

Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC)

Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea

Forja y Fundición

Documento BREF



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO



Comisión Europea

Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC)

Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea
Forja y Fundición

Documento BREF



2009

Título original en inglés: «*Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry*». Julio 2004

Traducción al español realizada por el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino

Colaboración en la Traducción:

Maite Rodríguez de la Federación Española de Asociaciones de Fundidores (FEAF)
Antton Meléndez y Leire Uribe de INASMET



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO

Secretaría General Técnica: Alicia Camacho García. **Subdirector General de Información al ciudadano, Documentación y Publicaciones:** José Abellán Gómez. **Director del Centro de Publicaciones:** Juan Carlos Palacios López. **Jefa del Servicio de Producción y Edición:** M^a Dolores López Hernández

Edita:

© Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones

Distribución y venta:

Paseo de la Infanta Isabel, 1
Teléfono: 91 347 55 51 - 91 347 55 41
Fax: 91 347 57 22

Plaza San Juan de la Cruz, s/n
Teléfono: 91 597 60 81
Fax: 91 597 66 01

Tienda virtual: www.marm.es
e-mail: centropublicaciones@marm.es

Maquetación, diseño, impresión y encuadernación:

Composiciones RALI, S.A.
Particular de Costa, 12-14, 7.^a - 48010 Bilbao

NIPO: 770-09-356-3

ISBN: 978-84-491-0976-8

Depósito legal: BI-919-2010

Catálogo General de Publicaciones Oficiales:

<http://www.060.es> (servicios en línea / oficina virtual / Publicaciones)

Datos técnicos: Formato: 21 × 29,7 cm. Caja de texto: 16,8 × 23,6 cm. Composición: una columna. Tipografía: Century Schoolbook a cuerpos 9,5, 10 y 12. Encuadernación: Rústica, cosido con hilo vegetal. Papel: interior en estucado mate reciclado de 115 g/m², 100% libre de cloro. Cubierta en cartulina gráfica de 300 g/m², reciclado 100% libre de cloro, plastificado mate 1/cara de cubierta. Tintas a 4/4.

Nota Introductoria

El 1 de julio de 2002 se aprobó la Ley 16/2002 de Prevención y Control Integrados de la Contaminación, que incorpora a nuestro ordenamiento jurídico la Directiva 96/61/CE.

La ley exige un enfoque integrado de la industria en su entorno y el conocimiento por parte de todos los implicados –industria, autoridades competentes y público en general de las Mejores Técnicas Disponibles (MTDs)–, con el fin de reflejar todos estos aspectos en la Autorización Ambiental Integrada que otorgan las CCAA.

Se establece, en el marco de la Unión Europea, un intercambio de información entre los Estados miembros y las industrias para la elección de estas MTDs que deben servir de referencia común para los Estados miembros a la hora de establecer el objetivo tecnológico de aplicación a las diferentes actividades.

A tal efecto, la Comisión Europea a través de la Oficina Europea de IPPC (European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau), ha organizado una serie de grupos de trabajo técnico que, por epígrafes y actividades, proponen a la Comisión Europea los Documentos de Referencia Europeos de las Mejores Técnicas Disponibles (BREFs).

Los BREF informarán a las autoridades competentes sobre qué es técnica y económicamente viable para cada sector industrial, en orden a mejorar sus actuaciones medioambientales y, consecuentemente, lograr la mejora del medio ambiente en su conjunto.

El grupo de Trabajo encargado de la valoración de las Mejoras Técnicas Disponibles en las industrias de Forja y Fundición comenzó sus trabajos en el año 2000 y el documento final fue aprobado por la Comisión en Mayo de 2005 «*Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry*». Está disponible en versión española en la página *web* del Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (<http://www.prtr-es.es>) y en versión inglesa, en la web de la Oficina Europea de IPPC: <http://ec.europa.eu/environment/air/pollutants/stationary/ippc/index.htm>. y en la pagina: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>

El Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino ha asumido la tarea, de acuerdo con los mandatos de la Directiva IPPC y de la Ley 16/2002, de llevar a cabo un correcto intercambio de información en materia de Mejores Técnicas Disponibles; este documento, en cumplimiento de las exigencias legales, obedece a una serie de traducciones emprendidas por el Ministerio de Medio Ambiente sobre documentos BREF europeos.

Se pretende dar un paso más en la adecuación progresiva de la industria española a los principios de la Ley 16/2002, cuya aplicación efectiva debe conducir a una mejora del comportamiento ambiental de las instalaciones afectadas, que las haga plenamente respetuosas con el medio ambiente.

Resumen Ejecutivo

El presente documento de referencia (en adelante BREF) sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) en forja y fundición refleja el intercambio de información propiciado por el artículo 16(2) de la Directiva del Consejo 96/61/CE. Este resumen ejecutivo se ha ideado para leerse junto con el prefacio del BREF, en el que se explican la estructura del documento, sus objetivos, su empleo y las consideraciones legales. En el resumen también se describen los resultados y las conclusiones sobre las MTD principales y los niveles asociados de emisión y consumo. Puede leerse e interpretarse como un único documento separado, con la salvedad de que, al tratarse de un resumen, no presenta la complejidad del texto íntegro del BREF. Por ello no debería considerarse un sustituto del documento completo a la hora de adoptar decisiones sobre las MTD.

Objetivos del BREF

Este documento refleja el intercambio de información entorno a las actividades tratadas en el anexo I, categorías 2.3 (b), 2.4 y 2.5 (b) de la Directiva IPPC, es decir:

«2.3. Instalaciones para la transformación de metales férreos:

- b) Forjado con martillos cuya energía de impacto sea superior a 50 kilojulios por martillo y cuando la potencia térmica utilizada sea superior a 20 MW.

2.4. Fundiciones de metales férreos con una capacidad de producción de más de 20 toneladas por día.

2.5. Instalaciones

- b) Para la fusión de metales no férreos, incluidos aleación o productos de recuperación (refino moldeado) con una capacidad de fusión de más de 4 toneladas para el plomo y el cadmio o 20 toneladas para todos los demás metales, por día.»

Tras comparar las anteriores descripciones con las capacidades reales de las instalaciones existentes en Europa, el grupo de trabajo técnico (GTT) estableció un objetivo de trabajo centrado en los siguientes aspectos:

- fundición de metales férreos, por ejemplo hierro colado laminar, hierro maleable y nodular, acero;
- fundición de metales no férreos, por ejemplo aluminio, magnesio, cobre, zinc, plomo y sus aleaciones.

La forja se ha excluido de entre los objetivos de este documento, ya que ninguna instalación de forja europea cumplía las condiciones estipuladas en el anexo I 2.3.(b). Así pues, el presente documento sólo trata de la transformación en las fundiciones. Las fundiciones dedicadas al cadmio, titanio o metales preciosos se han excluido asimismo por una cuestión también de capacidad. La colada continua (en forma de chapas y planchas) ya se ha tratado en los documentos BREF relativos a la producción de hierro y acero, así como a las industrias de metales no férreos, por lo que no se considerarán en el presente documento. Al tratar de metales no férreos, pues, se considerará que el proceso se inicia en el momento de fundir los lingotes y la chatarra interna o con el metal líquido.

Desde el punto de vista del proceso de fundición, el documento abarca los siguientes pasos:

- confección de modelos
- almacenamiento y manipulación de materias primas
- fusión y tratamiento del metal
- producción de moldes y machos, técnicas de moldeo
- colado o llenado y enfriamiento
- desmoldeo
- acabado
- tratamiento térmico.

La industria de la fundición

Las fundiciones funden metales férreos, no férreos y aleaciones y le dan forma definitiva o casi definitiva a los productos a través de la colada y la solidificación de metales fundidos o aleaciones en un molde. Se trata de un sector industrial diferenciado y diversificado que se compone de instalaciones de muy diverso tipo y tamaño; cada una de ellas presenta una combinación de tecnologías y operaciones unitarias propias, adaptadas al flujo de entrada, el tamaño de las series y los tipos de productos elaborados por las instalaciones específicas. La organización en el sector se basa en el tipo de material transformado, siendo la principal distinción entre industrias de fundición férrea y no férrea. Puesto que las piezas fundidas son productos semielaborados, las fundiciones suelen estar ubicadas cerca de sus clientes.

La industria europea de la fundición es la tercera más importante del mundo, en lo que a metales férreos se refiere, y la segunda en el caso de los no férreos. La producción total de la Europa ampliada se sitúa en 11,7 millones de toneladas de fundición férrea y 2,8 millones de toneladas de fundición no férrea. Alemania, Francia e Italia son los tres principales productores europeos, con una producción anual total de más de dos millones de toneladas cada uno. En los últimos años España ha arrebatado el cuarto puesto al Reino Unido, aunque ambos superan el millón de toneladas de producción. Los cinco productores principales aportan en conjunto más del 80% del total producido en Europa. Si bien el nivel de producción se ha mantenido relativamente estable en los últimos años, el número total de fundiciones ha experimentado un retroceso (el total ronda actualmente las 3.000), un fenómeno que se ve reflejado en las cifras de empleo (que actualmente se sitúan alrededor de los 260.000 trabajadores). Ello se debe a la progresiva mejora y automatización de las unidades de fundición. A pesar de todo, la industria de la fundición sigue siendo un sector en el que predominan las PYMEs, como demuestra que el 80% de las empresas tengan menos de 250 empleados.

Los principales mercados abastecidos por la industria de la fundición son el de la automoción (50% de la cuota de mercado), la ingeniería general (30%) y la construcción (10%). La creciente tendencia del mercado de la automoción hacia vehículos más ligeros se ha traducido en el crecimiento del mercado de moldeo del aluminio y el magnesio. Mientras que la mayoría de productos de hierro van destinados a la automoción (es decir, >60%), el acero suele ir dirigido a los mercados de la construcción, maquinaria y producción de válvulas.

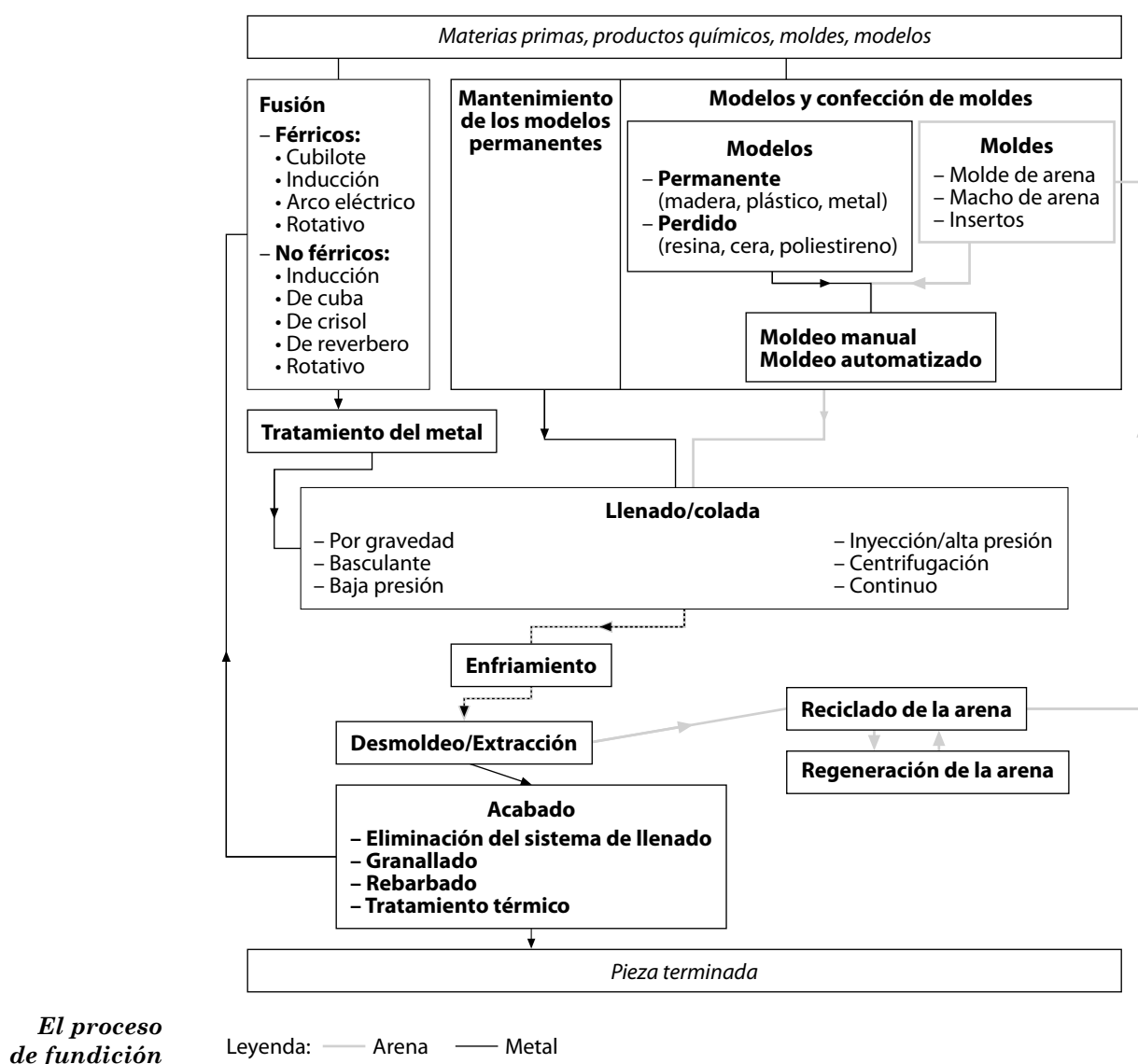
Proceso de fundición

En la siguiente figura puede observarse un diagrama de flujo general del proceso de fundición, dividido en las principales etapas:

- fusión y tratamiento del metal: área de fundición;
- preparación de moldes y machos: área de moldeo;
- llenado del molde en el molde, enfriamiento y solidificación y posterior desmoldeo: área de colada;
- acabado de la pieza fundida: área de acabado.

En función del tipo de metal, el tamaño de la serie y el tipo de producto existen varios procesos alternativos. Normalmente, la principal división del sector se basa en el tipo de metal (férreo o no férreo) y el tipo de moldeo utilizado (moldes perdidos o permanentes). Aunque es posible cualquier combinación, normalmente las fundiciones de metales férreos suelen utilizar moldes perdidos (por ejemplo, moldes de arena) y, las de metales no férreos, permanentes (por ejemplo, moldeo a presión). Cada uno de estos procesos básicos puede implicar una serie de técnicas que varían en función del tipo de horno utilizado, el sistema de moldeo y de producción de machos (arenas verdes o distintos aglomerantes químicos), así como el sistema de colada y las técnicas de acabado empleadas. Todos ellos tienen sus propias características técnicas, económicas y medioambientales, además de ventajas y desventajas.

Los capítulos 2, 3 y 4 de este documento siguen una aproximación basada en el flujo de procesos para describir las distintas operaciones, desde la elaboración de moldes hasta el acabado y el tratamiento térmico. En ellos se describen las técnicas utilizadas, los niveles de emisión y consumo que conllevan y las técnicas para minimizar el impacto medioambiental. El capítulo 5 se estructura sobre la distinción entre tipos de metal y tipos de moldeo.



Aspectos medioambientales clave

La industria de la fundición tiene una importancia capital en el reciclado de metales. La chatarra de acero, hierro y aluminio se funde nuevamente y da lugar a nuevos productos. Desde el punto de vista de las consecuencias medioambientales, los procedimientos más negativos que tienen lugar en las fundiciones son aquellos de carácter térmico o que emplean aditivos minerales. Así pues, las principales amenazas para el entorno son las relativas a los gases de salida y residuales y a la reutilización o eliminación de residuos minerales.

Las emisiones a la atmósfera son la principal preocupación medioambiental. La transformación genera partículas de origen metálico, compuestos acidificantes, productos de combustión incompleta y carbono orgánico volátil. Las partículas de polvo son realmente problemáticas, ya que se generan en todas las etapas del proceso y adoptan distintas composiciones y tipos. Se genera polvo durante la fusión, el moldeo en arena, la colada y el acabado, y ese polvo producido puede contener metales y óxidos metálicos.

La utilización de coque como combustible o el calentamiento de crisoles u hornos mediante quemadores de gas o de petróleo pueden provocar la emisión de productos de la combustión como NO_x y SO_2 . Por otro lado, el empleo de coque y la presencia de impurezas (por ejemplo, aceite, pintura, etc.) en la chatarra pueden

llegar a producir productos de combustión incompleta o recombinaciones (como por ejemplo PCDD/F), además de polvo.

Al confeccionar los moldes y machos se emplean varios aditivos para aglomerar la arena. Y al aglomerarla y colar el metal se generan productos de reacción y descomposición, entre ellos compuestos inorgánicos y orgánicos (aminas, COV). Los productos de descomposición (principalmente COV) siguen generándose durante los procesos de enfriamiento y desmoldeo y productos pueden provocar, además, malos olores.

Durante el proceso de fundición las emisiones a la atmósfera no se limitan a un único punto o puntos fijos. Las fuentes de emisión son varias (por ejemplo, coladas calientes, arena, metales calientes). Por ello, una de las cuestiones cruciales en la prevención de las emisiones es, además de tratar los gases de salida, lograr capturarlos.

El moldeo en arena supone el empleo de grandes volúmenes de arena, con una relación arena/metal líquido situada normalmente entre 1:1 y 20:1. La arena utilizada puede regenerarse, reciclarse, reutilizarse o desecharse. En la fase de fusión se generan residuos minerales adicionales por extracción de impurezas de la fundición, como son la escoria y el dross, los cuales pueden tanto reutilizarse como eliminarse.

Dado que las fundiciones utilizan procesos térmicos, la eficiencia energética y la gestión del calor generado son aspectos medioambientales importantes. A pesar de todo, a causa del elevado grado de transporte y manipulación del elemento destinatario de esa energía (es decir, el metal) y de su lento enfriamiento, la recuperación de este calor no siempre es sencilla.

Las fundiciones también presentan un elevado consumo de agua, por ejemplo, para el enfriamiento y temple. En la mayoría de ellas, la gestión del agua implica la existencia de un circuito interno por el que se evapora la mayor parte. El agua suele utilizarse en los sistemas de enfriamiento de hornos eléctricos (de inducción o de arco) o de cubilotes. Por lo general, el volumen final de agua residual es muy pequeño. Sin embargo, si se utilizan técnicas de eliminación de partículas por vía húmeda, el agua generada requiere atención especial. En el llenado por (alta) presión se forma una corriente de agua residual que debe tratarse para eliminar los compuestos orgánicos (fenol, petróleo) antes de su vertido.

Niveles de consumo y emisión

En la siguiente figura se presenta una descripción general de las entradas y salidas del proceso de fundición. La etapa de «fabricación» que aparece en el centro también engloba todos los procedimientos necesarios. Las entradas principales son el metal, la energía, los aglomerantes y el agua. Las emisiones clave son las partículas, las aminas y los COV, además del SO₂, las dioxinas y los NO_x para determinados tipos de hornos.

En la etapa de fusión se utiliza entre el 40 y el 60% de la energía de entrada. En determinados tipos de metal, el empleo de energía depende del tipo de horno en cuestión. Las energías de fusión se sitúan entre 500 y 1.200 kWh/t de carga metálica para los materiales férreos y entre 400 y 1.200 kWh/t de carga metálica para el aluminio.

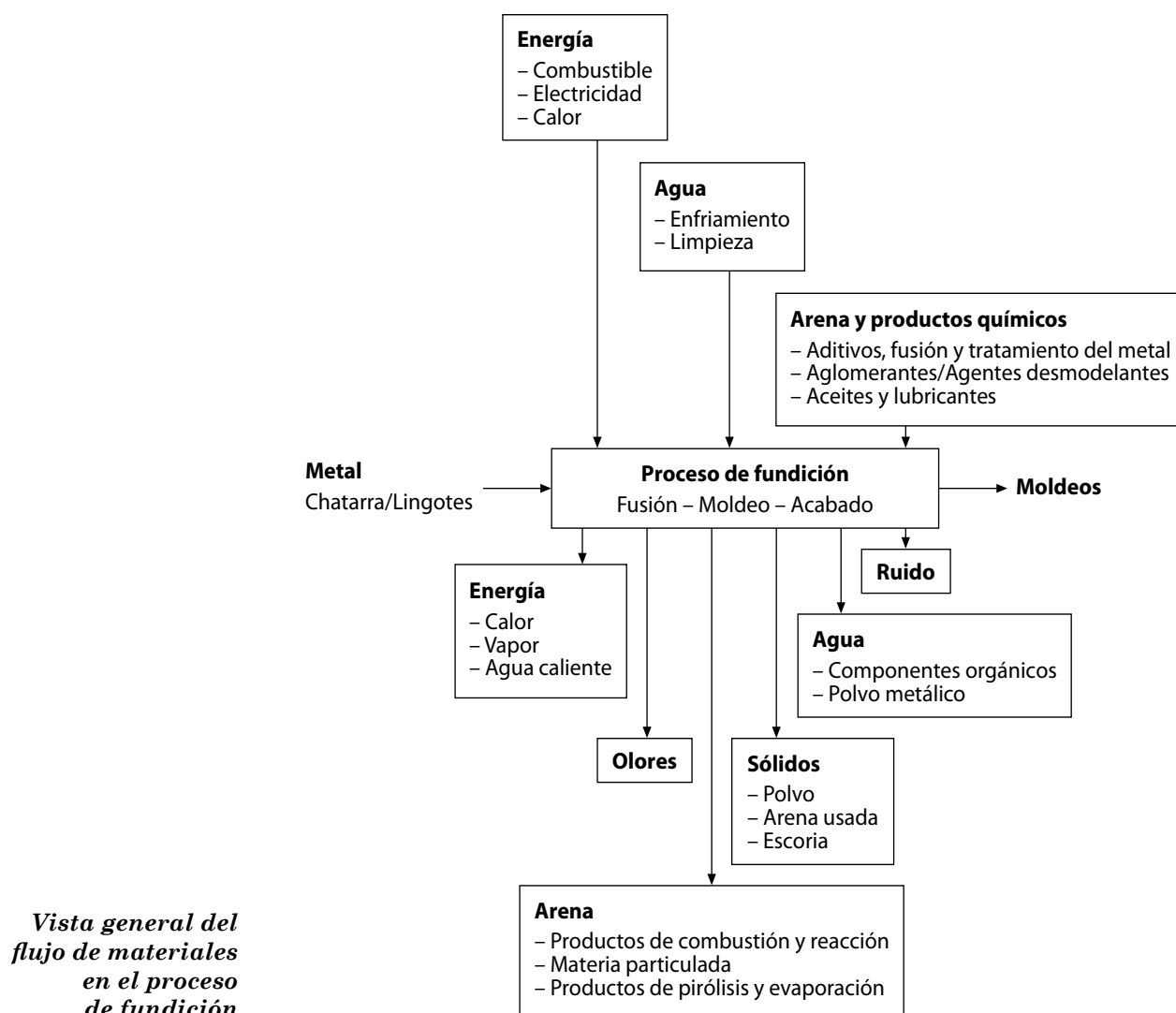
Las cantidades y tipos de aglomerantes, productos químicos y arena empleadas dependen en gran medida del tipo de moldeo, sobre todo de su forma y tamaño, aunque también del tamaño de las series fabricadas.

El consumo de agua depende básicamente del tipo de horno empleado, del sistema de depuración de gases de combustión aplicado y del método de colada utilizado.

En cada etapa del proceso se generan partículas, aunque con diferentes concentraciones de óxidos minerales, metales y óxidos metálicos. Los niveles de partículas durante la fusión del metal se encuentran en rangos inferiores al límite de detección (en ciertos metales no férreos) y valores superiores a 10 kg/tonelada en el caso de la fusión de hierro en cubilotes. La gran cantidad de arena empleada en el desmoldeo con molde perdido genera emisiones de partículas durante las distintas etapas de moldeo.

Las aminas se utilizan como aceleradores en la elaboración de machos, lo que origina emisiones propias generadas en las disparadoras de machos y emisiones difusas procedentes de la manipulación de los mismos.

La emisión de compuestos orgánicos volátiles (principalmente disolventes, BTEX y, en menor medida, fenol, formaldehído, etc.) se produce por el uso de, por ejemplo, resinas, disolventes orgánicos o recubrimientos de tipo orgánico empleados en el moldeo y en la elaboración de machos. Los compuestos orgánicos se descomponen térmicamente durante la colada del metal y vuelven a surgir durante las fases de desmoldeo y enfriamiento. En este documento se presentan niveles de emisiones con valores situados entre 0,1 y 1,5 kg/tonelada de colada.



Técnicas a tener en cuenta para determinar las MTD

La minimización de las emisiones, el uso eficiente de las materias primas y la energía, el uso óptimo de los procesos químicos, la recuperación y el reciclaje de los residuos y la sustitución de sustancias nocivas son cuestiones importantes señaladas por la Directiva IPPC. Por lo que respecta a las fundiciones, las principales consideraciones son las emisiones a la atmósfera, el empleo eficiente de materias primas y energía y la reducción de desechos, además de los sistemas de reciclado y reutilización empleados.

Los aspectos medioambientales antes señalados se atajan mediante diversas técnicas integradas en los procesos o mediante las denominadas técnicas 'end-of-pipe' (situadas al final del proceso). En este documento se presentan más de 100 técnicas de control y prevención de la contaminación, ordenadas en los doce epígrafes siguientes, basados principalmente en el flujo de procesos:

1. *Almacenamiento y manipulación de materias primas*: El almacenamiento de materiales y las técnicas de manipulación intentan evitar la contaminación del suelo y el agua y optimizar el reciclaje interno de chatarra.
2. *Fusión y tratamiento del metal fundido*: Pueden considerarse, para cada tipo de horno, varias técnicas de optimización de la eficiencia y minimización de la producción de residuos. Se trata principalmente de medidas integradas en el proceso. Las consideraciones medioambientales se aplican también en la selección del tipo de horno. Especial atención merece la limpieza en la fundición del aluminio y la fusión del magnesio, dado el gran potencial contaminante de los productos que se han venido utilizando hasta hace poco (HCE y SF_6).
3. *Producción de moldes y machos, incluyendo la etapa de preparación de la arena*: Se pueden aplicar técnicas y medidas de mejores prácticas para minimizar el consumo en cada tipo de sistema aglomerante y en las sustancias utilizadas para desmoldear los llenados por inyección. Para la reducción de las emisiones de COV y olores generados por los sistemas de molde perdido pueden emplearse recubrimientos de agua y disolventes inorgánicos. Aunque los recubrimientos de agua se utilizan ampliamente, la aplicación de disolventes inorgánicos en la producción de machos es todavía limitada. Otra aproximación consistiría en el uso de distintos métodos de moldeo. Sin embargo, estas técnicas sólo se emplean en contextos muy delimitados.
4. *Colada del caldo*: Para mejorar la eficiencia del proceso de colada se podrían tener en cuenta algunas medidas destinadas a incrementar el rendimiento del metal (es decir, la proporción de caldo frente a pieza terminada).
5. *Captura y tratamiento de humos y gases de combustión y de salida*: Hacer frente a las emisiones a la atmósfera en las distintas etapas de fundición requiere la implantación de un sistema apropiado de captura y tratamiento. En función de la operación unitaria pueden estudiarse varias técnicas, que varían según el tipo de compuestos emitidos, el volumen de gas residual y la facilidad de captación del mismo. Las técnicas utilizadas para capturar los gases residuales son de gran importancia a la hora de reducir las emisiones fugitivas; por lo que respecta a este tipo de emisiones, también pueden tenerse en cuenta medidas de mejores prácticas.
6. *Prevención y tratamiento de aguas residuales*: En muchos casos se puede evitar o minimizar la generación de aguas residuales empleando una serie de medidas integradas en el proceso. Las aguas residuales que no puedan evitarse contendrán partículas minerales o metálicas, aminas, sulfatos, aceite o lubricantes, dependiendo de la fuente de la que procedan. Las técnicas de tratamiento aplicables difieren según el tipo de compuesto.
7. *Eficiencia energética*: La fusión consume entre el 40 y el 60% del total de energía aportada en una fundición. Por ello, las medidas de ahorro energético deben aplicarse tanto al proceso de fusión como a los demás procesos (por ejemplo, compresión del aire, arranques de la planta, hidráulica) existentes. La necesidad de refrigerar el horno y el gas residual genera una corriente de agua o aire caliente que abre la posibilidad de dar uso, interno o externo, al calor.
8. *Arena: regeneración, reciclaje, reutilización y eliminación*: Puesto que las fundiciones emplean grandes cantidades de arena, una de las principales materias primas inertes, su regeneración o reutilización adquiere gran importancia en el ámbito medioambiental. Para regenerar la arena se utilizan varias técnicas (por ejemplo, tratamiento y posterior reutilización nuevamente como molde), cuya elección depende del tipo de aglomerante y de la composición del flujo de arena. Si la arena no se regenera internamente puede plantearse su reutilización externa para así evitar tener que desecharla. Se ha demostrado que la arena tiene varias aplicaciones.
9. *Polvo y residuos sólidos: tratamiento y reutilización*: Las técnicas empleadas en el proceso y las medidas operativas son aspectos que hay que tener en cuenta de cara a la minimización del polvo y los residuos. Al polvo recogido, la escoria y otros residuos sólidos se les puede dar nuevos usos internos o externos.
10. *Minimización de ruido*: Son varias las actividades desarrolladas en las fundiciones que generan ruido. Las instalaciones que se encuentran cerca de zonas habitadas pueden provocar molestias a las personas. Así pues, también puede considerarse la preparación e implementación de un plan de minimización del ruido, centrado tanto en medidas generales como adaptadas a la fuente que lo origina.
11. *Desmantelamiento*: La Directiva IPPC reclama la atención sobre la posible contaminación originada durante el desmantelamiento de las instalaciones, una etapa en la que las fundiciones presentan riesgo de

contaminación del suelo. Existen algunas medidas generales de amplio espectro, no limitadas a las fundiciones, que podrían tomarse en consideración.

12. *Herramientas de gestión medioambiental*: Los sistemas de gestión medioambiental son una herramienta útil en la prevención de la contaminación procedente de las actividades industriales en general. Por ello son una de las partes básicas de cualquier BREF.

MTD para fundiciones

El capítulo 5, dedicado a las MTD, señala las técnicas que el TWG ha considerado MTD, en un sentido general, para la industria de la fundición, basándose en la información del capítulo 4 y en especial en la definición del artículo 2(11) de las «mejores técnicas disponibles» y las consideraciones detalladas en el anexo IV de la Directiva. El capítulo dedicado a las MTD no establece ni propone límites a las emisiones; se limita a sugerir algunos niveles asociados al uso de las MTD.

Durante el intercambio de información por parte del TMG se presentaron y debatieron numerosas cuestiones. Este sumario recoge algunas de las más significativas. Los siguientes párrafos resumen las principales conclusiones sobre MTD relativas a los retos medioambientales más importantes.

Los elementos de las MTD deberán adaptarse a cada tipo de fundición. Una fundición consiste básicamente en un taller de fusión y uno de colada, ambos con su propia cadena de suministro. En el caso del moldeo perdido, la cadena de suministro incluye todas las actividades relativas al moldeo y la producción de machos. En el capítulo dedicado a las MTD se distingue entre la fusión de metales férreos y no férreos, y en el moldeo, entre moldes permanentes o perdidos. Cualquier fundición puede clasificarse teniendo en cuenta el tipo de fusión y los sistemas de moldeo asociados, para los que se describen MTD específicas. También se presentan MTD genéricas aplicables a cualquier fundición.

MTD genéricas

Algunos elementos de las MTD son genéricos y se aplican a todas las fundiciones, sin que importen los procesos utilizados o el tipo de productos obtenidos. Se refieren a flujos de material, acabado de coladas, ruido, aguas residuales, gestión medioambiental y desmantelamiento.

Las MTD buscan optimizar la gestión y el control de los flujos internos con el fin de prevenir la contaminación y el deterioro, proporcionar una buena calidad de entrada, permitir el reciclaje y la reutilización y mejorar la eficiencia del proceso. El BREF trata del almacenamiento y la manipulación tratados en el documento BREF dedicado al almacenamiento, pero añade al respecto algunas MTD específicas de las fundiciones, por ejemplo el almacenamiento de la chatarra sobre superficies impermeables con sistema de recogida y drenaje (si bien la construcción de un tejado puede suplir en parte este sistema), el almacenamiento por separado de los materiales de entrada y los residuos, el uso de contenedores reciclables, la optimización del rendimiento del metal y medidas de mejores prácticas para la transferencia del metal fundido y la manipulación de las cucharas.

Se proponen MTD para las técnicas de acabado que generan polvo y para las técnicas de tratamiento térmico. En cuanto a los cortes abrasivos, el granallado y el rebabado, las MTD van dirigidas a la recogida y el tratamiento del gas residual utilizado en el acabado mediante un sistema seco o húmedo. Las MTD también promueven tratamientos térmicos con combustibles limpios (es decir, gas natural, o combustibles con bajo contenido de azufre), el funcionamiento automatizado de los hornos y del sistema de control de quemadores/calentadores o la captura de gases de salida procedentes de los hornos de tratamiento térmico.

Respecto a la minimización del ruido, las MTD consisten en desarrollar y poner en práctica una estrategia de reducción del ruido con medidas generales y específicamente centradas en el origen, como por ejemplo el uso de sistemas de separación para las operaciones unitarias que más ruido generan, como el desmoldeo, además de la utilización de medidas adicionales en función de las condiciones locales.

Las MTD que tratan la gestión de aguas residuales se centran en la prevención, la separación de los distintos tipos de aguas residuales, la maximización del reciclaje interno y la aplicación de tratamientos adecuados al flujo final. Para ello se proponen emplear, por ejemplo, interceptores de aceite o sistemas de filtrado y sedimentación.

Las emisiones fugitivas tienen su origen en fuentes no confinadas (transferencias, almacenamientos, derrames) o en la parte de las confinadas que por escapar no se puede gestionar. En este caso las MTD fomentan la aplicación de un conjunto de medidas sobre la manipulación y el transporte de las materias y la optimización de la captura y depuración de gases de salida mediante la utilización de una o más técnicas. Se da preferencia a la captura de los humos lo más cerca posible de la fuente que los origina.

Las MTD también suponen la implementación y adhesión a un sistema de gestión medioambiental (SGA) que incluya medidas adaptadas a las circunstancias concretas, como por ejemplo el compromiso por parte de la dirección, la planificación, el establecimiento e implantación de procedimientos o la comprobación del comportamiento, con acciones correctivas y revisiones incluidas.

Las MTD consisten asimismo en poner en práctica todas las medidas necesarias para prevenir posibles contaminaciones durante el desmantelamiento. Entre ellas destacan la minimización de riesgos en la fase de diseño, la implementación de un programa de mejoras dirigido a las instalaciones existentes y el desarrollo y seguimiento de un plan de cierre de instalaciones que prevea tanto las instalaciones nuevas como las existentes. Dichas medidas deben estar dirigidas, al menos, a las siguientes partes del proceso: depósitos, contenedores, tuberías, aislantes, balsas y vertederos.

Fundición de metal férreo

En cuanto al funcionamiento de los cubilotes, las MTD incluyen técnicas que mejoran la eficiencia, como el uso de hornos de doble fila de toberas, enriquecimiento del oxígeno, soplado continuo o funcionamiento de larga duración, aplicación de mejores prácticas durante la fusión y control de la calidad del coque. También se consideran MTD la captura, enfriamiento y depuración de partículas del gas residual y la aplicación de la postcombustión y la recuperación del calor en determinadas condiciones. Varios de los sistemas utilizados para eliminar partículas de la corriente gaseosa se consideran MTD, si bien es preferible la depuración húmeda de partículas cuando se funde con escoria básica y, en algunos casos, como una de las medidas destinadas a prevenir y minimizar la emisión de dioxinas y furanos. La industria ha expresado sus dudas sobre la implantación de medidas secundarias para atajar las dioxinas y los furanos que sólo se han verificado en otros sectores y, en particular, sobre su aplicación a las fundiciones más pequeñas. En el caso de los cubilotes, las MTD para la gestión de residuos son la minimización de la formación de escoria, el tratamiento previo de la escoria que permita su reutilización externa y la recogida y reciclaje de menudo de coque (el vulgarmente denominado coquillo).

Con respecto al funcionamiento de los hornos eléctricos de arco, las MTD incluyen procesos fiables y eficientes destinados a acortar el tiempo de fusión y tratamiento a través de la utilización de escoria esponjosa, captura eficiente y enfriamiento de los gases residuales del horno y a través de la depuración de partículas mediante un filtro de mangas. En este caso, las MTD consisten en reciclar el polvo filtrado en el horno de arco.

Las MTD correspondientes a los hornos de inducción establecen la necesidad de fundir chatarra limpia; utilizar medidas de buenas prácticas en los procedimientos de carga y en el funcionamiento; utilizar potencia de frecuencia media y, al instalar un nuevo horno, cambiar la frecuencia de cualquier horno que funcione con corriente principal a frecuencia media; evaluar la posibilidad de recuperar el calor de los residuos y, en determinadas condiciones, implantar un sistema de recuperación de calor. En cuanto a la captura y tratamiento de los gases de salida en los hornos de inducción, las MTD consisten en emplear una campana o una cubierta extractora en cada horno para capturar los gases residuales y maximizar la recogida de los mismos a lo largo del ciclo completo de trabajo; utilizar gas de combustión seco para la limpieza y lograr mantener las emisiones de polvo por debajo de 0,2 kg/tonelada de hierro fundido.

En los hornos rotativos, las MTD serían implantar un conjunto de medidas destinadas a optimizar el rendimiento del horno y utilizar un quemador de oxigás. También capturar el gas residual cerca de la salida del horno, emplear postcombustión, enfriar mediante un intercambiador de calor y posteriormente utilizar un

sistema seco de extracción de partículas. De cara a la prevención y la minimización de las emisiones de dioxinas y furanos, las MTD establecen el uso combinado de diversas medidas. De forma parecida a lo que ha sucedido con los cubilotes, la industria ha expresado dudas sobre la implantación de medidas secundarias para atajar las dioxinas y de técnicas que sólo se han verificado en otros sectores y, en particular, sobre su aplicación a las fundiciones más pequeñas.

El tratamiento aplicado actualmente al metal depende del tipo de producto que se elabore. Las MTD consisten en recoger el gas de salida de los convertidores AOD mediante una campana o canopy y recoger y tratar el gas residual procedente de la nodulización mediante un filtro de mangas. Las MTD también incluyen lograr que el polvo de MgO pueda reciclarse.

Fundición de metal no férreo

Por lo que respecta al funcionamiento de los hornos de inducción para el fundido de aluminio, cobre, plomo y zinc, la MTD consiste en seguir medidas propias de mejores prácticas para los procesos de carga y funcionamiento, utilizar potencia de frecuencia media y, al instalar un nuevo horno, cambiar cualquier horno que funcione a la frecuencia de la corriente general a frecuencia media; evaluar la posibilidad de recuperar el calor residual y, en condiciones específicas, implantar un sistema de recuperación de calor. En cuanto a la captación de gases de salida procedentes del horno, las MTD aconsejan reducir al mínimo las emisiones y, en caso necesario, capturar los gases residuales, maximizando su recogida a lo largo del ciclo completo de trabajo, y poner en marcha un sistema seco de depuración de los gases de combustión.

Las MTD relativas a otros tipos de hornos se centran principalmente en la recogida eficiente de los gases residuales y/o la reducción de emisiones fugitivas.

Para el tratamiento de los metales no férreos las MTD establecen el empleo de un impulsor para la desgasificación y la limpieza del aluminio. Es MTD el empleo de SO_2 como gas de recubrimiento en el fundido del magnesio en instalaciones con una producción anual igual o superior a las 500 toneladas. De cara a las plantas pequeñas (<500 toneladas de Mg de producción anual), las MTD consisten en emplear SO_2 o bien minimizar el uso de SF_6 . Si se utiliza SF_6 , el nivel de consumo asociado a las MTD es inferior a 0,9 kg/tonelada de colada (en el caso de la colada en moldes de arena) e inferior a 1,5 kg/tonelada (inyección).

Molde perdido o de arena

Las coladas con molde perdido comprenden el moldeo, la producción de machos, el llenado, el enfriado y el desmoldeo. Estos procesos comportan la producción moldes de arena verde o aglomerada químicamente, además de machos de arena químicamente aglomerados. Las MTD hacen referencia a tres categorías de elementos: moldeo en arena verde, moldeo químico en arena y llenado/enfriamiento/desmoldeo.

En cuanto a la preparación de la arena verde, las MTD tratan de la captación y depuración de los gases de salida y el reciclaje interno o externo del polvo recogido. En línea con el objetivo de minimizar los residuos que se eliminan, las MTD señalan la necesidad de implantar una regeneración primaria de la arena verde, con unas proporciones de regeneración asociadas del 98% (arena única) o 90–94% (arena verde con machos incompatibles).

Por lo que respecta a la arena con aglomerante químico, las MTD propuestas abarcan diversas técnicas y tratan numerosas cuestiones medioambientales. Las MTD consisten en minimizar el empleo de aglomerante y resina, así como las pérdidas de arena y las emisiones de COV fugitivos capturando los gases emitidos al confeccionar y manipular los machos, y finalmente también utilizar recubrimientos con base de agua. El uso de recubrimientos de base alcohólica sólo es una MTD en determinados casos, por ejemplo cuando resulta imposible aplicar un recubrimiento de base acuosa. En este caso, los gases generados deberían capturarse, a ser posible, en la misma área de recubrimiento. Una MTD específica trata la producción de machos endurecidos por aminas y aglomerados mediante uretano (por ejemplo, caja fría) para minimizar las emisiones de aminas y optimizar su recuperación. En estos sistemas, tanto los disolventes aromáticos como los no aromáticos, se consideran MTD. Las MTD también buscan minimizar la cantidad de arena que se elimina, básicamente mediante la adopción de una estrategia de regeneración y/o la reutilización de arena

MTDs para forja y fundición

aglomerada químicamente (mezclada o arena única). Respecto a la regeneración, las condiciones de las MTD se enumeran en la siguiente tabla. La arena regenerada sólo puede reutilizarse en sistemas de arena compatibles.

MTD para la regeneración de la arena aglomerada químicamente (mezcla y arena única)

Tipo de arena	Técnica	Proporción de regeneración ¹ (%)
Arena única en frío	Regeneración mecánica simple	75 – 80
Arena única de silicatos	Tratamiento térmico y neumático	45 – 85
Arena única en cajas frías, SO ₂ , cajas calientes, en coquilla Arenas orgánicas mezcladas	Regeneración mecánica en frío o térmica	machos: 40 – 100 moldes: 90 – 100
Arenas mezcladas (verde y orgánica)	Tratamiento mecánico/térmico/ mecánico, rectificación o fricción neumática	machos: 40 – 100 moldes: 90 – 100

(1) masa de arena regenerada/masa total de arena utilizada.

Los métodos de moldeo alternativos y los aglomerantes inorgánicos tienen potencial para minimizar el impacto medioambiental de los procesos de moldeo y colado.

El llenado, el enfriamiento y el desmoldeo generan emisiones de polvo, COV y otros productos orgánicos. La MTD consiste en aislar las cadenas de colado y enfriamiento y extraer los gases de salida (en el caso de las cadenas en serie), y aislar asimismo el equipo de desmoldeo, además de tratar los gases de salida mediante sistemas secos o húmedos de extracción de partículas.

Molde permanente

A causa de las características diferenciadas del proceso, las cuestiones medioambientales derivadas de la colada en molde permanente requieren un enfoque distinto respecto a las de molde perdido, en las que el agua es un factor destacado. Las emisiones a la atmósfera adoptan forma de neblina de aceite en lugar de partículas polvo y productos de combustión como sucede en otros casos. Así pues, las MTD se centran en medidas de prevención que implican la minimización del consumo de agua y agentes desmoldeantes. Las MTD consisten en recoger y tratar el agua de escorrentía o procedente de fugas mediante interceptores de aceites y por destilación, evaporación en vacío o degradación biológica. Si las medidas de prevención destinadas a minimizar la neblina de aceite no permiten a la fundición alcanzar los niveles de emisión asociados a las MTD, éstas se centrarán en el empleo de campanas de extracción y precipitación electrostática para los productos de salida de máquinas MAP.

Las MTD para la preparación de la arena aglomerada químicamente coinciden con los elementos mencionados para el moldeo perdido. Las MTD para la gestión de la arena utilizada consisten en aislar la unidad de eliminación de machos y tratar los gases generados mediante sistemas secos o húmedos de extracción de partículas. Si existe un mercado local, las MTD se centrarán en conseguir que la arena procedente de la eliminación de los machos estuviera disponible para ser reciclada.

Niveles de emisión asociados a las MTD

Los siguientes niveles de emisión se asocian a las medidas contempladas por las MTD arriba citadas.

Emisiones a la atmósfera asociadas al uso de MTD en diversas actividades de las fundiciones

Actividad	Tipo	Parámetro	Nivel de emisión (mg/Nm ³)
Acabado de piezas		Polvo	5 – 20
Fusión de metales férreos	General	Polvo ⁽¹⁾	5 – 20
		PCDD/PCDF	≤0,1 ng TEQ/Nm ³
Fusión de metales férreos	Cubilote de viento caliente	CO	20 – 1.000
		SO ₂	20 – 100
		NO _x	10 – 200
	Cubilote de viento frío	SO ₂	100 – 400
		NO _x	20 – 70
		COV – NM	10 – 20
	Cubilote sin coque	NO _x	160 – 400
	Horno eléctrico de arco	NO _x	10 – 50
		CO	200
	Horno rotativo	SO ₂	70 – 130
		NO _x	50 – 250
		CO	20 – 30
Fusión de metales no férreos	General	Polvo	1 – 20
	Fusión de aluminio	Cloro	3
	Horno de cuba para Al	SO ₂	30 – 50
		NO _x	120
		CO	150
		COV	100 – 150
	Horno de solera para Al	SO ₂	15
		NO _x	50
		CO	5
		COT	5
Moldeo y colada en molde perdido o de arena	General	Polvo	5 – 20
	Macheríz	Aminas	5
	Unidades de regeneración	SO ₂	120
		NO _x	150
Colada en molde permanente	General	Polvo	5 – 20
		Neblina de aceite, medida como C total	5 – 10

(1) el nivel de emisiones de polvo depende de sus componentes, por ejemplo metales pesados y dioxinas, y su flujo másico.

Todos los niveles de emisión asociados se expresan como media a lo largo de un tiempo de medición factible. Cuando resulta practicable el seguimiento continuo se emplea un valor medio diario. Las emisiones a la atmósfera se basan en condiciones estándar, es decir 273 K, 101,3 kPa y gas seco.

Los documentos de referencia de MTD no establecen estándares legalmente vinculantes; están pensados para proporcionar información y servir de guía a la industria, los estados miembros y el público en general sobre los

niveles de consumo y emisiones que pueden lograrse al utilizar ciertas técnicas. Así pues, será necesario determinar los valores límite apropiados a cualquier caso tomando en consideración los objetivos de la Directiva IPPC y las consideraciones locales.

Técnicas emergentes

Actualmente siguen en fase de investigación y desarrollo, o simplemente acaban de introducirse en el mercado, nuevas técnicas de minimización del impacto medioambiental llamadas emergentes. En el capítulo 6 se tratan cinco de ellas: el uso de materiales de baja combustión para la fusión en cubilotes, el reciclaje del polvo de los filtros con carga metálica, la recuperación de aminas mediante la permeación del gas residual, la pulverización por separado del agente desmoldeante y el agua en las coladas por presión de aluminio y el uso de materiales aglomerantes inorgánicos en la producción de machos. Esta última técnica ha sido señalada por el GTT como prometedora, aunque la limitada escala de su aplicación e implantación actuales no permiten por el momento incorporarla como técnica a las MTD.

Conclusiones sobre el intercambio de información

Intercambio de información

El documento BREF aglutina más de 250 fuentes de información. Los institutos de investigación sobre la fundición proporcionaron buena parte de esa información y desempeñaron un papel activo en el intercambio de información. Las notas locales sobre MTD procedentes de diversos estados miembros sirvieron de base sólida para el intercambio. La mayoría de documentos proporcionados durante el intercambio trataban sobre procesos y técnicas tal y como se aplican en las fundiciones de metales férreos. A lo largo de toda la redacción del BREF los procesos de las fundiciones de metales no férreos han quedado subrepresentados; por este motivo, las conclusiones sobre las MTD para fundiciones de metales no férreos son menos detalladas.

Nivel de consenso

Se logró un buen nivel de consenso general sobre las conclusiones, sin que hubiera opiniones divergentes. Los representantes de la industria añadieron un comentario que expresaba sus dudas sobre la facilidad de implantación de medidas secundarias para la reducción de dioxinas.

Recomendaciones de cara a futuros trabajos

El intercambio de información y el resultado del mismo, o sea, este documento, representan un importante salto de cara a lograr el control y la prevención integrados de la contaminación dentro de la industria de la fundición. Los trabajos futuros pueden seguir esta línea si se centran en la recopilación y evaluación de la información que no se proporcionó durante el presente trabajo. En concreto, las iniciativas futuras deberían tratar en detalle las siguientes cuestiones:

- *Técnicas de reducción de COV*: Se necesitan datos e información sobre los métodos aplicados para la captura y tratamiento eficientes de los gases de salida procedentes de las fundiciones que contienen COV. El uso de aglomerantes y materiales de recubrimiento alternativos puede, en este sentido, convertirse en una medida de prevención importante.
- *Tratamiento de aguas residuales*: Se necesitan datos de un buen número de sistemas de tratamiento de agua utilizados en las fundiciones; en ellos se deberían constar los niveles de emisión respecto a la entrada y las técnicas de tratamiento aplicadas.
- *Fusión de metales no férreos*: En este documento sólo se citan datos correspondientes a fundiciones de metales no férreos en el caso de algunas instalaciones concretas. Se requiere más información tanto sobre emisiones controladas como fugitivas originadas por la fusión de metales no férreos en las fundiciones, basada en la práctica del día a día y expresada en forma de niveles de emisión y flujos de masa.

- *Datos económicos sobre las técnicas de las MTD*: Falta información económica sobre muchas de las técnicas presentadas en el capítulo 4. Esta información debería recopilarse a partir de proyectos de implementación de las mismas.

Temas sugeridos para futuros proyectos de I+D

El intercambio de información también ha puesto de relieve algunas áreas en las que podría lograrse mayor conocimiento útil a partir de proyectos de investigación y desarrollo. Se trata de las cuestiones siguientes:

- *Seguimiento y reducción de las dioxinas*: Hay que entender mejor la influencia de los parámetros del proceso por lo que respecta a la formación de dioxinas. Para ello se requiere un seguimiento de las emisiones en varias instalaciones y en condiciones diversas. Por otro lado, también es necesario investigar el uso y la efectividad de las medidas secundarias para la reducción de las dioxinas en la industria de la fundición.
- *Emisiones de mercurio*: La elevada volatilidad del mercurio puede provocar emisiones gaseosas, no relacionadas con el polvo. Con la vista puesta en la aplicación de una política europea sobre las emisiones de mercurio se hace necesario investigar las emisiones de mercurio en los procesos de fusión en general y, en particular, en las fundiciones (no férreas).
- *Quemadores de oxigás y su uso en cubilotes*: El TWG señaló la existencia de nuevas aplicaciones como resultado de las investigaciones en curso. En este caso, el objetivo de ulteriores investigaciones sería llevar esta técnica hasta un grado de desarrollo que permita su generalización.

Prefacio

1. Sobre el presente documento

A menos que se indique lo contrario, cualquier referencia a «la Directiva» en este documento alude a la Directiva del Consejo 96/61/CE sobre prevención y control integrados de la contaminación. Puesto que la Directiva es válida sin perjuicio de las disposiciones comunitarias en materia de salud y seguridad, también lo es el presente documento.

Este documento forma parte de una serie que presenta los resultados del intercambio de información entre los estados miembros de la UE y las industrias afectadas sobre las mejores técnicas disponibles (MTD) y el seguimiento y desarrollo que implican. *[Publicado por la Comisión Europea de conformidad con el artículo 16(2) de la Directiva, por lo que debe tomarse en consideración, de acuerdo con el anexo IV de la Directiva, a la hora de determinar las «mejores técnicas disponibles».]

* Nota: los corchetes se eliminarán cuando la Comisión haya completado el procedimiento de publicación.

2. Obligaciones legales relevantes de la Directiva IPPC y definición de MTD

Para ayudar al lector a entender el contexto en el que se redactó el presente documento, en el prefacio se incluyen algunas de las definiciones más relevantes de la Directiva IPPC, incluida la del término «mejores técnicas disponibles». Se trata de definiciones inevitablemente incompletas y de carácter únicamente informativo. No tienen validez legal y en ningún caso modifican o perjudican las disposiciones contenidas en la Directiva.

El objetivo de la Directiva es lograr el control y la prevención integrados de la contaminación generada por las actividades detalladas en el anexo I, con el fin de conseguir un alto grado de protección del medio ambiente en su conjunto. Los fundamentos legales de la Directiva se refieren a la protección medioambiental y su implantación debe tener en cuenta otros objetivos comunitarios, como por ejemplo la competitividad de la industria comunitaria en relación con el desarrollo sostenible.

Más concretamente, la Directiva establece un sistema de autorizaciones para determinadas categorías de instalaciones industriales que exigen que titulares y reguladores cuenten con una visión general y a la vez integral del potencial contaminante y de consumo de la instalación. El objetivo global de este planteamiento integrado es mejorar la gestión y el control de los procesos industriales con el fin de garantizar un elevado nivel general de protección medioambiental. Desde este punto de vista resulta esencial el principio general presentado en el artículo 3, según el cual los operarios han de adoptar todas las medidas preventivas frente a la contaminación, en particular a través de la aplicación de las MTD, para mejorar su rendimiento medioambiental.

El término «mejores técnicas disponibles» se define en el artículo 2(11) de la Directiva del modo siguiente: «La fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente.» El mismo artículo 2(11) prosigue con la definición del término:

- «técnicas»: la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada;
- «disponibles»: las técnicas desarrolladas a una escala que permita su aplicación en el contexto del sector industrial correspondiente, en condiciones económica y técnicamente viables, tomando en consideración los costes y los beneficios, tanto si las técnicas se utilizan o producen en el Estado miembro correspondiente como si no, siempre que el titular pueda tener acceso a ellas en condiciones razonables;
- «mejores»: las técnicas más eficaces para alcanzar un alto nivel general de protección del medio ambiente en su conjunto.

En el anexo IV de la Directiva se detalla una lista de los «Aspectos que deben tenerse en cuenta con carácter general o en un supuesto particular cuando se determinen las mejores técnicas disponibles (...), teniendo en cuenta los costes y ventajas que pueden derivarse de una acción y los principios de precaución y prevención». Estos aspectos incluyen la información publicada por la Comisión de conformidad con el artículo 16(2).

Las autoridades competentes responsables de la concesión de autorizaciones deberán tener en cuenta los principios generales establecidos en el artículo 3 al determinar las condiciones de los permisos. Estas condiciones deben incluir valores límite para las emisiones, que serán completados (o sustituidos), según corresponda, por parámetros equivalentes o medidas técnicas. De acuerdo con el artículo 9(4) de la Directiva, los límites a las emisiones han de basarse en las MTD, sin perjuicio del cumplimiento de las exigencias de calidad medioambiental, sin que se prescriba el uso de ninguna técnica o tecnología específica, aunque teniendo en cuenta las características técnicas de las instalaciones en cuestión, su localización geográfica y las condiciones medioambientales locales. En todos los casos, las condiciones de la autorización deben incluir disposiciones sobre la minimización de la contaminación a larga distancia o transfronteriza y deben garantizar un alto grado de protección medioambiental general.

Los Estados miembros tienen la obligación, según el artículo 11 de la Directiva, de garantizar que las autoridades competentes realicen un seguimiento de los avances de las MTD o estén informadas al respecto.

3. Objetivo de este documento

El artículo 16(2) de la Directiva exige que la Comisión organice «un intercambio de información entre los Estados miembros y las industrias correspondientes acerca de las mejores técnicas disponibles, las prescripciones de control relacionadas, y su evolución. La Comisión publicará cada tres años los resultados de los intercambios de información.»

El objetivo de intercambio de información se establece de acuerdo con el considerando 25 de la Directiva, donde se indica que «los avances y el intercambio de información en la Comunidad sobre las mejores técnicas disponibles contribuirán a reducir los desequilibrios tecnológicos en el ámbito de la Comunidad, ayudarán a la divulgación mundial de los valores límite establecidos y de las técnicas empleadas en la Comunidad y, asimismo, ayudarán a los Estados miembros para la aplicación eficaz de la presente Directiva.»

La Comisión (DG de Medio Ambiente) estableció un foro de intercambio de información (IEF, *Information Exchange Forum*) para contribuir a la realización de los trabajos previstos en el artículo 16(2) y propició la creación de diversos grupos de trabajo técnicos (TWG) en el marco del IEF. Tanto este foro como los grupos de trabajo técnicos cuentan con representantes de los Estados miembros y la industria, uno de los requisitos que establece el artículo 16(2).

El objetivo de esta serie de documentos es reflejar con precisión el intercambio de información, tal y como requiere el artículo 16(2), y proporcionar información de referencia a las autoridades responsables de la concesión de autorizaciones para que la tengan en cuenta en el momento de determinar las condiciones de la autorización. Estos documentos aportan información relevante sobre las mejores técnicas disponibles, por lo que deberían convertirse en herramientas útiles para potenciar el rendimiento medioambiental.

4. Fuentes de información

El presente documento es un resumen de la información recopilada de varias fuentes, entre ellas, en especial, la opinión del grupo de expertos creado para ayudar a la Comisión en la tarea encomendada, y ha sido verificada por los servicios de la Comisión. Se agradecen profundamente todas las contribuciones.

5. Cómo interpretar y utilizar este documento

La información que aporta este documento está pensada para utilizarse como referencia inicial a la hora de determinar las MTD para casos concretos. Al establecer las MTD y las condiciones de autorización basadas en

las mismas hay que tener siempre en cuenta el objetivo general: lograr un elevado nivel de protección del medio ambiente en su conjunto.

El resto de esta sección describe qué tipo de información aporta cada capítulo del documento.

Los capítulos 1 y 2 proporcionan información general sobre el sector industrial afectado y sobre los procesos industriales que en él tienen lugar.

El capítulo 3 aporta datos e información sobre los niveles actuales de consumo y emisiones y refleja la situación de las instalaciones existentes en el momento de su redacción.

El capítulo 4 describe en detalle la reducción de emisiones y otras técnicas consideradas de gran importancia para determinar las MTD y las condiciones de las autorizaciones basadas en éstas. Aporta información sobre los niveles de consumo y emisiones considerados alcanzables en aplicación de la técnica, una estimación general de los costes y enumera posibles problemas colaterales asociados a la técnica; además, analiza hasta qué punto es aplicable la técnica teniendo en cuenta la variedad de instalaciones que requieren autorizaciones IPPC (por ejemplo, nuevas instalaciones, ya existentes, grandes o pequeñas). No se han incluido las técnicas que, por lo general, se consideran obsoletas.

El capítulo 5 describe las técnicas y los niveles de emisión y consumo considerados compatibles con las MTD de forma genérica. Su objetivo es proporcionar indicaciones generales sobre los niveles de emisión y consumo que se consideran un buen punto de referencia para ayudar a determinar las condiciones de autorización basadas en las MTD o para establecer normas generales vinculantes en virtud del artículo 9(8). Nótese, sin embargo, que el presente documento no propone valores límite a las emisiones. Para determinar las condiciones de autorización adecuadas será necesario tomar en cuenta los factores locales y específicos que afectan a las instalaciones en cuestión, su ubicación geográfica y las condiciones medioambientales del lugar. Por lo que respecta a las instalaciones existentes, también debe tenerse en cuenta la viabilidad económica y técnica de actualizarlas. Incluso el objetivo evidente de garantizar un elevado grado de protección del medio ambiente en su conjunto a menudo implicará un compromiso entre los distintos tipos de impacto medioambiental que en muchas ocasiones se verá influido por cuestiones locales.

Aunque se intenta profundizar en algunas de estas cuestiones, resulta imposible abarcarlas todas en este documento. Las técnicas y niveles presentados en el capítulo 5, por tanto, no serán necesariamente apropiados para la totalidad de las instalaciones. Por otro lado, la obligación de garantizar un elevado grado de protección medioambiental, incluida la minimización de la contaminación de larga distancia o transfronteriza, provoca que las condiciones de autorización no puedan establecerse únicamente basándose en consideraciones locales. Así pues, es de vital importancia que la información contenida en el presente documento sea tenida en cuenta íntegramente por las autoridades responsables de la concesión de autorizaciones.

Puesto que las mejores técnicas disponibles cambian con el paso del tiempo, este documento se revisará y actualizará en su momento. Cualquier comentario o sugerencia debería hacerse llegar a la Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación del Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos (IPTS), a la dirección siguiente:

Edificio Expo, c/ Inca Garcilaso, s/n, E-41092 Sevilla, España
Teléfono: +34 95 4488 284
Fax: +34 95 4488 426
e-mail: JRC-IPTS-EIPPCB@cec.eu.int
Internet: <http://eippcb.jrc.es>

Índice

RESUMEN EJECUTIVO	I
PREFACIO	XV
OBJETIVOS	XXXVII
1. INFORMACIÓN GENERAL SOBRE LAS FUNDICIONES	1
1.1. Perspectiva general del sector	1
1.1.1. Industria de la fundición	1
1.1.2. Mercados de la fundición	7
1.1.3. Tipos de fundiciones	9
1.2. Consideraciones medioambientales	9
1.2.1. Atmósfera	9
1.2.2. Residuos	10
1.2.3. Energía	10
1.2.4. Agua	10
2. TÉCNICAS Y PROCESOS DE LAS FUNDICIONES	11
2.1. Perspectiva general	11
2.1.1. El proceso de fundición	11
2.1.2. Fusión de hierro	13
2.1.3. Fusión de acero	15
2.1.4. Fusión de aluminio	15
2.1.5. Fusión de magnesio	17
2.1.6. Fusión de cobre	17
2.1.7. Fusión de zinc	18
2.1.8. Fusión de plomo	19
2.1.9. Fusión de superaleaciones	19
2.2. Confección de modelos	20
2.2.1. Confección de modelos generales	20
2.2.2. Prototipado rápido (RP)	20
2.3. Materias primas y su manipulación	22
2.4. Fusión y tratamiento del metal	24
2.4.1. Cubilotes	25
2.4.1.1. Cubilote de viento frío	25
2.4.1.1.1. Descripción	25
2.4.1.1.2. Mantenimiento	26
2.4.1.1.3. Ventajas	27
2.4.1.1.4. Desventajas	27
2.4.1.2. Cubilote de viento caliente	27
2.4.1.2.1. Descripción	27
2.4.1.2.2. Ventajas	28
2.4.1.2.3. Desventajas	28

2.4.1.3.	Cubilote de larga campaña	29
2.4.1.4.	Características de las emisiones atmosféricas	30
2.4.2.	Horno eléctrico de arco (HEA).....	30
2.4.2.1.	Descripción	30
2.4.2.2.	Fusión y refinado en HEA con revestimiento ácido	31
2.4.2.3.	Fusión y refinado en HEA con revestimiento básico	32
2.4.2.4.	Características de las emisiones atmosféricas	32
2.4.3.	Hornos de inducción (HI).....	33
2.4.3.1.	Hornos de inducción sin núcleo	33
2.4.3.1.1.	Descripción	33
2.4.3.1.2.	Procedimiento de fusión	35
2.4.3.1.3.	Ventajas	35
2.4.3.1.4.	Desventajas	35
2.4.3.2.	Hornos de inducción de canal.....	36
2.4.3.2.1.	Descripción.....	36
2.4.3.2.2.	Ventajas	37
2.4.3.2.3.	Desventajas	37
2.4.3.3.	Características de las emisiones	38
2.4.4.	Hornos de techo radiante (calentados por resistencia).....	38
2.4.5.	Horno rotativo	39
2.4.5.1.	Descripción	39
2.4.5.2.	Procedimiento de fusión.....	39
2.4.5.3.	Metalurgia	40
2.4.5.4.	Aplicaciones.....	40
2.4.5.5.	Ventajas.....	40
2.4.5.6.	Desventajas.....	40
2.4.6.	Hornos de solera	40
2.4.7.	Hornos de cuba	41
2.4.7.1.	Descripción	41
2.4.7.2.	Ventajas.....	42
2.4.7.3.	Desventajas.....	42
2.4.8.	Hornos de crisol	42
2.4.8.1.	Descripción	42
2.4.8.2.	Procedimiento de fusión.....	43
2.4.8.3.	Ventajas.....	43
2.4.8.4.	Desventajas.....	43
2.4.9.	Convertidor AOD para el refinado de acero	44
2.4.10.	Convertidor VODC para el refinado de acero	44
2.4.11.	Tratamiento del acero	45
2.4.12.	Tratamiento del hierro colado	45
2.4.12.1.	Aleación.....	46
2.4.12.2.	Homogeneización	46
2.4.12.3.	Desulfuración y recarburación del hierro fundido en cubilote.....	46
2.4.12.4.	Tratamiento de nodulización de la colada.....	46
2.4.12.5.	Inoculación de la colada	47
2.4.13.	Tratamiento del metal no férreo	48

2.5. Producción de moldes y machos	49
2.5.1. Materias primas.	50
2.5.1.1. Materiales refractarios.	50
2.5.1.1.1. Arena silíceas.	50
2.5.1.1.2. Arena de cromita	51
2.5.1.1.3. Arena de zirconia	51
2.5.1.1.4. Arena de olivino	52
2.5.1.2. Aglomerantes y otros productos químicos	52
2.5.1.2.1. Bentonita	52
2.5.1.2.2. Resinas	52
2.5.1.2.3. Polvo de carbón.	54
2.5.1.2.4. Aglomerantes de cereales	54
2.5.1.2.5. Óxido de hierro.	54
2.5.1.3. Llenado, alimentación y filtrado.	54
2.5.2. Preparación de la arena (transporte, tamizado, enfriamiento, mezcla)	55
2.5.2.1. Acondicionamiento de la arena para el moldeo en arena verde	55
2.5.3. Moldeo en arena natural	57
2.5.4. Moldeo con arena ligada con arcilla o bentonita (moldeo en verde).	57
2.5.5. Moldeo con arena suelta (moldeo en vacío)	58
2.5.6. Producción de moldes y machos con arena química.	59
2.5.6.1. Procesos de fraguado en frío	60
2.5.6.1.1. Resina fenólica con catalizador ácido	60
2.5.6.1.2. Resina furánica con catalizador ácido	60
2.5.6.1.3. Poliuretano (isocianato fenólico)	61
2.5.6.1.4. Éster fenólico alcalino (Resol – éster)	61
2.5.6.1.5. Aceite alquídico, sin estufado	61
2.5.6.1.6. Silicato-éster	62
2.5.6.1.7. Cemento	62
2.5.6.2. Procesos de fraguado por gas	62
2.5.6.2.1. Caja fría (uretano fenólico endurecido con aminas)	63
2.5.6.2.2. Formiato de metilo fenólico alcalino (Resol – éster).	63
2.5.6.2.3. Resinas furánicas endurecidas con SO ₂	63
2.5.6.2.4. Resinas epoxi-acríticas endurecidas con SO ₂ (curado por radicales libres)	64
2.5.6.2.5. Silicato de sodio endurecido con CO ₂ (vidrio soluble).	64
2.5.6.2.6. Resinas fenólicas alcalinas endurecidas con CO ₂	64
2.5.6.3. Procesos de fraguado en caliente	64
2.5.6.3.1. Resinas fenólicas y/o furánicas en la técnica de caja caliente	65
2.5.6.3.2. Caja tibia	65
2.5.6.3.3. Croning (cáscara).	66
2.5.6.3.4. Aceite de linaza	66
2.5.6.3.5. Aceite alquídico, estufado	67
2.5.6.4. Revestimiento de moldes y machos de arena química	67
2.5.6.4.1. Composición de los revestimientos	67
2.5.6.4.2. Proceso de revestimiento	67
2.5.7. Moldeo con modelo perdido	68
2.5.7.1. Arena suelta –proceso a la espuma perdida– moldes para piezas pequeñas (poliuretano, lost foam)	68
2.5.7.2. Arena química – moldes para piezas grandes.	70

2.5.8. Preparación de moldes permanentes (de metal)	70
2.5.9. Moldeo a la cera perdida y cáscara cerámica (Investment casting)	71
2.6. Colada	72
2.6.1. Colada	73
2.6.1.1. Llenado	73
2.6.1.2. Solidificación (primer enfriamiento)	74
2.6.1.3. Desmoldeo	74
2.6.1.4. Enfriamiento de la colada (segundo enfriamiento)	75
2.6.2. Colada en moldes permanentes (utillajes metálicos)	75
2.6.2.1. Colada a baja presión y por gravedad	75
2.6.2.2. Colada a alta presión	77
2.6.2.3. Colada por centrifugación.	78
2.6.2.4. Colada continua	79
2.7. Desmoldeo y acabado	79
2.7.1. Separación del sistema de alimentación	80
2.7.2. Separación de la arena	80
2.7.3. Eliminación de rebabas (rebabado, desbarbado o rebarbado)	81
2.8. Tratamiento térmico.	82
2.8.1. Introducción	82
2.8.2. Hornos de tratamiento térmico	82
2.8.2.1. Hornos de cámara.	82
2.8.2.2. Hornos de cuba	83
2.8.2.3. Hornos de recocido	83
2.8.3. Temple	83
2.8.4. Tratamiento térmico del hierro dúctil (hierro SG).	83
2.8.4.1. Atenuación de la tensión	84
2.8.4.2. Eliminación de carburos.	84
2.8.4.3. Recocido para la producción de estructuras ferríticas	84
2.8.4.4. Normalización para la producción de estructuras perlíticas	84
2.8.4.5. Producción de estructuras endurecidas y templadas	84
2.8.4.6. Hierro dúctil austemperizado (ADI)	84
2.8.5. Tratamiento térmico del acero	85
2.8.6. Tratamiento térmico del aluminio	85
2.8.6.1. Atenuación de la tensión y recocido	86
2.8.6.2. Tratamiento de solución y enfriamiento	86
2.8.6.3. Tratamiento de precipitación	86
2.8.6.4. Envejecimiento artificial	86
2.9. Control de calidad.	86
3. NIVELES ACTUALES DE EMISIÓN Y CONSUMO EN LAS FUNDICIONES	89
3.1. Vista general del flujo de materiales	89
3.1.1. Introducción	89
3.2. Fusión y tratamiento térmico de metales férricos	91
3.2.1. Características de los hornos de fusión utilizados para el acero y el hierro	91
3.2.2. Cubilotes.	91
3.2.2.1. Consumo de coque y energía	91
3.2.2.2. Partículas	91

3.2.2.3. Gases residuales	93
3.2.2.4. Escoria generada por los cubilotes	94
3.2.2.5. Residuos de refractario	95
3.2.3. Hornos eléctricos de arco	95
3.2.3.1. Entrada	95
3.2.3.2. Partículas	95
3.2.3.3. Humos visibles	96
3.2.3.4. Gases residuales	96
3.2.3.5. Escoria	97
3.2.4. Hornos de inducción	98
3.2.4.1. Hornos de inducción sin núcleo	98
3.2.4.1.1. Energía de entrada	98
3.2.4.1.2. Partículas	98
3.2.4.1.3. Gases residuales	99
3.2.4.1.4. Escoria	100
3.2.4.2. Hornos de inducción de canal	100
3.2.5. Hornos rotativos	101
3.2.5.1. Entrada	101
3.2.5.2. Partículas	101
3.2.5.3. Gases residuales	101
3.2.6. Convertidor AOD	103
3.2.6.1. Entrada	103
3.2.6.2. Salida	104
3.2.6.3. Gases residuales	104
3.2.6.4. Escoria	104
3.2.7. Convertidor VODC	105
3.2.8. Refinado y tratamiento del acero	105
3.2.9. Tratamiento de la fundición de hierro	105
3.2.9.1. Nodulización	105
3.3. Fusión y tratamiento del aluminio	105
3.3.1. Análisis de los hornos de fusión de aluminio	105
3.3.2. Hornos de cuba	107
3.3.3. Hornos de fusión	108
3.3.4. Hornos de techo radiante (calentados mediante resistencia)	108
3.3.5. Hornos de solera	109
3.3.6. Hornos de crisol (calentados por combustible y resistencia)	109
3.3.7. Tratamiento del aluminio fundido	110
3.4. Fusión y colada de magnesio y aleaciones de magnesio	110
3.4.1. Protección del caldo de magnesio	110
3.4.2. Tratamiento del caldo de magnesio	111
3.4.3. Chatarra de magnesio	112
3.5. Fusión y colada de cobre y aleaciones de cobre	112
3.5.1. Procesos de fusión y colada	112
3.5.2. Tratamiento de la colada de cobre y aleación de cobre	114
3.6. Fusión y colada de zinc y aleaciones de zinc	114
3.7. Fusión y colada de plomo	114

3.8.	Depuración de gases residuales	115
3.8.1.	Sistemas de depuración	115
3.8.2.	Dioxinas	115
3.9.	Producción de moldes y machos	118
3.9.1.	Introducción	118
3.9.2.	Moldeo con arena ligada con arcilla (moldeo en verde)	120
3.9.3.	Moldeo con arena suelta (moldeo en vacío)	121
3.9.4.	Producción de moldes y machos con arena química	121
3.9.4.1.	Niveles de consumo de sustancias químicas	121
3.9.4.2.	Factores de emisión	122
3.9.4.3.	Emisiones originadas durante el fraguado en frío	123
3.9.4.4.	Emisiones originadas durante el fraguado con gas	123
3.9.4.5.	Emisiones originadas durante el curado en caliente	124
3.9.5.	Revestimiento de moldes y machos de arena química	125
3.9.6.	Moldeo con modelo perdido (espuma perdida/moldes completos)	125
3.9.6.1.	Arena suelta – proceso a la espuma perdida	125
3.9.6.2.	Arena química – moldes completos	126
3.10.	Colada	127
3.10.1.	Colada, enfriamiento y desmoldeo de moldes perdidos	127
3.10.1.1.	Niveles de emisión	127
3.10.1.2.	Proporción de arena y metal líquido	131
3.10.1.3.	Rendimiento de molde	133
3.10.1.4.	Arena usada	133
3.10.2.	Colada en moldes permanentes	134
3.11.	Desmoldeo y acabado	136
3.11.1.	Muelas correderas	136
3.11.2.	Granallado	136
3.11.3.	Rebabado (rebabado)	137
3.11.4.	Operaciones de acabado en fundiciones de acero	137
3.12.	Tratamiento térmico	137
3.13.	Aguas residuales	138
3.13.1.	Fuentes de agua residual	138
3.13.2.	Aguas residuales y almacenamiento de chatarra	138
3.13.3.	Aguas residuales procedentes de lavadores húmedos empleados en la fusión en cubilotes	139
3.13.4.	Aguas residuales generadas en la zona de moldeo, enfriamiento y desmoldeo y en la producción de moldes/preparación de la arena	140
3.13.5.	Agua residual en la producción de machos	140
4.	TÉCNICAS A TENER EN CUENTA PARA DETERMINAR LAS MTD	141
4.1.	Almacenamiento y manipulación de materias primas	142
4.1.1.	Introducción	142
4.1.2.	Almacenamiento cubierto y parques de chatarra impermeables	142
4.1.3.	Almacenamiento de sustancias químicas aglomerantes	143
4.1.4.	Empleo de chatarra limpia para la fusión y eliminación de arena de los retornos	145
4.1.5.	Reciclaje interno de chatarra de metal férreo	146
4.1.6.	Reciclaje interno de chatarra de magnesio	147
4.1.7.	Reciclaje de contenedores usados	150

4.2. Fusión y tratamiento del metal fundido	151
4.2.1. Cubilotes.	151
4.2.1.1. Optimización del funcionamiento del horno	151
4.2.1.2. Control de calidad del coque de entrada	152
4.2.1.3. Empleo de escoria ácida y básica.	154
4.2.1.4. Aumento de la altura de la zona de fusión del CVF	154
4.2.1.5. Instalación de una segunda fila de toberas en los cubilotes de viento frío (CVF)	156
4.2.1.6. Inyección de aire enriquecido en oxígeno	157
4.2.1.7. Sobrecalentamiento del aire inyectado en los CVC	160
4.2.1.8. Períodos mínimos de interrupción de la inyección en CVC	161
4.2.1.9. Cubilotes sin coque.	162
4.2.1.10. Cubilotes de coque y gas.	166
4.2.2. Hornos eléctricos de arco.	169
4.2.2.1. Reducción del tiempo de fusión y tratamiento	169
4.2.2.2. Empleo de escoria espumosa	169
4.2.3. Hornos de inducción.	171
4.2.3.1. Optimización de los materiales de carga, de la carga y del funcionamiento del horno	171
4.2.3.2. Cambio de frecuencia de red a frecuencia media	172
4.2.4. Hornos rotativos.	173
4.2.4.1. Aumento de la eficiencia del horno	173
4.2.4.2. Empleo de quemadores de oxigás.	175
4.2.5. Empleo de cubilotes u hornos de inducción y rotativos para la fusión de hierro	176
4.2.6. Horno de solera.	179
4.2.6.1. Empleo de quemadores de oxigás.	179
4.2.7. Otros tipos de hornos.	180
4.2.7.1. Alternativas al uso de SF_6 como gas protector o aislante para la fusión de Mg	180
4.2.8. Tratamiento de metales no férreos	183
4.2.8.1. Desgasificación para depuración del aluminio	183
4.3. Producción de moldes y machos, preparación de la arena incluida	185
4.3.1. Elección del tipo de molde	185
4.3.2. Moldeo con arena ligada con arcilla (moldeo en arena verde)	186
4.3.2.1. Preparación de la arena ligada con arcilla por mezclado y enfriamiento al vacío	186
4.3.3. Producción de moldes y machos en arena química.	188
4.3.3.1. Minimización del consumo de aglomerante y resina	188
4.3.3.2. Minimización de pérdida de arena en moldes y machos.	190
4.3.3.3. MTD para los procesos de fraguado en frío	191
4.3.3.4. MTD para procesos de fraguado con gas.	192
4.3.3.5. Sustitución de recubrimientos con base de alcohol por recubrimientos al agua	193
4.3.3.6. Secado por microondas de recubrimientos de base acuosa.	195
4.3.3.7. Uso de disolventes no aromáticos en la producción de machos en caja fría.	197
4.3.4. Métodos de producción de machos y moldes alternativos.	200
4.3.4.1. Espuma perdida	200
4.3.4.2. Moldeo en cáscara cerámica.	203

4.3.5. Preparación de moldes permanentes (de metal) y matrices para la inyección a presión . .	204
4.3.5.1. Minimización del consumo de agente desmoldeante y agua.	204
4.3.5.2. Aplicación de agente desmoldeante en moldes cerrados	205
4.4. Colada del metal	206
4.4.1. Mejora del rendimiento de molde	206
4.5. Captura y tratamiento de humos y gases de combustión y de salida.	208
4.5.1. Principios generales.	208
4.5.1.1. Reducción de emisiones fugitivas.	209
4.5.1.2. Uso de chimeneas múltiples	211
4.5.1.3. Técnicas de depuración.	212
4.5.1.4. Prevención y eliminación de dioxinas	216
4.5.1.5. Eliminación de olores	219
4.5.2. Cubilotes.	219
4.5.2.1. Captura, depuración y enfriamiento de los gases	219
4.5.2.2. Postcombustión en cámaras de combustión de CVC.	224
4.5.2.3. Postcombustión en la zona de fusión del horno.	228
4.5.3. HEA	231
4.5.3.1. Captura de gases residuales.	231
4.5.3.2. Depuración de gases de salida	234
4.5.4. Hornos de inducción.	235
4.5.4.1. Captura de gases de combustión	235
4.5.4.2. Depuración de gases de salida	237
4.5.5. Hornos rotativos.	239
4.5.5.1. Captura y depuración de gases residuales.	239
4.5.6. Hornos de crisol, de solera y de techo radiante	240
4.5.6.1. Prevención de emisiones visibles y fugitivas durante la fusión y el tratamiento del metal	240
4.5.7. Tratamiento del metal	242
4.5.7.1. Convertidores AOD: captura y tratamiento de gases de salida	242
4.5.7.2. Nodulización: captura y depuración de partículas de gases de combustión.	243
4.5.8. Producción de machos y moldes.	245
4.5.8.1. Captura de partículas de los gases de salida generados por la preparación de arena verde y depuración de partículas.	245
4.5.8.2. Captura de partículas generadas en el área de moldeo de arena verde y en la etapa de depuración de partículas	246
4.5.8.3. Captura de gases de salida procedentes de la producción de machos; consideraciones generales	246
4.5.8.4. Cajas frías: captura de vapores de aminas y tratamiento de gases de salida	247
4.5.8.5. Captura y extracción de COV.	249
4.5.8.6. Depuración de gases de salida mediante filtro biológico.	250
4.5.8.7. Moldeo permanente: captura de emisiones generadas por el agente desmoldeante	252
4.5.9. Colada/enfriamiento/desmoldeo	254
4.5.9.1. Introducción	254
4.5.9.2. Carenado de las líneas de colada y enfriamiento	254
4.5.9.3. Captura y tratamiento de gases generados en el desmoldeo.	255
4.5.9.4. Depuración de gases residuales mediante filtros biológicos	257

4.5.10.	Procesos de desmoldeo y acabado: captura y tratamiento de gases de combustión	257
4.5.10.1.	Captura de gases de combustión de los procedimientos de acabado	257
4.5.10.2.	Técnicas de depuración de gases de salida	259
4.5.11.	Captura y depuración de gases residuales generados por el tratamiento térmico.	260
4.5.11.1.	Uso de combustibles limpios en hornos de tratamiento térmico dotados de quemador	260
4.5.11.2.	Baños de temple	261
4.6.	Prevención y tratamiento de aguas residuales.	262
4.6.1.	Medidas de prevención de producción de aguas residuales	262
4.6.2.	Tratamiento de las aguas de depuración y otros flujos de aguas residuales.	264
4.6.3.	Ejemplo de prevención y reducción de aguas residuales.	266
4.6.4.	Interceptores de aceite	269
4.6.5.	Recuperación de aminas a partir del agua de depuración	270
4.6.6.	Reducción de glicoles de los caudales de aguas residuales generados por la inyección . .	271
4.7.	Eficiencia energética	272
4.7.1.	Introducción	272
4.7.2.	Hornos de inducción: uso del calor residual	273
4.7.3.	Uso del calor residual de los cubilotes.	276
4.7.4.	Reducción de pérdidas de energía/mejora del precalentamiento en la cucharas	277
4.8.	Arena: regeneración, reciclaje, reutilización y eliminación	278
4.8.1.	Introducción	278
4.8.2.	Regeneración de la arena verde en condiciones óptimas (regeneración primaria)	282
4.8.3.	Regeneración mecánica simple de la arena de fraguado en frío	285
4.8.4.	Regeneración mecánica en frío mediante muelas abrasivas	286
4.8.5.	Regeneración mecánica en frío mediante tambor de impacto	289
4.8.6.	Regeneración en frío mediante sistemas neumáticos	290
4.8.7.	Regeneración térmica.	292
4.8.8.	Regeneración combinada (mecánica-térmica-mecánica) de arenas mixtas orgánicas bentoníticas.	296
4.8.9.	Regeneración de arena húmeda.	299
4.8.10.	Regeneración de arena de vidrio soluble con sistemas neumáticos	300
4.8.11.	Uso interno de arena de machos no curados.	303
4.8.12.	Reutilización de partículas generadas en el circuito de arena verde de producción de moldes	304
4.8.13.	Reutilización externa de arena usada y granos de tamaño insuficiente generados en el circuito de arena y los procesos de regeneración	305
4.9.	Partículas y residuos sólidos: tratamiento y reutilización.	307
4.9.1.	Introducción	307
4.9.2.	Pretratamiento de residuos sólidos para su reutilización externa	308
4.9.3.	Minimización de la formación de escoria	311
4.9.4.	Cubilotes	311
4.9.4.1.	Recogida y reciclaje de menudos de coque	311
4.9.4.2.	Reintroducción de las partículas del filtro en los cubilotes	312
4.9.5.	Hornos eléctricos de arco (HEA)	316
4.9.5.1.	Reciclaje del polvo filtrado y de la escoria (colada en HEA)	316
4.9.5.2.	Reciclaje de escoria y residuos de aluminio	317
4.10.	Reducción del ruido	318
4.11.	Desmantelamiento.	319
4.12.	Herramientas de gestión medioambiental	320

5. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES PARA FUNDICIONES	329
5.1. MTD genéricas (para la industria de la fundición)	330
5.2. Fusión de metales férreos	333
5.3. Fusión de metales no férreos	336
5.4. Colada en moldes perdidos	338
5.5. Fundición de molde permanente	341
6. TÉCNICAS EMERGENTES	343
6.1. Uso de material combustible de bajo coste en los cubilotes	344
6.2. Reciclaje de partículas eliminadas en el filtro y que tengan contenido metálico (metales férreos)	345
6.3. Recuperación de aminos por permeación de gas a partir del gas residual generado en la producción de machos	345
6.4. Pulverización separada del agente desmoldeante y el agua en coladas a presión de aluminio	345
6.5. Aglomerantes inorgánicos para la producción de machos	347
7. CONCLUSIONES	351
7.1. Coordinación del estudio	351
7.2. Fuentes de información	351
7.3. Grado de consenso alcanzado	352
7.4. Recomendaciones para líneas de trabajo futuras	353
7.5. Posibles temas de estudio para futuros proyectos de I+D	353
8. REFERENCIAS	355
9. GLOSARIO	363
9.1. Siglas y abreviaturas	363
9.2. Términos	365
9.3. Equivalencia lingüística de los términos técnicos más comunes	368
10. ANEXOS	371
10.1. Anexo 1. Resumen de datos de fundición de hierro en varios tipos de cubilotes y en hornos de inducción	371
10.2. Anexo 2. Equipo de control de polvo en una fundición a gran escala dedicada a fabricar piezas de automoción	382

Lista de figuras

Figura 1.1: Productividad de las fundiciones férreas de varios países europeos.	7
Figura 1.2: Cuotas de mercado sectorial relativas	8
Figura 1.3: Cuotas de mercado de la fundición de hierro (mercado español).	8
Figura 1.4: Cuotas de mercado de la fundición de acero (mercado español)	8
Figura 2.1: El proceso de fundición	11
Figura 2.2: Diagramas de flujo de los procesos de fusión y tratamiento del metal del hierro colado. . . .	14
Figura 2.3: Diagramas de flujo de los procesos de fusión y tratamiento del acero	16
Figura 2.4: Modelo de madera	20
Figura 2.5: Cajas de machos.	20
Figura 2.6: Modelo de termopolímero (cera) en una máquina RP	21
Figura 2.7: Chatarra (izq.) y lingotes (der.) de aluminio.	22
Figura 2.8: Transportadores neumáticos para materia prima en polvo	22
Figura 2.9: Diseño esquemático y modelo en miniatura de un cubilote (con inyección de aire caliente) .	26
Figura 2.10: Efectos del precalentamiento del aire sobre la eficiencia de los hornos de inyección de aire . .	28
Figura 2.11: Representación esquemática de un cubilote de larga campaña.	29
Figura 2.12: Horno HEA	31
Figura 2.13: Distribución general de un horno de inducción sin núcleo.	33
Figura 2.14: Hornos de inducción sin núcleo	34
Figura 2.15: Instalación característica de un horno de canal	36
Figura 2.16: Horno de inducción de canal	37
Figura 2.17: Horno de techo radiante	38
Figura 2.18: Sección transversal de un horno de solera	41
Figura 2.19: Horno de cuba	42
Figura 2.20: Hornos de crisol	43
Figura 2.21: Convertidor AOD	44
Figura 2.22: Desoxidación con alambre de aluminio	45
Figura 2.23: Nodulización siguiendo el método «sandwich».	47
Figura 2.24: Inoculación durante el colado	48
Figura 2.25: Distribución por tamaño de los granos típica de las arenas silíceas usadas en fundiciones .	51
Figura 2.26: Componentes del bebedero	55
Figura 2.27: Distintos tipos de filtros	55
Figura 2.28: Diagrama de flujo de una típica planta de tratamiento de arena verde.	56
Figura 2.29: Distintos tipos de mezcladores de arena	56
Figura 2.30: Moldeo en vacío	59
Figura 2.31: Machos furánicos.	61
Figura 2.32: Macho confeccionado en caja fría	62
Figura 2.33: Machos (arriba) y moldes (abajo) moldeados en cáscara	66
Figura 2.34: Recubrimiento por flujo con base de alcohol, seguido del encendido o secado	68
Figura 2.35: Revestimiento por inmersión en recubrimiento al agua, seguido del secado en horno de aire caliente	68
Figura 2.36: Proceso a la espuma perdida	69
Figura 2.37: Modelo de poliestireno desechable (der.) utilizado en el proceso a la espuma perdida y ejemplo de moldeo producido siguiendo este método (izq.).	69
Figura 2.38: Proceso de moldeo a la cera perdida.	71
Figura 2.39: Cuchara de vaciado del metal por el borde.	73
Figura 2.40: Cuchara tipo tetera para la colada del metal fundido.	73
Figura 2.41: Cuchara de tapón para la colada del metal fundido	74
Figura 2.42: Horno de colada	74
Figura 2.43: Desmoldeo al final de una línea de moldeo automatizada.	75
Figura 2.44: Funcionamiento de una máquina de colada a baja presión.	76
Figura 2.45: Máquina de colada a baja presión.	76
Figura 2.46: Máquinas de cámara caliente y cámara fría para el moldeo a alta presión.	77

Figura 2.47: Representación esquemática de una máquina de colada por centrifugación	78
Figura 2.48: Representación esquemática de una máquina de colada continua	79
Figura 2.49: Pieza con bebedero.	80
Figura 2.50: Piezas antes (izq., centro) y después (der.) del granallado con arena	81
Figura 2.51: Rebabas (izq.) y su extracción mediante una piedra de amolar (centro) y una muela corredera (der.)	81
Figura 2.52: Temple de una pieza caliente poco después del tratamiento térmico	83
Figura 2.53: Fases habituales en el tratamiento térmico mediante austemperizado	85
Figura 3.1: Visión general del flujo de materiales en el proceso de fundición	89
Figura 3.2: Pérdidas de energía características en un horno de inducción sin núcleo con frecuencia de red.	98
Figura 3.3: Consumo energético (kWh/tonelada) en función de las toneladas transferidas y de la pérdida de temperatura (hornos de inducción de canal)	100
Figura 3.4: Producción de Mg por inyección por parte de los Estados de la UE en toneladas/año y mediante capa protectora o aislante de gas (SO_2 o SF_6).	111
Figura 3.5: Gases residuales durante el llenado de moldes completos y huecos	126
Figura 3.6: Niveles de emisión de contaminantes durante la colada, enfriamiento y desmoldeo de una fundición dedicada al moldeo del hierro en arena verde	130
Figura 3.7: Niveles de emisión de partículas durante la colada, enfriamiento y desmoldeo de una fundición dedicada al moldeo del hierro en arena verde	130
Figura 3.8: Relación entre arena y metal líquido en fundiciones de hierro.	131
Figura 3.9: Relación entre arena y metal líquido en fundiciones de cobre	132
Figura 3.10: Proporciones totales de mezcla de arena/metal líquido en las fundiciones del Reino Unido	132
Figura 4.1: Diagrama de flujo másico de la refusión sin fundente de chatarra de magnesio de clase 1	149
Figura 4.2: Diagrama de flujo másico de la refusión con cobertura de sal (fundente) de chatarra de magnesio de clase 1	149
Figura 4.3: Distintos métodos de inyección de oxígeno.	158
Figura 4.4: Cómo afectan los períodos de interrupción de la inyección a la temperatura de vaciado de un cubilote de postinyección	162
Figura 4.5: Cubilote sin coque (funcionamiento dúplex).	163
Figura 4.6: Instalaciones de preparación de la arena de moldeo mediante mezclador-enfriador a vacío	187
Figura 4.7: Balance térmico de una estufa de secado de machos funcionando al 72% de su capacidad.	194
Figura 4.8: Balance térmico del secado de machos en un horno microondas de 50 kW al 50% de su capacidad	196
Figura 4.9: Emisiones totales de carbono en los distintos procesos generadas por el empleo de disolventes aromáticos y con base vegetal	199
Figura 4.10: Unidades de filtro de mangas; parte interior (izq.) y exterior (centro, der.)	213
Figura 4.11: Condiciones de funcionamiento de los sistemas de eliminación de partículas de gases de combustión secos y húmedos en los cubilotes de viento caliente.	215
Figura 4.12: Diagrama de flujo de un cubilote de viento frío dotado de sistema de recuperación del calor y de enfriamiento y filtro de mangas	221
Figura 4.13: Cubilote de viento caliente con recuperación de calor y lavador húmedo	225
Figura 4.14: Cubilote de viento caliente con recuperación de calor y filtro de mangas.	225
Figura 4.15: Postcombustión y enfriamiento de gases de combustión en un cubilote de viento frío	229
Figura 4.16: Diseño de (a) una campana de montaje en el tejado, (b) una campana de aspiración lateral y (c) un sistema de evacuación directa por el cuarto agujero	232
Figura 4.17: Cubierta de boca de carga para la rejilla de desmoldeo (moldeo discontinuo de pieza grande).	256
Figura 4.18: Tratamiento de aguas residuales y lodos procedentes del sistema de depuración húmeda de partículas de un cubilote	265
Figura 4.19: Circuito de agua del sistema húmedo de depuración de partículas de un cubilote	268
Figura 4.20: Sistema de tratamiento de lodos procedentes del sistema húmedo de depuración de partículas de los gases de combustión de un cubilote	268
Figura 4.21: Planta de reciclado de aminas	270
Figura 4.22: Uso del calor residual para el secado de la chatarra	274
Figura 4.23: Representación esquemática del cubilote de viento caliente con la caldera, turbina y generador	276
Figura 4.24: Diagrama de flujo de procesos de un cubilote de viento caliente con recuperación del calor	277

Figura 4.25: Diagrama de distribución de la arena en un sistema de regeneración térmica/mecánica .	281
Figura 4.26: Regeneración mecánica en frío mediante muela	286
Figura 4.27: Datos operativos del circuito de arena de una fundición de arena verde de los Países Bajos.	287
Figura 4.28: Costes fijos en euros por tonelada de arena regenerada (recuperación mecánica de arena con aglomerantes de fraguado en frío)	288
Figura 4.29: Regeneración mecánica en frío mediante sistemas neumáticos	291
Figura 4.30: Costes fijos en euros por tonelada de arena regenerada por procesos térmicos y regeneración mecánica intensiva de arenas mixtas.	295
Figura 4.31: Unidad de regeneración de arena mecánica-térmica-mecánica	296
Figura 4.32: Unidad de regeneración mecánica giratoria	302
Figura 4.33: Distribución del zinc en la inyección de toberas tras un período de 20 días	314
Figura 4.34: Distribución del zinc en el sistema de recirculación a través de la carga, tras 11 días de carga.	315
Figura 6.1: Boquillas múltiple para pulverizar agua y agente desmoldeante.	346
Figura 10.1: Balance de entrada y salida correspondiente a diversas modificaciones técnicas introducidas en la fusión en cubilotes	371
Figura 10.2: Coste de las materias primas (Francia: de 1993 a 2003)	381
Figura 10.3: Datos de seguimiento de las emisiones de polvo en cuatro puntos distintos de la planta de arena (seguimiento continuo durante 24 horas).	382
Figura 10.4: Datos de seguimiento de las emisiones de polvo en cuatro puntos distintos de la planta de arena (seguimiento continuo durante 2 semanas)	382
Figura 10.5: Datos de seguimiento de las emisiones de polvo en cuatro puntos distintos de la planta de arena (seguimiento continuo durante 30 días).	383

Lista de tablas

Tabla 1.1: Producción europea de fundición férrea (es decir, hierro, acero y hierro maleable, en kilotoneladas)	1
Tabla 1.2: Producción europea de fundición no férrea (en kilotoneladas)	2
Tabla 1.3: Número de fundiciones (unidades de producción) de hierro, acero y hierro maleable	3
Tabla 1.4: Número de fundiciones (unidades de producción) de metales no férreos	4
Tabla 1.5: El empleo en la industria de la fundición de hierro, acero y hierro maleable	5
Tabla 1.6: El empleo en la industria de la fundición no férrea	6
Tabla 2.1: Proporciones relativas para las técnicas de moldeo utilizadas en la producción de Al	15
Tabla 2.2: Aleaciones de zinc más habituales. Contenido en %	18
Tabla 2.3: Descripción de las técnicas de prototipado rápido	21
Tabla 2.4: Contaminación potencial del suelo a partir de las materias primas utilizadas en las fundiciones férreas	23
Tabla 2.5: Aplicabilidad según tipo de horno ((f) = fusión; (m)= mantenimiento)	25
Tabla 2.6: Aplicaciones de los hornos de inducción existentes en función de su frecuencia	34
Tabla 2.7: Relación de varios tipos de resina y sus aplicaciones.	53
Tabla 2.8: Composición de la arena natural	57
Tabla 2.9: Composición de la mezcla de aditivos utilizada para preparar arena verde (excepto agua)	58
Tabla 2.10: Procesos de producción de machos empleados en 48 fundiciones dedicadas a la producción de piezas para el sector automovilístico de Alemania, 1991	60
Tabla 3.1: Características de los hornos de fusión y datos sobre las emisiones.	90
Tabla 3.2: Consumo medio de energía en el tratamiento de los gases de combustión y en los hornos de mantenimiento.	91
Tabla 3.3: Niveles de emisión de partículas (gases residuales sin depurar) de distintos tipos de cubilotres	92
Tabla 3.4: Niveles de emisión de partículas de los cubilotes y distribución de tamaño de partículas (PM)	92
Tabla 3.5: Composición típica de las partículas de polvo generado por los cubilotes (porcentaje en peso)	92
Tabla 3.6: Composición de los gases superiores de combustión incompleta de un cubilote	93
Tabla 3.7: Datos de emisiones correspondientes a cubilotes de viento caliente/frío de distintas configuraciones.	94
Tabla 3.8: Composición característica de la escoria procedente de cubilotes.	95
Tabla 3.9: Composición química de los hornos HEA (fundición de acero)	96
Tabla 3.10: Valores de emisión típicos de hornos HEA	97
Tabla 3.11: Composición química de la escoria de hornos HEA	97
Tabla 3.12: Niveles de emisión de un horno HI y distribución de partículas.	99
Tabla 3.13: Composición química del polvo generado por los hornos de inducción en la fundición de hierro	99
Tabla 3.14: Datos característicos de emisiones de hornos de inducción de fundiciones férreas	99
Tabla 3.15: Composición característica de la escoria de un horno de inducción	100
Tabla 3.16: Composición química del polvo originado en los hornos rotativos.	101
Tabla 3.17: Datos de emisión de un horno rotativo de fundición de hierro, sin equipo de depuración de gases residuales	102
Tabla 3.18: Niveles de consumo en el tratamiento del acero mediante convertidor AOD	104
Tabla 3.19: Composición de la escoria generada por los convertidores AOD	104
Tabla 3.20: Comparación de varios procedimientos de nodulización	105
Tabla 3.21: Características y datos de emisiones de los hornos utilizados en la fusión de aluminio	106
Tabla 3.22: Entradas y salidas características de la fusión de aluminio en un horno de cuba.	107
Tabla 3.23: Resultados obtenidos tras 6 días de prueba funcional de un horno de cuba de dos toneladas de capacidad utilizado para la producción de Al	108
Tabla 3.24: Datos de emisiones de un horno de solera calentado con fueloil (fusión de Al)	109
Tabla 3.25: Datos de emisión y consumo de un horno de crisol (fusión de Al)	110
Tabla 3.26: Empleo de SF ₆ en la inyección en distintas condiciones operativas	111
Tabla 3.27: Empleo de SF ₆ en operaciones de moldeo por gravedad	111

Tabla 3.28: Clases de chatarra de magnesio	112
Tabla 3.29: Balance de masa de una fundición de moldeo a baja presión de latón (operaciones de moldeo y inyección)	113
Tabla 3.30: Emisión de partículas de correspondiente a la fusión de aleaciones de cobre en crisoles ...	113
Tabla 3.31: Datos característicos de masa y energía en el moldeo a presión del zinc	114
Tabla 3.32: Ejemplo de emisiones actuales de los sistemas de depuración de partículas	115
Tabla 3.33: Datos de emisiones de dioxinas para varios tipos de fundición	116
Tabla 3.34: Emisiones de dioxinas procedentes de cubilotes	117
Tabla 3.35: Impacto medioambiental de los sistemas de aglomeración	118
Tabla 3.36: Valores y factores de emisión correspondientes a las emisiones de partículas de polvo en zonas de moldeo tras la depuración de gases de salida	120
Tabla 3.37: Ejemplo de datos de emisiones de partículas y tamaño de las mismas (producción de moldes y machos)	120
Tabla 3.38: Propiedades características de la arena verde medidas a partir de la información de 105 muestras obtenidas de otras tantas fundiciones de hierro	121
Tabla 3.39: Niveles de consumo de varias resinas, catalizadores, endurecedores y aditivos utilizados para preparar la arena química	122
Tabla 3.40: Factores de emisión durante la producción de moldes	122
Tabla 3.41: Factores de emisión durante la producción de machos	123
Tabla 3.42: Balance de masa de una zona de producción de machos mediante caja caliente en una fundición de latón	124
Tabla 3.43: Comparación de la producción de residuos de dos fundiciones dedicadas a la producción de aluminio (por espuma perdida y en arena verde)	125
Tabla 3.44: Datos de emisión de gases evacuados por la chimenea de dos fundiciones de aluminio ...	126
Tabla 3.45: Impacto medioambiental de los sistemas de aglomeración durante la colada, el desmoldeo y el enfriamiento.	128
Tabla 3.46: Factores de emisión del moldeo del hierro en moldes de arena aglomerada con resina de fraguado en frío	129
Tabla 3.47: Valores y factores de emisión correspondientes a la emisión de partículas durante el desmoldeo, una vez depurados los gases residuales	131
Tabla 3.48: Rendimiento de molde de las principales aleaciones	133
Tabla 3.49: Resultados del análisis de arenas de fundición usadas de origen diverso	134
Tabla 3.50: Contenido de HAP y fenol en la arena de fundición usada	134
Tabla 3.51: Balance másico y composición de efluentes y gases de salida de unidades de moldeo a presión de aluminio.	135
Tabla 3.52: Factores de emisión indicativos correspondientes al moldeo de bronce, latón y zamac	135
Tabla 3.53: Entradas y salidas de una muela corredera utilizada en el moldeo del aluminio	136
Tabla 3.54: Datos de emisión de gases de salida generados durante el granallado empleando distintas técnicas de eliminación de partículas.	136
Tabla 3.55: Datos de emisión de gases de salida generados durante el rebabado realizado por distintas técnicas de eliminación de partículas.	137
Tabla 3.56: Emisión media de partículas en los procesos de acabado del acero	137
Tabla 3.57: Posibles impurezas en función del tipo de chatarra	138
Tabla 3.58: Concentraciones de contaminantes presentes en el filtro de efluentes utilizado para extraer el agua de los lodos procedentes de los lavadores húmedos de los cubilotes.	139
Tabla 4.1: Estructuración de la información relativa a las técnicas tratadas en el capítulo 4	141
Tabla 4.2: Problemas debidos al incorrecto almacenamiento de los aglomerantes químicos líquidos ...	141
Tabla 4.3: Entradas y salidas de una planta de pretratamiento de chatarra de magnesio	148
Tabla 4.4: Propiedades características de los coques de fundición	153
Tabla 4.5: Alturas de zona de fusión necesarias	155
Tabla 4.6: Ejemplo de la modificación del consumo de coque al aumentar la altura de la zona de fusión	155
Tabla 4.7: Datos operativos característicos de un cubilote sin coque	164
Tabla 4.8: Datos de emisión de cubilotes sin coque y de cubiloten de viento caliente	165
Tabla 4.9: Costes operativos correspondientes a cubilotes sin coque frente a los de los CVC (a los que les corresponde un valor del 100%)	166
Tabla 4.10: Influencia de los quemadores de oxigás en la composición de los gases de combustión de un CVC	167
Tabla 4.11: Datos operativos de un cubilote de viento frío con y sin quemadores de oxigás	168

Tabla 4.12: Datos sobre energía y temperatura de hornos HEA dedicados a la fusión con escoria normal y escoria espumosa	170
Tabla 4.13: Tabla de consumo de energía (colada mínima)	175
Tabla 4.14: Elección técnica del dispositivo de fusión en fundición de hierro	178
Tabla 4.15: Ejemplo de costes de una planta que sustituye un cubilote por un horno rotativo o de inducción	179
Tabla 4.16: Comparación de costes de SO_2 y SF_6 como gases de cobertura protectora	181
Tabla 4.17: Datos operativos y de costes de una nueva planta de inyección con una capacidad de 1.000 toneladas/año de Mg	182
Tabla 4.18: Costes de inversión de una planta impulsora	184
Tabla 4.19: Aplicabilidad de los distintos tipos de moldeo	185
Tabla 4.20: Propiedades técnicas de varios tipos de moldeo	186
Tabla 4.21: Variables de proceso y rendimiento del mezclador	188
Tabla 4.22: Ejemplo de ahorro anual, costes y retorno energético de un sistema de control de mezclado	190
Tabla 4.23: Resultado de las campañas de prueba de secado de machos por microondas y por aire caliente	197
Tabla 4.24: Datos de emisión de un sistema de producción de machos en caja fría; mediciones realizadas durante el desmoldeo y en la chimenea de salida	198
Tabla 4.25: Emisiones (en %) de determinados compuestos en sistemas de producción de machos en caja fría con base de compuestos vegetales	199
Tabla 4.26: Datos operativos relativos a la producción de una cubierta de fundición de hierro parecida siguiendo varios métodos de moldeo	202
Tabla 4.27: Datos económicos de una fundición de aluminio mediante espuma perdida	202
Tabla 4.28: Reducción del peso relativo en el moldeo en cáscara cerámica de válvulas comparado con el moldeo en arena	203
Tabla 4.29: Rendimiento de molde correspondiente a distintos tipos de fundición	207
Tabla 4.30: Media ponderada del rendimiento de molde de 82 fundiciones férreas del Reino Unido, 1981 – 1987	207
Tabla 4.31: Análisis de las emisiones atmosféricas en varias fases del proceso de fundición férrea	209
Tabla 4.32: Características de los sistemas secos y húmedos de eliminación de partículas utilizados en las fundiciones	214
Tabla 4.33: Costes de inversión y consumo energético de varios sistemas de depuración	215
Tabla 4.34: Estimación de costes de inversión de unas instalaciones de inyección de carbón dispuestas en un CVC	218
Tabla 4.35: Costes totales de instalaciones de inyección de carbón dispuestas en un CVC	219
Tabla 4.36: Datos operativos de cubilotes de viento frío dotados de filtros de mangas para la depuración de partículas	222
Tabla 4.37: Datos operativos correspondientes a cubilotes de viento caliente dotados de filtro de mangas y un desintegrador para la extracción de partículas	226
Tabla 4.38: Consumo de energía de cubilotes de viento caliente	227
Tabla 4.39: Datos operativos de dos posibles sistemas de postcombustión, con refrigeración por agua (I) y por aire (J)	229
Tabla 4.40: Resultados analíticos y legislación (francesa) aplicable sobre la postcombustión en cubilotes de viento frío con refrigeración de los gases de combustión por agua (I) y por aire (J)	230
Tabla 4.41: Velocidades de flujo de gases de salida características (en m^3/s) y eficiencia de extracción de partículas de los sistemas de captura de gases de salida de hornos HEA	233
Tabla 4.42: Costes correspondientes a los equipos de depuración y captura de gases de combustión de hornos HEA	235
Tabla 4.43: Datos de emisión de una fundición de hierro dotada de hornos de inducción y un sistema de salida centralizado con filtro de mangas	238
Tabla 4.44: Costes de inversión y de consumo energético de la unidad de filtro de mangas de los hornos de inducción y variación de los niveles finales	239
Tabla 4.45: Estimación de costes de instalación de un sistema de depuración de humos visibles generados durante la carga y la colada	241
Tabla 4.46: Cálculo de costes correspondiente a la depuración de humos de MgO	244
Tabla 4.47: Valores de emisión de partículas correspondientes a los talleres de moldeo y tratamiento. .	246
Tabla 4.48: Datos de emisión de una zona de producción de machos en caja fría dotado de depuración ácida	248

Tabla 4.49: Características, costes de inversión y datos de emisión de un depurador de aminas para una zona de producción de machos en caja fría	248
Tabla 4.50: Datos operativos correspondientes al filtrado biológico de gases de combustión generados en la producción de machos en caja fría.	251
Tabla 4.51: Datos de emisión correspondientes al filtrado biológico de gases de salida procedentes de la colada (en arena verde) y una línea de enfriamiento.	251
Tabla 4.52: Datos de emisión correspondientes a los gases de combustión del MAP depuración mediante PE.	253
Tabla 4.53: Aplicabilidad de las técnicas de captura de partículas en los distintos procesos de acabado	258
Tabla 4.54: Niveles de emisión de un horno de tratamiento térmico antes y después de instalar quemadores de gas natural	261
Tabla 4.55: Aplicabilidad de las técnicas de captura de los gases de los baños de temple	262
Tabla 4.56: Datos de producción y consumo de agua (anuales) de una planta característica.	267
Tabla 4.57: Costes de eliminación correspondientes a la ampliación de un sistema de tratamiento de aguas residuales con tratamiento para lodos.	269
Tabla 4.58: Uso característico de energía en una fundición de acero dotada de horno HEA y en una fundición no férrea.	273
Tabla 4.59: Aplicabilidad de los distintos métodos de regeneración en sistemas de arena única.	279
Tabla 4.60: Aplicabilidad de los distintos métodos de regeneración en sistemas de arena mezclada . . .	280
Tabla 4.61: Aplicabilidad de varias técnicas de regeneración de arena en función del tipo de arena . . .	281
Tabla 4.62: Compatibilidad entre arenas regeneradas y aglomerantes de distinto tipo	282
Tabla 4.63: Ahorro propiciado por la regeneración primaria	284
Tabla 4.64: Datos operativos de tres fundiciones alemanas de referencia equipadas con sistemas térmicos de regeneración de arena.	293
Tabla 4.65: Datos operativos de un sistema de tratamiento mecánico-térmico-mecánico (neumático – lecho fluidizado – neumático)	297
Tabla 4.66: Datos operativos de una unidad de regeneración de arena con silicato	302
Tabla 4.67: Requisitos de tratamiento y posibles limitaciones de residuos sólidos destinados a reutilización externa	308
Tabla 4.68: Resumen de las posibilidades de reutilización externa de los residuos sólidos generados por las fundiciones (datos de 1999)	309
Tabla 4.69: Características de las técnicas de inyección para la recirculación del polvo de los cubilotes	313
Tabla 5.1: Emisiones atmosféricas asociadas al empleo de MTD en la fusión y el tratamiento del hierro .	335
Tabla 5.2: Emisiones atmosféricas asociadas al empleo de MTD en la fusión en cubilotes de metales férreos.	335
Tabla 5.3: Emisiones atmosféricas asociadas al empleo de MTD en la fusión en hornos eléctricos de arco de metales férreos	336
Tabla 5.4: Emisiones atmosféricas asociadas al empleo de MTD en la fusión en hornos rotativos de metales férreos.	336
Tabla 5.5: Emisiones atmosféricas asociadas al uso de MTD en la fusión del aluminio.	338
Tabla 5.6: Emisiones a la atmósfera asociadas al uso de las MTD en el moldeo y colada a partir de moldes perdidos	341
Tabla 5.7: Emisiones a la atmósfera asociadas al uso de las MTD en el moldeo permanente (MAP incluidas)	341
Tabla 10.1: Datos operativos de un cubilote de viento frío (10 t/h)	374
Tabla 10.2: Datos operativos de un cubilote de viento caliente de larga campaña (10 t/h)	375
Tabla 10.3: Datos operativos de un cubilote sin coque y un cubilote con inyección de viento caliente con precalentamiento de aire.	376
Tabla 10.4: Comparación de costes del hierro líquido (junio de 2003; producción en masa de 10 t/h) . . .	377
Tabla 10.5: Precio de la fundición laminar: carga metálica + energía.	378
Tabla 10.6: Precio de la fundición nodular: carga metálica + energía	379

Objetivos

Este documento refleja el intercambio de información entorno a las actividades tratadas en el anexo I, categorías 2.3 (b), 2.4 y 2.5 (b) de la Directiva IPPC, es decir:

«2.3. Instalaciones para la transformación de metales férreos:

- b) Forjado con martillos cuya energía de impacto sea superior a 50 kilojulios por martillo y cuando la potencia térmica utilizada sea superior a 20 MW

2.4. Fundiciones de metales férreos con una capacidad de producción de más de 20 toneladas por día

2.5. Instalaciones

- b) Para la fusión de metales no férreos, inclusive la aleación, incluidos los productos de recuperación (refinado, moldeado en fundición) con una capacidad de fusión de más de 4 toneladas para el plomo y el cadmio o 20 toneladas para todos los demás metales, por día.»

Al establecer el ámbito de trabajo del documento, el grupo de trabajo técnico (GTT) consideró la posible interpretación de los valores umbral. Tras comparar el alcance IPPC preestablecido con la existencia de instalaciones que cumplen los requisitos indicados más arriba, tanto en la Unión Europea como en los países candidatos, surgió el siguiente ámbito de trabajo:

- fundición de metales férreos, por ejemplo fundición con grafito laminar, hierro maleable y dúctil, acero
- fundición de metales no férreos, por ejemplo aluminio, magnesio, cobre, zinc, plomo y sus aleaciones.

La forja se ha excluido de entre los objetivos de este documento, ya que ninguna instalación de forja europea cumplía las condiciones estipuladas en el anexo I 2.3.(b), es decir: «Forjado con martillos cuya energía de impacto sea superior a 50 kilojulios por martillo y cuando la potencia térmica utilizada sea superior a 20 MW». Así pues, las fundiciones de cadmio, titanio o metales preciosos, además de la fundición de campanas y la artística, quedaron excluidas por una cuestión de capacidad.

La colada continua (en forma de chapas y planchas) ya se ha tratado en los documentos BREF relativos a la producción de hierro y acero, así como a las industrias de metales no férreos, por lo que no se considerarán en el presente documento.

La fundición, la aleación y el refinado de metales no férreos se han tratado en el documento BREF sobre industrias de metal no férreo y, por lo tanto, quedan fuera del alcance del presente trabajo. Al tratar de metales no férreos, pues, se considerará que el proceso se inicia en el momento de fundir los lingotes y la chatarra interna o con el metal líquido.

Desde el punto de vista del proceso de fundición, el documento abarca los siguientes pasos:

- confección de modelos
- almacenamiento y manipulación de materias primas
- fusión y tratamiento del metal
- producción de moldes y machos, técnicas de moldeo
- colado o vaciado y enfriamiento
- desmoldeo
- acabado
- tratamiento térmico.

Capítulo 1.

Información general sobre las fundiciones

1.1. Perspectiva general del sector

1.1.1. Industria de la fundición

Las fundiciones funden metales férreos, no férreos y aleaciones y le dan forma definitiva o casi definitiva a los productos a través del llenado y la solidificación de metales o aleaciones fundidos en un molde. Se trata de un sector industrial diferenciado y diversificado que se compone de instalaciones de muy diverso tipo y tamaño; cada una de ellas presenta una combinación de tecnologías y operaciones unitarias propias, adaptadas al flujo de entrada, el tamaño de las series y los tipos de productos elaborados por las instalaciones específicas. La organización en el sector se basa en el tipo de material transformado, siendo la principal distinción entre industrias de fundición férrea y no férrea.

La industria europea de la fundición es la tercera más importante del mundo en lo que a metales férreos se refiere y la segunda en el caso de los no férreos. En la Tabla 1.1 y la Tabla 1.2 puede verse la producción total en varios países europeos. No se han facilitado datos correspondientes a Irlanda del Norte, Luxemburgo y algunos países recién incorporados, aunque la actividad de dichas regiones es escasa en comparación con la de los países que sí figuran en la lista. Alemania, Francia e Italia son los tres principales productores europeos, con una producción anual total de más de dos millones de toneladas cada uno. En los últimos años España ha arrebatado el quinto puesto al Reino Unido, aunque ambos superan el millón de toneladas de producción. Los cinco productores principales aportan en conjunto más del 80% del total producido en Europa.

La producción total europea de fundición férrea se ha mantenido estable en los últimos cinco años, si bien se han registrado algunas fluctuaciones en países concretos. Por ejemplo, los datos correspondientes a Gran Bretaña indican un descenso general de la producción, mientras que en España ésta tiende a crecer. El sector de la fundición no férrea ha experimentado un crecimiento continuo desde 1998. La cifra total para 2001 puede llevar a confusión porque no recoge los datos de Gran Bretaña. En general, de la Tabla 1.2 se deduce que en la mayoría de países la producción se ha incrementado, ya se trate de los principales productores o de países con una producción más limitada.

Tabla 1.1. Producción europea de fundición férrea (es decir, hierro, acero y hierro maleable, en kilotoneladas) [168, CAEF, 2002], [202, TWG, 2002]

País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Austria	190,1	181,7	191,4	192,4	181,2	0,5	-5,8
Bélgica	144,4	149,3	149,8	149,5	143,7	-0,2	-3,9
República Checa	493	379,1	390,3	415,3	381,6	6,4	-8,1
Dinamarca	85,8	86	96,4	85,7	87,3	-11,1	1,9
Estonia	s.d.	s.d.	0,94	1,07	1,1	13,8	2,8
Finlandia	122,6	109	117,6	119,5	112,5	1,6	-5,8
Francia	2.250,8	2.146,6	2.283,1	2.147,4	2.128,6	-5,9	-0,9
Alemania	3.662,9	3.555,2	3.758,2	3.801,4	3.749,7	1,1	-1,4

.../...

MTDs para forja y fundición

.../...

País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Gran Bretaña	1.076,3 ^a	949,2 ^a	968,2 ^a	906,3 ^a	886,3 ^a	-6,4	-2,2
Hungría	78,1	68,7	74,8	62,8	67,9	-16,0	8,2
Irlanda	450	480	520	275	s.d.	-47,1	
Italia	1.508,4	1.492,6	1.516,4	1.433,3	1.460,9	-5,5	1,9
Países Bajos	140,6	121	136	132,3	123,7	-2,7	-6,5
Noruega	65,3	67,7	70,1	73,4	67,3	4,7	-8,3
Polonia	675	610,2	671,2	673	598,0	0,3	-11,1
Portugal	98,6	97,7	102,3	100	96,7	-2,2	-3,3
Eslovaquia	s.d.	s.d.	s.d.	47,5	s.d.		
Eslovenia	89,8	81,9	86,9	96,3	s.d.	10,8	
España	706,6	759,3	950,5	955,7	992,9	0,5	3,9
Suecia	264,2	253,2	266,7	244,7	234,6	-8,2	-4,1
Suiza	122,8 ^b	122 ^b	119,9 ^b	105,5 ^b	81,8 ^b	-12,0	-22,5
Total	12.225	11.710	12.471	12.018	11.396		
Total final ^c				12.018	11.815		

a) Sin fundición de acero.

b) Sin fundición de acero ni hierro maleable.

c) Total final calculado teniendo en cuenta las cifras más recientes para los años en que no se dispone de datos.

En las fundiciones férreas, los avances en la sustitución de materiales producidos en los últimos años han provocado que la cuota correspondiente a la fundición de hierro en la producción total haya descendido ligeramente, del 58,9% en 2001 al 58,2% en 2002. Por otra parte, los productores de hierro nodular han logrado una cuota del 34,3% de la producción total de 2002, lo que supone un incremento del 0,5 por ciento respecto a 2001. Los productores de maleables aumentaron su cuota del 1,1% de 2001 al 1,3% en 2002, mientras que la cuota del acero respecto al total final se sitúa en el 5,8% en 2002 (5,9% en 2001).

Tabla 1.2. Producción europea de fundición no férrea (en kilotoneladas) [168, CAEF, 2002], [202, TWG, 2002]

País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Austria	90,4	92,4	105,9	113,3	116,2	7,0	2,6
Bélgica	25,3	23,8	27,2	26,3	26,7	-3,3	1,6
República Checa	44,8	48	57,7	58,1	59,6	0,7	2,6
Dinamarca	1,7 ^a	4	4	4,8	4,6	20,0	-3,2
Estonia	s.d.	s.d.	0	0	0		
Finlandia	10,5	10	10	10	9,7	0,0	-3,3
Francia	338,2	343,8	373,9	394,7	390,3	5,6	-1,1
Alemania	783,9	777	842,1	849,6	845,8	0,9	-0,4

.../...

.../...

País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Gran Bretaña	121 ^a	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.		
Hungría	24,8	35	44,8	58,4	68,3	30,4	16,9
Irlanda ^b	25,8	25,8	26	26,6	s.d.	2,3	
Italia	832,3	832,1	959,1	960	979,7	0,1	2,1
Países Bajos	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.		
Noruega	22,2	25,2	26,4	30,9	26,7	17,0	-13,5
Polonia	66,5	84	84	72,2	76,3	-14,0	5,7
Portugal	17,5	21,2	22,6	25,4	25,6	12,4	0,6
Eslovaquia	s.d.	s.d.	s.d.	7,6	s.d.		
Eslovenia	15,9	17,3	23,6	24,8	s.d.	5,1	
España	140,7	153,6	121,1	142,1	149,9	17,3	5,5
Suecia	51,8	55,7	58,5	53,3	52,9	-8,9	-0,8
Suiza	22,3	22,9	25,1	24,1	21,1	-4,0	-12,3
Total	2.636	2.572	2.812	2.481	2.853		
Total final ^c				2.602	3.033		

a) Sólo aluminio.

b) Sólo producción de chapa de plomo.

c) Total final calculado teniendo en cuenta las cifras más recientes para los años en que no se dispone de datos.

La producción de aleaciones de metales no férreos continúa dominada por el moldeo de metales ligeros, cuya cuota asciende al 75,1%, a pesar de haber experimentado un descenso de 3,5 puntos respecto al año anterior. La cuota de aleaciones de cobre descendió del 10,1 al 9,8%, y la de los productores de aleaciones de zinc decreció igualmente del 8,7 al 7,3%. La diferencia corresponde a metales no férreos varios y procesos no detallados en las estadísticas.

La Tabla 1.3 y la Tabla 1.4 contienen información sobre el número de fundiciones. Los datos muestran que se ha producido un descenso general en el número de fundiciones desde 1998, con una pérdida anual de instalaciones existentes en torno al 5%. Esta caída también se observa en el número de empleados (Tabla 1.5 y Tabla 1.6).

Tabla 1.3. Número de fundiciones (unidades de producción) de hierro, acero y hierro maleable [168, CAEF, 2002], [202, TWG, 2002]

País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Austria	28	26	25	24	41	-4,0	70,8
Bélgica	40 ^a	25	24	21	21	-12,5	0,0
Rep. Checa	s.d.	s.d.	s.d.	140	143		2,1
Dinamarca	s.d.	s.d.	12	12	12	0,0	0,0
Estonia	s.d.	s.d.	1	1	1	0,0	0,0
Finlandia	19	23	20	19	19	-5,0	0,0

.../...

MTDs para forja y fundición

.../...

País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Francia	169	167	167	163	159	-2,4	-2,5
Alemania	324	310	299	288	273	-3,7	-5,2
Gran Bretaña	228 ^b	214 ^b	198 ^b	188 ^b	179 ^b	-5,1	-4,8
Hungría	34	34	32	33	s.d.	3,1	
Irlanda	s.d.	s.d.	s.d.	1	s.d.		
Italia	310	307	293	291	281	-0,7	-3,4
Países Bajos	22	s.d.	s.d.	28	s.d.		
Noruega	12	12	12	11	11	-8,3	0,0
Polonia	234	230	230	220	190	-4,3	-13,6
Portugal	62	61	61	61	61	0,0	0,0
Eslovaquia	s.d.	s.d.	s.d.	12	s.d.		
Eslovenia	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.		
España	224	221	105	102	98	-2,9	-3,9
Suecia	48	49	49	49	50	0,0	2,0
Suiza	23	23	23	22	20	-4,3	-9,1
Total	1.777	1.702	1.551	1.686	1.559		
Total final ^c			1.732	1.686	1.633		

a) Sólo miembros.

b) Sin fundición de acero.

c) Total final calculado teniendo en cuenta las cifras más recientes para los años en que no se dispone de datos.

Tabla 1.4. Número de fundiciones (unidades de producción) de metales no férreos [168, CAEF, 2002], [202, TWG, 2002]

País	Total		Inyección		Fundición ligera (otras)		Fundición de aleaciones de metal pesado (otras)	
	2001	2002	2001	2002	2001	2002	2001	2002
Austria	63	61	20	21	28	25	15	15
Bélgica	12	10	3	3	6	5	3	2
Rep. Checa	58	63	39 ^a	40	s.d.	s.d.	s.d.	23
Dinamarca	8	8	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	
Estonia	0	0	0	0	0	0	0	0
Finlandia	22	25	4	6	11	12	7	7
Francia	288	283	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Alemania	414	400	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Gran Bretaña	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Hungría	78	s.d.	23	s.d.	35	s.d.	20	s.d.

.../...

.../...

País	Total		Inyección		Fundición ligera (otras)		Fundición de aleaciones de metal pesado (otras)	
	2001	2002	2001	2002	2001	2002	2001	2002
Irlanda	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Italia	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Países Bajos	10	13	3	3	7	6		4
Noruega	290	280	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Polonia	67	54	38	32	12	9	17	13
Portugal	7	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Eslovaquia	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
Eslovenia	55 ^b	57	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
España	84	84	43	s.d.	29	s.d.	12	s.d.
Suecia	49	48	15	14	23	23	11	11
Total	1.505	1.386	149	119	151	80	85	75

a) Incluida toda la fundición ligera.

b) Sólo miembros.

Tabla 1.5. El empleo en la industria de la fundición de hierro, acero y hierro maleable [168, CAEF, 2002], [202, TWG, 2002]

País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Austria	3.465	3.314	3.342	3.936	3.067	17,8	-22,1
Bélgica	2.823	2.299	3.260	1.847	1.936	-43,3	4,8
Rep. Checa	s.d.	s.d.	s.d.	17.536	14.847		-15,3
Dinamarca	s.d.	s.d.	1.481	1.393	1.290	-5,9	-7,4
Estonia	s.d.	s.d.	125	133	129	6,4	-3,0
Finlandia	2.326	2.058	2.027	2.090	2.045	3,1	-2,2
Francia	26.407 ^a	25.714	25.613	24.871	24.651	-2,9	-0,9
Alemania	46.944	45.157	44.896	44.796	42.748	-0,2	-4,6
Gran Bretaña	24.000 ^b	20.000 ^b	18.000 ^b	16.500 ^b	15.900 ^b	-8,3	-3,6
Hungría	3.485	3.285	3.175	2.734	s.d.	-13,9	
Irlanda	502	503	509	309	s.d.	-39,3	
Italia	22.050	22.200	22.100	21.400	20.630	-3,2	-3,6
Países Bajos	2.462	2.122	2.119	2.148	1.830	1,4	-14,8
Noruega	1.864	1.706	1.730	1.754	1.564	1,4	-10,8
Polonia	33.600	28v500	26.800	26.370	24.500	-1,6	-7,1
Portugal	2.649	2.800	2.782	2.780	2.710	-0,1	-2,5

.../...

MTDs para forja y fundición

.../...

País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Eslovaquia	s.d.	s.d.	s.d.	1.925	s.d.		
Eslovenia	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.		
España	13.860	14.040	11.803	11.006	11.385	-6,8	3,4
Suecia	3.650	3.650	3.650	3.800	3.800	4,1	0,0
Suiza	2.400	2.300	2.400	2.400	1.930	0,0	-19,6
Total	192.487	179.648	175.812	189.728	174.962		
Total final ^c			195.273	189.728	179.930		

a) Interrupción de la continuidad de la serie.

b) Sin fundición de acero.

c) Total final calculado teniendo en cuenta las cifras más recientes para los años en que no se dispone de datos.

Tabla 1.6. El empleo en la industria de la fundición no férrea [168, CAEF, 2002], [202, TWG, 2002]

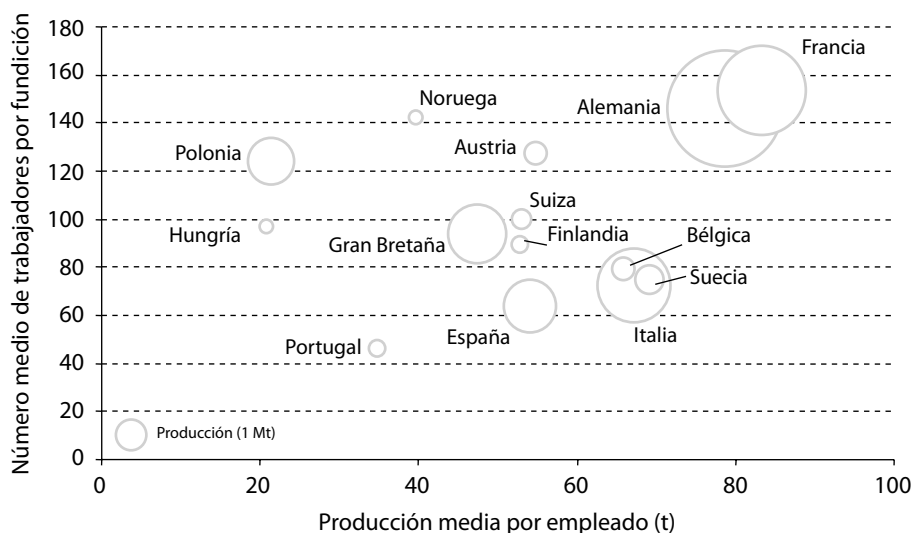
País	1998	1999	2000	2001	2002	2000:2001	2001:2002
						% variación	
Austria	4.029	4.179	4.349	4.585	4.398	5,4	-4,1
Bélgica	1.824	803	800	s.d.	558		
Rep. Checa	s.d.	s.d.	s.d.	5.083	5.374		5,7
Dinamarca	s.d.	s.d.	377	372	349	-1,3	-6,2
Estonia	s.d.	s.d.	0	0	0		
Finlandia	708	744	884	718	730	-18,8	1,7
Francia	17.926	17.821	17.651	17.932	17.720	1,6	-1,2
Alemania	32.000	33.000	33.000	34.500	34.390	4,5	-0,3
Gran Bretaña	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.		
Hungría	3.208	3.941	5.503	4.702	s.d.	-14,6	
Irlanda	70	70	70	70	s.d.	0,0	
Italia	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.		
Países Bajos	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.		
Noruega	1.271	1.411	1.483	1.491	1.307	0,5	-12,3
Polonia	4.433	6.500	6.200	4.130	4.100	-33,4	-0,7
Portugal	1.200	1.230	1.280	1.380	1.350	7,8	-2,2
Eslovaquia	s.d.	s.d.	s.d.	845	s.d.		
Eslovenia	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.		
España	5.650	5.620	4.810	5.034	4.994	4,7	-0,8
Suecia	3.700	3.700	3.700	3.700	3.700	0,0	0,0
Suiza	1.900	2.000	2.100	2.200	1.900	4,8	-13,6
Total	77.919	81.019	82.207	86.742	80.870		
Total final ^c			88.135	87.300	86.487		

a) Sólo plomo.

b) Total final calculado teniendo en cuenta las cifras más recientes para los años en que no se dispone de datos.

Las anteriores tablas muestran que los niveles de producción europea se mantienen relativamente estables o aumentan ligeramente, si bien la producción se obtiene actualmente con menos unidades y menos empleados. Este hecho puede deberse a las mejoras continuas y a la automatización de las unidades de fundición. La relación existente entre tamaño, producción y empleo de las unidades queda bien ilustrada en la Figura 1.1. En ella puede observarse cómo los grandes productores de Europa occidental (Alemania, Francia) consiguen una mayor productividad con menos personal. Las unidades que concentran más trabajo intensivo están situadas en el este y el sur de Europa (Polonia, Hungría, Portugal).

Figura 1.1.
Productividad de las fundiciones férreas de varios países europeos
El tamaño del círculo representa la producción total de un país concreto



La fundición de metales es una actividad muy antigua que se remonta más allá del tercer milenio antes de Cristo. En desarrollo de la industria europea de la fundición va unido al de las industrias del metal y la automoción. Las actuales fundiciones normalmente iniciaron sus actividades a principios del siglo XX. Inicialmente estaban situadas en la afueras de las localidades, pero a medida que los pueblos y ciudades crecieron fueron absorbiéndolas y se encontraron en medio de la población. La industria de la fundición se compone básicamente de pymes; el 80% de las empresas tienen menos de 250 empleados. Puesto que los productos de las fundiciones son semielaborados, las empresas suelen situarse cerca de sus clientes.

1.1.2. Mercados de la fundición

Los principales mercados abastecidos por la industria de fundición son el de la automoción, la ingeniería general y la construcción. Las cuotas de mercado relativas de estos sectores pueden observarse en la Figura 1.2. La gran dependencia en el sector de la automoción tiene gran influencia en las actividades del sector de la fundición y afecta a aspectos como la economía, la ubicación, las normativas de calidad, las exigencias medioambientales, los nuevos desarrollos, etc. Un ejemplo de esta interdependencia es que la tendencia por parte de la industria de la automoción hacia vehículos más ligeros se ha traducido en un crecimiento de la demanda (y, por tanto, del mercado) de moldes de aluminio y magnesio en la industria de la fundición, lo que supondrá un mayor crecimiento de estos sectores.

Las cuotas de mercado varían en función del tipo de metal, como puede verse en los datos correspondientes al mercado español de la fundición, en la Figura 1.3 y la Figura 1.4. El sector de la automoción absorbe más del 60% de toda la fundición de hierro de los centros nacionales. El acero, por otra parte (incluido el de baja aleación, el inoxidable y otras aleaciones) se utiliza para fabricar piezas de máquinas y válvulas, por lo que abastecen a mayor número de sectores. De hecho, la principal cuota del mercado de válvulas corresponde a la fundición de acero inoxidable.

La abertura de Europa hacia el Este ha llevado a los principales productores europeos a mostrar un interés creciente en las actividades de fundición existentes en países como Polonia, la República Checa o Hungría. Algunas grandes empresas europeas han invertido en esas regiones. Respecto a los países del este de Europa,

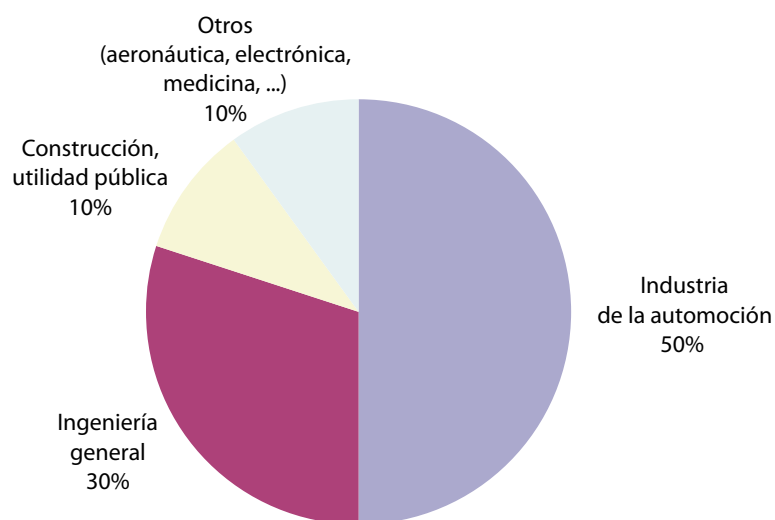


Figura 1.2.
Cuotas de mercado
sectorial relativas

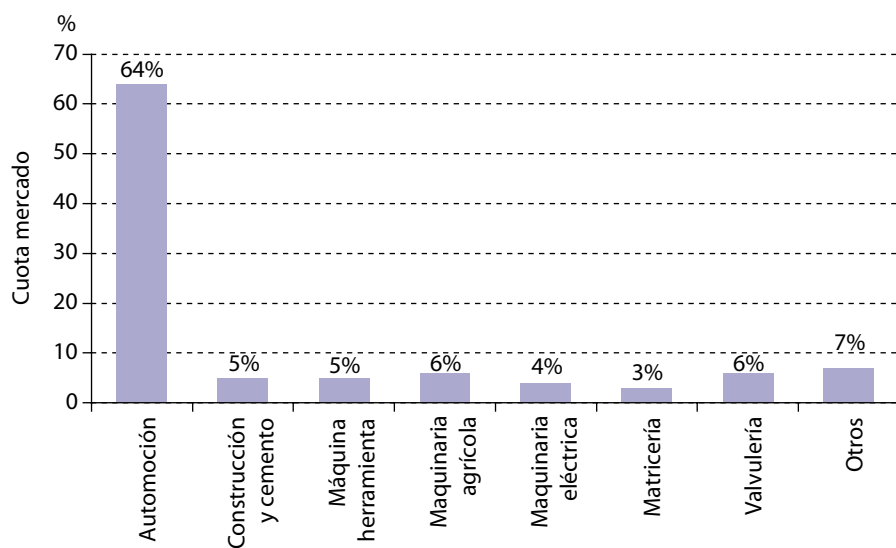


Figura 1.3.
Cuotas de mercado de
la fundición de hierro
(mercado español)
[108, FEAF, 1999]

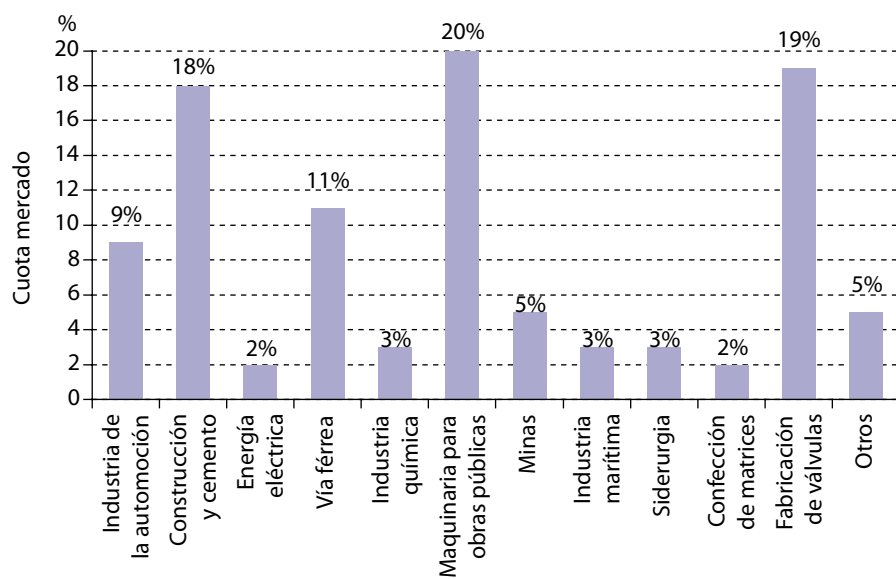


Figura 1.4.
Cuotas de mercado de
la fundición de acero
(mercado español)
[108, Feaf, 1999]

la abertura de sus mercados, junto con la entrada de inversiones extranjeras, ha permitido la implantación de nuevas técnicas que han incrementado la producción y reducido su impacto sobre el medio ambiente. Considerando los bajos costes salariales de esos países, su fuerza competitiva se basa en las fundiciones generales, no especializadas, dedicadas a la producción de grandes piezas, así como en las fundiciones que producen numerosos tipos de productos. Para competir en el mercado mundial, las fundiciones de Europa occidental se centran en la actualidad en sus habilidades tecnológicas, en seleccionar determinados nichos de mercado que requieren productos complejos y muy precisos, trabajos de calidad especiales o trabajos que requieren una entrega rápida o justo a tiempo.

1.1.3. Tipos de fundiciones

Además de por los tipos de metal (férreos y no férreos), las fundiciones se clasifican en buena medida por el tamaño de las coladas y las series. Las fundiciones de serie pequeñas se han venido a llamar «fundiciones generales», mientras que las que producen grandes series se han llamado «fundiciones en serie». Pero también podrían clasificarse según el tipo de metal fabricado; es decir, en fundiciones «férreas» y «no férreas». Existen grandes diferencias entre una fundición de zinc dedicada a producir grandes series de carrocerías para coches de juguete y una fundición de hierro que fabrica alojamientos de rotor para turbinas de viento. Las fundiciones utilizan distintos grados de automatización dependiendo del tamaño de la serie y de la repetitividad de la tarea. Por lo que respecta a las técnicas empleadas, las fundiciones se distinguen por el tipo de horno utilizado para la fusión (cubilote, eléctrico, rotativo...) y el tipo de molde (de arena, por presión, etc.). En el capítulo 2 se expone todo ello con más detalle.

1.2. Consideraciones medioambientales

La industria de la fundición desempeña un importante papel en el reciclaje de metales. Las chatarras de acero, hierro y aluminio pueden refundirse y dar lugar a nuevos productos. Los posibles efectos medioambientales negativos de las fundiciones son consecuencia de la existencia de un proceso térmico y el empleo de aditivos minerales. El impacto medioambiental del proceso de fundición, pues, tiene que ver con los gases de salida y residuales y con la reutilización o la eliminación de los residuos minerales.

1.2.1. Atmósfera

Las emisiones nocivas procedentes de la fusión y el tratamiento de los metales dependen del uso de aditivos y combustibles o bien de las impurezas existentes en la alimentación. El empleo de coque como combustible, el calentamiento de crisoles con gas o quemadores alimentados con fueloil pueden generar emisiones de productos de combustión. También el uso de aditivos en los procesos de tratamiento del metal da lugar a productos de reacción. La presencia de impurezas (aceite, pintura, etc.) en la chatarra refundida puede provocar potencialmente la generación de productos de combustión incompleta o de recombinaciones, y partículas de polvo. Además, las partículas generadas pueden contener metales y óxidos metálicos. Durante la fusión se da la evaporación de elementos con una presión de vapor elevada al escaparse del baño partículas de metal pequeñas. Estas partículas metálicas también se producen durante las operaciones de rectificación y acabado.

En la producción de moldes y machos se utilizan varios aditivos aglomerantes de la arena. Durante la aglomeración de la arena y el llenado de cucharas se generan productos de reacción y descomposición, tanto orgánicos como inorgánicos. La generación de productos de descomposición prosigue durante las operaciones de colada, enfriamiento y desmoldeo.

La liberación partículas afecta a todas las fases y operaciones del proceso de fundición. El polvo se genera durante la producción y el procesamiento de moldes y machos de arena, así como durante el acabado de las piezas (procedentes de moldes perdidos o permanentes).

Durante el proceso de fundición las emisiones a la atmósfera no se limitan a un único punto o puntos fijos. Las fuentes de emisión son varias (por ejemplo, coladas calientes, arena, metales calientes). Por ello, una de las cuestiones cruciales en la prevención de las emisiones es, además de tratar los gases de salida y residuales, lograr capturarlos.

1.2.2. Residuos

El moldeo en arena implica la utilización de grandes volúmenes de arena, con una relación entre arena/metal líquido que normalmente se sitúa entre 1:1 y 20:1. Al final del proceso de moldeo la arena utilizada puede regenerarse, reutilizarse o desecharse. Los residuos minerales adicionales como la escoria se generan en la fase de fusión, al extraer las impurezas de la colada, y su reutilización o eliminación también deberían tomarse en consideración.

1.2.3. Energía

Dado que las fundiciones utilizan procesos térmicos, la eficiencia energética y la gestión del calor generado son aspectos medioambientales importantes. A pesar de todo, a causa del elevado grado de transporte y manipulación del elemento calorífero (es decir, el metal) y de su lento enfriamiento, la recuperación del calor no siempre es sencilla.

1.2.4. Agua

En la mayoría de fundiciones la gestión del agua implica la existencia de un circuito interno por el que circula el agua, si bien la mayor parte de ésta sigue evaporándose. El agua suele utilizarse en los sistemas de enfriamiento de hornos eléctricos (de inducción o de arco) o de cubilotes. Por lo general, el volumen final de agua residual es muy pequeño. En el llenado por (alta) presión se forma una corriente de agua de desecho que debe tratarse para extraerle los compuestos orgánicos (fenol, aceite) antes de su eliminación.

Capítulo 2.

Técnicas y procesos de las fundiciones

2.1. Perspectiva general

2.1.1. El proceso de fundición

En la Figura 2.1 siguiente puede observarse un diagrama de flujo general del proceso de fundición, diferenciando las principales etapas:

- fusión y tratamiento del metal: área de fundición;
- preparación de moldes: área de moldeo;
- llenado del molde, enfriamiento y solidificación y posterior desmoldeo: área de colada;
- acabado de la pieza en bruto: área de acabado.

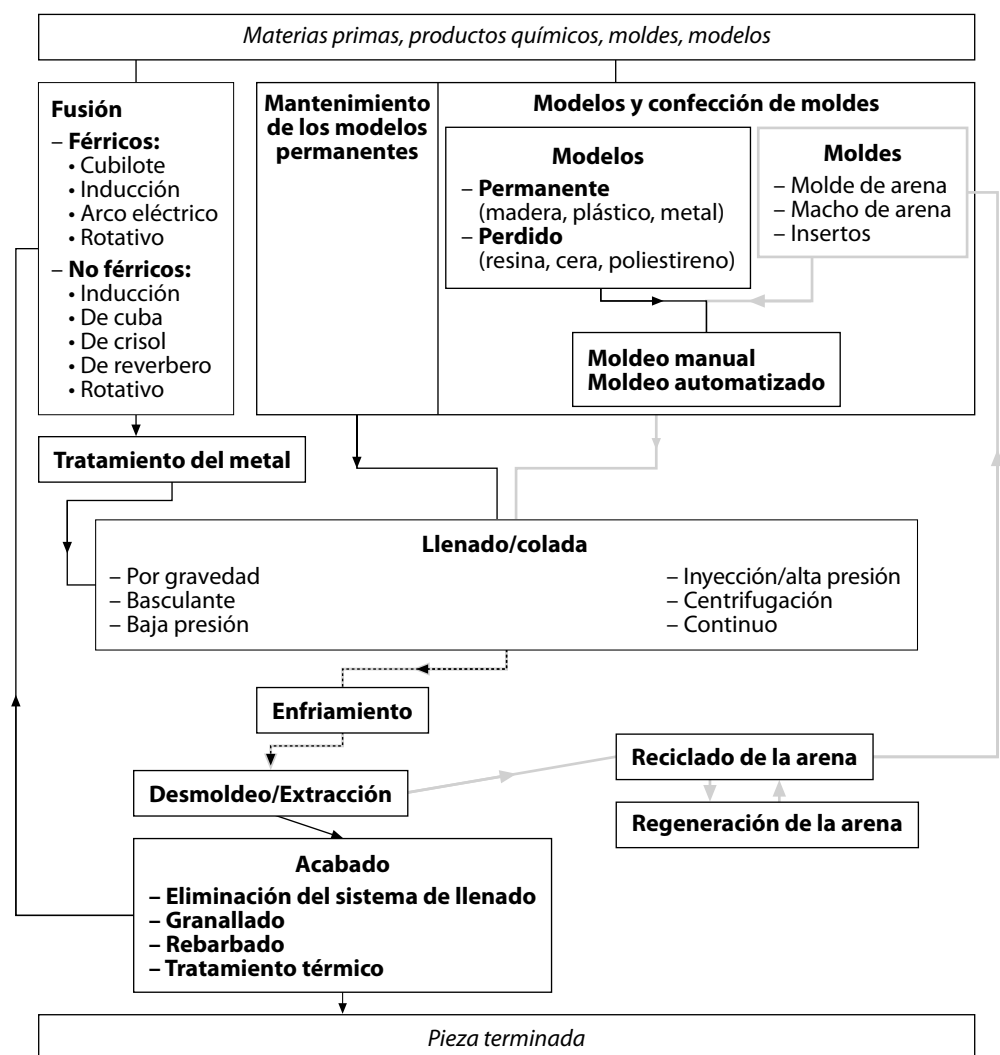


Figura 2.1.
El proceso
de fundición

El proceso de fundición se inicia al fundir la chatarra (seleccionada teniendo en cuenta su composición química) o los lingotes y finaliza al obtener la pieza moldeada. Normalmente se obtienen componentes que requieren tratamientos o montajes adicionales para obtener el producto final.

En la fase de moldeo se establece una diferencia básica entre los moldes de tipo permanente y los perdidos. Las fundiciones que utilizan los primeros adquieren los moldes de metal (matrices) fuera pero normalmente disponen de un taller interno de reparación y mantenimiento de moldes. Las fundiciones que utilizan moldes perdidos a menudo compran modelos de madera, plástico o metal (para el diseño de los moldes) y cuentan también con un taller interno de reparación y mantenimiento de modelos. Los moldes, machos y modelos perdidos normalmente se producen en el mismo proceso de fundición.

Tradicionalmente, la principal distinción en el sector ha sido entre fundiciones férreas y no férreas. Ello se debe, esencialmente, a que los procesos utilizados en ambos casos son distintos. Las fundiciones no férreas a menudo utilizan técnicas de inyección, ya que les permite obtener un mejor acabado de la superficie, un aspecto importante en numerosas aplicaciones de aluminio y latón. A causa de la elevada velocidad de enfriamiento se producen piezas de una gran resistencia mecánica. Sin embargo, esta técnica no permite fabricar piezas de gran tamaño o macizas, para las que se requieren técnicas de moldeo en arena. Las técnicas que utilizan arena se utilizan en fundiciones no férreas para la confección de productos en series no muy grandes. Los metales no férreos (y sus aleaciones) tratados en este documento son los siguientes:

- aluminio
- magnesio
- cobre
- zinc
- plomo.

Las fundiciones férreas normalmente utilizan técnicas de molde perdido. Gracias a su gran rigidez y resistencia, las aleaciones de hierro tienen más aplicaciones que las aleaciones no férreas. El tamaño de las piezas puede ser casi ilimitado. Los metales férreos tienen un punto de fusión más elevado y requieren varias técnicas de fusión. Los metales y las aleaciones férreos tratados en este documento son los distintos tipos de hierro colado (que pueden clasificarse en función de sus propiedades o por el tipo de grafito) y acero moldeado.

También se analizarán las superaleaciones con elevado contenido de elementos de aleación, como por ejemplo el níquel.

Las fundiciones utilizan sistemas mecanizados y automatizados en función de la repetitividad necesaria y el tamaño de la serie. Las instalaciones más flexibles suelen ser las fundiciones generales, donde se producen piezas de distinto tipo en pequeñas cantidades (<100). Por lo general, estas fundiciones utilizan técnicas de moldeo manual y moldes de arena aglomerados con resina. Los hornos de fusión trabajan de forma discontinua para facilitar el cambio de aleación y suelen ser de inducción o rotativos.

Para la producción de series de tamaño medio (<1.000 piezas), se emplean líneas de colada y moldeo mecanizado, lo que implica la utilización de arena verde, que permite confeccionar rápidamente los moldes. El tamaño de la máquina que fabrica los moldes limita las dimensiones máximas de las piezas obtenidas. El llenado del molde puede realizarse manualmente o mediante una máquina de llenado. Algunos procesos auxiliares, como la preparación de la arena, se realizan de forma semiautomatizada con control remoto. Se utilizan tanto los hornos continuos (cubilote, de cuba) como discontinuos. Para las aleaciones no férreas se usan técnicas de inyección.

Las series grandes de pequeñas piezas se producen mediante moldeo sin caja en arena verde. En las fundiciones férreas puede utilizarse para determinadas aplicaciones la inyección si la calidad de la pieza final así lo requiere, aunque en realidad la técnica sólo tiene una implantación limitada. La principal diferencia respecto a las series de tamaño medio es la mayor mecanización del acabado, el control de calidad y el montaje de moldes. Por otra parte, el proceso de llenado en fundiciones de aleaciones no férreas suele automatizarse aún más, sobre todo en el caso de talleres de inyección.

Algunas técnicas de colada específicas, como por ejemplo el colado por centrifugación, en moldes completos o colada continua, se utilizan en función del tipo de producto final.

2.1.2. Fusión de hierro

El hierro colado es una aleación hierro-carbono que contiene normalmente entre el 2,4 y el 4% de carbono. El contenido mínimo de carbono es del 1,8%, y también suele contener silicio, manganeso, azufre y fósforo, en distintas proporciones. Se produce hierro de calidades especiales con diferentes niveles de níquel, cromo y otros metales. A causa de su gran contenido en carbono, el hierro colado tiene un punto de fusión bajo y facilidad de colada frente al acero. Debido a su baja ductilidad no es posible emplearlo en operaciones de laminado o forja. Es posible modificar sus propiedades a través de la variación de la proporción entre carbono y silicio, de la aleación y del tratamiento térmico.

Dependiendo de la concentración y la forma del carbono (laminar, esferoidal y compacto) se obtienen distintos tipos de hierro colado, a saber:

- hierro laminar: carbono en forma de escamas;
- hierro nodular: carbono en forma esferoidal;
- hierro de grafito compacto: carbono ligado.

El hierro colado se suele clasificar asimismo por sus propiedades materiales:

- fundición gris: hierro con la superficie de fractura de color gris. Aunque hace referencia al hierro laminar, nodular y de grafito compacto, este término suele utilizarse como sinónimo de hierro laminar;
- hierro dúctil: hierro colado al que se le ha incrementado la ductilidad. Es uno de los efectos provocados por la nodulización, pero también puede referirse al hierro maleable. Este término se utiliza comúnmente como sinónimo de hierro nodular;
- hierro maleable: hierro que puede estirarse o al que se le puede dar forma con un martillo. La maleabilidad se debe al bajo contenido en carbono, que permanece en forma ligada.

El hierro colado puede fundirse en cubilotes, hornos de inducción (normalmente sin núcleo, aunque en ocasiones también pueden ser sin canal) u hornos rotativos. Los hornos eléctricos de arco apenas se utilizan para la preparación de hierro colado. La Figura 2.2 muestra los diagramas de flujo de los procesos de fusión y de tratamiento del metal correspondientes al hierro colado en los tres tipos de horno. El proceso normalmente consiste en la fusión –colada– tratamiento del metal – vaciado. Las características de la fusión y del tratamiento del metal se exponen en los siguientes apartados. El tratamiento se compone de varias fases como la desulfuración, la nodulización, la inoculación y el desescoriado. La fase de desulfuración de los cubilotes puede unirse a la nodulización, por ejemplo utilizando un proceso de nodulización que simultáneamente extraiga el azufre (por ejemplo el proceso de armadura).

Los cubilotes son los principales sistemas utilizados para refundir el hierro en Europa. De ellos se obtiene el 55% del total de toneladas de piezas fundidas de hierro de Europa occidental. En la actualidad, su dominio del mercado se ve disputado por varios motivos, entre ellos las características del gas de combustión, que requiere tratamiento. Ante la posible carga financiera que representa tener que invertir en una instalación de tratamiento de los gases de chimenea y después amortizarla, muchas instalaciones de tamaño pequeño y medio están optando por unidades de fusión eléctricas o de oxigás. Por ello, el número de cubilotes empleados en las fundiciones está disminuyendo, si bien su tamaño medio aumenta. En el mercado europeo de cubilotes se han producido grandes cambios en los últimos años, sobre todo a causa de la reestructuración de la industria del coque, que ha provocado un descenso en el número de proveedores y ha hecho necesario importar coque al continente. Otro cambio destacable es el reducido número de fabricantes de cubilotes; entre ellos, una empresa alemana domina casi en forma de monopolio el mercado de los cubilotes de viento caliente.

La mayoría de coladas de hierro producidas en serie se realizan con moldes de arena verde con machos aglomerados mediante resina. Las técnicas de aminas en caja fría y de caja caliente son las más empleadas. El proceso de moldeado en coquilla con resina (procedimiento Croning) se utiliza cuando se requiere mucha precisión y un buen acabado de la superficie. El proceso a la espuma perdida se utiliza, hasta cierto punto, para las coladas en serie; mientras que para series pequeñas se emplean moldes de arena química. Algunos procesos especiales con arena, como los moldeos en vacío y en molde completo, se utilizan para determinadas piezas de hierro. También existen algunas fundiciones férreas que emplean moldes permanentes (inyección), pero el corto tiempo de vida de los moldes de tan solo unos miles de componentes, ha hecho que el uso de moldeos férreos con estas técnicas descienda. [156, Godinot, 2001], [174, Brown, 2000]

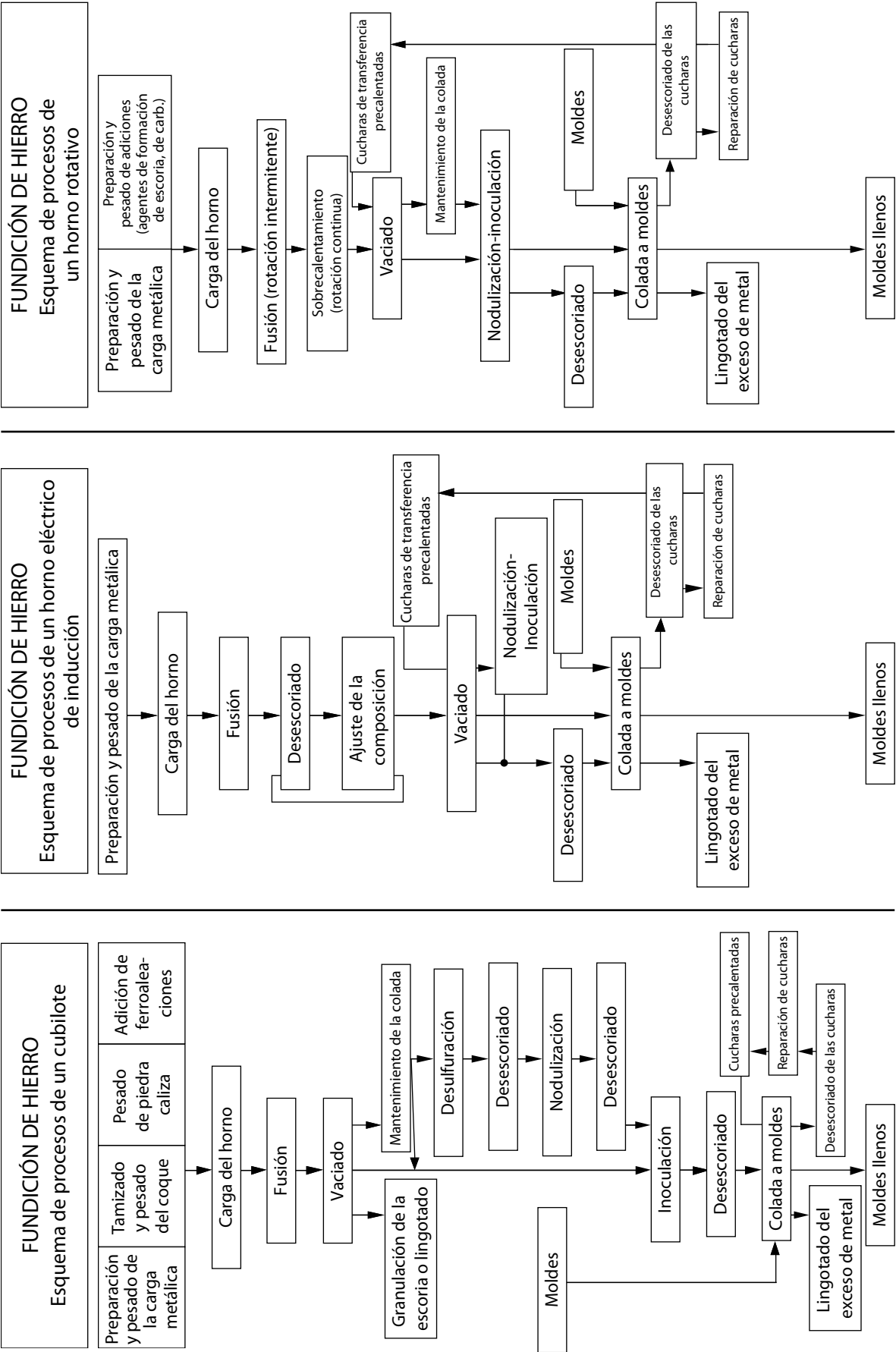


Figura 2.2. Diagramas de flujo de los procesos de fusión y tratamiento del metal del hierro colado [32, CAEEF, 1997]

2.1.3. Fusión de acero

El acero es un material cuyo contenido (masa) en hierro es mayor al de cualquier otro elemento, con un contenido de carbono inferior al 2% y que normalmente contiene también otros elementos. Ciertos tipos de aceros al cromo pueden tener más de un 2% de carbono, pero éste es el límite de corte utilizado para distinguir el acero del hierro colado [201, CEN, 2000]. El acero resulta especialmente útil porque puede trabajarse en caliente. Las aleaciones ligeras de acero contienen elementos como Mn, Cr, Ni y Mo en proporciones inferiores al 5%. El acero de alta aleación está formado por más de un 5% de elementos de aleación, por ejemplo un 12% de Cr y un 8% de Ni. También se produce acero de calidades especiales con propiedades mejoradas: mayor resistencia, mayor permeabilidad magnética, mejor resistencia a la corrosión, la fatiga o el desgaste y mejor comportamiento durante la soldadura y a bajas y altas temperaturas.

El acero suele fundirse en hornos eléctricos de arco (HEA) o en hornos de inducción sin núcleo (HI). Una vez fundido, el caldo se puede refinar (a través de la extracción del carbono, silicio, azufre y fósforo) y desoxidar (es decir, extraer los óxidos metálicos), dependiendo del material base y de los requisitos de calidad del producto final. En la Figura 2.3 se muestran los diagramas de flujo de los procesos de tratamiento del acero moldeado en los diferentes tipos de hornos.

[32, CAEF, 1997]

2.1.4. Fusión de aluminio

Aproximadamente dos tercios del aluminio producido por las fundiciones está destinado a la industria de la automoción, es decir, a fabricantes de coches, autobuses, camiones, trenes y aviones. La necesidad de reducir el consumo de combustible y el peso de los vehículos ha aumentado el interés de la aplicación de este metal. La masa total de aluminio en los coches europeos ha llegado a doblarse entre 1990 y 2000. El uso creciente del aluminio en su principal sector destinatario ha afectado claramente al número total de piezas de aluminio producidas.

El aluminio se produce principalmente en moldes permanentes. Las proporciones relativas para las técnicas utilizadas en la fabricación de Al se muestran en la Tabla 2.1:

Tabla 2.1. Proporciones relativas para las técnicas de moldeo utilizadas en la producción de Al [143, Inasmet y CTIF, 2002], [225, TWG, 2003]

Tipo de moldeo	Proporción relativa (%)
Inyección	59
Llenado a baja presión y por gravedad	37
Moldeo en arena	3
Otros	1

En las fundiciones de aluminio se utilizan hornos de fusión de muy distinto tipo según las necesidades concretas de cada proceso. Se emplean hornos calentados directa e indirectamente mediante combustible y electricidad. Los combustibles fósiles que se emplean en la actualidad son el gas natural, el gas licuado de petróleo (GLP) y el fueloil. La mayoría de fundiciones se han decantado por el gas natural por una cuestión de comodidad. El calentamiento mediante energía eléctrica puede tener su origen en los elementos de resistencia o ser por inducción. La capacidad es uno de los parámetros más importantes en los hornos de fusión y mantenimiento. Actualmente los hornos de inducción se utilizan cuando se requiere una elevada capacidad de fusión, por ejemplo de más de 10 t/h. Los hornos de cuba y los de mantenimiento, además de los de crisol, a menudo se emplean cuando la capacidad de fusión es inferior a 5 toneladas por hora. Los hornos de crisol pequeños y medianos se suelen usar cuando es necesario un cambio fácil de aleación o si el índice de producción es bajo.

Los hornos eléctricos tienen la ventaja, en cuanto al mantenimiento, de que no producen gases residuales en el quemador además de ser capaces de mantener una temperatura homogénea en todo el volumen de material fundido con unos costes energéticos relativamente bajos.

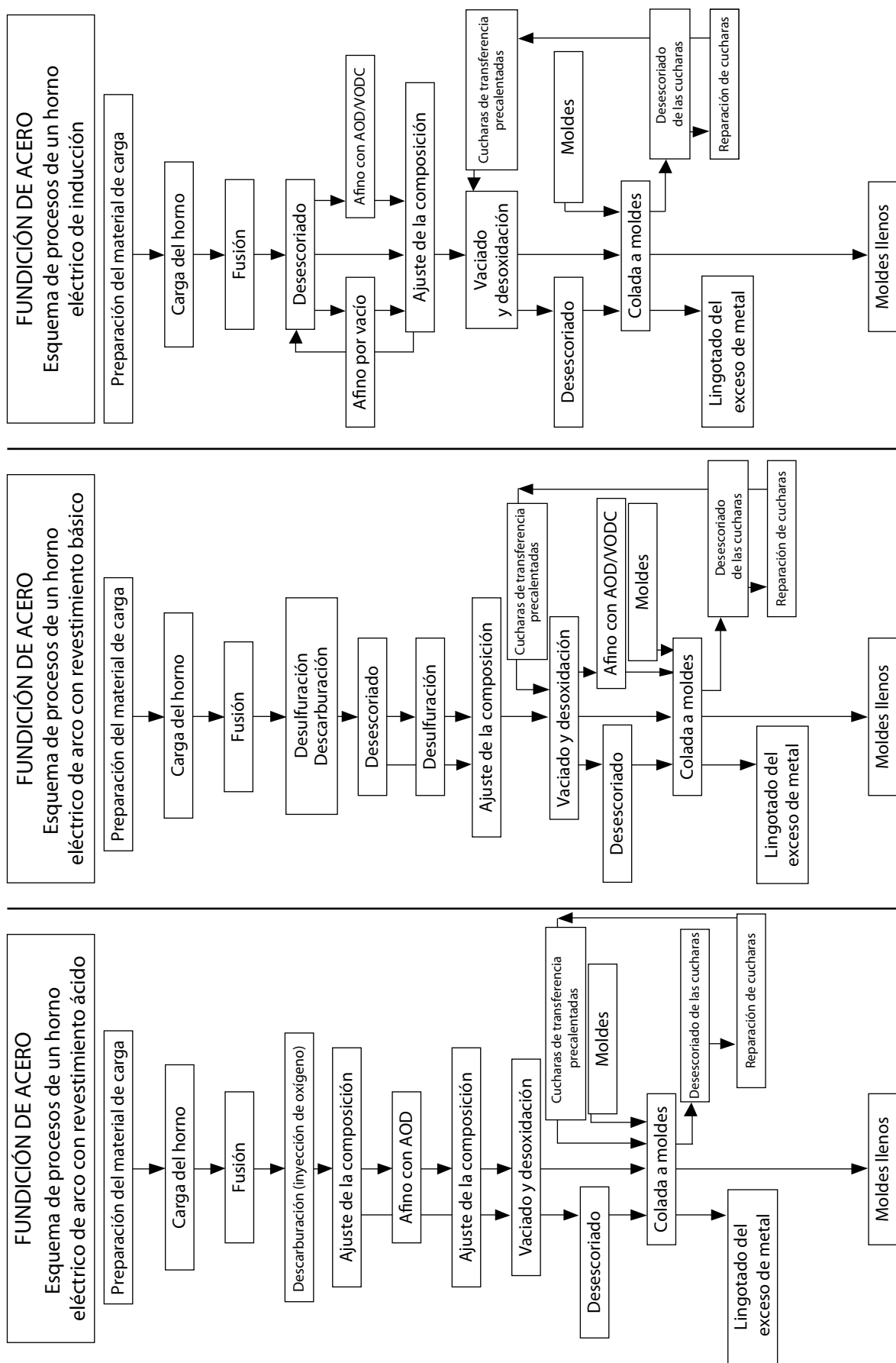


Figura 2.3. Diagramas de flujo de los procesos de fusión y tratamiento del acero [32, CAEEF, 1997]

Las fundiciones de aluminio normalmente utilizan como material de partida lingotes aleados, aunque en algunos casos el metal se suministra directamente líquido. La fusión secundaria de la chatarra de aluminio normalmente no se lleva a cabo en las fundiciones y, por tanto, queda fuera del alcance del presente documento. Se analiza en el documento de referencia sobre MTD, dentro del apartado de industrias de metales no féreos.

[48, ETSU, 1994] [148, Eurofine, 2002], [155, European IPPC Bureau, 2001]

2.1.5. Fusión de magnesio

Las piezas de aleación de magnesio se usan en la industria aeroespacial y de la automoción, así como en aplicaciones electrónicas. Su principal ventaja radica en su ligereza; las aleaciones de magnesio suelen presentar una densidad 1,8 g/ml en comparación con los 2,7 g/ml de las aleaciones de aluminio. El aluminio es el principal elemento aleado en las coladas de magnesio; estando también presentes el zinc y el manganeso, pero en pequeñas proporciones. La inyección es la técnica de moldeo más utilizada por su baja temperatura de colada (650 – 700 °C); en ella se emplean tanto máquinas de cámara caliente como fría. El moldeo en arena también se utiliza, pero en menor medida. Los moldes de magnesio pueden tener las paredes más finas que los de aluminio, pero su uso está limitado a causa de problemas de rigidez. Las paredes más finas permiten reducir sustancialmente el peso de los componentes, compensando así el mayor coste de aleación por kilogramo. Las coladas por gravedad y en arena también se emplean, sobre todo en moldeos de tensiones altas. El empleo de moldeos de aleación de magnesio en los componentes para la industria de la automoción se está extendiendo rápidamente; algunos vehículos contienen actualmente entre 10 y 20 kg de piezas de Mg. Se usa en especial en algunos componentes como soportes de los paneles de instrumentos, viguetas transversales de coches, sistemas de tracción y estructuras de los asientos.

Las aleaciones de magnesio fundido atacan el revestimiento de ladrillo y refractarios de los hornos y generan contaminación nociva de silicio, por ello se utilizan crisoles de acero. El hierro también es ligeramente soluble en magnesio, pero sus efectos son mucho más perjudiciales aún que los del silicio. La chatarra se suele limpiar y, a ser posible, granallar, para extraer cualquier partícula de arena adherida y como medida preventiva adicional frente a la adherencia del silicio. Para evitar el uso de cucharas, siempre que es posible se vierte la aleación fundida directamente del crisol.

Las aleaciones de magnesio se oxidan muy fácilmente, por lo que se funden bajo una cobertura (de flujo limpiador o gas) con el fin de evitar pérdidas por oxidación e inclusiones. Además, se utilizan polvos inhibidores para proteger el metal descubierto durante el mantenimiento y la colada; también se añaden a la arena de moldeo para impedir reacciones químicas. La fusión sin fundente de las aleaciones de Mg requiere protección adicional de la colada, para la que se utiliza hexafluoruro de azufre (SF_6), que forma una película líquida protectora sobre el magnesio líquido, evitando así la oxidación. Se utiliza a bajas concentraciones (<0,3 vol. %) en forma de mezcla con aire o con aire/ CO_2 . El SF_6 es un gas de efecto invernadero considerado nocivo para la atmósfera e incluido en el protocolo de Kioto, el cual prevé su minimización. En Austria y Dinamarca se han aprobado normativas que prohíben el uso de SF_6 en el año 2003 y 2006, respectivamente.

Las aleaciones de magnesio pueden someterse a refinado del grano mediante la inoculación con materiales de carbono. Antiguamente este proceso se llevaba a cabo con hexacloroetano, pero desde el 1 de julio de 2003 está prohibido su uso en toda Europa para garantizar una mejor protección medioambiental y por motivos de salud y seguridad, tanto en el caso de las aleaciones de magnesio como de aluminio.

[175, Brown, 1999], [225, TWG, 2003]

2.1.6. Fusión de cobre

El cobre da lugar a varios grupos de aleaciones, siendo el elemento principal en cada uno de ellos. A continuación se definen brevemente algunos de ellos:

- *Cobres de alta conductividad*: Se utilizan principalmente por su elevada conductividad eléctrica y térmica. Entre sus aplicaciones destacan las toberas para hornos con inyección de aire y cubilotes de viento caliente, pinzas de electrodos con enfriamiento por agua, conmutadores de alta tensión, etc.

- *Latones*: Son aleaciones de Cu-Zn con el zinc como principal elemento aleado. Son fáciles de colar, presentan una excelente facilidad de mecanizado y buena resistencia a la corrosión atmosférica y por agua dulce. Su uso está muy extendido en la en fontanería. Los latones de gran resistencia a la tracción suelen ser de alta aleación y se utilizan en la ingeniería marina. Se obtienen tanto a partir de moldes de arena como de tipo permanente.
- *Bronce al estaño*: Aleación de Cu-Sn con el estaño como principal elemento aleado. El cobre al estaño tiene un contenido en estaño del 10 – 12%, y las piezas obtenidas resultan más caras que las de latón. Presenta una elevada resistencia a la corrosión siendo apropiado para manipular aguas ácidas, agua de alimentación de caldera, etc. Las aleaciones con alto porcentaje se utilizan en aplicaciones que requieren alta resistencia al desgaste. Para la producción de bronce al estaño se utilizan las técnicas de moldeo en arena y centrifugado.
- *Bronce fosforoso*: Aleación de Cu-Sn a la que se le añade entre un 0,4 y un 1,0% de P. Es más resistente que el bronce al estaño, pero menos dúctil. Se utiliza en cojinetes donde la carga y velocidad de funcionamiento son altas y en engranajes como por ejemplo ruedas helicoidales.
- *Bronce al plomo*: Aleación de Cu-Sn-Pb. Se utiliza casi exclusivamente en cojinetes con cargas y velocidades moderadas.
- *Bronce de cañón*: Aleación de Cu-Sn-Zn-Pb. Es una aleación ideal para el moldeo en arena. Tiene buenas propiedades generales de colada, facilidad de mecanizado y resistencia, además de una buena resistencia a la corrosión. Se utiliza en aplicaciones complejas, estancas a la presión, como válvulas y bombas. También se usa en cojinetes con cargas y velocidades moderadas.
- *Cuproaluminio*: Aleación de Cu-Al con el Al como principal elemento aleado. Combina alta resistencia y gran resistencia a la corrosión. Sus aplicaciones van desde la decoración arquitectónica hasta elementos de ingeniería sometidos a gran esfuerzo. Tiene muchas aplicaciones marinas, por ejemplo hélices, bombas o válvulas. También se emplea para la fabricación de herramientas sin chispa. Se fabrica a partir de las técnicas de moldeo del aluminio.
- *Cuproníquel*: Aleación de Cu-Ni, con el Ni como principal elemento aleado. Se utiliza, por ejemplo, para aplicaciones marinas, para sistemas de canalización en condiciones adversas.
- *Aleación cobre berilio*: El berilio se produce en forma de aleación de cobre-berilio para la producción de piezas que requieren resistencia a la corrosión y excelentes características mecánicas, por ejemplo pistones de inyección de máquinas de inyección, piezas de precisión para la industria eléctrica y mecánica, en la fabricación de relojes y herramientas y en instrumentos de medición. Se utilizan dos tipos de aleaciones: de cobre-berilio con un 2% de Be y de cobre-cobalto-berilio con un 0,5% de Be. Existe cierta tendencia a reducir o excluir el berilio en las aleaciones a causa de su carácter carcinogénico. El moldeo se efectúa en moldes permanentes y por inyección o por gravedad. Para la fabricación de piezas de precisión se utiliza la técnica de moldeo a la cera perdida.

[175, Brown, 1999]

2.1.7. Fusión de zinc

Para el moldeo del zinc se utiliza casi exclusivamente la técnica de inyección. En la UE se utilizan principalmente dos tipos de aleaciones, cuyas composiciones se muestran en la Tabla 2.2. también denominadas Zamac, su nombre comercial original. La base utilizada para su fabricación es zinc puro.

Tabla 2.2. Aleaciones de zinc más habituales. Contenido en %

Símbolo	Nº de aleación	Al	Cu	Mg
ZnAl ₄ Cu ₁	ZP0410	3,7 – 4,3	0,7 – 1,2	0,025 – 0,06
ZnAl ₄	ZP0400	3,7 – 4,3	0,25	0,025 – 0,06

Las aleaciones de zinc se realizan casi exclusivamente en una máquina de moldeo de cámara caliente. En algunos casos, sólo cuando se requiere una gran capacidad de producción, pueden utilizarse técnicas de fusión centralizada.

Las aleaciones de zinc tienen propiedades materiales comparables a las del aluminio. Las principales diferencias son el punto de fusión más bajo y la densidad más alta de las aleaciones de zinc ($6,7 \text{ g/cm}^3$ frente a $2,6 - 2,7 \text{ g/cm}^3$). Se suelen emplear sobre todo para la fabricación de pieza pequeña que requiera gran precisión y poco espesor de pared. Son materiales que permiten una mayor velocidad de colada proporcionando a los moldes un tiempo de vida útil 10 veces superior (de 800.000 a 1.200.000 cargas), lo que hace que sean más apropiados para grandes series (de piezas pequeñas). Las aleaciones de zinc se funden en crisoles de hierro colado calentados eléctricamente o mediante combustible y se vacían en máquinas de inyección a presión de cámara caliente. Los productos se emplean por ejemplo para componentes electrónicos y de automoción y la construcción de máquinas.

2.1.8. Fusión de plomo

El plomo es un metal pesado de bajo punto de fusión (327°C). Es relativamente blando, resistente a la corrosión y tiene la útil propiedad de autolubrificarse. Las piezas de plomo se utilizan en láminas de acumuladores, blindaje de material de rayos X, aplicaciones nucleares así como material de lastre y contrapeso. Se moldea principalmente por presión y por presión en coquilla de gravedad.

2.1.9. Fusión de superaleaciones

La composición base de las superaleaciones suele ser Ni, Ni-Fe y Co, a la que se le añaden Cr, Ti, W y Al. Inicialmente se utilizaban en aplicaciones a altas temperaturas (más de 810°C) o en medios altamente corrosivos. Las superaleaciones son distintas a las altas aleaciones (véase definiciones en el apartado 2.1.3). Por no ser el hierro su principal componente (según se define en [201, CEN, 2000]), las superaleaciones se consideran materiales no férricos. Se confeccionan en ciertas instalaciones de moldeo a la cera perdida y, en parte, en fundiciones especializadas en acero de alta aleación.

Las aleaciones con base de níquel se producen a partir de un grupo de aleaciones con composiciones químicas que normalmente superan el 50% de níquel y no llegan al 10% de hierro. Se refuerzan básicamente por precipitación intermetálica en una matriz austenítica. Las aleaciones con base de cobalto tienen un elevado contenido de Co (entre el 40 y el 70%), de Cr (más del 20%) y de W (del 7 al 15%) y se refuerzan mediante una combinación de carburos y endurecedores en base sólida.

Algunas superaleaciones, en concreto las que tienen base de Ni-Fe o Co, se funden directamente en hornos eléctricos siguiendo métodos clásicos que normalmente se utilizan con el acero inoxidable. Sin embargo, las superaleaciones especiales de Ni y Ni-Fe requieren moldeo por inducción en vacío para reducir la proporción de gases intersticiales (O, H, N) a un nivel mínimo. De este modo las fundiciones consiguen elevar y controlar el contenido de elementos oxidables como el Ti o el Al.

El control de los gases intersticiales y de los elementos oxidables es muy importante para las propiedades mecánicas del producto, su resistencia a la corrosión y su fiabilidad. Por lo general, a las superaleaciones se les dan formas finales complejas cuando el mecanizado resulta imposible. Ello explica que se confeccionen principalmente a través del moldeo a la cera perdida (es decir, a partir de un molde de cerámica). El producto final de la fundición suele tener unas dimensiones muy precisas y una superficie muy lisa. Algunos procesos adicionales, como la compactación isostática en caliente, pueden emplearse para eliminar la porosidad interna que aparece en las grandes coladas. En la fabricación de colectores de turbinas de gas de aviones se utiliza habitualmente la tecnología de colada direccional, gracias a la cual se eliminan los contornos de los granos y se incrementa considerablemente la resistencia del material.

Inicialmente las superaleaciones se desarrollaron para aplicaciones a altas temperaturas. Sin embargo, su campo de aplicación se está extendiendo cada vez más llegando incluso a aplicaciones a temperatura criogénica o prótesis ortopédicas y dentales. Las superaleaciones se utilizan normalmente en aviones y turbinas de gas industriales, reactores nucleares, estructuras aeronavales y aeroespaciales, producción petroquímica y aplicaciones médicas.

[202, TWG, 2002]

2.2. Confección de modelos

2.2.1. Confección de modelos generales

La confección de modelos requiere mucha maestría para lograr las tolerancias estrechas necesarias para los modelos y las cajas de machos. Es una fase de importancia crucial en el proceso de fundición, ya que las piezas obtenidas no podrán ser mejores que los modelos utilizados para formarlos. Los modelos se confeccionan con herramientas manuales o máquinas universales o mediante sistemas CAD/CAM en máquinas CNC (control numérico por ordenador). Algunos talleres de creación de modelos utilizan programas de diseño asistido por ordenador (CAD) para diseñarlos. El recorrido de la máquina cortadora se diseña por CAM (fabricación asistida por ordenador). Los datos numéricos de los ordenadores se envían a las herramientas de la máquina CNC, que procede a dar a los modelos de producción la forma adecuada. Estos sistemas asistidos por ordenador tienen una mayor precisión y consistencia dimensional que los métodos manuales.

Los materiales empleados en los modelos (Figura 2.4) y cajas de machos (Figura 2.5) suelen ser metal, plástico, madera o yeso. La cera y el poliestireno se utilizan en las técnicas a la cera y espuma perdida, respectivamente. Los fabricantes de modelos tienen a su disposición gran variedad de herramientas, entre ellas maquinaria de carpintería y de mecanizado metálico. Para unir las piezas que componen los modelos se utilizan conectores mecánicos y colas, mientras que la cera, el plástico o la masilla de poliéster se utilizan para rellenar o redondear la parte interior de las esquinas cuadradas.

[42, US EPA, 1998]



Figura 2.4.
Modelo de madera
[237, HUT, 2003]



Figura 2.5.
Cajas de machos
[237, HUT, 2003]

2.2.2. Prototipado rápido (RP)

El prototipado rápido es una técnica que permite pasar rápidamente del prototipo de un producto al prototipo moldeado. Dentro del «prototipado rápido» se incluyen todas las tareas técnicas y organizativas, desde la for-

mulación del concepto de producto hasta su fabricación. Puede utilizarse en cualquier fase de desarrollo del producto: modelos de prototipo, prototipos geométricos, prototipos funcionales o prototipos técnicos o de ventas. Todas las técnicas disponibles actualmente permiten la fabricación de piezas prototipo a partir de un diseño tridimensional. También se utilizan para la sinterización directa de arenas para la producción de moldes o machos. La técnica consiste en ir construyendo un objeto hasta convertirlo en modelo añadiendo partículas o capas de materiales como resina de polímero, cera, papel o polvo cerámico. En la Figura 2.6 puede verse un ejemplo de un modelo de cera.



Figura 2.6.
Modelo de termopolímero (cera)
en una máquina RP
[237, HUT, 2003]

El prototipado rápido se divide en cuatro fases principales:

1. creación del modelo CAD tridimensional;
2. creación de la interfaz entre el CAD tridimensional y el sistema de prototipado rápido. Por ejemplo, los datos CAD se transforman al formato de archivos STL;
3. el archivo STL se corta en finas capas transversales;
4. realización del modelo RP.

Las ventajas del prototipado rápido, especialmente de formas complejas, son las siguientes:

- menor tiempo de desarrollo y posibilidad de introducir modificaciones rápidamente durante esta fase;
- ahorro de costes, materiales y tiempo;
- detección rápida de los errores.

[202, TWG, 2002], [203, Linxe, 2002]

La Tabla 2.3 muestra un resumen de las técnicas disponibles.

Tabla 2.3. Descripción de las técnicas de prototipado rápido [203, Linxe, 2002]

Proceso	Principio	Materiales	Características especiales
Líquido – sólido	Polimerización por exposición local UV a resina fotosensible	Resinas fotosensibles Acrilatos, epóxidos	• encogimiento y deformaciones • el modelo requiere soporte
Sólido – sólido	El contorno de la capa se corta de una lámina	Papel, metales, polímeros	• sin soporte • consumo de material base
	Deposición de material con fusión térmica	ABS, cera, elastómeros	• el modelo requiere soporte
	Chorro de material	Ceras, polímeros	• el modelo requiere soporte

.../...

.../...

Proceso	Principio	Materiales	Características especiales
Polvo – sólido	Sinterizado	Metales, cerámica, arena, poliestireno, nylon, poliamida, cera	• sin soporte • porosidad • encogimiento
	Proyección de aglomerante	Alúmina	• sin soporte • porosidad

2.3. Materias primas y su manipulación

La principal vía de entrada de materias primas en las fundiciones se da en forma de lingotes, chatarra y arena. Sin embargo, hay que distinguir entre fundiciones férreas y no férreas, ya que estas últimas normalmente sólo funden retornos internos y lingotes de aleación (Figura 2.7). La re-fusión de chatarra externa normalmente se considera una actividad aparte, integrada en la producción secundaria de metal. En caso de adquirir chatarra del exterior, lo primero que se hace es someterla a un análisis espectroscópico para determinar cuál es el tipo de aleación. Las fundiciones férreas utilizan lingotes y chatarra de hierro y acero seleccionada como materiales de partida, además de los reciclados internamente. Las distintas calidades del metal se almacenan en zonas separadas para controlar mejor la alimentación del horno de fusión.



Figura 2.7.
Chatarra (izq.) y lingotes (der.) de aluminio
[237, HUT, 2003]

Parte de la materia prima, incluida la que entra en forma de trozos gruesos o polvo, los coques para cubilotes, desoxidantes y refractarios, normalmente se almacena a cubierto. Una vez suministrada, su manipulación se reduce al mínimo. Las materias en forma de polvo pueden almacenarse en silos sellados y transportados neumáticamente o bien guardarse y manipularse en bolsas selladas, como muestra la Figura 2.8.



Figura 2.8.
Transportadores neumáticos para materia prima en polvo
[237, HUT, 2003]

La arena suele suministrarse al por mayor y se descarga directamente en el silo mediante un transportador neumático, cinta transportadora o cuchara. Las arenas especiales suelen llegar en bolsas o vehículos cisterna. Las arenas utilizadas se almacenan en silos antes de su regeneración y en silos o montones para su transporte y posterior reutilización o eliminación exterior.

Los aglomerantes líquidos y los productos derivados del petróleo se suministran en tambores, contenedores de descarga o camiones cisterna. Se almacenan en sus propios contenedores de transporte o, en el caso de vagones cisterna, se descargan directamente en depósitos especiales. Los contenedores se conectan mediante conductos a la unidad de mezclado de arena/resina/catalizador. Algunos catalizadores y co-reactivos se emplean en forma gaseosa, pero también se reciben en forma líquida y se manipulan de igual modo antes de su vaporización y mezcla con el gas portador. La evaporación se produce en cerrado y se transporta por diversos métodos.

Los refractarios, agentes de desmoldeo y otros productos suministrados en pequeñas cantidades se almacenan bajo cubierto.

Los residuos sólidos gruesos, como los refractarios usados y la escoria, se amontonan por separado en una zona de almacenamiento subdividida o en cajas y se desplazan y manipulan con pequeñas carretillas elevadoras. Los residuos sólidos finos se recogen en la unidad de filtrado y se pasan a grandes bolsas o contenedores, que pueden almacenarse temporalmente a la espera de ser transportados para su eliminación. Para evitar la contaminación del suelo a causa de los distintos tipos de materiales se adoptan medidas concretas. El impacto potencial de los materiales se refleja en la Tabla 2.5.

El metal de carga introducido en los hornos de fusión se selecciona cuidadosamente y se pesa para comprobar que la composición sea la correcta. La composición se calcula a partir de la composición química media de cada componente, las pérdidas por oxidación durante la fusión y la composición final necesaria del moldeo. Los distintos elementos de la carga se combinan en el dispositivo de carga (por ejemplo, volquete de trampilla, alimentador vibrante, carro de carga) con un imán basculante que normalmente está equipado de una báscula que permite recoger la cantidad precisa.

Se pueden añadir a la carga elementos de aleación adicionales en forma de ferroaleaciones, como por ejemplo FeSi, FeMn o FeCr, o bien en forma pura (Cu, C, Ni). Sin embargo, la mayoría de aleaciones se agregan al metal fundido para evitar pérdidas metálicas por oxidación. Los elementos de aleación normalmente están presentes en las fundiciones en pequeñas cantidades, siempre almacenados en el interior de los edificios, preferentemente cerca de las instalaciones de fusión. [32, CAEF, 1997].

Tabla 2.4. Contaminación potencial del suelo a partir de las materias primas utilizadas en las fundiciones férreas [140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001], [225, TWG, 2003]

Actividad	Contaminantes	Impacto potencial
Almacenamiento de materias primas		
Almacenamiento de chatarra: externo, a menudo en el suelo	Material de chatarra suelto: metales y recubrimientos	Contaminación superficial localizada del suelo
	Derivados de petróleo, entre otros: • HAP procedentes de motores de combustión • PCB procedentes de condensadores (principalmente en la chatarra triturada, a menos que se haya procedido con éxito a la eliminación progresiva de PCB)	Contaminación del agua freática y de aguas superficiales cercanas por lixiviación
	Taladrinas: pueden estar clorados	
Líquidos en depósitos subterráneos	Derivados del petróleo, por ejemplo fueloil diesel	Contaminación de suelo y aguas superficiales por lixiviación

.../...

.../...

Actividad	Contaminantes		Impacto potencial
Manipulación, transferencia y uso de materias primas			
Aglomerantes químicos: fugas o derrames accidentales	Resinas fenólicas	Contenido en fenol libre entre 0,5 y 5%	Hidrosolubles: posible lixiviación en aguas freáticas. Rápida degradación si no llega a 400 ppm. Los derrames concentrados de gran volumen se degradan más lentamente por la toxicidad a las bacterias.
	Disolventes portadores en las resinas	p. ej. metanol, hasta el 20% vol.	Principalmente hidrosoluble, puede lixivarse a las aguas freáticas
	Resinas de uretano	Disolventes aromáticos*	Los disolventes podrían lixivarse a las aguas freáticas
	Endurecedores furánicos	Ácidos sulfónicos de tolueno, xileno, benceno	Podría lixivarse a las aguas freáticas o alterar las propiedades del suelo, p. ej. movilización de metales
	Resinas de base urea	Amoníaco	Puede lixivarse a las aguas freáticas y superficiales
	Resinas de silicato	pH alcalino	Podría lixivarse a las aguas freáticas o alterar las propiedades del suelo, p. ej. movilización de metales
Recubrimiento de moldes	Alcohol isopropílico (IPA)		Hidrosoluble: posible lixiviación en aguas freáticas.
Combustibles, productos de mantenimiento: • fugas o derrames accidentales (especialmente cerca de los puntos de abastecimiento) • eliminación deliberada en el suelo	Fueloils, diesel, gasolina con postcombustión de HAP y SO ₄ ²⁻ ; Aceites lubricantes e hidráulicos; Aceites de temple; Aceite para transformadores (PCB potenciales)		Los aceites podrían lixivarse a las aguas freáticas y superficiales. Deposición atmosférica de HAP y SO ₄ ²⁻ por la combustión de fueloil. SO ₄ ²⁻ se lixivará al perfil edafológico. Los suelos tienden a absorber HAP y PCB.

* Las fórmulas iniciales contenían HAP (principalmente naftaleno), pero se han creado nuevas fórmulas que han eliminado este contaminante.

2.4. Fusión y tratamiento del metal

La elección del horno de fusión es una fase importante del proceso de fundición. Cada tipo de horno tiene sus propios requisitos en cuanto a la alimentación y las posibilidades de aleación, lo que a su vez repercute en todo el proceso. Por otro lado, el tipo de metal que va a fundirse determina qué hornos pueden utilizarse y cuáles no. La aplicabilidad de los distintos hornos se muestra en la Tabla 2.5.

Las fundiciones de hierro requieren que el metal tenga una composición y una temperatura controladas y se suministre a una velocidad que coincida con la demanda variable de la línea de moldeo. La carga metálica fundida normalmente se compone de retornos, chatarra de hierro y acero y lingote, a los que se añaden elementos de aleación como ferrosilicio, ferrofósforo o ferromanganeso. La carga se suele fundir en cubilotes u hornos de inducción eléctricos y estos últimos van ganando terreno en el mercado respecto a los primeros. Los hornos de inducción sin núcleo también se utilizan para la fusión mientras que los de inducción de canal sólo se emplean para el mantenimiento, ya que se utilizan principalmente en combinación con cubilotes, en lo que se ha venido a llamar «configuración dúplex». También se emplean hornos rotativos con combustible gas o líquido (fueloil) pero no son tan habituales. El mantenimiento momentáneo, el transporte y el tratamiento del metal se realizan en las propias cucharas.

Tabla 2.5. Aplicabilidad según tipo de horno ((f) = fusión; (m) = mantenimiento)

	Cubilotes	De arco eléctrico	Inducción de canal	Inducción sin núcleo	Rotativos	De solera	De cuba	Crisol/ cucharón
Hierro	f	f*	m	f, m	f*	f		m
Acero		f		f				m
Aluminio			f, m	f, m	f	f	f	f, m
Magnesio								f, m
Cobre			m	f, m		f		f, m
Plomo				f, m				f, m
Zinc				f, m				f, m

* Menos habituales.

El acero se funde tanto en hornos eléctricos de arco como de inducción. Las grandes fundiciones de acero emplean hornos de arco, pero los de inducción son los más utilizados. Los hornos eléctricos de arco pueden utilizar cargas de chatarra de bajo precio, puesto que el refinado tiene lugar en el horno, aunque tienen una limitación: siempre se adhiere un poco de carbono de los electrodos de grafito, de modo que no se puede fabricar acero inoxidable muy bajo en carbono ($<0,03\%$ C). En los hornos de inducción no es posible realizar el refinado, por lo que la carga debe ser cuidadosamente seleccionada. Sí se puede, no obstante, fundir cualquier tipo de acero. El mantenimiento momentáneo, el transporte y el tratamiento del metal se realizan en las propias cucharas.

El horno empleado en el caso metales no férricos varía en función del tamaño de la fundición. Las fundiciones no férricas a menudo utilizan aleaciones de distinto tipo y/o tienen una capacidad de fusión limitada. La fusión se lleva a cabo en hornos de poco volumen, de modo que los más indicados son los de tipo crisol. Por otra parte, la inyección es la principal técnica de moldear; a menudo no requiere fusión centralizada, ya que el horno de fusión (y el mantenimiento) está integrado en la máquina de moldear. Las fundiciones no férricas de alta capacidad que utilizan fusión centralizada normalmente se decantan por la inducción y utilizan hornos de cuba o de solera para la fusión y a continuación distribuyen el metal fundido a los hornos de mantenimiento y crisoles de colada.

[174, Brown, 2000], [225, TWG, 2003]

2.4.1. Cubilotes

2.4.1.1. Cubilote de viento frío

2.4.1.1.1. Descripción

El cubilote es un horno de cuba revestido con una capa de refractario donde se carga el metal y se calienta por combustión de coque, la cual se da en la parte más baja de la zona de fusión (la «solera»). El aire de combustión se genera mediante ventiladores y se introduce a la chimenea a través de una o varias filas (anillos) de toberas. Una válvula de control en el anillo permite controlar y distribuir uniformemente el flujo del aire de combustión por las toberas. El metal (lingotes, chatarra de acero, chatarra de hierro, retornos), el coque, elementos aleantes (ej. FeSi, SiC), escorificantes (SiO_2) y los agentes fluidificadores (ej. CaCO_3) se añaden al horno a través del tragante situado en la parte alta de la zona de fusión. Los gases de combustión fluyen hacia arriba con lo que ceden calor a la carga, antes de salir del horno.

Cuando la carga precalentada llega a la zona de combustión las partes metálicas se funden por las altas temperaturas y el coque cargado comienza a quemarse ante la presencia de oxígeno. Las gotas de metal fundido pasan a través de la cama de coque y se van acumulando en el fondo del cubilote junto al agujero de sangrado, la cual se encuentra debajo de la zona de combustión. Todas las impurezas quedan atrapadas en la escoria que está principalmente compuesta por SiO_2 , CaO , Al_2O_3 y FeO . Debido a que tiene una densidad menor la escoria flota en el caldo que se encuentra en la zona antes citada. Una vez que el caldo acumulado alcanza cierto nivel

se abre el agujero de sangrado. El metal fluye de forma discontinua desde el agujero de sangrado a través de un canal o reguera recubierto de refractario hasta una cuchara o antecrisol. Como alternativa se puede también dirigir el caldo de forma continua a un horno de almacenamiento.

La escoria, de menor densidad, flota sobre el caldo y se vacía por separado mediante una presa y una boca de descarga situada al efecto a una mayor altura. Se recoge de forma discontinua en recipientes o de forma continua granulado en una corriente de agua o en una instalación especial para granulado seco.

Los cubilotes básicos se llaman **cubilotes de viento frío (CBC)**. Se trata de hornos que emplean aire a presión atmosférica y a la temperatura ambiente normal.

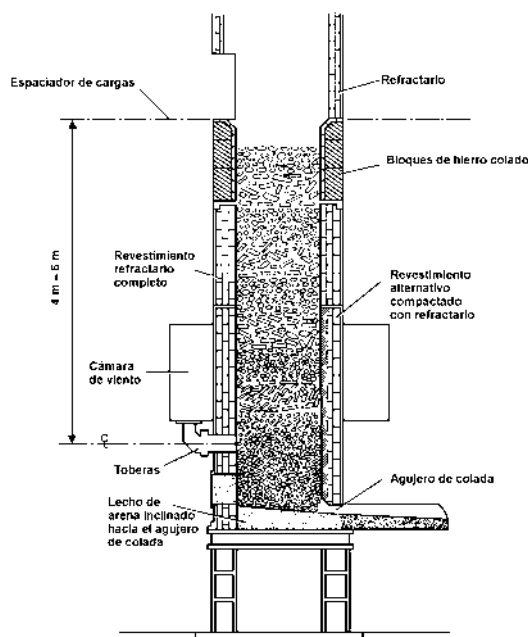


Figura 2.9.
Diseño esquemático y modelo en miniatura de un cubilote (con inyección de aire caliente) [44, ETSU, 1993], [237, HUT, 2003]

Para reducir las emisiones de CO e incrementar la eficiencia energética existe la opción de convertir los cubilotes de viento frío en cubilotes de viento caliente (véase el apartado 4.5.2). A pesar de todo, para las fundiciones de tamaño medio con una producción de hasta 2000 t/mes de pieza buena, no compensa emplear un cubilote de viento caliente, en particular por la gran inversión que supone. En estos casos suele prevalecer el empleo del cubilote de viento frío. El empleo de cubilotes con inyección de aire caliente también queda restringido a sistemas de moldeo continuo, de lo contrario los costes de explotación se disparan. Los cubilotes de viento frío siguen dominando en algunos tipos de producción, por ejemplo piezas de hierro esmaltado, artículos de cocina, equipos calefactores o contrapesos. Estos moldeos permiten el empleo de grandes cantidades de hierro colado viejo a la hora de fundir, un material que abunda todavía en los países de la vieja Europa industrial y que resulta especialmente apropiado para cubilotes de viento frío.

[44, ETSU, 1993], [156, Godinot, 2001], [202, TWG, 2002]

2.4.1.1.2. Mantenimiento

Una de las peculiaridades de los cubilotes es que el refractario del horno (una mezcla de cuarzo y arcilla) en las zonas de fusión y calentamiento sólo soporta una única campaña. El intenso calor y la presencia de escoria provocan la disolución química y el desgaste mecánico del revestimiento, que queda reducido a escoria. Por este motivo los cubilotes se construyen en parejas, de modo que cuando uno funde el otro se recubre de material de revestimiento nuevo, una operación que se invierte al siguiente día de uso.

[110, Vito, 2001]

2.4.1.1.3. Ventajas

- El coste de inversión se sitúa entre 125.000–150.000 EUR por tonelada instalada y hora, incluida el sistema de depuración de partículas;
- permite el uso de distintos tipos de chatarra (barata) gracias a la operación de limpieza y carburación;
- la eficiencia térmica es aceptable si se adoptan determinadas medidas.

2.4.1.1.4. Desventajas

- El régimen de producción no es flexible;
- la gestión de la producción es complicada debido a la lentitud del sistema;
- la carga de lingote es cara y la chatarra de acero poca;
- no se puede cambiar rápidamente de aleación;
- en el cubilote se produce una captación/absorción de azufre;
- las fundiciones dan lugar a impacto medioambiental a distintos niveles: grandes cantidades de partículas polvo, escoria y revestimiento refractario;
- se necesitan grandes instalaciones de eliminación de partículas debido al alto volumen de la corriente de gases de salida.

[110, Vito, 2001]

2.4.1.2. Cubilote de viento caliente

2.4.1.2.1. Descripción

Con el fin de optimizar la eficiencia del horno de cubilote es posible precalentar el aire de combustión. Esto es precisamente lo que se hace en los cubilotes de viento caliente (CVC); emplear viento precalentado, con la última temperatura disponible en los gases de combustión que salen del horno.

Las ventajas de la inyección de aire caliente pueden resumirse del modo siguiente:

- Reducción del consumo de coque.
- Aumento de la temperatura del metal.
- Aumento del ratio de fusión.
- Reducción de la absorción de azufre (consecuencia de la reducción del coque).
- Reducción de las pérdidas de fusión.
- Aumento de la absorción de carbono y de ahí la habilidad de sustituir chatarra de acero por lingote en la carga del horno.

Conviene destacar, sin embargo, que todas estas ventajas no se pueden alcanzar a la vez. Por ejemplo, el aumento en la proporción de chatarra de acero en la carga puede requerir un incremento en la proporción de coque necesario para la recarburación, lo que a su vez reduce la proporción de fundido y aumenta la absorción de azufre.

El cubilote de viento caliente (CVC) emplea viento precalentado mediante dos posibles métodos:

- *Calentamiento por recuperación*: implica la transferencia de calor entre los gases de salida y el aire de combustión. Los humos o gases de salida se recogen en la parte alta del horno junto con una corriente suficiente de aire y posteriormente se queman en la unidad de post combustión que provoca la oxidación exotérmica del CO. Los gases quemados se dirigen a un intercambiador (recuperador) de calor donde se transfiere al aire de combustión. Normalmente el aire de entrada al horno se calienta a temperaturas de entre 500 y 600°C. Por encima de estas temperaturas se producirían problemas por sinterización del polvo del horno en la superficie del recuperador.
- *Calentamiento exterior*: en este caso el aire de combustión se calienta por un medio externo, p.e. mediante un quemador de gas o fuel, por resistencia eléctrica o mediante una antorcha de plasma (poco común).

La combinación de estos dos métodos de calentamiento permite el sobrecalentamiento del aire de combustión hasta temperaturas de 1000 °C. Pero estas temperaturas tan altas requieren el uso de materiales refractarios más caros y pueden además alcanzar temperaturas de fusión demasiado altas.

Los sistemas de recuperación energética ofrecen alta eficiencia energética y térmica. Se debe de tener también en cuenta que la calidad del coque puede afectar a la eficiencia de la combustión general tal y como se puede observar en la Figura 2.10.

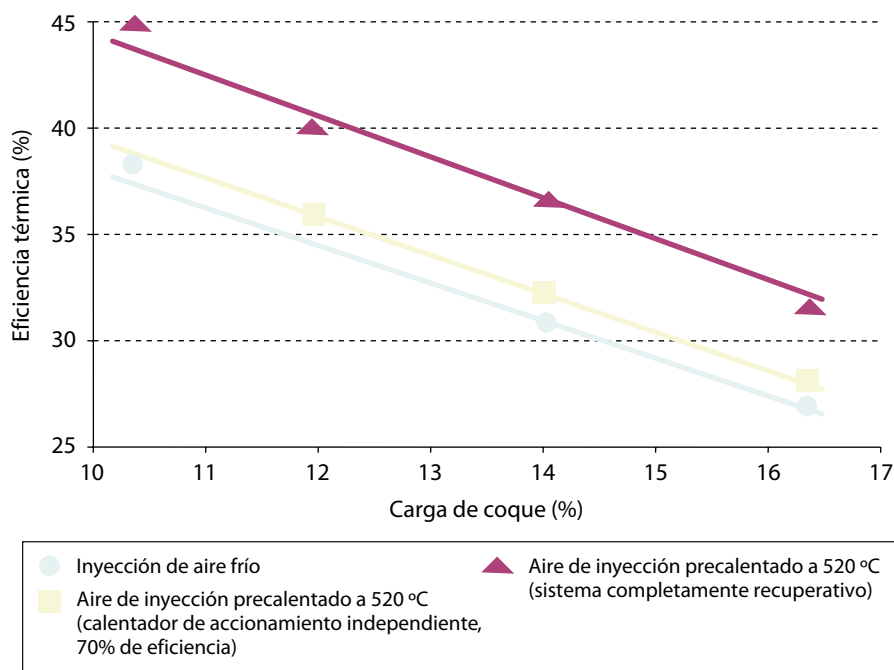


Figura 2.10.
Efectos del precalentamiento del aire sobre la eficiencia de los hornos de inyección de aire [44, ETSU, 1993]

Para las fundiciones de tamaño medio con una producción de hasta 2000 t/mes de pieza buena, no compensa emplear un cubilote de viento caliente, en particular por la gran inversión que supone. En estos casos suele prevalecer el empleo del cubilote de viento frío. El uso del cubilote de viento caliente está más extendido entre fundiciones de alta producción como fabricantes de piezas de automoción, fundición centrífuga etc.

Los cubilotes de viento caliente se emplean normalmente para campaña larga, con el fin de minimizar las paradas del proceso y tiempo y esfuerzo de mantenimiento.
[32, CAEF, 1997], [44, ETSU, 1993], [156, Godinot, 2001]

2.4.1.2.2. Ventajas

- Menor consumo de coque;
- elevada temperatura de vaciado;
- gran capacidad de fusión;
- menor absorción de azufre en el cubilote;
- posibilidad de utilizar distintos tipos de chatarra férrea de calidad y precio bajos;
- permite utilizar más chatarra de acero gracias a la mayor absorción de carbono del lingote.

2.4.1.2.3. Desventajas

- Inversión muy cara debido a las medidas medioambientales adicionales necesarias;
- régimen de producción poco flexible;
- gestión de la producción complicada a causa de la lentitud del sistema;

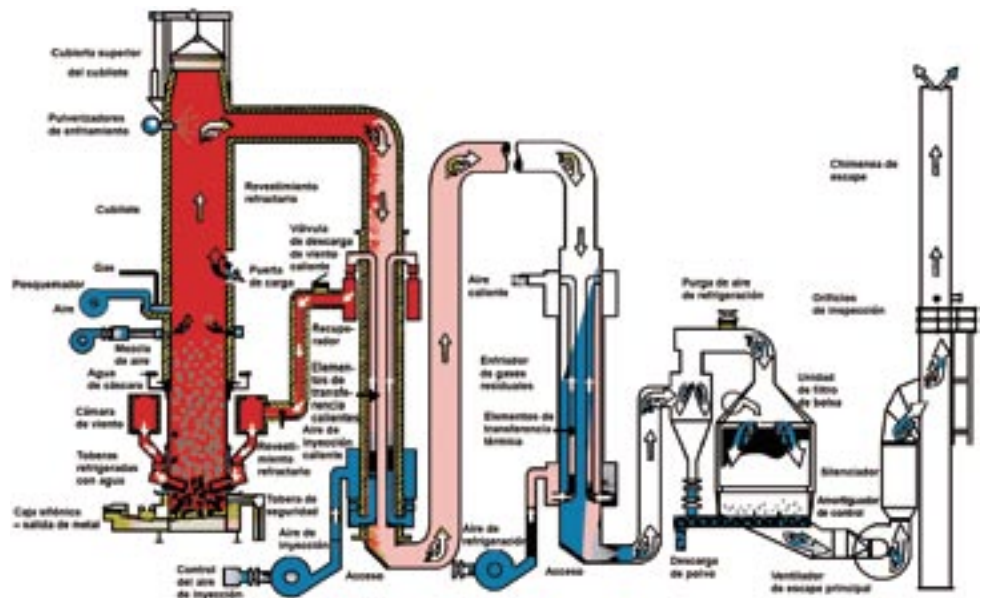
- limitado únicamente a las aleaciones de hierro, sin que sea posible cambiar rápidamente de aleación;
- las fundiciones dan lugar a impacto medioambiental a distintos niveles: grandes cantidades de partículas polvo, escoria y revestimiento refractario;
- se necesitan grandes instalaciones de eliminación de partículas debido al alto volumen de la corriente de gases de salida.

[110, Vito, 2001]

2.4.1.3. Cubilote de larga campaña

Los **cubilotes de larga campaña** suelen ser cubilotes revestidos de refractario y refrigerados con agua, tanto de viento caliente como frío. Funcionan diariamente a uno, dos o tres turnos y a menudo se utilizan como unidad única. Son hornos que permiten largas campañas, de varias semanas o incluso meses. Los cubilotes sin revestimiento permiten campañas mucho más prolongadas, pero las pérdidas de calor en la zona de fusión del horno pueden ser significativas. Las mejoras en los materiales refractarios y las técnicas de explotación son continuas, con el objetivo de incrementar la vida y la efectividad de los cubilotes de larga campaña. En la Figura 2.11 puede verse una representación esquemática de un cubilote de larga campaña dotado de sistema de postcombustión.

Figura 2.11.
Representación
esquemática
de un cubilote
de larga campaña
[150, ETSU, 1998]



Para poder realizar largas campañas deben adoptarse las siguientes medidas:

- revestir con refractario más duradero la zona de fusión, la parte inferior y la solera;
- refrigerar con agua las paredes del horno; de este modo se mantiene una baja temperatura y se evita el rápido desgaste del revestimiento de la solera;
- utilizar toberas de inyección refrigeradas por aire, ya que penetran hacia el interior de la zona de fusión del horno. En este caso la zona de combustión no está en contacto directo con el revestimiento del horno. La refrigeración con agua se ha utilizado por otros motivos aparte de la reducción del consumo de refractario, por ejemplo para:
 - prolongar la duración de la fusión;
 - permitir un aumento del diámetro interno del horno, lo que incrementa la velocidad de fusión.

En los hornos no revestidos la carga se encuentra en contacto directo con la zona de fusión de acero refrigerada con agua; sólo los cubilotes de cierto tamaño, y para grandes campañas, funcionan de esta manera. Las ventajas son las siguientes:

- sólo se requiere un cubilote;

- el cubilote sólo debe someterse a reparación externa tras una o varias semanas de funcionamiento;
- el consumo diario de la cama de coque se reduce;
- seguimiento más fácil a lo largo de toda la campaña gracias al diámetro constante y las condiciones de fusión más uniformes.

Existe un tipo de horno de larga campaña específico llamado cubilote sin coque; más información en el apartado 4.2.1.8.

[32, CAEF, 1997], [44, ETSU, 1993], [110, Vito, 2001], [150, ETSU, 1998]

2.4.1.4. Características de las emisiones atmosféricas

Los cubilotes se pueden cargar con una gran variedad de materiales, muchos de los cuales contienen partículas de óxido, arena y materiales no metálicos. El coque metalúrgico puede romperse en trozos pequeños al igual que puede ocurrir lo mismo con los materiales fluidizantes. Roturas y abrasión mecánica que se dan durante la preparación de la carga y la misma operación de carga, da lugar a la generación de partículas, muchas de las cuales se emiten inmediatamente.

Durante la fusión, la abrasión de la carga con el refractario también generará polvo.

La tercera fuente de partículas son las cenizas del coque que se generan en la zona de fusión y que no son retenidas por la escoria.

Las partículas de las distintas fuentes si son lo suficientemente ligeras pueden ser arrastradas por los gases de combustión del cubilote. Bajo ciertas condiciones se pueden generar humos metalúrgicos que dan lugar a un penacho visible en la chimenea del cubilote. Las partículas que salen con el humo suelen ser aglomerados sub-micrométricos de partículas de hollín y óxidos metálicos, tales como ZnO, PbO, etc., dependiendo de los metales que existen en la carga, como pueden ser los existentes en chatarra galvanizada o pintada. La emisión de los humos aumentará con la proporción de coque y contaminantes en la carga, la temperatura del aire y el ratio de oxígeno suministrado.

El humo carbonoso es materia generada a partir de la combustión incompleta de la materia orgánica en el cubilote. Los contaminantes presentes en la chatarra tales como aceites y grasas, madera, textiles y goma producen vapores aceitosos en los gases de chimenea. Los vapores y la materia orgánica parcialmente oxidada pueden dar lugar a olores.

Se observa una vez más, cómo el grado de limpieza de la chatarra y su naturaleza afectan significativamente a la naturaleza de las emisiones. La combustión del coque genera emisiones gaseosas que dan lugar a olores y contienen CO₂, CO y SO₂. Disminuyendo la proporción del coque en la carga (mediante el aumento de la eficiencia térmica) o sustituyendo (parcial o totalmente) el coque por gas natural, es posible reducir los niveles de este tipo de sustancias.

2.4.2. Horno eléctrico de arco (HEA)

2.4.2.1. Descripción

Los hornos eléctricos de arco son hornos discontinuos formados por un cuerpo de horno cilíndrico y de gran tamaño revestido de material refractario, y una solera en forma de plato. Su gran anchura permite manipular material de carga voluminoso y obtener reacciones eficientes entre escoria y metal. El diámetro de la cuba suele ser de entre 2 y 4 m. Como se muestra en la Figura 2.12, el horno está cubierto por un techo refractario con aberturas para tres electrodos de grafito. Los electrodos reposan sobre un brazo que permite su desplazamiento hacia arriba y abajo. La mayoría de estos hornos se cargan por la parte superior: el techo en forma de cúpula y los electrodos se retiran y el horno puede cargarse a través de una tolva de carga con abertura en la parte inferior o bien un imán. La carga metálica se calienta mediante un arco eléctrico generado por corriente eléctrica alterna trifásica entre los tres electrodos. Éstos están situados sobre la carga que, de hecho, se comporta de forma neutra.

Figura 2.12.
Horno HEA
[237, HUT, 2003]



La colada se produce inclinando el horno, lo que fuerza que el metal circule hacia el labio de colada. En el lado opuesto se encuentran unas puertas accesibles que permiten desescoriar y tomar muestras antes de la colada.

El revestimiento del horno puede ser ácido (refractario a base de SiO_2) o básico (refractario a base de MgO). El básico permite el empleo de prácticamente cualquier tipo de chatarra de acero. El horno también puede usarse para la producción de aceros de alta aleación y de manganeso. Si se utiliza chatarra con un elevado contenido de fósforo o azufre se suelen añadir piedra caliza y cal viva para llevar a cabo la defosforación y desulfuración. Estos compuestos atacan los revestimientos ácidos por lo que el refractario ácido sólo se utiliza para fundir chatarra con bajo contenido de azufre y fósforo.

Los hornos de arco se utilizan de forma casi exclusiva para fundir acero. Sólo en algunos casos se emplean también para la producción de hierro, el cual requiere la adición de polvo de carbón a la colada. Los HEA diseñados para la fundición de acero normalmente tienen una capacidad de entre 2 y 50 toneladas. Pueden funcionar intermitentemente y son apropiados para varios intervalos de composición. Producen acero a altas temperaturas con unos tiempos de fusión característicos de entre una y dos horas y logran rendimientos térmicos de hasta el 80%¹. El consumo de energía se sitúa entre 500 y 800 kWh/tonelada de acero fundido, dependiendo de la capacidad del horno, del consumo de metal caliente y las técnicas de refinado, de la temperatura de vaciado y del sistema de control de la contaminación instalado. El tiempo total de fusión suele estar entre 1 y 4 horas.

2.4.2.2. Fusión y refinado en HEA con revestimiento ácido

Considerando las características químicas del revestimiento ácido (SiO_2), la única opción para el refinado en este tipo de hornos es la decarburación. Así pues, hay que extremar el cuidado a la hora de seleccionar la carga para que los niveles de azufre y fósforo sean aceptables, ya que no pueden extraerse cuando se utiliza refractario ácido. La carga debe contener, en cantidades equilibradas, lingote, retornos y chatarra comprada. El carbono de la carga se conserva a un nivel suficiente, de modo que al final del proceso de fusión permanece en el 0,2-0,4%.

La decarburación se inicia al inyectar oxígeno en el baño de metal, lo que produce una gran agitación que acaba quemando el carbono de la colada. Por otro lado, en el «hervido» se quema el Si y aflora el H_2 y el N_2 del baño de metal. Todas las impurezas (óxidos) quedan atrapadas en la escoria. Durante la fusión, se puede añadir arena (SiO_2) para que la escoria adquiera la consistencia apropiada. Cuando se alcanza la concentración necesaria de carbono se detiene la inyección de oxígeno y se añaden silicio y manganeso para parar el burbujeo inducido.

Una vez retirada la escoria se controla la composición del metal y se modifica en caso necesario. Por último, el metal se desoxida añadiendo aluminio u otros agentes al flujo de metal durante la colada para evitar la forma-

¹ Sin considerar la eficiencia de la generación de energía eléctrica.

ción de burbujas de CO durante la solidificación. Se puede llevar a cabo una defosforación y/o desulfuración adicional mediante un convertidor AOD o VODC (véanse los apartados 2.4.9 y 2.4.10). [32, CAEF, 1997], [161, UK Environment Agency, 2002]

2.4.2.3. Fusión y refinado en HEA con revestimiento básico

Este tipo de hornos HEA utilizan revestimiento alcalino (MgO), lo que hace posible refinar el metal en el mismo horno. Así pues, es posible cargar el horno con casi cualquier combinación de chatarra y retornos. El sistema de revestimiento básico se utiliza cuando la chatarra adquirida contiene niveles de fósforo y azufre superiores a los deseados.

La defosforación de la colada se realiza añadiendo periódicamente caliza durante la fusión. Cuando se inyecta oxígeno se forma óxido fosfórico en el baño y queda atrapado en la escoria, junto con los demás óxidos metálicos e impurezas. La caliza mantiene muy básica la escoria, lo que estabiliza el óxido fosfórico. Por otro lado, el carbono se quema. Transcurrido un tiempo de reacción suficiente, la inyección de oxígeno se detiene y se extrae finalmente la escoria.

La desulfuración tiene lugar en una segunda fase, de forma similar pero a una temperatura superior. También en este caso se añade piedra caliza o cal viva a la colada, que reacciona con el azufre y adopta forma insoluble de CaS, pasando a formar así parte de la escoria. Periódicamente se añade carbono, aluminio o FeSi para reducir los óxidos metálicos (por ejemplo, óxidos de manganeso y cromo) y, así, minimizar las pérdidas de estos elementos en el baño de metal. Todas las demás impurezas (óxidos) quedan atrapadas en la escoria y se retiran durante el procedimiento final de desescoriado.

Tras el afinado, se controla y ajusta la composición de metales en caso necesario. Por último, se desoxida el metal añadiendo aluminio y otros agentes al baño de metal antes de la colada para evitar la formación de burbujas de CO. Si la composición final de la aleación así lo requiere se puede aplicar un último tratamiento al metal mediante un convertidor AOD o VODC (véanse apartados 2.4.9 y 2.4.10). [32, CAEF, 1997], [161, UK Environment Agency, 2002]

2.4.2.4. Características de las emisiones atmosféricas

Las emisiones de los hornos HEA se generan en las operaciones de carga, fusión y refinado y durante el vaciado del horno.

Durante la carga, se emiten partículas de polvo y suciedad desde el horno abierto. Cuando se carga un horno caliente (en especial cuando se funde con un pie de baño) cualquier combustible presente, como grasas, pintura o petróleo, se inflama y produce penachos de humo de partículas y material orgánico total o parcialmente quemados. La abrasión mecánica del revestimiento del horno también genera partículas de polvo adicionales.

Durante la fusión, el calentamiento de la escoria genera penachos de humo de óxidos metálicos que aumentan significativamente durante la decarburación. La inyección de oxígeno en el metal fundido crea una considerable cantidad de humos de óxido de hierro, que salen del horno en forma de nubes rojas. La adición de agentes escori-ficantes aumenta las emisiones del horno, pero sólo en pequeñas cantidades y durante intervalos cortos.

Durante el vertido del caldo a la cuchara u horno de mantenimiento también se generan algunas emisiones menores.

Las emisiones generadas por el proceso de fusión en sí se denominan emisiones primarias. Las secundarias corresponden al humo y partículas de polvo generados durante la carga y la colada.

Al analizar las características y las cantidades de las emisiones, las distintas fuentes generadoras de partículas y humo, según se han explicado anteriormente, se observa que entre las fundiciones existen grandes diferencias, que dependen de la limpieza del material de carga, el procedimiento de carga, la composición de la carga, los tratamientos de afino y los materiales añadidos a la colada. Al no quemarse carbón ni combustible en el horno las emisiones dependen enteramente de los parámetros citados

2.4.3. Hornos de inducción (HI)

Los hornos de inducción se utilizan tanto para fundir metales férreos como no férreos. Existen distintos tipos de hornos de inducción, pero todos funcionan aprovechando el fuerte campo magnético creado cuando la corriente eléctrica pasa por una bobina que envuelve el horno. Este campo magnético crea una tensión intermedia y, finalmente, una corriente eléctrica a través del metal que va a fundirse. La resistencia eléctrica del metal produce calor y sirve a su vez para fundirlo. Los hornos de inducción pueden adoptar formas y tamaños muy distintos. Al no existir contacto entre la carga y el portador de energía resulta apropiado para fundir acero, hierro y metales no férreos, siempre y cuando se disponga de material refractario adecuado.

Es esencial un correcto funcionamiento de los circuitos de refrigeración de agua para evitar que la bobina se sobrecaliente, por ello se han diseñado para proporcionar la máxima fiabilidad posible y dotados de varios termostatos y caudalímetros.

[42, US EPA, 1998], [47, ETSU, 1992], [110, Vito, 2001]

2.4.3.1. Hornos de inducción sin núcleo

2.4.3.1.1. Descripción

Los HI sin núcleo son hornos de fusión para operar en discontinuos que contienen una bobina de cobre refrigerada con agua y revestimiento refractario en el interior. La parte exterior está aislada mediante una virola de acero. El horno está dispuesto sobre un mecanismo de inclinación. Estos hornos suelen tener forma de cuba, el interior recubierto de material refractario y la parte superior abierta para llevar a cabo los procedimientos de carga y desescoriado (véase Figura 2.13).

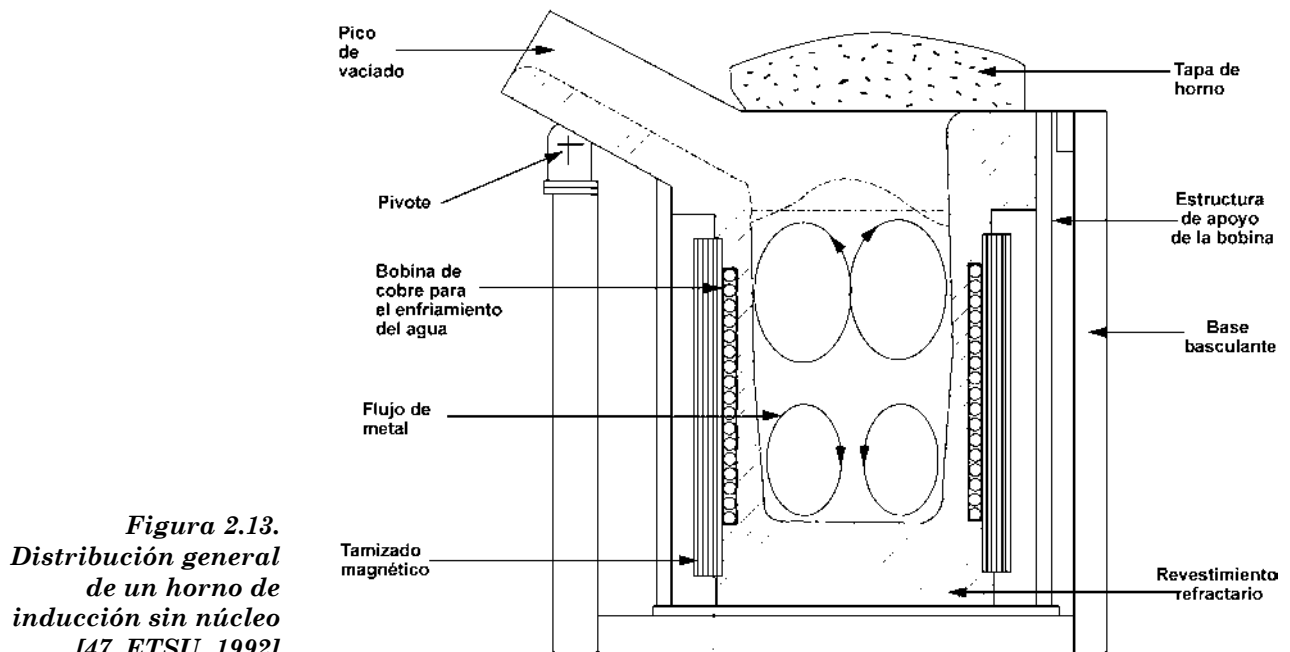


Figura 2.13.
Distribución general
de un horno de
inducción sin núcleo
[47, ETSU, 1992]

Dependiendo de su capacidad, el horno se carga por medio de un imán basculante, cubetas, alimentadores vibrantes o bien manualmente. Numerosas fundiciones utilizan hornos de inducción para producir pequeñas series con gran variedad de composiciones. La capacidad de estos hornos suele estar situada entre 10 kg y 30 toneladas. El núcleo se alimenta con corriente alterna con frecuencia de red, media o alta (50, 250 o 1.000 Hz, respectivamente).

Dependiendo de la densidad de energía instalada y del tipo de fusión, el rendimiento térmico puede llegar a superar el 80%², aunque lo normal es que se encuentre entre el 60 y el 70%. Si se tiene en cuenta la eficiencia

² Sin considerar la eficiencia de la generación de energía eléctrica.

en la generación de energía eléctrica los resultados se sitúan en torno al 15–20%, un porcentaje considerablemente bajo en comparación con otros tipos de hornos.

Los hornos de inducción sin núcleo pueden diseñarse para que funcionen a cualquier frecuencia a partir de 50 Hz. El calentamiento por inducción del metal líquido provoca agitación; cuanto menor sea la frecuencia de la corriente primaria, mayor será la agitación. Así pues, en un horno que utilice frecuencia de red de 50 o 60 Hz, la turbulencia será mayor que en uno que funcione a frecuencias más altas. Por ello, la potencia de entrada de los hornos que trabajen con frecuencia de red se limita a unos 250 kW por tonelada de capacidad. A mayores frecuencias la densidad de energía puede aumentarse tres o cuatro veces más.

La frecuencia de funcionamiento también afecta al nivel de penetración de la corriente. A mayor frecuencia, menor penetración. Este aspecto afecta también al tamaño mínimo de las piezas de carga y al tamaño efectivo del horno. En hornos de 50 Hz no resulta practicable una capacidad inferior a 750 kg. A 10 kHz pueden calentarse piezas de carga de un diámetro inferior a 10 mm, de modo que pueden usarse hornos con una capacidad de incluso 5 kg. La disponibilidad de convertidores de frecuencia fiables ha permitido el desarrollo de unidades para aplicaciones concretas, como muestra la Tabla 2.6. Las frecuencias normalmente se limitan a 250-350 Hz (en caso de que sean variables), ya que a mayores frecuencias la homogeneización del metal es insuficiente. Se emplean altas frecuencias en casos especiales como hornos muy pequeños. En la Figura 2.14 se detallan hornos de inducción sin núcleo de distintos tamaños.

Tabla 2.6. Aplicaciones de los hornos de inducción existentes en función de su frecuencia [174, Brown, 2000]

Frecuencia (Hz)	Aplicación
70	Virutas de latón
100	Chatarra (de recortes) de aluminio
100 – 150	Virutas de mecanizado de hierro
250	Chatarra de aluminio extruido
250	Hierro procedente de retornos y chatarra de acero
500 y 1.000	Fusión de aluminio y virutas de mecanizado de hierro
1.000 y 3.000	Gran variedad de aleaciones de cobre
3.000	Investment casting
10.000	Joyería



Figura 2.14.
Hornos de inducción
sin núcleo
[237, HUT, 2003]

Los sistemas de refrigeración del agua son esenciales para el funcionamiento de los hornos de inducción sin núcleo. Mediante el enfriamiento de la bobina, se consiguen proteger ésta y el aislante de los daños térmicos que podrían sufrir, no sólo durante el funcionamiento normal, sino también durante el período de enfriamiento, cuando la fuente de energía ha sido desconectada y el horno vaciado. Existen distintos sistemas de enfriamiento, basados en circuitos cerrados con intercambiadores de calor o sistemas abiertos de enfriamiento por

evaporación. Disponer de un mecanismo de enfriamiento da lugar a la posibilidad de llevar a cabo una recuperación interna de energía.

[32, CAEF, 1997], [47, ETSU, 1992], [110, Vito, 2001], [174, Brown, 2000], [176, ETSU, 1998], [202, TWG, 2002]

2.4.3.1.2. Procedimiento de fusión

Los hornos de inducción sin núcleo se utilizan para fundir, pero no pueden refinar. Así pues, en las fundiciones de acero el horno debe cargarse con materias primas que tengan la composición química «correcta»; es decir, que correspondan a la composición necesaria de la colada, lo que explica que se utilice principalmente chatarra de acero. En caso necesario el metal puede afinarse tras la fusión en un convertidor AOD o en cucharas de tratamiento especial (véase el apartado 2.4.12).

Los hornos de alta potencia permiten fundir metal siguiendo el procedimiento de «vaciado y carga», que consiste en vaciar completamente el horno y volverlo a cargar con material frío para iniciar el siguiente ciclo de fusión. El método de fusión con pie de baño (tap to tap) se utiliza en hornos de baja potencia (con frecuencia de tensión de red), en los que aproximadamente una tercera parte de la colada se vacía antes de añadir el material de carga frío. Gracias al mejor acoplamiento electromagnético entre el metal líquido y la bobina en comparación con otro tipo de cargas menos masivas (en frío), la velocidad de producción aumenta significativamente si se utiliza este último método en hornos de baja potencia.

Los aceros con un contenido superior al 0,2% de elementos reactivos como Al, Ti y Zr no pueden fundirse en ambientes oxidantes como el aire. Requieren un entorno inerte o el empleo de un método de fusión y moldeo en vacío, que se crea colocando el horno de inducción en una cámara de vacío o estanca. La utilización de vacío permite desgasificar muy bien la colada. Los elementos muy oxidables se añaden en vacío o tras el relleno con gas inerte.

Los hornos de inducción son excelentes unidades de fusión, aunque no resultan tan eficientes para el mantenimiento. Cuando se utilizan únicamente para fundir el metal líquido éste normalmente se envía a un horno de mantenimiento eficiente tan pronto como se haya alcanzado la temperatura deseada. Existen numerosos tipos de hornos de inducción sin núcleo, con crisoles fijos o extraíbles. Para el aluminio se emplean tanto hornos de inducción sin núcleo como de canal para la fusión y el mantenimiento. Con todo, los hornos de canal rara vez se utilizan por las dificultades que presentan a la hora de mantener el canal abierto y por la necesidad de mantener un pie de baño en todo momento.

[32, CAEF, 1997], [48, ETSU, 1994]

2.4.3.1.3. Ventajas

Los hornos de inducción tienen múltiples ventajas, por ello está su uso cada vez más extendido:

- mayor flexibilidad en el régimen de fusión y en las aleaciones, por ello resultan especialmente apropiados para las aleaciones y la fusión en la mayor parte de las fundiciones;
- menor tiempo de fusión;
- dan lugar a un menor impacto medioambientales;
- escaso mantenimiento dependiendo de la vida útil del revestimiento refractario;
- buen control de procesos, que permite la asistencia por ordenador y el funcionamiento completamente automático, lo que posibilita a su vez un control óptimo de la temperatura;
- Si se realizan una configuración y un cálculo in situ de parámetros del proceso es posible conseguir un máximo rendimiento térmico;
- la gran agitación del baño ayuda a que la fusión sea más homogénea;
- los procesos de carga, toma de muestras y desescoriado del metal normalmente suponen una pérdida de eficiencia en el proceso, aunque en el caso del cobre y el aluminio la eficiencia ha demostrado ser alta.

2.4.3.1.4. Desventajas

- A causa del monopolio en el suministro de energía eléctrica local el titular depende completamente de las condiciones de la conexión a la red de distribución, los costes energéticos y, posiblemente, costes adicionales (control de picos de consumo, etc.);

- los costes energéticos son superiores a los del empleo de combustibles fósiles;
- la acción depuradora de los hornos de inducción sobre la colada es limitada a causa de la escasa escoria y del tamaño relativamente pequeño de la zona de contacto entre la escoria y la colada. Por ello deben emplearse materiales de gran calidad, lo que aumenta los costes de carga en comparación con los de los cubilotes o los hornos HEA;
- las instalaciones precisan grandes inversiones, aunque el titular puede ahorrar en inversiones medioambientales adicionales. El coste bruto por tonelada instalada ronda los 375.000 EUR;
- existen otras técnicas de fusión más apropiadas para capacidades superiores a las 15 t/h. Según la aleación deseada los cubilotes u hornos eléctricos de arco pueden resultar mejores opciones;
- la eficiencia es baja durante el mantenimiento a consecuencia de las pérdidas de calor que se producen en la bobina de inducción refrigerada por aire.

[110, Vito, 2001]

2.4.3.2. Hornos de inducción de canal

2.4.3.2.1. Descripción

Este tipo de horno se utiliza principalmente para el mantenimiento, si bien también puede emplearse como instalación complementaria de fusión y mantenimiento.

Los hornos de inducción de canal están formados por una cuba de gran tamaño con aislamiento térmico equipada con una cubierta superior, también aislada térmicamente, por donde se introduce la carga (Figura 2.15). La parte inferior está formada por uno o más canales en U. Alrededor de los canales se encuentra la bobina de inducción refrigerada por agua que calienta y crea corrientes inducidas que hacen circular el metal. La corriente de inducción tiene la misma frecuencia que la red de distribución local. Los hornos suelen construirse sobre una estructura basculante hidráulica para la colada y el mantenimiento. También se utilizan hornos presurizados y sin estructura basculante.

Nota: El refractario de alto contenido de alúmina (lado caliente) puede ser de ladrillo, compactado o mortero refractario

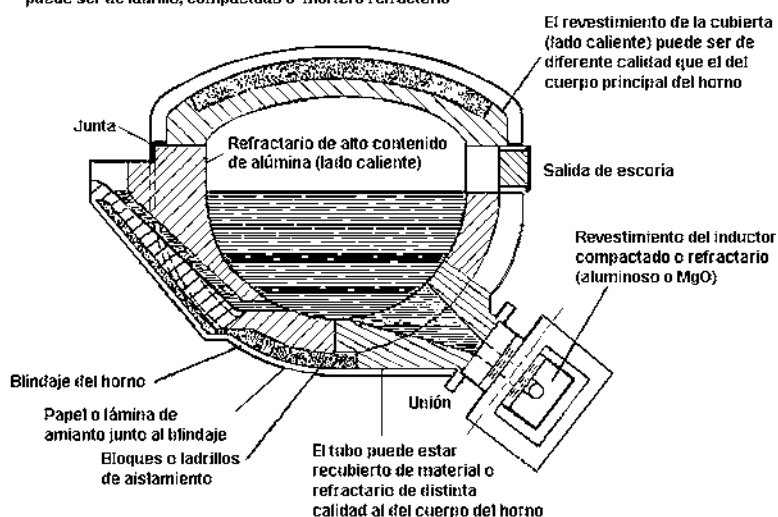


Figura 2.15.
Instalación característica
de un horno de canal
[55, ETSU, 1993]

Para que el horno comience a funcionar se requiere que en el interior del crisol y el canal haya una cantidad mínima de metal fundido. El crisol debe mantenerse lleno a un tercio de su capacidad. Para determinar la capacidad de un horno de mantenimiento se precisan dos valores: la capacidad total y la capacidad útil (por ejemplo 60/35 toneladas). La diferencia entre estos dos valores representa la cantidad de metal que debe permanecer en el horno.

Las pérdidas de calor por el agua de enfriamiento y las paredes del horno son bajas en comparación con las de los hornos de inducción sin núcleo. Si se dota al horno de canales de vaciado, siguiendo el «principio de la tetera», se reduce la oxidación de la colada y el desgaste del refractario.

Dado el elevado contenido del crisol cualquier cambio en la composición de la colada se uniformiza. Sin embargo, esto resulta contraproducente desde el punto de vista de la flexibilidad, ya que cambiar la composición de la colada requiere un largo período de transición. Por ello, en la práctica la composición de la colada se mantiene bastante constante.



Figura 2.16.
Horno de inducción de
canal [237, HUT, 2003]

Los hornos de inducción de canal se utilizan principalmente como hornos de mantenimiento en fundiciones de hierro. En la Figura 2.16 puede verse un ejemplo. Es la elección idónea en caso de funcionamiento dúplex con cubilotes. Su capacidad varía entre 5 y más de 100 toneladas. El horno de mantenimiento sirve de horno intermedio entre las áreas de fusión y moldeo. Es importante evaluar exhaustivamente los requisitos de fundición y producción antes de plantearse el uso de un horno de mantenimiento. Puede ser una opción más rentable y energéticamente eficiente para lograr los objetivos, aunque se recomienda explorar todas las alternativas antes de tomar la decisión final. Los hornos de canal prácticamente no se utilizan para el aluminio, a causa de las dificultades para conservar el canal abierto y la necesidad de mantener metal residual fundido en todo momento.

Los requisitos de capacidad son un aspecto importante que debe tenerse en cuenta al decidir el tamaño de un horno de canal. Los hornos pequeños pueden ser los más adecuados ya que, aunque son menos eficientes, las pérdidas de eficiencia se ven compensadas por su menor consumo anual de energía en comparación con otros tipos de hornos.

[48, ETSU, 1994], [55, ETSU, 1993], [110, Vito, 2001],

2.4.3.2.2. Ventajas

- Gran eficiencia térmica como horno de mantenimiento;
- quemado mínimo de los elementos de aleación;
- poco mantenimiento.

2.4.3.2.3. Desventajas

- En el cuerpo del horno debe mantenerse una cantidad mínima de hierro fundido (aunque represente una parte sustancial de la capacidad del horno) para garantizar el correcto funcionamiento eléctrico;
- el horno no puede ponerse en funcionamiento en frío debido a la densidad de energía limitada que puede alcanzarse en el bucle;
- el desgaste del canal es difícil de controlar;

- peligro potencial de derrames accidentales a causa de la bobina de inducción situada en la parte inferior;
- el contacto del agua de refrigeración con el metal es difícil de evitar.

[110, Vito, 2001]

2.4.3.3. Características de las emisiones

En los hornos de inducción no se quema carbón ni combustible y tampoco se llevan a cabo procedimientos de refinado, por lo que las emisiones dependen únicamente del nivel de limpieza y de la composición de la carga. Pueden distinguirse dos principales categorías de emisiones. La primera y más importante depende de la limpieza de la carga; así, la presencia de óxido, suciedad, arena de fundición, pintura, aceite y metales galvanizados o soldados produce emisiones de partículas y humos (orgánicos o inorgánicos). La segunda categoría guarda relación con las reacciones químicas que se producen a altas temperaturas (por ejemplo, mientras se mantiene el metal o se modifica su composición) y puede dar lugar a emisiones de partículas como consecuencia de la oxidación.

También el revestimiento refractario (de SiO_2 si es ácido, Al_2O_3 si es neutro o MgO si es básico) puede añadir una pequeña proporción de partículas de polvo a las emisiones.

Los datos de emisiones son difíciles de obtener, ya que la limpieza de la carga, el factor determinante, varía de una fundición a otra.

2.4.4. Hornos de techo radiante (calentados por resistencia)

Los hornos de techo radiante son hornos de mantenimiento de bajo consumo energético en forma de caja completamente aislada con bloques de elementos de resistencia en el techo articulado. Se utilizan básicamente en talleres no férreos (aluminio) de vaciado por presión con instalaciones de fusión centralizadas. Las unidades típicas tienen una capacidad de 250–1.000 kg con una carga conectada de 5 kW a 12 kW. Los depósitos de vertido y carga están separados del baño principal por paredes refractarias con conectores situados en la parte inferior para que el metal limpio pueda pasar de una zona a otra. En la Figura 2.17 se muestra un esquema del funcionamiento del mecanismo de techo radiante.

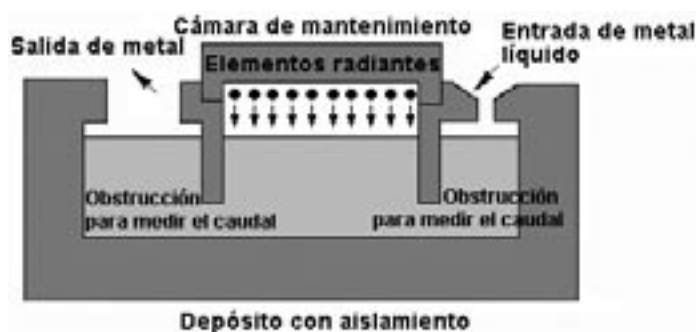


Figura 2.17.
Horno de techo radiante
[48, ETSU, 1994]

Las ventajas de este tipo de hornos son las siguientes:

- no se requiere crisol;
- costes energéticos muy bajos;
- control preciso de la temperatura;
- funcionamiento limpio, frío y silencioso.

Aunque la mayoría de hornos de mantenimiento de bajo consumo energético abastecen máquinas de moldeo, algunos de los más grandes se utilizan como equipos intermedios entre los hornos de fusión y los hornos de colada. Este uso aprovecha mejor las características del fundidor, que nunca ha destacado por su eficiencia de mantenimiento.

Algunas fundiciones utilizan grandes hornos de techo radiante de mayor potencia como sistema de fusión, por ejemplo para fundir metal para la colada a baja presión. Algunos fabricantes han creado versiones de hornos de techo radiante que pueden sellarse por completo y presurizarse con gas para funcionar como hornos dosificadores. Estos hornos inyectan metal con precisión en sistemas de moldeo a presión o de gravedad y compiten, hasta cierto punto, con los sistemas de vaciado automáticos como los de cucharas mecánicas. Siempre que se sometan a un buen uso y mantenimiento, los hornos de techo radiante pueden ser un eficaz sistema de control tanto de la temperatura como del peso inyectado y pueden mejorar la producción. [48, ETSU, 1994]

2.4.5. Horno rotativo

2.4.5.1. Descripción

El horno rotativo consta de una parte cilíndrica horizontal generalmente con dos troncos de cono en sus extremos donde la carga metálica se calienta mediante un quemador situado a uno de los extremos (conos) del horno. Los gases de salida abandonan el horno por el extremo contrario. Para generar el calor requerido, se utiliza combustible o gas natural junto con aire u oxígeno puro.

Un mecanismo de inclinación permite tener el horno elevado un cierto ángulo en los dos sentidos (según modelos) o en posición totalmente vertical. Esta última posición se emplea para rehacer el refractario, en tanto que la inclinación parcial está pensada para cargar el horno mediante un conjunto de skip-canal vibrante de almacenamiento o cinta metálica seguido de una tolva de conducción a la boca de entrada de materiales al horno. Durante las etapas de calentamiento y fusión el horno se rota lentamente de modo intermitente o continuo respectivamente para permitir la óptima transferencia y distribución del calor. La atmósfera del horno se controla mediante el ratio aire (oxígeno)/combustible.

Una vez que el metal esté fundido, y tras haber comprobado y ajustado a la composición y temperatura deseadas, se abre la piqueta denominada de vaciado o sangrado situada en la parte delantera cónica del horno y se descarga el caldo a las cucharas. Por su menor densidad, la escoria flota sobre el caldo, queda dentro del horno si la piqueta está bien mantenida y sale al final de la colada, donde se recoge en recipientes indicados para ello.

En función de la capacidad de los hornos, un ciclo de fusión puede llegar a abarcar desde 1 a varias horas. Para los casos de producción continua de caldo, las fundiciones suelen instalar de 2 o más hornos rotativos que operan secuencialmente. Teniendo en cuenta el proceso del que se trata, la eficiencia térmica del horno rotativo puede ser alta, p.e. de 50 a 65% dependiendo de la capacidad. Este alto rendimiento se consigue gracias al empleo de oxígeno puro en lugar de aire como medio combutor. [32, CAEF, 1997]

2.4.5.2. Procedimiento de fusión

Para la fusión el horno se carga con lingote, retornos, chatarra de acero, agentes escorificantes (por ejemplo arena, caliza) y agentes de carburación (por ejemplo grafito). El ciclo de fusión se inicia con una llama breve y ligeramente oxidante (factor de aire $\lambda=1,03$), que representa la principal entrada de energía. El horno gira gradualmente hasta 90° y la dirección de rotación se cambia cada cierto tiempo. De este modo las paredes del horno pueden intercambiar calor por convección con la carga. Tan pronto como se funde la carga la llama se reduce para evitar la oxidación excesiva de los elementos de aleación. Durante el sobrecalentamiento y el mantenimiento se aplica una llama reductora y prolongada ($\lambda=0,9$) y el movimiento del horno cambia a rotación completa continua. La capa de escoria proporciona aislamiento térmico y evita que se quemen los elementos de aleación. Tras comprobar y ajustar la composición y la temperatura de la colada se abre el orificio de colada y se vacía el caldo a cucharas. La escoria flota sobre el baño de metal y se recoge por separado después de extraer el metal.

El tiempo de vida del refractario depende mucho del buen uso que se haga de él, así como de la temperatura de sobrecalentamiento o el tipo de carga. En la operación de carga, es necesario prevenir las sacudidas mecánicas y los arranques en frío. La atmósfera del horno (oxidante o reductora), la temperatura de mantenimiento, las

velocidades de rotación en cada fase y la posición del quemador también afectan a la vida del refractario. En condiciones normales la vida del refractario es de 100 a 300 ciclos de fusión sin reparaciones. Con reparaciones se han sobrepasado las 2000 coladas.

[32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001]

2.4.5.3. Metalurgia

Este tipo de hornos se ha venido empleando para la fusión de no férreos durante muchos años. Para esta aplicación los quemadores tradicionales de fuel o gasóleo-aire podían alcanzar temperaturas de llama relativamente bajas y consecuentemente de fusión. El desarrollo de los quemadores oxígeno-gas ha permitido emplearlos en la producción de hierro fundido (mayor temperatura de fusión), empleando una mayor cantidad relativa de chatarra de acero y utilizando grafito para la recarburación.

Una desventaja significativa de los hornos rotativos es su alto poder oxidante, por lo que también ‘queman’ Fe, C, Si o Mn. Estas pérdidas deben compensarse mediante la adición de elementos aleantes antes o después de la fusión. Dependiendo del aleante que se trate la eficacia de asimilación de estos elementos puede ser baja. Esto ocasionaría gradientes de concentración entre la parte frontal y la trasera del baño por la ausencia de movimiento axial o las variaciones naturales de la radiación de la llama.

[110, Vito, 2001]

2.4.5.4. Aplicaciones

Debido a su carácter discontinuo, el horno rotativo tiene la misma flexibilidad que un horno de inducción en la fundición de hierro. Sin embargo, en general, los costes de inversión son más bajos. Un horno de 5 t cuesta entre 500000-600000 €, siendo el 30% el coste atribuido al sistema de depuración y eliminación de polvo. El horno rotativo es también una buena alternativa para los cubilotes de viento frío de corta campaña debido a su mayor flexibilidad y menor coste medioambiental. Los hornos rotativos se utilizan actualmente para volúmenes de 2 a 20 t (rango real de 0.6 a 30 t) con ratios de producción de entre 1 y 6 t por hora.

[110, Vito, 2001]

2.4.5.5. Ventajas

- Es posible un cambio rápido de la aleación.
- Fusión sin contaminación, p.e. sin absorción de azufre.
- Menor coste de inversión.
- Sistema de depuración pequeño debido al bajo flujo de gases.
- De fácil uso y mantenimiento.

2.4.5.6. Desventajas

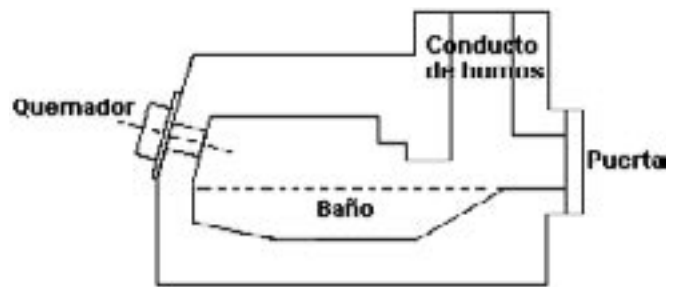
- Sin un buen control, alto ratio de oxidación de diferentes elementos Fe, C, Si, Mn, etc.
- El consumo de oxígeno y gas pueden ser altos si no se opera de forma continua.
- El consumo energético aumenta si se incrementa la tasa de acero en carga.

[110, Vito, 2001]

2.4.6. Hornos de solera

Los hornos de solera también se llaman hornos de reverbero. Se trata de equipos estáticos con calentamiento directo. El aire caliente y los gases de combustión generados por los quemadores de fuel o gas son inyectados sobre el metal (fusión) y después expulsados del horno. La principal aplicación de estos hornos se da en la fusión de metales no férreos. En la Figura 2.18 puede observarse un diseño típico de horno de solera.

Figura 2.18.
Sección transversal
de un horno de solera
[175, Brown, 1999]



Se componen de un baño rectangular o circular revestido de material refractario que se calienta a través de unos quemadores ubicados en las paredes o en el techo. Pueden utilizar varios tipos de combustible y también quemadores de oxígeno-gas combustible para aumentar la velocidad de fusión. La extracción y el tratamiento de los gases de combustión se realiza normalmente fuera del horno, que por este motivo está parcialmente sellado. Las campanas y canales cubiertos permiten llevar a cabo la extracción en las etapas de vaciado y carga. Los hornos de solera pueden adoptar distintas configuraciones en función del tipo de metal a fundir o de la aplicación que se le vaya a dar; entre las variaciones destacan las soleras inclinadas y los pozos laterales utilizados para fines de fusión específicos y toberas o lanzas para añadir gases. Algunos hornos pueden inclinarse para vaciar o inyectar los gases.

El rendimiento de fusión de los hornos de solera no suele ser muy alto debido a la escasa transferencia térmica que se produce desde los quemadores. Se ha conseguido mejorar la eficacia en la práctica utilizando oxígeno enriquecido o una combinación de gas y combustible sólido con el fin de prolongar la longitud de las llamas. Los hornos de solera se utilizan para la fusión discontinua, el refinado y el mantenimiento de varios tipos de metal. Se utilizan principalmente para fundir grandes cantidades de metales no férreos [155, European IPPC Bureau, 2001].

Los grandes hornos de solera permiten fundir rápidamente y pueden alojar materiales de carga voluminosos, si bien el contacto directo entre la llama y la carga puede provocar grandes pérdidas de metal, absorción de gases y una considerable contaminación por óxido. El control de la temperatura también puede resultar difícil, pero las dificultades se subsanan hasta cierto punto con las buenas prácticas. Por ejemplo, la escoria puede extraerse mediante una aplicación de flujo más adecuada, mientras que la utilización de quemadores modernos reduce los problemas de control de la temperatura. Tras la colada, filtrado y desgasificación pueden aplicarse tratamientos posteriores, a medida que el metal se transfiere a los hornos de mantenimiento. [42, US EPA, 1998], [48, ETSU, 1994], [155, European IPPC Bureau, 2001], [175, Brown, 1999]

2.4.7. Hornos de cuba

2.4.7.1. Descripción

Son sencillos hornos verticales con una solera colectora (en el interior o exterior del horno), un quemador en el extremo inferior y un sistema de carga de material en la parte superior. Los quemadores normalmente suelen ser de gas. El metal se alimenta por la parte superior del horno y se funde a medida que avanza hacia la solera. Cada quemador suele disponer de control independiente de la mezcla de combustible/aire. Cada bloque de quemadores permite controlar continuamente el CO y el hidrógeno, así como los gases de combustión de cada uno de los quemadores. Los gases de combustión normalmente se extraen y se depuran. A veces se suele utilizar la postcombustión para oxidar compuestos que pueden estar presentes como monóxido de carbono, aceites, COV o dioxinas. En ocasiones se añade oxígeno por encima de la zona de fusión para producir una postcombustión en la zona superior de los hornos de solera o de cuba.

Los hornos se utilizan para fundir metal puro, aunque algunas veces se utiliza metal contaminado de material orgánico. Si se alimenta metal con restos de aceite, éste atravesará un gradiente de temperatura situado entre la zona de carga y los quemadores. Las bajas temperaturas pueden provocar una neblina o material orgánico parcialmente quemado. Los hornos de cuba también se emplean para precalentar la carga de material antes de la fusión. En la Figura 2.19 puede observarse una representación de este tipo de hornos.

Los hornos de cuba sólo se utilizan para la fusión de metales no férreos, principalmente aluminio. A causa de su compleja estructura y las dificultades a la hora de renovar el refractario, sólo se emplean para metales con puntos de fusión bajos. Así pues, el mantenimiento del refractario es bastante limitado; de hecho, suele tener un tiempo de vida de entre 4 y 8 años.

Los hornos de cuba más modernos dotados de sistema informatizado de control de los quemadores alcanzan un uso de energía de 650 kWh/tonelada de Al fundido (a 720 °C). La energía teórica necesaria es de 320 kWh/tonelada, por lo que la eficiencia térmica es del 50%.

Son hornos de fusión continua de gran capacidad (entre 0,5 y 5 toneladas por hora, con un máximo de 50 toneladas). Su utilización como equipos de mantenimiento dificulta los cambios de aleación.

[48, ETSU, 1994], [155, European IPPC Bureau, 2001]

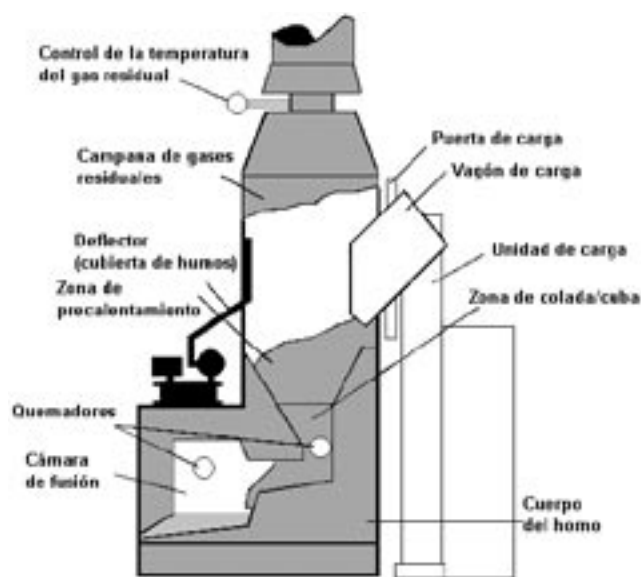


Figura 2.19.
Horno de cuba
[48, ETSU, 1994]

2.4.7.2. Ventajas

- Gracias al largo precalentamiento, la carga se seca muy bien antes de que se inicie la fusión, lo que hace que sean hornos especialmente indicados para el Al a consecuencia del escaso riesgo de absorción de nitrógeno;
- costes de inversión y operativos relativamente bajos. Los costes operativos se reducen gracias al precalentamiento efectivo, el control automático y la prolongada vida del refractario;
- ventajas técnicas: baja absorción de gas, excelente control de la temperatura y pocas pérdidas de metal.

2.4.7.3. Desventajas

- Falta de flexibilidad al cambiar de aleación.
- [110, Vito, 2001]

2.4.8. Hornos de crisol

2.4.8.1. Descripción

Se trata de sencillos crisoles calentados externamente por la combustión de gases (de gas o fuel), electricidad o, si las temperaturas son menores, gases calientes. Se evita el contacto directo con la llama para que no se creen puntos calientes en la base del crisol de forma que permita mantener un buen control de la temperatura de la colada y evitar la oxidación y la vaporización del metal.

Sólo se utilizan en la fusión de metales no férreos. A causa del calentamiento indirecto (a través de la pared del crisol) no se produce requemado ni absorción de gases. Los hornos de crisol se emplean para producir pequeñas cantidades de metal fundido (menos de 500 kg cada vez) y para producciones de baja capacidad. En la Figura 2.20 se muestran algunos ejemplos.



Figura 2.20.
Hornos
de crisol
[237, HUT, 2003]

El crisol se inclina manualmente con una grúa o bien automáticamente para vaciar el metal fundido en el molde. Para los materiales con base de cobre sólo se emplean crisoles de grafito y carborundum (carburo de silicio), mientras el aluminio puede fundirse en crisoles de fundición de hierro.

Los hornos de crisol utilizados para el mantenimiento, el transporte y el tratamiento del metal en fundiciones férreas se llaman cucharas. [110, Vito, 2001], [126, Teknologisk, 2000], [225, TWG, 2003]

2.4.8.2. Procedimiento de fusión

La carga se deposita en frío en el crisol y para fundirla el calentamiento se inicia a máxima potencia. Cuando la temperatura se encuentra 50 o 100 °C por debajo del punto de fusión no se aporta energía y se deja que la carga se caliente únicamente por la inercia térmica del crisol. A continuación se estabiliza la temperatura por medio de un sistema de control. Tras el desescoriado se puede iniciar el tratamiento del metal. Para ello se extraen el oxígeno y los gases, se refina el grano y se realiza el ajuste de los metales volátiles como el zinc y el magnesio. Después se extrae la escoria una vez más antes de iniciar el moldeo.

Aparte de la renovación periódica del crisol no se requiere mantenimiento. La periodicidad depende básicamente del tipo de aleación que se funde. Los cambios frecuentes de aleación desgastan antes el crisol. Los crisoles de SiC, utilizados en las bajas aleaciones, tienen una vida útil de entre 130 y 150 cargas, que en el caso de las altas aleaciones se reduce a entre 50 y 80.

Las eficiencias térmicas son de 750 – 3.000 kWh (es decir, de entre el 15 y el 30%). [34, Bininger, 1994], [110, Vito, 2001], [126, Teknologisk, 2000]

2.4.8.3. Ventajas

- Tecnología simple
- poco mantenimiento
- flexibilidad al cambiar de aleación.

2.4.8.4. Desventajas

- Eficiencia y capacidad de producción bajas.
- [110, Vito, 2001]

2.4.9. Convertidor AOD para el refinado de acero

Los convertidores de decarburación con argón y oxígeno, AOD (Argon Oxygen Decarburisation), son recipientes especiales para el refinado del acero. El metal fundido se transfiere directamente del horno de fusión (normalmente de arco eléctrico o de inducción) al convertidor. Como puede observarse en la Figura 2.21, para refinar el metal puede inyectarse oxígeno en el convertidor (para la extracción de carbono y silicio) y argón (para producir la agitación) a través de toberas ubicadas cerca de la base. El convertidor está equipado de un mecanismo de inclinación que permite llenarlo y vaciarlo. Con los convertidores AOD puede producirse acero de propiedades químicas específicas, pero a un gran coste. Fuera de los Estados Unidos no se utiliza de forma generalizada este sistema en fundiciones de acero.

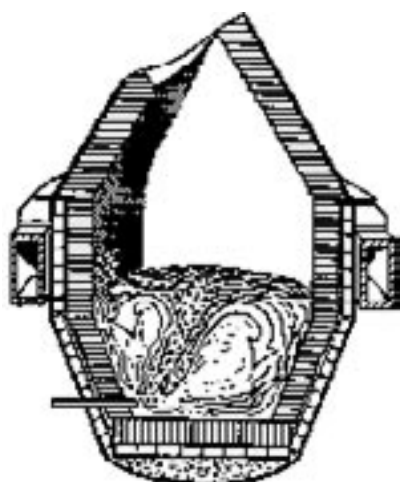


Figura 2.21.
Convertidor AOD
[237, HUT, 2003]

La primera fase del proceso de refinado es la decarburación, propiciada por la inyección de oxígeno en el convertidor. Se trata de una operación de afinado que mantiene el contenido de carbono del material de carga dentro de unos márgenes concretos previamente definidos. La decarburación se inicia al inyectar el oxígeno en el baño de metal, lo que provoca una fase de notable agitación durante la cual se quema el carbono del baño. Las «burbujas» eliminan al mismo tiempo el silicio y hacen que afloren el hidrógeno y el nitrógeno del baño de metal. Todas las impurezas (óxidos) quedan atrapadas en la escoria. Durante la fusión puede añadirse caliza para que la escoria adquiera la basicidad necesaria. Cuando el carbono alcanza la concentración prevista deja de inyectarse oxígeno y se añaden silicio y manganeso para detener la vigorosa agitación, sobre todo en la producción de aceros inoxidables. Una dilución de oxígeno con argón o nitrógeno contribuye a la oxidación del carbono de elementos metálicos, preferentemente, como por ejemplo hierro, cromo, etc. y produce rendimientos metálicos de gran calidad. A continuación se añade Al o Si y caliza al metal y se inyecta argón para extraerle el azufre. La inyección continua de gas produce una gran agitación vigorosa y un alto contacto entre la escoria y el material que puede llegar a reducir los valores de azufre por debajo del 0,005%. El contenido de gases residuales del metal tratado (hidrógeno y nitrógeno) es muy bajo. Todas las impurezas quedan atrapadas en la escoria y se extraen con ella. Tras ajustar la temperatura y la aleación se trasfiere el metal a cucharas para la posterior colada.

[174, Brown, 2000], [32, CAEF, 1997]

2.4.10. Convertidor VODC para el refinado de acero

Los convertidores de decarburación con oxígeno en condiciones de vacío, VODC (Vacuum Oxygen Decarburisation Converter), mantienen el acero fundido dentro del convertidor, al que se le han acoplado bombas de vacío, expulsores de vapor y un inyector de gas argón. Para el tratamiento en vacío del acero inoxidable se llevan a cabo dos procesos distintos que permiten mejorar su nivel de calidad.

Primero se decarburiza el acero introduciendo oxígeno en la colada, al tiempo que se inyecta un poco de argón desde la base del convertidor. Las bombas de vacío permiten al convertidor reducir la presión parcial del mo-

nóxido de carbono, hasta el punto de que la decarburación efectiva puede llevarse a cabo sin oxidar en exceso el cromo. El primer procedimiento es parecido al de la decarburación de los convertidores AOD, pero requiere menos argón gracias a la menor presión total del gas; además, el proceso es mucho más eficiente. El cromo oxidado se reduce nuevamente a acero líquido con aluminio.

El segundo procedimiento es la desgasificación. El convertidor se somete a alto vacío (1 - 5 mbar) mediante una bomba apropiada y los expulsos de vapor. Se mantiene un ligero burbujeo del argón para lograr el movimiento efectivo del acero. A presiones tan bajas las impurezas gaseosas como el hidrógeno y el nitrógeno se eliminan de forma efectiva. También el contenido total de oxígeno y el contenido de azufre se reducen drásticamente, lo que favorece las propiedades mecánicas del acero obtenido.

Los aceros de baja aleación normalmente sólo se desgasifican.

El procedimiento VODC permite obtener acero de calidades específicas que por otros métodos no podría producirse. El contenido total de oxígeno también es más bajo de lo normal para aceros fundidos en hornos eléctricos de arco y tratados mediante AOD, puesto que durante el proceso VODC se eliminan buena parte de las inclusiones de óxido de la colada; también se elimina la mayor parte de oxígeno disuelto durante la fase de desgasificación.

[202, TWG, 2002]

2.4.11. Tratamiento del acero

Para garantizar una buena calidad de la pieza, el acero de la colada debe someterse a otros tratamientos para eliminar las impurezas y posibles causas de defecto, por ejemplo:

- *Desoxidación*: el oxígeno se disuelve en el acero líquido en forma de FeO. Durante la solidificación puede combinarse con C y formar CO. Este proceso puede modificar la composición del acero y generar porosidad, por lo que la desoxidación es imprescindible. Se realiza mediante un elemento que de alta afinidad al oxígeno. El silicio, el siliciuro de calcio, el titanio, el zirconio y el aluminio son posibles desoxidantes, si bien este último es el más potente y uno de los más ampliamente utilizados. El aluminio se agrega en forma de barra o alambre (véase Figura 2.22). El tratamiento se lleva a cabo normalmente en el horno y en la cuchara. El óxido de aluminio generado es insoluble en la colada y se mezcla con la escoria.
- *Formación de sulfuros*: a medida que aumenta la resistencia a la tensión del acero se agravan los efectos perjudiciales del azufre. El sulfuro es soluble en acero líquido, pero al solidificarse se precipita en forma de MnS. Puede precipitarse de distintas maneras, con consecuencias igualmente distintas. La formación de sulfuros tiene que ver con el contenido de aluminio residual presente tras la desoxidación. La cantidad residual de Al debería permitir la formación de sulfuros de tipo III.

[110, Vito, 2001], [174, Brown, 2000]



Figura 2.22.
Desoxidación
con alambre de aluminio
[237, HUT, 2003]

2.4.12. Tratamiento del hierro colado

2.4.12.1. Aleación

Durante la fusión, algunos de los elementos presentes se oxidan y pasan a formar parte de la escoria. Al final de la etapa de fusión debe realizarse una corrección para asegurar la calidad final. El hierro colado no aleado necesita corregirse con C, Si, Mn, S y P. Si se desea darle propiedades especiales pueden añadirse elementos de aleación específicos (desde aluminio hasta zirconio), en concentraciones inferiores al 1% o superiores al 30%. Normalmente se añaden en forma de bloques o granos de aleación férrea sobre el hierro líquido, ya que así se reduce el riesgo de pérdidas por oxidación.

La adición se efectúa en el horno, durante el vaciado del caldo o bien agregando los aditivos en la cuchara antes de llenarla con el metal fundido.

[110, Vito, 2001]

2.4.12.2. Homogeneización

Al añadir elementos de aleación estos pueden a su vez introducir impurezas en el caldo como por ejemplo óxidos, sulfuros o carburos. Para reducir los efectos negativos de estos componentes el metal se sobrecalienta hasta los 1.480–1.500 °C, aunque ello puede afectar a la precipitación del grafito durante la solidificación. La homogeneización tiene los siguientes resultados positivos:

- reducción de óxidos (FeO , SiO_2 , MnO) por parte de C, generación de burbujas de CO que, al atravesar la colada, arrastran el H_2 y N_2 ,
- a alta temperatura y con un movimiento del baño intenso las impurezas llegan a coagular y ascienden a la superficie de la colada con mayor rapidez quedando atrapadas en la escoria.

[110, Vito, 2001]

2.4.12.3. Desulfuración y recarburación del hierro fundido en cubilote

A consecuencia del alto grado de contacto entre el metal líquido y el coque, el hierro fundido en cubilote muestra un contenido de azufre relativamente superior. La absorción de azufre en el cubilote produce una menor viscosidad en el metal líquido, lo que en algunos casos puede ser una ventaja (por ejemplo para la producción de fundición gris de paredes finas).

Sin embargo, si el hierro colado se va a tratar con Mg (como se describe en el siguiente apartado) para producir fundición de hierro nodular, el azufre debería neutralizarse para evitar un consumo excesivo de Mg. Para ello pueden seguirse distintos métodos. En el método del tapón poroso se utilizan nitrógeno y gas argón para agitar el metal, al que también se le añade polvo de CaC_2 ; cuando este último entra en contacto con el metal líquido forma CaS pasando así el azufre a formar parte de la escoria. El metal tratado fluye a continuación a una cuchara de mantenimiento de donde se vacía para someterlo a otros tratamientos.

2.4.12.4. Tratamiento de nodulización de la colada

La fundición de hierro nodular se obtiene al añadir Mg al metal fundido, ya sea en forma pura o como aleación de FeSiMg o NiMg. Como paso previo puede ser necesaria una desulfuración para asegurar una buena nodulización. La presencia de Mg en la colada provoca solidificación del grafito en forma de esferas microscópicas que mejora las propiedades mecánicas, entre ellas la resistencia y la ductilidad.

Existen varias técnicas para introducir Mg en el metal líquido:

- *La técnica del vertido*: Es el método más sencillo; consiste simplemente en verter el metal líquido sobre la aleación de Mg situada en el fondo de la cuchara.

- *El método sandwich:* La aleación de Mg se coloca en la parte inferior de una cuchara especialmente diseñada y a continuación se cubre con chapas de acero o FeSi, como se muestra en la Figura 2.23. El metal se vacía sobre la cuchara y al fundirse la capa tiene lugar la reacción del Mg.
- *El método tundish cover:* Se trata de una versión mejorada de la técnica del sandwich. La cuchara se tapa con una cubierta tras colocar la aleación de Mg en el fondo de la misma. El metal se vierte sobre la cubierta cóncava y fluye a través de una artesa situada en la cuchara donde tiene lugar la reacción.
- *El método de inmersión:* Con una campana de inmersión se sumerge la aleación de Mg en el metal líquido hasta que finaliza la reacción. Durante el tratamiento la tapa de la cuchara está cerrada para evitar emisiones de humo de MgO.
- *El convertidor G Fischer:* En este proceso se utiliza una cuchara especial que queda firmemente cerrada con una cubierta tras vaciar el metal en el convertidor colocado horizontalmente. A continuación se inclina el convertidor hasta que queda vertical, lo que permite que la aleación de Mg reaccione con el metal. Una vez finalizada la reacción el convertidor se devuelve a su posición original y se vacía después de retirar la cubierta.
- *Nodulización por hilo:* En este método la adición de Mg finamente pulverizada se introduce en un tubo de acero fino y muy largo, a modo de hilo, formando un encapsulado que se introduce mediante un mecanismo controlado en una cuchara, donde se libera el Mg.
- *El tratamiento flow treat:* El metal se vacía en una cámara de reacción especialmente diseñada en la que previamente se ha colocado la aleación de Mg.
- *«Ductilator»:* En este método, el metal se vierte en una cámara de reacción donde se fuerza al flujo para que forme un vórtice. La aleación de Mg se inyecta en el torbellino mediante un gas portador inerte. El tratamiento puede realizarse en grandes cantidades de metal o durante la colada.
- *El proceso dentro del molde:* La aleación de Mg se deposita directamente en forma de pastilla en la cavidad del molde (tipo bebedero). La reacción tiene lugar durante la colada, con un gran rendimiento.



Figura 2.23.
Nodulización siguiendo
el método «sandwich»
[237, HUT, 2003]

Tras el tratamiento, el metal debe vaciarse al molde dentro de un margen de tiempo concreto, ya que el efecto del Mg tiende a disiparse rápidamente; si se superase cierto límite (10 a 15 minutos) el tratamiento tendría que iniciarse de nuevo.

2.4.12.5. Inoculación de la colada

La presencia de grafito en forma gruesa en una matriz metálica afecta negativamente a las propiedades mecánicas del material. Para obtener una adecuada estructura metalúrgica cristalina debe inocularse la colada antes del moldeo. Durante el proceso se introduce granos, normalmente de aleaciones de FeSi, que favorecen el crecimiento de cristales en el caldo. El inoculante también suele incluir Ca, Al y materiales de tierras raras.

Existen también varias técnicas de inoculación del metal fundido:

- *Inyección durante el vaciado:* El inoculante se inyecta directamente al flujo de metal durante el vaciado.

- *Inyección durante la colada*: El inoculante se inyecta directamente al flujo de metal durante el proceso de colada (véase Figura 2.24).
- *Inyección de inoculante* (véase apartado 2.4.12.4).
- *Proceso in-mold* (véase apartado 2.4.12.4).



Figura 2.24.
Inoculación
durante el colado
[237, HUT, 2003]

2.4.13. Tratamiento del metal no férreo

Existen tres tratamientos (o tipos de refinado) principales que se llevan a cabo durante los procesos de fusión del **aluminio**:

- *Desgasificación*: El hidrógeno se disuelve en el aluminio fundido pero es expulsado durante el enfriamiento por lo que provocar porosidad en el producto final, por lo que debe ser eliminado previo enfriamiento. Para ello se emplean burbujas de gas inerte inyectado en la colada. En los mejores métodos de desgasificación las burbujas tienen un alto tiempo de residencia y gran área superficial. La desgasificación del aluminio se realiza principalmente por medio de un impulsor. Este método se utiliza un mezclador de rotación rápida y el nitrógeno se inyecta la colada. La desgasificación se suele llevar a cabo en combinación con la depuración o el lavado de la colada, cuyo objetivo es extraer los metales alcalinotérreos, como el Ca, y puede realizarse con gas Cl_2 . El empleo de HCE para estos fines fue prohibido por la UE (*Dir. 97/16/CE*). Habitualmente se utiliza una mezcla de nitrógeno con un 3% de Cl_2 para el proceso de depuración y desgasificación simultáneos. Otros métodos de desgasificación alternativos emplean pastillas, una lanza de cabeza porosa o una piedra porosa en el horno de mantenimiento.
- *Modificación y afinado del grano*: En las aleaciones de aluminio suelen añadirse pequeñas cantidades de metal a la colada para controlar el tamaño del grano, modificar la microestructura del metal en solidificación y mejorar las propiedades mecánicas del material. Para la modificación se utiliza sodio o estroncio, mientras que para el refinado del grano se emplea titanio, boruro de titanio, zirconio o carbono. El tratamiento suele realizarse conjuntamente con la desgasificación en una estación de tratamiento de metal especial.
- *Aplicación de flujo*: Normalmente consiste en la adición de flujos de fluoruro sólido a la colada con el fin de extraer los contaminantes sólidos.

[164, UK Environment Agency, 2002], [175, Brown, 1999], [178, Wenk, 1995]

En los procesos de fusión del **magnesio** se utilizan los siguientes cuatro procedimientos de tratamiento (o refinado):

- *Modificación del grano*: Los modificadores del grano aplicados a las aleaciones de magnesio suelen ser en forma de zirconio o hexacloroetano HCE (anteriormente). El empleo de este último para estos fines fue prohibido por la UE (*Dir. 97/16/CE*).
- *Aplicación de flujo*: Consiste normalmente en añadir flujos alcalinos, alcalinotérreos, de cloruro o de fluoruro a la colada para extraerle los contaminantes sólidos.

- *Desgasificación:* En el tratamiento del magnesio se utiliza el burbujeo de gas (nitrógeno o argón) para desgasificar y arrastrar los óxidos. La desgasificación de las aleaciones de magnesio también puede llevarse a cabo con una mezcla de gas argón y gas cloro, con el argón como gas portador.
- *Control de la oxidación:* La presencia de berilio en los granos de la colada modifica y detiene la oxidación. Las aleaciones de magnesio acabadas pueden contener hasta 15 ppm de berilio en peso. Puede añadirse al magnesio fundido una aleación matriz de aluminio/berilio que contenga un máximo del 5% de berilio (nominal) para aportarle la carga de berilio. El control de la oxidación también se logra a través de la inertización de la superficie del metal mediante un gas portador (por ejemplo dióxido de carbono o argón) que contenga un máximo del 4% de hexafluoruro de azufre. Hasta la fecha, la única alternativa libre de flujo al SF_6 es el SO_2 , que es sensiblemente más barato que SF_6 , si bien su principal detrimento es que es altamente tóxico, por lo que los procedimientos deben aislarse mejor. A día de hoy sólo un tercio de las fundiciones europeas han venido utilizando SO_2 . En ocasiones el control de la oxidación se consigue rociando con polvo de azufre la superficie de la colada, como se explica en el apartado 4.2.7.1.

Existen tres procesos principales de tratamiento (o refinado) aplicados a la fusión del **cobre**. El cobre fundido disuelve el oxígeno y el hidrógeno, que pueden recombinarse para formar vapor de agua, lo que a su vez genera porosidad en las piezas. La desgasificación y la desoxidación se utilizan, respectivamente, para extraer el hidrógeno y el oxígeno. Los procesos de tratamiento del metal utilizados son los siguientes:

- *Desoxidación:* La desoxidación se realiza añadiendo un reactivo que fija el oxígeno y forma escoria fluida. Debe procederse con cuidado para evitar que los productos de la desoxidación entren en la pieza solidificada y que el residual de desoxidante afecte negativamente a las propiedades de la aleación. El fósforo es el reactivo de desoxidación más utilizado. Entre las alternativas figuran el magnesio, manganeso, calcio, silicio y boro.
- *Desgasificación:* El hidrógeno se extrae de la colada mediante burbujeo con gas inerte. Para ello puede utilizarse tanto argón como nitrógeno. La técnica es parecida a la desgasificación del aluminio.
- *Aplicación de flujo:* El aluminio de las aleaciones puede oxidarse y generar películas de óxido que complican el moldeo. En aleaciones no alumínicas las trazas de aluminio pueden provocar defectos, lo que obliga a extraerlas mediante agentes fluidificantes. También se aplican flujos para recubrir la superficie e impedir la oxidación, la pérdida de zinc y la absorción de hidrógeno durante la fusión. Existen fluidificantes específicos para cada tipo de tratamiento.

[165, UK Environment Agency, 2002], [182, Closset, 2002]

2.5. Producción de moldes y machos

El moldeo es el proceso por el que se confecciona el molde en el que luego se vaciará el metal fundido o caldo. Algunos moldes deben tener propiedades especiales para producir piezas de gran calidad que, por ejemplo:

- reproduzcan con exactitud y con una elevada precisión dimensional la forma del modelo;
- eviten la aparición de excesivas rebabas aportando un acabado suave al metal;
- eviten efectos de moldeo como por ejemplo grietas, defectos tubulares, picaduras, etc.

Del mismo modo que los moldes definen la forma externa de las piezas, los machos definen la interna, o al menos aquellas partes que no pueden alcanzarse directamente con el molde.

Los moldes se clasifican en dos grandes familias:

- **perdidos** (de un solo uso): Se confeccionan especialmente para cada moldeo y se destruyen tras el desmoldeo. Normalmente se elaboran con arena y utilizan aglomerantes químicos, arcilla, etc. (y a veces ni siquiera se ligan). El moldeo a la cera perdida entra dentro de esta primera familia;
- **permanentes** (de múltiples usos): Se utilizan en moldeos por gravedad y a baja presión, por presión en coquilla y por centrifugación. Los moldes suelen ser metálicos.

Los machos utilizados para el moldeo férreo se confeccionan en su práctica totalidad con arena. La elección de la tecnología de aglomeración depende de factores como el tamaño del moldeo, la velocidad de producción, el metal vaciado, las propiedades de desmoldeo, etc.

Para el moldeo en arena el molde puede confeccionarse por compactación manual o mecánica (por ejemplo moldeo por sacudidas, por infiltración de preformas, por impacto de aire, por vibración, etc.). Cuando el molde adquiere la resistencia suficiente se separa del modelo, que puede utilizarse para formar nuevos moldes.

Por lo general los machos se confeccionan siguiendo las mismas técnicas que los moldes, aunque los de tamaño pequeño o medio a menudo son soplados o inyectados en cajas de machos de madera, plástico o metal.

Por lo que respecta al moldeo no férreo, cerca del 30% de las aleaciones de cobre se moldean en moldes de arena. Sólo en el 10%, aproximadamente, de los metales no férreos ligeros se utilizan moldes de un solo uso.

La producción de modelos y matrices normalmente corresponde a empresas suministradoras externas especializadas y normalmente centradas en los sectores del tratamiento de metales y plásticos.

[2, Hoffmeister, et al., 1997], [32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001]

2.5.1. Materias primas

2.5.1.1. Materiales refractarios

Independientemente del tipo de aglomerante utilizado, las propiedades físicas y químicas del material refractario utilizados para confeccionar los moldes o machos afectan a sus características y a su comportamiento durante la colada. Se trata de un hecho lógico, ya que estos materiales representan el 95–99% del total de productos empleados.

El precio de compra de cada tipo de arena tiene cuatro componentes: la extracción, la preparación, el envasado y el transporte. Los costes de transporte varían de una región a otra, aunque el factor determinante del precio es el tipo de arena. El precio medio de adquisición varía considerablemente. Así, según un cuestionario realizado en 1995 en el Reino Unido, el precio por tonelada de arena de cromita y zirconia era 9 y 14 veces superior, respectivamente, al de la arena silícea. En Portugal, el precio de la arena depende de la cantidad comprada, pero por lo general es más barata que en España, Francia o Italia. Los precios portugueses (año 2003) oscilan entre los 20 y los 25 euros por tonelada de arena seca AFS 55, más transporte. Los precios correspondientes a la arena silícea en la República Checa (2003) van de los 10 a los 20 euros, dependiendo del volumen, el envasado y el tratamiento al que se someta. El precio de la arena de cromita es de entre 250 – 300 EUR/tonelada, y el de arena de zirconia, de 250 – 400 EUR/t.

[72, ETSU, 1995], [225, TWG, 2003]

Los distintos tipos de arenas refractarias utilizadas en fundición se describen en los siguientes apartados.

2.5.1.1.1. Arena silícea

Este tipo de arena es el que más se utiliza, sobre todo porque es el más disponible y porque tiene un precio relativamente bajo. La arena silícea se compone de cuarzo (SiO_2), más o menos puro y limpio en función de su origen. Su densidad seca es de entre 2,5 y 2,8 kg/dm³ y su densidad o volumen aparente de 1,4 a 1,6 kg/dm³.

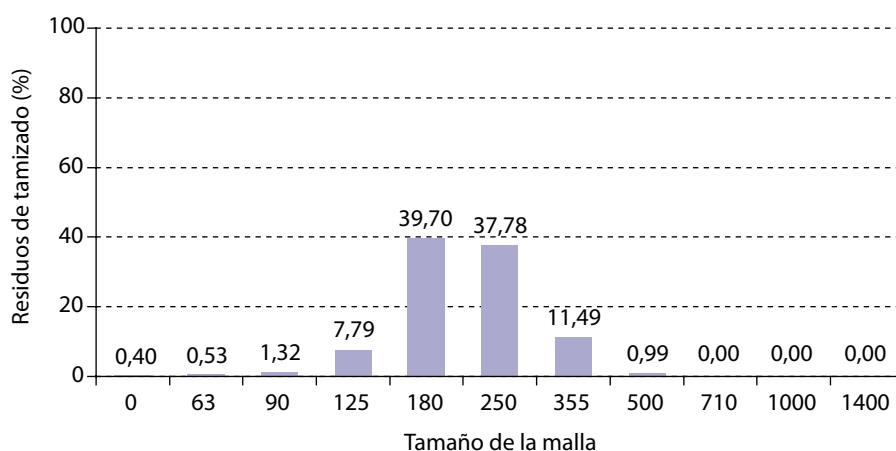
La expansión térmica de la arena silícea genera un movimiento de molde durante la colada y el enfriamiento, lo cual obliga a utilizar aditivos, especialmente al confeccionar machos, para evitar errores en las piezas finales. Entre los aditivos empleados, se encuentran la celulosa de madera, el óxido de hierro o la arena de fundición tratada térmicamente. El feldespatos con contenido de arena presenta una menor expansión térmica que la arena de cuarzo puro y también un punto de sinterización más bajo, aun así es ampliamente utilizado para minimizar los defectos de expansión de las piezas.

La arena silícea es neutra y compatible con todos los aglomerantes y aleaciones utilizados habitualmente en las coladas. La IARC clasifica las partículas respirables (RPM) del cuarzo como carcinogénica [233, IARC, 1997], por lo que su empleo es una cuestión de salud y seguridad. En la actualidad se están llevando a cabo estudios para determinar si también se produce contaminación atmosférica. La cantidad de cuarzo presente en las partículas de polvo depende de la cantidad de cuarzo de los materiales de entrada.

En la tecnología de moldeo en arena verde cobra gran importancia el control de la distribución de tamaño de grano. En la Figura 2.25 se observa la distribución típica propia de la arena silíceas. La distribución de tamaño de grano sirve para calcular el número AFS (AFS = American Foundry Society), que mide el grado de finura de la arena. Cuanto más elevado sea el valor más fina será la arena. Otro sistema de clasificación alternativo es el número medio de granos o MK.

Cuanto más fina sea la arena más granos habrá por gramo y, por tanto, mayor superficie de contacto. Es decir, se necesitará más aglomerante para obtener la misma resistencia de molde. Por este motivo, los titulares intentan usar la arena más gruesa posible que permita obtener un buen acabado superficial. Los números AFS estándar son 50 – 60. Si se requiere una superficie final muy uniforme se utiliza arena más fina, por ejemplo valores AFS 90 – 110. Las arenas finas se utilizan en algunos casos para sustituir el recubrimiento de los moldes. [110, Vito, 2001], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

Figura 2.25.
Distribución por
tamaño de los granos
típica de las arenas
silíceas usadas
en fundiciones
[110, Vito, 2001]



2.5.1.1.2. Arena de cromita

La cromita es un mineral de cromo, de fórmula teórica $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, que contiene otros componentes como óxidos de magnesio y aluminio. Para su aplicación en fundición tiene que tener un contenido en silicio inferior al 2% para evitar la sinterización a bajas temperaturas. Sus características son las siguientes:

- densidad: entre 4,3 y 4,6, (arena silícea: 2,65);
- punto de fusión teórico: 2.180°C, aunque la presencia de impurezas puede rebajarlo a 1.800 °C;
- difusividad térmica: superior en más de un 25% a la de la arena silícea;
- expansión térmica: regular, sin punto de transición, e inferior a la de la arena silícea;
- pH: más bien básico, entre 7 y 10.

La arena de cromita es más refractaria que la silícea, más estable térmicamente y con una mayor capacidad de enfriamiento. Con ellas se obtiene un mejor acabado superficial en piezas grandes. Se utiliza para la producción de pieza grande o en zonas del molde donde es necesario mayor enfriamiento. [32, CAEF, 1997]

2.5.1.1.3. Arena de zirconia

La zirconia es silicato de zirconio, con fórmula ZrSiO_4 . Es el más extendido entre los minerales del zirconio. Sus características son las siguientes:

- densidad: de 4,4 a 4,7 (arena silícea: 2,65);
- punto de fusión: superior a 2.000 °C;
- difusividad térmica: superior en más de un 30% a la de la arena silícea;
- expansión térmica: regular, sin punto de transición, e inferior a la de la arena silícea.

Las características generales de la zirconia son parecidas a las de la cromita, aunque la arena de zirconio proporciona mejores acabados al ser más fina. Sus propiedades físicas y térmicas permiten utilizarla en la producción de moldes o machos difíciles, a pesar de su precio, que es muy elevado. [32, CAEF, 1997], [72, ETSU, 1995]

2.5.1.1.4. Arena de olivino

Las arenas de olivino forman parte de un grupo mineral compuesto por la forsterita, y la fayalita, entre otras. Estas son sus características:

- punto de fusión: forsterita: 1.890°C, fayalita: 1.205 °C;
- densidad: de 3,2 a 3,6;
- pH: alrededor de 9.

El pH básico hace que esta arena no sea apropiada para sistemas de aglomeración mediante catalizador ácido.

La arena de olivino se produce triturando roca natural, lo que explica que su diversidad de características. Normalmente se emplea para la producción de moldes y machos en la fundición de acero al manganeso. La presencia de manganeso imposibilita la del silicio, ya que estos dos componentes reaccionan y dan lugar a un componente que se funde con mucha facilidad. El precio de compra documentado en España (2002) es de 130 EUR/tonelada.

[32, CAEF, 1997], [210, Martínez de Morentin Ronda, 2002]

2.5.1.2. Aglomerantes y otros productos químicos

2.5.1.2.1. Bentonita

La bentonita es una arcilla esmectita de estructura laminar. Mediante adición de agua la estructura arcillosa crece a causa de la adsorción de moléculas de agua de forma que se hace manejable y se puede extender para recubrir los granos de arena durante el mezclado.

Las bentonitas de calcio naturales no crecen ni se gelifican con agua. En la actualidad se utilizan muy poco quedando su uso limitado a piezas muy especiales. Estos materiales pueden activarse con carbonato sódico y dar lugar a bentonitas activadas por sosa, ampliamente utilizadas en las fundiciones férreas de toda Europa; sus propiedades son parecidas a las de las bentonitas sódicas naturales.

Las bentonitas sódicas naturales se hinchan considerablemente al mezclarse con agua. Desde el punto de vista de la arena verde, sus principales características son su gran dureza en seco, buena tolerancia a las variaciones en el contenido de agua, gran resistencia al quemado y durabilidad mejorada a altas temperaturas. Al importarse de Estados Unidos, donde se utilizan habitualmente, su precio suele limitar su empleo a piezas de acero de gran calidad o a mezclas con bentonitas cálcicas activadas.

Al vaciar el metal fundido en el molde de arena verde se somete la arena a un calor considerable que elimina la humedad y destruye la estructura ligada con arcilla (y los aditivos). Si durante el vaciado y el enfriamiento la bentonita permanece por debajo de la temperatura de desactivación, la estructura laminar se mantiene, así como la capacidad de hincharse y cohesionarse. La temperatura de desactivación varía de un tipo de bentonita a otro.

Los precios de la bentonita oscilan entre 70 y 250 EUR/tonelada, dependiendo del envasado y tipo de producto (República Checa, 2003).

[32, CAEF, 1997], [73, ETSU, 1995], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

2.5.1.2.2. Resinas

En las últimas décadas se han desarrollado una serie de aglomerantes químicos. Son sistemas de un único o de varios componentes que se mezclan con la arena de fundición hasta que todos los granos quedan recubiertos

de una fina película. Tras el mezclado se inicia una reacción endurecedora que une los granos de arena y da fuerza al molde. Las resinas pueden clasificarse según el método de endurecimiento del modo siguiente:

- resinas de endurecimiento en frío;
- resinas endurecidas por gas;
- resinas termocuradas.

Los distintos tipos de resina se tratarán en el apartado 2.5.6. En la Tabla 2.7 se muestran las posibles aplicaciones de algunas resinas.

Tabla 2.7. Relación de varios tipos de resina y sus aplicaciones [110, Vito, 2001]

Endurecimiento	Tipo de resina («nombre comercial»)	Producción de moldes	Producción de machos	Temperatura de curado	Tiempo de endurecimiento (*)	Tipos de metal	Tamaño de la serie
En frío	Furano	Media – grande	A veces	10 – 30 °C	10 – 120 min.	Férreos + no férreos	Pequeña – grande
	Fenólica	Grande	No	10 – 30 °C	10 – 180 min.	Férreos	Pequeña – grande
	Poliuretano («Pepset/ Pentex»)	Pequeña – media	A veces	10 – 30 °C	5 – 60 min.	Férreos + no férreos	Pequeña – grande
	Resol – éster («Alfaset»)	Pequeña – grande	A veces	10 – 30 °C	5 – 400 min.	Férreos + no férreos	Pequeña – grande
	Aceite alquídico	Grande	A veces	10 – 30 °C	50 min.	acero	Pequeña
	Silicato – vidrio soluble	Media – grande	No	10 – 30 °C	1 – 60 min.	Férreos + no férreos	Pequeña – media
Por gas	Fenólica/ Furano** («Hardox»)	Pequeña	Sí	10 – 30 °C	< 60 s.	Férreos + no férreos	Todas
	Poliuretano («Caja fría»)	Pequeña	Sí	10 – 30 °C	< 60 s.	Férreos + no férreos	Todas
	Resol («Betaset»)	Pequeña	Sí	10 – 30 °C	< 60 s.	Férreos + no férreos	Todas
	Acrílica/ époxi («Isoet»)	No	Sí	10 – 30 °C	< 60 s.	Férreos + no férreos	Todas
	Silicato	Pequeña	Sí	10 – 30 °C	< 60 s.	Férreos + no férreos	Todas
Termocuradas	Petróleo	Pequeña	Sí	180 – 240 °C	10 – 60 min.	Férreos	Pequeña
	«Caja tibia»	Casi nunca	Sí	150 – 220 °C	20 – 60 s.	Férreos	Media – grande
	«Caja caliente»	Casi nunca	Sí	220 – 250 °C	20 – 60 s.	Férreos + no férreos	Media – grande
	«Croning»	Sí	Sí	250 – 270 °C	120 – 180 s.	Férreos + no férreos	Grande

* Es decir, tiempo de desprendimiento que tarda el moldeo/macho en endurecerse lo suficiente para ser liberado del molde

** No se utiliza con capacidades inferiores a 20 toneladas/día.

2.5.1.2.3. Polvo de carbón

El polvo de carbón se añade normalmente a la arena verde para moldear la fundición de hierro; se utiliza hasta cierto punto en algunas fundiciones no férreas. El polvo de carbón puede mezclarse con pequeñas cantidades de resinas y derivados del petróleo. Durante el moldeo, la degradación térmica produce «carbono brillante» (o lustroso) que mejora el acabado superficial de la pieza y las propiedades de desmoldeo. El polvo de carbón se añade por tres motivos:

- para crear una atmósfera inerte en la cavidad del molde durante el vaciado a través de la combustión de compuestos orgánicos que ralentizan la oxidación del metal (formación de escoria);
- para reducir la penetración de metal entre los granos de cuarzo mediante la creación de una película de grafito que también forma una superficie de moldeo plana;
- para reducir la cantidad de arena que permanece en la superficie del moldeo en el momento del desmoldeo.

Además del polvo negro y pegajoso causado por la manipulación, el polvo de carbón puede contener o generar HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) durante el vaciado.

En los moldeos de acero no se usa polvo de carbón debido a la absorción de carbono; suele sustituirse por aglomerante de cereales como el almidón o la dextrina.

Existen varios materiales que se utilizan en sustitución del polvo de carbón. Se trata de mezclas de materiales de carbono muy brillantes y volátiles que se combinan con arcillas. Por lo general, su impacto medioambiental es menor al del polvo de carbón, ya que se produce menos humo durante el moldeo, si bien es cierto que algunos sustitutos generan más HAP al estar en contacto con la arena.

[174, Brown, 2000], [225, TWG, 2003]

2.5.1.2.4. Aglomerantes de cereales

Los aglomerantes de cereales se utilizan principalmente en fundiciones de acero para aumentar la resistencia y la dureza de la arena verde. Los hay de dos tipos: almidón y dextrina. El almidón es el material básico y el que más utilizan las fundiciones; se produce a base de distintas materias vegetales, especialmente almidón de maíz. La dextrina es una forma repolimerizada del almidón producida por la acción de un ácido y del tratamiento térmico del almidón.

Los almidones contribuyen a reducir los defectos de expansión, ya que al quemarse permiten que los granos de arena se deformen sin llegar a deformar el molde. Los cereales aumentan la resistencia en verde y en seco y también la dureza, aunque pueden reducir la colabilidad. Las dextrinas mejoran la colabilidad y la retención de humedad, evitando que los moldes se sequen en exceso y los bordes se queden quebradizos.

Los aditivos de cereal no mejoran la resistencia a la erosión de la arena ni su resistencia a la penetración del metal.

[174, Brown, 2000], [175, Brown, 1999]

2.5.1.2.5. Óxido de hierro

El óxido de hierro reacciona con el cuarzo a altas temperaturas y forma un compuesto de bajo punto de fusión, la fayalita. Este producto de textura vidriosa sinteriza los granos de arena; se utiliza principalmente para la producción de arena para machos, ya que logra reducir la formación de vetas.

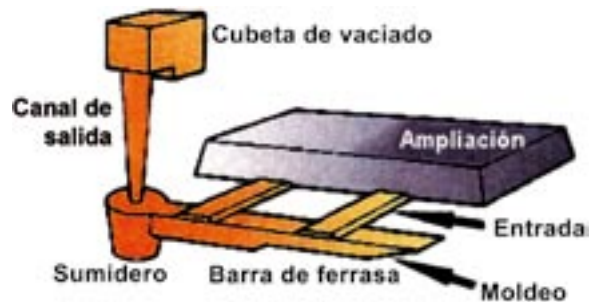
[110, Vito, 2001]

2.5.1.3. Llenado, alimentación y filtrado

Los distintos elementos utilizados en los bebederos se muestran en la Figura 2.26. El bebedero realiza las siguientes funciones:

- controla el flujo de metal que entra en la cavidad del molde y la velocidad necesaria para evitar defectos en frío del metal en la pieza;
- evita la formación de turbulencias al entrar el metal en el molde;
- evita que la escoria y el dross presentes en la colada pasen al molde;
- evita la colisión por alta velocidad del flujo de metal en la superficie de los moldes o machos;
- contribuye a formar gradientes térmicos en el interior de la pieza, lo que le aporta solidez;
- permite separar fácilmente el molde del sistema de alimentación.

Figura 2.26.
Componentes
del bebedero
[237, HUT, 2003]

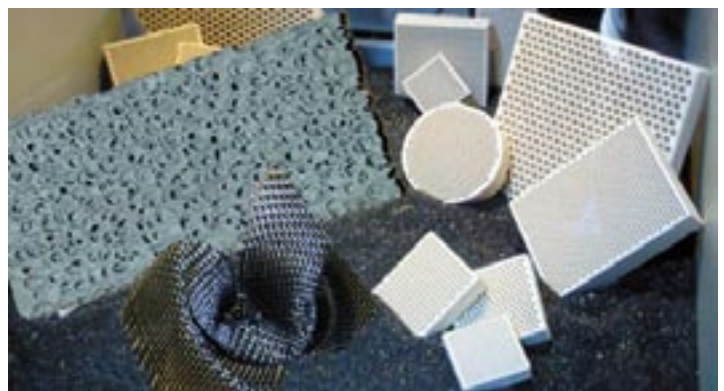


En el diseño del sistema de llenado deben tenerse en cuenta las distintas propiedades de formación de escoria y dross que presenta el material a colar, por ejemplo:

- en el hierro laminar puede haber presencia de escoria del horno, aunque sin riesgo de inclusiones en la colada a causa de la oxidación;
- el hierro nodular contiene escoria de silicato y sulfuro de magnesio producidas durante la nodulización;
- el acero es susceptible de oxidarse y formar escoria;
- las aleaciones de aluminio (y los bronce de aluminio) tienen problemas de formación de dross, ya que cualquier superficie metálica que quede expuesta al aire forma inmediatamente una capa de óxido.

Pueden producirse inclusiones en el acero por quedar atrapada la escoria, por erosión del refractario del horno y cucharas y también por desoxidación. En la actualidad se emplea a menudo el filtrado para reducir la presencia de inclusiones. La introducción de filtros cerámicos ha permitido simplificar incluso el diseño de los sistemas de alimentación. En la Figura 2.27 se muestran algunos de los distintos filtros existentes.

Figura 2.27.
Distintos tipos de filtros
[237, HUT, 2003]



2.5.2. Preparación de la arena (transporte, tamizado, enfriamiento, mezcla)

2.5.2.1. Acondicionamiento de la arena para el moldeo en arena verde

Una de las principales ventajas de utilizar arena verde para los moldeos es que puede regenerarse y volverse a utilizar. En la Figura 2.28 puede verse el diseño general de una planta de producción de arena verde, y en la Figura 2.29 algunos ejemplos de mezcladores de arena.

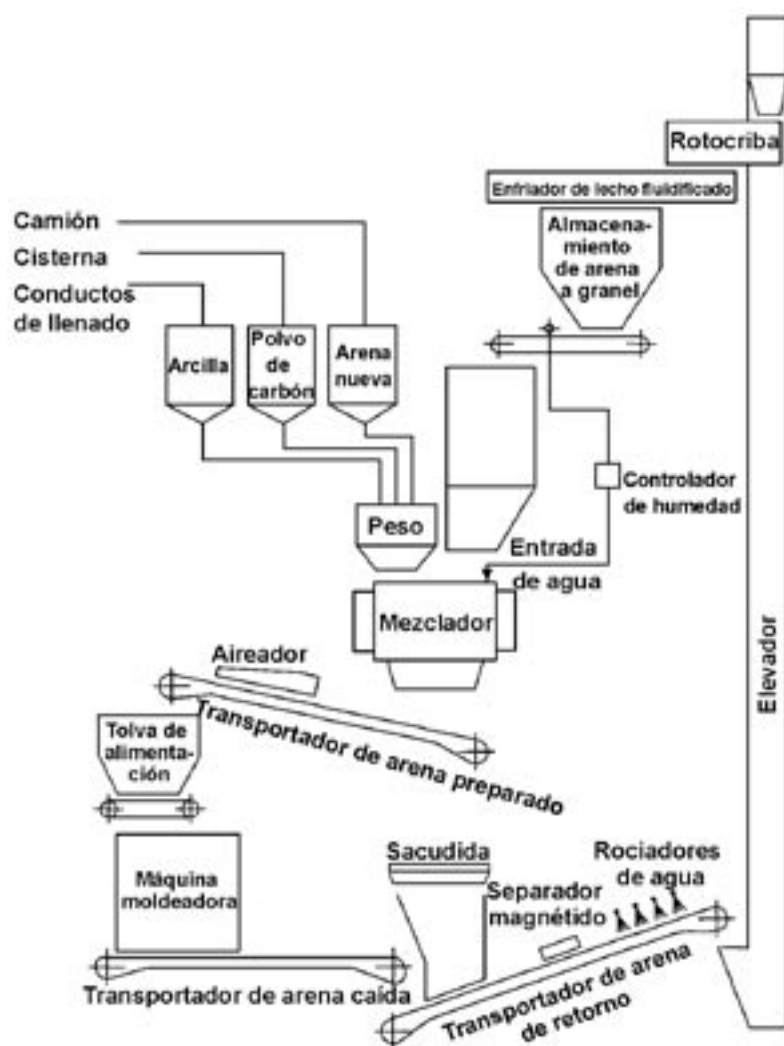


*Figura 2.28.
Diagrama de flujo
de una típica planta
de tratamiento de arena
verde [174, Brown, 2000]*



*Figura 2.29.
Distintos tipos
de mezcladores de arena
[237, HUT, 2003]*

Es necesario limpiar la arena ya que a menudo contiene elementos metálicos como rebabas, gotas de colada, trozos de chatarra o incluso piezas metálicas de los moldeos. En primer lugar, se realiza una depuración inicial mediante separadores magnéticos. Si no se consigue o resulta imposible separar las piezas de hierro, la separación puede realizarse por medio de separadores de corriente de Eddy, que rompen los trozos gruesos de arena residual. Es importante no triturar la arena para evitar que se pierda la mezcla de arena y bentonita.

Normalmente la arena ya preparada debe enfriarse para mantener el nivel de humedad lo más constante posible y para evitar cualquier pérdida por evaporación. El enfriamiento se realiza normalmente en un lecho fluidizado que permite, además, realizar una depuración de partículas en la arena extrayendo las partículas finas en exceso.

La arena se tamiza a continuación para extraerle los gruesos restantes y se almacena antes de mezclarla con las cantidades requeridas de aditivos, como arcilla, agua, etc., y prepararla para un nuevo uso. [32, CAEF, 1997], [174, Brown, 2000]

2.5.3. Moldeo en arena natural

Algunas fundiciones utilizan arena ligada de forma natural, que contiene un porcentaje (natural) de arcilla. En este caso sólo es necesario añadir agua para activar la capacidad de aglomeración. Si se requiere pueden añadirse también algunos aditivos. La composición aproximada de la arena natural se muestra en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Composición de la arena natural [126, Teknologisk, 2000]

Componentes	% aproximado
Arena de cuarzo	80
Arcilla	15
Agua	5

La arena natural, que se encuentra en la naturaleza lista para su uso, no necesita tantos equipos de mezclado como la sintética. Se utiliza sobre todo en fundiciones no férreas pequeñas (por ejemplo, bronce) y no se emplea en fundiciones de hierro y acero.

2.5.4. Moldeo con arena ligada con arcilla o bentonita (moldeo en verde)

El moldeo en arena verde es el más utilizado de todos, aunque no se usa para la producción de machos, que se forman recurriendo a un sistema de aglomeración química. El moldeo en arena verde es el único proceso en el que se utiliza mezcla de arena húmeda. La mezcla se compone de un 85–95% de arena silícea (o bien de olivino o zirconia), un 5 a 10% de arcilla de bentonita, un 3 a 9% de materiales carbonosos como polvo de carbón (marino), derivados del petróleo, almidón de maíz o harina y un 2–5% de agua. La arcilla y el agua actúan de aglomerantes manteniendo los granos de arena unidos. Las sustancias carbonosas se queman cuando el metal fundido se vierte al molde, creando una atmósfera reductora que evita que el metal se oxide a medida que se solidifica. En la Tabla 2.9 figuran algunos de los aditivos empleados en distintos tipos de moldeo de metales.

La arena verde, como demuestra su extendido uso, presenta varias ventajas respecto a otros métodos de moldeo. El proceso sirve tanto para el moldeo de metales férreos como no férreos y se muestra efectivo para más productos que ningún otro método de moldeo. Por ejemplo, la arena verde se utiliza para producir gamas completas de piezas, desde piezas pequeñas de precisión hasta piezas grandes de hasta una tonelada. Si se logra mantener una compactación uniforme y control preciso de sus propiedades pueden obtenerse tolerancias muy precisas. El proceso tiene la ventaja, además, de requerir un tiempo de preparación de moldes relativamente breve en comparación con muchos otros sistemas. Por otro lado, la relativa simplicidad del proceso hace que sea ideal para sistemas mecanizados.

Tabla 2.9. Composición de la mezcla de aditivos utilizada para preparar arena verde (excepto agua) [36, Winterhalter, et al., 1992]

Metal moldeado	Aditivos para la reparación de arena verde
Fundición de hierro nodular Fundición de hierro laminar Fundición de hierro maleable	Bentonita Aglomerante de cereales* Polvo de carbón
Acero	Bentonita Aglomerante de cereales*
Metal ligero y aluminio	Bentonita Aglomerante de cereales*
Aluminio con aleación de magnesio	Bentonita Ácido bórico
Magnesio	Bentonita Azufre en polvo Ácido bórico
Metales pesados (aleaciones de cobre)	Bentonita Aglomerante de cereales* Polvo de carbón

* Aditivo opcional.

Aunque todavía se siguen preparando moldes a mano, el moldeo mecanizado está mucho más extendido en la actualidad. En las máquinas de moldeo deben realizarse dos operaciones secuenciales: primero se compacta la arena y a continuación se separa la arena compactada del modelo. Los principales procesos utilizados funcionan como se describe a continuación.

El moldeo por presión emplea alta presión para compactar la arena mediante una placa de presión simple o de múltiples pistones. Moldear únicamente por presión es menos efectivo a medida que aumenta la profundidad del semimolde. En estos casos, sacudir la mesa de trabajo contribuye en gran manera a aumentar la compactación de la arena.

En el moldeo por impacto, la arena se alimenta por gravedad en la caja y se compacta por liberación instantánea de aire comprimido mediante activación de una válvula. Este proceso proporciona una densidad elevada y uniforme, especialmente en la arena que rodea el modelo.

El moldeo sin caja, con juntas tanto verticales como horizontales, proporciona una eficiencia productiva muy considerable. Con él puede producirse con gran precisión, pero para lograr este objetivo se requiere una preparación adecuada y modelos de gran calidad. [32, CAEF, 1997]. [42, US EPA, 1998]

2.5.5. Moldeo con arena suelta (moldeo en vacío)

En este proceso se utiliza arena seca compactada por vibración, sin adición de aglomerantes. La arena queda ubicada entre dos láminas de polietileno por vacío parcial.

La Figura 2.30 ilustra la producción de semimoldes. Los pasos del proceso son los siguientes, en este orden:

- el modelo se fija a una cámara hermética conectada a una bomba de vacío. A continuación se purga por unos orificios de diámetro pequeño conectados a través de la cámara hermética;
- una fina película de acetato de polietilenvinilo (PEVA), de un grosor de entre 75 y 100 micras, se calienta hasta los 85 °C;
- la capa, que se expande por la acción del calor, se aplica sobre el modelo y se fija mediante vacío a través de la cámara hermética;

- la caja de moldeo, que permite crear vacío, se coloca sobre el modelo y se llena de arena seca;
- la arena se compacta por vibración y se uniformiza y a continuación se recubre de una segunda capa de PEVA;
- se extrae el aire de la caja de moldeo; al mismo tiempo, se libera el vacío de la cámara provocando que la arena se endurezca y el semimolde pueda desprenderse;
- el segundo semimolde se confecciona del mismo modo y después ambos se ensamblan y cierran sin dejar de generar vacío;
- en este momento ya puede introducirse el caldo; las dos cajas de moldeo permanecen a vacío hasta que la pieza esté lo suficientemente fría como para proceder al desmoldeo;
- el proceso de desmoldeo es muy simple: basta con detener el vacío. La arena escapa de la caja por la rejilla y puede reciclarse una vez de ser sometida a extracción de partículas y separada de las láminas de plástico no quemadas.

[174, Brown, 2000]

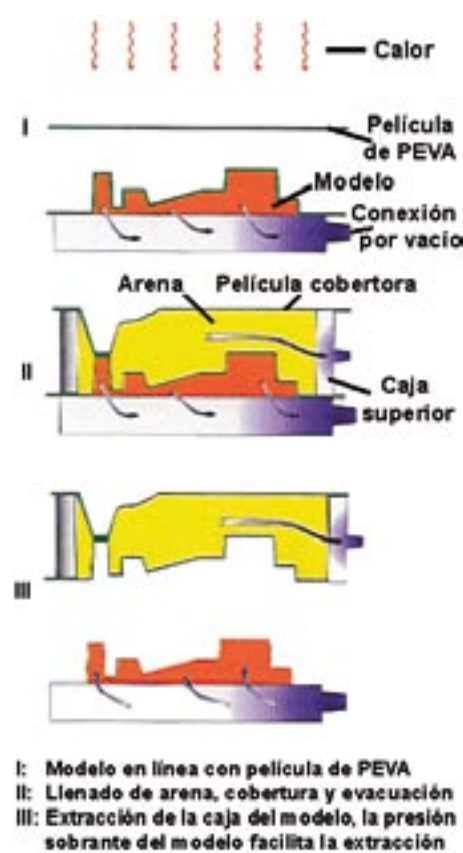


Figura 2.30.
Moldeo en vacío
[179, Hoppenstedt, 2002]

2.5.6. Producción de moldes y machos con arena química

Para la elaboración de machos se utilizan principalmente sistemas de aglomeración químicos. Los machos tienen características físicas distintas a los moldes, por ello los aglomerantes utilizados también pueden ser distintos. Los machos deben resistir las fuerzas que se generan cuando el metal líquido llena el molde, y a menudo deben extraerse posteriormente a través de pequeñas zonas de la pieza final. El sistema de aglomeración utilizado debe por tanto ser capaz de producir machos resistentes que se desmonten para poder extraerlos una vez solidificada la pieza final. Por este motivo suelen confeccionarse con arena silícea (ocasionalmente arena de olivino, zirconia o cromita) y aglomerantes químicos resistentes. La arena y la mezcla aglomerante se colocan en la caja de machos, de donde se extraen una vez que han adoptado la forma de macho deseada. El endurecimiento, o curado, se logra por medio de una reacción química o catalítica.

En la Tabla 2.10 se muestran las cuotas relativas de los distintos procesos de producción de machos en las fundiciones alemanas que trabajan para el sector automovilístico (datos de 1991). Como puede observarse, las

técnicas de aminas en caja fría y en caja caliente dominan el mercado. Más del 90% de este tipo de fundiciones utilizan el sistema de aminas en caja fría. Los otros procesos (Croning, CO₂-silicato) son de uso complementario, por ejemplo para elaborar machos de características específicas (de tamaño, grosor, etc.). [42, US EPA, 1998], [174, Brown, 2000]

Tabla 2.10. Procesos de producción de machos empleados en 48 fundiciones dedicadas a la producción de piezas para el sector automovilístico de Alemania, 1991 [174, Brown, 2000]

Sistema	Número
Aminas en caja fría	44
En caja caliente	10
En cáscara/Croning	9
CO ₂ – silicato	3

2.5.6.1. Procesos de fraguado en frío

El curado de las arenas de aglomeración en frío se produce a temperatura ambiente. El proceso se inicia al introducir en la mezcla el último componente de la fórmula. A continuación se prolonga durante unos minutos o varias horas, dependiendo del proceso, la cantidad de aglomerante y la fuerza del agente de fraguado.

Estos procesos se utilizan más a menudo para confeccionar moldes que machos, sobre todo si se trata de piezas de tamaño medio o grande.

2.5.6.1.1. Resina fenólica con catalizador ácido

Este proceso se utiliza desde 1958. Los componentes necesarios son relativamente baratos, por lo que se emplea principalmente para la producción de piezas grandes. Sirve para todo tipo de aleaciones. El curado de estas resinas es más complicado y menos uniforme que el de las de furano.

Las resinas usadas son de fenol-formaldehído (PF) o con copolímeros de formaldehído ureico/fenol-formaldehído (UF/PF), ambas «resoles», con una proporción de formaldehído/fenol superior a uno. Los catalizadores son potentes ácidos sulfónicos como el paratolueno, el xileno o el ácido bencensulfónico, a los que a veces se añade ácido sulfúrico, normalmente diluido.

2.5.6.1.2. Resina furánica con catalizador ácido

Estos aglomerantes, utilizados por primera vez en las fundiciones en 1958, se emplean habitualmente para la producción de machos y moldes de piezas de tamaño medio y grande, para la producción discontinua de series pequeñas y medias y para todo tipo de aleaciones. Para piezas de de acero sólo se utilizan unos tipos concretos, de lo contrario existe riesgo de formación de grietas, finos o picaduras. El proceso resulta flexible desde el punto de vista de la aplicación y sus propiedades. El alcohol de furfurilo (FA) tiene la desventaja de ser un producto básico (estratégico) sometido a variaciones del precio de mercado. Los aglomerantes furánicos son comparables a los fenólicos; ambos utilizan el mismo mecanismo de aglomeración y catalizadores ácidos. En la Figura 2.31 pueden verse algunos ejemplos de machos furánicos.

Al añadir un catalizador ácido a una resina furánica se produce una policondensación exotérmica que endurece el aglomerante. Las resinas de furano pueden tener distintas formulaciones, todas ellas con base de alcohol furfurílico:

- resina furánica FA
- urea – formaldehído – alcohol furfurílico UF – FA
- fenol – formaldehído – alcohol furfurílico PF – FA

- urea – formaldehído – fenol – alcohol furfurílico UF – PF – FA
- resorcinol – alcohol furfurílico R – FA

Casi siempre se añade además silano para potenciar la aglomeración de la resina-arena. Los catalizadores son potentes ácidos sulfónicos como el paratolueno, el xileno o el ácido bencensulfónico, a los que a veces se añade ácido sulfúrico o fosfórico, normalmente diluido.
[110, Vito, 2001]



Figura 2.31.
Machos furánicos
[237, HUT, 2003]

2.5.6.1.3. Poliuretano (isocianato fenólico)

Este proceso también se utiliza, en menor grado, en la producción de machos y moldes, a excepción de los de acero, que podrían presentar grietas y picaduras en las piezas (aunque para evitarlo puede añadirse óxido de hierro o secar los moldes y machos). En algunos países (como Suecia) este tipo de aglomerante no se utiliza desde hace 25 años, sobre todo a causa de sus efectos en el ambiente de trabajo.

El proceso se basa en la reacción por poliadición que se produce entre una resina fenólica y un isocianato (principalmente MDI), catalizada por un derivado de la piridina; como resultado se obtiene una estructura de poliuretano. Todos los componentes forman una solución en didisolvente aromático y/o polar (por ejemplo didisolvente alifático), con un punto de ebullición elevado. Debe evitarse a toda costa la contaminación por agua, ya que ésta reacciona fuertemente con el isocianato.

2.5.6.1.4. Éster fenólico alcalino (Resol – éster)

Este proceso se utiliza para la producción discontinua de pequeñas y medias series; es válido para todas las aleaciones, en especial para las más ligeras a causa de la facilidad de desmoldeo. La ausencia de nitrógeno entre los reactivos que forman el compuesto es una ventaja a la hora de moldear acero.

La resina es una solución de resol fenólico alcalino que reacciona con éster líquido. La resina y el éster producen un complejo inestable que provoca la gelificación. El complejo se desintegra y causa la polimerización cruzada de la resina, lo que da como resultado una sal y un alcohol.

En el proceso, la velocidad de curado no se controla a partir de la proporción de endurecedor añadido, sino a partir de distintos grados. El tiempo de curado puede oscilar entre unos minutos y más de una hora. Las propiedades mecánicas inmediatamente posteriores al curado no son destacables, pero mejoran con el almacenamiento.

2.5.6.1.5. Aceite alquídico, sin estufado

Este proceso se utiliza básicamente en coladas especiales y para la producción discontinua a pequeña escala en fundiciones de acero. Destaca por su buen acabado superficial y fácil desprendimiento, pero resulta muy caro.

Se prepara mezclando resina de poliéster modificada con aceite, e isocianato, lo que produce una resina de poliuretano de lento curado. El fraguado del molde se acelera con un catalizador y se completa calentándolo a 150 °C.

2.5.6.1.6. Silicato-éster

Se usa sobre todo en fundiciones de acero para piezas de tamaño medio-grande en series pequeñas y medias. Es un proceso parecido al del aceite alquídico sin estufado descrito en el párrafo anterior pero, a diferencia de aquel, el moldeo no se desprende tan fácilmente ni tiene tanta resistencia mecánica como la de los sistemas de aglomeración por resina orgánicos.

En el endurecimiento de la arena de silicato éster hay un paso intermedio que consiste en hidrolizar el éster mediante la solución de silicato alcalino. La hidrólisis produce glicerol y ácido acético que precipita en forma de gel para formar el enlace inicial. Cuando el silicato residual se seca aumenta la resistencia.

2.5.6.1.7. Cemento

Este proceso sólo se utiliza para piezas de tamaño muy grande, sobre todo en obra civil. No genera emisiones al confeccionar ni moldes ni machos.

2.5.6.2. Procesos de fraguado por gas

En estos procesos el curado se realiza por inyección de un catalizador o endurecedor en forma gaseosa. El curado puede ser muy rápido y la producción, por tanto, elevada. Funcionan bien con moldes y machos de tamaño limitado, en series de tamaño medio o para la producción en masa. Su uso se ha ido extendiendo en los últimos años.

El principio químico que subyace a estos procesos de endurecimiento por gas es parecido al de los procesos de aglomeración en frío. Al encontrarse los catalizadores en forma gaseosa a veces es necesario capturar y tratar las emisiones.

2.5.6.2.1. Caja fría (uretano fenólico endurecido con aminas)

Este proceso se utiliza habitualmente para confeccionar machos de incluso 100 kg y más, así como pequeños moldes. Proporciona un acabado superficial muy fino y una precisión dimensional realmente elevada. Sus propiedades de extracción de machos son excelentes y la arena puede reutilizarse fácilmente. Se utiliza más a menudo para elaborar machos. En la Figura 2.32 puede verse un ejemplo de macho confeccionado en caja fría.



Figura 2.32.
Macho confeccionado
en caja fría
[237, HUT, 2003]

Desde un punto de vista químico, este proceso basado en el poliuretano es muy parecido al de la aglomeración en frío con poliuretano; en ambos se utiliza resina fenólica y un isocianato (MDI). Sólo varía el catalizador; en este proceso se emplea una amina terciaria, por ejemplo trietilamina (TEA), dimetiletilamina (DMEA), dimetilisopropilamina (DMIA) o dimetilpropilamina (DPMA). La amina se aplica en forma de vapor por medio de un gas portador (aire comprimido, nitrógeno o CO_2). Tanto la resina como el isocianato se encuentran disueltos en disolventes aromáticos y/o polares con puntos de ebullición elevados. La contaminación con agua debe evitarse a toda costa, ya que experimenta una fuerte reacción con el isocianato que debilita el aglomerante.

La amina se suministra a través de un generador en el que el gas portador, preferiblemente inerte, está saturado de vapores de amina o bien a través de un inyector que mide automáticamente la cantidad de amina necesaria para la operación; a continuación la inyecta en la arena a través de aire comprimido o nitrógeno gaseoso. La proporción de adición del aglomerante oscila entre el 1,0 y el 2,0% del peso total de la arena, con la resina y el isocianato en una proporción de 50:50.

La amina no es más que un catalizador, por eso no se consume en la reacción. Tras el curado permanece en la arena del molde o macho y debe eliminarse. En la actualidad, el lavado dura entre 10 y 15 veces más que la inyección de la amina. La cantidad de amina necesaria para el endurecimiento es de aproximadamente un 0,05% del peso de la arena, aunque lo normal es que se utilice entre un 0,10 y 0,15%.

Existe una variante de este proceso llamada «Cold-box Plus» que consiste en calentar la caja de machos a 40–80 °C mediante agua caliente en circulación. Los machos resultantes presentan una mejor resistencia mecánica, si bien los tiempos de los intervalos son mayores.
[110, Vito, 2001]

2.5.6.2.2. Formiato de metilo fenólico alcalino (Resol – éster)

Se trata de un proceso bastante nuevo. Sus ventajas y desventajas son similares a las de los procesos de aglomeración en frío de los que deriva. Puesto que su precio es elevado, se utiliza especialmente para la producción de machos. A pesar de las dificultades indicadas a la hora de reciclar la arena usada es un proceso muy extendido, sobre todo a causa de la facilidad de desmoldeo, la capacidad de evitar las grietas, vetas y picaduras y la baja emisión de olores. Sirve para cualquier tipo de series y aleaciones, aunque se utiliza sobre todo para aleaciones ligeras y superligeras (facilidad de desmoldeo) y acero (menor riesgo de grietas).

La resina es un resol fenólico alcalino que reacciona con el formiato de metilo y produce metanol y un formiato alcalino. La resina fenólica se precipita en forma de gel que fija todos los componentes. Durante el almacenamiento, los enlaces cruzados aportan aún mayor dureza.

El formiato de metilo es líquido a temperatura ambiente y tiene un punto de ebullición de 32 °C, pero se gasifica con aire calentado habitualmente hasta los 80 °C y que actúa además de portador en el proceso. A la gasificación le sigue siempre una depuración con aire con el que se intenta distribuir uniformemente el formiato de metilo por toda la arena.

2.5.6.2.3. Resinas furánicas endurecidas con SO_2

Este proceso ya no se utiliza tanto, a pesar de que se puede aplicar con éxito en la fabricación de moldes y machos para piezas de cualquier tipo de aleación y de tamaño pequeño y medio. El catalizador de azufre puede provocar algunos problemas metalúrgicos en la superficie de piezas de hierro dúctil. Sus principales ventajas son la prolongada vida útil de la arena preparada, las buenas propiedades mecánicas y el fácil desprendimiento, así como la limitación de la aparición de grietas. Sin embargo, su utilización efectiva se ve limitada a causa del carácter adhesivo de la resina y los problemas que conlleva utilizar dióxido de azufre como endurecedor.

Utiliza resinas furánicas que contienen aproximadamente un 80% de alcohol furfúrico. Ambas resinas polimerizan en condiciones ácidas y deben mezclarse con la arena y agentes oxidantes como, por ejemplo, peróxidos orgánicos o peróxido de hidrógeno. La reacción que se produce entre los peróxidos y el dióxido de azufre inyectado genera ácido sulfúrico, lo que provoca la rápida polimerización.

El período de gasificación siempre va seguido del lavado, cuyo objetivo es eliminar el exceso de dióxido de azufre sin reaccionar presente en la arena.

[32, CAEF, 1997], [174, Brown, 2000]

2.5.6.2.4. Resinas epoxi-acrílicas endurecidas con SO_2 (curado por radicales libres)

Las ventajas de este proceso son muchas: buena compactación, alto tiempo de vida en banco de la arena preparada (los cabezales mezcladores no tienen que limpiarse), buenas propiedades mecánicas, ausencia de nitrógeno, fenol y formaldehído, fácil desprendimiento, inexistencia de grietas. La principal desventaja, sin embargo, es el elevado precio de los componentes del aglomerante.

Este proceso se caracteriza no tanto por el tipo de resina como por el principio subyacente del enlace cruzado producido entre radicales libres. Las resinas deben contener enlaces dobles de carbono y pueden ser de tipo poliéster-acrílico, poliéster-uretano o poliéster-epoxi. Estas resinas suelen tener un peso molecular menor y se diluyen en disolvente orgánico a una proporción de casi el 50% del peso, si bien con algunos tipos no se utilizan disolventes. Se mezclan con un peróxido orgánico que actúa de iniciador de la reacción. El endurecimiento se realiza inyectando dióxido de azufre a través de gas inerte, por ejemplo dióxido de carbono o nitrógeno, por entre la arena. El período de gasificación siempre va seguido del lavado, para el que se utiliza el mismo gas inerte del curado y cuyo objetivo es eliminar el exceso de dióxido de azufre sin reaccionar presente en la arena.

2.5.6.2.5. Silicato de sodio endurecido con CO_2 (vidrio soluble)

Las ventajas de este proceso son evidentes: es barato, de fácil manipulación y no provoca problemas medioambientales; además también presenta ventajas respecto al uso de aglomerantes orgánicos y sobre la salud de los trabajadores y la fiabilidad del procedimiento. A pesar de todo, su uso se ha ido reduciendo por motivos técnicos, como por ejemplo escasa compactación y problemas de desintegración, escasa fuerza mecánica, sensibilidad al descascarillado, absorción de humedad y baja recuperabilidad. Además, el empleo de vidrio soluble puede dar lugar a un aumento de los costes de depuración. Los machos sólo alcanzan su máxima resistencia tras un período de secado, lo que reduce significativamente su incorporación a procesos automatizados. Por estos motivos esta técnica se utiliza principalmente en fundiciones a pequeña escala.

El silicato más utilizado es el de sodio, caracterizado por su concentración (contenido de materia seca) y coeficiente (relación sílice-sosa $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$). El coeficiente oscila entre 2,0 y 2,8, aunque lo más habitual es que sea de 2,0 a 2,3. El silicato se mezcla con la arena a una concentración de entre el 2 y el 4%. Se suelen emplear aditivos para el desmoldeo y el vaciado de la arena, aunque normalmente se mezclan previamente con el silicato.

El curado se produce por gasificación de dióxido de carbono, dado su carácter ligeramente ácido. La proporción de CO_2 no puede superar el 1–2% de la masa de arena, con un tiempo de gasificación de entre 10 y 60 segundos. Los moldes y machos endurecidos no necesitan limpiarse.

[126, Teknologisk, 2000], [152, Notzon y Heil, 1998]

2.5.6.2.6. Resinas fenólicas alcalinas endurecidas con CO_2

Este proceso se implantó por primera vez en 1989 y desde entonces ha experimentado mejoras continuas. Ahora puede adquirirse comercialmente y se utiliza en algunas instalaciones, si bien su empleo no se ha generalizado.

La resina utilizada es de tipo fenólico alcalino y contiene una sustancia enlazante que se estabiliza en pH elevado (aproximadamente 14). El curado se realiza por gasificación con dióxido de carbono, que se disuelve en el didisolvente al agua de la resina, hace descender el pH y activa la sustancia enlazante.

2.5.6.3. Procesos de fraguado en caliente

En estos procesos el curado se produce al calentar la mezcla de arena-resina o, más habitualmente, al dejar que entre en contacto con los moldes calentados. Todos estos procesos proporcionan una elevada precisión di-

mensional que sólo se obtiene utilizando moldes (de metal) de alta calidad, lo que los encarece. Por este motivo sólo se emplean en la producción de machos de tamaño limitado y principalmente en sistemas de producción en masa. Su uso estuvo generalizado durante años pero en la actualidad desciende a medida que se sustituyen por sistemas de endurecimiento por gas.

Los procesos de endurecimiento en caliente destacan por sus problemas de emisiones: al calentarse, las resinas y catalizadores generan sustancias químicas nocivas (entre ellas amoníaco y formaldehído) que pueden provocar olores molestos. Para limitarlos se han utilizado numerosas técnicas como la depuración, la combustión o técnicas de eliminación biológica, pero ninguna ha demostrado ser efectiva.

2.5.6.3.1. Resinas fenólicas y/o furánicas en la técnica de caja caliente

Este proceso puede producir machos de una gran precisión dimensional y buena resistencia mecánica, pero para lograrlo los titulares necesitan conocer y controlar a la perfección el método de producción. Las limitaciones del proceso son su coste, especialmente el correspondiente a la resina, la energía y el equipo de producción de moldes y las condiciones internas de trabajo desfavorables creadas. Actualmente se emplea para la fabricación de machos pequeños y de tamaño medio en producción en masa.

La resina aglomerante y el catalizador activado por calor que se utilizan en el proceso se mezclan previamente con arena y la mezcla resultante se insufla en una caja de machos calentada o molde, donde se endurece durante en un tiempo de 5 a 60 segundos.

Puede utilizarse en gran variedad de resinas, por ejemplo:

• urea – formaldehído	UF
• urea – formaldehído – alcohol furfurílico	UF – AF
• fenol – formaldehído	PF
• fenol – formaldehído – alcohol furfurílico	PF – AF
• urea – formaldehído – fenol – formaldehído	UF – PF
• urea – formaldehído – fenol – formaldehído – alcohol furfurílico	UF – PF – AF

Los catalizadores son sales de amoníaco de ácidos minerales a las que a veces se añade urea para reducir el formaldehído libre. También pueden utilizarse otros aditivos como silanos, óxidos de hierro, conservantes o aceite de silicona.

La proporción de resina añadida oscila entre el 1,2 y el 3,0% del peso de la arena; la media se sitúa en el 1,8%. La proporción de adición del catalizador varía entre el 10 y el 25% del peso de la resina, aunque la mayoría de fórmulas se han optimizado en el 20%. La temperatura más habitual se encuentra entre los 230 y los 290 °C, con un margen óptimo de 220–250 °C. Si se aplica calor excesivo para intentar acelerar el tiempo de curado la superficie del macho puede quemarse y provocar fragilidad durante la colada.

2.5.6.3.2. Caja tibia

Este proceso se parece mucho al de la caja caliente y sigue la misma técnica de producción. Sólo difiere en el tipo de resina utilizado, que permite un endurecimiento a temperaturas más bajas y que resulta significativamente más caro que las utilizadas en el proceso de caja caliente. Ello explica que, a pesar de ser realmente ventajoso en algunos aspectos, el uso de este proceso no esté extendido.

El aglomerante utilizado se compone en su mayor parte de alcohol furfurílico (aproximadamente un 70%) o un polímero bajo de alcohol furfurílico. Los catalizadores son sales de cobre derivadas de ácidos sulfónicos aromáticos en solución acuosa o alcohólica. Estos catalizadores destacan por su excelente estabilidad a temperatura ambiente y por su temperatura de disociación relativamente baja, de entre 150 y 170 °C. De este modo la temperatura de las herramientas puede mantenerse aproximadamente a unos 180 °C, lo que representa un ahorro energético muy considerable de entre el 15 y el 25% en comparación con la técnica de caja caliente.

2.5.6.3.3. Croning (cáscara)

Este es el único proceso de producción de machos y moldes que puede utilizar arena prerrevestida. Esta arena se adquiere lista para su uso a los proveedores, si bien el proceso de revestimiento previo puede llevarse a cabo también en la fundición.

La arena se endurece calentándola en un molde metálico hasta que se crea una capa superficial endurecida. La arena no calentada ni curada puede extraerse y destinarse a otros usos con sólo darle la vuelta al molde. La arena curada forma una «cáscara» que da nombre al proceso.

Este proceso proporciona una alta precisión dimensional y un buen acabado superficial a los moldeos, facilita el desprendimiento, el vaciado de la arena del macho y, además, permite almacenar de forma casi ilimitada la arena ya prerrevestida. Por el contrario, la arena prerrevestida y el equipo utilizado para crear los moldes resultan caros. Su uso se limita a la producción de piezas de tamaño pequeño y medio en plantas de producción en masa. En la Figura 2.33 pueden verse algunos ejemplos de machos y moldes.



Figura 2.33.
Machos (arriba)
y moldes (abajo)
moldeados en cáscara
[237, HUT, 2003]

La resina utilizada para el prerrevestimiento es una «novolaca» fenólica con una relación entre formaldehído y fenol inferior a 1 a la que se añade hexametenetetramina como endurecedor. La hexametenetetramina se descompone a 160 °C y da lugar a sus dos componentes básicos: formaldehído y amoníaco. Cuando la arena prerrevestida entra en contacto con el molde calentado la hexametenetetramina se descompone y el formaldehído se entrecruza con el aglomerante de resina y forma la característica ligazón.

2.5.6.3.4. Aceite de linaza

Este antiguo proceso quizá sea el que más tiempo lleve utilizándose para la producción de arenas químicamente aglomeradas. Es muy fácil de utilizar, no requiere moldes complejos y presenta una buena resistencia a la formación de vetas y grietas. Todavía sigue utilizándose ampliamente para confeccionar pequeños machos especiales.

Las arenas se ligan con una mezcla de aceites secantes, en su mayor parte aceite de linaza, al que se suele añadir normalmente dextrina y cierto volumen de agua. La proporción de adición de aceite es de entre el 0,8% y el 4% del peso de la arena. También pueden añadirse agentes secantes. El endurecimiento se produce por entrecruzamiento de los ácidos grasos insaturados que contienen los aceites secantes inducido mediante oxígeno atmosférico y acelerado por el calentamiento en un horno de secado a una temperatura de 190–260 °C durante 1 o 2 horas.

2.5.6.3.5. Aceite alquídico, estufado

El proceso es similar al descrito anteriormente en el apartado correspondiente al aceite alquídico sin estufado; la única diferencia estriba, en este caso, en el tratamiento térmico de las piezas para acelerar su curado.

2.5.6.4. Revestimiento de moldes y machos de arena química

El trabajo del fundidor consiste en producir piezas de máxima calidad, sin defectos y que apenas deban retocarse o repararse. Para lograrlo lo ideal es minimizar todo aquello que pueda afectar negativamente al molde, macho o metal durante la colada. Los defectos pueden deberse a causas diversas como la expansión, compactación o abrasión de la arena, la penetración del metal, la descomposición química, la interacción de los aglomerantes, etc.

Por este motivo a menudo conviene revestir el molde o macho de material refractario que proporcione una superficie final lisa y reduzca el coste del rebabado.

2.5.6.4.1. Composición de los revestimientos

Los revestimientos pueden adquirirse en forma de productos listos para su uso o bien de masa para diluir con agua o alcohol. Normalmente tienen los siguientes componentes:

- uno o más rellenos refractarios como talco, pirofilita, mica, zirconio, magnesita, cuarzo, etc., o bien polvo de carbón;
- un líquido de relleno, que puede ser alcohol (isopropanol, etanol) o agua;
- agentes aglomerantes a altas temperaturas; por ejemplo bentonitas, resinas, ácido bórico;
- agentes reológicos como bentonitas o polímeros sintéticos;
- aditivos (surfactantes, antiespumantes, fungicidas, etc.).

2.5.6.4.2. Proceso de revestimiento

El revestimiento puede aplicarse sobre el molde o el macho de distintas maneras:

- mediante cepillado (machos pequeños o aplicaciones puntuales);
- por inmersión (machos de formas complejas; este proceso suele estar automatizado);
- por pulverización, normalmente sin aire;
- mediante recubrimiento por flujo (molde y machos de tamaño medio-grande).

Si se utilizan recubrimientos con alcohol el área de trabajo debe estar bien ventilada para evitar riesgos de incendio o explosiones. Los moldes y machos recubiertos normalmente se queman, lo que limita las emisiones. En caso contrario el secado se realiza con presencia de productos de salida y se controlan las emisiones de COV. El revestimiento por flujo con recubrimientos con base de alcohol y el posterior encendido o secado se representan en la Figura 2.34.

El secado de revestimientos con base de agua se produce por calentamiento por aire en un horno de secado o bien por infrarrojos o microondas. El recubrimiento por inmersión de los machos y su posterior secado por aire caliente se ilustran en la Figura 2.35. Los recubrimientos al agua no provocan problemas de emisiones, ni durante el recubrimiento propiamente dicho ni durante el secado. Por este motivo poco a poco van sustituyen-

do a los de base de alcohol. Con todo, su aplicación presenta dificultades técnicas como la continuidad de la calidad del recubrimiento o dificultades de secado. En el apartado 4.3.3.5 se analizan y contrastan en detalle los recubrimientos con base de alcohol y de agua.

[143, Inasmet y CTIF, 2002]



Figura 2.34.
*Recubrimiento por flujo
con base de alcohol,
seguido del encendido o
secado [237, HUT, 2003]*

Figura 2.35.
*Revestimiento por inmersión
en recubrimiento al agua,
seguido del secado en horno
de aire caliente
[237, HUT, 2003]*



2.5.7. Moldeo con modelo perdido

En esta técnica los modelos no se extraen del molde antes de la colada. El modelo, elaborado con material desechable, es de un único uso y se destruye tras la colada. Pueden ser de arenas químicamente aglomerada o de arena sin aglomerantes, endurecida por vibración.

Este proceso de moldeo, que se suele llamar a la «espuma perdida», se creó hace 30 años, aunque inicialmente su crecimiento comercial fue lento. En los últimos 10-15 años, sin embargo, se ha venido empleando cada vez más, especialmente en la producción en masa de piezas para el sector de la automoción y similares, a pesar de las evidentes dificultades que conlleva la preparación.

2.5.7.1. Arena suelta –proceso a la espuma perdida– moldes para piezas pequeñas (poliuretano, lost foam)

El proceso a la espuma perdida (Figura 2.36) se inicia con el diseño 3D-CAD y la producción de un modelo de precisión moldeado en espuma (a partir de poliestireno expandido (EPS) o PMMA) y mediante máquinas de moldeo por inyección automatizadas. Los modelos pueden ser de una sola pieza o ensamblar varias mediante adhesivos. En este caso cierto número de modelos, dependiendo de su tamaño, se fijan a un sistema de bebedero elaborado con el mismo material que el molde y que, por tanto, genera un racimo.

Los racimos se introducen por inmersión en un revestimiento al agua de tipo refractario que crea una barrera entre el metal fundido y la arena durante el vaciado. Tras el secado, el racimo se coloca en una caja de moldeo que se rellena de arena suelta, a la que se puede añadir una resina de baja viscosidad para evitar deformaciones durante la compactación. La arena se compacta por vibración triaxial de los modelos, lo que provoca que penetre en los orificios y reproduzca con exactitud todos los detalles, haciendo innecesarios el macho y el equipo que se utiliza para confeccionarlo. Durante el vaciado, el metal líquido produce pirólisis en el poliestireno y rellena el espacio liberado.



Figura 2.36. Proceso a la espuma perdida [110, Vito, 2001]

La arena, cuarzo en su mayor parte, debe ser muy permeable para poder garantizar la evacuación de los gases provocados por la pirólisis, por ello se suele utilizar la correspondiente a los números AFS 35–50. Si se interrumpe la colada el molde de arena podría desintegrarse, de modo que a menudo se utilizan sistemas de colada automático.

Las piezas moldeadas destacan por su excelente precisión dimensional, como puede observarse en la Figura 2.37. La técnica es válida para cualquier tipo de aleación y se utiliza para producir series medias o grandes. El proceso no es perjudicial para el medio ambiente durante el moldeo, pero genera emisiones gaseosas durante la colada y el desmoldeo a causa de la evaporación de los modelos desechables. El moldeo a la espuma perdida permite a los fundidores crear piezas complejas que muchas veces no podrían obtenerse a partir de otros métodos. Gracias a él, los diseñadores desarrollan formas de gran complejidad que reducen las necesidades de mecanizado o minimizan los procesos de ensamblado. Para ello, cada paso del proceso debe controlarse de cerca para asegurar la consistencia de la calidad de las piezas. De hecho, lo que ha ralentizado la implantación de este proceso ha sido la falta de conocimiento en profundidad por parte del sector sobre cómo establecer las medidas de control necesarias.

[32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [144, US Dept. of Energy, 1998]

Figura 2.37.
Modelo de poliestireno
desechable (der.)
utilizado en el proceso a la espuma
perdida y ejemplo de
moldeo producido
siguiendo este método
(izq.) [237, HUT, 2003]



2.5.7.2. Arena química – moldes para piezas grandes

El proceso a la espuma perdida también sirve para producir prototipos de una única pieza, lo que permite acortar el tiempo de entrega. Pero también puede utilizarse para la producción de piezas muy grandes como, por ejemplo, bases de máquinas de procesamiento de metal, prensas, etc., en hierro colado, acero o aleaciones no férreas. El grosor de las paredes también es muy variable (de entre 5 y 1.000 mm) y ha permitido moldear piezas de hasta 50 toneladas. Para estas grandes piezas es necesario aplicar resina (furánica) para que el molde adquiera la resistencia necesaria.

El proceso a la espuma perdida con arena química se llama también de «molde completo» y se utiliza en especial para producir piezas de tamaño medio o grande, tanto de producción única como en pequeñas series discontinuas.

Los modelos se confeccionan con materiales de baja densidad expandidos como por ejemplo:

- espuma de poliestireno blanca con una densidad de 16 a 20 g/dm³;
- espuma de poliestireno azul, con una densidad de 18 a 22 g/dm³;
- espuma de polimetilmetacrilato, también llamado PMMA, y con una densidad de 25 g/dm³.

Los materiales se cortan en forma de las distintas piezas necesarias, que luego se ensamblan y se fijan entre sí por medio de cola termoplástica para establecer la forma definitiva de los futuros moldeos, para la que se toman en consideración las posibles contracciones del metal.

El modelo ensamblado, con su bebedero, debe revestirse en su mayor parte por medio de un sistema de recubrimiento al agua y secarse completamente antes de alojarse en la arena. El proceso de aglomeración debe elegirse cuidadosamente para evitar la absorción de humedad por parte de modelo antes de la colada.

Este proceso, al menos desde el punto de vista del moldeo, es muy respetuoso con el medio ambiente, si bien produce emisiones gaseosas durante las fases de colada y desmoldeo a causa de la evaporación de los moldes desechables y la destrucción del aglomerante.

Como sucede en el proceso que utiliza arena suelta, resulta vital no interrumpir la colada, de lo contrario el molde podría desintegrarse. El llenado del molde de grandes piezas se realiza mediante dos o más cucharas y dos o más bebederos simultáneamente.

Las ventajas del proceso de moldes completos son las siguientes:

- precisión en piezas grandes;
- permite aplicar geometría compleja, sobre todo en las cavidades internas;
- permite integrar varias piezas en un único moldeo;
- reduce o elimina los bordes que se crean con el desprendimiento;
- posibilita la regeneración térmica de la arena.

Aunque los procesos a la espuma perdida y moldes completos se conocen desde hace mucho, su empleo en Europa no está extendido. Ello se debe, principalmente, a que para su optimización se requiere un gran esfuerzo de investigación y desarrollo. Las principales dificultades son:

- definición de la gama de productos: determinar qué piezas pueden confeccionarse más fácilmente en relación a otros métodos tradicionales;
- elección de la técnica de compactación: cómo aplicar la arena para que se adapte a la perfección a cada cavidad;
- selección del tipo de revestimiento y de arena; deberían mostrar una permeabilidad al gas suficiente que permita que los gases escapen.

[110, Vito, 2001]

2.5.8. Preparación de moldes permanentes (de metal)

Los moldes permanentes se confeccionan a partir de elementos metálicos adaptados a la forma de la pieza que al ensamblarse permiten el moldeo, la colada y el desmoldeo. Estos moldes metálicos se emplean en los moldeos

por gravedad, por inyección a alta presión, centrífugos, continuos y por baja presión. A diferencia de los moldes de arena, pueden volverse a utilizar muchas veces, de ahí que se conozcan como «permanentes».

Si la forma de la pieza no puede definirse fácilmente mediante nayos metálicos pueden emplearse machos de arena. Por ejemplo, los machos de arena se utilizan para dar forma al ensanchamiento de las tuberías producidas por moldeo centrífugo.

Los moldes permanentes normalmente se recubren con un «lavado en negro o en blanco»; es decir, con un agente desmoldeante a base de refractario (lavado blanco) o de grafito (lavado negro) cuya función es proteger la matriz, regular su enfriamiento a través de la evaporación de agua y lubricar. También actúan de tapajuntas.

En algunos casos, el ennegrecimiento se logra quemando acetileno en ausencia de aire; así se produce acetileno negro que queda adherido en parte a la matriz. El negro no adhesivo debe recuperarse y filtrarse antes de que genere emisiones.

Los moldes (o matrices) permanentes no suelen confeccionarse normalmente en la fundición, aunque algunas fundiciones de inyección por presión disponen de taller de montaje, mantenimiento y reparación de matrices. Estas operaciones, sin embargo, no tienen consecuencias a nivel medioambiental.

2.5.9. Moldeo a la cera perdida y cáscara cerámica (Investment casting)

Este proceso se utiliza para producir piezas complejas de pared delgada y altas precisión dimensional, nivel de detalle y calidad del acabado superficial.

Las fases que lo componen se muestran en la Figura 2.38. El proceso se inicia confeccionando los modelos de cera desechables e inyectando cera líquida en una matriz de aluminio o epoxi para formar un modelo que sea una réplica prácticamente exacta de la pieza final que se desea obtener. La cera a veces incorpora relleno. Para la producción de piezas más pequeñas pequeños se unen varios modelos de cera a un sistema de bebederos. Los agentes desmoldeantes hidrosolubles de la matriz facilitan la extracción del modelo de cera.

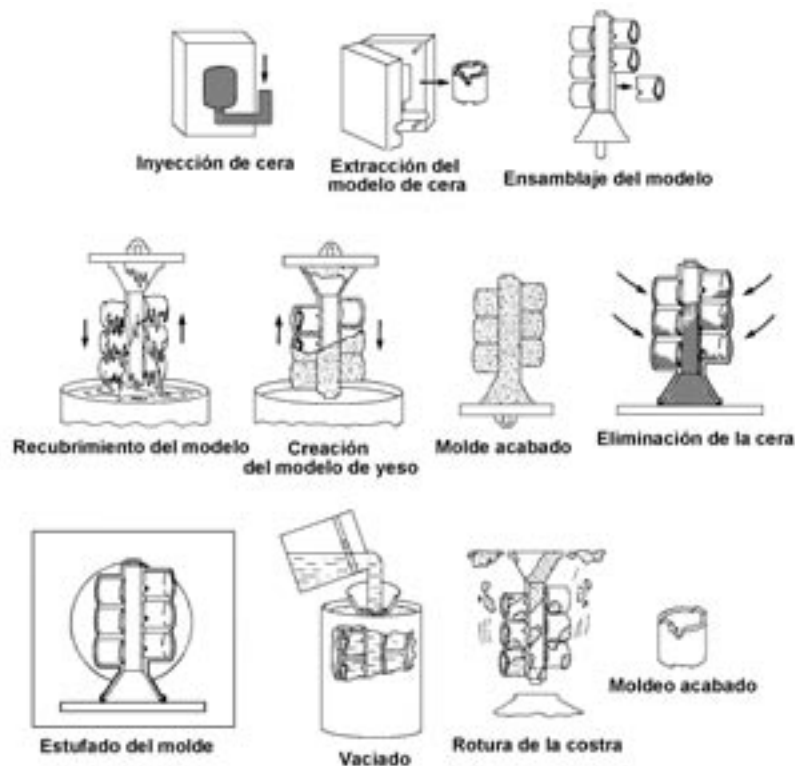


Figura 2.38. Proceso de moldeo a la cera perdida [110, Vito, 2001]

Los modelos de cera se limpian con agua o disolventes orgánicos y se recubren con un agente humectante que contribuye a que la pasta cerámica se adhiera mejor a la cera. A continuación el racimo se introduce por inmersión en una pasta cerámica líquida, se estuca con refractario de sílice, zirconio o sílice/aluminio y después se deja secar antes de la aplicación de la siguiente capa. El proceso de recubrimiento continúa hasta obtener el grosor necesario.

La cera del molde ya seco se extrae introduciéndolo en un autoclave, donde los modelos de cera se funden, o bien en un horno de fusión rápida, donde es posible que la cera se queme parcialmente. A continuación se procede a hornear la cáscara en un horno a alta temperatura. La cera residual se quema y endurece el material cerámico dejando un molde de cáscara cerámica de una sola pieza en el que se vacía el metal fundido para darle la forma de la pieza final.

Puede producirse contaminación atmosférica en dos de las fases de este proceso: al moldear la cera y al extraerla.

Moldeo de la cera

La pasta de cerámica líquida está formada por aglomerante y polvo refractario muy fino, reducido a lodo tras ser permanentemente mezclado. El aglomerante puede ser sílice coloidal, etilsilicato hidrolizado o silicato de sodio hidrolizado, según determinen las cuestiones técnicas. Si se utiliza etilsilicato el secado es más rápido, lo que aumenta la productividad del ciclo, pero también se generan vapores de alcohol etílico. Estos vapores, presentes en exceso, deben ser capturados y tratados antes de su emisión.

Extracción de la cera y horneado

La extracción de la cera por medio del autoclave no afecta negativamente a la atmósfera, al contrario de lo que sucede si se extrae en un horno y durante el encendido de la cáscara, ya que se queman residuos de cera.

El quemado se produce a menudo en ausencia de aire, lo que provoca la formación de partículas de polvo de carbón que deben recogerse y destruirse en un postcombustor o bien eliminarse. Los filtros cerámicos cumplen muy bien este cometido al resistir la elevada temperatura de los gases de salida, pero se trata de una tecnología muy reciente cuyo uso todavía no se ha generalizado.

Esta técnica se usa, por ejemplo, para moldeos de precisión o artísticos. Normalmente no se utiliza en grandes fundiciones (con una capacidad diaria superior a las 20 toneladas), por lo que sólo se hace constar con fines informativos.

El moldeo en cáscara cerámica (patentado con el nombre comercial de Replicast®) aumenta la calidad y la precisión del moldeo a la cera perdida con componentes más grandes al aplicar a la vez los principios de la técnica a la espuma perdida y cera perdida. Para confeccionar el molde (que es un molde inerte cerámico horneado) se crea una réplica en poliestireno expandido del componente necesario, que deberá tener las dimensiones precisas y un buen acabado superficial. No precisa juntas, machos ni ángulos de inclinación lateral y las réplicas elaboradas en poliestireno pueden unirse mediante cola para crear geometrías complejas. El poliestireno se quema antes de la colada, lo que permite moldear numerosos tipos de aleaciones, desde acero inoxidable muy bajo en carbono hasta níquelados. Todo ello lo distingue del proceso a la espuma perdida, en el que el metal líquido consume y sustituye el modelo de poliestireno, lo que hace que resulte inadecuado para la gran mayoría de componentes de acero (el poliestireno tiene un 92% en peso de carbono).

[219, Castings Technology International, 2003]

2.6. Colada

La colada del caldo o el llenado del molde es la principal operación que tiene lugar al moldear. El molde acabado se rellena de metal líquido bajo los efectos de las fuerzas gravitacionales o centrífugas o bien de la presión. Tras el llenado el metal se enfría para solidificarlo y poder así extraer la pieza del molde para seguir enfriándola y someterla a tratamiento.

[32, CAEF, 1997]

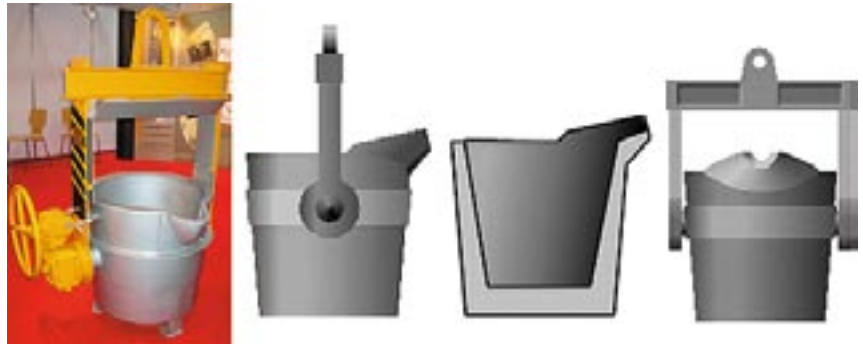
2.6.1. Colada

2.6.1.1. Llenado

Existen dos tipos de cucharas o cucharones empleados para el llenado de los moldes: las que tienen reborde o pico y las cucharas de tetera. Existen además otros tipos, como la cuchara de tapón, que se utiliza principalmente con el acero.

- *De vaciado por el borde:* En este tipo de cuchara (Figura 2.39) el metal se carga por encima del reborde y el flujo se controla inclinando la cuchara mediante un volante de mano engranado. Puesto que el metal fluye desde la parte superior de la cuchara, la superficie del metal debe estar limpia de escoria o la cuchara debe estar dotada de un desespumador para evitar que la escoria llegue al molde. Las cucharas con reborde se utilizan para la fundición de pequeñas piezas de acero.

Figura 2.39.
Cuchara de vaciado
del metal por el borde
[237, HUT, 2003]



- *Cuchara tipo tetera:* Como muestra la Figura 2.40, en la parte delantera de la cuchara hay un sifón de refractario que asegura que el metal que salga por el pico provenga del fondo de la cuchara, lo que garantiza que no tenga escoria. El metal fundido normalmente sale más limpio de este tipo de cucharas que de las que tienen reborde. Sin embargo, tienen una desventaja: el pico es estrecho y a veces provoca que el acero líquido se solidifique si no está lo suficientemente caliente o si el llenado del molde se prolonga demasiado.

Figura 2.40.
Cuchara tipo tetera
para la colada del metal
fundido [237, HUT, 2003]



- *Cuchara de tapón:* La cuchara incorpora una abertura en la parte inferior que se cierra con un vástago de refractario. El metal sale por el fondo, lo que evita que contenga escoria; los elementos no metálicos, como los productos de la desoxidación, pueden así flotar y extraerse de la colada. El flujo de metal desciende, de modo que no se produce movimiento del fluido durante la colada. La desventaja es la velocidad y la proporción de cambios que afectan al flujo a medida que varía la presión aerostática.

Las líneas de colada automática a menudo están dotadas de un horno de colada. El funcionamiento de este sistema se ilustra en la Figura 2.42. La línea se detiene cuando un molde se halla en la posición correcta, es decir, debajo de la salida de la colada. El tiempo de vaciado del metal se controla elevando un tapón. Al mantenerse constante el nivel del metal en el interior del recipiente de colada siempre cae en el molde un volumen fijo de metal fundido. El nivel de llenado de metal del horno se controla a través de un dispositivo flotante que controla la presión de gas en el interior del horno. Los hornos de colada se rellenan con metal procedente del horno de fusión a intervalos regulares.

[110, Vito, 2001], [174, Brown, 2000]



Figura 2.41.
Cuchara de tapón
para la colada del metal
fundido [237, HUT, 2003]

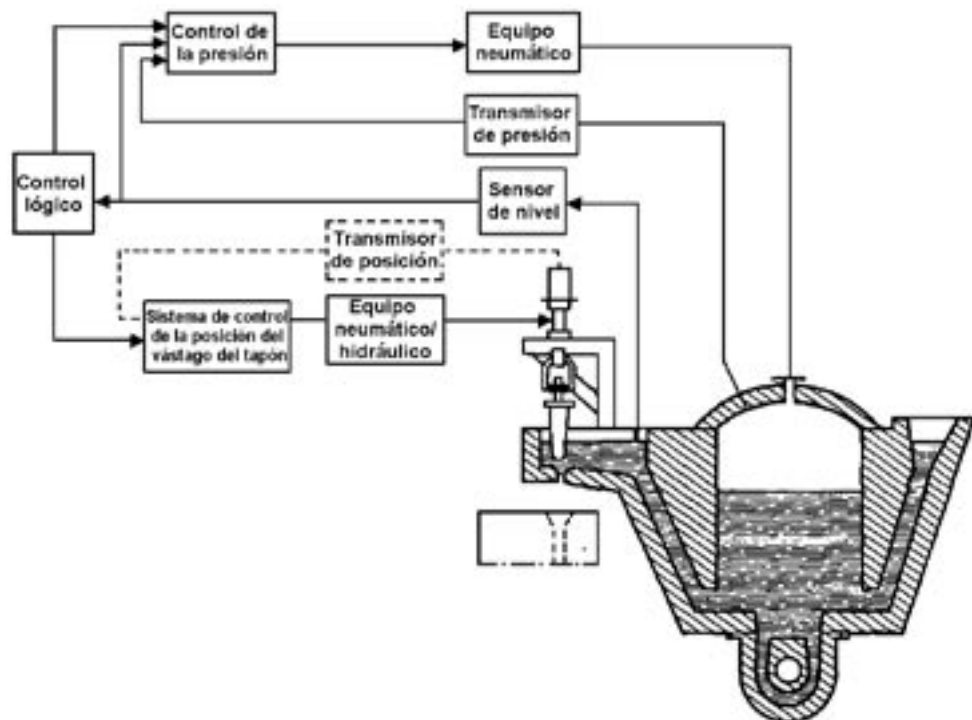


Figura 2.42.
Horno de colada
[110, Vito, 2001]

2.6.1.2. Solidificación (primer enfriamiento)

Los moldes llenados se transportan desde la línea de moldeo a las líneas de enfriamiento. La longitud de la línea de enfriamiento determina la temperatura final de la pieza en el momento del desmoldeo. Esta temperatura debe ser lo suficientemente baja para que la pieza haya adquirido consistencia suficiente para soportar el desmoldeo y posteriores tratamientos.

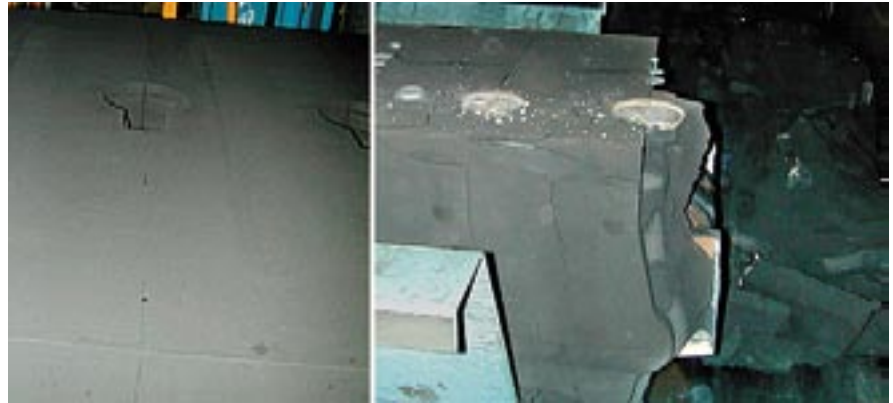
Los moldes de gran tamaño no se mueven durante el enfriamiento, que puede durar varios días.
[110, Vito, 2001]

2.6.1.3. Desmoldeo

Cuando los moldeos son individuales, los moldes de arcilla o químicamente aglomerados suelen destruirse simplemente por vibración. Para ello, en la mayoría de casos la caja de moldeo se coloca sobre una rejilla de desmoldeo mediante una grúa. Con las vibraciones la arena se separa de la pieza y de la caja de moldeo, que permanecen sobre la rejilla mientras la arena cae (posteriormente se vuelve a procesar). La pieza suele transportarse a una zona de enfriamiento para que termine de enfriarse a temperatura ambiente (segundo enfriamiento).

A menudo se lleva a cabo un procedimiento de desmoldeo similar en sistemas mecanizados y en sistemas automatizados antiguos de baja capacidad (Figura 2.43). En este caso las cajas de moldeo se retiran de la cinta transportadora por medio de un elevador (u otro equipo de transferencia) y se colocan sobre los vibradores. Por último, los moldes se dejan enfriar en un dispositivo especial de enfriamiento. En muchos sistemas, los moldes de arena se extraen de la caja y se inicia un segundo enfriamiento controlado de la pieza y la arena en dispositivos conjuntos o independientes, como por ejemplo tambores enfriadores, tubos flexibles, cadenas transportadoras, enfriador de lecho fluidizado, etc.

Figura 2.43.
Desmoldeo al final
de una línea de moldeo
automatizada
[237, HUT, 2003]



Los moldes de arena realizados por vacío se destruyen al liberar el vacío. La tolva de carga o caja de moldeo, donde se encuentran la arena suelta y la pieza, se vacía y a continuación la pieza se enfría siguiendo uno de los métodos arriba descritos.

[32, CAEF, 1997]

2.6.1.4. Enfriamiento de la colada (segundo enfriamiento)

El enfriamiento controlado de las piezas y la arena se realiza en tambores giratorios, tubos oscilantes o cubetas de transportadores de vaivén. Las piezas se enfrían en transportadores de vaivén o en cabinas a tracción por cable. Muchas veces se suele utilizar también un flujo de aire como medio de enfriamiento, a menudo dirigido en dirección contraria a la pieza. En ocasiones se emplean finos chorros de agua para acelerar el enfriamiento.

2.6.2. Colada en moldes permanentes (utillajes metálicos)

2.6.2.1. Colada a baja presión y por gravedad

Los moldeos a baja presión y por gravedad se realizan en matrices permanentes de acero en las que se cuela el caldo por gravedad o mediante gas de baja presión. Los machos de arena permiten formar oquedades y formas interiores complejas en los moldeos. A consecuencia de la rápida solidificación los moldes permanentes tienen una densa estructura de granos finos muy resistente.

En la Figura 2.44 se muestra cómo funciona la colada a baja presión. La matriz de metal se coloca encima de un horno sellado que contiene el metal líquido. Un tubo revestido de refractario se prolonga desde la parte inferior de la matriz hasta el metal fundido. Al introducir aire a baja presión en el horno (15–100 kPa) el metal líquido asciende por el tubo y fluye a una cavidad de la matriz con baja turbulencia; el aire de la matriz escapa a través de los orificios de ventilación y las juntas. Cuando el metal se solidifica se libera la presión de aire, lo que provoca que el metal que sigue fundido en el tubo elevador caiga de nuevo al horno. Tras un enfriamiento adicional se abre la matriz y se extrae la pieza. Al no utilizarse mazarotas ni bebederos el rendimiento de colada es especialmente elevado, normalmente por encima del 90%. Si se utilizan machos de arena puede lograrse una buena precisión dimensional, un acabado superficial de calidad así como piezas complejas. Esta técnica se suele utilizar para la producción de piezas de aluminio, especialmente para la industria de la automoción

(llantas, culatas, bancadas de motores eléctricos o utensilios de cocina, etc.) La matriz debe recubrirse para optimizar la extracción y el enfriamiento de la pieza. Normalmente se recubre una vez por turno. La vida útil de la matriz alcanza entre 30.000 y 50.000 inyecciones de metal. En la Figura 2.45 se puede observar una máquina de inyección a baja presión.

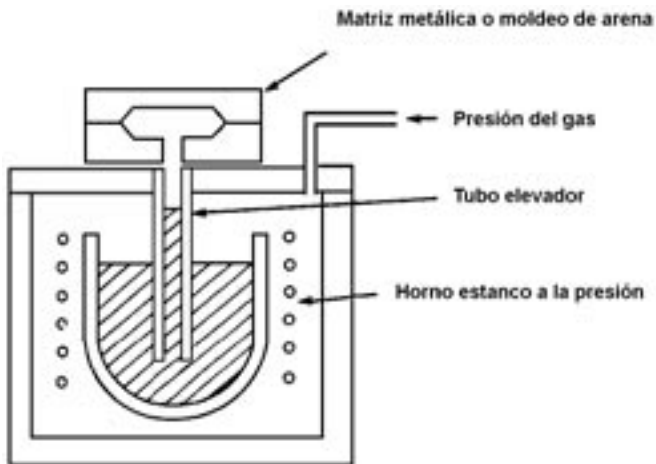
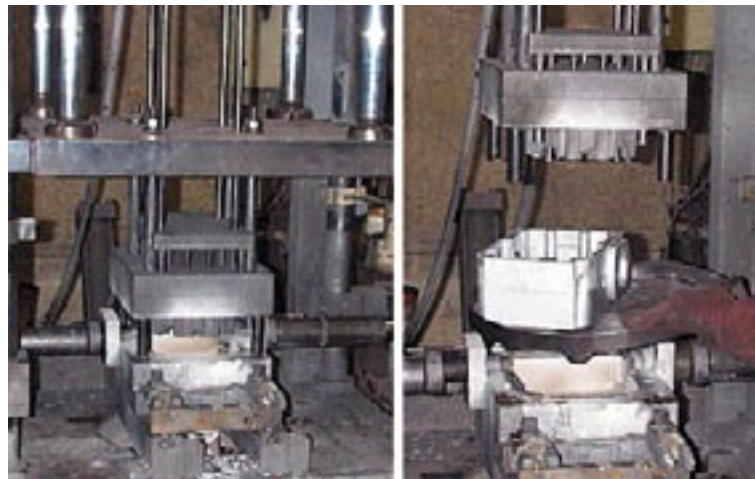


Figura 2.44.
Funcionamiento de una
máquina de colada a baja
presión [175, Brown, 1999]

Figura 2.45.
Máquina de colada
a baja presión
[237, HUT, 2003]



En los moldeos por gravedad el metal fundido se introduce por gravedad en un molde permanente o matriz. Las máquinas de colada por gravedad pueden ser sencillas, accionadas y vaciadas manualmente mediante cremallera y piñón, o bien disponer de una cadena de transporte con mecanismo de inclinación para el llenado de la matriz a menudo robotizado. Las matrices se recubren de material refractario que contribuye a controlar la velocidad de enfriamiento. El tiempo necesario para poder extraer la pieza de la matriz oscila de 4 a 10 minutos, dependiendo del tipo de pieza. Se trata, pues, de un proceso relativamente lento en comparación con la colada a presión. Para alcanzar una velocidad de producción razonable el operador debe accionar (manualmente) de forma secuencial de 2 a 4 conjuntos de matrices, lo que representa una producción de entre 30 y 60 piezas a la hora. Algunas máquinas dotadas de cinta transportadora disponen de 4 a 6 plataformas de varios conjuntos de matrices que permiten lograr producciones de hasta 1 pieza por minuto. Este proceso se aplica especialmente a la producción de piezas de aluminio en series de entre 1.000 y 100.000 piezas anuales (por ejemplo, colectores, culatas, bombas de agua).

Los revestimientos de los moldes permanentes normalmente utilizan agua como portador, un aglomerante a altas temperaturas (normalmente silicato de sodio) y un relleno o mezcla de rellenos refractarios. Existen dos categorías de recubrimientos:

- aislantes: contienen mezclas de materiales aislantes como talco, mica, diatomeas, dióxido de titanio, alúmina, etc.;
- lubricantes: contienen grafito coloidal o nitruro de boro que facilitan la extracción de la pieza.

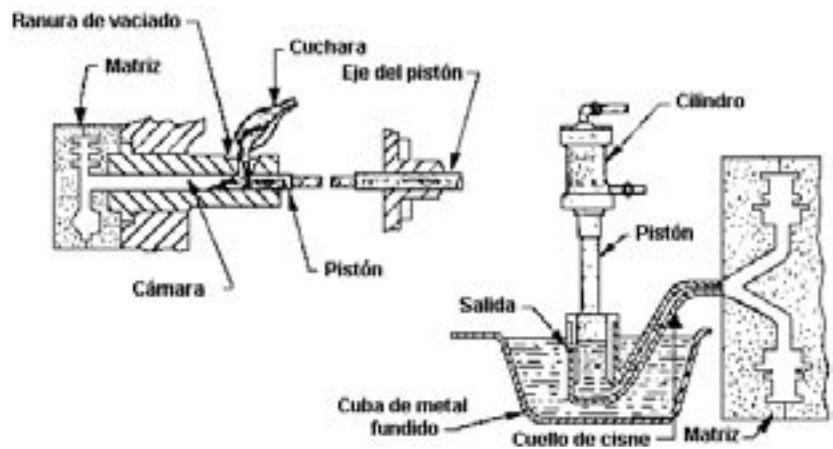
Los revestimientos normalmente se pulverizan sobre la matriz. Si se planifica con cuidado la preparación de la matriz, la aplicación del revestimiento y los equipos utilizados para el recubrimiento, la productividad y la calidad aumentan significativamente.

[175, Brown, 1999]

2.6.2.2. Colada a alta presión

El término «moldeado a presión» a menudo se utiliza como sinónimo de «moldeado por inyección a alta presión». El método consiste en inyectar a alta presión metal fundido en una matriz permanente (molde de metal). La alta presión provoca un elevado y turbulento flujo de metal que permite producir piezas de gran área superficial y paredes finas. Las matrices suelen estar formadas por dos bloques de acero, cada uno de los cuales contiene parte de la cavidad, que se fijan uno a otro mientras se vierte el metal. A causa de la elevada presión del metal el tamaño máximo de la pieza se ve limitado por la fuerza máxima de cierre de las dos mitades que componen la matriz y sólo pueden utilizarse machos metálicos, lo que limita la complejidad de la pieza moldeada. El metal se mantiene bajo presión hasta que se enfría y solidifica. Los semimoldes se separan entonces y se extrae la pieza moldeada, normalmente mediante un sistema de expulsión automático. Las matrices se precalientan y lubrican antes de usarse y se enfrían por medio de aire o agua hasta lograr la temperatura de operación deseada. Se emplean dos tipos básicos de máquinas de moldeo a alta presión (MAP): las de cámara caliente y las de cámara fría (véase Figura 2.46).

Figura 2.46.
Máquinas de cámara
caliente y cámara fría para
el moldeo a alta presión
[42, US EPA, 1998]



Las máquinas de MAP de cámara caliente se componen de un depósito de metal fundido, la matriz y un dispositivo de transferencia del metal que lo extrae automáticamente del depósito y lo introduce por presión en la matriz. Mediante un sistema de pistón y cilindro de acero dotado de cuello de cisne se crea la precisión necesaria en el interior de la matriz. Con una máquina de cuello de cisne se transfiere el metal fundido, a través de un canal de hierro colado, del depósito a la matriz. Las presiones alcanzadas pueden oscilar entre unos cuantos bares y más de 350 bar. Las máquinas de cámara caliente se usan principalmente en las aleaciones de zinc y magnesio.

Las máquinas de MAP de cámara fría disponen de depósitos de metal fundido independientes de la máquina de moldeo. En una pequeña cámara se introduce la cantidad necesaria para un único moldeo, de forma manual o mecánica, y de allí se fuerza su entrada a la matriz por alta presión. La presión se genera mediante un sistema hidráulico conectado a un pistón y normalmente se encuentra entre algunos cientos y 700 bar. En las máquinas de cámara fría el metal se encuentra justo por encima del punto de fusión, en estado muy denso. Puesto que el metal está muy poco tiempo en contacto con el pistón y el cilindro, el proceso es válido básicamente para las aleaciones de aluminio y, en menor grado, las de magnesio o zinc e incluso otras con puntos de fusión más elevados como el bronce y el latón.

Resulta esencial lubricar adecuadamente las matrices y pistones para que el moldeo a alta presión sea efectivo. La lubricación de la matriz afecta a la calidad de la pieza, su densidad y acabado superficial, facilidad de llenado de las cavidades y facilidad de extracción. Una correcta lubricación aumenta además la velocidad de producción, reduce las necesidades de mantenimiento y la acumulación de material en la cara de la matriz. Aunque algunas fórmulas están patentadas, por lo general los lubricantes (también llamados agentes desmoldeantes) son una mezcla de lubricante y sustancias portadoras. Algunas incluyen además aditivos anticorrosión, para aumentar la estabilidad durante el almacenamiento y para combatir la degradación bacteriana. Los materiales lubricantes normalmente son aceites minerales y ceras en emulsiones acuosas. Los aceites de silicona y ceras sintéticas cada vez se utilizan más. En la actualidad se emplean tanto lubricantes con base de disolvente como acuosa, si bien estos últimos dominan el mercado (95%). El lubricante se aplica sobre la matriz abierta por pulverización después de cada inyección de metal. También se utilizan soluciones de lubricantes diluidos (con una proporción entre agente desmoldeante y agua de 1:20 a 1:200). En la actualidad se están desarrollando procesos electrostáticos de recubrimiento en polvo.

El moldeo a alta presión no es válido para el acero o las aleaciones con un punto de fusión elevado. En cambio, su utilización en los moldeos de aluminio es muy habitual. Las matrices son caras pero tienen una vida de 150.000 coladas, lo que lo hace más adecuado para moldeos prolongados. Una de las principales ventajas del MAP frente a otros métodos de moldeo es que permite obtener piezas resultantes de formas muy complejas. La posibilidad de producir piezas de formas complejas muchas veces posibilita fabricar productos con molde único en vez de a partir de varios componentes ensamblados. De este modo se reducen drásticamente los costes de moldeo, así como otros asociados a la fabricación y el mecanizado. Además, los moldeos producidos por MAP tienen una precisión dimensional y definición superficial elevadas en comparación con otros métodos que contribuye a reducir o eliminar las costosas operaciones de mecanizado. Por último, el método de MAP permite moldear piezas de paredes relativamente delgadas, lo que también puede traducirse en un ahorro considerable de material y en la reducción del peso de los componentes.

El proceso de MAP utilizado actualmente genera relativamente pocos residuos en comparación con otros procesos. Sí se generan, sin embargo, algunas emisiones de gases y humos durante la inyección del metal. Al vaporizarse y condensarse parte del metal se generan penachos de humo de óxido metálico. Las emisiones gaseosas pueden tener origen en el propio metal fundido, en la evolución de las sustancias químicas del lubricante cuando éste se pulveriza sobre la matriz de metal caliente y en el momento en que entra en contacto con el metal líquido. En cuanto al agua, la posible contaminación puede deberse a fugas o derrames de aceite hidráulico, combustible utilizado para el calentamiento o agua de refrigeración.

[42, US EPA, 1998], [128, IHOBE, 1998], [175, Brown, 1999], [225, TWG, 2003]

2.6.2.3. Colada por centrifugación

En la colada por centrifugación el molde permanente gira a gran velocidad sobre su eje a medida que se vierte el metal. La velocidad de giro y de llenado del molde dependen del tipo de aleación y del tamaño y la forma de la pieza. El eje de rotación normalmente es horizontal o ligeramente inclinado (Figura 2.47). Algunos sistemas especiales producen rotación por el eje vertical. El material así moldeado tiene una estructura muy densa y algunas propiedades que el moldeo en arena no permite obtener.

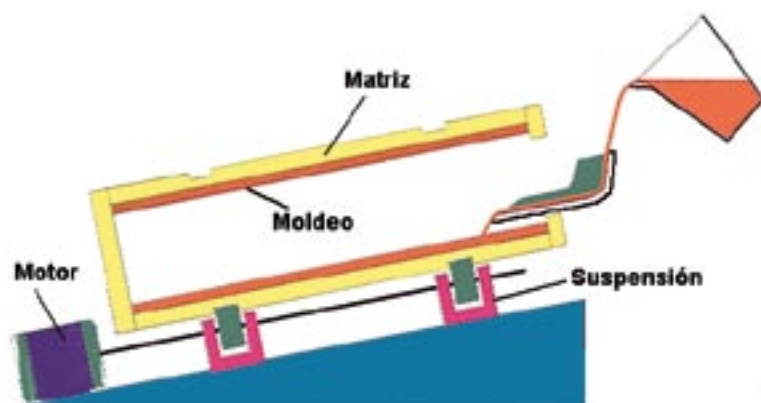


Figura 2.47.
*Representación esquemática
de una máquina de colada
por centrifugación*
[179, Hoppenstedt, 2002]

Esta técnica se utiliza para fabricar productos cilíndricos de hierro, acero y aleaciones de aluminio, cobre y níquel. Las piezas típicamente moldeadas por centrifugación son tuberías, calderas, recipientes a presión, volantes, camisas de cilindros y otras piezas axisimétricas.

[179, Hoppenstedt, 2002]

2.6.2.4. Colada continua

La colada continua es una técnica de gran productividad que permite fabricar barras, tubos y perfiles y obtener piezas de grano muy fino y buenas propiedades mecánicas con un rápido enfriamiento. En esta técnica el caldo se vacía en una matriz refrigerada por agua, abierta por la base o por un lado (Figura 2.48). La matriz da la forma deseada al producto. Aplicando frío de forma intensiva se consigue que la capa exterior de metal solidifique, lo que permite retirarlo lentamente del molde. A través de la colada continua y de la extracción de los productos del molde, éstos aumentan su longitud. A continuación, con un quemador se cortan al tamaño deseado. Esta técnica sirve tanto para procesos férreos como no férreos, y se suele emplear en la fase final de la producción de barras, planchas y láminas de hierro, acero y productos no férreos. Su empleo en fundiciones no férreas se describe en el documento BREF dedicado a este sector [155, European IPPC Bureau, 2001] y en el dedicado a la producción de hierro y acero [211, European IPPC Bureau, 2000].

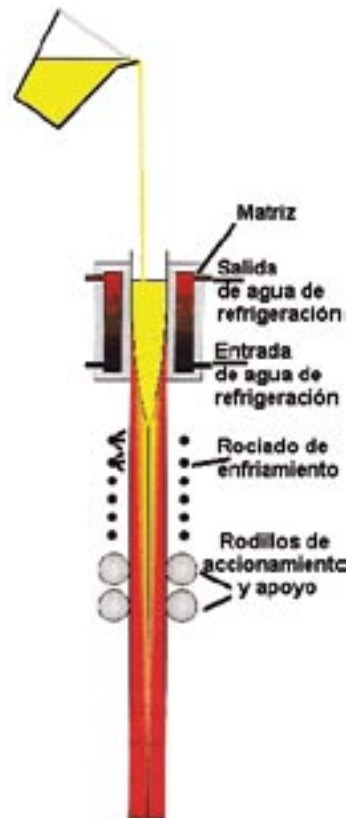


Figura 2.48.
Representación esquemática
de una máquina
de colada continua
[179, Hoppenstedt, 2002]

2.7. Desmoldeo y acabado

El acabado de piezas brutas de fundición incluye todos los pasos necesarios para que el producto esté completamente terminado. Según el proceso de moldeo pueden seguirse distintas operaciones, como por ejemplo:

- extracción del sistema de alimentación del molde;
- eliminación de la arena de moldeo residual de la superficie y de los restos de macho que puedan quedar en las cavidades del moldeo;
- retirada de rebabas de la colada;

- reparación de errores de colada;
- preparación de la pieza para posteriores tratamientos mecánicos, ensamblajes, tratamiento térmicos, recubrimientos, etc.

En algunos casos las fundiciones también se encargan del ensamblaje, acabado superficial y recubrimiento de los moldes, si bien todos estos procedimientos no se tratan en el presente documento. Las técnicas de acabado superficial y recubrimiento se analizan en profundidad en los documentos BREF sobre Tratamiento superficial de los metales (STM BREF) y sobre Tratamiento superficial mediante disolventes (STS BREF). [110, Vito, 2001], [225, TWG, 2003]

2.7.1. Separación del sistema de alimentación

Para el acabado de las piezas brutas y la extracción del sistema de alimentación (véase Figura 2.49) se llevan a cabo los pasos siguientes:

- *Golpeado, extracción*: Si se trata de materiales frágiles como fundición gris o fundición maleable blanca, los chaflanes y las mazarotas pueden normalmente retirarse a golpes. Para este procedimiento cada vez se utilizan más equipos hidráulicos.
- *Rebabeado con muela*: Puede ser manual, semiautomático o automatizado.
- *Corte*: Para la extracción de piezas macizas de acero al carbono o acero de baja aleación se utiliza un cortador de oxígeno-acetileno. En el caso del hierro o acero de alta aleación se utilizan cortadores de oxígeno-acetileno-polvo u oxígeno-GLP-polvo.
- *Serrado*: Algunos materiales sensibles al calor, como las aleaciones de aluminio, normalmente se cortan con sierra.



Figura 2.49.
Pieza con bebedero
[237, HUT, 2003]

Si los puntos de conexión se han diseñado correctamente, puede que el bebedero se desprenda incluso durante el desmoldeo, sobre todo en el caso de hierro gris. [32, CAEF, 1997], [202, TWG, 2002]

2.7.2. Separación de la arena

La separación de la arena se lleva a cabo en cabinas de granallado. El material de granallado depende del tipo de producto que vaya a tratarse y puede ser un chorro de arena o perlas de vidrio. La depuración de las placas de los modelos y moldes permanentes se realiza con perlas de vidrio, de aluminio o granos de hielo de CO₂. En la Figura 2.50 puede observarse la diferencia entre la pieza antes y después del granallado.

Existen diversas técnicas de granallado. La aceleración de la granalla se controla con aire comprimido o palas de turbina. El tratamiento se lleva a cabo en una sala cerrada con las puertas selladas con goma.

Figura 2.50.
Piezas antes (izq., centro)
y después (der.)
del granallado con arena
[237, HUT, 2003]



Las piezas se suspenden en un transportador monorraíl y se mueven de forma discontinua por la cabina de granallado. Para piezas pequeñas se utiliza una cinta transportadora especial. Las piezas de gran tamaño se granallan manualmente con una lanza en una cabina cerrada. En este caso las medidas de seguridad personal son vitales; debe utilizarse casco con máscara de polvo y equipo de respiración.

Las partículas de polvo gruesas (arena y virutas de metal) generadas durante el granallado de la pieza se recogen junto con la arena, que se separa de la pieza, a continuación se separa magnéticamente y se tamiza. La fracción de finos se extrae del aire de salida junto con los gruesos a través de un filtro de mangas. El lavado de la granalla antes de su reutilización interna tiene gran importancia, ya que la presencia de arena podría desgastar rápidamente las palas.

2.7.3. Eliminación de rebabas (rebabado, desbarbado o rebarbado)

Las rebabas, que se originan en las juntas de unión del molde y de los macho, en las vetas y en otras superficies irregulares, se eliminan con muelas abrasivas o amoladoras de banco. Las muelas abrasivas se accionan manualmente, mientras que en los bancos la pieza se presiona contra una muela giratoria.

Otras técnicas utilizadas:

- **Muela corredera:** Las rebabas y pequeñas cantidades de otros materiales sobrantes de la superficie de la pieza pueden retirarse sin necesidad de recurrir al amolado manual. Las piezas dan vueltas en tambores o contenedores vibrantes junto con otras piezas abrasivas; de este modo rozan unas contra otras y contra las superficies abrasivas. Una técnica muy utilizada consiste en apoyar la pieza sobre un lecho de piedras de amolar piramidales y utilizar una emulsión de agua y jabón. La rugosidad y el tamaño de las piedras de amolar dependen del tamaño de la pieza.
- **Tambor giratorio:** Esta técnica se emplea para extraer las rebabas finas o residuos pequeños del moldeo. Durante el proceso las rebabas se desprenden por sí solas como resultado del impacto entre unas y otras piezas del tambor giratorio con ausencia de aire. Las aristas también se redondean durante el proceso. A veces se utiliza además líquido.



Figura 2.51. Rebabas (izq.) y su extracción mediante una piedra
de amolar (centro) y una muela corredera (der.) [237, HUT, 2003]

Resulta difícil automatizar estas operaciones debido a la variabilidad que presenta la forma de las rebabas y a la necesidad de sujetar las piezas de forma rápida y sencilla. Con todo, las máquinas de amolar automáticas cada vez se utilizan más en producciones en serie. Las piezas brutas se introducen en las máquinas y se obtienen piezas igualmente trabajadas que no requieren remecanizado ni amolados manuales posteriores.

Las dos técnicas utilizadas en las líneas automatizadas son las siguientes:

- *Punzonado*: A causa de la utilización de técnicas de corte y conformado a menudo las piezas de las coladas en serie se diseñan de forma que las inevitables rebabas ocurran en puntos predeterminados fácilmente procesables. Si la serie es lo suficientemente grande pueden diseñarse máquinas de punzonado específicas para extraer rápidamente las rebabas y proporcionar a la pieza un contorno uniforme.
- *Fresado*: El desarrollo de sistemas de control electrónico para máquinas procesadoras facilita cada vez más la creación de programas para procesar piezas independientes. Gracias a ello es posible utilizar fresadoras para las series más pequeñas en vez de punzonadoras y sus herramientas de funciones limitadas. Durante el proceso el sistema recoge las piezas y éstas pasan por una serie de distintas máquinas de fresado.

Por último, las piezas pueden soldarse unas con otras para formar una pieza final o bien para corregir defectos de fabricación y moldeo. En la mayoría de casos se utiliza la técnica de soldadura por arco. En función de las necesidades y el equipo disponible el proceso suele realizarse mediante electrodos de barra manuales o mediante alambre para soldadura, con o sin gas inerte. Los moldeos de acero se someten a corte por electrodos arco-aire en forma de estrías para liberar la tensión. Para ello se emplea un soplete cortador dotado de electrodo de carbono recubierto de cobre.

[32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [202, TWG, 2002]

2.8. Tratamiento térmico

2.8.1. Introducción

En fundición férrea se suelen utilizar dos tipos de tratamiento térmico básicos: el recocido y el endurecimiento. En el primero, la tensión provocada sobre la pieza por el vaciado y el posterior enfriamiento se reduce y la estructura se equilibra. En el endurecimiento se eleva el nivel de calor por encima de la temperatura de transformación y la pieza se somete así a un enfriamiento rápido, un proceso conocido como temple que modifica las propiedades del material. Para el temple puede utilizarse agua, aceite o aire. El procedimiento de «bonificado» consiste en volver a calentar la pieza hasta la temperatura de revenido tras el temple, que a continuación vuelve a repetirse.

La maleabilización del hierro es un tratamiento térmico distinto del recocido y del endurecimiento. En este caso la pieza de material maleable sin acabar se transforma por acción de la temperatura en fundición blanca o negra, según el procedimiento seguido.

Muchas piezas no férreas se utilizan en estado bruto, pero para algunas aplicaciones es necesario mejorar las propiedades mecánicas del producto en bruto. Los posibles tratamientos son el recocido, el enfriamiento controlado, el recocido de solubilización, el envejecimiento artificial o el tratamiento de precipitación.

[32, CAEF, 1997], [175, Brown, 1999]

2.8.2. Hornos de tratamiento térmico

2.8.2.1. Hornos de cámara

Los hornos de cámara son los más habituales. Su diseño actual cuenta con múltiples adaptaciones desarrolladas para hacer frente a los diferentes tratamientos térmicos que requieren los distintos tipos de piezas y sistemas de producción. Algunos ejemplos de este tipo de hornos son los de solera móvil, de campana o de solera abierta. Los hornos de cámara con sistema de transporte continuo se llaman de túnel. Se calientan con electricidad, gas o fueloil.

Para los materiales no férreos se utilizan algunos tratamientos térmicos cercanos al punto de fusión del material, lo que requiere un control preciso de la temperatura. La circulación forzada del aire sirve para garantizar que la temperatura sea constante y uniforme en todo el interior del horno.

[32, CAEF, 1997], [175, Brown, 1999]

2.8.2.2. Hornos de cuba

Algunas piezas como tuberías, largas piezas curvadas o similares se someten al tratamiento mientras están suspendidas en posición vertical en hornos de cuba. Estos hornos se calientan por electricidad, gas o fueloil.

2.8.2.3. Hornos de recocido

Los hornos de cámara, de campana o de túnel se utilizan para templar las piezas inacabadas. Estos hornos pueden calentarse con electricidad, gas o fueloil.

2.8.3. Temple

En los procesos térmicos se llama temple en coquilla al enfriamiento de una pieza a una velocidad mayor que al aire. Para lograrlo hay que sumergir la pieza de forma rápida en agua o aceite (véase Figura 2.52) y después enfriarla con aire forzado. Debe prestarse especial atención a que el enfriamiento de las piezas sea uniforme. Al sumergirlas en el líquido o bien las piezas deben moverse o bien el líquido deberá circular de forma continua para garantizar que todos los componentes de las piezas se enfrién uniforme y completamente. Si el enfriamiento se realiza por aire, el mecanismo de soplado debe poder llegar a todas las superficies.

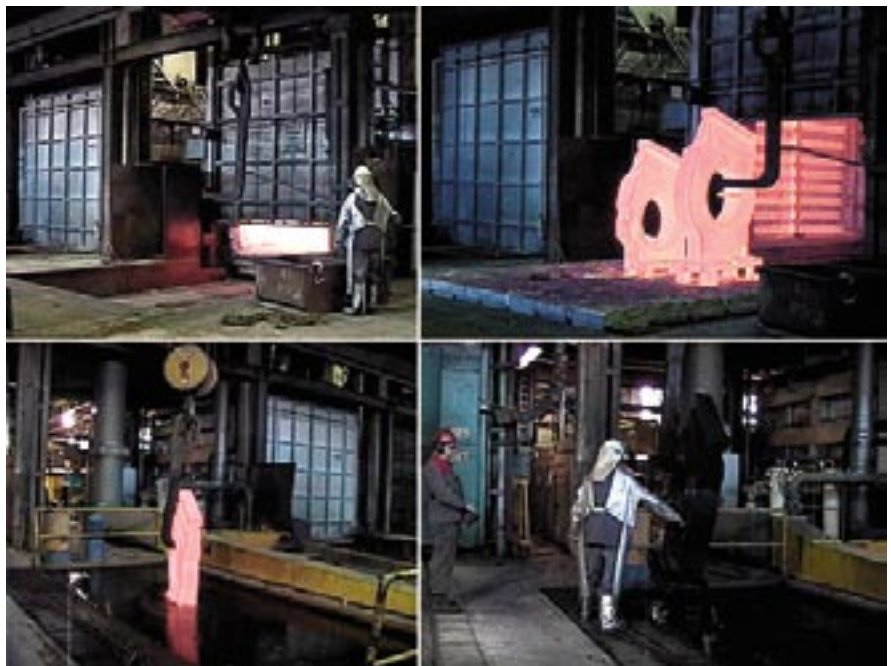


Figura 2.52.
*Temple de una pieza
caliente poco después del
tratamiento térmico*
[237, HUT, 2003]

2.8.4. Tratamiento térmico del hierro dúctil (hierro SG)

Naturalmente, lo que se persigue desde el inicio del proceso es que el metal obtenido en bruto tenga las propiedades requeridas para evitar así tratamientos ulteriores, pero no siempre es posible a causa de determinados factores, como por ejemplo las variaciones en el espesor de las paredes. El tratamiento térmico de las piezas puede eliminar los carburos de las secciones finas, crear matrices de estructura uniforme o, en el caso de estructuras

concretas, mejorar las propiedades mecánicas, especialmente mediante la normalización de la estructura de granos. El tratamiento técnico es esencial si se requiere obtener estructura martensítica por el temple. [32, CAEF, 1997], [174, Brown, 2000]

2.8.4.1. Atenuación de la tensión

La atenuación de la tensión consiste en calentar las piezas entre 50–100 °C/h y 600 °C (con el cuidado de que la temperatura no supere los 610 °C) y, a continuación, sumergirlos durante un mínimo de una hora, más una hora adicional por cada 25 mm de espesor de pared en la parte más gruesa; después le sigue un enfriamiento a 50–100 °C/h o menos. Las piezas deben estar adecuadamente fijadas en el horno para evitar que les afecten las tensiones.

2.8.4.2. Eliminación de carburos

Las piezas de pared fina obtenidas en bruto pueden contener carburos; para eliminarlos, se sumergen durante 3-5 horas a 900–925 °C.

2.8.4.3. Recocido para la producción de estructuras ferríticas

El recocido consiste en sumergir las piezas a 900–925 °C durante 3-5 horas, seguido de un enfriamiento lento a 20–35 °C/h durante el margen de temperaturas más crítico (aproximadamente 800–710 °C) y, finalmente, enfriado en el horno a entre 50–100 °C/h y 200 °C.

2.8.4.4. Normalización para la producción de estructuras perlíticas

Para la normalización es necesario sumergir las piezas por encima de la temperatura de transformación y a continuación aplicar refrigeración por aire. Después se suelen volver a sumergir a una temperatura de 900–925 °C para lograr la descomposición de los carburos. Para formar la perlita se recurre al aire forzado. El tipo de horno de tratamiento térmico y el tamaño de la carga determinan el ciclo de procesos posible. Puede ser necesario ajustar la composición del metal con estaño o cobre para contribuir a la formación de estructuras completamente perlíticas.

2.8.4.5. Producción de estructuras endurecidas y templadas

Las estructuras endurecidas se producen por austenizado de la pieza a 900–920 °C y posterior temple en aceite (normalmente a unos 600–650 °C).

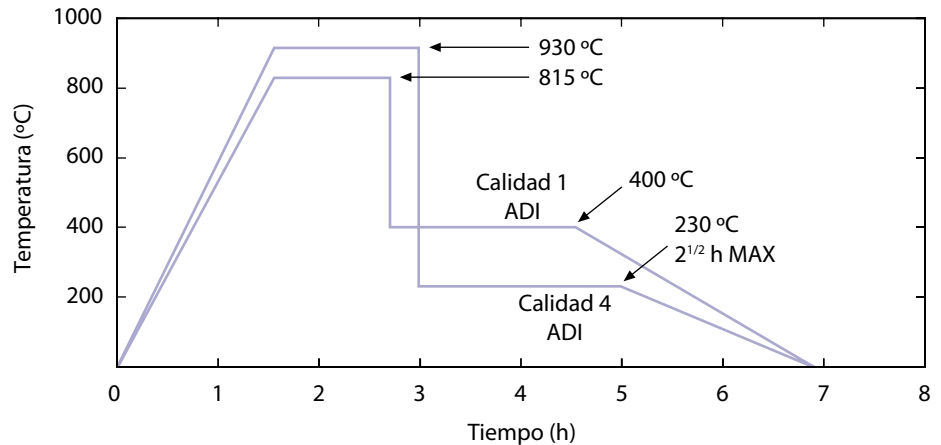
2.8.4.6. Hierro dúctil austemperizado (ADI)

El austemperizado es un tratamiento térmico isotérmico para la producción de estructuras de ausferrita. Puede llegar a doblar la resistencia del hierro dúctil sin perder una buena ductilidad y solidez. Su resistencia al desgaste y a la fatiga son excelentes, hasta el punto de que el hierro ADI es comparable con el acero forjado y endurecido-templado.

El tratamiento térmico del hierro ADI se compone de dos fases, como se ilustra en la Figura 2.53. La austenización se lleva a cabo a entre 815–930 °C con el objetivo de convertir completamente la matriz en austenita. Para ello se requiere un horno de atmósfera no oxidante o un baño de sal a altas temperaturas. Las temperaturas y tiempos necesarios dependen de la composición química, el grosor de la lámina y el grado de ADI necesario; normalmente bastan 1,5–2 horas. El calentamiento inicial debería ser lento para evitar el posible agrietamiento de las formas complejas. A continuación las piezas se templan a la temperatura de tratamiento térmico isotérmico necesaria, que suele ser de entre 210 y 400 °C, normalmente en baño de sal. Se mantienen a esta temperatura durante una o dos horas para completar la transformación de la austenita en ausferrita.

Las temperaturas más bajas aportan una elevada resistencia y resistencia al desgaste, mientras que las elevadas proporcionan mayor ductilidad y fuerza. Tras el tratamiento isotérmico las piezas se enfrían a temperatura ambiente.

Figura 2.53.
Fases habituales en el tratamiento térmico mediante austemperizado
[174, Brown, 2000]



Los hierros dúctiles no aleados pueden austemperizarse en secciones de espesor de hasta 8 mm. Para espesores mayores es necesario añadir Mo o Ni para incrementar la templabilidad.

El hierro dúctil austemperizado se emplea como sustitución de componentes de acero forjado en los sectores de la agricultura, automoción, ferrocarriles y en industrias de ingeniería general; se utiliza, por ejemplo, en puntas de arado, dientes para excavadoras, soportes de resortes, soportes de ejes traseros, engranajes, etc. La producción de hierro ADI crece, pero su empleo se ve limitado hasta cierto punto por la falta de instalaciones adecuadas donde realizar el tratamiento térmico.

[32, CAEF, 1997], [174, Brown, 2000]

2.8.5. Tratamiento térmico del acero

Las piezas de acero normalmente se someten a un tratamiento térmico antes de la entrega, por ejemplo a la normalización, con el objetivo de cambiar su estructura. Por otro lado, las tensiones potenciales de la pieza deben reducirse (recocido para la atenuación de la tensión). Muchas piezas de acero de distintas calidades deben someterse a un temple adicional tras el recocido para la atenuación de la tensión (endurecimiento y temple).

La mayoría de piezas de acero se someten a tratamiento térmico para proporcionarles las propiedades mecánicas deseadas y a atenuación de la tensión para obtener la resistencia a la corrosión necesaria y evitar complicaciones durante las operaciones de acabado. El tratamiento térmico elegido depende del tipo de acero. Para extraer las segregaciones químicas y estructurales se suele realizar un recocido a altas temperaturas. Los aceros al carbono y de baja aleación se someten a:

- normalización y enfriamiento por aire o bien
- austenizado, bonificado.

Los aceros inoxidables dúplex o austeníticos se sumergen en una solución de recocido y un tratamiento térmico de temple al agua. Algunos tratamientos adicionales (atenuación de la tensión, tratamientos posteriores a la soldadura, etc.) también se utilizan para eliminar tensiones internas del material.

[32, CAEF, 1997], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

2.8.6. Tratamiento térmico del aluminio

Las piezas de aluminio se someten a tratamiento térmico por los siguientes motivos: homogeneización, atenuación de la tensión, mejora de la estabilidad dimensional y el mecanizado, optimización de la resistencia, ducti-

lidad, solidez o resistencia a la corrosión. La mayoría de veces con el tratamiento térmico se busca un equilibrio entre varios efectos, aunque a menudo potenciar uno va en detrimento de los otros. El tratamiento térmico del aluminio puede implicar los siguientes procesos: recocido, tratamiento térmico en solución, temple, envejecimiento artificial y tratamiento de precipitación. El tipo de tratamiento térmico utilizado se indica por medio de un sufijo que sirve para designar la aleación y que se llama designación del temple. Los moldeos de arena, por gravedad o a baja presión admiten cualquier tratamiento, aunque no todos están estandarizados. Los moldeos por inyección a presión no se tratan mediante solución y temple de la misma manera que los fabricados con arena, por gravedad o a baja presión, ya que las burbujas de gas atrapadas podrían expandirse y provocar defectos de moldeo. Los moldeos de alta presión no suelen someterse normalmente a tratamiento térmico (sólo el 1%). Todos los moldes a presión pueden templarse a partir de la matriz, someterse a tratamiento de precipitación y a atenuación de la tensión sin verse afectados negativamente. En la producción de llantas de aluminio por baja presión el 90% de las piezas pasan por la fase de tratamiento térmico. [225, TWG, 2003].

2.8.6.1. Atenuación de la tensión y recocido

Las piezas con cambios de espesor o de formas complejas presentan mayor riesgo de tensiones internas, que pueden provocar cambios dimensionales durante el mecanizado. Para estabilizar las piezas y eliminar tensiones internas se calientan a una temperatura de 200 °C durante 5 horas y después se dejan enfriar lentamente en el horno.

2.8.6.2. Tratamiento de solución y enfriamiento

Las piezas se calientan hasta temperaturas situadas justo por debajo del punto de fusión que se mantienen estables durante mucho tiempo para que los componentes de la aleación formen una solución sólida homogénea. A continuación se enfrían rápidamente (temple) a temperatura ambiente para retener los elementos de la solución, para la que se emplea agua o productos de temple especiales. Las cubas de enfriamiento están ubicadas cerca del horno para permitir un enfriado rápido. Aunque la sensibilidad al intervalo de enfriamiento varía según el tipo de aleación, las buenas prácticas deberían limitarlo a 5–10 segundos.

2.8.6.3. Tratamiento de precipitación

La precipitación controlada de los elementos de aleación se induce calentando las piezas hasta una temperatura de entre 150 y 200 °C para incrementar la resistencia y la dureza de las mismas. Por eso se conoce este proceso también con el nombre de endurecimiento estructural. Cada aleación tiene un ciclo de tratamiento térmico óptimo.

2.8.6.4. Envejecimiento artificial

Algunas aleaciones aumentan su resistencia y dureza con sólo permanecer a temperatura ambiente. El proceso puede durar varias semanas, pero se puede acelerar aumentando la temperatura por encima de la temperatura ambiente y manteniéndola de forma constante.

[175, Brown, 1999], [202, TWG, 2002], [213, CTIF y CQRDA, 2002], [212, Zalensas, 1993]

2.9. Control de calidad

En el control de calidad se comprueba que la pieza acabada cumpla con las exigencias predeterminadas con respecto a las dimensiones, los defectos estructurales del metal o la estructura superficial. Dependiendo del tipo de pieza y del tamaño de la serie el control de calidad puede realizarse por inspección visual, con las correspondientes herramientas de medición, o bien automáticamente.

En la producción de llantas de aluminio las piezas se someten a análisis de rayos X. Para ello se utiliza un programa informático para realizar las verificaciones basándose en la imagen estándar de una pieza de buena

calidad. Si hay muchas diferencias la imagen la estudia y evalúa un operador humano. Mediante análisis espectral se realizan pruebas aleatorias en las aleaciones.

El procedimiento de control de calidad es la base sobre la que se decide si finalmente una pieza debe ser rechazada o si debe seguir su curso hasta llegar al mercado. Las piezas rechazadas van a parar junto con las materias primas de entrada y vuelven a fundirse, serán parte de los denominados retornos de fundición.
[225, TWG, 2003]

Capítulo 3.

Niveles actuales de emisión y consumo en las fundiciones

3.1. Vista general del flujo de materiales

3.1.1. Introducción

La Figura 3.1 muestra una vista general del flujo de materiales en el proceso de fundición. El esquema corresponde tanto a fundiciones férreas como no férreas. En las siguientes páginas se analizarán aspectos concretos de los distintos tipos y fases del proceso.

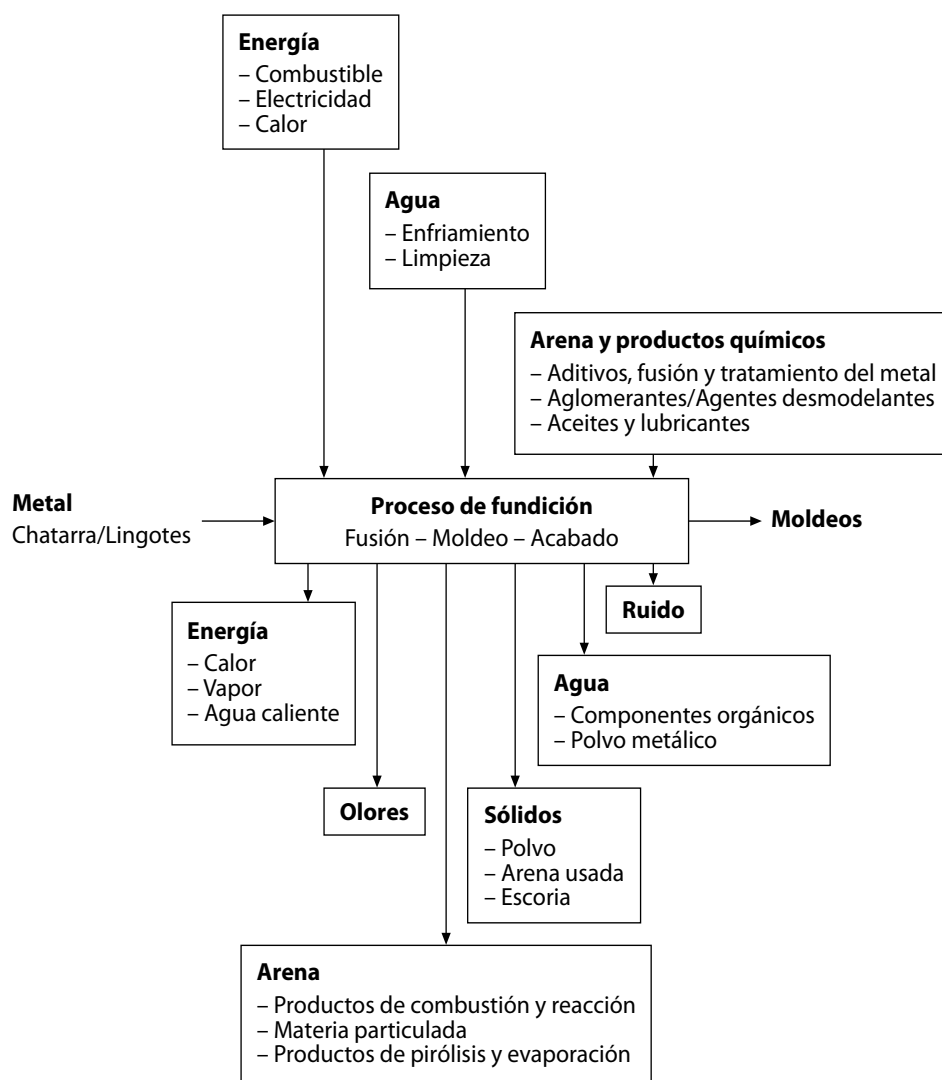


Figura 3.1.
*Visión general del
flujo de materiales
en el proceso de
fundición*

Tabla 3.1. Características de los hornos de fusión y datos sobre las emisiones [32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003] y comentarios de CTIF

Proceso	Acero		Hierro			
	Horno eléctrico de arco	H. Inducción	H. Inducción	Cubilotes		
Subtipo	Revesti- miento ácido	Revesti- miento básico	Sin núcleo	De viento frío	De viento caliente	De viento caliente- campana larga
Fuente de energía	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica	Coque	Coque	Gas/ combustible
Eficiencia térmica ¹ (%)	60-70	60-70	50-60	30-40	40-45	35-45
Eficiencia térmica primaria ² (%)	21-25	21-25	15-20	30-40	40-45	35-45
kWh/tonelada de carga de metal	500-700	500-700	520-800	950-1.200	800-900	810-1.100
Continuo/discontinuo	Discontinuo	Discontinuo	Discontinuo	Continuo	Continuo	Continuo
Velocidad de producción (t/h)				2-10	8-70	>5
Capacidad del horno (en toneladas)	2-50	2-50	0,01-30			1-20
Tiempo de fusión (h)	1-4	1-4	1-2			2-4
Posibilidad de refinio	Posible	Posible	No	Sí	Sí	No
Coste de inversión	Elevado	Elevado	Elevado	Medio	Elevado	Medio
Producción de escoria (kg/t de carga de metal)	10-40	20-80	10-20	40-80	40-80	40-80
Producción de polvo ⁶ (kg/t de carga de metal)	5-8		0,06-1	5-13	4-12	0,8
Emisiones de gases residuales⁷ (kg/tonelada de carga de metal)						
CO ₂ ⁸	Depende de la fuente de energía	Depende de la fuente de energía	400-500		350-480	100-120
CO	7,5-25 (decarburation)		n. c.	Posibles ⁹	0,5 - 2,5	<10
SO ₂	<1		Escasas	1-2	<1	Dependen del combustible
NO _x	n. c.		n. c.	<1	<1	0,5

¹ Los valores indicados sólo pretenden ser orientativos, ya que dependen de condiciones de operación como la temperatura del metal, la capacidad del horno y la velocidad de producción

² La eficiencia de la generación de energía eléctrica se considera del 35%

³ Tiene en cuenta el consumo de energía necesario para la producción de oxígeno y las materias primas, por ejemplo grafito y FeSi, que sustituyen los elementos oxidados durante la fusión

⁴ Sólo en procesos continuos

⁵ Sólo en procesos discontinuos

⁶ Los valores indicados son generales, obtenidos de publicaciones especializadas

⁷ Los valores indicados son generales, obtenidos de publicaciones especializadas

⁸ Considerando que la combustión es completa

⁹ Dependen de las condiciones locales de operación e infraestructura.

3.2. Fusión y tratamiento térmico de metales férreos

3.2.1. Características de los hornos de fusión utilizados para el acero y el hierro

La Tabla 3.1 muestra un resumen de las características de los hornos de fusión utilizados en la producción de acero y hierro colado. En los apartados que la siguen se analizan los datos en detalle.

3.2.2. Cubilotes

Entrada	Salida
- material férreo (lingote, esponja de hierro, chatarra de acero, retornos de fundición...) - metal de aleación (ferroaleaciones...) - fundente (piedra caliza...) - energía (coque, gas, fueloil, electricidad) - oxígeno - agua de refrigeración - agua	- aleaciones de metal (hierro) - polvo (contenido metálico) - CO/CO₂, SO₂, NO_x - HF - dioxinas, furanos - contaminantes orgánicos - escoria - desechos de refractario

3.2.2.1. Consumo de coque y energía

En las instalaciones dotadas de horno de viento frío el consumo de coque entre cargas es por lo general de 90 a 120 kg/tonelada de carga de metal, aunque puede ser inferior a 70 kg/tonelada de carga de metal, por ejemplo al fabricar contrapesos. Si se mide la cantidad de coque presente en el lecho se obtiene un consumo de coque total de 110–140 kg/tonelada de carga de metal. La potencia calorífica del coque europeo es de 8,5 kWh/kg, por lo que la entrada calorífica resultante es de 950 – 1.200 kWh/tonelada de carga de metal.

El consumo total de coque de un cubilote de viento caliente suele rondar los 110-145 kg/tonelada de carga de metal. Sin embargo, puesto que el porcentaje medio de producción de acero es del 50% y en la recarburación se consume un 1,5%, la proporción real de coque quemado alcanza los 95 – 130 kg/tonelada de carga de metal; es decir, entre 810 y 1.100 kWh/tonelada de carga de metal. A esta cifra le corresponde una eficiencia térmica del 35 al 45%.

Según la distribución de la planta será necesario añadir la energía consumida por el equipo de tratamiento de humos y el horno de mantenimiento, como muestra la Tabla 3.2. Los datos correspondientes a Alemania indican un consumo de electricidad de los equipos de depuración de gases de combustión de alrededor de 20 kWh por tonelada de pieza buena.

[202, TWG, 2002]

Tabla 3.2. Consumo medio de energía en el tratamiento de los gases de combustión y en los hornos de mantenimiento

Tipo de energía utilizada	Consumo medio kWh/t de carga de metal
Gas para la cámara de combustión	40
Electricidad para el equipo de depuración de gases de combustión (ventiladores, etc.)	40
Electricidad para el horno de mantenimiento	60

3.2.2.2. Partículas

El porcentaje de emisiones de partículas es muy variable; depende básicamente del tipo de cubilote utilizado, como puede observarse en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3. Niveles de emisión de partículas (gases residuales sin depurar) de distintos tipos de cubilotes [32, CAEF, 1997]

Cubilotes	Emisión de partículas (kg/tonelada de carga de metal)	Proporción de coque (kg/tonelada de carga de metal)
De viento frío	5 – 13	110 – 140
De viento caliente	4 – 10	95 – 130
De viento caliente sin refractario	5 – 12	115 – 135
Sin coque	0,8	0

En la Tabla 3.4 figuran los niveles de emisiones correspondientes a tres hornos alemanes (medición en chimenea).

Tabla 3.4. Niveles de emisión de partículas de los cubilotes y distribución de tamaño de partículas (PM) [202, TWG, 2002]

Depuración de gases de combustión	Volumen (m ³ /h)	Partículas totales (mg/m ³)	PM ₁₀ (%)	PM _{2,5} (%)
Por encima de la entrada de carga; filtro de mangas	28.500	7	88	47
Ciclón, Venturi, recuperador	16.000	68 – 94	96	88
S.d.	6.000 (Nm ³ /h seco)	75	100	45 – 85

Por lo general, el tamaño de las partículas se encuentra entre menos de 1 µm y más de 10 mm, siendo el 50% inferior a 100 µm. Sin embargo, entre el 5 y el 20% de las partículas tienen un tamaño inferior a 2 µm, lo que dificulta la recogida de las mismas. El polvo emitido por los cubilotes se compone principalmente de coque, sílice, óxido y caliza, como muestra la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Composición típica de las partículas de polvo generado por los cubilotes (porcentaje en peso) [32, CAEF, 1997] y [158, Charbonnier, et al., 1998]

Sustancia	Composición (%)	
	[32, CAEF, 1997]	[158, Charbonnier, et al., 1998]
Óxido de hierro	30 – 60	15 – 25
SiO ₂	± 25	15 – 30
Polvo de coque	3 – 15	s.d.
MnO	3 – 10	2 – 5
Al ₂ O ₃	1 – 3	2 – 5
MgO	1 – 3	0 – 2
CaO	<1	5 – 10
S	<2	s.d.
ZnO, dependiendo de la carga	<3	0 – 30 Zn*
PbO, dependiendo de la carga	<1	0 – 5 Pb*

* En forma de óxidos y silicatos, correspondiente a polvo de Zn enriquecido

3.2.2.3. Gases residuales

Los gases residuales de los cubilotes alimentados con coque se componen principalmente de N_2 , CO_2 , H_2O y CO , con una pequeña proporción de SO_2 . En los cubilotes convencionales, donde los gases se recogen por encima de la puerta de carga, debe distinguirse entre las mediciones de los gases de combustión por encima y por debajo de la puerta de carga, ya que al abrirse ésta penetra aire a través de ella al interior; una contribución que modifica significativamente el flujo de aire total.

Si tienen una temperatura lo suficientemente elevada y si hay suficiente CO presente es posible que los gases se quemen de forma espontánea en presencia del aire de entrada ($CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$) y dando lugar a un aumento de la temperatura de hasta $900^\circ C$. En este caso, en el sistema de salida no (o apenas) quedará CO . Si no se produce combustión, la entrada de aire provocará un enfriamiento de entre 100 y $300^\circ C$ y se mantendrá el equilibrio entre CO/CO_2 . La temperatura de los gases medida inmediatamente debajo de la puerta de carga depende principalmente de la altura de la carga; la entrada de aire a temperatura ambiente la determina la capacidad del ventilador o el tiro natural existente.

El flujo de los gases superiores del cubilote no diluidos es proporcional al consumo de coque. Si se aumenta la proporción de coque en la carga desciende el nivel de emisión (tonelada de metal fundido/h) siempre que se mantenga el mismo flujo de aire de inyección. Por tanto, es posible que para mantener el nivel constante deba aumentarse la cantidad de aire inyectado. También la temperatura del metal aumentará. En cuanto a la proporción de combustión ($C + O_2 \rightarrow CO_2$), si se aumenta la cantidad de coque y de aire inyectado, el flujo de gases de salida también incrementará.

En los hornos, el consumo de coque y aire inyectado dependen de la proporción de material fundido prevista y de la temperatura del metal, que puede variar de una hora a otra. Las mediciones de flujo típicas que recoge la literatura especializada varían entre 600 y $800 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$ de carga de metal en el caso de los cubilotes de viento frío y entre 500 y $700 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$ de carga de metal si se trata de cubilotes de viento caliente. La composición de los gases superiores de combustión incompleta podría ser la siguiente (Tabla 3.6):

Tabla 3.6. Composición de los gases superiores de combustión incompleta de un cubilote [32, CAEF, 1997]

Sustancia	Volumen (%)
CO_2	10 – 18
CO	5 – 15
H_2	< 1
SO_2	< 0,05
N_2	Restos

Por encima de la puerta de carga, el flujo de gases de salida puede ser de dos a cinco veces superior, en función de la temperatura programada (que depende del tipo de sistema de extracción de partículas utilizado), de los gases de dilución y, en el caso de los cubilotes de viento caliente con recuperación de calor, de la existencia de una cámara de postcombustión. Los caudales típicos oscilan entre 3.000 y $4.000 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$ de carga de metal en cubilotes de viento frío y de 900 a $1.400 \text{ Nm}^3/\text{tonelada}$ de carga de metal si se realiza tratamiento de postcombustión. La composición de los gases viene determinada por el grado de dilución (por tiro natural o ventilador) y de combustión espontánea de CO o por el proceso de postcombustión, que pueden afectar a la totalidad o a parte del caudal.

[32, CAEF, 1997]

Los datos de emisiones de los principales componentes del gas de combustión se muestran en la Tabla 3.7, que incluye cubilotes de viento frío y caliente de distintas capacidades. También se especifica si los gases residuales se capturan por encima o por debajo de la puerta de carga. Los sistemas de viento caliente tienen menores niveles de emisión de SO_2 . El desintegrador de aire muestra una mayor capacidad de eliminación de partículas que los lavadores venturi. La implantación de la postcombustión influye claramente sobre los niveles de CO y

NO_x en condiciones óptimas de trabajo. Los análisis de los datos de las campañas completas revelan que si los cubilotes de viento caliente no funcionan en condiciones óptimas aumentan las emisiones de CO hasta los 2.000 mg/Nm³ en comparación con los 5–20 mg/Nm³ propios del funcionamiento optimizado. Los niveles de emisiones de COV y HAP también aumentan igualmente.¹
[110, Vito, 2001]

El empleo de la extracción de partículas en seco (por ejemplo, mediante un filtro de mangas) genera unos niveles de emisión de ≤20 mg/Nm³. Los inventarios de datos de fundiciones italianas muestran unos niveles de polvo inferiores a 30 mg/Nm³ (dentro de un margen de 0,1 a 32 mg/Nm³) si se utiliza un filtro de mangas, al contrario de lo que sucede si se utilizan lavadores húmedos, con unas emisiones de polvo que alcanzan los 80 mg/Nm³ (dentro de un margen de 5,4 a 78 mg/Nm³) [180, Assofond, 2002]. Un cubilote alemán obtuvo unos valores de 68 – 94 mg/m³ con un sistema de depuración húmedo (véase Tabla 3.4).

Tabla 3.7. Datos de emisiones correspondientes a cubilotes de viento caliente/frío de distintas configuraciones [29, Batz, 1986], [202, TWG, 2002], datos recalculados en base a un 11% de O₂

Cubilotes	Capacidad	Salida	Flujo	Equipo de depuración	Polvo	SO ₂	CO	NO _x	HF	O ₂
Tipo	t/h	tipo	m ³ /h		mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	vol. %
De viento caliente ¹	19	DC	29.000	Venturi ¹⁾	41	21	17.798	21	s.d.	11
De viento caliente	20	DC	40.000	Desintegrador	5	57	712	11	s.d.	11
De viento caliente	24	DC	46.445	Filtro de mangas	1,1 – 1,4	20	14 – 17	70 – 75	7	11
De viento caliente	25	DC	35.000	Venturi	36	28	21	16	s.d.	11
De viento caliente	60	DC	75.000	Desintegrador	5	58	9	7	s.d.	11
De viento frío	3,2	EC	12.000	Filtro de mangas	10	401	5.084	16	1	11
De viento frío	5	EC	23.000	Filtro de mangas	6	434	28.558	63	s.d.	11
De viento frío	8	EC	20.000	Filtro de mangas	20	401	936	36	s.d.	11
De viento frío	9	DC	22.000	Filtro de mangas	4	105	17.286	60	s.d.	11

¹ Se utiliza un recuperador antiguo.

DC: Gas recogido por debajo de la puerta de carga; EC: gas recogido por encima de la puerta de carga.

Todos los datos corresponden a medias diarias de mediciones continuas.

3.2.2.4. Escoria generada por los cubilotes

La escoria contiene óxidos que flotan encima del caldo y que proceden de impurezas del material de carga, desprendimientos del refractario del horno, de la ceniza del coque y de las pérdidas en la fusión del metal cargado [225, TWG, 2003]. La escoria se forma por acción de los aglomerantes, por ejemplo la vermiculita. La composición típica de la escoria procedente de los cubilotes se muestra en la Tabla 3.8. Los cubilotes suelen producir de 40 a 80 kg de escoria por tonelada de hierro líquido.

La escoria generada por los cubilotes se compone en un 30% de material refractario, de un 10% de arena (procedente de la chatarra interna), de un 40% de CaO (fundente) y de un 10% de cenizas de coque y un 10% de material quemado.

Un aspecto destacable de la escoria de cubilote es su elevado contenido de SiO₂. Tras el temple la escoria adquiere una estructura vitrificada y genera un material inerte no lixiviable.

Tabla 3.8. Composición característica de la escoria procedente de cubilotes [172, Neumann, 1994], [156, Godinot, 2001]

Compuesto	%
SiO ₂	45 – 55
CaO	25 – 40
Al ₂ O ₃	8 – 20
MgO	1 – 3
MnO	1 – 4
FeO	1 – 6
Sulfuros	< 1
TiO ₂	< 1
ZnO	< 0,1

3.2.2.5. Residuos de refractario

Los cubilotes tienen la peculiaridad de que el material de revestimiento (una mezcla de cuarzo y arcilla) de la zona de fusión del horno sólo resiste una campaña. La mayor parte del refractario se convierte en escoria, si bien las cantidades que deben extraerse y eliminarse finalmente son muy inferiores a las del refractario inicial.

3.2.3. Hornos eléctricos de arco

Entrada	Salida
- material férreo (chatarra de acero, retornos, virutas, lingote...) - metal de aleación (ferroaleaciones...) - fundente (piedra caliza...) - energía (electricidad, gas, fueloil) - oxígeno - electrodos	- aleaciones de metal (acero fundido) - partículas (contenido metálico, refractario) - NO_x, CO₂, CO - contaminantes atmosféricos orgánicos, HC - humos de óxidos metálicos - escoria (CaO, SiO₂, MgO) - residuos de refractario

3.2.3.1. Entrada

Se necesitan 500 – 600 kWh de electricidad para fundir y lograr que una tonelada de acero alcance la temperatura de colada. Los hornos suelen tener una potencia de 500 kVA por tonelada, lo que representa un tiempo de fusión de aproximadamente 1,5 horas.

Los electrodos son de grafito y se consumen durante el funcionamiento por oxidación, volatilización y rotura, lo que obliga a ir sustituyéndolos. Un horno de tres toneladas utiliza normalmente electrodos de 200 mm de diámetro. El consumo de electrodos es un factor que incide significativamente sobre los costes de la fundición de arco eléctrico; se utilizan entre 3 y 10 kg por tonelada de acero fundido, dependiendo del tipo de acero y de la técnica seguida.

[174, Brown, 2000]

3.2.3.2. Partículas

Los niveles de emisión de partículas recogidos por la literatura especializada oscilan entre 2 y 20 kg por tonelada de hierro cargado, siendo la media de entre 5 y 8 kg por tonelada. Los niveles de emisiones más altos se registran al inicio del ciclo de fusión, durante la decarburación y durante la recarga [173, Huelsen, 1985]. Los

tamaños de partícula oscilan entre menos de 1 μm y más de 100 μm , aunque el 50% tiene un tamaño inferior a 3–5 μm . Durante el tratamiento con oxígeno un análisis demostró que casi el 90% de las partículas eran más pequeñas de 5 μm .

En cuanto a la composición química de la partículas, las variaciones son aún mayores. En la Tabla 3.9 se recogen los valores indicados en las publicaciones especializadas.

Tabla 3.9. Composición química de los hornos HEA (fundición de acero) [32, CAEF, 1997]

Sustancia	Porcentaje de peso
$\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	30 – 60
SiO_2	5 – 35
CaO	1 – 15
MgO	0 – 15
ZnO	0 – 16
Cr_2O_3	0 – 8
MnO	2 – 10
Al_2O_3	0 – 5
MoO_3	< 1
NiO	< 1
Pb	< 1
Cd	< 0,01
TiO_2	< 0,05
V_2O_5	< 0,05
Pérdida por calcinación	0 – 4

La composición del polvo procedente del horno depende en primera instancia de la calidad del acero producido. Por ejemplo, los de baja aleación no generan emisiones de cromo o níquel, al contrario que los aceros inoxidable. Otro factor importante es la calidad de la chatarra. Fundir chatarra de acero galvanizado conlleva un aumento significativo de las emisiones de óxido de zinc.

La instalación de campanas extractoras apropiadas en el horno permite capturar hasta el 98% del polvo generado, además de depurar los gases de salida capturados, normalmente por medio de un filtro de mangas. De este modo las emisiones de partículas se reducen a niveles inferiores a los 10 mg/Nm^3 . [29, Batz, 1986]

3.2.3.3. Humos visibles

Los humos visibles se generan durante la carga del horno en caliente y al inicio del ciclo de fusión. La documentación disponible no aporta datos sobre las cantidades ni las composiciones de estas emisiones secundarias. También en este caso las características de los humos dependen del grado de limpieza del material de carga en cuanto a la presencia de aceite, grasa, pintura u otras materias orgánicas en el mismo.

3.2.3.4. Gases residuales

Los hornos eléctricos de arco se utilizan básicamente para la fusión del acero. Las emisiones primarias se dan en forma de partículas de polvo y compuestos gaseosos como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y com-

puestos orgánicos. Éstos últimos dependen del tipo y de la cantidad de impurezas presentes en el metal alimentado. Las materias primas empleadas como carga en la fundición se seleccionan previamente y no suelen contener materiales que produzcan dioxinas. Los compuestos orgánicos se descomponen y dan lugar a productos inocuos, siempre y cuando no se precaliente la chatarra sin sistema de postcombustión. [29, Batz, 1986]

Los datos de emisiones de los principales componentes de los gases de combustión se incluyen en la Tabla 3.10. Los datos correspondientes a los inventarios de las fundiciones italianas muestran unos niveles de polvo por debajo de 10 mg/Nm³ (dentro de un margen de 1,2 – 8,3 mg/Nm³) al utilizar filtro de mangas. El lavado húmedo de los gases proporciona unos niveles de emisión de partículas inferiores a 25 mg/Nm³ (dentro de un margen de 12 – 24,5 mg/Nm³). [180, Assofond, 2002]

Tabla 3.10. Valores de emisión típicos de hornos HEA [29, Batz, 1986]

	Capacidad	Recogida de gas residual	Flujo	Equipo de depuración	Polvo	SO ₂	CO	NO _x	HF	O ₂
	tonelada/carga		m ³ /h		mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	vol. (%)
HEA	50	CT	265.000	Filtro de mangas	2	s.d.	s.d.	50	s.d.	20
HEA	2 x 50	CT	380.000	Filtro de mangas	4	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	20
HEA	10	CP	160.000	Filtro de mangas	1	1	200	5	0,1	20

CT: campana total; CP: campana parcial.

Durante la fusión y el refinado se genera CO a causa de la oxidación de los electrodos de grafito y del carbono del baño de metal. Las cantidades estimadas oscilan entre 6 y 20 Nm³ CO/tonelada (o 7,5 – 25 kg CO/tonelada), según el contenido de carbón inicial del material de carga y del nivel de carbono requerido tras el tratamiento. La inyección de oxígeno provoca que el baño de metal genere óxido de hierro en forma de humo rojo. No se han detectado otras emisiones significativas. [32, CAEF, 1997]

3.2.3.5. Escoria

La composición química de la escoria procedente de los hornos HEA se muestra en la Tabla 3.11. Los valores recogidos se basan en el análisis de tres muestras.

Tabla 3.11. Composición química de la escoria de hornos HEA [171, The Castings Development Centre, 1999]

Compuesto	Media (%)	Rango (%)
SiO ₂	36,2	28,6 – 41,8
CaO	12,4	7,2 – 17,7
MgO	22,1	18,3 – 27,0
Al ₂ O ₃	8,4	7,4 – 0,1
FeO	0,7	0,5 – 1,0
MnO	14,8	4,0 – 29,6
TiO ₂	1,2	0,39 – 2,7
Na ₂ O	0,3	0,11 – 0,57
K ₂ O	0,1	0,1 – 0,23

3.2.4. Hornos de inducción

Entrada	Salida
- material férreo (lingote, chatarra de acero, virutas, retornos de fundición...) - metal de aleación (ferroaleaciones...) - agentes de carburación, fundente - energía (eléctrica) - agua de refrigeración	- aleaciones de metal (fundición de hierro, fundición de acero) - partículas de polvo - humos orgánicos y metálicos - CO - escoria - residuos de refractario

3.2.4.1. Hornos de inducción sin núcleo

3.2.4.1.1. Energía de entrada

Los hornos de inducción sin núcleo son capaces de fundir una tonelada de hierro y aumentar la temperatura del metal líquido hasta los 1.450 °C consumiendo menos de 600 kWh de electricidad. En la práctica, sin embargo, sólo algunas fundiciones logran este nivel de consumo específico de forma semanal. El consumo real de energía varía en función del tamaño y del sistema de trabajo del horno en cuestión. Los grandes hornos que funcionan las 24 horas del día y emplean pie de baño alcanzan los 600 kWh/tonelada. Los estudios realizados en fundiciones muestran que los consumos en torno a 520 – 800 kWh/tonelada de carga de metal son habituales siendo las diferencias existentes debidas a las técnicas de fusión empleadas, como por ejemplo la velocidad a la que la línea de colada acepta el metal fundido o si las tapas del horno se usan de forma eficiente. Poniendo en práctica medidas de ahorro energético pueden obtenerse valores de 550 – 650 kWh/tonelada de carga de metal. Las pérdidas de calor características de los hornos de inducción sin núcleo pueden verse en la Figura 3.2.

[47, ETSU, 1992], [174, Brown, 2000], [202, TWG, 2002]

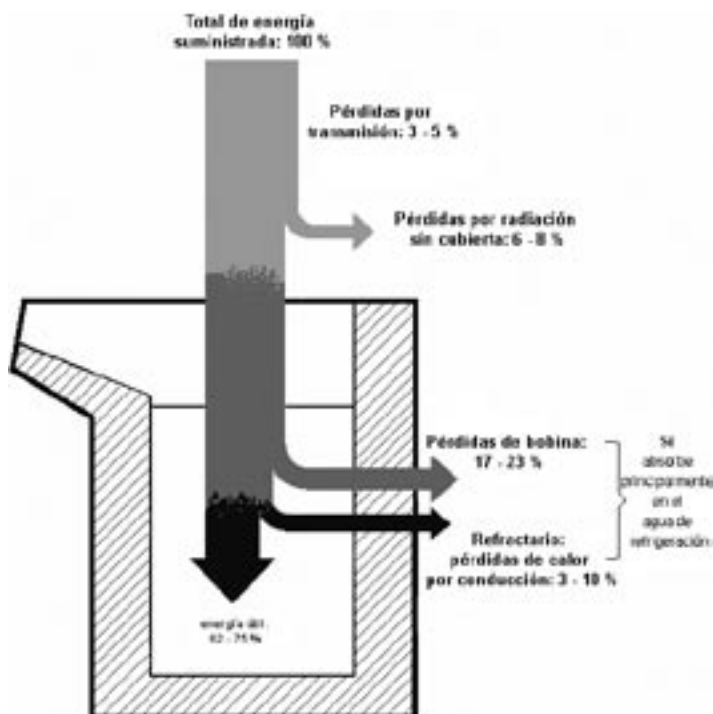


Figura 3.2.
Pérdidas de energía
características en un horno
de inducción sin núcleo
con frecuencia de red
[47, ETSU, 1992]

3.2.4.1.2. Partículas

La literatura especializada señala unos niveles de emisión de entre 0,06 y 1 kg/tonelada de carga de metal, aunque en la actualidad lo normal es que se encuentren entre 0,04 y 3 kg/tonelada. Los niveles más altos se

producen durante la carga y al inicio del ciclo de fusión. El tamaño de las partículas oscila entre 1 y 100 μm , pero más del 50% son más pequeñas de 10 – 20 μm . [32, CAEF, 1997], [202, TWG, 2002]

La Tabla 3.12 recoge los niveles de emisión de polvo y la distribución de la partículas en un horno de inducción de una fundición de Alemania.

Tabla 3.12. Niveles de emisión de un horno HI y distribución de partículas [202, TWG, 2002]

Depuración de gases de combustión	Volumen (m^3/h)	Partículas totales (mg/m^3)	PM_{10} (%)	$\text{PM}_{2,5}$ (%)
Campana y filtro de mangas	10.400	aprox. 0,4	78	50

En cuanto a la composición química de la partículas, no existen datos publicados referentes a la fusión del acero, pero hay motivos para creer que es similar a la composición del polvo emitido durante la fusión del hierro, como muestra la Tabla 3.13. La presencia de Zn, Pb o Cd apunta la posible aparición de penachos de humo metálicos durante la fusión.

Tabla 3.13. Composición química del polvo generado por los hornos de inducción en la fundición de hierro [32, CAEF, 1997]

Sustancia	Porcentaje de peso (%)
$\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$	30 – 70
SiO_2 (dependiendo del material de revestimiento)	5 – 25
MnO	< 5
Al_2O_3 (dependiendo del material de revestimiento)	3 – 10
CaO	< 1
ZnO (dependiendo del material de carga)	< 5
Óxidos metálicos (dependiendo del material de carga)	< 0,1
Pérdida por calcinación	0 – 10

3.2.4.1.3. Gases residuales

La fusión de hierro y acero en hornos de inducción genera pocas emisiones en comparación con los cubilotes. Se previenen las emisiones provocadas al quemar combustibles fósiles con sistemas especiales de captura con rendimientos en la recogida de gases de salida de hasta el 95% como sistemas de aspiración lateral, campanas móviles y cubiertas parciales. Se utilizan sistemas de filtración en seco pudiendo alcanzar niveles de emisión de partículas inferiores a 5 mg/Nm^3 [225, TWG, 2003]. La Tabla 3.14 muestra los datos de emisión característicos.

Tabla 3.14. Datos característicos de emisiones de hornos de inducción de fundiciones férreas [29, Batz, 1986]

	Capacidad	Captura de gases residuales	Fundente	Sistema de depuración	Partículas	SO_2	CO	NO_x	HF	O_2
	Nº de hornos x tonelada/carga		m^3/h		mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	mg/m^3	vol. %
HI	(2 x 10) + (3 x 3)	Aspiración lateral	54.000	Filtro de mangas	5	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	21

Si se emplea chatarra que contenga aceite o virutas y el horno está frío se generarán vapores orgánicos en los gases de salida que permanecerán sin quemarse al haberse creado al inicio del ciclo de fusión. Añadir este tipo de carga al metal fundido (por ejemplo, siguiendo la técnica de fusión de dejar un pie de baño) puede ser muy peligroso, ya que pueden producirse pequeñas explosiones en el caldo que podrían lanzar gotas de metal fundido y chispas fuera del horno.

Puesto que el presente documento se centra únicamente en las fundiciones, no se tendrán en cuenta los datos de emisión correspondientes a la generación de energía eléctrica.

3.2.4.1.4. Escoria

En la Tabla 3.15 puede verse la composición típica de la escoria procedente de los hornos de inducción. Estos hornos producen entre 10 y 20 kg de escoria por tonelada de metal de carga. El límite inferior del margen se obtiene en aquellos casos en los que los retornos internos se limpian (por granallado) antes de volverse a fundir.

Tabla 3.15. Composición característica de la escoria de un horno de inducción [172, Neumann, 1994]

Compuesto	%
SiO ₂	40 – 70
FeO	10 – 30
Al ₂ O ₃	2 – 15
MnO	2 – 10
CaO	0 – 3
MgO	0 – 3

3.2.4.2. Hornos de inducción de canal

En las fundiciones férreas los hornos de inducción de canal sólo se utilizan como hornos de mantenimiento, normalmente en funcionamiento dúplex, conjuntamente con cubilotos de viento caliente. En estos casos, su función es mantener u homogeneizar la composición química del metal o bien servir de depósito de metal fundido. Tampoco se utilizan para aumentar la temperatura del metal, sino más bien para evitar que se enfríe.

La Figura 3.3 muestra los consumos de energía de algunos hornos de inducción de canal representativos que, de hecho, dependen de parámetros relativos al procedimiento, como por ejemplo el tiempo de mantenimiento. En el gráfico puede observarse cómo desciende el consumo a medida que aumenta el número anual de toneladas. Los valores mínimo y máximo son 80 y 20 kWh por tonelada transferida.

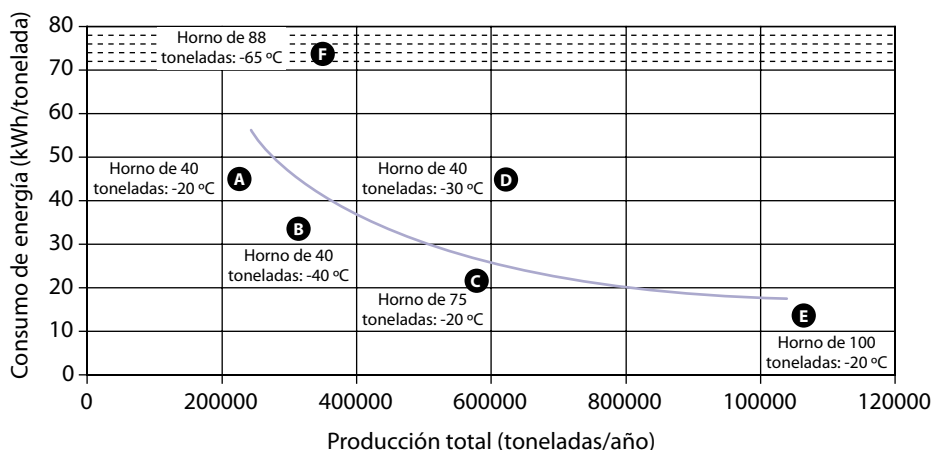


Figura 3.3.
Consumo energético (kWh/tonelada) en función de las toneladas transferidas y de la pérdida de temperatura (hornos de inducción de canal) [140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001]

3.2.5. Hornos rotativos

Entrada	Salida
• material férreo (lingote, chatarra de acero, virutas, retornos...) • metal de aleación (ferroaleaciones...) • agentes de carburación, fundente • energía (eléctrica, fueloil, gas) • agua de refrigeración	• aleación de metal (fundición de hierro) • partículas • humos orgánicos y metálicos • escoria • residuos de refractario

3.2.5.1. Entrada

Como sucede con los hornos eléctricos de fusión, la fuente de energía utilizada en los hornos rotativos hace posible que el proceso sea limpio, sobre todo si se emplea gas natural o propano. El grado de contaminación de la chatarra de la carga adquiere de nuevo gran importancia e influye sobre las características y las cantidades de las emisiones producidas. Ello explica que no exista un patrón uniforme y que los datos de medición presenten grandes variaciones.

3.2.5.2. Partículas

Las partículas proceden de la suciedad adherida al material de la carga, los restos de refractario desgastado durante la carga y la fusión, y el quemado de elementos de aleación y distintos aditivos añadidos a la carga. Los datos obtenidos muestran niveles globales de emisión de entre 0,3 y 2,9 kg/tonelada de carga de metal. El tamaño de grano es relativamente pequeño y va de menos de 1 μm a 100 μm , siendo el 20% del total inferior a 1 μm , el 60% a 10 μm y el 95% a 50 μm .

[32, CAEF, 1997], [204, Carnicer Alfonso, 2001]

La Tabla 3.16 muestra la composición química del polvo generado por los hornos rotativos.

Tabla 3.16. Composición química del polvo originado en los hornos rotativos [204, Carnicer Alfonso, 2001]

Compuesto	%
Óxidos de hierro	50 – 75
MnO	< 1
SiO ₂	< 1
MgO	1 – 2
Cr ₂ O ₃	< 0,5
ZnO	< 1
Pb	< 0,5
Sn	0,2
Pérdida por calcinación	5 – 10

3.2.5.3. Gases residuales

La producción de CO₂ estimada es de 120 kg/tonelada de carga de metal. La eficiencia térmica del horno es muy elevada, del orden del 50 al 65%¹, dependiendo de su capacidad. El rendimiento más alto se alcanza utili-

¹ Sin considerar la energía necesaria para la producción de oxígeno. Si se tuviera en cuenta, la eficiencia descendería en un 10 o 15%. Por otro lado, si se resta la energía necesaria para sustituir los elementos de carga quemados (C, Si), la eficiencia primaria resultante sería de sólo el 30 o el 35%.

zando oxígeno puro en lugar de aire en la combustión. Durante la reducción de la llama es posible que la combustión del gas o combustible utilizado sea incompleta y se genere CO. Sin embargo, en ese momento los gases de salida salen del horno a una temperatura de 1.500 °C, lo que provoca que el CO se queme espontáneamente al entrar en contacto con el aire a temperatura ambiente utilizado para enfriar los gases.

Si se utiliza combustible que contenga azufre las emisiones de SO₂ pueden ser significativas, lo que no sucede si se emplea gas natural o propano.

Se han registrado emisiones de NO_x de 50 a 250 ppm en los gases residuales de un horno de 5 toneladas. El NO_x proviene de la oxidación del nitrógeno atmosférico a temperaturas de llama elevadas (2.800 °C) en caso de que penetre aire a temperatura ambiente en el horno a través de la puerta del quemador. La producción de NO_x es destacable en presencia de llama oxidante, pero pasa a ser baja con la llama reductora. No se tiene constancia de emisiones de compuestos de carbono, probablemente a causa de la elevada temperatura de la llama en el interior del horno y de la relativa limpieza de la carga.
[32, CAEF, 1997]

En los hornos rotativos que emplean quemadores simples de aire/combustible y postcombustor, las emisiones de partículas alcanzan picos de emisión de 250 mg/m³ durante períodos breves (de forma continuada durante tres segundos o ininterrumpidamente durante más de un minuto) en las fases sólidas del ciclo de fusión. Después, una vez que la carga empieza a volverse líquida, las emisiones de partículas descienden a menos de 30 mg/m³ en funcionamiento normal. Durante la fase sólida pueden mantenerse de forma continua a un nivel elevado (150 – 200 mg/m³). Las emisiones combustibles pueden llegar habitualmente a valores del 40%. Los picos de emisión de los hornos rotativos se componen al menos en un 80% de inquemados de combustible y se producen durante las operaciones de carga cuando se apaga y se vuelve a encender el quemador del horno principal. Los niveles de emisión mencionados hacen referencia solo a los casos en los que, los gases residuales se llevan a un postcombustor, que se mantiene completamente operativo incluso en la operación de carga [163, UK Environment Agency, 2002]. Un horno rotativo de oxigás sin postcombustor ha dado lugar a unos niveles medios de emisión de partículas de 400 – 450 mg/Nm³ en el gas residual en bruto durante las dos fases diferenciadas de fusión. Las dos fases hacen referencia por una parte a la fase sólida con unos niveles de emisión de 150 mg/Nm³ y una fase de metal líquido con picos de emisión de hasta 1.500 mg/Nm³ al inicio de la rotación o de 600 – 700 mg/Nm³ durante el funcionamiento normal).
[204, Carnicer Alfonso, 2001]

En la Tabla 3.17 se proporcionan datos de emisión característicos para estos hornos. Se obtuvieron para un horno rotativo de fundición de hierro de 1,4 t/h sin equipo de depuración de gases residuales. Los datos obtenidos en las fundiciones italianas muestran niveles de emisión de partículas inferiores a 15 mg/Nm³ (en un rango de 0,6 a 14,6 mg/Nm³) para aquellos casos que emplean filtro de mangas.
[180, Assofond, 2002].

Tabla 3.17. Datos de emisión de un horno rotativo de fundición de hierro, sin equipo de depuración de gases residuales [110, Vito, 2001]

Parámetro	Valor de medición	Parámetro	Valor de medición
Flujo de gas (Nm ³ /h)	9.000	Cloro(mg/Nm ³)	0,01
Capacidad (t/h)	1,4	Dioxinas (ngTEQ/Nm ³)	0,018
SO ₂ (mg/Nm ³)	70 ± 60	HAP (ng/Nm ³)	
NO _x (mg/Nm ³)	200 ± 200	Naftaleno	548
CO (mg/Nm ³)	20 ± 10	Fenantreno	269
Hidrocarburos (mg/Nm ³)	< 1	Antraceno	9
HCl (mg/Nm ³)	1,64	Fluoranteno	102
HF (mg/Nm ³)	0,91	Pireno	55

.../...

.../...

Parámetro	Valor de medición	Parámetro	Valor de medición
Polvo (mg/Nm ³)	220	Benzo(a)antraceno	10
Mercurio (mg/Nm ³)	0,35	Criseno	73
Cadmio (mg/Nm ³)	0,001	Benzo(a)fluoranteno	3
Talio (mg/Nm ³)	< 0,0015	Benzo(b)+(k)fluoranteno	39
Arsénico (mg/Nm ³)	0,0002	Benzo(a)pireno	12
Níquel (mg/Nm ³)	0,015	Benzo(e)pireno	20
Cobalto (mg/Nm ³)	0,0001	Indeno(1,2,3-cd)pireno	10
Plomo (mg/Nm ³)	0,38	Dibenzo(a,h)+(a,c)antraceno	3
Cromo (mg/Nm ³)	0,022	Benzo(g,h,i)perileno	11
Cobre (mg/Nm ³)	0,196	Perileno	4
Manganeso (mg/Nm ³)	0,38	Antantreno	3
Antimonio (mg/Nm ³)	< 0,0001		
Vanadio (mg/Nm ³)	0,011		
Estaño (mg/Nm ³)	0,0187		
Selenio (mg/Nm ³)	< 0,0001		
Platino (mg/Nm ³)	< 0,0006		
Paladio (mg/Nm ³)	< 0,0029		
Rodio (mg/Nm ³)	< 0,0016		
Zinc (mg/Nm ³)	1,768		
Hierro (mg/Nm ³)	64,63		

– Datos correspondientes a instalaciones sin depuración de gases de combustión
– Valores medios tras tres mediciones, con una desviación estándar de > 30%

3.2.6. Convertidor AOD

Entrada	Salida
• acero fundido • metales de aleación (ferroaleaciones) • Al, FeSi, cal viva • O₂, N₂, Ar	• acero decarburado • polvo de óxido metálico y humos (Fe, Mn, Cr, Ni) • gases (CO₂, CO, gases inertes) • escoria (CaO, SiO₂, AlO₃)

3.2.6.1. Entrada

Los convertidores AOD se utilizan principalmente en la producción de aceros inoxidable de bajo carbono y, en algunos casos especiales, aceros al carbono y de baja aleación, para extraer impurezas como el carbono, el azufre y óxidos y también para decarburar aceros inoxidable con alto contenido en cromo. El material procesado es acero líquido fundido en hornos HEA o de inducción y posteriormente vaciado en el depósito mediante cucharas. Se trata de una técnica muy utilizada en la industria del acero y que también se emplea en las fundiciones, aunque de forma más limitada. Para la decarburación se inyecta oxígeno en el convertidor, que oxida el carbono y lo convierte en gas CO, haciendo que el carbono se desprenda del metal líquido. No se utiliza fuente de energía salvo para la energía necesaria para la reacción de combustión entre el oxígeno y el carbono durante la oxidación y, posteriormente, entre el oxígeno y el aluminio (y/o silicio) durante la reducción.

El consumo de carbono varía entre el 0,4 y el 1% y alcanza aproximadamente 50 – 120cm³ de CO por tonelada de acero y 25– 60 m³ de oxígeno. Para eliminar el azufre es necesario utilizar escoria de alta basicidad en acero líquido completamente reducido. Los materiales de reducción, como el aluminio o el silicio y la cal viva se cargan en el convertidor AOD. Los niveles de consumo que figuran en la Tabla 3.18 dependen de la calidad del acero.

Tabla 3.18. Niveles de consumo en el tratamiento del acero mediante convertidor AOD [202, TWG, 2002]

Compuesto	Consumo (por tonelada de acero)
CO	50 – 120 m ³
O ₂	25 – 60 m ³
Al	1 – 2.5 kg
Cal viva	10 – 20 kg
Si	1 – 2 kg
Ar	1 – 5 m ³

3.2.6.2. Salida

Las emisiones de partículas de polvo son comparables a las de los hornos HEA, tanto por lo que respecta a la cantidad como a la calidad. Las emisiones de partículas de los convertidores AOD tienen unos niveles de residuos (orgánicos) inferiores a los de la carga de chatarra, aunque, por otro lado, tienen un contenido mayor de óxidos metálicos (Cr, Ni), ya que los depósitos procesan básicamente acero inoxidable.

3.2.6.3. Gases residuales

Los gases de salida de los convertidores AOD son monóxido de carbono y gas inerte. La proporción de dióxido de carbono presente depende de la proporción de inyección de oxígeno en las toberas y de la eficiencia del oxígeno o porcentaje de oxígeno que reacciona con el carbono. La eficiencia del oxígeno (o eficiencia en la extracción del carbono, como se suele llamar en las operaciones AOD), varía a medida que lo hace la carga fundida en respuesta a la combinación de variables como el nivel de carbono del baño, la temperatura, las propiedades químicas del metal fundido y la mezcla de gases inyectados.

La mezcla de CO y gas inerte sale del depósito a una temperatura equiparable a la del baño. Al salir se mezcla con el exceso de aire con el objetivo de quemar completamente el CO para que pase a CO₂ muy al inicio del conducto de salida. De este modo se evita la presencia o la permanencia de combustible o de mezclas explosivas que podrían descender por el conducto y llegar al sistema de filtrado.

3.2.6.4. Escoria

La escoria de los convertidores AOD está especialmente «limpia» de óxidos metálicos a causa de las peculiaridades del proceso. La composición de la escoria se muestra en la Tabla 3.19.

Tabla 3.19. Composición de la escoria generada por los convertidores AOD [202, TWG, 2002]

Compuesto	%
CaO	50 – 70
Al ₂ O ₃	5 – 25
SiO ₂	10 – 25
MgO	5 – 15

3.2.7. Convertidor VODC

El proceso que tiene lugar en los convertidores VODC consiste en una recarburación bajo presión reducida. Los procesos que utilizan vacío (HEA/vacío) representaban el 5,8% del total de la producción de acero inoxidable de Occidente en 1991. La técnica consume 1 Nm³ de Ar por tonelada de acero, demuestra un bajo nivel de oxidación del cromo y consume de 3 a 5 kg de silicio por tonelada. El proceso VODC permite producir aceros muy bajos en carbono y nitrógeno.
[202, TWG, 2002]

3.2.8. Refinado y tratamiento del acero

El aluminio utilizado para la desoxidación normalmente se encuentra en forma de barras. Las adiciones van del 0,1% del acero con contenido medio de carbono al 0,2% del acero bajo en carbono. La tasa de recuperación varía entre el 35% y el 80%. También se utilizan sistemas de alimentación mecánica de alambre de aluminio.
[174, Brown, 2000].

3.2.9. Tratamiento de la fundición de hierro

3.2.9.1. Nodulización

En la Tabla 3.20 se comparan la eficiencia, la evaluación cualitativa de la producción de gases de combustión y la complejidad de los distintos métodos de nodulización utilizados.

Tabla 3.20. Comparación de varios procedimientos de nodulización [110, Vito, 2001], [225, TWG, 2003]

	«Sandwich»	Artesa	Inmersión	Por flujo	Inyección de encapsulado	Moldeo	«Ductilator»
Eficiencia de la captación de Mg (%)	35 – 50	45 – 60	40 – 60	40 – 50	20 – 50	70 – 90	60 – 75
Producción de gases de combustión	Elevada	Baja	Baja	Baja	Baja	No	Elevada
Comentario	Procedimiento sencillo	Optimización del método «sandwich»; más mantenimiento	Mantenimiento elevado	Mantenimiento elevado	Instalación costosa	Distintos diseños del sistema de vaciado	Mantenimiento elevado

3.3. Fusión y tratamiento del aluminio

3.3.1. Análisis de los hornos de fusión de aluminio

La Tabla 3.21 muestra las características generales y los datos de emisión y consumo de los distintos tipos de hornos de fusión de aluminio. Las capacidades y configuraciones de los hornos son tan distintas que la literatura especializada no siempre aporta márgenes de consumo homogéneos. Los niveles de consumo dependen en gran medida de la capacidad del horno y de condiciones de explotación como la temperatura del metal o la densidad de la carga.

El empleo de materia prima pura y de sistemas de calentamiento principalmente eléctricos y de gas se traduce en niveles de emisión relativamente bajos durante la fusión. Al no existir preocupación de altos niveles de emisión hay pocos datos sobre la composición del gas residual.

Al fundir aluminio no se generan humos metálicos y sólo se producen pérdidas de metal al formarse la escoria. Este tipo de pérdidas se suele llamar por quemado y consisten en la oxidación del metal fundido, que depende

Tabla 3.21. Características y datos de emisiones de los hornos utilizados en la fusión de aluminio [148, Eurofine, 2002] y comentarios de CTIF y VDG

	Unidades	Horno rotativo	Horno de solera	Horno de cuba	Horno de crisol		
Subtipo			Cámara única		Calentado por combustible	Calentado por resistencia	De inducción
Fuentes energéticas		Combustibles (líquidos, gaseosos)	Combustibles (líquidos, gaseosos)	Combustibles (líquidos, gaseosos)	Combustibles (líquidos, gaseosos)	Electricidad	Electricidad
Eficiencia térmica ¹	%	15 – 40	< 30 – 57	35 – 60	15 – 40	65	65 – 70
Eficiencia térmica primaria ²	%	15 – 40	< 30 – 57	35 – 60	15 – 40	22	22 – 25
Necesidades energéticas especiales ³	kWh/t Al ⁴	600 – 1.250	975 – 1.150	580 – 900 610 – 720	900 – 1.200 610 – 680	750 470 – 590	475 – 640 440 – 470
Discontinuo/continuo		Discontinuo	Discontinuo	Continuo	Discontinuo	Discontinuo	Discontinuo
Capacidad de fusión	t	3 – 10	0,5 – 30	0,5 – 4 (-15)	0,1 – 1,2	0,1 – 0,4	0,2 – 25
Capacidad de mantenimiento	t	n.a.	n.a.	1,5 – 10	0,1 – 1,5	0,1 – 1,5	0,15– 6
Tiempo de fusión		2 – 4	3 – 4	0,5 – 1	0,5 – 1	4 – 5	0,2 – 0,5
Posibilidad de refinio		Baja	Baja	Baja	Buena	Muy buena	Baja
Pérdidas (quemado)	%	s.d.	s.d.	1 – 3	1 – 2	1 – 2	1 – 2
Polvero generado	kg/t Al ⁴	s.d.	< 1	< 1	< 1	Mínima	Mínima
NO _x ⁵	kg/t Al ⁴	s.d.	< 1 – 6	< 1 – 6	< 1 – 6	n.a.	n.a.
Capital de inversión ⁶	’000 EUR	s.d.	s.d.	190 – 370	20 – 50	12 – 100	190 – 500
Costes operativos	’000 EUR	s.d.	s.d.	20 – 100	3 – 20	15 – 45	35 – 150
Técnicas de depuración		Filtro de mangas (para instalaciones más grandes)	Filtro de mangas (para instalaciones más grandes)	Filtro de mangas (para instalaciones más grandes)	No suelen ser necesarias dado el pequeño tamaño del horno	Innecesarias	Innecesarias

¹ Definición: relación entre el calor del baño de caldo y el calor suministrado por el combustible; los valores indicados sólo pretenden ser orientativos, ya que dependen en buena medida de condiciones de explotación como la temperatura del metal

² La eficiencia de la generación de energía eléctrica (combustibles) se considera del 35%

³ Dependen de las medidas de recuperación del calor; sólo son válidas para la fusión; valores obtenidos de [148, Eurofine, 2002] *en cursiva*

⁴ Las unidades «por tonelada de Al» se refieren a una tonelada de aleación de aluminio fundido

⁵ Depende del diseño del quemador y del procedimiento seguido

⁶ Depende de las medidas de recuperación del calor; sólo es válido para la fusión

Fuentes: Estudio interno de VDG; Aluminium Taschenbuch, Band 2, 15. Auflage, Aluminium Verlag GmbH, Düsseldorf, 1996; Aluminium recycling, Aluminium Verlag GmbH, Düsseldorf, 2000; [148, Eurofine, 2002]; comentarios de CTIF.

de la cantidad de escoria que lo recubra y de si se produce combustión. También puede estar provocada por fugas que permitan la entrada de aire en el interior del horno y por anomalías en el quemador. Los costes que provocan las pérdidas son elevados, a veces más que los energéticos.
[148, Eurofine, 2002]

En los siguientes apartados se procederá a analizar la información de los distintos tipos de horno.

3.3.2. Hornos de cuba

Entrada	Salida
• lingotes de aluminio, desperdicios de colada • energía • productos desoxidantes y de extracción de gas	• aluminio fundido • polvo • NO_x, CO • refractario usado

Los datos de emisión disponibles corresponden a emisiones por tonelada de pieza buena en base a las siguientes consideraciones:

- producción media de metal fundido: 70% (pieza/metal fundido);
- proporción media de chatarra: 5% (procedente de acabados/pieza);
- rendimiento global del metal: $0,7 \times 0,95 = 66,5\%$ (pieza buena/metal fundido).

Los datos de consumo y emisiones por tonelada de pieza buena correspondientes a un horno de cuba de 3 t/h para la fusión de aluminio figuran en la Tabla 3.22. La tabla incluye además las emisiones de gases de combustión del gas en bruto (sin sistema depuración).

Tabla 3.22. Entradas y salidas características de la fusión de aluminio en un horno de cuba [177, Silva Ribeiro, 2002]

Entrada	Por tonelada	Por Nm ³
Lingotes de aluminio	1.503 kg/t	
Gas natural	717 kWh/t	
Energía eléctrica	172 kWh/t	
Uso total de energía	889 kWh/t	
Salida		
Escoria (con un 35 – 40% de Al)	40,3 kg/t	
Refractario usado	0,3 kg/t	
Emisiones (sin depuración de gases de combustión)		
Partículas	0,12 kg/t	112 mg/Nm ³
NO _x	0,18 kg/t	113 mg/Nm ³
COV	0,12 kg/t	
SO ₂	0,04 kg/t	
CO		150 mg/Nm ³
Pb + Cr + Cu		0,98 mg/Nm ³
Cd + Hg		0,01 mg/Nm ³
As + Ni		0,03 mg/Nm ³

Datos calculados para tonelada de piezas buenas

La Tabla 3.23 muestra los niveles de consumo de un horno de cuba con una capacidad de 2 toneladas dedicado a la fusión de aluminio.

Tabla 3.23. Resultados obtenidos tras 6 días de prueba funcional de un horno de cuba de dos toneladas de capacidad utilizado para la producción de Al [48, ETSU, 1994]

	Consumo final	Consumo por tonelada de metal cargado
Cargas de metal	115.332 kg (54% lingotes, 46% chatarra)	1 tonelada
Metal vaciado	113.983 kg	0,988 kg/tonelada
Pérdida de metal	1.349 kg	0,012kg/tonelada –1,2%
Escoria extraída	1.412 kg	0,012 kg/tonelada –1,2%
Consumo de gas	92.786 kWh	804 kWh/tonelada

3.3.3. Hornos de fusión

Entrada	Salida
• lingotes de aluminio, retornos • energía eléctrica • agua de refrigeración	• aluminio fundido • polvo • refractario usado

Los hornos de inducción de aluminio suelen tener una capacidad de entre 500 kg y dos toneladas y funcionan con frecuencias de 250 –1.000 Hz.

Por ejemplo, en unas instalaciones, dos hornos de acero inoxidable de 1,5 toneladas de capacidad con cuba basculante para la fusión de aluminio requerían un suministro energético de 1.250 kW y 250 Hz y estaban dotados de un conmutador inversor que permite iniciar la fusión de forma alterna. Con este sistema es posible fundir 1,5 toneladas en 40 minutos.

Los hornos de inducción son muy eficientes a la hora de fundir metal, si bien el consumo energético se ve afectado por la densidad de la carga y la técnica de fusión empleada. La fusión discontinua es menos eficiente que el método de fusión dejando un pie de baño (que resulta especialmente eficiente si se utiliza un 50% de material residual como pie de baño). El consumo de energía oscila entre los 540 kWh/tonelada por carga de alta densidad aparente (chatarra pequeña y lingotes) y 600 kWh/tonelada si se funde chatarra de menor densidad (por ejemplo, bebederos utilizados en la inyección a presión y lingotes). Los costes de consumo de energía son bajos, pero los de fusión pueden llegar a ser superiores a los de los hornos por combustión de gas a causa del elevado precio de la electricidad como fuente de calor.

[175, Brown, 1999] [148, Eurofine, 2002]

La bobina de los hornos de inducción requiere un sistema de refrigeración; es posible emplear refrigeración con agua que circule a través de un circuito cerrado o bien a través de un sistema abierto en el que el agua se evapore.

3.3.4. Hornos de techo radiante (calentados mediante resistencia)

Los hornos calentados mediante resistencia se utilizan para el mantenimiento, principalmente de aleaciones de aluminio. Las emisiones dependen del metal utilizado, la temperatura de mantenimiento, el área de superficie de las caras interna y externa del metal y, sobre todo, el tiempo de mantenimiento. Las emisiones son tan bajas que no hay mediciones disponibles.

[202, TWG, 2002]

3.3.5. Hornos de solera

Existen hornos de solera (o de reverbero) de distintos tamaños y formas. Los más grandes permiten fundir rápidamente el metal y pueden procesar material de carga voluminoso; sin embargo, el contacto directo entre la llama y el material de carga puede provocar pérdidas de metal elevadas, absorción de gas y considerable contaminación por oxidación. Además, el control de la temperatura puede resultar complicado. Estos hornos son menos utilizados a causa de su eficiencia térmica relativamente escasa (de alrededor de 1.100 kWh/tonelada). Los hornos de solera también se usan para fundir aleaciones de cobre (véase apartado 3.5.1). [175, Brown, 1999]

La Tabla 3.24 contiene los datos de emisión de un horno de solera de una capacidad de 450 kg/h alimentado con fueloil y sin sistema de tratamiento de gases de combustión utilizado para fundir aluminio.

Tabla 3.24. Datos de emisiones de un horno de solera calentado con fueloil (fusión de Al) [183, Goovaerts, 2002]

Compuesto	Nivel de emisión (mg/Nm ³)	Flujo másico (g/h)	Flujo másico anual (tonelada /año)
O ₂	17,6%		
CO ₂	2,2%		
CO	< 4	< 24	< 0,0438
NO _x	45	270	0,4928
SO ₂	13	78	0,1424
polvo	1	6	0,011
COT	5	30	0,0548
Al	0,092	0,552	0,001

Flujo de gases de combustión: 6.000 Nm³/h (en seco); horas de funcionamiento: 1.825 h/año

3.3.6. Hornos de crisol (calentados por combustible y resistencia)

Entrada	Salida
• lingotes de aluminio, retornos o aluminio líquido si se utiliza como horno de mantenimiento • energía eléctrica o combustible	• aluminio fundido • polvo

Los hornos de crisol se calientan indirectamente mediante quemadores de combustible o resistencias eléctricas. Los calentados por combustión muestran una eficiencia térmica menos elevada que la de otros hornos de fusión a causa de las dificultades de uso del calor de los productos de combustión. Son relativamente baratos y, al no entrar en contacto las llamas con el metal fundido, las pérdidas son mínimas y la calidad de la colada elevada; además, los cambios de aleación no presentan complicaciones. [175, Brown, 1999]

Por lo que respecta a las aleaciones de aluminio, el total de partículas puede estimarse en alrededor de 0,3 kg/tonelada de metal fundido. [126, Teknologisk, 2000]

La información sobre emisiones y consumos por tonelada de pieza buena se muestra en la Tabla 3.25 (corresponden a un horno de crisol con una capacidad de 3 t/h).

Tabla 3.25. Datos de emisión y consumo de un horno de crisol (fusión de Al) [177, Silva Ribeiro, 2002]

Entrada	
Gas natural	538 kWh/tonelada
Electricidad	414 kWh/tonelada
Energía de entrada total	952 kWh/tonelada
Salida	
Escoria	61 kg/tonelada
Refractarios	6,87 kg/tonelada
Emisiones (tras pasar por la cámara de filtros)	
NO _x	0,18 kg/tonelada
SO ₂	0,04 kg/tonelada
COV	0,12 kg/tonelada
Polvo	0,12 kg/tonelada

Todos los datos están referidos a tonelada de pieza buena.

3.3.7. Tratamiento del aluminio fundido

Para el ciclo combinado de desgasificación/depuración en un impulsor se utiliza normalmente una mezcla de argón o hidrógeno con un 3% de Cl₂. En cambio, si sólo se lleva a cabo la desgasificación, el Ar y el N₂ suelen emplearse sin Cl₂. El flujo aplicado y el tiempo de desgasificación dependen del tipo de aleación y del tamaño del depósito en el que se realiza el tratamiento.

El consumo de agentes modificadores, afinadores de grano y fundentes depende del tipo de aleación, aunque normalmente la proporción es de entre 100 g y 1 kg por cada 50 kg de metal fundido.

3.4. Fusión y colada de magnesio y aleaciones de magnesio

3.4.1. Protección del caldo de magnesio

Se utiliza SF₆ y SO₂ como capa protectora o aislante de gas para evitar la oxidación (o combustión) del magnesio fundido. Puesto que el SF₆ es más fácil de manipular que el SO₂, que es tóxico, se convirtió en el gas más utilizado desde su introducción en el mercado a mediados de los años 70; sin embargo, el SF₆ tiene un potencial de calentamiento global (GWP) de 22.200 (en un horizonte temporal de 100 años) y un tiempo de vida atmosférico de 3.200 años [194, UNEP IPCC, 2002].

La Tabla 3.26 y la Tabla 3.27 muestran las cantidades de SF₆ empleadas en distintas condiciones operativas de moldeo a presión y por gravedad, respectivamente. Las concentraciones indicadas deben mantenerse cerca de la superficie de la colada [191, IMA, et al.]. Los valores que figuran en la tabla corresponden a las recomendaciones para el uso de SF₆ de la International Magnesium Association (IMA). A pesar de todo, en la práctica en ocasiones suelen utilizarse concentraciones más altas (por ejemplo 99,4% de CO₂, 0,6% de SF₆) [202, TWG, 2002].

Hasta la fecha la única alternativa sin fundente al SF₆ es el SO₂. En una colada no alterada su empleo habitual sería de 1 – 2% (en aire o nitrógeno) a una velocidad de flujo de 5 a 10 l/min. [182, Closset, 2002], [218, Harnisch y Schwarz, 2003]

En 2001 la producción total de piezas de magnesio de la UE alcanzó las 39.100 toneladas, de las cuales el 37% se produjo con SO₂ y el 63%, (24.500 toneladas) con SF₆ (véase Figura 3.4). Más información en el apartado 4.2.7.1.

Tabla 3.26. Empleo de SF₆ en la inyección en distintas condiciones operativas [191, IMA, et al.]

Temperatura de fusión (°C)	Atmósfera sobre el caldo (vol. %)	Agitación de la superficie	Fundente residual ¹⁾	Protección del caldo
650 – 705	Aire/0,04 SF ₆ ²⁾	No	No	Excelente
650 – 705	Aire/0,2 SF ₆	Sí	No	Excelente
650 – 705	75 aire/25 CO ₂ /0,2 SF ₆	Sí	Sí	Excelente
705 – 760	50 aire/50 CO ₂ /0,3 SF ₆	Sí	No	Excelente
705 – 760	50 aire/50 CO ₂ /0,3 SF ₆	Sí	Sí	Muy buena

¹⁾ Puede deberse a operaciones previas

²⁾ Concentración mínima en condiciones controladas

Nota: En la mezcla debería usarse aire seco (< 0,1% H₂O)

Tabla 3.27. Empleo de SF₆ en operaciones de moldeo por gravedad [191, IMA, et al.]

Diámetro de crisol (cm)	Velocidad baja del flujo de gas en reposo (fusión/mantenimiento)		Velocidad alta del flujo de gas agitado (aleación/vaciado)	
	SF ₆ (ml/min.)	CO ₂ (l/min.)	SF ₆ (ml/min.)	CO ₂ (l/min.)
30	60	3,5	200	10
50	60	3,5	550	30
75	90	5	900	50

Nota: Las velocidades sugeridas son del 1,7% – 2% de SF₆ por volumen

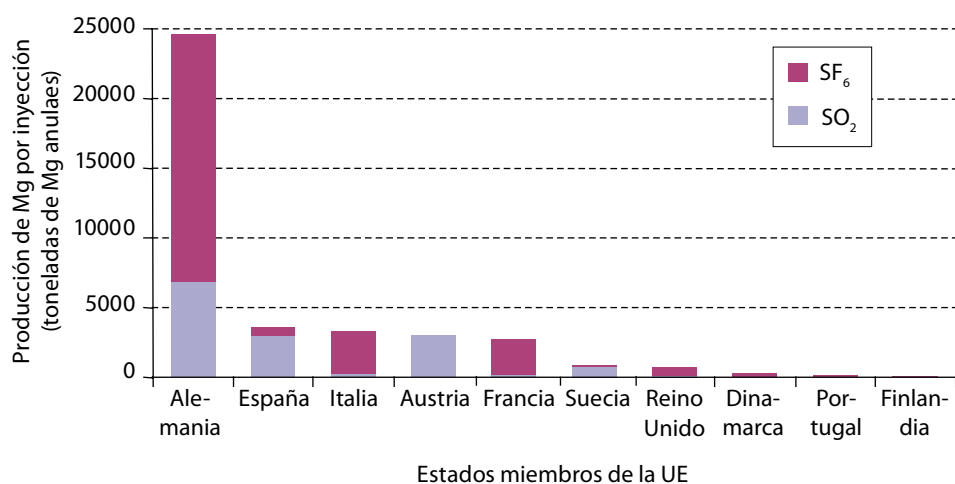


Figura 3.4. Producción de Mg por inyección por parte de los Estados de la UE en toneladas/año y mediante capa protectora o aislante de gas (SO₂ o SF₆) (datos de 2001) [218, Harnisch y Schwarz, 2003]

3.4.2. Tratamiento del caldo de magnesio

Las aleaciones de magnesio que contienen aluminio se tratan con hexacloroetano (HCE) para afinar el grano. Este tratamiento se utiliza en las aleaciones obtenidas a partir de moldeo en arena y por presión; es decir, alrededor de un 10% del total de aleaciones de magnesio. La cantidad de HCE necesaria depende del tipo de componente que se va a fabricar y de la información acumulada por las distintas fundiciones. Algunas fuentes

apuntan una cantidad de aproximadamente 2 kg de HCE por tonelada de aleación de magnesio con contenido de aluminio. [178, Wenk, 1995]

3.4.3. Chatarra de magnesio

En las fundiciones de inyección dedicadas a la fusión de Mg, la cantidad de retorno (chatarra de Mg) prácticamente equivale a la de las piezas buenas moldeadas a presión. Cerca del 80% de los retornos cumplen con los requisitos de calidad de la «clase 1» (véase Tabla 3.28).

Tabla 3.28. Clases de chatarra de magnesio [206, Ditze y Scharf, 2000]

Clase	Descripción
Clase 1	Chatarra limpia y compacta; se conoce su composición Mazarotas: limpios Residuos de prensado: limpios Piezas rechazadas: limpias, sin recubrimientos
Clase 2	Chatarra de piezas coladas, con pintura (insertos parciales de Fe o Al, no contaminados de cobre ni níquel)
Clase 3	Chatarra metálica compacta sin limpiar (con aceite, humedad o contaminada con arena, cobre, níquel, ferro-silicio), básicamente chatarra postconsumo
Clase 4	Virutas: limpias, secas Virutas: con aceite, húmedas Cascarillas, rebabas, mazarotas: con aceite, húmedas
Clase 5	Escoria (dross de superficies metálicas)
Clase 6	Escoria (crisoles)
Clase 7	Fundente con contenido de chatarra, granza negra
Clase 8	Residuos no metálicos
Clase 9	Intermetálicos

3.5. Fusión y colada de cobre y aleaciones de cobre

3.5.1. Procesos de fusión y colada

El cobre y las aleaciones de cobre se suelen fundir en hornos de crisol que normalmente funcionan dentro de los márgenes siguientes:

- carga: 30 – 1.800 kg
- capacidad: 30 – 400 kg
- consumo energético (fueloil): 0,4 l/kg
- consumo energético (butano): 0,3 Nm³/kg

También se emplean hornos de inducción de frecuencia media revestidos de sílice o alúmina.

La Tabla 3.29 muestra el balance de masa característico de una fundición de latón dedicada a fabricar grifos de bronce. Los siguientes datos corresponden a las operaciones combinadas de fusión y llenado a baja presión (pero no de acabado ni de producción de machos). Todos los datos se han obtenido de piezas de buena calidad y se refieren a la fusión con quemador de gas en un horno de crisol de 1 tonelada/h de capacidad.

En cuanto a las aleaciones de cobre, la cantidad de partículas emitidas depende en gran medida del contenido de zinc de las mismas. Los valores indicados en la Tabla 3.30 muestran la relación entre la cantidad de partículas de zinc generadas y el contenido de zinc.

Tabla 3.29. Balance de masa de una fundición de moldeo a baja presión de latón (operaciones de moldeo e inyección) [177, Silva Ribeiro, 2002]

Entrada	
Energía eléctrica	1.360 kWh
Gas propano	14
Aire comprimido	48 kWh
Agua	85,7 l
Pastillas de extracción de gas	0,6 unidades
Desoxidantes	0,9 unidades
Aleaciones de cobre	0,44
Cobertura del fundente	0,31
Machos	286
Pintura de grafito	3,4
Salida	
Arena sin contacto con el fundido	101
Arena con contacto con el fundido	6,7
Pintura de grafito	61,4 l
Polvo de zinc	0,075
Escoria	36,3
Chatarra de latón	57,1
Virutas de latón	18,4
Emisiones (sin depuración de los gases de combustión)	
Partículas	3,9
COV	3,3
SO ₂	0,1
NO _x	0,03
Cobre	0,081
Zinc	26,3

Todos los datos corresponden a una tonelada de pieza comercializada; valores en kg si no se indica lo contrario

Tabla 3.30. Emisión de partículas de correspondiente a la fusión de aleaciones de cobre en crisoles [126, Teknologisk, 2000]

	Contenido de Zn (%)	Emisión de partículas (kg/t de metal fundido)
Bronce	0 – 7	0,3 – 1,5
Latón	20 – 40	0,5 – 16

La producción de escoria alcanza los 60 kg/tonelada de metal fundido, una cifra que apenas varía respecto de las de los hornos de inducción o de solera y varios tipos de aleaciones de cobre. La composición de la escoria depende del tipo de aleación fundida. Por lo general el contenido de bronce es de entre 45 y 55%. Mezclando varios tipos concretos de escoria generada en la fundición se obtiene escoria de calidad constante, una calidad constante necesaria para el reciclaje externo.

La producción de residuos de refractario es de 8 a 9 kg/tonelada de metal fundido (inducción) y de 7,5 kg/tonelada de metal fundido (combustión de fueloil) [34, Binninger, 1994].

3.5.2. Tratamiento de la colada de cobre y aleación de cobre

Cuando se utilizan burbujas de gas inerte para desgasificar el cobre se necesitan de 50 a 70 litros de gas por cada 100 kg de cobre. Como alternativa pueden utilizarse pastillas específicas o briquetas. El tratamiento de desgasificación normalmente dura entre 3 y 10 minutos, dependiendo del tamaño de la colada. La cantidad exacta de desoxidante necesaria depende de la técnica de fusión empleada [175, Brown, 1999].

3.6. Fusión y colada de zinc y aleaciones de zinc

La Tabla 3.31 muestra el balance de masa característico de una fundición de zinc con tecnología de vaciado a presión. Los datos corresponden a colada de zamac (ZnAl_4Cu_1 o ZnAl_4). Los lingotes de aleación de zinc se funden junto con los rechazos y las mazarotas en un crisol calentado con gas, parte de la máquina de moldeo. Antes de la colada se pulveriza un agente desmoldeante en la matriz. La pieza moldeada se enfría en un baño de agua y se le extrae la mazarota. A continuación se desengrasa y rectifica. El gas residual se captura y se somete a extracción de partículas en un sistema seco. Los apartados 3.9 y 3.11 aportan información sobre la producción de machos y el acabado.

Tabla 3.31. Datos característicos de masa y energía en el moldeo a presión del zinc

Entrada	
Aleación de zinc	1.040
Rechazos	50
Mazarotas	450
Agente desmoldeante	20 l
Agua	1 m ³
Energía eléctrica	700 kWh
Gas natural	70 Nm ³
Salida	
Pieza buenas	1.000
Virutas	3
Escoria	30
Lodo (lavado y rectificado)	2
Gas residual	10.000 Nm ³
Partículas	1

Todos los datos están referidos a una tonelada de pieza buena; valores en kg si no se indica lo contrario

3.7. Fusión y colada de plomo

Los procesos de moldeo de colada pueden dividirse en las siguientes categorías:

- inyección;
- coladas para baterías de acumuladores;
- moldeo en arena de pantallas protectoras.

3.8. Depuración de gases residuales

3.8.1. Sistemas de depuración

En el sector de la fundición se utilizan varios tipos de técnicas de depuración para los gases de salida y residuales, descritos con detalle en el documento BREF dedicado a las industrias del metal no férreo. En la Tabla 3.32 se proporcionan datos de diverso tipo así como los niveles de emisión de los distintos sistemas de depuración de partículas de polvo. En el apartado 4.5, dentro de las técnicas que hay que considerar al elegir las MTD, se analiza en detalle la selección de la técnica de depuración, su empleo en los distintos procesos de fundición y los niveles alcanzables.

Tabla 3.32. Ejemplo de emisiones actuales de los sistemas de depuración de partículas [155, European IPPC Bureau, 2001]

Técnica	Tamaño de las partículas (µm)	Eficiencia de recogida a 1 µm (%)	Temperatura máxima de funcionamiento (°C)	Nivel de emisiones alcanzable (mg/Nm³)	Comentarios
PE caliente	< 0,1	> 99 Depende del diseño	450	5–15 (Predepuración >50)	4 o 5 zonas; se suele utilizar normalmente como pretratamiento
PE frío	0,01	< 99	80	1–5 (Limpio a la vista)	PE de 2 zonas en serie. Básicamente para la precipitación de neblina
Ciclón	10	40	1.100	100–300	Partículas gruesas Método de apoyo
Filtro de mangas	0,01	> 99,5	220	1–5	Buen rendimiento para el tipo de partículas adecuado
Lavador húmedo	1 – 3	> 80–99	Entrada 1.000 Salida 80	4–50	Buen rendimiento para el tipo de partículas adecuado Reducción de gases ácidos

PE: Precipitador electrostático.

3.8.2. Dioxinas

En los procesos de fusión pueden generarse dioxinas si se dan las condiciones que dan origen a las mismas en el momento y en el lugar donde se lleva a cabo el proceso. Las condiciones necesarias son las siguientes:

- presencia de iones de cloruro (puede provenir de chatarra contaminada, del uso de carbón, coque, fueloil o a de determinados flujos;
- presencia de carbono orgánico (puede provenir de chatarra contaminada, del uso de carbón, coque o fueloil como combustibles);
- condiciones de temperatura de entre 250 y 450 °C, con un tiempo de residencia de gas suficiente mientras la temperatura se mantiene en esos límites;
- presencia de catalizadores como el cobre;
- presencia de oxígeno.

Al evaluar el riesgo de formación de dioxinas debe distinguirse entre las fundiciones férreas y las no férreas:

- *Fundiciones no férreas*: debido a que solo se funde a partir de lingotes y chatarra interna, el riesgo de formación de dioxinas en la etapa de fusión es muy bajo. La fusión de metales no férreos puros evita la presencia tanto de cloruros como de carbono, ambos necesarios para la (re)formación de dioxinas. Sin embargo el uso de chatarra externa pintada o plastificada de estos metales puede suponer riesgo en cuanto a formación de dioxinas. Se trata de un proceso, en cualquier caso, que escapa del objetivo del presente documento y se analiza en [155, European IPPC Bureau, 2001]

- *Fundiciones férreas*: se podrían dar las condiciones necesarias para la formación de dioxinas dependiendo del tipo de horno y de la carga empleados. Teniendo en cuenta las altas temperaturas que se alcanzan en la fusión, la emisión de dioxinas (en el caso que se produjese) se debería principalmente al proceso de reformación conocido como síntesis *de-novo*. Las condiciones antes citadas sirven para evaluar el riesgo de que se lleguen a formar dioxinas.

Los datos de formación de dioxinas recogidos proceden de fuentes de diverso tipo. La Tabla 3.33 incluye información sobre los distintos metales y hornos utilizados. Los espacios en blanco indican ausencia de información. Ninguno de los sistemas medidos emplea técnicas específicas de captación de las dioxinas. Las técnicas existentes pueden dividirse en dos grupos en función del nivel de dioxinas: muy bajo ($< 0,05 \text{ ng/Nm}^3$) o muy variable ($< 0,01 - 3 \text{ ng/Nm}^3$). El primer grupo incluye la fusión de aluminio, la fusión de hierro por inducción y la fusión de acero en hornos HEA. En el segundo grupo figura la fusión en cubilotes y la fusión de hierro en hornos rotativos. La bibliografía analizada no aporta datos que expliquen la razón de las variaciones existentes dentro del segundo grupo. A pesar de todo, parece evidente que los CVF dotados de depuración húmeda muestran unos niveles de emisiones de PCDD/F considerablemente inferiores.

Tabla 3.33. Datos de emisiones de dioxinas para varios tipos de fundición [21, Strauß, 1994], [23, Brettschneider y Vennebusch, 1992], [27, Kran, et al., 1995], [43, Batz, 1996], [110, Vito, 2001], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003], notificación en persona

Producto	Tipo de horno	Capacidad de fusión (t/h)	Gas de combustión (m³/h)	Sistema depuración	O ₂ (%)	PCDD/F (ngTEQ/Nm³)
Aluminio	Solera	s.d.	s.d.		s.d.	0,002
Aluminio	Solera	0,45	9.300	Ninguno	18,8	0,002
Aluminio	De cuba	1,5	8.400	Ninguno	18,4	0,01
Hierro	CVF	3,4	15.900	Filtro de mangas	s.d.	0,04
Hierro	CVF	3,7	14.300	Filtro de mangas	16	0,09
Hierro	CVF	4,5	14.300	Filtro de mangas	s.d.	0,09
Hierro	CVF	3,4	s.d.		s.d.	0,33
Hierro	CVF	5,5	17.400	Filtro de mangas	15,9	0,51
Hierro	CVF	6,5	17.500	Filtro de mangas	s.d.	0,51
Hierro	CVF	6	27.600	F. mangas + PC	s.d.	3,14
Hierro	CVC	45,5	55.000	Desintegrador	6	0,003
Hierro	CVC	60	s.d.	Desintegrador	s.d.	0,003
Hierro	CVC	40,6	75.000	Filtro de mangas	12,5	0,05
Hierro	CVC	50	75.000	Filtro de mangas	s.d.	0,07
Hierro	CVC	15	36.400	F. mangas + PC	s.d.	0,05
Hierro	CVC	13	s.d.		s.d.	0,10
Hierro	CVC	18,2	29.100	Filtro de mangas	8,6	0,20
Hierro	CVC	17,1	22.500	Filtro de mangas	7,5	0,29
Hierro	CVC	27	s.d.		s.d.	1,00
Hierro	CVC	28	37.000	Filtro de mangas	s.d.	2,08
Hierro	CVC	21	32.000	F. mangas + PC	s.d.	3,09
Hierro	HI	19,5	208.000	Filtro de mangas	20,2	0,003

.../...

.../...

Producto	Tipo de horno	Capacidad de fusión (t/h)	Gas de combustión (m ³ /h)	Sistema depuración	O ₂ (%)	PCDD/F (ngTEQ/Nm ³)
Hierro	HI	s.d.	s.d.	Filtro de mangas	s.d.	0,01
Hierro	HR	8	s.d.		s.d.	0,004
Hierro	HR	1,4	9.000	Ninguno	s.d.	0,02
Hierro	HR	2,1	18.600	Filtro de mangas	19,9	0,45
Hierro	HR	3,5	s.d.	Filtro de mangas	s.d.	0,61
Acero	HEA	5,4	54.150	Filtro de mangas	20,9	0,003
Acero	HEA	9	5.000	Depuración húmeda	s.d.	0,02

CVF: Cubilote de viento frío; CVC: Cubilote de viento caliente; HR: Horno rotativo; HI: Horno de inducción; HEA: Horno eléctrico de arco; PC: Postcombustión; s.d.: Sin datos

A continuación se analizan los datos sobre emisión de dioxinas de los distintos hornos de fusión de metal férreo.

- *Cubilotes*: en los cubilotes siempre existe un exceso de cloro a causa del aporte del coque, el cual también aporta carbono suficiente, aunque a veces puede que sea necesario añadir carbono adicional si la chatarra no es de buena calidad. En determinadas condiciones de operación pueden darse las condiciones necesarias para la formación de dioxinas. Debido a que la síntesis *de novo* se produce principalmente durante el enfriamiento del gas de combustión, este problema afecta tanto a los cubilotes de inyección de aire frío como caliente. En la Tabla 3.34 figuran los resultados del análisis estadístico de todos los datos de medición sobre CVF y CVC aportados en la Tabla 3.33. Mientras que la Tabla 3.33 muestra los valores medios correspondientes a las plantas, el análisis de la Tabla 3.34 se basa en valores concretos.

Tabla 3.34. Emisiones de dioxinas procedentes de cubilotes [21, Strauß, 1994], [23, Brettschneider y Vennebusch, 1992], [27, Kran, et al., 1995], [43, Batz, 1996], [110, Vito, 2001], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003], comunicación personal

	Unidades	CVF	CVC
Media	ngTEQ/Nm ³	0,54	0,75
Desviación estándar	ngTEQ/Nm ³	1,08	1,3
Mediana	ngTEQ/Nm ³	0,18	0,09
Mínimo	ngTEQ/Nm ³	0,001	0,001
Máximo	ngTEQ/Nm ³	5,1	4,4
Número de mediciones		35	18
Número de hornos		11	11

Los datos obtenidos en un estudio alemán (6 instalaciones, 18 mediciones) mostraron niveles de 0,006–0,22 ng TEQ/Nm³, con una media de 0,0724 ng TEQ/Nm³ (0,0608 i-TEQ/Nm³). Los datos de las conclusiones coinciden en parte con los que se han presentado más arriba, pero la información aportada no es suficiente para poder extenderlo a otros hornos. [224, Helber, et al., 2000]

Los datos muestran que tanto la media como la desviación estándar y el rango de valores son parecidos en los hornos de viento frío y caliente. La mediana es inferior en el caso de los cubilotes de viento caliente. Todo ello confirma la afirmación [224, Helber, et al., 2000] de que no existen diferencias estadísticas entre las emisiones de dioxinas de ambos tipos de cubilotes. La elevada desviación estándar viene a mostrar que la información debería interpretarse planta por planta y no en base a la media.

En la depuración de partículas húmeda con desintegrador los gases residuales atraviesan el rango crítico de temperatura (250–450°C) tras la extracción de partículas; es decir, cuando los gases tienen un bajo contenido en partículas de polvo. Ello, sumado a que los cloruros han sido lavados, implica una notable reducción del riesgo de síntesis *de novo*.

- **Hornos rotativos:** las limitadas posibilidades de aleación obligan por lo general a utilizar material de carga limpio en los hornos rotativos. A causa de la elevada temperatura que alcanza la llama, los gases calientes abandonan el horno a una temperatura de entre 1.000 y 1.300 °C. La postcombustión tiene lugar en el interior (volumen) del horno. Existe riesgo de síntesis *de novo* si los gases de combustión se enfrían lentamente. Los datos obtenidos indican unos valores de 0,004–0,61 ngTEQ/Nm³.
- **Hornos de inducción:** las limitadas posibilidades de aleación obligan por lo general a utilizar material de carga limpio en los hornos de inducción. Además, este tipo de hornos no producen flujos de gas a alta temperatura canalizados que puedan enfriarse lentamente.
- **Hornos eléctricos de arco:** los hornos HEA permiten tratar la colada y realizar aleaciones si el refractario es básico, por lo que entonces pueden utilizar chatarra con impurezas (aceite, pintura, plástico...) como carga. Si la carga contiene chatarra con componentes orgánicos y/o clorados podrían formarse dioxinas durante el enfriamiento de los gases de combustión. Podría suceder, por ejemplo, si se utilizase chatarra procedente de equipos electrónicos, transformadores y restos de vehículos triturados. Los HEA con revestimiento ácido no permiten tratar el metal y, por tanto, se reduce la posibilidad de alimentarlos con chatarra contaminada, lo que a su vez reduce el riesgo de formación de dioxinas.

[161, UK Environment Agency, 2002]

3.9. Producción de moldes y machos

3.9.1. Introducción

La producción de moldes y machos implica mezclar arena con varias sustancias químicas, unas mezclas que, en ocasiones, se calientan posteriormente. Al hacerlo se generan emisiones de productos de reacción gaseosos o volátiles y de exceso de reactivo. La Tabla 3.35 representa el estudio de emisiones y otros impactos medioambientales durante el mezclado, el curado y el almacenamiento de los machos y moldes. En los apartados que siguen se tratarán los niveles de emisión y consumo de los distintos tipos de aglomerantes.

Tabla 3.35. Impacto medioambiental de los sistemas de aglomeración [126, Teknologisk, 2000], [160, UK Environment Agency, 2002], [225, TWG, 2003], [229, Lilja, et al., 2000]

Nombre del sistema y componentes del aglomerante	Método de fraguado y necesidades de energía relativa	Emisiones atmosféricas durante el mezclado y el fraguado	Otros impactos medioambientales
ARENA VERDE Arcilla Polvo de carbón o sustituto Agua	Por presión: bajas	partículas: no se producen emisiones significativas a la atmósfera	Deben evitarse las pérdidas de arena alrededor de los transportadores para disminuir la posibilidad de emisiones fugitivas. No es necesario realizar depuración posterior a la mezcla (se trata normalmente de un proceso autónomo con salida de aire hacia la fundición)
EN CÁSCARA Fenol – formaldehído Resina (Novalak)	Calor: altas	Formaldehído* Amoniaco* Fenol* Aromáticos HCN	Los olores pueden representar un problema, ya que las máquinas para moldear en cáscara tienen extracción a la atmósfera

.../...

.../...

Nombre del sistema y componentes del aglomerante	Método de fraguado y necesidades de energía relativa	Emisiones atmosféricas durante el mezclado y el fraguado	Otros impactos medioambientales
FENÓLICOS ALCALINOS Resol – Resina alcalina de fenol-formaldehído 1. Fraguado con gas (fenólico alcalino, en caja fría) 2. Autofraguado (fenólico alcalino, no estufado)	Fraguado con vapor de formiato de metilo: bajas En frío mediante ésteres: bajas	Formaldehído* Fenol* Formiato de metilo Formaldehído* Fenol* Ésteres	
URETANO FENÓLICO 1. Fraguado con gas: caja fría 2. Autofraguado (uretano fenólico no estufado)	Vapor de aminas: bajas Autofraguado con sustituto de piridina: bajas	Isocianato (MDI) Aminas* Formaldehído* Fenol Isocianatos (MDI) Formaldehído* Fenol	Los olores son un problema frecuente; si se utiliza DMEA es imprescindible realizar un lavado. El lavado puede ser por incineración o depuración (mediante ácido sulfúrico o fosfórico); este último produce licor cáustico, un residuo especial. Si se utiliza TEA el lavado sólo es necesario si se dan problemas de olor
FURANO Combinación de resinas de: Fenol Urea Alcohol furfurílico Formaldehído	En frío mediante ácidos: bajas	Formaldehído* Fenol* Alcohol furfurílico* Ácido sulfhídrico Neblina de ácido	Las resinas y ácidos deben mantenerse aparte (a menos que haya arena) ya que al entrar en contacto son muy exotérmicos
CAJA CALIENTE Combinación de resinas de: Fenol Urea Alcohol furfurílico Formaldehído	Calor: altas	Formaldehído* Ácidos Alcohol furfurílico* Fenol* Amoníaco Ácido isocianico Isocianato de metilo	Los olores pueden representar un problema, ya que las máquinas para moldear en cáscara tienen extracción a la atmósfera
ARENA CON ACEITE Aceite de linaza o almidón	Calor: altas	Acroleína* Sustancias orgánicas complejas	Los olores pueden representar un problema, ya que las estufas de machos tienen extracción a la atmósfera
CON CO₂ Silicato de sodio	Fraguado por gas (CO ₂): bajas	Inexistentes	
SILICATO ÉSTER Silicato de sodio	En frío mediante ésteres: bajas	Ésteres	

Nota 1: Todos los procesos anteriores generan arena usada (machos rotos, derrames y residuos de mezcla incluidos) que pueden ir a parar al vertedero.

Nota 2: Las sustancias marcadas con un * son las más proclives a provocar olores durante el proceso indicado.

Nota 3: Cualquier componente aglomerante de las resinas se consideraría residuo especial desde el punto de vista de su eliminación y en caso de derrame podría provocar riesgo de contaminación de sistemas de agua.

Nota 4: Las aminas y formiatos de metilo utilizados para el endurecimiento mediante gas son muy inflamables y olorosos. Deben extremarse las precauciones para que no se produzcan fugas en el almacenamiento.

Los datos cuantitativos sobre las emisiones de partículas de polvo generadas en las zonas de moldeo pertenecen a un estudio de fundiciones realizado en Italia. La Tabla 3.36 muestra los resultados obtenidos. Todos los sistemas de depuración dieron unos valores inferiores a 15 mg/Nm³.

Las emisiones de la Tabla 3.35 se refieren a las fases de mezclado, fraguado y almacenamiento de moldes y machos. La mayoría de emisiones persisten durante las etapas de vertido de metal y enfriamiento de la pieza, aunque ahora se añaden productos de pirólisis (que se analizarán en el apartado 3.10.1).

Tabla 3.36. Valores y factores de emisión correspondientes a las emisiones de partículas de polvo en zonas de moldeo tras la depuración de gases de salida [180, Assofond, 2002]

	Concentración (mg/Nm ³)			Factor de emisión (g/t)*		
	Media	Mínima	Máxima	Media	Mínima	Máxima
Filtro de mangas	3,2	0,4	12,1	24,4	0,5	108,3
Lavador húmedo	5,2	3,6	6,7	6,2	4,0	8,0
Venturi (húmedo)	9,6	8,5	10,9	34,2	30,1	39,9

Unidades: g/tonelada de pieza buena

Número de puntos de medición: filtro de mangas: 33; depurador húmedo: 4; sistema venturi húmedo: 3

La Tabla 3.37 refleja los resultados obtenidos tras una campaña de mediciones llevada a cabo en Alemania. Las partículas se analizaron en fracciones de PM₁₀, PM_{2,5} y PM₁.

Tabla 3.37. Ejemplo de datos de emisiones de partículas y tamaño de las mismas (producción de moldes y machos) [202, TWG, 2002]

Procedimiento	Volumen de gas residual (Nm ³ /h)	Equipo de depuración de gases	Partículas totales (mg/m ³)	PM ₁₀ (%)	PM _{2,5} (%)	PM ₁ (%)
Preparación de la arena	25.600	Filtro de mangass	0,3			
Preparación de arena verde	24.400	Campana extractora, filtro de mangass	0,7	88	38	
Preparación de la arena	70.400	PE	22 – 28,3	79	18	
Zona de machos	4.670 (seco)	Depurador de aminas	0,7	98	47 – 62	
Zona de moldeo	52.300 (seco)	Filtro de mangass	0,7	95 – 97	50 – 60	2–5
Acabado	22.000 (seco)	Filtro de mangass	5,3	100	45 – 48	9

3.9.2. Moldeo con arena ligada con arcilla (moldeo en verde)

Entrada	Salida
- arena - arcilla aglomerante (p.ej. bentonita) - polvo de carbón, dextrina - agua (para preparar la mezcla de moldeo)	- moldes de arena verde - polvo (finos de silicio, arcilla parcialmente quemada, polvo de carbón incombusto y cenizas)

La composición de la bentonita que se añade a la arena depende de las propiedades concretas tanto de la arena como de la bentonita, así como de la resistencia deseada y la permeabilidad al gas del molde acabado. La Tabla 3.38 proporciona algunos parámetros sobre la arena ligada con arcilla obtenidos de una selección de 105 muestras procedentes de fundiciones de hierro.

Para la mezcla de la arena verde se utilizan además los siguientes aditivos:

- *Polvo de carbón*: se utiliza principalmente en las fundiciones de hierro y en menor medida en algunas no férreas. Los niveles de polvo de carbón de la arena verde oscilan entre el 2 y el 3% en el caso de las piezas pequeñas y el 7 u 8% en el caso de piezas con grandes espesores de pared. El exceso de polvo de carbón provoca agujeros en las piezas o en los moldes mal llenados. Existen varios productos sustitutivos del carbón que normalmente se añaden en una concentración ligeramente modificada respecto a la del polvo de carbón

- *Aglomerantes de cereales*: el almidón y la dextrina se utilizan básicamente en las fundiciones de acero para evitar las consecuencias de la expansión del sílice y para controlar el exceso de humedad en la mezcla de arena. Los porcentajes de adición de aglomerantes de cereal más efectivos en la arena verde se encuentran entre el 0,5 y el 0,75%. En las arenas verdes de tipo unitario se destruye parte del cereal durante el proceso de moldeo. Las adiciones recomendadas por cada nuevo ciclo son de 0,1 a 0,25%, en función de la cantidad de cereal quemado y de la dilución de machos y arena nueva.
[174, Brown, 2000], [225, TWG, 2003]

Tabla 3.38. Propiedades características de la arena verde medidas a partir de la información de 105 muestras obtenidas de otras tantas fundiciones de hierro [36, Winterhalter, et al., 1992]

Parámetro	Unidades	Media	% de muestras dentro de un margen de $\pm 10\%$ respecto a la media		Valor máximo	Valor mínimo
			Margen	%		
Contenido de agua	%	4,1	3,4 – 4,5	48	6,9	2,4
Contenido de bentonita	%	8,3	7,5 – 9,1	45	11,9	5,6
Densidad	g/cm ³	0,940	1,00 – 0,85	75	1,06	0,73
Pérdida por calcinación	%	5,0	4,5 – 5,5	20	15,0	1,0
Resistencia a la compresión	N/cm ²	18,6	16,7 – 20,5	54	24,5	13,2

3.9.3. Moldeo con arena suelta (moldeo en vacío)

Entrada	Salida
• arena seca • láminas de PE • energía (para generar y mantener el vacío)	• moldes • polvo

El choque térmico inducido por el contacto del metal fundido suelta los granos de arena y genera partículas de polvo, principalmente durante el desmoldeo. El polvo restante de la arena debe extraerse para que la arena pueda reutilizarse para moldear. Con este método sólo debería emitirse una pequeña cantidad de partículas durante el llenado de las cajas de moldeo.

Es un proceso interesante, desde un punto de vista medioambiental, porque su impacto es muy limitado. Sin embargo, como se basa en numerosos pasos, la tasa de moldeo es baja y el tiempo de espera antes de iniciar una nueva colada larga. Además, los costes de inversión son también muy elevados, lo que hace que su aplicación sea muy limitada.

3.9.4. Producción de moldes y machos con arena química

Entrada	Salida
• arena • resina • catalizador, endurecedor, aditivos	• moldes y machos de arena • exceso de reactivos • productos de reacción • partículas

3.9.4.1. Niveles de consumo de sustancias químicas

Los niveles de consumo de los distintos tipos de aglomerantes, endurecedores, catalizadores y aditivos se muestran en la Tabla 3.39.

Tabla 3.39. Niveles de consumo de varias resinas, catalizadores, endurecedores y aditivos utilizados para preparar la arena química [174, Brown, 2000], [225, TWG, 2003]

Tipo de fraguado	Tipo de resina	Adición de resina por peso de arena (%)	Tipo de catalizador/endurecedor	Adición de catalizador/endurecedor por peso de arena (%)	Tipo de aditivo	Aditivos añadidos por peso de arena (%)
En frío	Furano	0,8 – 1,5	Ácido sulfónico	25 – 60	Silano	0,1 – 0,2
	Fenólica	1 – 2	Ácido sulfónico	25 – 50	n.d.	n.d.
	Poliuretano	0,8 – 1,5	Derivado de la piridina	2 – 6	n.d.	n.d.
	Resol	1,0 – 1,5	Éster	22 – 25	n.d.	n.d.
	Aceite alquídico	1,0 – 2,0	Isocianato	18 – 20	Catalizador	0,002 – 0,2
	Silicato éster	2,0 – 4,5	Éster	10 – 15	n.d.	n.d.
Por gas	Fenólica/Furano	0,8 – 1,2	SO ₂	0,3 – 3	Peróxido	0,1 – 0,5
	Poliuretano caja fría	1,0 – 1,8	Amina	0,05 – 0,15	n.d.	n.d.
	Resol	1,2 – 1,8	Formiato de metilo	0,3 – 0,5	n.d.	n.d.
	Resol	2 – 2,5	CO ₂	0,7 – 1,25	n.d.	n.d.
	Acrílica/époxi	1,2 – 1,6	SO ₂	0,02 – 0,05	Peróxido	0,05 – 0,06
	Silicato	2 – 4	CO ₂	1 – 2	n.d.	n.d.
Térmico	Aceite	0,8 – 4			n.d.	n.d.
	Caja caliente (alcohol furfurílico)	1,0 – 1,5	Sales de Cu de ácidos sulfónicos	10 – 30	n.d.	n.d.
	Caja caliente (fenólica o furánica)	1,2 – 3,0	Sales de amonio	10 – 25	n.d.	n.d.
	Fenólica cronin	1,5 – 5	hexametil-etetramina	15	n.d.	n.d.

3.9.4.2. Factores de emisión

La utilización de aglomerantes químicos provoca la creación de varios compuestos durante los procesos de mezclado, producción de machos y moldes, almacenamiento, llenado del molde y enfriamiento, tal como se indica en la Tabla 3.35. La Tabla 3.40 y la Tabla 3.41 proporcionan factores de emisión significativos de algunos procesos.

Tabla 3.40. Factores de emisión durante la producción de moldes [110, Vito, 2001]

	Arena furánica	Arena fenólica
Disolventes orgánicos	1,4	1,25
Fenol	0,02	0,18
Formaldehído	0,08	0,15

Todos los datos se expresan en kg/tonelada de metal fundido

Tabla 3.41. Factores de emisión durante la producción de machos [110, Vito, 2001]

	Caja fría	Caja caliente	Cáscara
Polvo	n.a.	0,003	0,003
Alcohol furfurílico	0,1	n.a.	n.a.
Formaldehído	0,01	n.a.	0,003
Disolventes orgánicos	n.a.	0,03	n.a.
Disolventes aromáticos	0,12	n.a.	n.a.
Aminas	0,13	n.a.	n.a.

Todos los datos se expresan en kg/tonelada de metal fundido

n.a.: no aplicable

3.9.4.3. Emisiones originadas durante el fraguado en frío

A continuación se describen brevemente las emisiones generadas durante los procesos de fraguado en frío:

- *Fenólico*: puede que se generen vapores de formaldehído y fenol a causa de la presión de vapor de estos componentes. Sin embargo, dado que la polimerización tiene lugar a temperatura ambiente, las presiones de vapor son bajas y, teniendo en cuenta los niveles de consumo, las emisiones resultan insignificantes.
- *Furánico*: pueden generarse vapores de formaldehído, fenol, alcohol furfurílico y alcoholes a causa de la presión de vapor de estos componentes. Sin embargo, dado que la polimerización tiene lugar a temperatura ambiente, las presiones de vapor son bajas y, teniendo en cuenta los niveles de consumo, las emisiones resultan insignificantes.
- *Poliuretano*: pueden generarse vapores de formaldehído, fenol, isocianato y disolventes aromáticos a causa de la presión de vapor de estos componentes. Sin embargo, dado que la polimerización tiene lugar a temperatura ambiente, las presiones de vapor son bajas y, teniendo en cuenta los niveles de consumo, las emisiones resultan insignificantes. Pueden producirse olores desagradables en la zona de moldeo, pero es poco probable que causen molestias en el exterior.
- *Resol-éster*: la resina contiene fenol y formaldehído sin reaccionar, pero las emisiones son extremadamente bajas e insignificantes desde un punto de vista medioambiental.
- *Aceite alquídico*: la producción de machos y moldes no provoca problemas de emisiones siempre que no se utilice calor para el curado, en cuyo caso podrían generarse olores molestos.
- *Silicato éster*: este proceso no provoca problemas de emisiones.

[32, CAEF, 1997]

3.9.4.4. Emisiones originadas durante el fraguado con gas

A continuación se describen brevemente las emisiones generadas durante los procesos de fraguado con gas:

- *Caja fría*: se emiten pequeñas cantidades de vapores de formaldehído, fenol, isocianato y disolventes aromáticos a pesar de sus bajas presiones de vapor. Las emisiones de disolventes aromáticos alcanzan su máximo durante el purgado. Las emisiones más significativas corresponden a las aminas, que tienen umbrales de detección olfativa bajos y pueden provocar molestias en el exterior. Las aminas son peligrosas y tienen unos límites de exposición relativamente bajos, así como un fuerte olor característico a concentraciones muy bajas.
- *Resol-éster*: la resina contiene fenol y formaldehído sin reaccionar, pero los niveles de emisión, incluidos los del tratamiento con gas y el purgado, son muy bajos. El formiato de metilo no es tóxico, no genera olores desagradables y sus valores límite de exposición son relativamente altos.
- *Resol-CO₂*: la resina tiene un contenido bajo de fenol y formaldehído sin reaccionar y los niveles de emisión, incluso durante los procesos de tratamiento con gas y purgado, son muy bajos.
- *Resina fenólica y furánica curada con SO₂*: tanto las resinas como las arenas preparadas generan emisiones de formaldehído. Los principales problemas derivan del dióxido de azufre, muy peligroso.
- *Resinas epoxi/acrílicas curada con SO₂*: las emisiones generadas durante la producción de machos son mínimas.
- *CO₂-silicato*: este proceso no genera emisiones problemáticas ni durante el moldeo ni durante la producción de machos.

[32, CAEF, 1997]

3.9.4.5. Emisiones originadas durante el curado en caliente

A continuación se describen brevemente las emisiones generadas durante los procesos de curado en caliente:

- *Caja caliente*: los modelos se calientan normalmente mediante quemadores de gas al aire libre que generan emisiones de gases de combustión. Los gases residuales pueden contener fenol, amoníaco, formaldehído y monoisocianatos (si la resina contiene nitrógeno).
- *Caja tibia*: las emisiones son significativamente inferiores a las de los procesos en caja caliente. Las emisiones no contienen fenol ni amoníaco, mientras que las de formaldehído son cuatro veces inferiores. La temperatura del modelo también es inferior a la alcanzada en el proceso anterior, lo que mejora las condiciones de trabajo. El impacto medioambiental se considera relativamente bajo.
- *Cáscara*: el consumo de arena curada, si lo comparamos con el del proceso en caja caliente, es muy inferior. Sin embargo, la arena prerrevestida contiene de 2 a 3 veces más resina; a pesar de todo, dado que las temperaturas de moldeo son aproximadamente las mismas, el impacto sobre las condiciones de trabajo es parecido.
- *Emisiones del aceite de linaza*: los aceites suelen encontrarse en solución con disolventes orgánicos como nafta o queroseno, por ello el curado genera grandes cantidades de COV que provocan malos olores en el exterior. Este problema se hace más persistente aún durante la colada. Todo ello, junto con la baja productividad, explican el menor interés actual por este proceso.

[32, CAEF, 1997]

La Tabla 3.42 muestra el balance másico correspondiente a una zona de producción de machos mediante caja caliente. Los datos se obtuvieron en el área de producción de machos de una fundición de latón (por baja presión) [177, Silva Ribeiro, 2002].

Tabla 3.42. Balance de masa de una zona de producción de machos mediante caja caliente en una fundición de latón [177, Silva Ribeiro, 2002]

Entrada	
Arena nueva	371
Energía eléctrica	352,9 kWh
Gas propano	7
Aire comprimido	187,1 kWh
Resina	8,3
Conservantes	0,51
Catalizador	0,76
Recubrimiento	1,7
Salida	
Machos	287,7
Arena no utilizada en el vaciado	84,3
Resina	1,4 l
Recipientes metálicos y de plástico	
Emisiones (tras el filtro de mangas)	
Emisiones de partículas	0,11
COV	0,83

Todos los datos corresponden a una tonelada de pieza comercializada; valores en kg si no se indica lo contrario

3.9.5. Revestimiento de moldes y machos de arena química

Entrada	Salida
- recubrimientos listos para su uso o para diluir con agua o alcohol - calor para la evaporación del disolvente	COV (con base de alcohol)

3.9.6. Moldeo con modelo perdido (espuma perdida/moldes completos)

3.9.6.1. Arena suelta – proceso a la espuma perdida

Entrada	Salida
- EPS granulado - cola EPS - revestimiento refractario - arena	- moldes de arena - residuos de EPS - productos de combustión y pirólisis - polvo

Para producir piezas de aluminio se necesitan alrededor de 15 kg/tonelada de pieza buena de granulado de EPS. El consumo de revestimiento de refractario se sitúa en aproximadamente 20 kg/tonelada de pieza buena.

La Tabla 3.43 muestra el análisis comparativo de dos fundiciones de aluminio; una de ellas utiliza la técnica de la arena verde y la otra a la espuma perdida, con una producción conjunta de 5.490 toneladas de piezas buenas anuales. Nótese que los valores no tienen en cuenta la regeneración interna. En la práctica, ambos tipos de fundiciones llevan a cabo regeneración, lo que reduce la proporción de residuos destinados a ser eliminados.

Tabla 3.43. Comparación de la producción de residuos de dos fundiciones dedicadas a la producción de aluminio (por espuma perdida y en arena verde) [96, Spillner, 1997]

Tipo de residuo	Espuma perdida	Arena verde
Arena de fundición (sin regeneración interna)	1,04	2,95
Polvo filtrado (sin regeneración interna)	0,056	0,22
Polvo filtrado (con regeneración interna)	0,056	0,61
Residuos de EPS	0,0027	–

Todos los valores se expresan en kg/tonelada de piezas buenas

En la Tabla 3.44 se muestran los datos de emisión correspondientes a compuestos orgánicos, obtenidos en una fundición de aluminio por espuma perdida con una producción de 1,5 t/h y de una fundición de aluminio en arena verde con una producción de 1,2 t/h que emplea 1,9 t/h de machos en caja fría. La fundición que utiliza la técnica a la espuma perdida disponía de filtro de mangas y unidad de postcombustión, mientras que la de arena verde contaba con una unidad de de filtros de mangas. Los datos muestran que la primera, al someter a una depuración más profunda a los gases de combustión, emite niveles más altos de BTEX y formaldehído, pero muestra unos niveles de carbono orgánico claramente inferiores. La postcombustión de los gases residuales es necesaria para descomponer los productos de pirólisis del EPS durante la colada.

Tabla 3.44. Datos de emisión de gases evacuados por la chimenea de dos fundiciones de aluminio [96, Spillner, 1997]

Compuesto	Espuma perdida	Arena verde
Benceno	35,33	8,5
Tolueno, xileno, etilbenceno, estireno	354,67	18,58
Compuestos orgánicos desconocidos	96,67	655,0
Carbono orgánico total	857,33	1.283,33
HAP	1,45	1,43
Formaldehído	18,00	2,08
Fenol	18,00	69,83

Todos los valores corresponden a g/tonelada de aluminio fundido.

3.9.6.2. Arena química – moldes completos

Entrada	Salida
• Poliestireno • cola para poliestireno • pintura refractaria • arena • aglomerantes	• moldes de arena • residuos de poliestireno • productos de combustión y pirólisis • polvo

El flujo másico de emisiones correspondiente a los procesos de moldeo de moldes completos y huecos debería considerarse similar, como se desprende de la Figura 3.5, que muestra el flujo de masa del carbono orgánico en función del tiempo en el momento del vaciado. '0:00' corresponde al inicio del vaciado. Los datos recopilados se basan en arenas aglomeradas con furano, tanto para la producción de moldes completos como huecos.

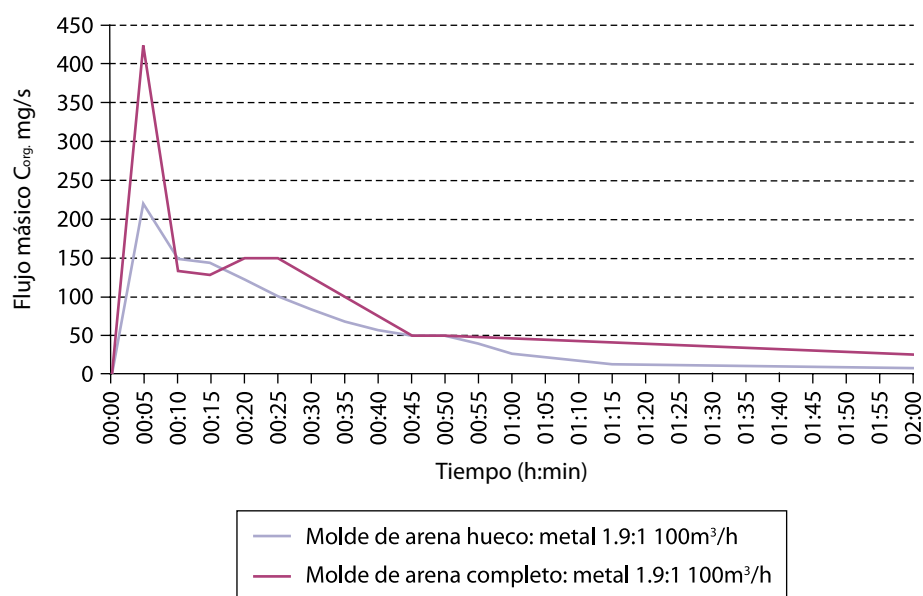


Figura 3.5. Gases residuales durante el llenado de moldes completos y huecos aleación: hierro laminar; molde: arena aglomerada con furano; 1,9 toneladas de arena: 1 tonelada de Fe [215, Müller, 1996]

El proceso de producción de moldes completos muestra unos elevados niveles de emisión durante el llenado y un máximo inicial inmediatamente posterior al llenado del molde que se equilibra en el plazo de una hora. El proceso de moldes huecos tiene unas emisiones iniciales más bajas, si bien tardan más tiempo en equilibrarse (hasta 2 horas). Así pues, la emisión total de carbono orgánico a lo largo de toda la etapa de enfriamiento coincide en los dos procesos. Las mediciones adicionales demostraron que se trata de un comportamiento común al benceno, etilbenceno, fenol y alcohol furfurílico. Las emisiones máximas de estireno y tolueno se producen transcurridos entre 15 y 30 minutos a causa de la condensación inicial de las moléculas en las partes más frías del molde. [215, Müller, 1996]

3.10. Colada

3.10.1. Colada, enfriamiento y desmoldeo de moldes perdidos

3.10.1.1. Niveles de emisión

Entrada	Salida
• moldes acabados • metal fundido	• piezas • arena usada • productos de combustión (de las cucharas de precalentamiento y llenado) • contaminantes orgánicos originados por pirólisis y degradación térmica de la resina, la plomagina de los moldes, etc. (fenol, formaldehído, amina, cianuro de hidrógeno, HAP, benceno, COV) • olores • residuos del sistema de depuración de gases de salida (secos/lodos) • polvo producido por desmoldeo

Al **precalentar** las cucharas se generan gases de combustión como resultado del empleo de gas natural como fuente de energía habitual.

Los siguientes tipos de emisiones se producen durante la **colada**:

- componentes térmicamente degradables como manguitos exotérmicas, humos y/o vapores liberados a causa de las reacciones;
- componentes químicos procedentes de la resina y algunos sistemas de ennegrecimiento que pueden liberarse como resultado de la degradación térmica y/o la volatilización; por ejemplo, gases de combustión, vapor de agua y compuestos orgánicos volátiles. Algunos de los productos de degradación pueden dar lugar a olores.

La experiencia demuestra que las emisiones máximas (asociadas al C total) sólo se producen durante los diez minutos o más posteriores al llenado del molde. El CO es el principal componente; su nivel es indicativo de los otros compuestos que se liberan. [110, Vito, 2001]

Durante el **enfriamiento y el desmoldeo** los procesos de descomposición térmica prosiguen y se generan componentes volátiles que se controlan básicamente por la velocidad de difusión y evaporación.

El desprendimiento (desmoldeo) de los moldes y machos de arena genera considerable cantidad de partículas de polvo, ya que los moldes se trituran, al menos parcialmente.

En la **segunda fase de enfriamiento** sólo se libera vapor de agua; el agua se pulveriza para contribuir al enfriamiento. [32, CAEF, 1997]

Las emisiones generadas durante la colada dependen del tipo de aglomerante empleado y son comparables a las que se producen durante la etapa de mezclado, si bien hay que añadir los productos de pirólisis generados cuando se produce el contacto con el metal caliente. La Tabla 3.45 proporciona los resultados de un análisis cualitativo de las emisiones asociadas a los distintos tipos de aglomerantes.

Tabla 3.45. Impacto medioambiental de los sistemas de aglomeración durante la colada, el desmoldeo y el enfriamiento [160, UK Environment Agency, 2002]

Nombre del sistema y componentes del aglomerante	Emisiones atmosféricas durante la colada	Comentarios
ARENA VERDE Arcilla Polvo de carbón o sustituto Agua	Partículas: hollín del carbón quemado Monóxido y dióxido de carbono Benceno Tolueno Xileno	Olores potenciales (pueden ir asociados al contenido de azufre del carbón)
EN CÁSCARA Fenol – formaldehído Resina (Novalak)	Partículas: hollín procedente de la combustión incompleta de resinas con base de carbono Óxidos de carbono Fenol*, cresoles* y xilenoles* Amoníaco Aldehídos Benceno HAP	Problemas de olores habituales; puede que sea necesario realizar tratamiento, aunque podría bastar con la dispersión
FENÓLICOS ALCALINOS Resol – Resina alcalina de fenol-formaldehído 1. Fraguado con gas 2. Autofraguado	Partículas: hollín procedente de la combustión incompleta de resinas con base de carbono Óxidos de carbono Formaldehído Fenol, cresoles y xilenoles Aromáticos	Posibles problemas de malos olores
URETANO FENÓLICO 1. Fraguado con gas, por ejemplo caja fría 2. Autofraguado (uretano fenólico no estufado)	Partículas: hollín procedente de la combustión incompleta de resinas con base de carbono Óxidos de carbono Óxidos de nitrógeno Monoisocianatos Formaldehído Fenol, cresoles y xilenoles Aromáticos (incluidos los policíclicos) Anilinas Naftalenos Amoníaco	Posibles problemas de malos olores
FURANO Combinación de resinas de: Fenol Urea Alcohol furfurílico Formaldehído	Partículas: hollín procedente de la combustión incompleta de resinas con base de carbono Óxidos de carbono Fenol, cresoles y xilenoles Formaldehído Aromáticos (incluidos los policíclicos) Dióxido de azufre Amoníaco Anilina Ácido isociánico* Isocianato de metilo*	Problemas de malos olores ocasionales
CAJA CALIENTE Combinación de resinas de: Fenol Urea Alcohol furfurílico Formaldehído	Partículas: hollín procedente de la combustión incompleta de resinas con base de carbono Óxidos de carbono Óxidos de nitrógeno Formaldehído Fenol, cresoles y xilenoles Aromáticos (incluidos los policíclicos) Anilina Amoníaco Ácido isociánico* Isocianato de metilo*	

.../...

.../...

Nombre del sistema y componentes del aglomerante	Emisiones atmosféricas durante la colada	Comentarios
ARENA CON ACEITE Aceite de linaza y almidón	Partículas: hollín procedente de la combustión incompleta de resinas con base de carbono Óxidos de carbono Butadieno Cetonas Acroleína	Posibles problemas de malos olores
CON CO₂ Silicato de sodio	Óxidos de carbono	
SILICATO ÉSTER Silicato de sodio	Óxidos de carbono Alcanos Acetona Ácido acético Acroleína	

* Resinas con contenido de nitrógeno (urea)

En la Tabla 3.46 se incluyen los factores de emisión correspondientes a la fundición de hierro en moldes de arena de fraguado en frío tal y como se utilizan en Bélgica.

Tabla 3.46. Factores de emisión del moldeo del hierro en moldes de arena aglomerada con resina de fraguado en frío [110, Vito, 2001]

Compuesto	Media kg/tonelada fundida
CO	1,1
Hidrocarburos alifáticos heterocíclicos	0,22
Hidrocarburos aromáticos	0,05
HCN	0,03
Formaldehído	0,02
Compuestos de azufre (si se utiliza ácido sulfónico de paratolueno)	0,10
Compuestos organofosforados volátiles (si se utiliza ácido sulfónico)	0,11

Los factores de emisión resultantes de la colada, enfriamiento y desmoldeo en un sistema de arena mezclada se han determinado tras realizar mediciones intensivas en dos fundiciones de automoción de México. Las fundiciones estudiadas se dedican a la producción de piezas de hierro en moldes de arena verde y machos de arena química. Los factores de emisión dependen en gran medida del proceso seguido y varían en función de los cambios en la composición de los moldes o machos, de los parámetros del proceso como el tiempo de enfriamiento o de las técnicas empleadas, como por ejemplo el dispositivo utilizado para el desmoldeo. Los resultados obtenidos proporcionan información útil sobre el tipo de emisiones y la importancia relativa de las distintas etapas del proceso. Los factores de emisión de los contaminantes atmosféricos más importantes detectados se muestran en la Figura 3.6. Los datos muestran que las emisiones más altas se producen durante el desmoldeo, mientras que durante el llenado de los moldes sólo son menores. El naftaleno y los naftalenos monometilados contribuyen básicamente a las emisiones de HAP. Los análisis en profundidad realizados en esta categoría no detectaron la presencia de numerosos HAP carcinogénicos como el benzo(a)pireno.

Entre las principales emisiones de metales destacan el manganeso, plomo, níquel, cobre y cromo; las más elevadas son las de plomo y manganeso. [141, CERP, 1999]

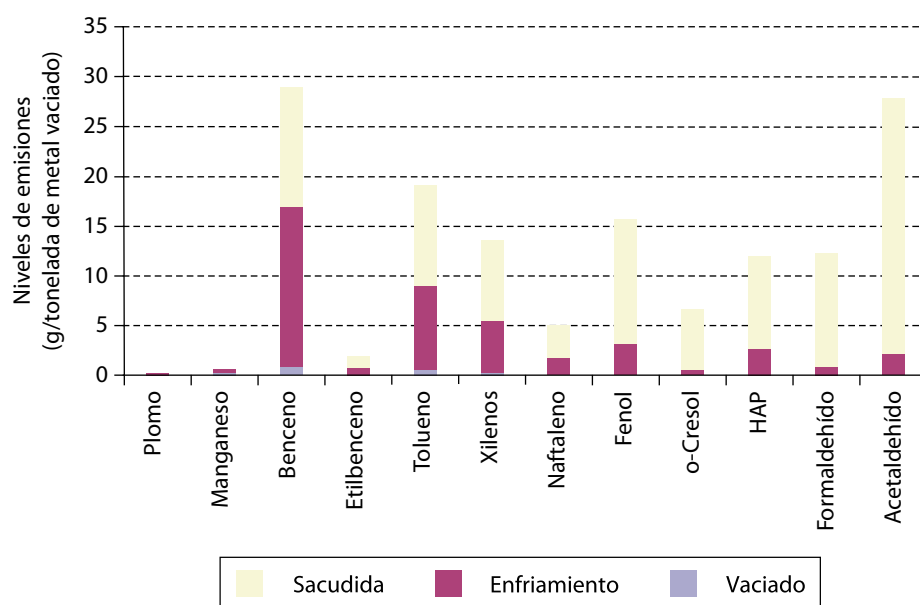


Figura 3.6.
Niveles de emisión de contaminantes durante la colada, enfriamiento y desmoldeo de una fundición dedicada al moldeo del hierro en arena verde [141, CERP, 1999]

La Figura 3.7 muestra los factores de emisión de partículas, basados en las mediciones totales de polvo, PM_{10} (partículas de un tamaño igual o inferior a $10\ \mu m$) y $PM_{2,5}$ (partículas de un tamaño igual o inferior a $2,5\ \mu m$). Nótese que, por definición, dentro de la categoría de PM_{10} se incluye la de $PM_{2,5}$. [141, CERP, 1999]

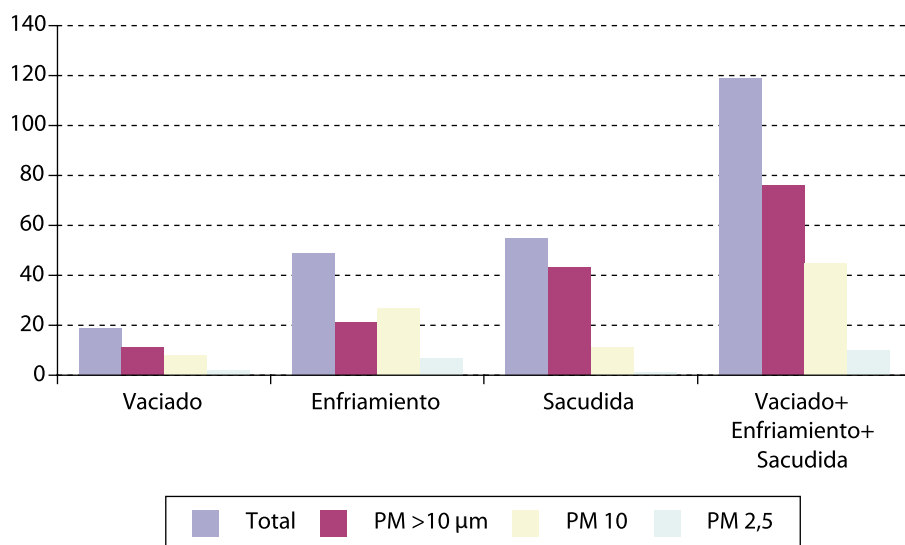


Figura 3.7.
Niveles de emisión de partículas durante la colada, enfriamiento y desmoldeo de una fundición dedicada al moldeo del hierro en arena verde (Total = $PM_{10} + PM_{>10}$) [141, CERP, 1999]

Los datos anteriores se refieren a gases no sometidos a depuración. En la Tabla 3.47 se recogen los datos de emisión correspondientes a los flujos de gases de salida depurados, obtenidos en un estudio sectorial realizado en Italia [180, Assofond, 2002]. Todos los sistemas de depuración de los gases de salida proporcionan unos niveles de emisión de partículas inferiores a $20\ mg/Nm^3$. Los lavadores húmedos son los que muestran mejor rendimiento, si bien debería tenerse en cuenta que los datos recogen sólo tres mediciones.

Tabla 3.47. Valores y factores de emisión correspondientes a la emisión de partículas durante el desmoldeo, una vez depurados los gases residuales [180, Assofond, 2002]

Equipo de depuración de gases de combustión	Concentración (mg/Nm ³)			Factor de emisión (g/tonelada)*		
	Media	Mínima	Máxima	Medio	Mínimo	Máximo
Filtro de mangas	5,8	1,0	16,8	68,5	7,8	206,9
Lavador húmedo	2,3	1,8	2,8	16,3	13,3	18,0
Multiciclón húmedo	18,6	14,6	21,9	202,2	163,6	224,4
Venturi húmedo	11,7	6,2	16,9	116,3	38,2	187,7

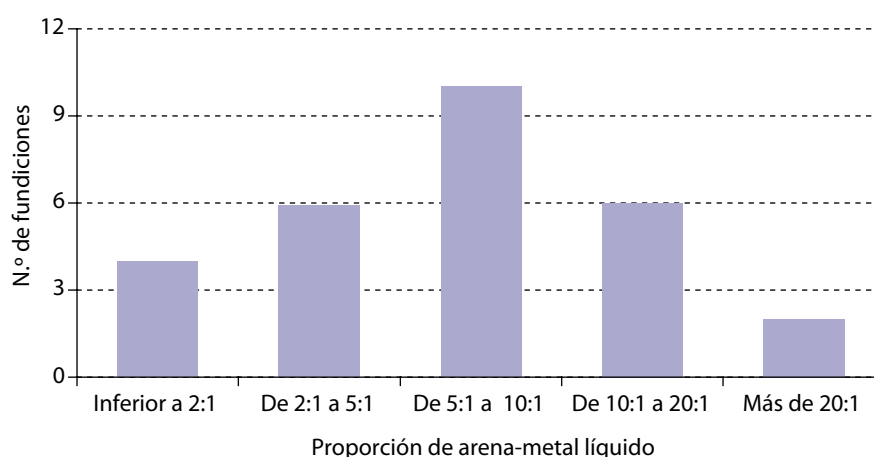
* Factor de emisión expresado en g/tonelada de pieza buena.

3.10.1.2. Proporción de arena y metal líquido

El exceso de arena en los sistemas de moldeo genera costes de capital y operación innecesarios. Si la relación entre arena y metal fundido es menor se reduce el volumen total de arena del sistema y, a su vez, el consumo de materias primas.

La Figura 3.8 muestra la distribución de la relación arena/metal en técnicas de arena verde en el sector de la fundición de hierro. Los datos se recopilaron en un estudio realizado en la industria de las fundiciones del Reino Unido. La proporción media de arena/metal fundido es de 9:1, aunque algunas fundiciones presentan resultados bastante por encima o bien por debajo de esa relación. Las proporciones inferiores normalmente responden a determinados tipos de moldes de metal o a fundiciones dedicadas a producir un único producto, ya que las combinaciones de tamaño de caja/moldeo son más fácilmente optimizables. Las proporciones más elevadas suelen darse, en cambio, en fundiciones que trabajan según modelo o en series pequeñas. En este caso entrarían en juego las múltiples variables de moldeo existentes (y, por tanto, de modelo) o bien la mezcla producto-producto original ha variado significativamente desde que la planta fue diseñada.

Figura 3.8.
Relación entre arena
y metal líquido en
fundiciones de hierro
[73, ETSU, 1995]



La Figura 3.9 muestra la distribución de las distintas proporciones de mezcla de arena/metal líquido en el moldeo en arena verde de fundiciones del sector del cobre, donde la relación media obtenida es de aproximadamente 4:1. La menor proporción responde en este caso básicamente a que en el sector del cobre la mayoría de fundiciones tienen un enfoque orientado al producto y han optimizado el tamaño de las cajas.

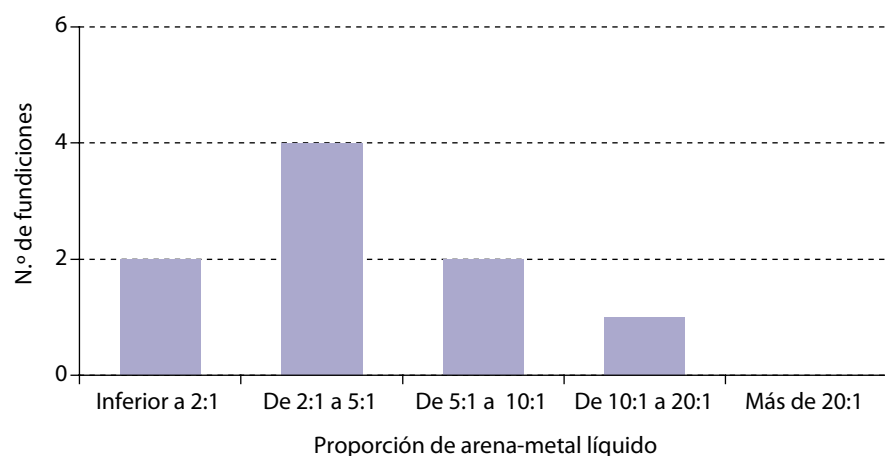


Figura 3.9.
Relación entre arena y metal líquido en fundiciones de cobre [73, ETSU, 1995]

En la Figura 3.10 se muestran las distintas proporciones de arena química/metall líquido correspondientes a varios tipos de metales.

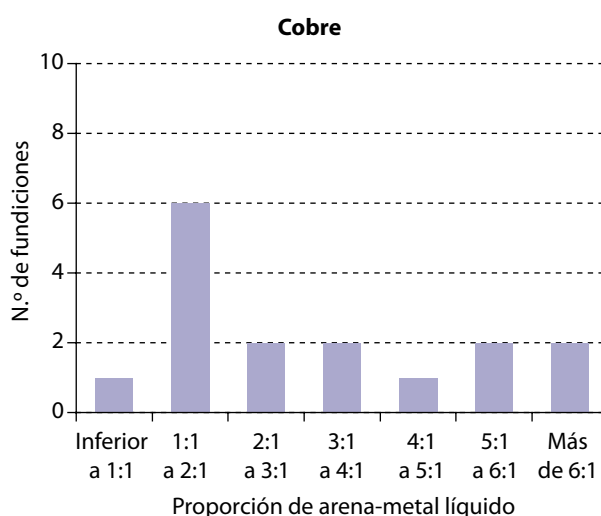
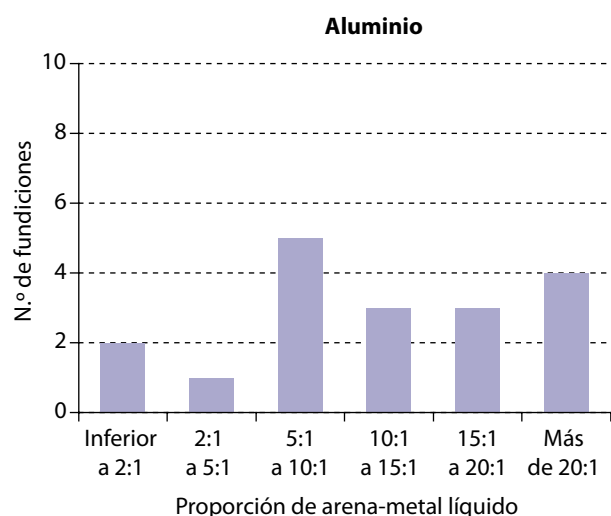
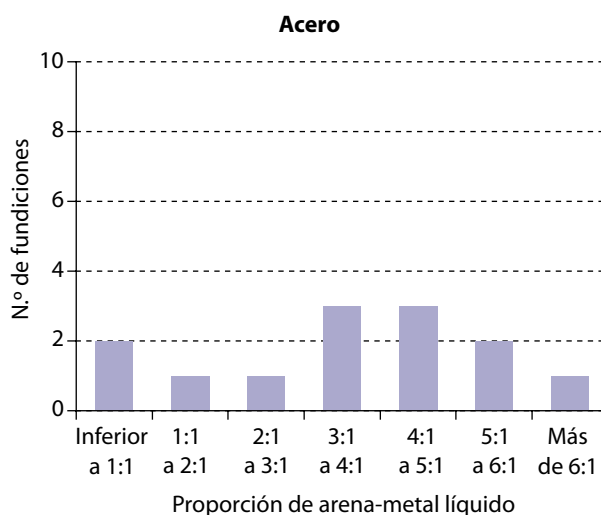
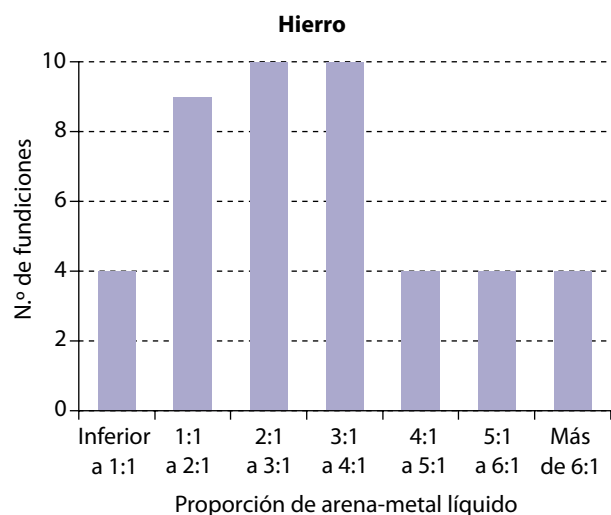


Figura 3.10. *Proporciones totales de mezcla de arena/metall líquido en las fundiciones del Reino Unido [72, ETSU, 1995]*

3.10.1.3. Rendimiento de molde

El rendimiento de molde es la proporción entre la cantidad de metal fundido empleado y el peso de piezas buenas finalmente obtenidas. Puede verse afectada por cinco factores principales:

- requisitos de calidad
- elección del tamaño de la caja de moldeo
- extensión del sistema de alimentación
- contracción del metal
- proporción de escoria.

El rendimiento de molde no influye directamente sobre el empleo de arena. Sin embargo, un aumento del rendimiento puede suponer la producción de menos moldes, lo que implica un menor consumo global de arena. Los descensos en el rendimiento normalmente se asocian a productos de mayor integridad que pueden requerir mayores niveles de calidad y que necesitan un sistema de alimentación más extenso. Un menor rendimiento, por el contrario, puede ser indicativo de proporciones de escoria más elevadas o sistemas de alimentación excesivos. En estos casos las fundiciones deben revisar el control de procesos y los métodos de producción de moldes. El rendimiento de molde medio correspondiente a las aleaciones más importantes se muestra en la Tabla 3.48.

Tabla 3.48. Rendimiento de molde de las principales aleaciones [73, ETSU, 1995], [225, TWG, 2003]

Sector	Rendimiento de molde medio (%)	Rango de rendimiento indicados (%)
Hierro laminar	68	40 – 90
Hierro nodular	63	40 – 90
Aluminio	57	40 – 80
Cobre	58	30 – 90
Acero	45	s.d.

Los datos proceden de un estudio realizado en el sector de la fundición del Reino Unido y de la asociación portuguesa de fundiciones (de acero). Un número significativo de empresas se negó a aportar los datos de rendimiento, especialmente en los sectores del aluminio y el cobre. A pesar de todo pueden obtenerse algunas conclusiones generales al respecto:

- los márgenes de rendimiento aportados en el caso del hierro laminar y nodular se encuentran entre el 40% y más del 90%;
- los rendimientos metálicos proporcionados por las fundiciones de aluminio muestran una distribución bastante uniforme de entre el 40% y el 80%. Sin embargo, más del 50% de fundiciones de aluminio prefirieron no aportar información;
- la mitad de las (escasas) fundiciones que proporcionaron información tienen unos rendimientos de entre el 50% y el 60%, a pesar de que el margen indicado va del 30 a más del 90%.

[73, ETSU, 1995]

3.10.1.4. Arena usada

En Finlandia se ha realizado un estudio sobre la calidad y la composición de las arenas residuales de las fundiciones. Los datos se han obtenido a partir de publicaciones especializadas y experimentos propios. [169, Orkas, 2001].

Son numerosos los análisis químicos realizados en varios estudios sobre la arena de fundición usada de distinta procedencia. Los resultados más significativos se muestran en la Tabla 3.49 y muestran que los contenidos de compuestos metálicos y orgánicos perjudiciales en la arena son normalmente bajos. Por lo general estos compuestos nocivos están más presentes en la arena verde que en arenas químicas. Las arenas inorgánicas suelen estar muy limpias.

Tabla 3.49. Resultados del análisis de arenas de fundición usadas de origen diverso [169, Orkas, 2001]

Compuesto	Arena verde (mg/kg)	Arena orgánica (mg/kg)	Arena inorgánica (mg/kg)
Ba	35 – 118	2,4 – 5,5	s.d.
Cr	1,7 – 13,5	1,2 – 7,2	< 5
Fe	2.950 – 21.000	640 – 16.300	530 – 1.700
Zn	1,5 – 1.450	1,6 – 49	< 10 – 30,0
Cd	0,03 – 6,7	0,01 – 0,03	0,02
Pb	1,6 – 390	0,4 – 2,1	1,3
Cu	4,7 – 5,0	2,7 – 4,4	< 1,5 – 6,0
Ni	< 2,5 – 20,0	0,3 – 8,5	2,5 – 8,3
Mn	76 – 78	22 – 79	25 – 34
As	0,2 – 2,1	0,2 – 1,8	< 0,5 – 0,51
Fenol	1,1 – 29,6	0,1 – 14	0,03
Total de HAP	1,0 – 206,6	0,1 – 8,8	< 1,75

El Castings Development Centre (CDC) analizó los valores de HAP (HAP total, naftaleno y HAP carcinogénicos) así como el contenido de fenol de distintas arenas de fundición usadas. Los resultados se muestran en la Tabla 3.50. Las variaciones en el contenido de HAP y fenol son relativamente bajas en las líneas de producción de arena existentes.

Tabla 3.50. Contenido de HAP y fenol en la arena de fundición usada [169, Orkas, 2001]

Sistema utilizado	Hidrocarburos aromáticos policíclicos (mg/kg)			Fenol	
	Naftaleno	HAP carcinogénicos	HAP totales	Total (mg/kg)	Lixiviable (µg/l)
Arena verde	< 1,0 – 7,4	0,03 – <1,0	<10 – 11	1,4 – 63	26 – 1.600
Fenólico alcalino	1,1 – 4,8	0,026 – 0,096	2,3 – 8,1	1,4 – 210	0,025 – 4.400
Furano	0,87 – <1,0	0,014 – 1,5	1,0 – <10	0,18 – 15	1,2 – 19
Cáscara de resina	0,11 – 7,1	0,01 – 0,67	0,75 – 9,3	3,7 – 3.300	0,025 – 3.200

Las pruebas demostraron que la lixiviación de metales es normalmente baja y que la lixiviación de cromo a causa de la presencia de cromita es desdeñable [169, Orkas, 2001].

3.10.2. Colada en moldes permanentes

Entrada	Salida
- agentes desmoldeantes al agua - agua de refrigeración - metal fundido - machos	- piezas - neblina de aceite provocada por la pulverización de agente desmoldeante - contaminantes orgánicos generados por la degradación térmica del aglomerante de los machos - partículas de polvo con contenido de óxido metálico procedente del horno de mantenimiento - partículas originadas al extraer los machos - aguas residuales

La Tabla 3.51 muestra los datos de balance de masa de tres fundiciones distintas dedicadas al moldeo a presión del aluminio fundido.

Tabla 3.51. Balance másico y composición de efluentes y gases de salida de unidades de moldeo a presión de aluminio [177, Silva Ribeiro, 2002], [202, TWG, 2002]

	Fundición A	Fundición B	Fundición C
Entrada			
Agua	802 l/tonelada	935 l/tonelada	1.709 l/tonelada
Agente desmoldeante	16 l/tonelada	8,26 l/tonelada	1,12 l/tonelada
Electricidad	1.103 kWh/tonelada	1.380 kWh/tonelada	652 kWh/tonelada
Salida			
aguas residuales ¹	18.000 mg/l	122 l/tonelada	126 mg/l
DQO	7,5		7,5
pH	1.300 mg/l		1 mg/l
SS	3.000 mg/l		1 mg/l (total de hidrocarburos)
Aceite y grasa	2.000 mg/l		78 mg/l
DBO5	5 mg/l		0,6 mg/l
Al			
Gases de salida		0,006 kg/tonelada	0,14 – 0,27 kg/tonelada
NOx		0,28 kg/tonelada	0,030 – 0,16 kg/tonelada
COV		1,8 kg/tonelada	
Polvo			

Todos los valores se expresan en toneladas de pieza buena o en mg/l de efluentes

¹ En la fundición C la calidad del agua indicada es posterior al tratamiento en planta de destilado y torres de enfriamiento- evaporación

Actualmente, en el moldeo a presión los agentes desmoldeantes de base acuosa se pulverizan sobre la matriz abierta a una dilución de 1:50–1:200. La pulverización, además de recubrir la matriz, contribuye a enfriarla. Ello explica las diferencias en el empleo del agua que muestra la tabla. Esta técnica supone pérdidas y derrames de agua; además, hasta el 40% de la mezcla de agua y desmoldeante va a parar al sistema de aguas residuales de la fundición.

Los niveles de emisiones y consumo de los procesos realizados con moldes permanentes dependen del tipo de aleación, el área de superficie de la colada, la cantidad de machos de arena insertados en el molde y la relación entre superficie y volumen de la pieza. Los machos de arena son los principales causantes de las emisiones. No existen diferencias significativas entre las distintas técnicas de moldeo. No ha sido posible aportar valores medios a causa de la gran variedad de procesos y aplicaciones existentes. [202, TWG, 2002]

El consumo de electricidad depende de variables propias del proceso, como la fuerza de cierre de la matriz, que se seleccionan siguiendo criterios técnicos.

La Tabla 3.52 incluye los factores de emisión correspondientes al moldeo de bronce, latón y zamac tal y como se lleva a cabo en Bélgica.

Tabla 3.52. Factores de emisión indicativos correspondientes al moldeo de bronce, latón y zamac [110, Vito, 2001]

Aleación	CuO	SnO	PbO	ZnO	Al ₂ O ₃	MnO
Bronce	0,06	0,04	2 – 20	625 – 6.250	n.d.	n.d.
Latón	0,01	n.d.	0,007 – 1	125 – 21.500	n.d.	n.d.
Zamac	n.d.	n.d.	n.d.	0,004	0,2	0,01

Todos los datos se expresan en g/tonelada de metal fundido

3.11. Desmoldeo y acabado

Entrada	Salida
• piezas sin acabar • abrasivos • agua, jabón • electricidad	• piezas acabadas • partículas (<i>arena, partículas metálicas</i>) originadas en operaciones mecánicas • metales volatilizados, productos de combustión de operaciones térmicas • agua residual

3.11.1. Muelas correderas

La Tabla 3.53 muestra las entradas y salidas que se producen en una muela corredera utilizada en el moldeo del aluminio. Los efluentes líquidos se conducen a un sistema de tratamiento de agua y vuelven a entrar en el circuito del equipo amolador. Las piedras abrasivas utilizadas no sufren ninguna alteración salvo un ligero desgaste.

Tabla 3.53. Entradas y salidas de una muela corredera utilizada en el moldeo del aluminio [177, Silva Ribeiro, 2002]

Entrada	
Electricidad	20,7 kWh
Agente de depuración	0,5 l
Agua	490 l
Salida	
Efluente líquido	400 l

Todos los valores se expresan en toneladas de pieza buena

3.11.2. Granallado

Los niveles de emisión de los gases de salida producidos durante el granallado se han recogido en un estudio sobre fundiciones realizado en Italia cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.54. Los valores de emisión de partículas de todas las técnicas utilizadas son inferiores a 15 mg/Nm³. El sistema Venturi húmedo es el menos efectivo; su factor de emisiones se sitúa muy por encima del de las otras técnicas. Sin embargo, también se utiliza como dispositivo de seguridad para evitar la explosión del polvo de aluminio [225, TWG, 2003].

Tabla 3.54. Datos de emisión de gases de salida generados durante el granallado empleando distintas técnicas de eliminación de partículas [180, Assofond, 2002]

	Concentración (mg/Nm ³)			Factor de emisión (g/tonelada)		
	Media	Mínima	Máxima	Medio	Mínimo	Máximo
Filtro de mangas	5,3	0,4	19,3	53,1	0,3	327,3
Lavador húmedo	12,0	4,2	16,4	21,9	7,9	30,1
Multiciclón húmedo	8,2	4,2	14,8	54,9	18,5	135,4
Venturi húmedo	12,8	1,1	22,3	149,0	2,3	523,5

Factor de emisión expresado en g/tonelada de pieza buena y Nm³gas depuración

3.11.3. Rebabado

Los niveles de emisión de los gases de salida producidos durante el desmazarotado se han recogido en un estudio sobre fundiciones realizado en Italia cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.55. Los valores de emisión de partículas con todas las técnicas utilizadas son inferiores a 30 mg/Nm³, si bien los filtros de mangas y el sistema Venturi proporcionan niveles por debajo de 10 mg/Nm³. El multiciclón húmedo es el sistema menos efectivo; su factor se sitúa muy por encima del de las otras técnicas. Los factores de emisión dependen en buena medida de los requisitos de acabado y, por tanto, del tipo de moldeo producido.

Tabla 3.55. Datos de emisión de gases de salida generados durante el rebabado realizado por distintas técnicas de eliminación de partículas [180, Assofond, 2002]

	Concentración (mg/Nm ³)			Factor de emisión (g/tonelada)		
	Media	Mínima	Máxima	Medio	Mínimo	Máximo
Filtro de mangas	3,0	0,4	7,5	17,0	2,3	85,6
Multiciclón húmedo	14,8	7,6	23,3	275,6	96,2	497,2
Venturi húmedo	2,5	1,1	5,9	45,5	35,5	63,4

Factor de emisión expresado en g/tonelada de pieza buena y Nm³ gas depurado

3.11.4. Operaciones de acabado en fundiciones de acero

En las fundiciones de acero se llevan a cabo procesos específicos de corte oxiacetilénico, por electrodos arco-aire y por electrodos convencionales. Los valores medios de emisión se muestran en la Tabla 3.56 y corresponden a las siguientes técnicas:

- *Corte oxiacetilénico* (del sistema mazarota): Tetreno-acetileno-óxido de hierro para realizar cortes inoxidables.
- *Corte por electrodos arco-aire*: Electrodo de carbono recubierto de cobre.
- *Corte por electrodos convencionales*: Mediante electrodos o alambre.

Tabla 3.56. Emisión media de partículas en los procesos de acabado del acero [202, TWG, 2002]

Técnica de acabado	Emisión de partículas (kg/tonelada)
Corte oxiacetilénico	11 – 13
Corte por electrodo arco-aire	9 – 11
Corte por electrodos convencionales	3 – 3,5

Todos los valores se expresan en toneladas de pieza buena

3.12. Tratamiento térmico

Entrada	Salida
• piezas acabadas • energía (eléctrica, gas o fueloil) • temple: agua, aceite, aire	• piezas acabadas (tratadas térmicamente) • productos de combustión del encendido • vapor de agua, humos, neblina de aceite • NO_x, SO₂

Las emisiones de los hornos de tratamiento térmico están formadas básicamente por gases de combustión, en especial si se trata de hornos con quemadores de gas o petróleo. La composición de los gases de combustión depende del tipo de combustible utilizado. Los hornos que queman petróleo generan emisiones de SO₂, unas

emisiones que no se producen al quemar gas. Si se lleva a cabo el temple también se generan emisiones de gaseosas, vapor de agua o neblina de aceite, según el sistema empleado.

Los hornos de tratamiento térmico son conocidas fuentes de emisión continua de componentes no atmosféricos. Los niveles de emisión dependen del consumo de energía, el diseño del quemador y su mantenimiento. Las emisiones capturadas de los hornos de recocido son insignificantes. El modo de capturar las emisiones no difiere en exceso en los distintos hornos, ya que las emisiones se expulsan a través del conducto de los gases residuales. Normalmente no se suele tratar posteriormente el gas residual.

Por lo general el temple es un proceso discontinuo, lo que explica que los niveles de emisión varíen considerablemente. Las emisiones de los baños de temple se consideran insignificantes para el medio ambiente, si bien pueden adquirir mayor importancia en producciones a gran escala. No se ha encontrado información al respecto, ni sobre los porcentajes de emisión y composiciones químicas.

[32, CAEF, 1997]

3.13. Aguas residuales

3.13.1. Fuentes de agua residual

La cantidad de agua de proceso utilizada en las fundiciones es pequeña y depende básicamente de la técnica de eliminación de partículas seleccionada. Las aguas residuales se generan sobre todo en los sistemas de extracción de partículas y tratamiento de gases residuales, empleados en el área de fusión, en la preparación y recuperación del material de moldeo y en el área de limpieza. También se generan aguas residuales durante la producción de machos si se utilizan lavadores húmedos (dependiendo de la técnica de producción de machos y de las sustancias aglomerantes). En una minoría de plantas (se tienen datos de 2 en toda Europa) se utiliza agua para la regeneración de la arena húmeda. También se suele emplear agua en los cubilotes para enfriar las zona de fusiones y en los baños de enfriamiento de piezas moldeadas (a presión).

Las posibles fuentes de agua residual son las siguientes:

- almacenamiento de chatarra y sistemas de drenaje de las instalaciones;
- preparación de la arena;
- lavadores húmedos utilizados en varios procesos de eliminación de partículas;
- enfriamiento de máquinas y herramientas de moldeo a presión;
- sistemas de acabado vibratorios (muela corredera);
- baños de enfriamiento utilizados en el tratamiento térmico.

La cantidad media de agua residual (depende del sistema de producción utilizado) es de **0,5 m³/t de pieza buena**. [160, UK Environment Agency, 2002], [195, UBA, 2003]

3.13.2. Aguas residuales y almacenamiento de chatarra

La chatarra puede llevar tierra adherida, y además la de origen externo suele tener impurezas que varían según el proceso del que proceden. Las impurezas adheridas pueden lavarse con el agua de la lluvia y penetrar en el suelo hasta alcanzar las aguas subterráneas. En la Tabla 3.57 se muestran las posibles impurezas:

Tabla 3.57. Posibles impurezas en función del tipo de chatarra [195, UBA, 2003]

Tipo de chatarra	Impurezas adheridas
Virutas	Aceites de corte, emulsiones (pueden contener cloro)
Chatarra de punzonado	Aceites de punzonado (pueden contener cloro)
Piezas mecanizadas rotas o que no cumplen las exigencias	Aceites hidráulicos y de engranajes
Chatarra de conformado y forja	Fosfatos, jabones de zinc, grafitos, aceite de conformado

Si las impurezas adheridas contienen sustancias peligrosas para el agua (aceites, emulsiones) deberán cumplirse las exigencias de almacenamiento correspondientes.

3.13.3. Aguas residuales procedentes de lavadores húmedos empleados en la fusión en cubilotes

Los lavadores húmedos se utilizan en la zona de fusión para depurar los gases residuales de los cubilotes. Emplean agua para extraer las partículas de polvo (carga media: 10–15 g/Nm³) y gases como dióxido de azufre emitidos por los cubilotes. En el tanque de sedimentación se eliminan gran parte de las partículas sólidas, que se extraen casi por completo del agua de lavado.

Los gases, parcialmente ácidos presentes en los gases de combustión de los cubilotes, como el dióxido de azufre, se acumulan en el agua de lavado haciendo que aumente su concentración de sales (por ejemplo por la formación de sulfato sódico) y descienda el pH. La acumulación de sales se suma a las pérdidas por evaporación, de modo que es necesario extraer el agua cada cierto tiempo.

El agua residual procedente de los sistemas de depuración húmedo de la zona de fusión contiene principalmente:

- sólidos, por ejemplo óxidos de silicio, hierro y aluminio, carbonatos cálcicos y cianuros;
- metales pesados, con la excepción del zinc, aunque presentes en concentraciones muy bajas;
- contaminantes orgánicos que podrían llegar a las aguas residuales a través de la chatarra en contacto con el suelo.

El nivel de AOX (haluros orgánicos absorbibles) de las aguas empleadas para la depuración de gases de combustión de los cubilotes puede llegar a ser de varios miligramos. Ello podría deberse a los recubrimientos de la chatarra y los compuestos orgánicos clorados que entran en el agua durante el proceso de depuración del gas. Los compuestos orgánicos clorados también pueden llegar al agua a través de sustancias auxiliares como el ácido clorhídrico comercial o cloruros de hierro y aluminio utilizados como floculantes.

La Tabla 3.58 muestra una visión general de las concentraciones de contaminantes presentes en el filtro de efluentes utilizado para extraer el agua de los lodos procedentes de los lavadores húmedos de los cubilotes.

Tabla 3.58. Concentraciones de contaminantes presentes en el filtro de efluentes utilizado para extraer el agua de los lodos procedentes de los lavadores húmedos de los cubilotes [195, UBA, 2003]

Elemento analizado	Unidades	Valor
pH		7,2 – 9,9
Conductividad eléctrica	μS/cm	1.400 – 18.400
Plomo	mg/l	< 0,01 – 2,5
Cadmio	mg/l	< 0,01 – 0,03
Cromo	mg/l	< 0,01 – 0,13
Cobre	mg/l	0,02 – 0,89
Níquel	mg/l	0,04 – 0,23
Mercurio	mg/l	< 0,001
Zinc	mg/l	1,8 – 27,9
Sulfato	mg/l	430 – 1.550
Cloruro	mg/l	1.330 – 3.947
DQO	mg/l	154 – 7.580

3.13.4. Aguas residuales generadas en la zona de moldeo, enfriamiento y desmoldeo y en la producción de moldes/preparación de la arena

Durante la eliminación de partículas en la zona de moldeo, enfriamiento y desmoldeo y en la producción de moldes/preparación de la arena, se capturan finos insolubles del material de moldeo, además de pequeñas proporciones de sustancias orgánicas procedentes del agente de aglomeración. Si se emplea depuración húmeda, los componentes anteriores pasarn a formar parte del flujo de aguas residuales. Los sólidos inorgánicos suelen ser óxidos de hierro y arcillas en partículas muy finas y dispersas y, por tanto, difíciles de extraer.

3.13.5. Agua residual en la producción de machos

En las zonas de producción de machos se utilizan lavadores químicos que pueden ser ácidos (cajas frías) o básicos (SO_2 y Croning). La cantidad de aguas residuales producidas depende de la acumulación de contaminantes y sales en el agua de circulación. Si los niveles de contaminación son muy elevados deberá extraerse parte del agua contaminada.

Las soluciones utilizadas para la depuración en sistemas de producción de machos en caja fría y caja caliente son aminas y fenoles fácilmente biodegradables.

El tratamiento de disoluciones de lavado que contienen aminas necesita una fase de nitrificación/desnitrificación, que puede realizarse en una planta externa de tratamiento biológico de aguas residuales. Una alternativa al vertido consiste en recuperar las aminas.

Tras la oxidación, las soluciones de depuración utilizadas en el proceso SO_2 contienen principalmente sulfato sódico. Dado que las concentraciones elevadas de sulfato ($> 600 \text{ mg/l}$) pueden llegar a dañar los sistemas de desagüe, la autoridad competente en la materia establece un límite en función de las condiciones locales (por ejemplo, la existencia de tuberías resistentes a los sulfatos y la dilución en otras aguas residuales). [195, UBA, 2003]

Capítulo 4.

Técnicas a tener en cuenta para determinar las MTD

En esta sección se proponen técnicas de protección medioambiental y medidas de ahorro energético para cada fase de los procesos. Las técnicas se estructuran en temas generales, lo que posibilita un enfoque temático a la hora de valorar los distintos procesos y fases de fundición.

Todas las técnicas buscan optimizar el proceso o bien reducir su impacto medioambiental mediante, por ejemplo:

- la cuidadosa selección y la optimización de cada operación unitaria (almacenamiento, fusión y tratamiento del metal, producción de moldes y machos, moldeo, etc.);
- la reducción de las emisiones atmosféricas y contaminación de agua;
- el aumento del uso eficiente de la energía;
- la minimización y reutilización de residuos.

La información se ha organizado en base a este enfoque temático en los siguientes apartados:

- 4.1. Almacenamiento y manipulación de materias primas.
- 4.2. Fusión y tratamiento del metal fundido.
- 4.3. Producción de moldes y machos, preparación de la arena incluida.
- 4.4. Colada.
- 4.5. Captura y tratamiento de humos y gases de combustión y salida.
- 4.6. Prevención y tratamiento de aguas residuales.
- 4.7. Eficiencia energética.
- 4.8. Arena: regeneración, reciclaje, reutilización y eliminación.
- 4.9. Polvo y residuos sólidos: tratamiento y reutilización.
- 4.10. Reducción del ruido.
- 4.11. Desmantelamiento.
- 4.12. Herramientas de gestión medioambiental.

Para ayudar a analizar las mejores técnicas disponibles, todas las técnicas posibles que deben tenerse en cuenta en el proceso de toma de decisión se estructuran siguiendo unos criterios comunes, cuyos epígrafes se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Estructuración de la información relativa a las técnicas tratadas en el capítulo 4

Epígrafe	Información proporcionada
Descripción	Descripción técnica de la MTD
Ventajas medioambientales	Impactos medioambientales que se intentan atajar mediante la técnica
Datos operativos	Datos sobre los niveles de consumo y emisión obtenidos de plantas en funcionamiento que utilizan la técnica en cuestión. Información adicional sobre el funcionamiento, mantenimiento y control de la técnica
Efectos colaterales	Posibles consecuencias negativas o desventajas para otros procesos originadas por la implantación de la MTD o impactos medioambientales de la misma respecto a otros procesos

.../...

.../...

Epígrafe	Información proporcionada
Aplicabilidad	Proporciona información sobre las plantas en las que puede implantarse la técnica en cuestión teniendo en cuenta su antigüedad (nueva o ya existente), tamaño (pequeña o grande), técnicas en uso (p.ej. tipo de horno, técnica de moldeo) y tipo de producto (férreo o no férreo)
Datos económicos	Información sobre costes (tanto de inversión como operativos) y posibles ahorros; también se detalla cómo se han calculado los costes
Ventajas de la implantación	Condiciones locales o requisitos que aconsejan o favorecen la implantación de las MTD. Motivos, excepto los medioambientales, que justifican la implantación (p.ej. aumento de la productividad, seguridad)
Ejemplos	Plantas en las que se ha implantado la MTD y datos obtenidos al respecto
Publicaciones de referencia	Literatura especializada utilizada de referencia donde puede encontrarse información más detallada

Este capítulo proporciona información sobre cada una de las técnicas. En el capítulo 5 se hace balance de todas ellas y se analiza cómo elegir las, aunque en base a la información aportada en el capítulo 4.

4.1. Almacenamiento y manipulación de materias primas

4.1.1. Introducción

El almacenamiento y la manipulación de materias sólidas, gases y líquidos se tratan en profundidad en el BREF sobre almacenamiento [205, European IPPC Bureau, 2003]. En este documento se analizan las técnicas disponibles para, por ejemplo, pilas de almacenamiento, silos, tanques o materiales envasados (p. ej. sustancias peligrosas o inflamables), que son aplicables a las materias primas de las fundiciones como la arena, chatarra, coque, combustibles (gas, fueloil), sustancias químicas, aditivos y residuos como la arena usada, el polvo de los filtros o la escoria. En este apartado sólo se tratan aspectos específicos de las fundiciones no analizados en el documento BREF sobre almacenamiento.

4.1.2. Almacenamiento cubierto y parques de chatarra impermeables

Descripción

La zona de almacenamiento de chatarra se puede estructurar y gestionar de manera que se tengan en cuenta los siguientes factores:

- la composición de la carga del horno, para la que se necesita conocer el material de alimentación. Si se almacenan por separado los distintos tipos de metal o las distintas calidades se puede controlar la composición de la carga. Para ello pueden crearse compartimentos o utilizarse cajas en la zona o el depósito de almacenamiento;
- la entrada de materiales minerales u oxidados como el óxido, la tierra o el polvo pueden aumentar el desgaste del refractario. La utilización de parques de chatarra de cemento evita que se contaminen de tierra, polvo o agua;
- cubrir la zona de almacenamiento con un techo puede ayudar a protegerla del agua de la lluvia y contener las emisiones de partículas;
- los sistemas de tratamiento y recogida de agua pueden servir para controlar la contaminación del suelo o del agua.

Ventajas medioambientales

Disponer un techo y refuerzaz el parque de chatarra permiten recoger el agua sobrante y evitar así que las emisiones al suelo y al agua queden fuera de control. Las emisiones directas al suelo también se minimizan al evitarse que el material y el suelo se mezclen.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

El uso de zonas de almacenamiento de chatarra impermeables puede extenderse a todas las fundiciones nuevas o ya existentes. La chatarra se almacena bajo techo o bien protegida por algún sistema de recogida y tratamiento del agua para evitar la contaminación del suelo y del agua.

Ventajas de la implantación

Controlar la composición de la carga contribuye a mejorar el control del funcionamiento del horno y, en consecuencia, la composición del metal. También ayuda a minimizar el desgaste del refractario.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en la mayoría de fundiciones.

Publicaciones de referencia

[202, TWG, 2002]

4.1.3. Almacenamiento de sustancias químicas aglomerantes

Descripción

Las sustancias químicas aglomerantes cuentan con recomendaciones de almacenamiento propias que proporciona el fabricante. De no observarse se generarán productos inutilizables o que no cumplen las exigencias necesarias que deberán eliminarse como residuos especiales o bien afectarán negativamente a la calidad de las piezas a causa del empleo de moldes o machos no conformes. En la Tabla 4.2 se resumen los problemas de calidad ocasionados por el almacenamiento incorrecto de aglomerantes líquidos que deben tenerse en cuenta en el correcto almacenamiento.

Tabla 4.2. Problemas debidos al incorrecto almacenamiento de los aglomerantes químicos líquidos [71, ETSU, 1998]

Problema	Consecuencias sobre el producto	Implicaciones	Consecuencias sobre el moldeo
Exposición a exceso de frío	Los productos de base acuosa podrían congelarse	Pueden producirse segregación del producto y fallos en el moldeo. Los productos afectados deberán eliminarse adecuadamente	Puede resultar imposible moldear
Exposición a exceso de calor y luz solar directa	Envejecimiento prematuro, entrecruzamiento de la resina y aumento de la viscosidad	Dificultades a la hora de mezclar y escasa resistencia de los moldes y a las altas temperaturas	Defectos de afinado

.../...

.../...

Problema	Consecuencias sobre el producto	Implicaciones	Consecuencias sobre el moldeo
Almacenamiento prolongado o en frío	Aumento de la viscosidad	Dificultades de dispersión en la arena. La mezcla de arena se trabaja y compacta peor. Moldes de baja resistencia	Erosión, inclusiones exógenas (arenosas), errores dimensionales y de afino
Contaminación por humedad	Los productos que contienen isocianatos se deterioran al reaccionar con el agua	Mal rendimiento del aglomerante, que podría tener que desecharse	Aumenta el riesgo de defectos provocados por el gas (picaduras)
Eliminación de sedimentos en tanques de almacenamiento de silicato de gran capacidad	El líquido bombeado podría ser inestable	Moldes de baja resistencia	Piezas sobredimensionadas y defectos de contracción

Algunas medidas básicas que pueden adoptarse:

- disponer un techo y ventilar la zona de almacenamiento;
- recoger los líquidos derramados;
- cerrar el área de almacenamiento.

Dependiendo del clima deberá hacerse frente al exceso de frío, de calor o de luz solar directa. Deben adoptarse medidas adicionales para el almacenamiento de líquidos muy inflamables como el formiato de metilo, trietilamina (TEA), dimetiletilamina (DMEA) o recubrimientos de moldes con contenido de alcohol isopropílico.

Ventajas medioambientales

Reducción de la cantidad de sustancias químicas desechables que no pueden reaprovecharse.

La mayoría de aglomerantes químicos son peligrosos y se caracterizan por una o más de las propiedades siguientes: ser peligrosos, corrosivos o inflamables, lo que representa que hasta los derrames más pequeños pueden poner en peligro la salud y la seguridad de los trabajadores. Los grandes derrames representan un grave problema medioambiental; si se permite que lleguen hasta las aguas superficiales podría producirse una contaminación grave de los cursos de agua.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todas las instalaciones, nuevas o ya existentes.

Ventajas de la implantación

Medidas de seguridad y optimización de operaciones.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en la mayoría de fundiciones.

Publicaciones de referencia

[75, ETSU, 1996]

4.1.4. Empleo de chatarra limpia para la fusión y eliminación de arena de los retornos**Descripción**

Fundir chatarra limpia impide la absorción de compuestos no metálicos por parte de la escoria y/o evita que ataquen el refractario del horno. Los compuestos más habituales son la cal viva, óxidos de hierro, óxidos de manganeso y óxidos básicos (como el MgO procedente de los retornos de hierro nodular) en combinación con refractario de sílice (ácido). Limitar la contaminación supone reducir la cantidad de escoria formada y prolongar la vida útil del horno y del revestimiento de las cucharas. En cuanto a la producción de hierro nodular en hornos revestidos de refractario ácido, la arena de sílice adherida podría tener un efecto beneficioso, ya que neutraliza el MgO procedente de los retornos.

La presencia de contaminantes y óxidos en la carga provoca que se consuma parte de la energía de fusión. Por otro lado, la extracción de escoria requiere temperaturas de baño superiores para mantenerla líquida.

La chatarra reciclada internamente se compone de sistemas de alimentación de moldeos y de rechazos. Los sistemas de alimentación se desprenden a golpes después del desmoldeo. Normalmente no tienen restos de arena a causa de su geometría. Las piezas rechazadas se descartan en el control de calidad, que se realiza una vez se han limpiado las piezas mediante granallado o chorro de arena para extraerles la arena adherida. Así pues, si se utiliza material sin arena procedente de desperdicios no suelen ser necesarios tratamientos posteriores.

Ventajas medioambientales

Esta técnica reduce la cantidad de escoria y polvo que deben eliminarse y limita las emisiones de COV. El consumo energético se reduce (en un 10 o un 15%) a causa de la menor presencia de escoria. También el flujo de aire del sistema de extracción puede reducirse.

El granallado de la chatarra se recomienda en caso de que la contaminación pudiera provocar niveles excesivos de escoria. El empleo de chatarra limpiada únicamente mediante granallado requeriría incluso el uso de aditivos de formación de escoria para que ésta aflorase.

Efectos colaterales

Si las fundiciones aceptan únicamente chatarra limpia se reduce la proporción global de reciclaje de chatarra sucia, lo que requerirá la implantación de sistemas de depuración adicionales y aumentará los desechos de escoria.

El empleo de técnicas de depuración de arena en los desperdicios de colada consume energía, si bien se compensa con el aumento de energía que tiene lugar durante la fusión.

Datos operativos

Según datos obtenidos de una fundición operativa, para limpiar entre 30 y 40 kg de arena de una tonelada de piezas se consumen de 12 a 15 kWh. El nivel de consumo depende del tamaño y el tipo de pieza.

En una fundición con hornos HEA se ha registrado un aumento del 2 al 3% de la recuperación de metal fundido (metal vaciado/de carga).

La carga de metal típica de los hornos HEA es de un 55% de chatarra de acero de fundición, 40% de desperdicios de colada internos y 5% de aditivos de corrección del metal.

Aplicabilidad

La extracción de arena de la chatarra interna es válida para cualquier fundición, sea nueva o ya existente. El empleo de chatarra limpia en la colada puede aplicarse a cualquier tipo de fundición, aunque la calidad debería depender de las técnicas utilizadas para fundir y limpiar los gases. Si todo el sector decidiera utilizar chatarra limpia se generaría un problema de reciclaje de chatarra sucia.

El uso de chatarra férrea limpia (tanto acero como hierro) provoca el aumento de los costes de adquisición y requiere invertir en equipos de depuración nuevos. La oxidación superficial de la chatarra o el uso de lingotes de hierro durante la fusión en cubilotes no presenta problemas (proceso de reducción). Los hornos eléctricos sólo tendrán dificultades si utilizan chatarra contaminada de acero que no cumple con las exigencias necesarias para la fundición.

Los cubilotes pueden fundir sin problemas chatarra sucia; si los gases se tratan adecuadamente apenas habrá sobreconsumo de coque ni impacto medioambiental.

La limitación de la escoria es muy importante para el buen funcionamiento de los hornos de inducción sin núcleo. Estos hornos son los que se ven más afectados por el grado de limpieza de la chatarra.

El uso de chatarra sucia no afecta negativamente al funcionamiento de los hornos rotativos, pero es el principal factor determinante de las emisiones de polvo. Si los gases se tratan adecuadamente el impacto medioambiental es escaso.

Datos económicos

El precio de la chatarra limpia (por ejemplo de clase 1) es un 20 o un 30% superior al de la chatarra contaminada (p. ej. de clase 2). Por otro lado, si se implanta esta técnica los costes de eliminación de la escoria y el polvo se reducen.

Ventajas de la implantación

Reducir los elevados costes del refractario y de las tasas de eliminación de residuos.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones.

Publicaciones de referencia

[103, Vereniging van Nederlandse Gemeenten, 1998], [110, Vito, 2001], [202, TWG, 2002]

4.1.5. Reciclaje interno de chatarra de metal férreo

Descripción

La chatarra interna se obtiene al golpear los sistemas de alimentación para desprenderlos y en las operaciones de control de calidad y acabado. La cantidad relativa de chatarra interna producida puede calcularse a partir del rendimiento de molde, tal y como se describe en el apartado 3.10.1.3. Para minimizar la producción de residuos la chatarra interna vuelve al alimentador de chatarra del horno.

En las fundiciones de acero no es habitual que el porcentaje de material reaprovechado llegue al 100%. Los titulares consideran que el porcentaje máximo de material de carga procedente de retornos internos (mazarotas, chatarra de piezas, etc.) es del 60%. Las virutas pueden provocar la oxidación excesiva del metal fundido.

El reciclaje de chatarra interna también puede verse limitado en las coladas de hierro nodular, ya que se añade una elevada cantidad de silicio (alrededor del 1% en la mayoría de casos) al hierro líquido durante el tratamiento del metal. En algunos casos no es posible refundir la totalidad de la chatarra interna porque el porcentaje final de silicio sería demasiado alto (normalmente de entre el 2,5 y el 3% del moldeo).

Por lo que respecta al hierro nodular o gris, el plomo y el bismuto son muy contraproducentes para las propiedades del metal tras la solidificación. En caso de contaminación los desperdicios de colada (chatarra interna) no deben reciclarse.

Ventajas medioambientales

Minimización de residuos gracias al reciclaje de materias primas.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todas las instalaciones, nuevas o ya existentes.

Datos económicos

Esta técnica no implica costes adicionales.

Ventajas de la implantación

Minimización de residuos, uso óptimo del metal.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en todas las fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[202, TWG, 2002]

4.1.6. Reciclaje interno de chatarra de magnesio

Descripción

Reciclaje in situ:

Las mazarotas limpias pueden introducirse directamente en los hornos de fusión. La presencia de óxidos y otras inclusiones limita el potencial de reciclaje; además, se requiere equipo especial para el preciso control analítico y metalográfico.

«Reciclaje en las instalaciones»:

En este caso la chatarra se trata y recicla en una planta de reciclaje independiente situada dentro de la misma fundición. Las técnicas utilizadas son dos:

- *Refusión sin fundente*: la chatarra de Mg se refunde bajo una cubierta de gas en los hornos de tipo solera, aunque sólo la de clase 1. Las ventajas son la escasa inversión adicional necesaria y el bajo consumo de energía.
- *Refusión con cobertura de sal (fundente)*: esta técnica de refusión de Mg es aplicable al procesado de todas las clases de chatarra excepto los fundentes usados y lodos (sin tratar). Si se utiliza únicamente chatarra de clase 1 y 2 podrán producirse aleaciones de magnesio de alta pureza.

Ambas técnicas son válidas para producir lingotes de Mg o metal fundido para cargas líquidas. Tanto en la refusión sin fundente como con cobertura de sal (fundente) se generan escoria (flota) y lodos (van al fondo de la colada), así como residuos con un contenido residual de metal (70–80% de Mg en el caso de los lodos y 60–90% de Mg en el de la escoria). Existen tres alternativas para recuperar el contenido metálico:

- refusión en cubierta de sal (en el mismo horno o en uno distinto);
- refusión por parte de la industria del aluminio;
- utilización en la desulfuración del hierro o acero.

Si la chatarra se vuelve a fundir en un horno sin fundente, la refusión con cobertura de sal (fundente) de la escoria y los lodos deberá llevarse a cabo en un horno distinto.

La refusión de chatarras de clases distintas se realiza con cobertura de sal (fundente) y requiere pretratamiento. En la Tabla 4.3 se muestran las entradas y salidas características de una instalación de pretratamiento.

Tabla 4.3. Entradas y salidas de una planta de pretratamiento de chatarra de magnesio [202, TWG, 2002]

Entradas	Equipo	Salidas	Tecnología al final de la cadena
virutas de Mg húmedas u oleosas (>2% aceite/agua) electricidad	Centrifugador	virutas de Mg (<2% aceite/agua) emulsión de aceite/agua	
virutas de centrifugado y de todo tipo electricidad	Prensa (T = 400 °C)	virutas de prensado aire de salida	separador de partículas (aceite vaporizado)
mazarotas, moldeos descartados escoria (sin sal, procedente del proceso de fundición) electricidad	Triturador (en caso necesario)	material triturado polvo	

La recuperación de metal del residuo de sal del refundido se realiza a través de la molienda en seco y el cribado con separación magnética o bien mediante un sistema de depuración húmeda. Este sistema produce una fracción de magnesio y lodos que tras la deshidratación pueden emplearse en la industria de los fertilizantes.

Ventajas medioambientales

La principal ventaja es la optimización del reciclaje del magnesio. El reciclaje interno tiene otra ventaja añadida: evitar el transporte a plantas de reciclaje externas. La eficiencia metálica del reciclaje se incrementa mediante fusiones especialmente adaptadas.

Efectos colaterales

La refusión sin fundente conlleva el uso de gases protectores con contenido de azufre que contribuyen al calentamiento global (SF₆) o son venenosos (SO₂). Véase el apartado 4.2.7.1 para un análisis en profundidad.

Datos operativos

La Figura 4.1 y la Figura 4.2 muestran los diagramas de flujo másico experimentales correspondientes a la fusión de chatarra de clase 1. Incluyen la refusión interna de lodos y escoria.

Figura 4.1.
Diagrama de flujo másico de la refusión sin fundente de chatarra de magnesio de clase 1 [206, Ditzze y Scharf, 2000]

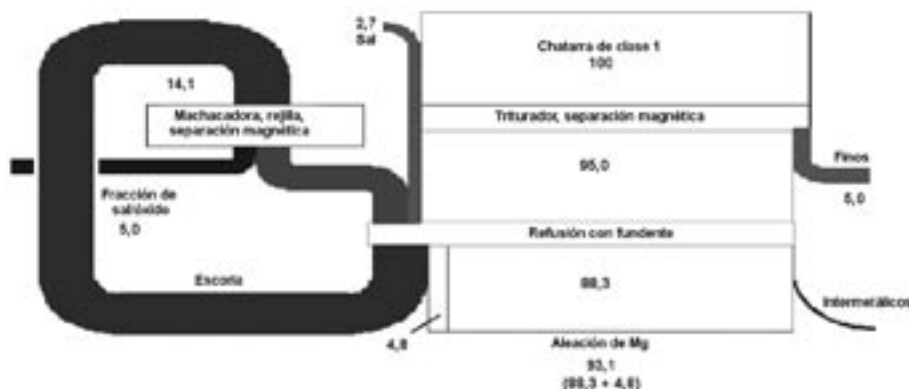
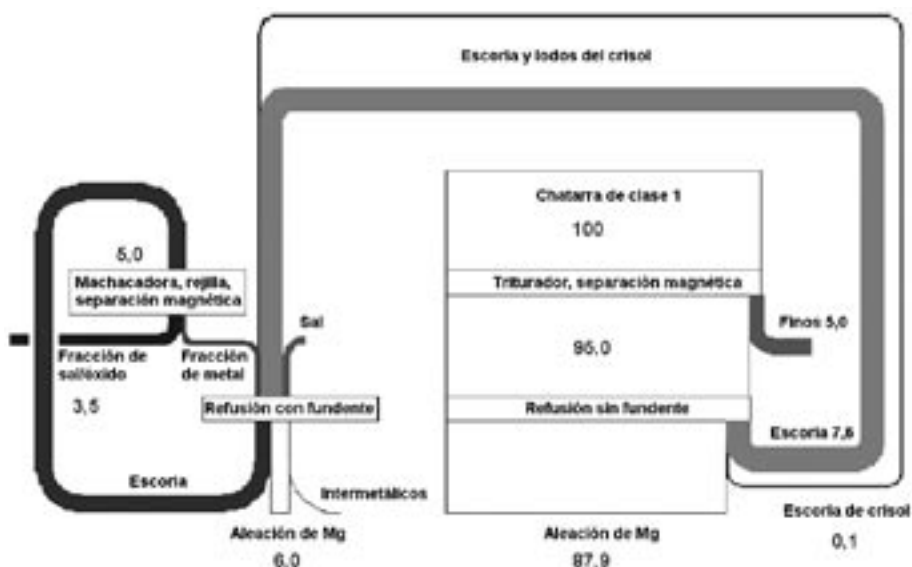


Figura 4.2.
Diagrama de flujo másico de la refusión con cobertura de sal (fundente) de chatarra de magnesio de clase 1 [206, Ditzze y Scharf, 2000]

Los datos operativos obtenidos de una planta de refusión con cobertura de sal (fundente) de escoria mezclada tratada, con una capacidad de 2.000 toneladas al año y dotada de tres hornos de 600 kg cada uno, muestran unos niveles de consumo de sal de 3,4 kg/tonelada de chatarra y de gas natural de 26,5 Nm³/tonelada de chatarra.

El tratamiento húmedo de la fracción de sal produce una fracción de magnesio (43%) y lodos (57%), que se deshidratan con una prensa de filtro de membrana de modo que el agua vuelve a entrar en el circuito del proceso.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para las instalaciones de las fundiciones de magnesio nuevas y ya existentes.

Datos económicos

Los costes del reciclaje externo se estiman en aproximadamente 1.200 EUR/tonelada, dependiendo del sistema de transporte utilizado, la distancia y el mercado local. Los costes del reciclaje interno ascienden a 500 EUR/tonelada, lo que representa un ahorro de 700 euros por tonelada. Si se toma como ejemplo una única planta

con una producción de material reciclado de 1.500 toneladas/año, el ahorro potencial ascendería a más de un millón de euros.

Los datos aportados son globales y deberían adaptarse a los distintos tipos de empresas. En función de los productos y procesos empleados deberán considerarse los costes de separación de residuos. La recogida de residuos se efectúa de forma independiente para cada tipo de aleación y procedimiento.

Hay que tener en cuenta la gran influencia de los siguientes factores:

- amortización (aproximadamente el 10% en un período de amortización de 5 años);
- costes de personal (35 – 40%);
- coste del material nuevo (aproximadamente un 30%) para compensar las pérdidas de material (alrededor del 7%);
- costes energéticos, de mantenimiento, recambios, sal, eliminación (20 – 25%).

La amortización de unas instalaciones dotadas de dos hornos de fusión (con fundente) se prolonga entre 8 y 11 meses. La amortización de una planta continua con capacidad para 500 kg/hora de magnesio posiblemente requiera unos meses más.

Ventajas de la implantación

Optimización del uso del magnesio y reducción de la proporción de magnesio destinada a ser eliminada.

Ejemplos

TCG Unitech, Kirchdorf/Krems (Austria): dispone de instalaciones de reciclaje interno.

No se tiene conocimiento de la existencia de plantas de refusión sin fundente en Europa, a pesar de que la tecnología necesaria se encuentra en el mercado.

Publicaciones de referencia

[202, TWG, 2002], [206, Ditze y Scharf, 2000], [223, Rauch, et al., 2003]

4.1.7. Reciclaje de contenedores usados

Descripción

Los proveedores de sustancias químicas o aditivos en ocasiones retiran los contenedores vacíos (de plástico, madera, metal) para su reciclaje. Debería sopesarse la posibilidad de utilizar los contenedores más grandes disponibles.

Ventajas medioambientales

Evita la acumulación de residuos e impulsa el reciclaje.

Efectos colaterales

Si los contenedores se devuelven sin depuración adicional no hay efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida tanto para las instalaciones nuevas como existentes.

Datos económicos

Los datos económicos varían de una fundición a otra y dependen del procedimiento acordado con el proveedor.

Ventajas de la implantación

Cumplir los programas de prevención y reciclaje de residuos y la normativa sobre residuos de envases.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[110, Vito, 2001]

4.2. Fusión y tratamiento del metal fundido

4.2.1. Cubilotes

En este apartado se estudian las técnicas relativas a las operaciones de fusión y funcionamiento del horno, aplicables a los cubilotes de viento caliente, frío o ambos. Las técnicas relativas a los gases, como la postcombustión y la depuración, se tratan en el apartado 4.5.2, donde también se analiza cómo convertir un cubilote de viento frío en uno de aire caliente.

4.2.1.1. Optimización del funcionamiento del horno

Descripción

La cantidad emitida de partículas de polvo y gases de salida depende directamente de la cantidad de coque que necesita una tonelada de carga de hierro. Así pues, cualquier medida que mejore la eficiencia térmica del cubilote resultará también en un descenso de las emisiones generadas.

Entre las medidas que mejoran las operaciones de fusión destacan las siguientes:

- *Funcionamiento del horno en régimen óptimo (en la medida de lo posible)*: la influencia de la velocidad de inyección y de la carga de coque sobre la temperatura de vaciado del metal y la velocidad de fusión de un cubilote se expresan mediante un diagrama de red o diagrama de Jungblüth. Este diagrama sólo es válido, en términos cuantitativos, para el cubilote del que se han obtenido los datos. Muestra el comportamiento de la temperatura del metal y la velocidad de fusión frente a los cambios en la velocidad de inyección y la carga de coque y permite determinar el punto (o línea) de eficiencia térmica óptima.
- *Evitar temperaturas excesivas* en la colada y reducir las temperaturas de sobrecalentamiento adoptando medidas al manipular el metal vaciado.
- *Carga uniforme*: procurar que la distribución del metal y el coque sea uniforme durante la carga.
- *Mejorar el control* del peso de la carga, el flujo de inyección y la temperatura del metal.
- *Minimizar las pérdidas de aire*: suministrar la cantidad correcta de aire es fundamental para el buen funcionamiento de los cubilotes, a menudo afectados por pérdidas de aire. Es necesario extremar los cuidados para evitar fugas y garantizar el funcionamiento eficiente del horno. Los agujeros que forma la escoria en los cubilotes de vaciado discontinuo a menudo se dejan abiertos y frecuentemente aumentan de tamaño, lo que provoca pérdidas de aire considerables. Estas pérdidas son especialmente habituales en los cubilotes de viento caliente y tienen lugar en el intercambiador de calor. Como consecuencia, debe inyectarse el oxígeno en las toberas para compensar el aire perdido.
- *Evitar los «coronamientos» en el cubilote*: los coronamientos, colgaduras (formación de bóvedas en la carga) o pegotes se forman al colgar o no descender la carga en la zona de fusión del horno. Provocan pérdida de eficiencia durante la fusión y en casos graves pueden llegar a detenerla por completo.

- *Mejorar el revestimiento*: durante la colada, el diámetro y el área de la zona de fusión aumentan a causa de la erosión y el desgaste del refractario, lo que afecta al funcionamiento haciendo que deje de ser óptimo. Por ello minimizar el ataque al revestimiento acaba siendo una medida de ahorro energético. Para que el funcionamiento del cubilote sea satisfactorio y económicamente rentable la zona de fusión debe repararse adecuadamente tras cada colada.

Ventajas medioambientales

Aumento de la eficiencia energética; reducción del consumo de coque y de los residuos.

Efectos colaterales

No se conocen efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable tanto a las instalaciones nuevas como existentes.

Ventajas de la implantación

Optimización del funcionamiento del horno.

Ejemplos

Las medidas para mejorar la colada se utilizan en todas las fundiciones de cubilotes.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [44, ETSU, 1993], [202, TWG, 2002]

4.2.1.2. Control de calidad del coque de entrada

Descripción

La calidad del coque afecta directamente al buen funcionamiento del cubilote. En concreto, afecta a la absorción de carbono a temperatura inicial y al contenido de azufre del hierro. Para determinar las características del coque deben analizarse los siguientes contenidos:

- *Carbono fijo*: a mayor contenido de carbono, mayor poder calorífico.
- *Contenido de ceniza*: un elevado contenido de ceniza sólo reduce el poder calorífico del coque y genera un mayor volumen de escoria en el cubilote.
- *Materia volátil*: la materia volátil en el coque es negativa porque reduce el contenido de carbono fijo y, en consecuencia, su poder calorífico.
- *Azufre*: el azufre es un elemento muy conocido y evitado en la fundición del hierro en general, ya que provoca emisiones de SO_2 . Cuanto menor sea el contenido de azufre del coque suministrado, tanto mejor. El contenido de azufre del coque depende a su vez del contenido original que tenía el carbón. Desafortunadamente, no existe ningún método conocido para extraer el azufre del carbón.
- *Humedad*: la humedad del coque al salir del horno de coque también resulta negativa, ya que reduce la proporción de carbono disponible por unidad de masa. A pesar de todo, cierta humedad en el coque es necesaria porque evita que se encienda en las cintas transportadoras, camiones y vagones.
- *Tamaño*: el tamaño del coque de fundición afecta directamente al consumo del mismo por tonelada de hierro fundido y también a la velocidad de fusión. Para lograr un rendimiento óptimo el coque salido del horno debe tener un diámetro medio superior a 90 mm y el porcentaje de coque con diámetro inferior a 50 mm no puede sobrepasar el 4%. La proporción de finos afecta a la emisión de partículas de polvo durante la (des)carga y la manipulación.

Ventajas medioambientales

La optimización del coque suministrado redonda en una mayor eficiencia del proceso.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

La Tabla 4.4 muestra las propiedades características del coque de fundición:

Tabla 4.4. Propiedades características de los coques de fundición [197, Nalorchem, 2002]

Propiedad	Valor típico (%)	Valor límite (%)
Ceniza	5,8 – 5,9	6,5 máx.
Materia volátil	0,3 – 0,4	0,8 máx.
Azufre	0,68 – 0,70	0,75 máx.
Humedad	1,5 – 2,5	3,0 máx.
Resistencia		
• M80 índice Micus	81 – 82	78,0 máx.
• M10 índice Micus	8 – 8,5	9,0 máx.
Carbono fijo	93,7 – 93,8	93,0 mín.
Poder calorífico máximo	32.200 kJ/kg	31.800 kJ/kg

Los datos de la Tabla 4.4 se han obtenido a partir de las especificaciones de los proveedores. Puede que las exigencias locales establezcan valores límite superiores.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todas las instalaciones nuevas y existentes.

Datos económicos

Por lo general el suministro de coque bajo en azufre es más caro.

Ventajas de la implantación

Mejora la eficiencia del proceso de fundición.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones europeas dotadas de cubilotes.

Publicaciones de referencia

[44, ETSU, 1993], [225, TWG, 2003]

4.2.1.3. Empleo de escoria ácida y básica

Descripción

Se emplea fundente para lograr que la escoria sea lo suficientemente fluida para separarse del hierro y permitir que fluya libremente del cubilote. El fundente más utilizado es la piedra caliza (carbonato cálcico), que se calcina en la zona de fusión del horno y forma cal viva, un óxido básico que se combina a su vez con los demás elementos que forman la escoria (principalmente ácidos) y hace que ésta sea fluida.

La basicidad de la escoria se calcula mediante la relación siguiente: $(\text{CaO}\% + \text{MgO}\%)/\text{SiO}_2\%$

La escoria de la mayoría de cubilotes suele ser ácida o ligeramente ácida (basicidad $< 1,2$). Los cubilotes básicos (basicidad máxima: 2) tienen las siguientes 3 ventajas:

- mayor contenido de carbono;
- menor contenido de azufre;
- posibilidad de utilizar chatarra de menor calidad en la carga.

Pero también los siguientes inconvenientes:

- pérdidas de silicio elevadas;
- costes de refractario elevados a menos que el cubilote sea sin revestimiento;
- costes de material fluidificante superiores;
- el análisis del metal es más difícil de controlar que el de los cubilotes ácidos.

Ventajas medioambientales

En los cubilotes ácidos pueden utilizarse filtros secos. La escoria de los cubilotes básicos tiene un punto de fusión más elevado, de modo que debe utilizarse un fundente con base de CaF_2 para hacerla fluida. En este tipo de cubilotes se producen emisiones de componentes con contenido de flúor, lo que requiere la utilización de lavadores húmedos para capturarlos de forma eficiente.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todas las instalaciones dotadas de cubilotes, nuevas y existentes. Si se utiliza escoria básica será necesario disponer de un equipo húmedo de eliminación de partículas.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones europeas dotadas de cubilotes.

Publicaciones de referencia

[44, ETSU, 1993], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

4.2.1.4. Aumento de la altura de la zona de fusión del CVF

Descripción

En la Tabla 4.5 figuran las distintas alturas de zona de fusión y velocidades de fusión de los cubilotes. Las alturas optimizan el precalentamiento de la carga en descenso. Sin embargo, si el gas va a quemarse en el agujero de carga podría considerarse la modificación la altura de la zona de fusión. Por lo general, cuanto más corta sea la zona de fusión mayor temperatura alcanzará el gas situado arriba; también será más fácil la combustión, ya sea espontánea o inducida por un postcombustor.

Tabla 4.5. Alturas de zona de fusión necesarias

Velocidad de fusión de los cubilotes (t/h)	Altura desde las toberas al umbral de la puerta de carga (m)
Máximo 5	4,9
5 – 8	5,8
> 8	6,7

La eficiencia térmica de los cubilotes de viento frío puede mejorarse incrementando la altura de la zona de fusión. Normalmente, a mayor altura de la zona de fusión, más tiempo permanecen los gases de combustión en contacto con la carga, que recibe una mayor transferencia térmica.

Ventajas medioambientales

Según el tipo de instalación la altura deberá optimizarse para permitir la combustión de los gases y el calentamiento eficiente de la carga.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

Los datos operativos figuran en la Tabla 4.6. La modificación consiste en doblar el volumen de la zona superior. Así se consigue reducir el consumo de coque entre 115 y 140 kg/tonelada, lo que representa una reducción relativa del 18%. Generalmente puede decirse que el cálculo de la altura óptima de la zona de fusión sigue la regla general de «altura = 5 x diámetro en las toberas», de modo que la situación inicial del horno del siguiente ejemplo no era óptima.

Tabla 4.6. Ejemplo de la modificación del consumo de coque al aumentar la altura de la zona de fusión [202, TWG, 2002]

	Cubilote antes de la modificación	Cubilote tras la modificación
Diámetro		
• zona de fusión (m)	1,4	1,4
• zona superior (m)	1,4	1,7
Altura sobre las toberas (m)	5	6,5
Proporción de coque (kg/tonelada)	140	115

Aplicabilidad

La optimización de la altura del horno debe realizarse en la etapa de diseño inicial del mismo, de lo contrario los aumentos sólo son posibles normalmente si se realizan obras mayores en el horno.

Ventajas de la implantación

Aumentar la eficiencia del funcionamiento del horno.

Ejemplos

Los datos operativos del ejemplo corresponden a una planta de Francia.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [44, ETSU, 1993], [202, TWG, 2002]

4.2.1.5. *Instalación de una segunda fila de toberas en los cubilotes de viento frío (CVF)*

Descripción

La eficiencia térmica de los cubilotes de viento frío puede mejorarse instalando una segunda hilera de toberas. Con ellas aumenta la presencia de oxígeno por encima de la zona de combustión y se induce la oxidación del CO de los gases de combustión; el CO se forma por la reducción endotérmica del CO₂ por parte del C (coque). Esta técnica libera el calor «latente» de los gases de combustión y mejora, por tanto, la eficiencia térmica de los cubilotes.

Estos cubilotes cuentan con una doble fila de toberas, cada una de las cuales recibe un suministro de aire controlado y regulado. Si los comparamos con los cubilotes normales, dotados de una única hilera de toberas, los de doble fila permiten:

- alcanzar una mayor temperatura de vaciado del metal y una mayor absorción de carbono con el mismo consumo de coque;
- reducir el consumo de coque y, en caso necesario, aumentar la velocidad de fusión sin modificar la temperatura de vaciado del metal.

Para aprovechar al máximo el funcionamiento de los cubilotes de doble fila de toberas el aire inyectado debería dividirse del siguiente modo: 25 – 50% por la parte superior y 75 – 50% por la inferior. Las dos filas deberían espaciarse aproximadamente 1 m (inyección fría) o 0,5 m (inyección caliente). Cada hilera requiere su propio sistema de inyección de aire.

Ventajas medioambientales

Reducción en el consumo de coque y aumento de la eficiencia térmica.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

La utilización de dos filas de toberas convenientemente espaciadas y con la inyección de aire igualmente dividida permite aumentar la temperatura de vaciado en aproximadamente 45–50 °C con el mismo consumo de coque, lo que equivale a una reducción en el consumo de coque del 20–32% y un aumento de la velocidad de fusión del 11 al 23%. Si se utiliza un cubilote de doble hilera pero no se reduce la carga de coque, para aumentar así la temperatura de colada, la absorción de carbono tiende a aumentar ligeramente (aproximadamente un 0,06%), al igual que las pérdidas de silicio durante la fusión (alrededor del 0,18%).

En este tipo de cubilotes, sin embargo, el abrasamiento del revestimiento se da también en la zona de fusión del horno. Al inicio de la fusión, por tanto, será necesario medir y ajustar la altura del lecho de coque. Si la colada es de corta duración, por ejemplo de menos de 2 o 3 horas, el ahorro de coque de la carga no suele compensar la mayor necesidad de coque del lecho. Con todo, incluso en las coladas breves, la mayor temperatura de vaciado y mayor absorción de carbono que proporcionan los cubilotes con doble hilera de toberas sí puede resultar ventajosa para muchas fundiciones.

Otras ventajas destacables:

- la temperatura de salida de los gases es de sólo 250 °C, lejos de los 450 °C de los cubilotes convencionales;
- es capaz de fundir trozos de chatarra del doble del tamaño habitual;
- permite aumentar la proporción de chatarra de acero en la carga de metal.

En el anexo 1 se aportan más datos operativos.

Aplicabilidad

La técnica de la segunda fila de toberas se utiliza en todos los cubilotes de viento frío nuevos y puede implantarse en las instalaciones existentes durante su reconstrucción. No suele utilizarse, por el contrario, en cubilotes de viento caliente.

Datos económicos

La doble fila de toberas en los cubilotes es una técnica muy utilizada en la práctica, ya que posibilita un funcionamiento económico con un coste de inversión escaso.

Los costes de adaptar la doble fila de toberas a los cubilotes existentes son bajos en comparación con el ahorro potencial. Según datos de BCIRA, en una fundición británica el tiempo de retorno energético se redujo a sólo 14 semanas. Una fundición canadiense de gran tamaño ahorró 170.000 CAD en un año con unos costes de reconversión de tan sólo 18.000 dólares canadienses. Una ventaja adicional desde el punto de vista del consumo de coque por tonelada de hierro es que desciende el contenido de azufre, lo que reduce los costes de la planta de desulfuración y contribuye a la obtención de hierro de mejor calidad.

En el anexo 1 se amplían los datos económicos.

Ventajas de la implantación

Aumentar la eficiencia del procedimiento de fusión.

Ejemplos

En Francia, todos los cubilotes de viento frío recientes emplean dos filas de toberas: STAUB (Merville), FONTE ARDENNAISE (Vivier-au-Court), BERNARD HUET (Vivier-au-Court). También existe un cubilote de viento caliente con dos hileras: FIDAY GESTION (Chassey-les-Scey).

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [196, Unido, 2002], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

4.2.1.6. Inyección de aire enriquecido en oxígeno

Descripción

La eficiencia térmica de los cubilotes de viento frío puede mejorarse enriqueciendo en oxígeno el aire de combustión, ya que aumenta la temperatura de combustión del coque. De este modo se reduce el consumo de coque o bien aumenta la temperatura de vaciado.

En comparación con el funcionamiento normal, el uso constante de oxígeno posibilita una de las siguientes mejoras:

- temperaturas de metal superiores, mayor absorción de carbono y menos pérdidas de silicio con el mismo consumo de coque;

- menor consumo de coque con la misma temperatura de metal, sin que se produzcan un aumento en la absorción de carbono o una reducción de las pérdidas de silicio durante la colada;
- aumento de la producción de un cubilote existente como consecuencia de la mayor velocidad de fusión.

La inyección de oxígeno permite reaccionar rápidamente ante las posibles variaciones del proceso y compensar los pequeños cambios en las condiciones en el mismo. Por ello la inyección de oxígeno suele utilizarse de forma intermitente, normalmente cuando es necesario hacer algún ajuste en el proceso.

La efectividad del oxígeno depende del método por el que se introduce en el cubilote. Existen tres métodos distintos:

- *Enriquecer directamente el suministro de aire:* se alimenta con oxígeno el flujo principal; esta técnica se utiliza en la mayoría de cubilotes de viento frío.
- *Inyección en la zona baja:* el oxígeno se inyecta en la cama de coque a través de una canalización circular que suministra oxígeno a los inyectores refrigerados por agua, cuyo número depende del tamaño del cubilote. El oxígeno así empleado es, como mínimo, el doble de efectivo que enriqueciendo directamente el flujo de aire que se inyecta. Sin embargo, este método se limita a los cubilotes de colada continua, ya que en los discontinuos existe riesgo de que la escoria y el metal suban y alcancen el nivel de los inyectores. Esta técnica se desarrolló en el Reino Unido pero no se ha extendido.
- *Inyección en las toberas:* el oxígeno se introduce en el cubilote a través de los inyectores insertados en cada tobera o en toberas alternas. La efectividad de este método se sitúa entre el enriquecimiento directo y la inyección en la zona baja; se utiliza en el 20 – 30% de los casos, aunque más a menudo en cubilotes de aire caliente.

La Figura 4.3 muestra cómo funciona la inyección de oxígeno.

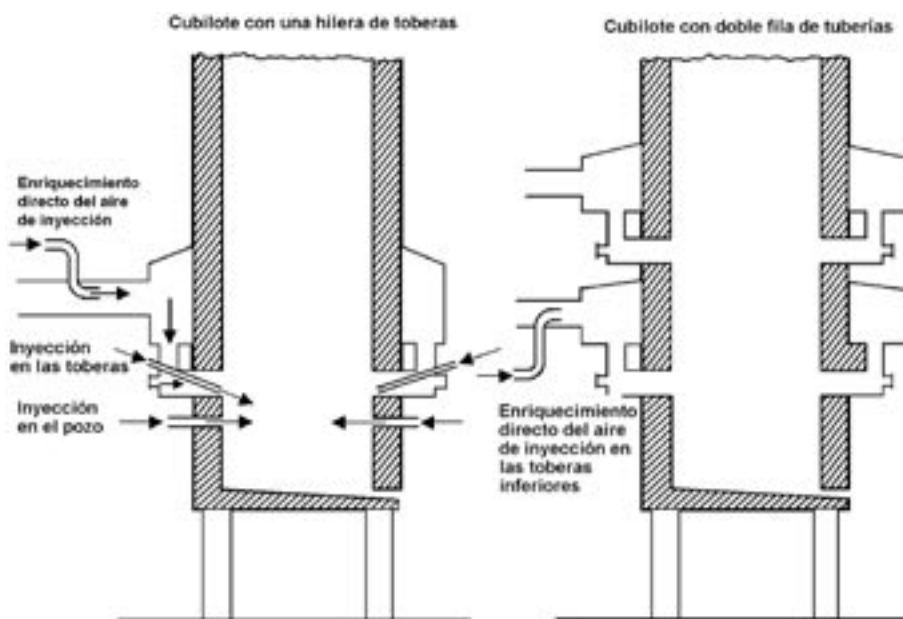


Figura 4.3.
Distintos métodos de
inyección de oxígeno
[44, ETSU, 1993]

Ventajas medioambientales

La inyección de oxígeno permite reducir el consumo de coque y controlar mejor el proceso. También se ha registrado un descenso en la emisión de dioxinas y furanos en cubilotes de viento frío (véase apartado 4.5.1.4).

Efectos colaterales

La técnica requiere oxígeno, que se produce fuera de las instalaciones y consume energía eléctrica.

Datos operativos

En comparación con un cubilote convencional dotado de una única hilera de toberas, el aumento de la temperatura de vaciado obtenido a partir de la misma carga de coque puede ser del orden de:

- enriquecimiento de flujo: + 15 °C
- inyección en la zona baja: + 85 °C
- inyección en tobera: + 40 °C

La tecnología de doble hilera junto con enriquecimiento de aire del flujo de aire de entrada supone un aumento de la temperatura de colada de 85 °C en comparación al obtenido en cubilotes de viento frío convencionales; este método simple de inyección directa supera en ventajas obtenidas con las técnicas de inyección en la zona baja y en tobera.

Uno de los usos más importantes del oxígeno consiste en aumentar la velocidad de fusión de los cubilotes existentes muy por encima de su capacidad óptima. Los cubilotes con doble fila de toberas muestran aumentos de alrededor del 6,8% en la velocidad de fusión y de unos 20 °C en la temperatura de colada, por cada unidad porcentual de enriquecimiento de oxígeno en el aire inyectado. Si no se requiere aumento de temperatura y se reduce la carga de coque puede lograrse un incremento aún superior de la velocidad de fusión con el mismo nivel de inyección y enriquecimiento.

En el anexo 1 se aportan más datos operativos.

Aplicabilidad

En la actualidad, en la práctica totalidad de cubilotes de viento caliente de Europa se inyecta oxígeno a través de las toberas. En cuanto a los CVF, enriquecer el aire de oxígeno podría considerarse una técnica establecida, ya que se emplea habitualmente. El nivel de oxígeno de la mezcla de aire oxidante normalmente es de entre el 22 y el 25% (es decir, un enriquecido de entre un 1 y un 4% de oxígeno).

Datos económicos

La influencia del empleo de oxígeno sobre los costes de colada depende en gran medida del precio del oxígeno, que a su vez depende de la cantidad utilizada. Las fundiciones con mayor producción normalmente compran el oxígeno más barato. La viabilidad económica de utilizar oxígeno debería, por tanto, determinarse caso por caso.

El potencial de aumento sustancial de la producción ha permitido a muchas fundiciones aumentar la producción sin tener que invertir en plantas nuevas y reducir los costes y los pagos suplementarios, por lo que la reducción global de costes justifica ampliamente el gasto del oxígeno. Con todo, estas mejoras deben tener en cuenta la capacidad de producción de moldes y machos de la fundición.

Ventajas de la implantación

Optimizar la eficiencia y el control del proceso de fusión.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones europeas dotadas de cubilotes.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [156, Godinot, 2001]

4.2.1.7. Sobrecalentamiento del aire inyectado en los CVC

Descripción

Una técnica alternativa para aumentar la temperatura de la llama consiste en sobrecalentar el aire de inyección hasta los 800 – 900 °C. Para ello se inyecta un plasma de aire o se utilizan calentadores de resistencia tubulares. La experiencia demuestra que si se aumenta la temperatura del aire inyectado en 200 °C, de 550 °C a 750 °C, lo que consume 60 kWh por tonelada de hierro, se obtiene un ahorro de 10 kg de coque por tonelada de metal fundido. La principal ventaja, más importante aún que el ahorro de coque, es la flexibilidad: la producción horaria puede aumentar un 30% sin tener que modificar el lecho de fusión. Además, la utilización de sobrecalentamiento (plasma) hace posible cambiar la materia prima de hierro limpio a acero, con el consiguiente efecto económico positivo.

Ventajas medioambientales

Reducción del consumo de coque y aumento de la eficiencia del proceso.

Efectos colaterales

El calentamiento mediante electricidad provoca un aumento del consumo de energía eléctrica (58 kWh/tonelada).

Datos operativos

Los datos operativos se encuentran en el anexo 1. El calentamiento del aire de inyección genera un menor volumen de gases de combustión que en las largas campañas de CVC. El volumen de gases de combustión y el consumo de energía son mayores en los CVC que en los hornos dotados de inyección de oxígeno.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida tanto para los CVC nuevos como existentes.

Esta técnica (ya se trate de calentamiento eléctrico o mediante el plasma) tiene efectos parecidos a la inyección de oxígeno a través de lanzas, pero puede emplearse en instalaciones más complejas y genera un mayor volumen de gases de combustión. Además, la inyección de aire contribuye a tapar las fugas de la conducción de aire.

Datos económicos

Los datos económicos figuran en el anexo 1.

Ventajas de la implantación

Optimizar la eficiencia y controlar el proceso de fusión.

Ejemplos

PSA, Sept-Fons, Francia

Tres fundiciones francesas utilizan calentamiento mediante resistencia tubular.

Publicaciones de referencia

[156, Godinot, 2001]

4.2.1.8. Períodos mínimos de interrupción de la inyección en CVC

Descripción

Los cubilotes que sólo funcionan de forma intermitente no son eficaces, ya que la temperatura de vaciado del metal acaba reduciéndose, como muestra la Figura 4.4.

Las frecuentes interrupciones de la inyección a causa de la demanda intermitente de metal provocan:

- reduce la temperatura media de colada y vaciado y aumenta el alcance de las modificaciones, con un mayor riesgo de aparición de defectos en las piezas;
- aumento de las posibles variaciones en la composición del metal, especialmente del contenido en carbono y silicio, con riesgo de producir metal no conforme a especificaciones;
- aumento en el consumo de coque a causa del intento de mejorar la temperatura de vaciado;
- alteraciones en el grado de nucleación del hierro y aumento de su tendencia a la formación de rechupes.

Por todo ello, el moldeo y la colada se programan de modo que la demanda de metal sea razonablemente constante, reduciéndose o incluso eliminándose así la necesidad de períodos sin inyección o de grandes variaciones en la velocidad del viento.

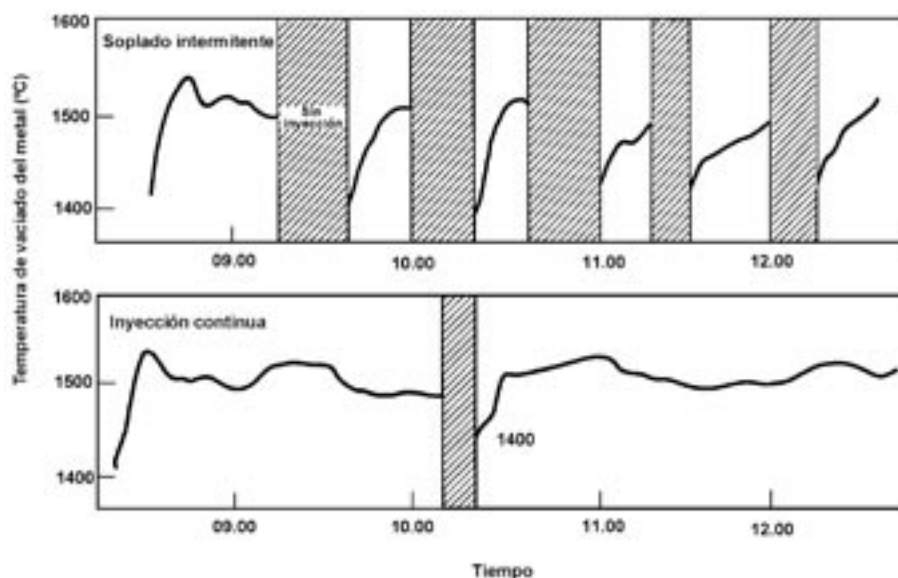


Figura 4.4.
Cómo afectan los períodos de interrupción de la inyección a la temperatura de vaciado de un cubilote de postinyección [44, ETSU, 1993]

Si es imposible evitar grandes variaciones en la demanda puede tenerse en cuenta la posibilidad de instalar un horno eléctrico de mantenimiento. Este horno servirá de equipo intermedio de almacenamiento de metal, para compensar las variaciones en la demanda de modo que el cubilote pueda funcionar continuamente a una velocidad de inyección razonablemente constante. Puede incluso contribuir a equilibrar las variaciones en la temperatura y la composición.

Ventajas medioambientales

Reducción del consumo de coque. Mayor eficiencia energética de los procesos.

Efectos colaterales

Si se utiliza horno eléctrico de mantenimiento aumenta el consumo de energía.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todos los cubilotes, nuevos y existentes.

Datos económicos

Deben tenerse muy en cuenta las consideraciones económicas de cara a la instalación de un horno de mantenimiento, sobre todo en fundiciones con velocidades de producción relativamente bajas.

Ventajas de la implantación

Aumenta la eficiencia del proceso de fundición.

Ejemplos

El régimen de inyección más adecuado es un aspecto que se tiene en cuenta en todas las fundiciones europeas dotadas de cubilotes.

Publicaciones de referencia

[44, ETSU, 1993]

4.2.1.9. Cubilotes sin coque

Descripción

En los cubilotes sin coque la carga de metal se calienta por combustión de gas natural. En vez de la tradicional cama de coque, estos hornos cuentan con un lecho de esferas refractarias sobre una rejilla refrigerada por agua que sostiene la carga de metal. Las gotas de metal fundido fluyen hacia el lecho y se acumulan en el pozo situado en la parte inferior del horno. La vida útil de las esferas sometidas a sobrecalentamiento a altas temperaturas es limitada. Por ello los cubilotes sin coque funcionan a una temperatura reducida (1.400 °C en vez de 1.500 °C) y el sobrecalentamiento del metal líquido se realiza por medio de un horno de gas o de inducción adjunto (funcionamiento dúplex).

Un aspecto importante respecto al funcionamiento de los cubilotes sin coque es que debe ser continuo, de lo contrario podrían producirse obstrucciones y bloqueos en las barras de la rejilla como consecuencia del enfriamiento. En caso de que sea necesario detener el flujo de metal (por ejemplo por problemas en el área de moldeo), la potencia de los quemadores puede reducirse entre un 35 y un 40%, para compensar la pérdida de calor de las paredes. La necesaria continuidad en el funcionamiento debe equilibrarse con el empleo de refractario en la zona de colada. Por ello las campañas de fusión suelen durar normalmente una semana.

La atmósfera oxidante y las temperaturas de llama relativamente bajas provocan un aumento de las pérdidas por oxidación y limitan la posibilidad de incorporar acero a la carga. Para producir hierro nodular se utiliza un máximo de acero del 35%, aunque un 20% es la práctica más habitual. La calidad del material alimentado debe someterse a estricto control, ya que los cubilotes sin coque son más susceptibles a la formación de bóvedas en la carga (colgaduras) que los que sí utilizan coque.

Una ventaja destacable del uso de cubilotes sin coque en la producción de hierro nodular es que no se produce resulfuración, de modo que la colada puede utilizarse inmediatamente después de la recarburación.

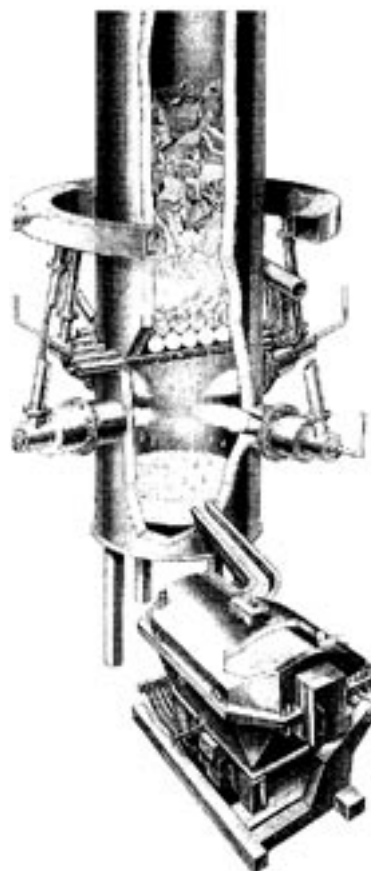


Figura 4.5.
Cubilote sin coque
(funcionamiento dúplex)
[110, Vito, 2001]

Ventajas medioambientales

Además de una mayor eficiencia térmica, estos hornos tienen otras ventajas medioambientales. La combustión de gas natural en vez de coque afecta del siguiente modo a los gases de combustión:

- reducción de partículas (0,8 kg/t de carga metálica en vez de los 10–15 kg/t de carga de metal característicos de los cubilotes de viento frío);
- ausencia de CO o SO₂ y menor presencia de CO₂ (120 kg/t de carga de metal frente a los 450 kg CO₂/t de carga de metal de los cubilotes de viento frío);
- menor proporción de gases de combustión (495 m³/t de carga de metal en vez de los 770 m³/t de carga de metal propios de los cubilotes de viento frío sin refractario refrigerado por agua) y, en consecuencia, menor tamaño de las instalaciones de depuración de partículas.

Efectos colaterales

El empleo de cubilotes sin coque requiere funcionamiento dúplex para que se produzca el sobrecalentamiento del hierro. Si el sobrecalentamiento se llevara a cabo en un horno de inducción la energía eléctrica necesaria sería superior a la de la inyección de aire caliente.

Datos operativos

Los datos operativos se muestran en la Tabla 4.7. Los hornos suelen funcionar con un factor atmosférico de $\lambda = 1,15$. La capacidad del horno puede ser elevada (a menudo del orden de 10 – 12 t/m² h). La cantidad de esferas corresponde al 1 – 1,4% de la carga de metal. La eficiencia energética de los cubilotes, sin considerar la existencia de hornos de inducción complementarios, se sitúa alrededor del 70%.

Tabla 4.7. Datos operativos característicos de un cubilote sin coque [202, TWG, 2002]

	Unidades	Consumo (por tonelada de metal fundido)
Consumo de gas natural		
Precalentamiento del horno	m ³	600
Fusión	m ³	48,0
Consumo de energía eléctrica		
a) Sobrecalentador		
Sobrecalentamiento	kWh	64,0
Mantenimiento	kWh	15,0
b) Equipo auxiliar	kWh	25,0
Consumo de material de revestimiento		
Cuba del horno	kg	5 – 8
Sifón	kg	0,7
Sobrecalentador	kg	0,5
Consumo de agua	m ³	0,4
Consumo de oxígeno	m ³	19,7
Carga metálica	Componentes	Porcentaje (%/t)
	acero	25 – 35
	lingote	20 – 30
	retornos/chatarra de hierro	35 – 55
Aleaciones y aditivos	Componentes	Porcentaje (%/t)
	Carburizador	1,1
	Briquetas – Sí	0,8
	Bolas cerámicas	0,95
	Componente de formación de escoria	0,3

La ausencia de coque (y CO) hace que los cubilotes sin coque no tengan pérdidas de calor latente; el calor de los gases de combustión se recupera completamente en la zona de fusión. En funcionamiento dúplex (por ejemplo junto con un horno de inducción) pueden obtenerse márgenes de eficiencia del 40–60%. La eficiencia térmica de los cubilotes alimentados con coque se sitúa entre el 25% (inyección fría) y el 45% (inyección caliente, campañas largas).

En la Tabla 4.8 se comparan los datos de emisión de cubilotes sin coque y CVC en base a los siguientes criterios:

- cubilotes sin coque: captura de gases por debajo del punto de carga, atmósfera oxidante ($\lambda = 1,15$), sin postcombustión y con sistema de filtración seco.
- cubilote de viento caliente: captura de gases por debajo del punto de carga, postcombustión en cámara independiente seguida de recuperación de calor y sistema de filtración seco.

Observaciones

- Los cubilotes sin coque emiten una cantidad cinco veces menor de gases de combustión que los cubilotes de viento caliente a causa principalmente de la postcombustión, que conduce el exceso de aire a la cámara de combustión de los cubilotes de viento caliente. Como resultado el cubilote sin coque puede dotarse de sistemas de tratamiento de gases de combustión más pequeños;

- los cubilotes sin coque emiten de 3 a 4 veces menos CO₂ en que los de viento caliente;
- los cubilotes sin coque emiten más CO, que en los cubilotes de viento caliente, donde se quema;
- los niveles de emisión de NO_x y SO₂ son bajos en comparación con los valores límite establecidos actualmente (por ejemplo, en Francia son 500 mg/Nm³ y 300 mg/Nm³ respectivamente);
- si se utiliza un sistema de filtración en seco, ambas técnicas tiene valores de emisión escasos.

Tabla 4.8. Datos de emisión de cubilotes sin coque y de cubilotes de viento caliente [170, Godinot y Carlier, 1999]

	Sin coque				Cubilote de viento caliente			
	Condiciones de trabajo		Nm ³ /t	kg/t	Condiciones de trabajo		Nm ³ /t	kg/t
Gas	50 Nm ³ /t							
Energía	500 kWh/Nm ³							
λ	1,15							
Coque					12%			
Acero					50%			
Recarburación					1,9%			
Carbono (total combustible)					9%			
Gases de combustión			550				2.930	
CO ₂		9,1%	50	98		6%	176	346
H ₂ O		18,2%	100			–		
O ₂		2,7%	15			15%		
CO		< 1%	< 5,5	< 6,9		10 mg/Nm ³		29 g/t
NO _x		155 – 375 mg/Nm ³		85 – 210 g/t		205 mg/Nm ³		150 g/t
SO ₂		–				100 mg/Nm ³		300 g/t

Aplicabilidad

La técnica es válida para todas las instalaciones nuevas que produzcan series medias o grandes. Los cubilotes sin coque necesitan un régimen de funcionamiento constante. A causa de las considerables pérdidas por oxidación y del elevado riesgo de formación de bóvedas en la carga (colgaduras) la técnica requiere que la carga alimentada este limpia y tenga un contenido máximo de acero del 35%. Dado que no se produce sulfuración, la técnica resulta especialmente interesante para la producción de hierro nodular.

Datos económicos

En la Tabla 4.9 se muestran los costes operativos (de 1999) asociados a los cubilotes de viento caliente (a los que corresponde un valor del 100%). Los valores hacen referencia a equipos con una capacidad de 12 toneladas/h y se basan en el estudio de tres cubilotes sin coque europeos.

Tabla 4.9. Costes operativos correspondientes a cubilotes sin coque frente a los de los CVC (a los que les corresponde un valor del 100%) [202, TWG, 2002]

		Materias primas (%)	Materiales auxiliares (%)	Fluidos + energía de fusión (%)	Índice comparativo
Fundición gris	Cubilote sin coque (a gas)	83	6	11	116
	CVC	69	8	23	100
Fundición de hierro nodular	Cubilote sin coque (a gas)	81	6	13	104
	CVC	69	8	23	100

Los valores que figuran en la anterior tabla se calcularon en 1999, aunque desde entonces se ha producido un incremento en el precio del coque. Los datos de la tabla permiten llegar a las siguientes conclusiones basadas en hornos europeos sin coque con una capacidad 12 t/h:

- es más caro fundir hierro gris en estos hornos;
- los costes de producción de fundición de hierro nodular son muy parecidos a los de los CVC.

La comparación depende en gran medida de los precios de la energía y los materiales locales.

Ventajas de la implantación

Reducir las emisiones de los cubilotes.

Ejemplos

- Düker, Laufach (Alemania): 15 toneladas/h de hierro nodular.
- Düker-Kuttner, Lingotes Especiales, Valladolid (España): 16 toneladas/h de hierro gris y nodular.
- Hayes Hydraulic Castings (Gran Bretaña), 5–6 toneladas/h de hierro laminar y nodular.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [170, Godinot y Carlier, 1999]

4.2.1.10. Cubilotes de coque y gas

Descripción

Estos cubilotes sustituyen parte del coque por gas. Existen dos técnicas de combustión de gas natural en los cubilotes:

- mediante quemadores de aire y gas situados por encima de las toberas;
- mediante quemadores de oxígeno situados en las toberas.

Actualmente, la implantación de los hornos de aire y gas en Europa es limitada. Puede que ello se deba a las dificultades a la hora de controlar el proceso y a la progresiva complejidad de disponer la cobertura del del horno.

Los quemadores de oxígeno se empezaron a utilizar en 1994. Además de quemar oxígeno permiten la entrada de partículas de polvo en las toberas para la recirculación, aunque en la práctica no se utiliza esta función. Los quemadores de gas se colocan en 1/3 – 1/2 de las toberas. El gas natural sustituye alrededor de un 10% de la energía obtenida normalmente del coque, lo que supone un consumo de gas de 8 a 16 Nm³/tonelada, al que hay que sumar un consumo total del oxígeno (quemadores y lanzas) de 40 a 60 Nm³/tonelada. La utilización de esta técnica aporta flexibilidad a la producción y/o metalurgia.

Las consecuencias de utilizar quemadores oxigás varían en función del cubilote. En los de viento frío la técnica se emplea para asegurar un rápido arranque o para reducir la proporción de coque. En los cubilotes de viento caliente la técnica permite aumentar la capacidad del horno sin modificar el lecho de fusión. La sustitución de parte del coque por CH_4 conlleva una reducción en el volumen de gases de combustión, por lo que es posible aumentar la capacidad del horno sin saturar el sistema de depuración de gases de combustión existente.

El uso de esta técnica supone un aumento del contenido en carbono de la colada y permite incrementar la proporción de acero de la carga. El proceso posibilita la inyección de FeSi , menos caro en polvo que en forma mineral. Todo ello implica beneficios económicos.

Ventajas medioambientales

La sustitución de parte del coque por CH_4 reduce también el volumen de gases de combustión. Además, los gases se vuelven más combustibles a causa del mayor contenido de CO y H_2 . Si además se emplea un sistema de postcombustión, los gases resultantes tendrán niveles inferiores de compuestos orgánicos y CO .

La sustitución de coque por gas natural reduce los niveles de emisión de SO_2 .

La técnica brinda la posibilidad de hacer recircular el polvo del cubilote hacia la colada pero, tras algunas pruebas iniciales, no se ha logrado realizar completamente.

La reducción del nivel de coque implica un aumento del riesgo de formación de bóvedas en la carga (colgaduras) del cubilote.

Efectos colaterales

La producción, el almacenamiento y el empleo de oxígeno aumentan los riesgos en materia de seguridad. La producción de oxígeno se realiza por destilación criogénica o adsorción por cambio de presión de vacío, y ambas técnicas requieren consumo de electricidad. La segunda técnica tiene unos niveles de consumo de $0,35 - 0,38 \text{ kWh/Nm}^3$ de O_2 . La producción de oxígeno a menudo se externaliza; la empresa suministradora se encarga de almacenar el oxígeno en los depósitos o de proveerlo directamente a través de una tubería.

Datos operativos

La fundición AGA-Rayburn (Coalbrookdale, Reino Unido) dispuso en 3 de las 8 toberas de un cubilote de viento frío con quemadores de oxigás. Con ello se obtuvo una reducción de la proporción global de coque de entre el 15% y el 10% dando lugar a una reducción también del contenido de azufre en el hierro producido, lo que a su vez hizo posible reducir la cantidad de lingote en la carga que se traduce en una minimización de costes económicos.

La fundición Fritzwinter (Alemania) dotó 3 de las 6 toberas de su cubilote de viento caliente de 20 – 25 toneladas/h con quemadores de oxigás; esta modificación supuso un incremento de la capacidad de producción hasta las 28 toneladas/h sin necesidad de cambiar el lecho de fusión o el sistema de depuración de gases de combustión. La Tabla 4.10 muestra cómo se reflejan los cambios en los gases de combustión.

Tabla 4.10. Influencia de los quemadores de oxigás en la composición de los gases de combustión de un CVC; valores expresados en % [184, Godinot y Ressent, 2002]

	Con oxígeno y sin quemadores de oxigás	Con oxígeno y con quemadores de oxigás
H_2	0,8 – 1,2	2,2 – 2,4
CO	14 – 15	19
O_2	2	2

Aplicabilidad

Esta técnica es válida tanto para cubilotes de viento frío como caliente, tanto de instalaciones nuevas como ya existentes. Las ventajas derivadas de su aplicación (mayor flexibilidad, beneficios económicos, reducción del volumen de gases de combustión, aumento de la capacidad) dependen de las condiciones de fusión específicas de la instalación en cuestión. Se sabe, sin embargo que también provoca problemas de control del proceso y aumenta la complicación del blindaje del horno necesaria.

Datos económicos

Los datos operativos antes y después de dotar el cubilote de viento frío de quemadores de oxigás, correspondientes a la fundición antes citada Aga-Rayburn (Reino Unido), se muestran en la tabla 4.11. Los precios son previsiones calculadas por CTIF (Francia).

Los costes operativos descienden de 105 a 94 EUR/tonelada de metal fundido. Esta ventaja económica puede atribuirse básicamente a la reducción de la proporción de lingote en la carga. Por lo tanto, el descenso de costes operativos mostrarían variaciones entre las distintas fundiciones dependiendo de la cantidad de lingote empleado en la carga.

Tabla 4.11. Datos operativos de un cubilote de viento frío con y sin quemadores de oxigás [184, Godinot y Ressant, 2002]

Entrada	Unidades	Precio unitario EUR	Con quemadores		Sin quemadores	
			Consumo por tonelada	Coste en EUR/t	Consumo por tonelada	Coste en EUR/t
Coque	Tonelada	198	0,15	29,7	0,1	19,8
Gas	Nm ³	0,15	0	–	16,5	2,5
Oxígeno	Nm ³	0,38	14	5,4		
		0,23			40	9,2
Lingote	Tonelada	164,6	0,2	32,9	0	–
Chatarra de hierro	Tonelada	125,8	0,2	37,7	0,5	62,9
Total	EUR/tonelada			105,7		94,4

Todos los valores se expresan en toneladas de caldo o metal fundido

Ventajas de la implantación

Aumentar la flexibilidad del funcionamiento de la fundición y/o aumentar la capacidad de producción de instalaciones existentes sin cambiar su diseño.

Ejemplos

- AGA-Rayburn Foundry (Coalbrookdale, Reino Unido).
- Fundición Fritzwinter (Alemania)

Publicaciones de referencia

[156, Godinot, 2001], [184, Godinot y Ressant, 2002]

4.2.2. Hornos eléctricos de arco

4.2.2.1. Reducción del tiempo de fusión y tratamiento

Descripción

La mejora de los métodos de control puede suponer una reducción del tiempo necesario para la fusión o el tratamiento. Ejemplos de mejoras:

- control preciso de la composición (p. ej. contenido de C, S o P) y del peso de las materias primas y de los materiales escorificantes;
- control de la temperatura de la colada; esta mejora puede aumentar el rendimiento de las reacciones de afinado y evitar el sobrecalentamiento;
- la utilización de métodos de muestreo y desescoriado más eficientes puede reducir el tiempo de inactividad del horno.

La metalurgia secundaria con tratamiento mediante AOD/VODC reduce el tiempo necesario de los hornos HEA y favorece la conservación de energía. Esta técnica se trata en mayor profundidad en el apartado 4.5.7.1.

Ventajas medioambientales

Aumento de la eficiencia del horno gracias a los tiempos de fusión e inactividad menores.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica sirve para cualquier horno eléctrico de arco, ya sea nuevo o existente.

Ventajas de la implantación

Aumento de la eficiencia de los procesos de fusión y tratamiento

Ejemplos

Esta técnica está muy extendida entre las fundiciones europeas que se dedican a la fusión en HEA.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [202, TWG, 2002]

4.2.2.2. Empleo de escoria espumosa

Descripción

El *empleo de escoria espumosa* se utiliza actualmente en la industria de producción de acero y consiste en inyectar simultáneamente oxígeno y carbono (en forma de polvo de carbón) en la escoria al final de la fusión. La espuma se genera por acción de las burbujas de CO, que proviene por una parte de la oxidación del carbono presente en el metal por acción del oxígeno inyectado, y por otra de la reducción de los óxidos de hierro (FeO) por el carbono inyectado.

La creación de escoria espumosa mejora la transferencia térmica hacia las unidades con carga y protege el material refractario del interior del horno. Gracias a la mejor estabilidad del arco y a los menores efectos de radiación, la escoria espumosa da lugar a una reducción del consumo energético, de electrodos y de niveles de ruido, junto con un incremento en la productividad.

Ventajas medioambientales

Reducción del consumo energético, de electrodos, de los niveles de ruido y del volumen de gases de combustión.

Efectos colaterales

Puesto que el volumen de escoria aumenta pueden necesitarse mayores recipientes de recogida. Tras la colada, la escoria vuelve a desgasificarse. No se conocen efectos adversos que impidan reutilizar la escoria.

Datos operativos

La Tabla 4.12 muestra los datos operativos de un horno eléctrico de arco de 60 toneladas e indica los principales ahorros en materia de energía, tiempo, refractario y electrodos.

Tabla 4.12. Datos sobre energía y temperatura de hornos HEA dedicados a la fusión con escoria normal y escoria espumosa [202, TWG, 2002]

	Unidades	Escoria normal	Escoria espumosa
Potencia total	MW	25	30
Pérdidas por radiación (del arco a los gases de combustión)	MW	6	0
Flujo de gases de combustión	m ³ /h	41.000	28.000
Temperatura final	°C		
• metal		1.630	1.630
• escoria		1.603	1.753
• gas de combustión		1.463	1.607
• refractario		1.528	1.674
Energía (entrada)	kWh/tonelada		
• electricidad		50,8	37,7
• fósil (carbón)		37,1	22,6
Energía (salida)	kWh/tonelada		
• metal (ΔH)		10,4	10,4
• escoria (ΔH)		1,1	9,4
• pérdidas de horno		20,7	14,1
• pérdidas de gases de combustión		53,6	24,8
• otras pérdidas		2,5	1,6
Tiempo de calentamiento (1.584 – 1.630 °C)	minutos	11 min. 45 s.	7 min. 30 s.
Velocidad de calentamiento	°C/minutos	3,9	6,1

La densidad de la escoria se reduce de 2,3 toneladas/m³ a 1,15 – 1,5 toneladas/m³.

Aplicabilidad

Esta técnica puede implantarse en todas las fundiciones de HEA nuevas y existentes que empleen inyección de oxígeno.

Ventajas de la implantación

Funcionamiento más eficiente del horno.

Ejemplos

No se tienen datos de ninguna fundición concreta, pero la técnica se utiliza en varias fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [202, TWG, 2002], [211, European IPPC Bureau, 2000]

4.2.3. Hornos de inducción

4.2.3.1. Optimización de los materiales de carga, de la carga y del funcionamiento del horno

Descripción

La optimización de procesos en los hornos de inducción sin núcleo comprende los siguientes aspectos:

- *Optimización de las condiciones del material de carga:* se trata de evitar que los materiales de entrada estén sucios u oxidados, de lograr que tengan el tamaño y la densidad entrada/escoria óptimos y que los carburadores estén más limpios. Estas medidas permiten reducir el tiempo de fusión, las necesidades específicas de energía de la colada y la cantidad de escoria formada.
- *Cierre de la cubierta del horno:* la oxidación se reduce si la cubierta del horno está bien ajustada, si se limitan las aperturas innecesarias o demasiado prolongadas, si la carga se efectúa con rapidez o si se crea una atmósfera protectora sobre el caldo (N_2). Los tiempos de apertura necesarios para la carga, extracción de escoria, medición de la temperatura, obtención de muestras y vaciado varían entre un 50 y un 25% del turno. La última de estas cifras corresponde a hornos nuevos que trabajan en condiciones optimizadas. Si la cubierta encaja y cierra bien la pérdida de calor superficial se limita al 1% de la potencia de entrada. Una vez abierta la tapa, las pérdidas de calor pueden llegar a 130 kWh/tonelada en instalaciones de 10 toneladas de capacidad. Si la colada se realiza bajo cubierta cerrada debe procederse con cuidado para que el horno no se sobrecaliente.
- *Limitar el mantenimiento al mínimo:* puesto que la fusión es el primer paso en la cadena de procesos de fundición sólo puede lograrse una reducción del tiempo de mantenimiento a través de la optimización integral de los procesos de toda la fundición y minimizando retardos, problemas y anomalías de todas las áreas que la componen. Durante el mantenimiento se realizan ajustes de la composición en función de los resultados obtenidos del análisis de una muestra de pieza enfriada. La optimización de los procesos de muestreo, prueba y ajustes también posibilita una reducción del tiempo de mantenimiento.
- *Funcionamiento al nivel de potencia máximo:* los hornos son más eficientes desde el punto de vista del consumo de energía si funcionan a un nivel máximo de potencia de entrada y proporcionan mejores resultados si utilizan plenamente toda la potencia disponible durante la mayor parte posible del ciclo de fusión. Esto también implica reducir los arranques de fusiones en frío (optimización del programa de producción) y llevar a cabo un seguimiento y control informatizados.
- *Evitar excesos de temperatura y sobrecalentamientos innecesarios:* es importante que el metal alcance la temperatura necesaria justo en el momento en que el área de moldeo está listo para recibirlo. Este funcionamiento sincronizado de las zonas de fusión y moldeo es esencial para minimizar el uso de electricidad.
- *Optimizar la fusión a alta temperatura para la extracción de la escoria:* la formación de escoria en puntos de fusión bajos puede reducirse calentando el horno a temperaturas elevadas (1.580 °C en vez de los 1.450 °C habituales). Ello provoca un mayor consumo de energía y puede afectar a las propiedades metalúrgicas de la colada. Si se deja que la escoria se forme en el revestimiento del horno la eficiencia eléctrica de éste puede verse afectada negativamente. Por otro lado, para extraer la escoria se requiere abrir la cubierta del horno, lo que provoca una pérdida de calor. Ello obliga a encontrar un buen equilibrio entre el aumento de la temperatura de fusión y la extracción de la escoria.
- *Evitar la acumulación de escoria:* la acumulación de escoria en el horno a causa de puntos de fusión elevados es más habitual y más problemática. Suele ser consecuencia del contenido de arena de la carga y, en caso de la fusión de hierro, de la presencia de aluminio metálico en la colada. Algunas fundiciones han intentado

poner remedio añadiendo aditivos al fundente o estableciendo rutinas de limpieza, pero en este caso es mejor prevenir que curar; es decir, minimizar la presencia de arena y de Al en las materias primas.

- *Controlar el suministro de oxígeno inyectado*: en vez de utilizar la decarburación convencional.
- *Minimizar y controlar el desgaste de la pared de refractario*: la vida útil del refractario depende de la elección de materiales en base a las propiedades químicas de la escoria (ácida o básica), de la temperatura de funcionamiento (acero, hierro, fundición no férrea) y del cuidado a la hora de reponer el revestimiento (sinterización); puede oscilar entre 50 (acero, hierro) y 200–300 coladas (hierro). Deben adoptarse medidas de control operativo para valorar el desgaste del refractario: inspecciones visuales, mediciones físicas y programas de control de instrumentos. Además, la adopción de mejores prácticas de carga (uso de sistemas de carga automatizados, carga en caliente, evitar goteos elevados, empleo de chatarra compacta y seca) evita la acción acumulativa de choques físicos y esfuerzos mecánicos.

Ventajas medioambientales

Aumento de la eficiencia del horno gracias a la reducción de los tiempos de fusión y de inactividad.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

Un horno sin núcleo típico es capaz de fundir una tonelada de hierro y aumentar la temperatura del metal líquido hasta los 1.450 °C utilizando para ello menos de 600 kWh de electricidad. En la práctica, sin embargo, sólo algunas fundiciones logran este nivel de consumo específico de forma semanal. El consumo de algunas fundiciones se sitúa alrededor de 1.000 kWh por tonelada de hierro producido en hornos sin núcleo. Las peculiaridades de muchas fundiciones pueden limitar el alcance de la gestión adecuada de la energía, aunque en realidad prácticamente todas las operaciones de fusión sin núcleo pueden mejorarse de una u otra manera para lograr ahorros aceptables en la cantidad de energía utilizada por tonelada de hierro procesada.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para todos los hornos de inducción nuevos y existentes.

Ventajas de la implantación

Aumentar la eficiencia de funcionamiento del horno.

Ejemplos

Las fundiciones europeas dotadas de hornos de inducción utilizan habitualmente técnicas de optimización de procesos.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [47, ETSU, 1992], [110, Vito, 2001], [145, Inductotherm], [225, TWG, 2003]

4.2.3.2. Cambio de frecuencia de red a frecuencia media

Descripción

Los hornos de frecuencia media (250 Hz) tienen una densidad de energía mayor (de hasta 1.000 kW/tonelada) que la de los hornos de frecuencia de red (50 Hz y 300 kW/tonelada), lo que permite utilizar crisoles más pe-

queños (hasta tres veces más) y reducir así las pérdidas de calor totales. La eficiencia térmica de los hornos de frecuencia media es un 10% superior a la de los que funcionan con frecuencia de red. Además, las unidades de frecuencia de red necesitan para funcionar bien hasta 2/3 de la capacidad del crisol de material residual para optimizar el consumo de energía específico y también requieren un sistema de arranque para la puesta en marcha en frío. Los hornos de frecuencia media pueden ponerse en marcha de inmediato con carga fría y vaciarse al final de cada turno de trabajo o lote.

Cuando una fundición pasa de utilizar hornos de frecuencia de red a equipos de frecuencia media es importante que el personal que está a cargo de los hornos reciba formación nueva al respecto. Las técnicas de funcionamiento utilizadas hasta el momento del cambio deberán abandonarse por la adopción de nuevos procedimientos específicos diseñados para optimizar el consumo de energía. Si el personal no recibe la formación adecuada las mejoras potenciales en el consumo de energía no llegarán a materializarse.

Ventajas medioambientales

Aumento de la eficiencia energética de los procedimientos de fusión.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

Los datos operativos se describen en el apartado 3.2.4.

Aplicabilidad

Esta técnica puede implantarse en instalaciones nuevas y en las existentes previa remodelación.

Ventajas de la implantación

Aumentar la eficiencia operativa de la fundición.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones que instalan hornos nuevos.

Publicaciones de referencia

[47, ETSU, 1992]

4.2.4. Hornos rotativos

4.2.4.1. Aumento de la eficiencia del horno

Descripción

Todas las medidas destinadas a aumentar la eficiencia térmica del horno acaban reduciendo la producción de CO₂. El uso de oxígeno en vez de aire como medio de combustión ha hecho posibles mejoras destacables, como se describe en el apartado 4.2.4.2.

MTDs para forja y fundición

Controlar exhaustivamente y optimizar los aspectos siguientes también consigue mejorar el rendimiento del horno:

- régimen de los quemadores;
- posición del quemador;
- proceso de carga;
- composición del metal;
- temperatura.

Ventajas medioambientales

La optimización reduce la cantidad del polvo y residuos y aumenta la eficiencia energética.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

Un programa de optimización diseñado para un horno de hierro de 3 toneladas sugirió las siguientes mejoras operativas:

- utilización de chatarra limpia. Procedimiento de carga en el siguiente orden: (1) lingotes y materiales con bajo contenido de Si; (2) material de desperdicio interno y chatarra de fundición, (3) elementos de aleación y protección de la colada; (4) chatarra de acero;
- protección de la colada: uso de antracita (2% de la carga de metal) y silicio (2%);
- rotación: durante la fase discontinua, efectuar 1/3 de rotación cada minuto hasta llegar a un total de 7,5 giros en el momento de cambiar de fase. Durante el funcionamiento continuo: 1,7 giros/minuto;
- potencia y ángulo del quemador: utilizar una posición de quemador adicional paralela para los inyectores inferiores. Iniciar el proceso a potencia máxima, durante 20 minutos, y reducirla un 10% cada 20 minutos hasta el cambio de fase (60 minutos después del inicio).

Si se ponen en marcha las anteriores medidas se puede mantener una eficiencia de >95% (metal fundido/metal de carga).

Aplicabilidad

Los principios de la optimización son extensibles a la fusión de hierro en hornos rotativos dotados de quemadores de oxígeno. Los datos operativos hacen referencia a un horno de 3 toneladas. En caso de que el tamaño sea distinto deberá ponerse en práctica un programa de optimización específico para las instalaciones.

Ventajas de la implantación

Optimización del funcionamiento del horno y aumento de la eficiencia de la colada.

Ejemplos

Estas medidas de optimización de procesos se utilizan habitualmente en las fundiciones europeas que disponen de hornos rotativos.

Publicaciones de referencia

[204, Carnicer Alfonso, 2001]

4.2.4.2. Empleo de quemadores de oxigás

Descripción

Las temperaturas de llama se aumentan utilizando oxígeno puro en vez de aire en los quemadores empleados para fundir o precalentar las cucharas de colada. Así la transferencia del calor a la colada es más eficiente y consume menos energía.

Si el suministro de aire se bloquea cerrando fuertemente el equipo receptor no puede formarse NO_x a causa de la oxidación del nitrógeno atmosférico. Por otro lado, el flujo de gases de combustión generado por el quemador de oxigás es escaso debido a la ausencia de resistencia del nitrógeno. Gracias a ello es posible emplear equipos de eliminación de partículas más pequeñas.

Ventajas medioambientales

Estas técnicas reducen el consumo de energía y las emisiones de NO_x y CO_2 gracias a las temperaturas de combustión más elevadas.

Efectos colaterales

La producción, el almacenamiento y el empleo de oxígeno aumentan los riesgos en materia de seguridad. La producción de oxígeno se realiza por destilación criogénica o adsorción por cambio de presión de vacío; ambas técnicas requieren consumo de electricidad. La segunda tiene unos niveles de consumo de 0,35 – 0,38 kWh/ Nm^3 de O_2 . La producción de oxígeno a menudo se externaliza; la empresa suministradora se encarga de almacenar el oxígeno en los depósitos o de proveerlo directamente a través de una tubería..

El combustible o los gases pesados dan lugar a emisiones de SO_2 o NO_x , dependiendo de su contenido de S o N. El uso de carburantes más limpios como el gas natural o el gas propano no produce contaminación adicional a excepción del CO_2 , como sucede en cualquier otro proceso de combustión.

Datos operativos

La Tabla 4.13 muestra, respecto de la fusión mediante oxigás de hierro colado y para varias capacidades de horno, el consumo teórico de varios tipos de combustible y oxígeno por tonelada fundida:

Tabla 4.13. Tabla de consumo de energía (colada mínima) [148, Eurofine, 2002]

Fuente de energía	Unidades	Capacidad del horno (toneladas)				
		3	5	8	12	20
Fueloil ligero	kg/tonelada	33 – 38	33 – 38	33 – 38	32 – 37	32 – 37
Gas natural	Nm^3 / tonelada	38 – 43	38 – 43	38 – 43	38 – 42	38 – 42
Propano	Nm^3 / tonelada	15 – 17	15 – 17	15 – 17	14 – 16	14 – 16
Oxígeno	Nm^3 / tonelada	130 – 150	130 – 150	130 – 150	130 – 145	130 – 145

El empleo de aire enriquecido en oxígeno junto con un recuperador, normalmente permite un ahorro energético del 30%. Además, la temperatura de combustión más elevada contribuye a reducir el nivel general de emisiones. El volumen de gases de salida también decrece. El encendido exclusivamente con oxcombustible proporciona un ahorro de energía de hasta el 50% y una reducción del volumen de gases de salida de hasta el 72%.

Unas instalaciones alemanas sustituyeron el encendido mediante quemador fueloil/aire por uno de gas/oxígeno y registraron una reducción en los niveles de ruido de 15–18 dB(A) en el entorno inmediato del horno, depen-

diendo del punto de análisis. En el extremo de las instalaciones los valores medidos fueron de 48 dB(A). Si a ello le añadimos el empleo de un sistema de recuperación de la energía para el precalentamiento de la carga, el ahorro energético total registrado alcanzó el 53%.

Aplicabilidad

Esta técnica puede aplicarse a cualquier horno rotativo y en el precalentamiento de las cucharas de colada. Los quemadores de oxigás no tienen implantación en las fundiciones no férreas, aunque se utilizan por ejemplo en la fusión secundaria del cobre.

Datos económicos

Costes de inversión: 3.400 – 4.500 EUR.

Costes operativos: dependen de los procesos en cuestión.

Ventajas de la implantación

Optimización del funcionamiento del horno y aumento de la eficiencia de la fusión.

Ejemplos

Esta técnica es ampliamente utilizada en las fundiciones férreas dotadas de hornos rotativos.

Publicaciones de referencia

[23, Brettschneider y Vennebusch, 1992], [32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [103, Vereniging van Nederlandse Gemeenten, 1998], [148, Eurofine, 2002], [163, UK Environment Agency, 2002], [232, Novem, 2000]

4.2.5. Empleo de cubilotes u hornos de inducción y rotativos para la fusión de hierro

Descripción

Puesto que varias técnicas de fusión tienen distintas aplicaciones posibles, uno de los aspectos primordiales de la implantación consiste en saber cuál es la más adecuada. Algunos de los criterios más decisivos son los siguientes:

- tipo de metal;
- producción continua o discontinua;
- tamaño de la serie;
- capacidad o producción de metal;
- flexibilidad respecto al material de entrada y su estado de limpieza;
- flexibilidad frente a los cambios de aleación;
- tipo de producto fabricado;
- emisiones y otras consideraciones medioambientales;
- disponibilidad de materias primas;
- disponibilidad de combustibles/electricidad.

La implantación de las distintas técnicas de fusión depende en gran medida de los criterios arriba indicados. De lo tratado hasta ahora se deducen los siguientes principios generales:

- *Tipo de metal*: los hornos eléctricos son los más aconsejables para la producción de hierro nodular o de aleación.
- *Producción continua*: los cubilotes son los más indicados.

- *Producción discontinua*: los hornos eléctricos o rotativos reúnen las mejores condiciones.
- *Flexibilidad respecto al material de entrada y su estado de limpieza*: los cubilotes son los más indicados.
- *Flexibilidad frente a los cambios de aleación*: los hornos de inducción o rotativos reúnen mejores condiciones.
- *Consideraciones medioambientales*:
 - los cubilotes son la mejor opción sólo si el sistema de eliminación de partículas es el adecuado; los cubilotes sin coque muestran un mejor rendimiento medioambiental que los CVF o CVC;
 - la tecnología de inducción presenta menores niveles de CO, SO₂, NO_x, dioxinas o escoria, pero conviene recordar que también se generarán emisiones al producir la electricidad necesaria.
- *Disponibilidad de materias primas*: los cubilotes son más apropiados si se tiene acceso a chatarra barata.

Lo cierto es que todos los criterios anteriores deben tenerse en cuenta de forma conjunta. La Tabla 4.14 es un resumen basado en consideraciones técnicas. Los datos económicos correspondientes a los hornos de inducción y a los distintos tipos de cubilotes se incluyen en el anexo 1.

Partiendo de los criterios que figuran más arriba podría plantearse la sustitución de los cubilotes por hornos rotativos o de inducción. Los hornos rotativos o de inducción son una elección prioritaria sobre los cubilotes de viento frío en el caso de fundiciones pequeñas dedicadas a fabricar varios tipos de productos en distintos países europeos (p. ej. Austria, Bélgica (Flandes)).

Ventajas medioambientales

La sustitución de un cubilote por un horno de inducción o rotativo hace posible una reducción de las emisiones directas de CO y SO₂ y de la cantidad de escoria. Los hornos de inducción presentan niveles inferiores de emisiones de NO_x y menor riesgo de formación de dioxinas. Las emisiones indirectas producidas por los hornos de inducción dependen de la infraestructura local utilizada para generar la electricidad.

Efectos colaterales

La sustitución de un cubilote por un horno de inducción supone un considerable aumento en el consumo de electricidad.

Aplicabilidad

La sustitución de un cubilote de viento frío por un horno de inducción o un horno rotativo es posible siguiendo los criterios expuestos anteriormente y en el momento de remodelar las instalaciones.

En cuanto a las instalaciones nuevas, deben tenerse en cuenta los criterios que figuran en la Tabla 4.14 además de las peculiaridades de las instalaciones. Aunque los cubilotes y los hornos de inducción o los rotativos se consideren los más indicados es posible que desde un punto de vista medioambiental sea preferibles los de tipo rotativo o de inducción.

Datos económicos

En el anexo 1 se incluye un análisis de datos económicos correspondientes a los distintos tipos de cubilotes y al horno de inducción.

La Tabla 4.15 muestra el resumen de costes obtenido de una fundición española que decidió sustituir un cubilote existente por un horno de tipo rotativo o eléctrico. No incluye los costes relativos a la recogida de las emisiones ni al equipo de filtrado. Los datos corresponden a 1997 – 1998. Se comparan los siguientes tres sistemas:

- cubilote de viento frío: capacidad de 3,5 toneladas/h;
- horno rotativo de oxigás: 3 toneladas de capacidad;
- 2 hornos de inducción de frecuencia media con capacidades de 2 y 1 toneladas.

Tabla 4.14. Elección técnica del dispositivo de fusión en fundición de hierro [202, TWG, 2002]

CRITERIO	FUNDICIÓN GRIS EXCLUSIVAMENTE						F. GRIS + NODULAR	SÓLO FUNDICIÓN NODULAR		SÓLO FUNDICIÓN MALEABLE
	Contrapesos	Alcantarillado, tuberías, mobiliario urbano	Fundición esmaltada, equipos de calefacción	Piezas mecánicas		Piezas mecánicas		Alcantarillado, tuberías, mobiliario urbano	Piezas mecánicas	
Serie (tamaño)	Media a grande	Todas	Media a grande	Discontinua a pequeña	Media a grande	Todas		Todas	Discontinua a pequeña	Media a grande
Cubilotos	CVF	++ (< 10 – 15 t/h)	++ (< 10 – 15 t/h)	++	++ (< 10 – 15 t/h)	++ (< 10 – 15 t/h)			(+)	
	CVC	+	++ (< 10 – 15 t/h)	++	0 (< 10 – 15 t/h)	++ (< 10 – 15 t/h)		++ (< 10 – 15 t/h)	0 (< 10 – 15 t/h)	+
Inducción	Sin coque				0			+	0	+
		+	+	++	++	++		+	++	++
Horno rotativo	(+) discontinua			++	+	++		(+) discontinua o series pequeñas	++	++

++: técnicamente más adaptados;

+: técnicamente adaptados

(0): adaptados en algunos casos

0: no adaptados

En el cálculo de costes se tuvieron en cuenta los costes de fusión correspondientes a una producción de colada de 1 tonelada/h durante 8 horas al día. En el horno de inducción se distingue entre los costes de la energía eléctrica consumida en horas punta y valle respectivamente. Dado que la electricidad es el componente que más influye en el coste, la distinción acaba teniendo gran relevancia en los resultados finales. Si el horno de inducción funciona durante horas de baja demanda (franja nocturna) los costes son comparables a los de un horno rotativo. De los datos se desprende que la inversión tiene un tiempo de retorno energético de entre 5 y 9 años.

Tabla 4.15. Ejemplo de costes de una planta que sustituye un cubilote por un horno rotativo o de inducción. Datos de 1997 - 1998, España [202, TWG, 2002]

Costes en EUR/tonelada de metal fundido	Cubilote	Rotativo	Inducción	
Energía	30,7	29,8	40,8 27,2	(pico) (valle)
Refractario	3,6	1,3	1,4	
Mano de obra	52,9	22,7	22,7	
Materias primas	205	205	205	
Coste total	292	259	270	
Costes anuales en euros				
Coste de fundir 1.320 toneladas/año	385.000	341.000	356.000 338.000	(pico) (valle)
Ahorro	ninguno	44.000	29.000 47.000	(pico) (valle)
Inversión	ninguno	250.000	260.000	
Edificación		No es necesaria	No es necesaria	

Ventajas de la implantación

Reducción de las emisiones directas generadas al fundir hierro.

Ejemplos

La mayoría de fundiciones austriacas, que suelen ser pequeñas y medianas empresas, han sustituido los cubilotes por hornos de inducción, hasta el punto de que ya sólo quedan tres que utilizan cubilotes como medio fusor.

Publicaciones de referencia

[202, TWG, 2002], [110, Vito, 2001], [225, TWG, 2003]

4.2.6. Horno de solera

4.2.6.1. Empleo de quemadores de oxigás

Véase el apartado 4.2.4.2.

4.2.7. Otros tipos de hornos

4.2.7.1. Alternativas al uso de SF_6 como gas protector o aislante para la fusión de Mg

Descripción

Los gases de cobertura alternativos usados en la fusión del magnesio tienen un gran interés a causa del elevado potencial de calentamiento global del SF_6 usado habitualmente. La sustitución del SF_6 ha sido un tema recurrente en las investigaciones de los últimos años. En la actualidad, la International Magnesium Association está coordinando un proyecto de investigación mundial que finalizará en 2004 con el fin de desarrollar y proponer alternativas. Mezclas de gas con HFC-134a ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$) y Novec 612 (perfluoracetona, $\text{C}_3\text{F}_7\text{C}(\text{O})\text{C}_2\text{F}_5$) han sido satisfactoriamente testadas. Hay en marcha un proyecto de investigación en la aplicabilidad de ambos compuestos. HFC-134a cumple las restricciones del protocolo de Kioto. Ambos compuestos muestran un potencial menor de calentamiento global que el SF_6 : SF_6 GWP = 23.900; HFC-134a GWP = 1.300; Novec 612 GWP = 1.

En la actualidad el SO_2 es una alternativa viable. Algunas fundiciones de magnesio tienen una larga experiencia con este gas, ya que nunca llegaron a emplear el SF_6 cuando empezó a utilizarse a principios de los años 1970. El SO_2 reacciona con el magnesio líquido y forma una capa superficial protectora. En el mercado existen sistemas de mezclado de SO_2 a bajas concentraciones y aire. Por otra parte, se han establecido procedimientos de manipulación de SO_2 para limitar exposiciones y riesgos por parte de los trabajadores.

El gas protector se suministra a través de un colector dotado de varias salidas cuyas posiciones se seleccionan para lograr proteger todas las zonas de la superficie metálica. Las áreas situadas cerca de las puertas que se abrirán frecuentemente durante el funcionamiento requieren un mayor flujo de gas que las que no estarán tan expuestas a cambios atmosféricos.

Para optimizar la seguridad y reducir el consumo de gas se utilizan procesos de fusión y colada completamente con atmósfera inerte.

Si la sustitución no resulta factible pueden ponerse en práctica las siguientes medidas técnicas que contribuyen a reducir los niveles de consumo y emisiones de SF_6 :

- mejora del sellado de los hornos;
- dosificación completamente automatizada del gas protector o aislante;
- control electrónico tanto de la mezcla como del flujo de gas;
- reducción de la sobredosificación.

Ventajas medioambientales

La sustitución del SF_6 evita tener que utilizar este gas de efecto invernadero, que tiene un valor GWP de 22.200 y un horizonte temporal de 100 años.

Efectos colaterales

El SO_2 es un gas tóxico que obliga a tener en cuenta los valores límite de exposición de los trabajadores. Los límites de exposición profesional en la mayoría de países se sitúan en 2 ppm (5 mg/m^3) a lo largo de 8 horas. Es posible que en las paredes del horno se formen depósitos con contenido de azufre y oxígeno. En condiciones desfavorables estos depósitos pueden llegar a sumergirse en el caldo, donde provocan reacciones que hacen que el metal salga despedido de la superficie a modo de erupción. Para evitar que esto ocurra hay que eliminar frecuentemente las incrustaciones.

Esta técnica de protección de la colada provoca la emisión de pequeñas cantidades de SO_2 , en función de la capacidad de la fundición y del número de hornos, que según estimaciones podrían alcanzar un total anual de entre 50 y 500 kg.

Datos operativos

El consumo de SF_6 depende de la técnica de fusión empleada y oscila entre menos de 0,1 y 11 kg/tonelada de piezas acabadas. Las mejoras y las medidas técnicas han propiciado una reducción del consumo medio específico de SF_6 , que ha pasado a ser de más de 3 kg/tonelada de pieza a 0,9 kg/tonelada. En el apartado 3.4.1 se dan más detalles sobre su implantación.

En coladas no alteradas el empleo de SO_2 normalmente se limitaría al 0,7% (atmosférico) a una velocidad de flujo de 5 a 10 l/minuto. En los hornos cerrados (pero no herméticos) como los que se utilizan para fundir y dosificar en máquinas de inyección se utiliza SO_2 puro. Para que la cobertura llegue a cubrir eficazmente se necesita que entren pequeñas cantidades de aire a través de la cubierta. Si se utiliza gas portador se suele elegir el nitrógeno al ser inerte. A continuación se mezcla el SO_2 en concentraciones del 1–2%.

En el apartado 4.1.6 se proporcionan los datos de balance másico correspondientes a la refusión sin fundente de chatarra de magnesio.

Aplicabilidad

El potencial de reducción del consumo de SF_6 es considerable, pero por el momento no parece posible sustituirlo por completo en situaciones no conformes. El SO_2 se utiliza, por lo general, en condiciones de colada normales. Cuando se reparan los hornos el SF_6 sigue siendo un gas protector necesario a causa de los riesgos sobre la salud que entraña la exposición al SO_2 . Por otra parte, el SO_2 no puede utilizarse para extinguir fuegos de magnesio; en esos casos deberá utilizarse SF_6 .

Datos económicos

El precio del SF_6 ha aumentado drásticamente en los últimos años, por lo que la sustitución del SF_6 por el SO_2 tendrá un ahorro en costes económicos asociado. En la Tabla 4.16 se muestran estimaciones sobre los costes de funcionamiento que conlleva el uso de SF_6 y SO_2 basadas en la información obtenida de una fundición de inyección dotada de tres máquinas de inyección, así como los resultados de los ensayos realizados a escala industrial. Aunque las cifras sólo son estimativas demuestran claramente que existe un gran potencial de ahorro en la sustitución de SF_6 por SO_2 .

Tabla 4.16. Comparación de costes de SO_2 y SF_6 como gases de cobertura protectora [190, Schubert y Gjestland]

Característica	Unidades	SF_6	SO_2
Concentración del gas	%	0,4	0,7
Precio	EUR/kg	36,5	4,5
Densidad invertida (a 0 °C y 1 atm)	l/kg	153	350
Consumo anual de gas	kg/año	339	259
Coste/año	EUR	12.373	1.165

Datos correspondientes a 3 máquinas de inyección que funcionan durante 300 días/año y 24 h/día con una velocidad de flujo de gas de 10 l/minuto en cada máquina

En caso de que se prevea realizar nuevas inversiones, un sistema de gas SO_2 que cumpla con todas las exigencias actuales de seguridad y dosificación cuesta 70.000 euros (para una planta de 1.000 toneladas/año). En cambio, los sistemas nuevos de SF_6 cuestan 23.300 EUR. La Tabla 4.17 muestra los datos operativos correspondientes a la inversión y al empleo de un 1,5% de SO_2 y un 0,2% de SF_6 , en ambos casos con nitrógeno. El coste anual total del SO_2 se sitúa aproximadamente 2.500 euros por encima del SF_6 , si bien se evitan 12.300

toneladas de emisiones de CO₂ equivalente. Cuanto mayor sea la planta, menos difieren los costes anuales de los dos sistemas. El punto de inflexión se encuentra en las 1.500 toneladas/año de producción; a partir de ahí los costes de reducción de CO₂ pasan a ser negativos.

Tabla 4.17. Datos operativos y de costes de una nueva planta de inyección con una capacidad de 1.000 toneladas/año de Mg [218, Harnisch y Schwarz, 2003]

Datos de moldeo generales		
Capacidad de los hornos	2.000 kg	
Rendimiento máximo de colada	1.000 kg/h	
Horas de fusión diarias (cámara fría)	13,2 h	
Días laborables	250/año	
Utilización	76%	
Peso total de colada (inyectada)	2.000 t/año	
Porcentaje de escoria	50%	
Peso neto de las piezas de Mg	1.000 t/año	
Ventas anuales (15,00 EUR/kg)	15 millones de EUR	
Superficie de los baños de Mg	6 m ³	
Gas (portador + cobertura) por m ² de superficie	300 litros por hora, durante todo el año	
Dosificación adicional de gas durante la carga	+ 25%	
Datos relativos al gas	SF₆	SO₂
Gas portador	nitrógeno	nitrógeno
Concentración del gas protector o aislante en el gas portador	0,2 vol.%	1,5 vol.%
Dosificación de gas protector o aislante por hora	46,9 g	154,2 g
Dosificación de gas protector o aislante por año	514 kg	1.688 kg
Coeficiente gas protector o aislante/producción neta de Mg	0,51 kg/t	1,69 kg/t
Emisiones en toneladas de CO ₂ equivalente	12.278	–
Datos sobre costes	SF₆	SO₂
1 kg de gas protector o aislante	20,00 EUR	3,00 EUR
1 m ³ de gas portador (nitrógeno)	0,20 EUR	0,20 EUR
Coste de inversión en el nuevo equipo de gas	23.333 EUR	70.000 EUR
Porcentaje de descuento por año	10%	10%
Período de amortización	10 años	10 años
Coste anual de inversión en equipo	3.797 EUR	11.392 EUR
Costes operativos del gas protector o aislante	10.274 EUR	5.065 EUR
Costes anuales de explotación (sin incluir el nitrógeno)	14.072 EUR	16.457 EUR
Costes adicionales totales del uso de SO ₂	–	2.385 EUR
Coste de reducción de emisiones específicas	–	0,19 EUR/tonelada de CO ₂ equivalente
Repercusión de costes adicionales sobre las ventas		0,02%

Nota: La mayor parte de los datos sólo son válidos para la planta de 1.000 toneladas/año estudiada y variarían en función del tamaño de la planta.

En las instalaciones existentes la reducción de costes de consumo de SO_2 debe compensar los costes de inversión que implica la adaptación del equipo utilizado para el gas protector o aislante. El tiempo de retorno energético depende del consumo de gas protector o aislante. Tomando como base un consumo de SF_6 de 0,9 kg/tonelada, el punto de inflexión en el que los costes totales de SO_2 resultan inferiores en comparación a los de SF_6 se sitúa por debajo de las 900 toneladas al año de producción. Con una producción de 500 toneladas/año el SO_2 sigue siendo más caro, aunque el coste de reducción específico por tonelada de CO_2 equivalente es de 0,31 euros. La repercusión de los costes adicionales de la planta alcanza el 0,04%. Así pues, a esta capacidad la técnica podría tomarse en consideración.

La conclusión es que resulta rentable utilizar SO_2 como gas protector o aislante en vez de SF_6 en el moldeo a presión del magnesio, al menos en plantas con una producción anual de metal mínima de 500 toneladas, sin que importe si se trata de una planta recién construida o si todavía utiliza SF_6 .

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las medidas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en especial las que incluye el protocolo de Kioto respecto al empleo de gases fluorados: HFC, PFC y SF_6 . Estos gases tienen un gran potencial de efecto invernadero, pero no contribuyen a la reducción de la capa de ozono. Estarán contemplados en la directiva de la UE sobre empleo de gases fluorados. Por otro lado, algunas regiones ya han presentado propuestas para prohibir su uso, por ejemplo Dinamarca, Alemania u Austria.

Ejemplos

LM Leichtmetall Systemtechnik, Felbach (Alemania)

En Austria, Dinamarca o Suecia ya no se puede utilizar SF_6 como gas protector o aislante.

Publicaciones de referencia

[182, Closset, 2002], [190, Schubert y Gjestland], [191, IMA, et al.], [192, Gjestland y Westengen, 1996], [194, UNEP IPCC, 2002], [218, Harnisch y Schwarz, 2003]

4.2.8. Tratamiento de metales no féreos

4.2.8.1. Desgasificación para depuración del aluminio

Descripción

La desgasificación del aluminio es necesaria para extraer el hidrógeno del caldo. Para eliminar o reducir la presencia de pequeñas cantidades de elementos nocivos o impurezas debe tratarse la colada con halógenos como cloro, flúor o bromo. El tratamiento se llama depuración y normalmente se combina con la desgasificación.

La adecuada desgasificación a través de procesos físicos de tratamiento no permite limpiar lo suficiente la mayoría de las piezas de aluminio. La desgasificación a vacío consigue una gran reducción del contenido de hidrógeno del caldo pero, a la vez, el menor número de núcleos puede provocar que la cristalización sea menos efectiva.

El proceso combinado de desgasificación y depuración consiste en introducir en la colada mezclas de gases como argón y cloro o nitrógeno y cloro. La concentración de cloro en el gas portador debe optimizarse para garantizar una buena depuración y un bajo nivel de emisiones. En la mayoría de casos sólo se necesita un tratamiento de desgasificación, que se realiza con gas Cl_2 . Dependiendo del recipiente donde se lleve a cabo el tratamiento la eficiencia de la desgasificación puede mejorarse mediante tapones porosos e impulsores.

MTDs para forja y fundición

En algunos casos aislados se ha utilizado una mezcla de Ar/SF₆. El segundo componente es un gas de efecto invernadero con gran potencial de calentamiento global regulado en el protocolo de Kioto (véase también apartado 4.2.7.1).

Ventajas medioambientales

El uso de impulsores con Ar/Cl₂ o N₂/Cl₂ evita tener que utilizar hexacloroetano en el tratamiento de depuración del aluminio. El uso de hexacloroetano está prohibido en la UE desde el 30 de junio de 2003.

Efectos colaterales

La utilización de este tipo de unidad de desgasificación ha permitido poner fin al uso de hexacloroetano en la depuración y la desgasificación.

Datos operativos

Para la desgasificación/depuración combinados se utiliza normalmente una mezcla de nitrógeno con un 3% de Cl₂. Si sólo se lleva a cabo la desgasificación el Cl₂ no es necesario.

Para los hornos de mantenimiento y cucharas de aluminio de 50 – 250 kg puede utilizarse un equipo impulsor móvil. El tratamiento dura de 3 a 5 minutos. A mayores capacidades (entre 400 y 1.000 kg) se utiliza una unidad de tratamiento del metal que trata la colada durante 1,5 a 5 minutos con un flujo de gas de entre 8 y 20 litros/minuto. El rotor de grafito tiene una vida de 100 – 150 tratamientos, dependiendo de la temperatura de la colada.

Aplicabilidad

Los impulsores se han desarrollado para su uso en hornos de mantenimiento y cucharas con una capacidad de aluminio fundido de entre 50 y 1.000 kg.

Datos económicos

Los costes de inversión figuran en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Costes de inversión de una planta impulsora [178, Wenk, 1995]

Descripción	Coste (EUR)
Planta impulsora, accesorios incluidos	15.000
Instalaciones para el mezclado de gas argón y cloro	40.000
Total	55.000

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la Directiva 97/16/EC que prohíbe el uso de hexacloroetano en la fabricación o el procesamiento de metales no ferreos.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones de aluminio.

Publicaciones de referencia

[175, Brown, 1999], [178, Wenk, 1995].

4.3. Producción de moldes y machos, preparación de la arena incluida

4.3.1. Elección del tipo de molde

La elección del tipo de molde se basa normalmente en criterios técnicos. La aplicabilidad de los distintos tipos de moldeo se resume en la Tabla 4.19. A continuación, en la Tabla 4.20, se aportan datos generales sobre los distintos sistemas.

Tabla 4.19. Aplicabilidad de los distintos tipos de moldeo [126, Teknologisk, 2000]

	Moldes perdidos				Moldes permanentes				
	Métodos de moldeo				Técnica de vaciado				
	Moldeo en arena verde	Cáscara (Investment casting)	Fenólico/furano	Pep-Set/vidrio soluble	Inyección a baja presión	Inyección (caliente)	Inyección (frío)	Moldeo por centrifugación	Moldeo continuo
Hierro									
Fundición gris	X	X	X	X	O			X	X
Fundición nodular	X	X	X	X				X	X
Fundición maleable	X	O	X	O					
Fundición blanca	X	X	X						
Acero									
No aleado	X	X	X	X				X	
De baja aleación	X	X	X	X				X	
De manganeso de alta aleación	X	X	X	X				X	
Inoxidable resistente al calor	X	X	X	X			O	X	
Metales pesados									
Latón	X	X	X	X	X				
Bronce	X	X	X	X					
Cobre	X	X	X	X	X		X	X	X
Aleaciones de zinc					O		X	X	
Aleaciones ligeras									
Aleaciones de aluminio	X	X	X	X	X		X		X
Aleaciones de magnesio	X	O	X	X	X	X	X		
Aleaciones de titanio	O	O	X	X	O				

X: Método válido

O: Método válido pero poco utilizado

Tabla 4.20. Propiedades técnicas de varios tipos de moldeo [42, US EPA, 1998]

	Moldeo en arena verde	Arena química	Llenado a baja presión y por gravedad	Moldeo a alta presión
Coste relativo en función de la cantidad	Bajo	Medio-alto	Bajo	Muy bajo
Coste relativo (cantidades pequeñas)	Muy bajo	Medio-alto	Alto	Muy alto
Peso de pieza permitido	Hasta aprox. 1 tonelada	Hasta varios centenares de toneladas	50 kg	30 kg
Espesor mínimo de pared que se puede obtener, en centímetros	0,25	0,25	0,3	0,08
Tolerancia dimensional característica, en cm (sin incluir juntas divisorias)	0,03	0,02	0,07	0,02
Acabado superficial relativo	Aceptable a bueno	Aceptable a bueno	Bueno	Muy bueno
Propiedades mecánicas relativas	Buenas*	Buenas*	Buenas*	Muy buenas
Facilidad de moldeo relativa (piezas complejas)	Aceptable a buena	Buena	Aceptable	Buena
Posibilidad de cambiar el diseño durante la producción	Excepcional	Aceptable	Baja	Muy baja
Tipo de aleaciones que se pueden obtener	Ilimitadas	Ilimitadas	Preferiblemente de cobre o metales con bajo punto de fusión	Preferiblemente de aluminio o metales con bajo punto de fusión

* Propiedades mecánicas que pueden potenciarse mediante tratamiento térmico

4.3.2. Moldeo con arena ligada con arcilla (moldeo en arena verde)

4.3.2.1. Preparación de la arena ligada con arcilla por mezclado y enfriamiento al vacío

Descripción

El proceso de mezclado y enfriamiento se realiza en una única fase. Para ello se utiliza un mezclador de arena a presión reducida que provoca enfriamiento a causa de la vaporización controlada del agua. Este mezclador especial debe tener un cierre hermético para lo que dispone de una carcasa estanca conectada al sistema de vacío. En la Figura 4.6 se muestra el diseño del sistema.

A diferencia de una planta de mezclado normal (Figura 2.28), esta técnica no necesita un enfriador independiente ni equipos auxiliares y el sistema de vacío utilizado puede tener un tamaño más compacto. Puesto que el flujo total de aire se reduce, el equipo de vacío tiene un filtro de extracción de polvo central de menor tamaño. El tamaño y el consumo de energía del filtro son un 50% inferiores a los de las plantas convencionales. La reducción del flujo de aire provoca una menor eliminación de la bentonita activa y, por tanto, una reducción general del consumo de aditivos. Al utilizarse dentro de un equipo cerrado, esta técnica no se ve afectada por las condiciones climáticas externas.

El uso de vapor en ausencia de aire permite la rápida activación de la bentonita y, como resultado, que la arena aglomerada alcance rápidamente el nivel óptimo de resistencia a la compresión.

El agua se añade en dos fases distintas:

- para humedecer la arena sobrante hasta que tenga el mismo contenido de agua que la arena preparada;
- para enfriar la arena por vaporización para que alcance la temperatura necesaria de 38 – 40 °C.

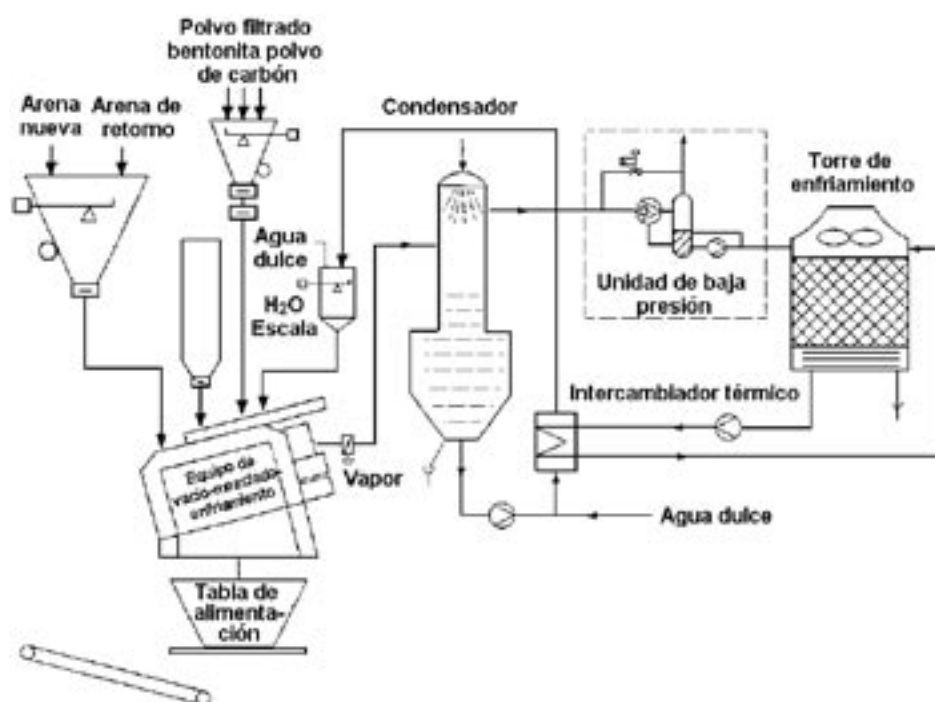


Figura 4.6.
Instalaciones de preparación de la arena de moldeo mediante mezclador-enfriador a vacío [207, Drews, 1996]

La desventaja del sistema radica en el funcionamiento y la gestión del sistema de vacío. El proceso también afecta a las propiedades técnicas de la arena (por ejemplo, su resistencia a la compresión y a la tracción o su permeabilidad), que disminuyen tras 72 horas. Para evitarlo puede realizarse un remezclado durante 90 segundos.

Ventajas medioambientales

La reducción del flujo de aire total provoca una disminución del volumen de gases de combustión y de la cantidad de partículas que deben eliminarse, así como del consumo de aglomerante en comparación con las plantas de enfriamiento y mezclado convencionales (aunque también depende de la eficiencia de las instalaciones de regeneración). Además, este sistema emplea menos energía.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica puede utilizarse en las instalaciones nuevas de arena verde.

Datos económicos

Los límites comerciales de su aplicación son, a parecer, los procesos en los que es necesario el enfriamiento de la arena y que tienen una capacidad de más de 60 toneladas de arena por hora.

Ventajas de la implantación

Reducción de la cantidad de polvo destinada a eliminarse y minimización de consumo de aditivos. Limitaciones de espacio.

Ejemplos

En Japón existe una planta de mezclado y enfriamiento a vacío en funcionamiento desde 1993, con una producción de arena preparada de 100 m³/h.

En la actualidad hay varias instalaciones de este tipo en funcionamiento en Italia, Francia, Alemania e Inglaterra.

Publicaciones de referencia

[143, Inasmet y CTIF, 2002], [207, Drews, 1996], [214, Gerl, 2003]

4.3.3. Producción de moldes y machos en arena química

4.3.3.1. Minimización del consumo de aglomerante y resina

Descripción

Es posible minimizar el consumo de sustancias químicas optimizando el control de procesos y la manipulación de materiales (este último aspecto se analiza en detalle en el apartado 4.1). En el presente apartado se tratan las medidas relativas al proceso.

Una de las formas más habituales de desperdiciar sustancias químicas aglomerantes consiste en usarlas en exceso para compensar el escaso control del proceso. Los principales parámetros que contribuyen a mejorar la gestión de los aglomerantes son:

- *Calidad de la arena:* uso de arena de calidad apropiada para el sistema aglomerante. El correcto almacenamiento de la arena y la realización de pruebas (pureza, tamaño de grano, forma, humedad) tienen una gran importancia. Si el contenido de finos es bajo y la cantidad de arena reutilizada elevada se reducirá la cantidad de resina necesaria.
- *Control de la temperatura:* la temperatura de la arena debe mantenerse dentro de un margen estrecho mediante comprobaciones periódicas y ajustes en la cantidad de endurecedor añadido. Si se coloca el calentador de arena inmediatamente antes del mezclador podrá controlarse con exactitud la temperatura.
- *Mantenimiento y depuración del mezclador.*
- *Calidad del molde:* comprobación, resolución y prevención de defectos de moldeo.
- *Porcentaje de adición:* la cantidad de aglomerante necesaria depende del tipo de aglomerante, el área superficial de la arena y el tamaño de la pieza.
- *Funcionamiento del mezclador:* para optimizar el funcionamiento del mezclador debe controlarse y llevarse un seguimiento de su funcionamiento.

La Tabla 4.21 muestra las variables del proceso de mezclado fáciles de medir utilizando instrumentos y sistemas disponibles en el mercado. Por ejemplo, si se acoplan los controles a un sistema de alarma el operador será alertado cada vez que se produce una situación «no conforme», que deberá corregirse mediante la depuración, el mantenimiento y la recalibración antes de que el problema sea más grave.

Tabla 4.21. Variables de proceso y rendimiento del mezclador [71, ETSU, 1998]

Variables de proceso	Comentarios	Instrumentos
Flujo de arena	Puede variar a consecuencia de obstrucciones en la puerta de descarga que reducen o detienen el flujo de arena o a causa de tuercas de retención gastadas o sueltas que aumentan la rapidez del flujo	Medidores de flujo en la placa de impacto

.../...

.../...

Variables de proceso	Comentarios	Instrumentos
Temperatura de la arena	Determina la velocidad del endurecimiento y el tipo y la cantidad de endurecedor necesarios	Con un instrumento de control de procesos se pueden ajustar las adiciones de endurecedor para compensar los cambios de temperatura de la arena
Consumo de energía	Es un indicador del estado de limpieza del mezclador	Sistema de seguimiento de la carga del motor
Velocidad de flujo de resina y endurecedor	Puede variar si las bombas están desgastadas, a causa de cambios de viscosidad provocados por la temperatura, por atascos o fugas en las tuberías e inyectores, bloqueo de las válvulas de retención, etc.	Medidores de flujo de desplazamiento positivo, electromagnético o de Coriolis
Horas de funcionamiento	Es útil para evaluar el rendimiento respecto a los costes de mantenimiento y capital	

Existen varios sistemas de control del mezclador completamente automatizados para las fundiciones que necesitan equipos más sofisticados. Estos sistemas utilizan un microprocesador que permite realizar un control correctivo automático de la producción de arena mezclada y que sólo requieren accionamiento limitado por parte del operador. Las ventajas adicionales que posibilitan se deben básicamente a la dependencia mucho menor en la intervención del operador y en la corrección más rápida de las condiciones variables, para la que ni siquiera es necesario detener la producción.

Ventajas medioambientales

La optimización del uso de aglomerante y resina conlleva una minimización del consumo de aditivos químicos.

Los compuestos orgánicos volátiles representan entre el 50 y el 60% del peso de los componentes aglomerantes, aunque la cantidad depende del sistema utilizado. La mayoría de ellos se emiten durante el mezclado de la arena y el vaciado de metal. Si se reduce el consumo de aglomerante se reducen proporcionalmente las emisiones de COV.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

En la mayoría de casos se obtienen fácilmente reducciones del nivel de aglomerante del 5% y del 1% de chatarra de moldes utilizando sistemas modernos de control del mezclado. Muchas fundiciones han conseguido ahorros considerablemente superiores. Existen datos de varias fundiciones que han logrado reducir las adiciones de aglomerante entre un 5 y un 25%, así como prácticamente eliminar la chatarra de moldes.

La instalación de un sistema de control automatizado del mezclado en una fundición de hierro que utilizaba resinas de endurecimiento en frío permitió reducir los niveles de adición de resina de 10 kg/minuto (1,22% de resina respecto al peso de la arena) a 8,89 kg/minuto (1,09%), lo que representó un ahorro de catalizador del 10%. El número de moldes defectuosos descendió en más del 60% y el ahorro de costes alcanzó más de 37.000 GBP/año (precios del RU en 1995).

Aplicabilidad

Esta técnica resulta válida para cualquier fundición, nueva o existente, que emplee arena química. El equipo de control del mezclado puede adaptarse a plantas ya existentes.

Datos económicos

La cantidad de aglomerante necesario por tonelada de arena mezclada sólo representa normalmente entre el 1 y el 3% del peso de la arena, pero su coste equivale al 30–60% del total de materias primas. El porcentaje de ahorro de costes que se obtendría con una mejor gestión de los materiales aglomerantes se estima en el 5–10%.

Instalar todos los equipos que figuran en la Tabla 4.21 en un sistema de mezclado costaría unas 10.000 GBP (precios del RU de 1997). Sin embargo, a causa de la mejora significativa del control de procesos que conlleva esta inversión tiene un tiempo de retorno energético relativamente breve. Aunque los costes de instalación de un sistema de control automatizado son de aproximadamente el doble que los del simple seguimiento de la línea, representan un ahorro sustancial.

En la Tabla 4.22 figuran algunos datos económicos a modo de ejemplo. Corresponden a la fundición de hierro que aparece bajo el epígrafe «Datos operativos» de este apartado.

Tabla 4.22. Ejemplo de ahorro anual, costes y retorno energético de un sistema de control de mezclado (precios de 1995) [75, ETSU, 1996]

Tipo de coste	EUR
Ahorro por un descenso del 60% de moldes defectuosos	6.416
Ahorro por la reducción del 10% del uso de resina	29.966
Ahorro por la reducción del 10% del uso de catalizador	9.050
Ahorro total en costes de material	45.433
Coste de funcionamiento anual	320
Coste estimado de mantenimiento anual	24
Ahorro de costes neto	45.088
Coste de adquisición unitario	24.166
Tiempo de retorno energético	7 meses

Ventajas de la implantación

Optimización de costes operativos y minimización de emisiones de COV.

Ejemplos

La gran mayoría de fundiciones que utilizan arena ligada ponen en práctica medidas de gestión del aglomerante apropiadas.

Publicaciones de referencia

[71, ETSU, 1998], [75, ETSU, 1996], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

4.3.3.2. Minimización de pérdida de arena en moldes y machos

Descripción

Las máquinas de producción de machos y moldes modernas permiten almacenar los parámetros de producción de los distintos tipos de productos en una base de datos electrónica. De este modo se puede cambiar de produc-

to fácilmente sin perder material ni tiempo en buscar los parámetros apropiados a través, simplemente, de la realización de pruebas y el análisis de los errores. En cuanto a los nuevos productos, pueden usarse los parámetros establecidos para productos similares y así reducir el período de optimización.

Ventajas medioambientales

Disminución de la cantidad de arena residual y de energía gracias a la reducción al mínimo del período de pruebas de funcionamiento.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Producción en serie de pequeños lotes con una elevada productividad. Para que no haya errores al cambiar de producto debe llevarse un buen control de la arena y procurar que su calidad sea constante.

Datos económicos

Los costes de inversión de una disparadora de machos dependen del volumen de éstos; puede oscilar entre los 150.000 (5 l) y los 400.000 (100 l) euros. Los costes operativos representan un 5–10% de los costes de inversión anuales.

Ventajas de la implantación

Optimización de procesos en los que es necesario cambiar a menudo de tipo de molde o macho.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en varias fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[110, Vito, 2001]

4.3.3.3. MTD para los procesos de fraguado en frío

- *Fenólico*: la temperatura de la arena se mantiene todo lo constante que resulta posible, normalmente alrededor de 15–25 °C, temperaturas lo suficientemente bajas para evitar las emisiones provocadas por la evaporación. Debe evitarse el contacto directo entre resina y catalizador, ya que se produce una reacción exotérmica que puede ser violenta.
- *Furánico*: la temperatura de la arena es muy importante en este proceso y se mantiene todo lo constante que resulta posible, normalmente alrededor de 15 – 25 °C para controlar el tiempo de fraguado del aglomerante y minimizar las adiciones de catalizador. Debe evitarse el contacto directo entre resina y catalizador, ya que se produce una reacción exotérmica que puede ser violenta.
- *Poliuretano (isocianato fenólico)*: la arena se mantiene a una temperatura de entre 15 y 25 °C para permitir el control del proceso y minimizar las emisiones. Las mejores prácticas consisten en utilizar tres bombas y mezclar el catalizador y la resina fenólica con el isocianato y la arena directamente en el mezclador [202, TWG, 2002].
- *Resol – éster* (fraguado con éster fenólico alcalino): la temperatura de la arena se controla para mantenerla dentro de un margen constante de 15 – 35 °C. Este proceso es menos sensible a las variaciones de tempera-

tura que los otros sistemas de autofraguado. La velocidad de aglomeración se controla al elegir el tipo de endurecedor [225, TWG, 2003].

- *Silicato éster*: la temperatura se controla y mantiene dentro de los 15 – 25 °C. Dado que los moldes y machos absorben humedad deben utilizarse tan pronto como sea posible una vez han alcanzado su resistencia máxima. El almacenamiento sólo se puede prolongar en condiciones medioambientales secas.

4.3.3.4. MTD para procesos de fraguado con gas

- *Caja fría*: los vapores de aminas deben recogerse en la máquina de producción de machos. La caja de machos captura el exceso de aminas. Por otro lado, puede que sea necesario ventilar la zona de almacenamiento de machos. Cuando sea posible deben colocarse campanas extractoras sobre las máquinas de producción de moldes o machos, además de sobre la zona de almacenamiento temporal de machos.

El consumo de aminas puede reducirse hasta equiparlo a las necesidades de producción de los machos de arena, ya que los costes de las materias primas y su tratamiento son elevados. A la minimización del consumo de aminas contribuye la optimización del proceso de distribución de las aminas en el interior del macho, normalmente mediante la simulación y la optimización del flujo de gas [202, TWG, 2002].

La temperatura de la arena debe mantenerse todo lo constante que sea posible, entre 20 y 25 °C; de lo contrario las temperaturas excesivamente bajas prolongarán el período de gasificación, lo que provoca un aumento en el consumo de aminas. Si la temperatura es demasiado alta se reduce el tiempo de vida de la arena preparada.

El agua es perjudicial para este proceso. La humedad de la arena debe mantenerse por debajo del 0,1%, y la gasificación y la purga deben realizarse con aire seco.

Nota: Las aminas son inflamables y explosivas al mezclarse en determinadas proporciones con el aire. Deben extremarse las precauciones durante su almacenamiento y manipulación y observarse en todo momento las instrucciones del proveedor.

- *Resol (fraguado con formiato de metilo fenólico alcalino)*: se recomienda ventilar la zona de trabajo, al menos para evitar posibles riesgos de incendio. El consumo de formiato de metilo debe reducirse hasta equiparlo a las necesidades de producción de moldes de arena. La temperatura de la arena debe mantenerse por encima de los 20 °C para evitar que el formiato de metilo se condense. Los vapores de formiato de metilo son más pesados que el aire, un aspecto que debe tenerse en cuenta al diseñar la línea de gases.

Nota: El formiato de metilo es inflamable si su concentración en el aire alcanza del 6 a 20% y explosivo al mezclarse con el aire en determinadas proporciones. Deben extremarse las precauciones durante su almacenamiento y manipulación y observarse en todo momento las instrucciones del proveedor.

- *Resol- CO_2* : la resina tiene un contenido bajo de fenol y formaldehído sin reaccionar y los niveles de emisión, incluso durante los procesos de tratamiento con gas y purga, son muy bajos. Se recomienda ventilar la zona de trabajo. [225, TWG, 2003].

- *Resina fenólica y furánica curada con SO_2* : la zona de trabajo debe ventilarse y las emisiones captarse en el punto de emisión cubriendo por completo las máquinas de producción de moldes o machos con una campana extractora.

Los gases recogidos deben tratarse antes de su emisión. Suele hacerse sin dificultades con un equipo de depuración que contiene una solución de hidróxido de sodio. El pH y la concentración de la solución depuradora deben controlarse constantemente. La solución tiene que sustituirse cada cierto tiempo para extraer las sales acumuladas, que deben tratarse como residuo peligroso.

El consumo de dióxido de azufre debe minimizarse de modo que coincida con las necesidades de producción de machos de arena.

Normalmente el ciclo de purga dura 10 veces más que la gasificación.

- *Resinas epoxi/acrílicas curadas con SO_2 (curado por radicales libres)*. Al igual que sucede con el proceso de gasificación y purga, la recogida y el tratamiento de los gases se explican en el apartado referente a la resina fenólica y furánica curada con SO_2 . Las siguientes condiciones de gasificación son necesarias para obtener machos de buena calidad:

- la arena debe estar seca antes de usarse;
- el aire soplado o inyectado debe secarse también;
- la concentración de dióxido de azufre en el CO_2 o nitrógeno puede oscilar entre el 5% y el 100%, dependiendo de la resina utilizada (concentraciones mínimas en el caso de la resina acrílica y máximas si es epoxi/acrílica);
- el ciclo de purga dura 10 veces más que el de la gasificación.

4.3.3.5. Sustitución de recubrimientos con base de alcohol por recubrimientos al agua

Descripción

Los recubrimientos se aplican en la superficie de machos y moldes para crear una barrera de refractario en el interfaz entre molde y metal y para garantizar un buen aspecto superficial. Los recubrimientos reducen la formación de vetas, los defectos por erosión y penetración del metal y contribuyen a disminuir la necesidad de tratamientos de acabado. Los recubrimientos con base de alcohol normalmente utilizan alcohol isopropílico. La capa se seca por evaporación o por calcinación del didisolvente y al hacerlo emite COV. Por ello se han desarrollado recubrimientos alternativos con base acuosa.

Ventajas de utilizar recubrimientos de base acuosa:

- seguridad (no hay riesgo de incendio);
- salud de los trabajadores (menor exposición a vapores orgánicos);
- coste reducido de los reactivos (agua frente a alcohol);
- mejor acabado superficial de las piezas.

Dificultades de implantación:

- se requiere más tiempo y espacio (para el proceso). Los machos, además, tienen un tiempo de secado más largo que obliga a utilizar una línea de secado dotada de horno de secado;
- los cambios de proceso necesitan un período de optimización caso por caso;
- aumento de bacterias que acortan la duración útil de los recubrimientos (1-2 semanas) y provocan problemas de olores;
- nuevos costes de homologación por parte de clientes concretos de aplicaciones aeroespaciales y de defensa.

Los recubrimientos al agua pueden secarse a temperatura ambiente o bien en hornos de secado, microondas o infrarrojos. Normalmente requieren un tiempo de secado mas prolongado en comparación con los recubrimientos con base de alcohol. Durante el secado no se generan emisiones, pero sí olores. El secado se realiza en una línea de secado, durante el transporte de los machos del área de confección a la de ensamblaje de moldes. La línea puede atravesar a su paso un horno de secado. El secado mediante hornos microondas o infrarrojos se utiliza para series pequeñas, medianas y grandes.

Las distintas propiedades reológicas de los recubrimientos al agua en comparación con los de base de disolvente han hecho necesario el desarrollo de nuevas técnicas de aplicación que contribuyen a que la calidad de los recubrimientos sea constante.

Ventajas medioambientales

En un análisis del ciclo de vida (ACV) se ha evaluado el impacto medioambiental de los recubrimientos con base de alcohol y de agua. El empleo de estos últimos y su secado a temperatura ambiente muestran ventajas medioambientales claras, básicamente a causa de la reducción de emisiones de COV y el menor uso de energía. Cuando se secan mediante estufa la reducción de emisiones se ve parcialmente compensada (desde el punto de vista del ACV) por el mayor uso de energía. El índice medioambiental general correspondiente al estufado muestra una ligera ventaja respecto al uso y la calcinación del alcohol isopropílico (IPA).

Efectos colaterales

Los recubrimientos acuosos contienen numerosas sustancias químicas (orgánicas) que potencian sus propiedades y que también afectan al nivel de emisiones durante el desmoldeo.

El secado de recubrimientos de base acuosa aumenta la volatilización de los didisolventes del aglomerante. Como consecuencia pueden generarse olores principalmente por la evaporación de didisolventes con contenido de BTX que se utilizan para los machos.

Los recubrimientos de base acuosa requieren un mayor uso de energía a causa del transporte (durante el secado con aire) y del secado en el horno.

El secado a temperatura ambiente puede provocar una reducción de la temperatura ambiente de la fundición. En una fundición de los Países Bajos se registró un descenso general de la temperatura ambiente de 2 °C. Esta disminución provoca un mayor consumo de combustible usado para el calentamiento en invierno.

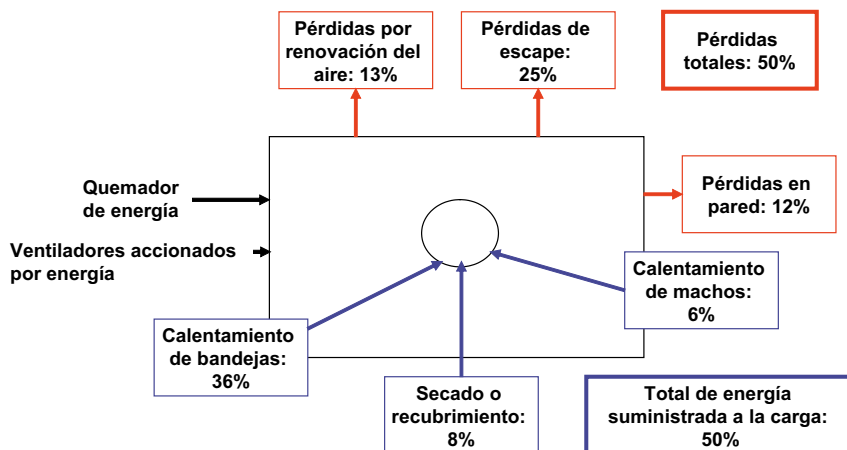
Datos operativos

La sustitución de recubrimientos con base de IPA por otros de base acuosa se está extendiendo entre las fundiciones en la actualidad. Las fundiciones dedicadas a la fabricación de piezas para automoción han adaptado la mayor parte de su producción a los recubrimientos de base acuosa y han limitado el uso de los de base de disolvente a determinadas aplicaciones (véase aplicabilidad).

Los datos operativos corresponden a una fundición de los Países Bajos. Si el secado se produce a temperatura ambiente, la velocidad del aire se convierte en el factor más influyente (más que la temperatura o la humedad). Para que la velocidad del aire fuera suficiente durante el recorrido en la fundición se instalaron ventiladores adicionales. Para alcanzar una calidad apropiada y constante, el contenido de finos de la arena (regenerada) utilizada para confeccionar los machos se redujo. Los recubrimientos al agua pueden provocar la dilatación de las partículas de los finos residuales (bentonita y polvo de carbón) y, en consecuencia, defectos en los machos.

Los datos operativos se han recabado de una fundición francesa dotada de una estufa con capacidad para 540 cajas frías para machos calentada mediante un quemador de gas natural. Dos ventiladores se encargaban de evacuar el humo y aportar aire fresco. La temperatura nominal del aire caliente era de 165°C. Se estableció un balance térmico tomando como referencia machos de 0,4 kg con una humedad del 5,5%. Este balance, que se muestra en la Figura 4.7, es válido para una producción de 390 machos, equivalente al 72% de la capacidad total.

Figura 4.7.
Balance térmico de una estufa de secado de machos funcionando al 72% de su capacidad
[143, Inasmet y CTIF, 2002]



El balance muestra que el 50% de la energía se pierde y que, de hecho, sólo se utiliza de forma efectiva menos del 10% en el secado de los machos. El balance proporciona un consumo de 8,5 kWh por kg de agua evaporada, equivalente a 465 kWh por tonelada de machos con una producción de 156 kg/h. Si la estufa funciona a baja capacidad las pérdidas aumentan aún más. Mediciones similares obtenidas de otra fundición confirman las elevadas pérdidas (>50%) y el bajo uso energético efectivo (<10%). La eficiencia energética puede aumentar realizando el secado por microondas, como se analiza en el apartado 4.3.3.6.

Aplicabilidad

Los disolventes de base acuosa son válidos para la mayoría de situaciones, pero en algunos casos concretos los recubrimientos con base de alcohol no pueden sustituirse y deben, por tanto, seguir empleándose:

- si los machos/moldes son grandes o complejos, lo que podría provocar problemas de secado a causa de las dificultades que tendría el aire de secado para penetrar en su interior;
- si las arenas se aglomeran con vidrio soluble;
- en la fundición de Mg: el agua forma $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y origina problemas técnicos;
- en la producción de acero al manganeso con recubrimiento de MgO .

La implantación de los recubrimientos de base acuosa es aplicable a las fundiciones que producen grandes series y a gran escala; en el caso de instalaciones más pequeñas, nuevas o existentes, ésta puede verse afectada por problemas técnicos o económicos.

Datos económicos

Los costes de inversión dependen de varios factores como el espacio disponible en la fundición para la línea de secado, la elección de la técnica de secado o la necesidad de adaptar la mezcla de arena.

La sustitución íntegra de los recubrimientos con base de alcohol por acuosos en una fundición de hierro holandesa donde se lleva a cabo secado al aire ambiente supuso una inversión total de 71.000 euros. Estos costes incluyen la instalación de ventiladores y la optimización de la calidad de la arena. La reducción de emisiones de IPA fue de 161 toneladas al año (equivalente a 62,5 euros/tonelada).

Los costes operativos, que incluyen el mayor control necesario de moldes y machos (viscosidad, espesor de capa, contenido de agua, calidad del producto), ascienden a 9.000 EUR/año. Para el secado de una tonelada de recubrimiento se consumen 2.100 kWh de energía.

Una de las ventajas desde el punto de vista económico es la reducción de los costes de adquisición de disolvente. Se tienen datos de algunas fundiciones de gran tamaño en las que la inversión en sistemas de base acuosa tuvo un período de retorno de 2 años, y ello teniendo en cuenta únicamente la reducción de costes de adquisición del alcohol.

Los costes operativos del secado ascienden a 0,01 euros/kg (fundición no férrea de Francia).

Ventajas de la implantación

Responder a la creciente presión de las autoridades respecto a las emisiones orgánicas.

Ejemplos

- PSA Sept-Fons (Francia);
- Fonderie Bréa, Montluçon (Francia);
- De Globe b.v., Weert (Países Bajos).

Publicaciones de referencia

[129, infoMil, 1999], [143, Inasmet y CTIF, 2002], [149, Beauvais y Choplin, 2001]

4.3.3.6. Secado por microondas de recubrimientos de base acuosa

Descripción

Los recubrimientos de base acuosa requieren secado. La utilización de hornos microondas representa, en este sentido, ventajas operativas en comparación con el secado con aire ambiente o caliente. Las microondas empleadas tienen una frecuencia de 2.450 MHz y las siguientes propiedades:

- buena selectividad en la transferencia de la energía: La energía de las microondas se transmite de forma preferente a las moléculas de agua frente a las de la arena. De este modo se produce un secado homogéneo y preferente de la superficie, incluso en machos complejos;
- acoplamiento adaptativo: Este sistema de secado provoca la homogeneización de la humedad del material sin necesidad de intervenir;
- secado rápido: La velocidad de secado depende de la potencia utilizada. A mayores velocidades se limita el tiempo de contacto entre el agua y el macho, lo que contribuye a la buena estabilidad mecánica de los mismos.

La utilización del secado por microondas presenta dificultades en los siguientes casos:

- cuando la carga del horno no es homogénea (dentro de un margen de masas y volúmenes de macho);
- si se utilizan machos o material con contenido de hierro;
- si el secado de las zonas de mayor grosor de recubrimiento no es homogéneo;
- en caso de riesgo de deformación de machos complejos.

Ventajas medioambientales

Aumento de la eficiencia energética del proceso de secado.

Efectos colaterales

El secado por microondas también da lugar a reacciones de polimerización más completas. Como resultado se reducen las emisiones gaseosas de las fases previas del proceso de fundición (vaciado, enfriamiento, desmoldeo).

Datos operativos

El empleo del secado por microondas todavía no se ha implantado a escala industrial, aunque sí se han realizado algunos ensayos industriales, los resultados de los cuales se muestran a continuación. Una de las campañas de prueba se ha realizado con un horno microondas de 50 kW, con una carga de 800 machos, el 50% de su capacidad. Los machos se colocan sobre bandejas de plástico que las microondas no calientan. El balance térmico que se muestra en la Figura 4.8 indica que más del 30% de la energía de entrada va destinado al secado. Por otro lado, los machos sólo se calientan ligeramente (su temperatura de salida es de 40 °C), por lo que pueden manipularse de inmediato. La Tabla 4.23 muestra los resultados de dos campañas y los compara con campañas equivalentes realizadas en hornos de aire caliente (como se describe en el apartado 4.3.3.5).

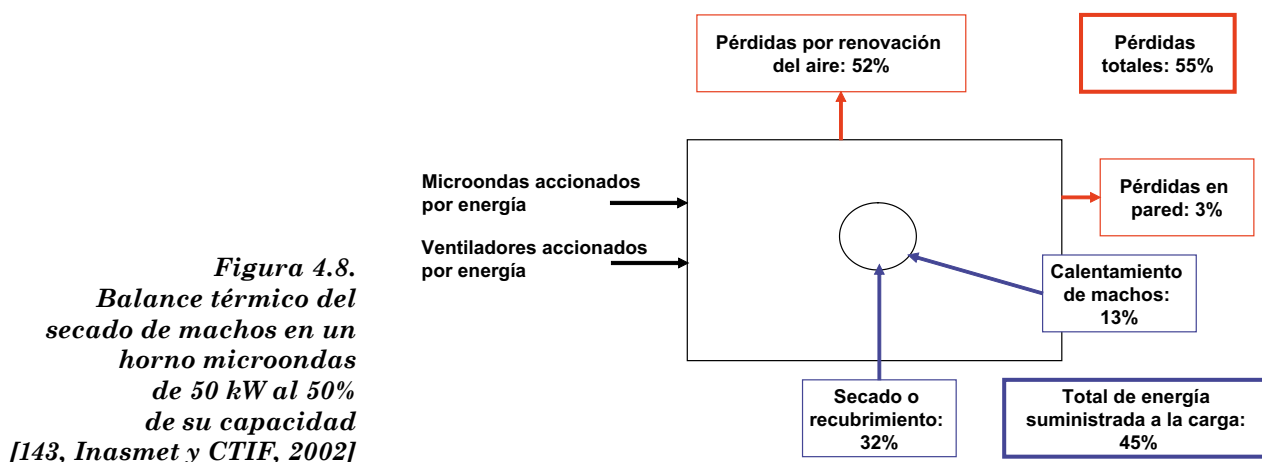


Tabla 4.23. Resultado de las campañas de prueba de secado de machos por microondas y por aire caliente [143, Inasmet y CTIF, 2002]

Tipo de horno	Fundición A	Fundición B	Fundición B	Fundición C
	Aire caliente	Aire caliente	Microondas	Microondas
Carga de machos	156 kg/h	270 kg/h	800 kg/h	500–900 kg/h
Humedad	5,5%	2,7%	2,7%	2 – 3,2%
Suministro de energía térmica	73 kW	70 kW	50 kW	40 kW
Duración	48 min.	113 min.	8 min.	8 min.
Consumo específico por kg de agua evaporada	8,5 kWh	9,3 kWh	2,3 kWh	2 kWh
Consumo específico por tonelada de machos húmedos	465 kWh	280 kWh	63 kWh	–

Los datos muestran que los tiempos de secado se reducen considerablemente, de 1–2 h a menos de 10 minutos. El consumo de energía también se reduce entre 4 y 5 veces y el rendimiento total aumenta.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable al secado de todos los recubrimientos de base acuosa y permite adaptar estos recubrimientos, más versátiles, a machos de formas más complejas y series más pequeñas.

Datos económicos

El secado por microondas tiene unos costes de inversión elevados, proporcionales, en realidad, a la potencia necesaria, que a su vez se corresponde con la cantidad de agua que deberá evaporarse. Los elevados costes de inversión se ven compensados en parte por los siguientes aspectos:

- mayor eficiencia energética a causa del consumo de electricidad en vez de gas en el horno de aire caliente;
- reducción de costes por la utilización de sistemas de base acuosa en vez de con base de disolvente;
- costes de mantenimiento inferiores gracias al menor tamaño de las instalaciones en comparación con el uso de sistemas de secado por aire (caliente) o líneas de enfriamiento.

Ventajas de la implantación

Responder a la creciente presión de las autoridades respecto a las emisiones orgánicas y a la necesidad de incrementar la eficiencia energética.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en algunas fundiciones de Francia y España.

Publicaciones de referencia

[143, Inasmet y CTIF, 2002], [225, TWG, 2003]

4.3.3.7. Uso de disolventes no aromáticos en la producción de machos en caja fría

Descripción

Los sistemas de caja fría tradicionales emplean disolventes aromáticos que provocan la emisión de COV nocivos y que producen olores en las fases de producción y almacenamiento. También se producen emisiones de

compuestos orgánicos volátiles (benceno, tolueno, xileno) durante la colada, el enfriamiento y el desmoldeo. Los disolventes alternativos para la producción de machos en cajas frías utilizan proteínas o grasa animal (ésteres de metilo de aceite vegetal) o ésteres de silicato. Estos disolventes no son perjudiciales para la salud de los trabajadores ni inflamables, lo que facilita su transporte y almacenamiento.

La escasa volatilidad de los ésteres de metilo de aceite vegetal facilita los procedimientos de almacenamiento en ambientes húmedos y su permanencia al utilizar recubrimientos de base acuosa.

Los machos resultantes tienen una mayor resistencia y muestran una menor adherencia de la arena y mejores propiedades de desprendimiento.

Ventajas medioambientales

A causa del elevado punto de ebullición (unos 300 °C) no se produce vaporización y, por tanto, no se generan olores durante el mantenimiento.

Las emisiones de COV se reducen durante la confección y el almacenamiento de los machos y, más importante todavía, durante las fases de vaciado, enfriamiento y desmoldeo.

Efectos colaterales

Los disolventes de base vegetal provocan un aumento de la producción de humos durante la colada y (en sistemas de inyección) en el momento de abrir la matriz a causa de la escasa evaporación y, en consecuencia, elevado contenido de disolvente residual durante la colada. Los disolventes de éster de silicato no generan este tipo de humos.

Los disolventes con base de proteínas y grasa animal generan olores característicos; se conocen casos de malos olores en el interior de las fundiciones.

Datos operativos

La Tabla 4.24 muestra los valores de emisión operativos correspondientes al benceno, tolueno, xileno y fenol, obtenidos de una fundición dedicada a la producción de aluminio en arena verde. Las mediciones se llevaron a cabo tanto en la rejilla de desmoldeo como en la chimenea de aire de salida. Los datos distinguen entre el sistema tradicional en caja fría y el empleo de disolventes con base de aceite vegetal. Se observa una clara reducción en las emisiones de BTX y de C (25–50% de las emisiones en chimenea).

Tabla 4.24. Datos de emisión de un sistema de producción de machos en caja fría; mediciones realizadas durante el desmoldeo y en la chimenea de salida [189, Hüttenes-Albertus, 2002]

Compuestos	Durante el desmoldeo			En la chimenea de gases de salida		
	Aromáticos (mg/m ³)	Vegetales (mg/m ³)	Diferencia (%)	Aromáticos (mg/m ³)	Vegetales (mg/m ³)	Diferencia (%)
Benceno	0,08	0,05	-44	0,1	0,07	-30
Tolueno	0,12	0,05	-58	0,08	0,06	-25
Xileno	0,09	0,04	-56	0,09	0,05	-41
Fenol	14,8	14,6	-2	7,2	6,57	-9
Total C	61,0	29,5	-52	37,0	18,5	-50

La Tabla 4.25 muestra los resultados de las mediciones realizadas en una fundición de hierro alemana. Las mediciones de los distintos componentes se expresan en relación con las que se obtendrían de un sistema basado en compuestos aromáticos. Así por ejemplo, las emisiones de tolueno durante el segundo enfriamiento sólo llegan al 58% de los valores característicos de los sistemas aromáticos. La tabla muestra una clara reducción de las emisiones durante el segundo enfriamiento y el desmoldeo.

Tabla 4.25. Emisiones (en %) de determinados compuestos en sistemas de producción de machos en caja fría con base de compuestos vegetales [216, Hobelsberger, et al., 1997]

	Benceno	Tolueno	Xileno	Fenol
Vaciado y enfriamiento 1	83	100	100	100
Enfriamiento 2	78,5	58	46	74
Desmoldeo	78	78	78	12

Datos de emisiones expresados en porcentaje respecto a las emisiones de sistemas con base de compuestos aromáticos (a los que corresponde un valor del 100%).

Las reducciones de flujo másico total de los componentes indicados fueron las siguientes:

- benceno: -21%;
- tolueno: -26%;
- xileno: -30%;
- fenol: -62%.

La Figura 4.9 muestra los resultados de un estudio sobre las emisiones totales de carbono a lo largo de todo el proceso de fundición. De los datos se deduce que el uso de disolventes con base vegetal provoca un desplazamiento parcial de las emisiones de la zona de producción de machos a la de acabado. A pesar de todo se logra una reducción general de las emisiones de carbono del 17%.

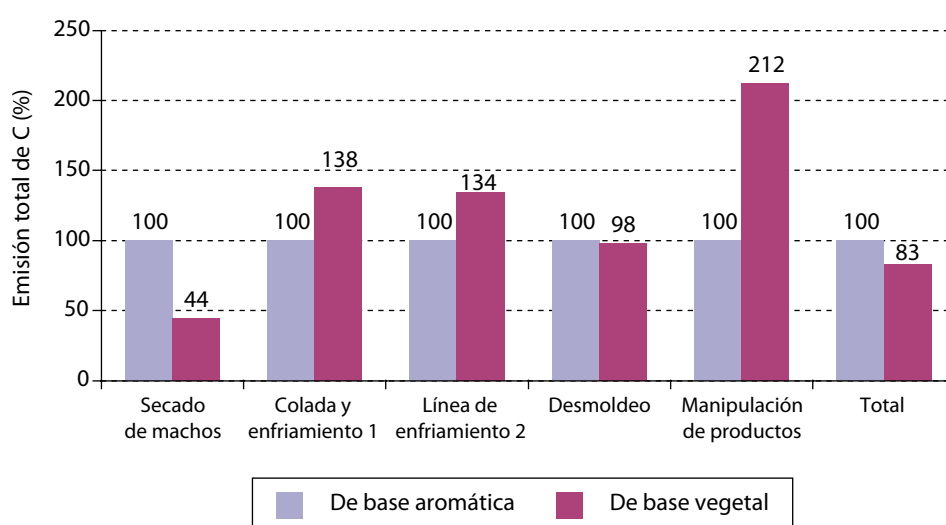


Figura 4.9. Emisiones totales de carbono en los distintos procesos generadas por el empleo de disolventes aromáticos y con base vegetal (los valores se expresan en %, tomando como referencia las emisiones de los sistemas con base de compuestos aromáticos) [216, Hobelsberger, et al., 1997]

Aplicabilidad

Los disolventes no aromáticos pueden utilizarse en todos los procesos en los que se emplee arena en cajas frías. La técnica es relativamente nueva y los resultados operativos arriba indicados deberán confirmarse a medida que se vaya extendiendo. Se ha implantado con éxito en el moldeo de todo tipo de piezas de automoción así como en fundiciones para maquinaria y en el sector de la electrónica y la construcción. Sirve tanto para fundiciones férreas como no férreas.

Datos económicos

Los datos obtenidos por una asociación de fundiciones italiana indican que los disolventes no aromáticos tienen un coste que llega a doblar el de los aromáticos (por ejemplo 0,82 EUR/kg frente a 0,36–0,48 EUR/kg).

Los datos operativos de una fundición férrea dedicada a la producción de grandes series muestran que los precios del aglomerante utilizado en los sistemas de caja fría con compuestos aromáticos son de 2 euros/kg (2001) y que se incrementan en alrededor de un 30% tras la adaptación al sistema no aromático. Un año después (2003), sin embargo, los precios volvieron a descender hasta un porcentaje del 10% adicional respecto al precio del sistema tradicional.

Ventajas de la implantación

Reducción de olores y de COV.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en fundiciones a gran escala de Alemania.

Publicaciones de referencia

[143, Inasmet y CTIF, 2002], [189, Hüttenes-Albertus, 2002], [202, TWG, 2002], [216, Hobelsberger, et al., 1997], [225, TWG, 2003]

4.3.4. Métodos de producción de machos y moldes alternativos

4.3.4.1. *Espuma perdida*

Descripción

Las características generales del moldeo a la espuma perdida se han descrito en el apartado 2.5.7.1. La ausencia de aglomerante posibilita unos niveles de emisión y de residuos sólidos inferiores en comparación con el moldeo en arena.

Esta técnica permite producir piezas de tolerancias estrechas, requiere menos canales de bebederos y mazos y mejora las propiedades de la pieza en estado bruto. Todo ello reduce las necesidades de mecanizado y el tiempo de depuración.

Las fundiciones de espuma perdida disponen de zona de espuma, de fusión y una de vaciado. No cuentan con grandes zonas para producción de machos y para acabado. El área de espuma se compone de máquinas espu-madoras, generadores de vapor, enfriadores y secadores a aire ambiente.

Los modelos de espuma perdida se confeccionan con poliestireno (EPS) o PMMA, con pequeñas proporciones de pentano, cola y recubrimiento mineral. Puesto que tanto el EPS como el pentano son hidrocarburos puros,

se forman carbonos orgánicos por pirólisis del modelo. Para minimizar las emisiones de los productos orgánicos de descomposición del EPS se realiza una postcombustión de los gases residuales.

La técnica emplea arena suelta y, como resultado, no se producen emisiones a consecuencia del aglomerante durante la colada y el desmoldeo; además, la arena se puede reutilizar internamente sin someterla a tratamientos exhaustivos. La pirólisis del EPS provoca la lenta acumulación de material orgánico en la arena. Para evitarlo puede realizarse una depuración de partículas y una renovación parcial de la arena utilizada en el ciclo. Una renovación del 5% basta para mantener la calidad de la arena. La arena rechazada puede regenerarse térmicamente para su reutilización interna.

Ventajas medioambientales

Al utilizar arena suelta la técnica no produce emisiones asociadas al aglomerante durante la colada. Sin embargo, la pirólisis del EPS o PMMA genera productos de descomposición orgánica que requieren postcombustión.

El uso energético en la técnica a la espuma perdida es significativamente menor que en los métodos de moldeo convencionales a causa de la cantidad inferior de energía necesaria para los procedimientos posteriores al vaciado, la fusión y la preparación de la arena. La producción de machos a partir de métodos de moldeo convencionales es relativamente más intensiva, desde un punto de vista energético, que la producción de modelos de espuma.

Un análisis del ciclo de vida (ACV) ha confirmado que las ventajas medioambientales antes indicadas pueden ampliarse hasta lograr un mejor rendimiento medioambiental del proceso a la espuma perdida respecto al moldeo en arena, al menos por lo que respecta a la producción intensiva de machos. En cuanto a los piezas simples (por ejemplo cubiertas), el ACV muestra que ninguno de los dos procesos supera al otro en rendimiento medioambiental.

Efectos colaterales

Esta técnica representa una reducción del consumo de energía y de los procesos de confección y de acabado de moldes. Los gases residuales presentan valores superiores de BTEX y formaldehído, si bien sólo se generan emisiones durante la colada, cuando pueden capturarse y tratarse más fácilmente. Esta técnica produce, además, una cantidad reducida de polvo y arena residual, que puede regenerarse más fácilmente (mediante un tratamiento térmico limitado).

Un estudio basado en el ACV del proceso a la espuma perdida (y que también considera los procesos desarrollados en el exterior de la fundición) muestra un impacto medioambiental general menor en la producción intensiva de machos.

Datos operativos

Los datos sobre emisión y producción de residuos figuran en el apartado 3.9.6.1. La técnica a la espuma perdida muestra una producción de residuos menor a la de una fundición de arena de idéntica capacidad. Los gases de combustión requieren una depuración intensiva (postcombustión) y presentan (tras la depuración) unos niveles de compuestos orgánicos en la chimenea (BTEX, formaldehído) más elevados.

La Tabla 4.26 muestra una comparación de los niveles de consumo necesarios para la producción de una cubierta de compresor siguiendo la técnica a la espuma perdida y la de moldeo en arena. La primera destaca por una mayor cantidad de retornos en la carga y un menor peso de la colada. En la técnica a la espuma perdida la cantidad total de arena utilizada para el moldeo aumenta muy considerablemente, aunque no se utilizan machos.

Tabla 4.26. Datos operativos relativos a la producción de una cubierta de fundición de hierro parecida siguiendo varios métodos de moldeo [130, de Wilde y ten Houten, 1999]

Material de entrada	Arena verde	Arena química	Espuma perdida
Hierro	98,0	98,0	96,1
Retornos	30,0	30,0	38,1
Peso de la colada	68,0	68,0	58,0
Arena de moldeo	256,8	233,0	1.101,4
Arena para machos	122,0	150,7	n.a.
Peso del modelo de espuma + mazarota	n.a.	n.a.	0,212

Todos los datos en kg
n.a.: no aplicable

Aplicabilidad

Esta técnica se utiliza para la producción en serie de piezas pequeñas y medianas en metal férreo y no férreo. El tamaño máximo de pieza es de 1.000 x 1.000 x 550 mm. Se suele emplear normalmente en las fundiciones de aluminio y tiene una cuota del 2% de producción de piezas de aluminio.

Puesto que requiere un cambio básico en el proceso de confección de moldes y la infraestructura necesaria, suele implantarse normalmente en fundiciones nuevas. Para utilizarla en instalaciones existentes es necesario adaptar el proceso de fundición, en concreto las fases de moldeo, vaciado y acabado, así como revisar estos tres aspectos para cada pieza producida. Aplicar la técnica a la espuma perdida a un molde concreto requiere financiación, mano de obra, el tiempo y la flexibilidad necesarias y cooperación por parte del cliente.

Datos económicos

La Tabla 4.27 muestra los datos económicos correspondientes a una instalación de espuma perdida. Los costes de inversión incluyen el equipo, la instalación, la puesta en marcha y la formación.

Tabla 4.27. Datos económicos de una fundición de aluminio mediante espuma perdida [96, Spillner, 1997]

Costes de inversión	Descripción	Euros
Equipo de producción de modelos	Máquina de producción de modelos Generador de vapor Instalaciones de recubrimiento	1.300.000
Equipo de colada	Máquina de colada automática	2.540.000
Depuración de gases residuales	Extracción de partículas en seco Tratamiento térmico regenerativo	608.000
Preparación de la arena	Tamizado, enfriamiento, transporte	160.000
<i>Total</i>	<i>Inversión, instalación, puesta en marcha, formación</i>	<i>4.608.000</i>
Coste operativo		EUR/t de pieza buena
Consumo	Poliestireno, cola, recubrimiento, vapor, combustibles	202

Detalles de la fundición: producción de 5.500 t/año de pieza buena y de 6.864 t/año de metal fundido

Ventajas de la implantación

Reducir los residuos de producción de moldeos en arena y el consumo energético.

Ejemplos

Varias plantas de Alemania y Francia.

Publicaciones de referencia

Fundición de hierro: [130, de Wilde y ten Houten, 1999]

Aluminio: [96, Spillner, 1997], [143, Inasmet y CTIF, 2002]

4.3.4.2. Moldeo en cáscara cerámica

Descripción

El moldeo en cáscara cerámica es un proceso patentado (Replicast®) que consiste en recubrir un modelo de poliestireno con una capa de cerámica (de 2 o 3 cm de espesor) compuesta de silicato de etilo y arena refractaria. La cáscara se endurece con amoníaco y se sinteriza a 1.000 °C. El sinterizado se encarga del curado y de quemar el modelo de poliestireno. A continuación se vacía el metal en la cáscara.

El horno de sinterización está equipado de un sistema de postcombustión para reducir las emisiones.

La técnica proporciona diseños sin juntas divisorias, machos o ángulos de inclinación lateral y reduce la cantidad de metal alimentado. De este modo se simplifican los procedimientos de acabado y mecanizado.

Ventajas medioambientales

Esta técnica minimiza las emisiones de partículas de polvo durante el moldeo y el acabado en comparación con los moldeos en arena. No produce emisiones de COV y la cáscara de cerámica inerte no genera gases. Además, la cantidad de residuos (partículas, metal) también se reduce. El menor tamaño de las mazarotas proporciona un mayor rendimiento de piezas por colada.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

Los datos operativos facilitados por la empresa propietaria de la técnica se muestran en la Tabla 4.28; en ella se compara el moldeo de válvulas en cáscara con el moldeo en arena.

Tabla 4.28. Reducción del peso relativo en el moldeo en cáscara cerámica de válvulas comparado con el moldeo en arena [219, Castings Technology International, 2003]

Característica	Reducción de peso relativo (%)
Peso de las piezas acadas	20–26
Metal alimentado	24–60
Metal colado	24–50

Aplicabilidad

La técnica es válida para la fabricación de piezas que requieren un buen acabado superficial, en aleaciones con bajo contenido en carbono como el acero inoxidable muy bajo en carbono y aleaciones con base de níquel con un peso final inferior a 550 kg. La técnica de la cáscara cerámica es un proceso patentado y sólo puede utilizarse siguiendo los términos y condiciones de la licencia otorgada al titular de la misma.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa sobre emisiones de COV; reducción de los elevados costes de eliminación de residuos.

Ejemplos

- CMS srl, Urbisaglia (Italia): 2 líneas de producción de cáscaras automatizadas dedicadas a la producción de válvulas de acero de hasta 150 kg (peso tras el acabado)
- Saint-Gobain SEVA, Chalons-sur-Saone (Francia): componentes de superaleaciones y acero para la industria del vidrio.

Publicaciones de referencia

[110, Vito, 2001], [219, Castings Technology International, 2003]

4.3.5. Preparación de moldes permanentes (de metal) y matrices para la inyección a presión

4.3.5.1. Minimización del consumo de agente desmoldeante y agua

Descripción

El agente desmoldeante se pulveriza a través de una solución acuosa directamente en la matriz de MAP antes de cerrarla. De esta forma puede enfriarse y formar la capa necesaria. La adopción de algunas medidas sencillas durante el proceso permiten minimizar el consumo de agente desmoldeante y agua y, además, contribuyen a evitar la formación de neblinas:

- *Proceso de pulverización automática*: la robotización del proceso de pulverización permite controlar de cerca la cantidad de agente desmoldeante utilizado y adaptarla a las necesidades específicas de la pieza moldeada.
- *Optimizar el porcentaje de dilución*: debe elegirse una proporción de dilución del agente desmoldeante que equilibre los procesos de formación de capa y enfriamiento.
- *Enfriamiento en el interior de la matriz*: mediante un circuito de agua integrado puede complementarse el enfriamiento externo con el enfriamiento interno de la matriz.

Ventajas medioambientales

Minimización del consumo de agua y sustancias químicas. Prevención y/o reducción de emisiones (difusas).

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Se utiliza en las fundiciones de vaciado a alta presión. La reducción del consumo varía en función del tipo de pieza producida y de las máquinas empleadas.

Ventajas de la implantación

Minimización de consumos y emisiones.

Ejemplos

Se utiliza en grandes fundiciones de inyección, por ejemplo para la fabricación de piezas para automóviles (Alemania, Francia).

Publicaciones de referencia

[202, TWG, 2002]

4.3.5.2. Aplicación de agente desmoldeante en moldes cerrados

Descripción

En este caso el agente desmoldeante se introduce en el interior del molde de inyección en forma vaporizada. La elevada temperatura provoca que el agente se condense y se deposite formando una lámina interior. Esta técnica es una alternativa a la pulverización de la solución acuosa de agente desmoldeante en la matriz abierta. Con ella se reduce el empleo de agua y también el consumo de desmoldeante. Las sustancias activas que intervienen en el proceso, por ejemplo a la hora de desprender el molde de la matriz, son muy similares a las de la técnica de los moldes abiertos: cera de parafina, carbonos alifáticos, polisiloxanos, poliglicol.

La pulverización de agua, no obstante, facilita el necesario enfriamiento de la superficie de la matriz. Por ello la técnica alternativa requiere una gestión óptima de la temperatura de la matriz (básicamente a través de enfriamiento) mediante un mecanismo de refrigeración interior, lo que podría conseguirse reduciendo la temperatura del aceite térmico. El uso conjunto de agua pulverizada y agente desmoldeante en moldes cerrado es posible en lugares donde los moldes no alcancen un equilibrio térmico completo a partir únicamente de mecanismos de enfriamiento interno.

Ventajas medioambientales

Esta técnica permite reducir el empleo tanto de agua como de agente desmoldeante. Como resultado disminuyen la cantidad de agua residual y las emisiones de vapor, que contienen partículas aceitosas. Los componentes activos del agente desmoldeante son comparables a los de la técnica tradicional. Las emisiones por descomposición del agente desmoldeante (y en el momento de abrir la matriz para desprender el molde) también tienen unas características comparables a las de la técnica de moldes abiertos.

Efectos colaterales

La técnica requiere un mayor esfuerzo de enfriamiento de las matrices. En casos sencillos bajar la temperatura del aceite termal puede ser suficiente; las matrices complejas, sin embargo, pueden necesitar un circuito de refrigeración adicional.

Datos operativos

Se conocen algunos ejemplos de utilización de esta técnica en fundiciones de aluminio; con ella se logran reducir los tiempos de pulverización entre un 50 y un 80% y el consumo de agente de desmoldeante en un 80%.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para cualquier planta ya existente, aunque puede requerir la producción de matrices específicas con circuito de refrigeración integrado o adaptado. La aplicabilidad se limita a determinados tipos de moldeos, matrices y máquinas de moldeo, pero depende básicamente de consideraciones técnicas. Esta técnica no es, pues, una alternativa universal a la aplicación de agentes desmoldeantes.

Ventajas de la implantación

Reducir la producción de aguas residuales y el consumo de agua y sustancias químicas en las fundiciones.

Ejemplos

Existen algunas fundiciones de aluminio que utilizan esta técnica.

Publicaciones de referencia

[189, Hüttenes-Albertus, 2002], [202, TWG, 2002]

4.4. Colada del metal

4.4.1. Mejora del rendimiento de molde

Descripción

El rendimiento del metal es la proporción existente entre el metal fundido y el peso de las piezas acabadas. La diferencia entre ambos valores es consecuencia de las pérdidas de metal (por ejemplo durante la fusión, a causa de salpicaduras, por abrasión) y de los desperdicios de colada (lingote, mazarotas, rechazos). Mejorar el rendimiento implica reducir las pérdidas y los desperdicios de metal.

La adopción de una o más de las siguientes medidas permite mejorar el rendimiento de molde:

- implantación de métodos eficientes: adecuado diseño de las mazarotas, manguitos, bebederos, depósitos de vaciado y optimización del rendimiento de la caja (piezas/metal vaciado en el molde). El empleo de simulaciones por ordenador de los procesos de vaciado y solidificación es una herramienta muy útil a la hora de diseñar un método eficiente;
- implantación de procedimientos apropiados durante la fusión y la colada para reducir pérdidas de colada, adiciones excesivas de lingote, proporciones elevadas de chatarra generada, etc.;
- implantación de buenas prácticas en las zonas de moldeo y producción de machos para reducir el porcentaje de chatarra debida a las deficiencias en el proceso de producción de machos y moldes.

Ventajas medioambientales

El aumento del rendimiento del metal disminuye el consumo de energía, arena y aditivos por unidad de pieza buena. Aumenta asimismo la eficiencia global del proceso.

Efectos colaterales

Esta técnica carece de efectos colaterales.

Datos operativos

La Tabla 4.29 proporciona una relación de los rendimientos característicos de los distintos tipos de hierro producido. No es posible recomendar un objetivo de rendimiento concreto de fácil adaptación por parte de las fundiciones, ya que depende en gran medida del tipo de metal y de pieza y de las instalaciones de producción y el mercado abastecido. Así pues, las fundiciones deben establecer sus propios objetivos en base a un análisis de los rendimientos registrados.

Tabla 4.29. Rendimiento de molde correspondiente a distintos tipos de fundición [45, ETSU, 1990]

Tipo de piezas	Rendimiento (%)
Fundición gris pesada, formas simples	85 – 95
Fundición gris de tamaño medio de fundición común o pequeñas series	65 – 75
Fundición gris de calidad general y tamaño pequeño-medio obtenida por mecanización, para ingeniería o mobiliario urbano	65– 75
Fundición gris de alta calidad y tamaño pequeño-medio obtenida por mecanización, para ingeniería, con diseños relativamente simples	60 – 65
Fundición gris de alta calidad y tamaño pequeño-medio obtenida por mecanización, para ingeniería, con diseños de machos complejos y masivos	55 – 60
Fundición nodular de tamaño medio, general o pequeñas series	50– 60
Fundición repetitiva de piezas de fundición gris pequeñas o muy pequeñas	45– 55
Mecanización repetitiva de fundición maleable y moldeos nodulares pequeños	40 – 50

En respuesta a un cuestionario, 82 fundiciones del Reino Unido aportaron datos sobre el rendimiento de molde correspondientes al período 1981 –1987. En la Tabla 4.30 figuran las mejoras de rendimiento obtenidas, por tipo de metal (media ponderada).

Tabla 4.30. Media ponderada del rendimiento de molde de 82 fundiciones férreas del Reino Unido, 1981 – 1987 [45, ETSU, 1990]

	Rendimiento en 1981 (%)	Rendimiento en 1987 (%)	Mejora del rendimiento(%)
Fundición gris	60,5	63,0	2,5
Fundición nodular	51,8	55,7	3,9
Fundición maleable	36,4	39,2	2,8

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para cualquier fundición férrea o no férrea existente.

Datos económicos

La mejora del rendimiento de molde puede lograrse poniendo en práctica medidas y controles sencillos y económicos. Las ventajas pueden llegar a ser considerables, ya que cada punto porcentual de incremento conlleva un descenso equivalente en el consumo de energía para la fusión y en el de arena y sustancias químicas.

La puesta en marcha de un programa de simulación de la colada y la solidificación asistido por ordenador requiere financiación y formación.

Ventajas de la implantación

Optimización de la eficiencia de los procesos.

Ejemplos

La mayoría de fundiciones europeas analizan el rendimiento de molde como parte de las buenas prácticas de funcionamiento.

Publicaciones de referencia

[45, ETSU, 1990], [140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001]

4.5. Captura y tratamiento de humos y gases de combustión y de salida

4.5.1. Principios generales

Algunas fases del proceso de fundición pueden dar lugar a la producción de partículas, humo y otros gases, como por ejemplo las fases de almacenamiento de materias primas, su manipulación o su procesamiento. Las técnicas de reducción de emisiones atmosféricas se basan en los siguientes tres aspectos: prevención, minimización y captura de gases.

El sellado del horno (o el empleo de hornos herméticos) junto con el control de procesos permiten evitar o reducir las emisiones generadas en las plantas. Los apartados 4.5.2 – 4.5.6, dedicados a los hornos, indican cuándo es posible sellar los hornos y cuándo pueden implantarse otras técnicas de captura para la recogida integral de los gases.

Existen además otras técnicas disponibles para capturar las emisiones que no se pueden evitar o limitar. Los gases y humos que generan los procesos se liberan en el área de trabajo y de ahí al entorno más inmediato; pueden llegar a afectar a la salud y la seguridad de los trabajadores y contribuyen a agravar el impacto medioambiental de los procesos. Las técnicas de captura de gases permiten evitar y minimizar esas emisiones fugitivas. Las campanas extractoras se diseñan para que estén lo más cerca posible de la fuente de emisión sin restar espacio necesario para los procedimientos. Las campanas móviles son una alternativa en algunos casos. Algunos procesos requieren campanas para la recogida de las emisiones primarias y secundarias.

Las emisiones fugitivas pueden tener gran importancia, pero son muy difíciles de medir y cuantificar. Los métodos de estimación de volúmenes de ventilación o la velocidad de deposición pueden servir de indicadores. Un método fiable, aplicado a la fusión primaria del cobre, muestra que las emisiones fugitivas pueden tener una magnitud muy superior a la de las emisiones capturadas y eliminadas, llegando incluso a doblar o triplicar la cantidad de emisiones controladas. [155, European IPPC Bureau, 2001].

Las áreas de colada, producción de machos, preparación de la arena y postcolada son fuentes de emisiones considerables. Los principales contaminantes atmosféricos emitidos son partículas (que posiblemente contengan partículas de metal pesado), dióxido de azufre, monóxido de carbono y compuestos orgánicos que dan lugar a olores. La Tabla 4.31 muestra los resultados de un estudio sobre los contaminantes generados en las distintas actividades del proceso de fundición férrea. Tanto los compuestos orgánicos como los inorgánicos se muestran por separado y en grupos. Las emisiones de partículas tienen especial relevancia, ya que los procesos térmicos pueden generar cantidades considerables de metales pesados.

Los principios y técnicas de recogida y tratamiento de gases residuales coinciden en las fundiciones y en las industrias de metales no ferreos (primarias), por lo que para obtener información precisa al respecto se recomienda al lector que consulte el documento BREF sobre industrias del metal no férreo. El apartado 4.5.1.3 incluye un breve estudio sobre las técnicas que pueden utilizarse.

Tabla 4.31. Análisis de las emisiones atmosféricas en varias fases del proceso de fundición férrea [160, UK Environment Agency, 2002]

Emisiones \ Origen	Almacenamiento y manipulación de materias primas	Procedimientos de horno	Desulfuración del hierro fundido	Nodulización	Preparación de machos y moldes	Colada	Desmoldeo, recuperación	Rebado, tratamiento y acabado de piezas
Óxidos de azufre		X	X		X	X	X	
Óxidos de nitrógeno		X			X	X	X	
Dióxido de carbono		X	X	X	X	X	X	
Monóxido de carbono		X	X	X	X	X	X	
Ácido sulfhídrico					X	X	X	
Amoníaco					X	X	X	
Oxidos de hierro		X	X	X		X	X	X
Compuestos de metales alcalinos		X	X					
Compuestos de metales alcalinotérreos		X	X	X		X		
Partículas metálicas		X	X	X		X	X	X
Partículas no metálicas	X	X	X		X	X	X	X
Hierro metálico		X						X
Cianuro de hidrógeno					X			
Azufre			X					
Aminas/amidas					X	X		
Dioxinas		X						
Compuestos orgánicos volátiles		X			X	X	X	
Vapores ácidos		X			X	X		
Ruido		X			X		X	X

Las sustancias indicadas incluyen sus compuestos, a menos que también figuren en la tabla.

Las emisiones atmosféricas pueden liberarse en la atmósfera o en el agua, dependiendo de la tecnología de eliminación utilizada (por ejemplo: recogida de partículas, lodos o licores).

Algunas emisiones corresponden a sistemas de aglomeración concretos.

4.5.1.1. Reducción de emisiones fugitivas

Descripción

Las emisiones fugitivas se producen cuando no se capturan las emisiones de un proceso concreto. Además de las fuentes de emisión vinculadas a los distintos procesos ya mencionados en el apartado 4.5.1 cabe destacar las siguientes fuentes potenciales de emisiones fugitivas:

- áreas de almacenamiento (por ejemplo, depósitos, montones, pilas);
- carga y descarga de contenedores de transporte;
- traspaso de material entre recipientes (por ejemplo, hornos, cucharas, silos);
- mezclado y curado de aglomerantes químicos (emisión de sustancias químicas orgánicas e inorgánicas);
- recubrimientos de los moldes (disolventes);
- transportadores para el desplazamiento del material;
- sistemas de tuberías y conducciones (por ejemplo bombas, válvulas, bridas, pozos de sedimentación, desagües, portezuelas de inspección, etc.); este tipo de emisiones se tratan en detalle en el documento BREF sobre Los compuestos orgánicos de gran volumen de producción;
- sistemas de contención y extracción de los edificios;
- desviación de los sistemas de eliminación de emisiones (hacia la atmósfera o el agua);
- fallo accidental de los sistemas de contención o de los equipos, fugas incluidas, del área de tratamiento de arena;
- derrames.

Para minimizar las emisiones de polvo fugitivas pueden utilizarse las siguientes técnicas:

- tapar las cucharas y recipientes;
- evitar formar montones al aire libre o descubiertos;
- si resulta imposible no recurrir a las pilas o montones: utilizar pulverizadores, aglomerantes, sistemas de gestión de pilas, protectores del viento, etc.;
- depuración de ruedas y vías de transporte (para evitar que la contaminación se transmita al agua o al viento);
- utilización de transportadores cerrados o neumáticos (sin pasar por alto su mayor consumo energético) y minimización de los goteos;
- depuración de los gases recogidos por aspiración en las áreas de colada y moldeo en fundiciones de moldeo en arena, a excepción de las zonas donde el uso de arena tenga una función técnica o de seguridad, por ejemplo la zona de vaciado, con la excepción de las fundiciones generales donde se realizan los modelos a mano;
- mantener las puertas exteriores cerradas, por ejemplo por medio de un sistema de cierre automático o compuertas;
- llevar a cabo tareas de mantenimiento adecuadas, por ejemplo asegurarse de que se realizan inspecciones periódicas por parte del personal responsable o delegado y de que se mantienen al día de los registros.

Las emisiones fugitivas al agua pueden provenir de estructuras subterráneas o revestimientos superficiales defectuosos. Estas emisiones pueden atajarse llevando a cabo las siguientes acciones:

- determinación y registro de fuentes, dirección y destino de todos los desagües de las instalaciones;
- identificación y registro de todos los colectores y depósitos de almacenamiento subterráneos;
- realización de las inspecciones regulares programadas;
- establecimiento de un programa de inspección y mantenimiento de superficies impermeables y bordes de recipientes;
- justificación de los motivos que han llevado a no equipar a las áreas operativas de:
 - superficies impermeables;
 - recipientes para la contención de derrames;
 - juntas de construcción selladas;
 - conexiones a sistemas de drenaje sellados.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones no controladas.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Estas técnicas son válidas para cualquier instalación nueva o existente.

Ventajas de la implantación

Limitar las emisiones fugitivas limita a su vez la generación de olores y las emisiones de partículas en las inmediaciones de las instalaciones. Para plantas situadas en zonas pobladas se puede considerar como ventaja de implantación el mantener buenas relaciones con los vecinos.

Ejemplos

Depuración de gas capturado por aspiración en las áreas de colada y moldeo: se utiliza en varias fundiciones de arena verde visitadas.

Publicaciones de referencia

[160, UK Environment Agency, 2002], [163, UK Environment Agency, 2002], [155, European IPPC Bureau, 2001]

4.5.1.2. Uso de chimeneas múltiples

Descripción

Para aprovechar al máximo la fuerza ascensional térmica, las emisiones calientes pueden conducirse de forma conjunta de modo que se minimice el número de chimeneas, evitando multiplicar los puntos de descarga. Ello resulta especialmente importante al diseñar nuevas plantas o al introducir cambios en los procesos existentes.

Ventajas medioambientales

Al agrupar varios conductos de expulsión de gases en una única chimenea se controlan mejor las emisiones y aumenta el volumen (y la carga) total sometido a tratamiento, lo que se traduce en una reducción de los niveles de emisión totales.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica sólo puede implantarse en plantas nuevas o al someter las instalaciones existentes a cambios sustanciales.

Ventajas de la implantación

Aumentar las posibilidades de medición y control de los procedimientos de fundición.

Ejemplos

La técnica se emplea habitualmente en Europa.

Publicaciones de referencia

[160, UK Environment Agency, 2002]

4.5.1.3. Técnicas de depuración

Descripción

Para depurar los gases residuales pueden utilizarse varios sistemas húmedos y secos. La elección de la técnica más apropiada depende de la composición, el flujo y las condiciones de conducción de los gases. El diseño del proceso de eliminación de contaminación es un aspecto de gran importancia en el que es necesario tener en cuenta la eficiencia o adecuación del método y la carga de entrada y salida que habrá que capturar. Su funcionamiento se describe exhaustivamente en el documento BREF sobre industrias del metal no férreas. Las técnicas que figuran a continuación se utilizan en la industria de la fundición.

- Eliminación de partículas:
 - ciclones;
 - filtros de mangas;
 - lavadores húmedos.
- Sistemas de depuración de gases (eliminación de SO₂, Cl y aminas):
 - depuración húmeda en torres, lavadores venturi o desintegradores.
- Separadores de neblina de aceite:
 - precipitadores electrostáticos húmedos.
- Eliminación de CO y compuestos orgánicos:
 - postcombustión,
 - filtro biológico.

Para la captura de partículas y las partículas se utilizan tanto sistemas húmedos como secos. La principal ventaja de los primeros es que el polvo se atrapa seco, lo que permite reutilizarlo posteriormente. Además, la contaminación no se transmite a otros medios, como sucede con los sistemas húmedos. En cuanto a los compuestos gaseosos, como el SO₂ y los cloruros, los filtros de mangas resultan ineficaces, ya que la superficie del filtro no puede adsorberlos. Los experimentos de inyección de cal viva no han dado buenos resultados. A continuación se describen los sistemas utilizados para la extracción de polvo y partículas:

- *Ciclones*: si se adoptan las medidas correctas (es decir, acero resistente al calor y revestimiento refractario) los ciclones pueden utilizarse para la extracción de partículas en gases residuales calientes (500–600 °C), aunque su eficiencia es demasiado baja para lograr unos niveles de emisión del orden de 20 mg/Nm³. Los ciclones se utilizan principalmente como *apagachispas* colocados delante de los filtros de mangas. Se suelen emplear como pretratamiento a otros sistemas utilizados.
- *Multiciclones*: la eficacia de separación de los ciclones aumenta a medida que disminuye su diámetro. El uso de pequeños ciclones dispuestos en series paralelas permite separar las partículas de polvo más finas sin que aumente en exceso la caída de presión en el equipo de depuración.
- *Filtro de mangas*: este tipo de técnica se utiliza mucho en varias etapas del proceso de fundición a causa de su gran eficiencia y escaso nivel de emisiones. Tiene un alto rendimiento en extracción de finos con lo que permite controlar el nivel de partículas finas generadas en la etapa de fusión. Puede separar incluso partículas submicrónicas como por ejemplo óxidos metálicos. Para su correcto funcionamiento deben adoptarse las siguientes medidas: enfriamiento de los gases de combustión (T=130-160 °C) y eliminación previa de chispas (mediante un ciclón). La postcombustión de materia orgánica (para reducir el riesgo de incendio) resulta adecuada para gases de combustión con un elevado contenido en COV. Cuando existan inquemados, es obvio que la postcombustión sirve de cortafuegos para proteger el filtro de mangas de los gases de combustión generados al vaciar los tambores. La técnica no tiene un uso generalizado; en lugar de ello se utiliza una combinación de los gases con que portan la carga de partículas con otros caudales de alto contenido en COV para evitar que se adhieran en filtro y conductos de salida. En la Figura 4.10 se muestran el interior y el exterior de una unidad de filtro de mangas.



Figura 4.10. Unidades de filtro de mangas; parte interior (izq.) y exterior (centro, der.) [237, HUT, 2003]

- *Sistemas de filtración a altas temperaturas (mediante filtros de cerámicos)*: aunque se comercializan, actualmente no se usan en la industria de la fundición.
- *Precipitadores electrostáticos (PE) o electrofiltros*: su utilización para la extracción de partículas en gases de combustión de fundiciones no está muy extendida. A causa de su sensibilidad al caudal, la temperatura y la humedad del gas sólo resultan válidos para regímenes de colada continua. También presentan un riesgo considerable de explosión como consecuencia del gran volumen de gas que contienen. Para reducir este riesgo se precisan depuraciones frecuentes en la eliminación de partículas y, por lo tanto, puede dar lugar a problemas económicos. El principal campo de aplicación de los precipitadores electrostáticos en la fundiciones es la eliminación de la neblina de aceite de los gases de salida en los sistemas de inyección.

Los sistemas húmedos de extracción de partículas, por ejemplo desintegradores o tipo venturi, se emplean en el tratamiento de los gases de combustión de la colada, mientras que las torres de depuración se utilizan para otros tipos de gases de combustión. Las desventajas de los sistemas húmedos frente a los sistemas secos son las siguientes: mayor consumo energético, más mantenimiento (corrosión, bacterias) y mayor cantidad de aguas residuales y de lodos residuales. Las ventajas radican en la capacidad de capturar compuestos solubles en el agua (por ejemplo SO_2 o cloruros), enfriamiento rápido (lo que evita la formación de dioxinas), costes de inversión bajos y menor sensibilidad a la temperatura de entrada.

- *Lavadores venturi*: cuando los gases atraviesan la depuración se les pulveriza agua. La aceleración del flujo de gas en el tubo venturi provoca que ambos medios se mezclen exhaustivamente. Las partículas de polvo absorben la humedad y se vuelven más pesadas, lo que permite separarlas en un ciclón u otro sistema situado más abajo en el recorrido. Si se produce una caída de caudal se ajusta el tubo venturi para que siga funcionando eficientemente.
- *Desintegradores*: estos lavadores llamados «dinámicos» están formados por un rotor concéntrico con el estator que contiene unos vástagos a los que se conduce el flujo de gas mediante un ventilador situado más abajo en el conducto o bien mediante un ventilador de palas situado en el extremo exterior del rotor. El agua inyectada hacia el centro del rotor se divide en finas gotas por la acción de los vástagos y se dispersa en el flujo de gas. Las partículas húmedas chocan contra las paredes del estator y se recogen en la parte inferior del desintegrador. El sistema funciona eficientemente aunque se reduzca el caudal de gas.

Los sistemas de postcombustión y los filtros biológicos se tratan en los apartados 4.5.2 y 4.5.9, respectivamente.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones atmosféricas.

Efectos colaterales

Los sistemas de depuración húmedos generan aguas residuales que deben tratarse. El agua tratada puede recircularse al circuito. Las tortas de lodos producidas en el tratamiento del agua residual deben también eliminarse.

Si la fundición se encuentra en entornos de clima frío (donde se utilice la calefacción durante más de seis meses), cualquier aumento de la ventilación de aire provocará un incremento en el consumo de energía, ya que el lugar de trabajo deberá calentarse más.

El uso de cualquier sistema de eliminación requiere energía para conducir los gases y lograr que sean aspirados.

Datos operativos

En la Tabla 4.32 se comparan las características de los sistemas húmedos y secos. En los apartados que siguen se analizan las técnicas específicamente diseñadas para los distintos hornos de colada y fases de producción.

Tabla 4.32. Características de los sistemas secos y húmedos de eliminación de partículas utilizados en las fundiciones [110, Vito, 2001], [155, European IPPC Bureau, 2001], [202, TWG, 2002]

Técnica de eliminación	Sistemas secos		Sistemas húmedos	
	Multiciclón	Filtro de mangas	Venturi	Desintegrador
Nivel de emisión de partículas*	100– 200 mg/Nm ³	< 5–20 mg/Nm ³	<20–150 mg/Nm ³	<20–150 mg/Nm ³
Costes de inversión	Bajos	Altos	Bajos	Medios
Consumo de energía	Bajo	Bajo-medio	Alto	Alto
Ventajas/motivos de la elección	Para la depuración previa de gases antes de la utilización de otros métodos	Buen rendimiento si las partículas son las adecuadas y se realiza un buen seguimiento. Potencial de reciclaje de polvo	Captura parcial de SO ₂ . Escaso riesgo de síntesis <i>de novo</i>	Instalaciones compactas. Escaso riesgo de síntesis <i>de novo</i>
Desventajas	Escasa eficiencia cuando el caudal presenta alteraciones (las partículas bloquean el distribuidor). Eficiencia limitada si las partículas son finas	Riesgo de incendios, gran volumen, bloqueo en caso de condensación	Lodos húmedos, tratamiento de aguas residuales, pérdida de eficiencia con el desgaste	Mayor uso de energía, desgaste, lodos húmedos, tratamiento de aguas residuales

* Valores obtenidos durante el funcionamiento que pueden mantenerse durante la vida útil de las instalaciones

En la Figura 4.11 se comparan las condiciones de funcionamiento de los cubilotes de viento caliente dotados de sistemas de eliminación húmedos y secos. Las principales diferencias se dan en el perfil de temperatura del gas de combustión y el consumo de energía.

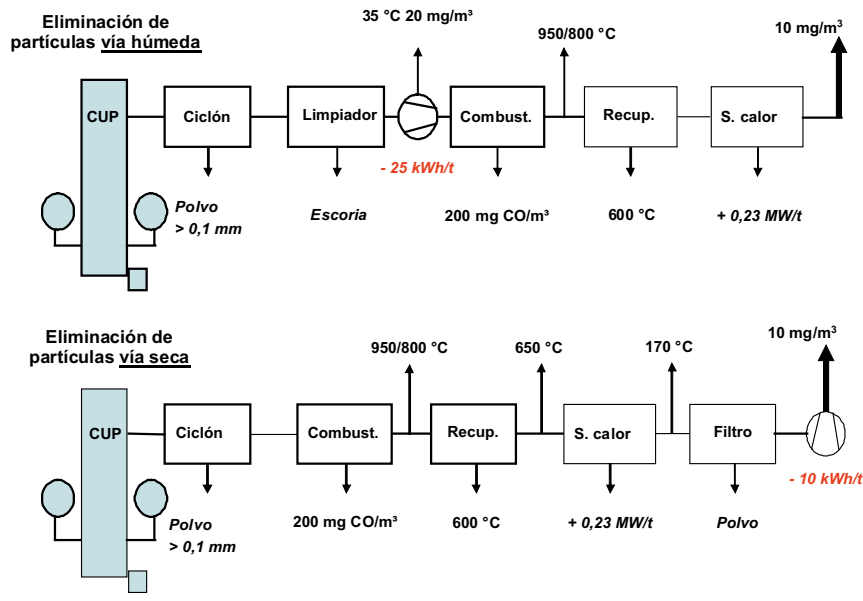


Figura 4.11.
Condiciones de funcionamiento de los sistemas de eliminación de partículas de gases de combustión secos y húmedos en los cubilotes de viento caliente [230, CAEF, 2003]

Aplicabilidad

La aplicabilidad de los distintos sistemas de eliminación de partículas se analiza en los siguientes apartados de este capítulo.

Datos económicos

La Tabla 4.33 muestra los costes de inversión y el uso de energía de los filtros de mangas y los separadores húmedos.

Tabla 4.33. Costes de inversión y consumo energético de varios sistemas de depuración [32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [202, TWG, 2002]

Técnica de depuración	Coste de inversión* (EUR/Nm³)	Consumo energético (kW/1.000 Nm³)
Filtro de mangas	2,5 – 5	1 – 3
Lavador húmedo	1,5 – 5	1 – 3
Filtro biológico	7,5 – 10	

* Se excluyen las tuberías y conductos, pero se incluye el conjunto del equipo.

Ventajas de la implantación

Normativa sobre emisiones a la atmósfera.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [155, European IPPC Bureau, 2001], [202, TWG, 2002]

4.5.1.4. Prevención y eliminación de dioxinas

Descripción

Las dioxinas son un problema en los procesos térmicos con presencia de metales pesados. Las dioxinas o sus precursores pueden estar presentes en algunas materias primas, y existe además la posibilidad de que se produzca síntesis *de novo* en los hornos o sistemas de depuración. La materia sólida adsorbe fácilmente las dioxinas, que pueden recogerse a través de cualquier medio del entorno como las partículas (también partículas de filtros) y los sólidos generados tras la depuración. Las pruebas de campo demuestran que la formación de dioxinas en cubilotes no puede atribuirse a un único (o un conjunto) parámetro(s) de funcionamiento. Para reducir al mínimo el riesgo de formación de dioxinas deben combinarse varias medidas.

Entre las medidas primarias (o de proceso) para la reducción de emisiones de dioxinas destacan:

- postcombustión de los gases procedentes del horno en las zona de fusión de los CVF o cámaras de combustión de los CVC. La combustión de los gases residuales de los cubilotes se describe detalladamente en los apartados 4.5.2.2 y 4.5.2.3;
- control y seguimiento continuos de la temperatura en el interior de las cámaras de los CVC ($T > 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) y aumento del tiempo de residencia (preferentemente $> 2\text{ s.}$);
- mantenimiento de la concentración de partículas en el recuperador a un nivel de $< 20\text{ mg/m}^3$, posible, en el caso de los CVC, si se utiliza un sistema húmedo de eliminación de partículas;
- llevar a cabo un enfriamiento rápido de los gases de combustión, con gran contenido en partículas, en el intervalo de temperatura característico de la síntesis *de novo* ($250 - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- impedir o minimizar las concentraciones de partículas a lo largo del recorrido de refrigeración de los gases de combustión, especialmente en el intercambiador de calor, por ejemplo utilizando tubos de intercambiador verticales, sistemas de depuración interno eficientes, eliminación de partículas a altas temperaturas, etc.;
- empleo de chatarra limpia como materia prima de la fusión. Esta técnica se describe en el apartado 4.1.4;
- utilización de inyección de oxígeno para garantizar una combustión completa. Esta técnica se describe en el apartado 4.2.1.6.

Aunque las dioxinas se destruyen a altas temperaturas (por encima de los $850\text{ }^{\circ}\text{C}$) en presencia de oxígeno, la síntesis *de novo* resulta todavía posible si los gases se enfrían y alcanzan temperaturas situadas en el rango donde la conversión es posible ($250 - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$). Estas temperaturas se pueden alcanzar en los intercambiadores de calor o sistemas de depuración y en las partes más frías del horno, por ejemplo la zona de alimentación. Al diseñar los sistemas de refrigeración es necesario intentar minimizar el tiempo de residencia en el rango de temperatura mencionado y evitar la acumulación de partículas para impedir que se produzca la síntesis *de novo*. Una alternativa consiste en eliminar las partículas de los gases de combustión mediante un enfriamiento rápido inducido por un sistema húmedo. Un enfriamiento rápido asegura que el tiempo de residencia en el rango de temperaturas característico no es suficiente para que se produzca la síntesis *de novo*, la cual daría a una reformación de las dioxinas previamente destruidas por las altas temperaturas. Además, en los gases calientes debe haber oxígeno suficiente; de ahí que se utilice la inyección de oxígeno para garantizar la combustión completa. A pesar de todo, deben evitarse los excesos de oxígeno, ya que pueden llegar a favorecer la síntesis *de novo*.

El azufre tiene un efecto inhibidor sobre la formación de dioxinas a través del empobrecimiento del cloro molecular. Se ha demostrado que el empleo de carbón con contenido elevado en azufre en grandes plantas de combustión genera concentraciones menores de PCDD/F. Este efecto inhibidor reductor guarda es proporcional al ratio S/Cl, cuyo nivel crítico es 0,64; aunque el ratio sea mayor, la presencia de dioxinas y furanos no desciende. Este efecto no se ha demostrado en el caso de las fundiciones, aunque puede estudiarse. [231, UNEP, 2003]

La amplia distribución y gran variabilidad en los niveles de emisión de dioxinas (incluso en las mismas instalaciones) demuestran que las medidas primarias pueden no ser suficientes para lograr un valor de emisiones bajo y estable. Así pues, además de las medidas primarias, pueden considerarse las siguientes:

- *Inyección de aditivos en forma de partículas* al flujo de gas, por ejemplo carbón activo, coque de hornos de solera abierta o zeolita, de modo que se produzca una adsorción superficial de las dioxinas. A continuación se lleva a cabo una extracción de partículas de gran eficiencia para extraer las partículas y las dioxinas (adsorbidas en las mismas). El aditivo se inyecta en el caudal de los gases de combustión antes del filtrado. El proceso de adsorción tiene lugar principalmente mientras los adsorbentes se adhieren a las mangas del

filtro. Las partículas filtradas pueden recircularse a los gases de combustión para lograr mayor eficiencia de eliminación de dioxinas. Si se utilizan aditivos con contenido de carbono deben adoptarse medidas especiales para evitar riesgos de explosión e incendio. Las partículas recogidas pueden tener concentraciones elevadas de dioxinas, por lo que deberán tratarse y eliminarse cuidadosamente;

- *sistemas de oxidación catalítica* para la destrucción de las dioxinas. Se utilizan filtros de mangas dotados de capa catalítica para destruir las dioxinas. En otros sectores (por ejemplo, el del acero o la incineración local de residuos) se ha implementado con éxito esta técnica, por lo que se considera que su implantación en las fundiciones es factible. No obstante, para evitar la desactivación de la capa de catalizador deben eliminarse previamente las partículas de polvo más gruesas.

Las anteriores técnicas deben analizarse teniendo en cuenta su aplicación. Todas ellas pueden incorporarse a procesos ya existentes. La elección de la técnica más efectiva y económicamente viable depende de las características de la fundición, los aspectos de seguridad, la estabilidad operativa y los factores económicos.

Aunque la ausencia de una de las cinco condiciones de formación de dioxinas explicadas más arriba dificulta la síntesis, en la actualidad no es posible prever con precisión las emisiones de dioxinas a partir de los parámetros operativos conocidos. Por ello, al construirse un nuevo horno debe prestarse gran atención a las medidas primarias, así como a la posibilidad de implantar medidas secundarias en caso de que los valores obtenidos sean inesperadamente altos.

Ventajas medioambientales

Reducción de los niveles de emisión de dioxinas y furanos a la atmósfera.

Efectos colaterales

La adsorción de dioxinas y furanos por parte del carbón activo genera un caudal de polvo con carga de PCDD/F. Para evitar riesgos de explosiones en el filtro de mangas quizá sea necesario mezclar el carbón activo con cal viva, aunque esto aumenta la cantidad total de residuos a eliminar y limita las posibilidades de reutilización del polvo filtrado.

Datos operativos

Las mediciones de dioxinas durante el proceso en los cubilotes de viento caliente dotados de sistemas secos de eliminación de partículas muestran niveles elevados de PCDD/F (5 ng TEQ/Nm^3) en el intercambiador de calor. En otros dispositivos de la línea de gases los niveles son muy inferiores, de ahí que las medidas de reducción deban ir enfocadas a minimizar el contacto entre las partículas y los gases de combustión en esa zona, reduciendo al mínimo el nivel de partículas o bien su tiempo de residencia.

Mediante la aplicación de medidas primarias es posible conseguir un nivel de emisiones de PCDD/F de $0,5 \text{ ng TEQ/Nm}^3$, que podría reducirse aún más utilizando una o más de esas técnicas. Un estudio realizado en Alemania concluyó que sin medidas secundarias sólo un número limitado de plantas pueden obtener un nivel de $0,1 \text{ ng TEQ/Nm}^3$, y aun así sólo hasta cierto punto. Los datos operativos se analizan en el apartado 3.8.2, pero de ellos se desprende que el nivel de emisiones debería evaluarse planta por planta.

En otros sectores las medidas secundarias han permitido reducir los niveles por debajo de $0,1 \text{ ng TEQ/Nm}^3$.

Con una velocidad de gases residuales de $8.000 \text{ m}^3/\text{h}$ y una velocidad de inyección de $3.000 \text{ m}^3/\text{h}$ se necesitan $4 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua para llevar a cabo un enfriamiento rápido en los gases generados por los cubilotes (de 800 a 150°C).

Aplicabilidad

Estas técnicas se utilizan en otros sectores industriales, como por ejemplo el de la producción de acero y metales no férreos o la incineración de residuos. Desde un punto de vista técnico podrían adaptarse a los tipos de hornos con escaso riesgo de formación de dioxinas: cubitotes, hornos rotativos y hornos eléctricos de

arco dedicados a la fusión de hierro y acero (apartado 3.8.2). Tanto en las fundiciones nuevas como las existentes deben analizarse caso por caso las medidas de reducción de dioxinas primarias (como combustión eficiente, modificaciones en el diseño del horno o control de la calidad de la chatarra) antes de adoptar medidas secundarias.

La inyección de aditivo implica tener que instalar un depósito de aditivo, un sistema de inyección y, en el caso de la inyección de carbono, adoptar medidas de control para evitar la acumulación de aditivo. Para prevenir los riesgos de incendio puede mezclarse el carbón activo con cal viva e inyectarse después del primer filtrado, aunque antes de la unidad secundaria de filtrado específica.

El uso de filtros catalíticos supone muy pocas adaptaciones técnicas para las plantas existentes, ya que sólo deben sustituirse las mangas del filtro por otras de tipo catalítico.

Datos económicos

Las medidas primarias no requieren inversiones adicionales. Los costes operativos se limitan al uso de oxígeno o al precio más elevado de la chatarra limpia.

En la Tabla 4.34 se muestra una estimación de costes correspondiente a un cubilote de viento caliente. Los costes operativos dependen de la dosis de inyección del coque y se muestran en la Tabla 4.35. No se tienen en cuenta los costes de personal, mantenimiento, recambios, la posible necesidad de cambiar la manga más pronto o de instalar mangas de distinta calidad.

Tabla 4.34. Estimación de costes de inversión de unas instalaciones de inyección de carbón dispuestas en un CVC [230, CAEF, 2003]

Parámetro	Unidades	Valor
Caudal volumétrico	Nm ³ /h	50.000
Horas de funcionamiento	h/año	6.250
Aditivo en polvo		Coque para hornos de solera abierta
Precio del aditivo	EUR/t	400
Costes de vertedero	EUR/t	300
Costes energéticos	EUR/kWh	0,09
Contenido de partículas		2 g/Nm ³ – 100 kg/h
Costes de inversión: incluye depósito, equipo de seguridad, recirculación e integración		
• coste total	EUR	350.000
• coste anual	EUR/año	52.500
Consumo energético	kW	10
Coste del consumo energético	EUR/año	6.000

Los sistemas dotados de filtros de manga catalíticos se emplean en el sector de la incineración de residuos. Los costes derivados de esta implantación se han extrapolado tomando como referencia el volumen de gases de combustión que deben tratarse, pero sin considerar parámetros operativos como por ejemplo la relación entre aire y tejido. Estableciendo un período de amortización de 5 años, los costes operativos y de inversión estimados son de aproximadamente 0,4 – 0,5 EUR/tonelada de metal fundido para CVC o bien 0,9 – 1,3 EUR/tonelada de metal fundido (CVF). Esta estimación de precios no fue ni confirmada ni desmentida por parte de un proveedor de filtros de manga catalíticos.

Tabla 4.35. Costes totales de instalaciones de inyección de carbón dispuestas en un CVC [230, CAEF, 2003]

Parámetro	Unidades	Valores			
Contenido en coque	g/Nm ³ (húmedo)	0,2	0,3	0,4	0,5
Consumo de coque	t/año	63	94	126	156
Precio de compra	EUR/año	25.200	37.600	50.400	62.400
Costes de vertedero	EUR/año	18.900	28.200	37.800	46.800
Costes de inversión de la depuración	EUR/año	52.500	52.500	52.500	52.500
Coste energético	EUR/año	6.000	6.000	6.000	6.000
Coste total	EUR/año	102.600	124.300	146.700	167.700

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la legislación que limita las emisiones de dioxinas y furanos generados por la fusión de metal.

Ejemplos

Ejemplos de reducción mediante la instalación de sistemas de inyección de oxígeno: 3 plantas de los Países Bajos (CVF).

Ejemplos de inyección de carbón activo: 1 planta alemana.

Publicaciones de referencia

[155, European IPPC Bureau, 2001], [161, UK Environment Agency, 2002], [202, TWG, 2002], [224, Helber, et al., 2000], [230, CAEF, 2003].

4.5.1.5. Eliminación de olores

La emisión de malos olores se asocia básicamente a procesos en los que se utiliza aglomerante para ligar la arena. Los productos de la pirólisis que dan lugar a olores pueden variar dependiendo del tipo de sistema utilizado, aunque normalmente los productos de descomposición fenólica, por ejemplo cresoles o xilenoles, son las principales fuentes de emisión de olores a causa de su bajo umbral olfativo. La dispersión de olores que se produce durante la colada, el enfriado y el desmoldeo ocupa un gran volumen de aire, lo que complica su captura y tratamiento. El uso de aglomerantes inorgánicos, por ejemplo el silicato de sodio, puede reducir sustancialmente las emisiones. No se tiene conocimiento en la actualidad de la existencia de ningún método de probada eficacia para la eliminación de olores generados por las fundiciones. Las precauciones generales consisten en proporcionar buena ventilación y una velocidad de renovación del aire que garantice que las emisiones se dispersen rápida y eficientemente a la atmósfera. Entre las medidas integradas en los procesos se incluye la sustitución de aglomerantes o disolventes de aglomerantes (véase apartado 4.3.3.7). Las técnicas de eliminación que se llevan a cabo al final de la cadena tienen como objetivo eliminar los productos de pirólisis (véase apartado 4.5.8.5) y las aminas (véase apartado 4.5.8.4); se trata, por ejemplo, de técnicas de adsorción o postcombustión, lavadores húmedos y filtros biológicos (véase apartado 4.5.8.6).

4.5.2. Cubilotes

4.5.2.1. Captura, depuración y enfriamiento de los gases

Descripción

El diseño de los sistemas de captura y depuración de gases se basa en las condiciones que tienen lugar durante el apagado del horno, ya que son las más duras de todo el proceso. Al final de la campaña de colada el

horno no se llena nuevamente de materiales de carga; las temperaturas del gas aumentan gradualmente al no ser compensadas por la entrada de una carga fría en la chimenea. El CO, al entrar en contacto con el oxígeno, se quema automáticamente, y las temperaturas pueden alcanzar los 1.200 °C o incluso más. El sistema de captura de gases de combustión y de tratamiento debe poder hacer frente a estas condiciones extremas.

Captura

Se utilizan dos sistemas de captura del gas del tragante:

- *Abertura por encima del agujero de carga:* los gases de salida son conducidos al final de la chimenea del cubilote por medio de una serie de conductos y un ventilador situado más abajo. La abertura situada por encima del agujero de carga permite la entrada de un flujo de aire considerable, necesario para evitar que los gases salgan despedidos de la zona. Este volumen de aire adicional puede ser muchas veces superior al caudal de gases del cubilote, lo que hace que sean mayores el tamaño y la capacidad necesarios del sistema de depuración. La reducción del tamaño del agujero de carga puede ser una opción, aunque muy limitada por el hecho de que existe riesgo de explosión cuando se mezcla demasiado poco oxígeno con los gases del cubilote, que contienen CO (combustión pulsante).
- *Abertura por debajo del agujero de carga:* los gases del tragante se recogen por medio de un anillo anular situado debajo del agujero de carga. No se requiere entrada de aire al no poder escapar los gases por el orificio, siempre y cuando el sistema de control sea lo suficientemente sensible para funcionar correctamente cuando se producen variaciones en el viento del cubilote. Si la velocidad de descarga es demasiado baja podrían emitirse gases sin limpiar por la chimenea, y si es excesiva podría entrar aire por el tragante, lo que provocaría la combustión y el sobrecalentamiento de los gases (es decir, riesgo de explosión).

Enfriamiento

Tras la recogida de los gases es posible que haya que enfriarlos (dependerá del sistema de extracción de partículas). Si el cubilote es de inyección de aire caliente el calor recuperado durante el enfriamiento puede emplearse para precalentar el viento.

Son varios los sistemas disponibles para enfriar los gases capturados, por ejemplo:

- *Enfriadores tubulares:* si los gases recogidos se conducen por largos tubos disminuye su temperatura por convección y radiación naturales. Es un sistema sencillo, pero ocupa mucho espacio y no permite controlar el enfriamiento (lo que aumenta el riesgo de condensación).
- *Intercambiador de calor de aire/gas forzado:* el aire ambiente frío se introduce forzosamente a través de un conjunto de tubos o placas destinados a enfriar los gases. La recogida de las partículas y la necesidad de limpiar las superficies intercambiadoras de calor pueden provocar que el diseño del sistema sea complejo, además de encarecerlo. Una de las ventajas de este sistema es que permite aprovechar externamente el aire calentado (para calefacción). Los cubilotes de viento caliente de calor recuperable están dotados de una unidad de postcombustión y un intercambiador de calor (recuperador) para calentar el aire de inyección.
- *Intercambiador de calor de aceite/gas:* se parece al sistema anterior pero resulta más caro al necesitar un sistema de enfriamiento secundario. El intercambiador de calor normalmente se enfría por medio de un circuito de aceite mineral. El enfriamiento a través de intercambiadores de calor de agua/gas no se utiliza (o sólo muy raramente).
- *Saturación por agua:* los gases se enfrían por evaporación del agua pulverizada sobre el flujo de gas. Los lavadores húmedos funcionan mejor si los gases se enfrían en una cámara de saturación antes de su depuración. Si se utilizan filtros de mangas únicamente se puede llevar a cabo una saturación parcial para evitar que tejido filtrante de las mangas se obstruya por la condensación del agua. Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema se requiere un buen sistema de control. El rápido enfriamiento de los gases tiene la ventaja de reducir el riesgo de formación de dioxinas.

Depuración de partículas

Se utilizan equipos de distinto tipo para extraer la partículas de los gases residuales. Por lo general los costes de inversión y mantenimiento de los lavadores húmedos son bajos, pero necesitan mucha energía para lograr

una eficiencia de recogida aceptable. La eliminación de lodos es compleja, ya que el agua de lavado debe tratarse antes de la descarga. Los sistemas de captura en seco requieren una mayor inversión y un mejor control del gas de entrada (temperatura, condensación del agua o de los vapores orgánicos, relación $\text{CO}:\text{O}_2$, chispas) pero normalmente requieren menos energía que los lavadores húmedos. Las partículas secas procedentes de los cubilotes pueden reciclarse y recircularse en los hornos (véase apartado 4.9.4.2).

En los cubilotes se utilizan tanto lavadores venturi como desintegradores. Estos sistemas se describen en el apartado 4.5.1.3. El separador que extrae las pequeñas partículas de las gotas de agua se encuentra después del lavador húmedo.

Algunas observaciones respecto a los sistemas secos:

- *Multiciclones*: a menudo se utilizan de forma conjunta con filtros de manga, que se encargan de atrapar las partículas de polvo más gruesas. Ayudan a evitar que las partículas de coque incandescentes lleguen al tejido filtrante. Si en la construcción del ciclón se emplean material refractario y acero de gran calidad podrá funcionar a altas temperaturas. Nótese, sin embargo, que la eficiencia de los ciclones no basta por sí sola para cumplir con las exigencias de las normativas actuales, por ello se emplean en conjunción con otros sistemas de depuración de partículas.
- *Filtros de mangas*: son el sistema ideal si los gases se queman antes de la depuración de partículas, ya que se evitan los problemas derivados de la deposición del material carbonoso y el riesgo de incendios. Los filtros de mangas pueden diseñarse de modo que recojan eficientemente partículas de humo metalúrgico, por ejemplo de ZnO .
- *Precipitadores electrostáticos*: estos sistemas no son tan habituales en el sector europeo de la fundición. Resultan especialmente adecuados en condiciones de trabajo más o menos constantes, por ejemplo en cubilotes de largas campañas, a causa de su sensibilidad a las variaciones en la temperatura, humedad y caudal del gas. Existe riesgo de explosión durante la depuración de gases incombustos mezclados al aire a causa del volumen relativamente grande del precipitador, que debe limpiarse por descarga antes de que se suministre energía eléctrica.

La Figura 4.12 muestra una representación esquemática de un cubilote de viento frío dotado de sistema de recuperación del calor y filtro de mangas.

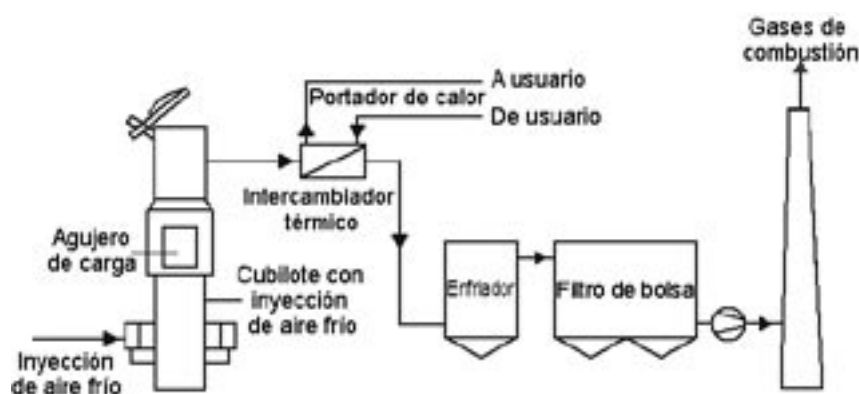


Figura 4.12.
Diagrama de flujo de un cubilote de viento frío dotado de sistema de recuperación del calor y de enfriamiento y filtro de mangas [29, Batz, 1986]

Postcombustión

La postcombustión de los gases de combustión sirve para optimizar la recuperación del calor (químicamente ligado en forma de CO) y lograr limpiar los gases. Al quemar el CO se oxida cualquier material carbonoso residual y da lugar a CO_2 y H_2O . El calor generado puede recuperarse internamente mediante un intercambiador de calor y transportarse allá donde se necesite (por ejemplo, para el precalentamiento del aire de inyección).

Suele formar parte de los siguientes sistemas:

- cámara de postcombustión situada antes (filtro de mangas) o después (filtro húmedo) de la unidad de depuración de partículas (descarga por debajo del agujero de carga); más detalles en el apartado 4.5.2.2;
- quemadores (de gas natural) o inyección de aire controlada en la zona de fusión del cubilote (descarga por encima del agujero de carga); más detalles en el apartado 4.5.2.3.

El diseño del sistema debe garantizar la permanencia de los gases residuales a una temperatura superior a los 800 °C y un tiempo de residencia adecuado, normalmente de 2 segundos, para que se produzca una oxidación completa de los mismos. Los distintos sistemas empleados se describen y analizan en detalle a continuación.

Ventajas medioambientales

La captura y la depuración de gases residuales es una medida necesaria para limitar los productos emitidos por la combustión del coque, por ejemplo NO_x, SO₂, HF y PCDD/F, además de partículas.

La postcombustión del CO permite recuperar (adicionalmente) el calor de los gases de combustión de los cubilotes. También permite la fusión de chatarra contaminada con aceite o grasa sin mayores efectos negativos sobre el medio ambiente, por lo que contribuye al reciclaje de los metales. En cambio, el balance medioambiental de los sistemas de postcombustión sin recuperación del calor es negativo (véase «Efectos colaterales»).

Efectos colaterales

Los sistemas de depuración de partículas generan polvo residual que debe eliminarse, a un ritmo de 5 a 13 kg por tonelada de hierro líquido. Las partículas de polvo tratado pueden recircularse en el circuito del cubilote, como se describe en el apartado 4.9.4.2. Las características de las partículas se han tratado previamente en el apartado 3.2.2.2.

La postcombustión del CO sin recuperación del calor tiene un impacto negativo sobre el medio ambiente, ya que requiere la instalación de quemadores de gran potencia (de varias decenas de kW). Estos quemadores emiten gases de combustión y consumen oxígeno adicional.

Datos operativos

La eficiencia de los filtros de manga supera el 99%, mientras que las emisiones medias diarias se mantienen bastante por debajo de los 10 mg/Nm³. Sumados, el Pb, Zn, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Cr, Ni, As y Cd representan en conjunto alrededor del 20% del contenido total de las partículas. Los datos mostrados en la Tabla 4.36 se han reunido en el marco del programa de estudios realizados por la agencia medioambiental de Alemania respecto de las plantas en funcionamiento. Los siguientes datos corresponden a tres plantas.

Tabla 4.36. Datos operativos de cubilotes de viento frío dotados de filtros de mangas para la depuración de partículas datos obtenidos de [43, Batz, 1996] y [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

	Unidades	Planta D		Planta E	Planta F
		Inicial	Tras remodelación		
Capacidad de fusión					
– según diseño	t/h	7,5 – 8	12,0	6 – 7	4 – 5
– valor real	t/h	7,0	11,0	5,5	3,7
Caudal de gases de salida					
– según diseño	Nm ³ /h	25.000	30.000	20.000	s.d.
– valor real	Nm ³ /h	19.800	22.300	17.400	14.300
Año de construcción del filtro		1981	1995	1988	1985

.../...

.../...

	Unidades	Planta D		Planta E	Planta F
		Inicial	Tras remodelación		
Última sustitución del tejido del filtro		s.d.	1995	1988	1993
Fecha de las mediciones		07/1981	11/1997	03/1993	03/1993
Emisiones	mg/Nm ³				
– partículas		1.623 – 2.674		s.d.	s.d.
– gas bruto					
– gas limpio					
• media ¹		21,5	< 1	3	3
• mín.		18,0	< 1	1	2
• máx.		25,4	< 1	5	
– gaseosas ²					4
• SO ₂		288	s.d.	174	227
• NO _x		43	s.d.	24	31
• C _{total}		s.d.	s.d.	22	7
• CO		700	s.d.	11.890	18.980
• CO ₂	%	7	s.d.	4,9	3,9
Emisión de metales pesados	mg/Nm ³	Bruto	Limpio	Gas limpio	s.d.
– Cd		0,0184	0,0019		s.d.
– Cr		0,7287	0,0384	0,00313 (ΣCu, Mn, Cr, V)	
– Pb		29,895	0,2952		
– Zn		16,464	0,2862		
– Ni		0,2024	0,0077	0,00057	
– As		0,7665	0,0149		
– Mo		0,2672	0,0420		
Emisiones de PCDD/F			s.d.		
– gas limpio ³	ngTEQ/Nm ³			0,512	0,085
– factor de emisiones	µg TEQ/t Fe			1,620	0,330
Polvo filtrado					
– cantidad recogida	kg/t Fe	6,5 eliminación	8,2 reutilización		
– PCDD/F-Gehalt	µg TEQ/kg			4,850	0,960
Material del filtro		Tejido de poliéster con recubrimiento de PA	Fibra sintética	Poliéster	Tejido agujado
Depuración del filtro		Pulse jet	Contraflujo de presión media	Neumático con control de la caída de presión	
Coste de inversión	‘000 EUR	385 (1981)	370 (1995/96)	s.d.	350
Coste operativo	EUR/t de pieza buena	9,8 (1982) = 3% de los costes de moldeo	9,04 (1998) = 2,8% de los costes de moldeo	s.d.	s.d.

¹ Media de partículas calculada según datos obtenidos tras 3 – 5 mediciones efectuadas cada media hora

² Las concentraciones de dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, carbono total, monóxido de carbono y dióxido de carbono son promedios calculados a partir de mediciones continuas realizadas durante varias horas de muestreo de partículas o PCDD/F

³ Tiempo de muestreo: 6 horas

s.d.: sin datos

Los datos correspondientes a los cubilotes de viento caliente pueden consultarse en el apartado 4.5.2.2.

Aplicabilidad

Esta técnica puede aplicarse a todos los cubilotes, nuevos o ya existentes.

Datos económicos

La Tabla 4.36 muestra los niveles de emisión y los datos económicos. Los costes operativos más significativos son los derivados del consumo de electricidad del material y los correspondientes al material del filtro.

Los datos de un presupuesto calculado para unas instalaciones de fusión dotadas de dos cubilotes de viento frío con una velocidad de colada de 4,5 t/h incluían los siguientes detalles:

- equipo de depuración para el tratamiento de hasta 12.400 m³/h de aire de inyección, con cámara de combustión a una temperatura de 820 °C, con una capacidad de hasta:
 - COV: 1 g/Nm³;
 - CO: 59.100 g/Nm³;
- dos quemadores de metano con una potencia por equipo de 390 kW

Precio de instalación y puesta en marcha: 350.000 euros.

Coste de funcionamiento previsto, con una producción de 4.500 toneladas de piezas, un período de amortización de 5 años más un 10% anual adicional en concepto de consumo de energía y mantenimiento: 23,3 EUR/t.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa sobre emisiones atmosféricas de las fundiciones.

Ejemplos

Las técnicas mencionadas se utilizan corrientemente en las fundiciones europeas dotadas de cubilotes.

Publicaciones de referencia

[29, Batz, 1986], [32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

4.5.2.2. Postcombustión en cámaras de combustión de CVC

Descripción

Tras el cubilote se instala una cámara de combustión equipada con un quemador. Normalmente debe precalentarse una unidad de combustión independiente con un quemador de gas natural. Una vez el cubilote está listo y en funcionamiento un pequeño quemador se encarga de mantener la combustión de los gases o bien éstos se inflaman espontáneamente.

La ubicación y el tipo de cámara varían según cuáles sean las características del proceso. Existen cámaras de combustión tanto verticales como horizontales.

- *Cubilote de viento caliente con recuperación de calor y lavador húmedo* (Figura 4.13): en este tipo de cubilotes los gases se someten a depuración de partículas antes de la combustión. De este modo se reduce la acumulación de polvo en el recuperador, lo que mejora la rapidez de la transferencia térmica. Una desventaja de este sistema es que aumenta el consumo energético de la unidad de postcombustión debido a que los gases se enfrían en el lavador húmedo. Para reducir el tamaño de la unidad de depuración de partículas se lleva a cabo un enfriamiento inicial continuo de los gases de salida.

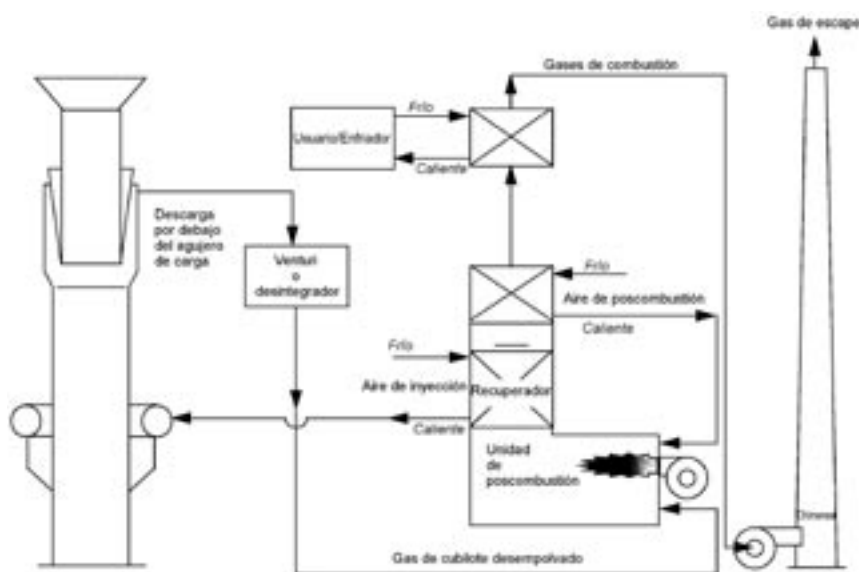


Figura 4.13.
Cubilote de viento caliente con recuperación de calor y lavador húmedo
[32, CAEF, 1997]

- **Cubilote de viento caliente con recuperación de calor y filtro de mangas** (Figura 4.14): los gases del tragante, calientes y cargados de polvo, pasan directamente a la unidad de postcombustión. Se requiere un control exhaustivo del proceso para evitar la sinterización de las partículas de polvo en las paredes del recuperador, que deben limpiarse periódicamente. Los gases requieren un enfriamiento ulterior antes de entrar en el filtro de mangas, ya que abandonan el recuperador con una temperatura de entre 500 y 600 °C.

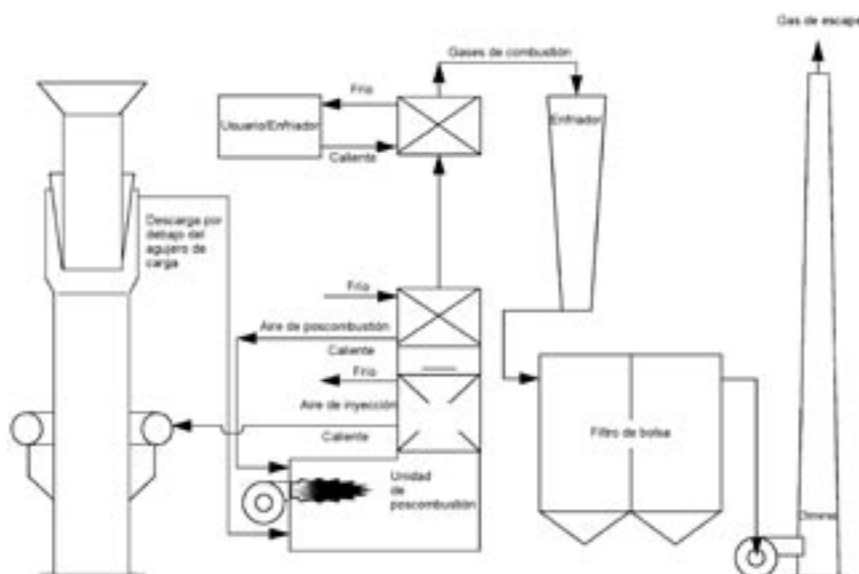


Figura 4.14.
Cubilote de viento caliente con recuperación de calor y filtro de mangas
[32, CAEF, 1997]

Ventajas medioambientales

La postcombustión limita las emisiones de CO y elimina la mayoría de compuestos orgánicos que, de no someterse a combustión, serían capturados junto con las partículas a través de la chimenea. Por otro lado, la postcombustión reduce el riesgo de que se incendie el filtro.

Efectos colaterales

Las técnicas de depuración de partículas en seco generan partículas como residuos (4 – 12 kg/t de hierro líquido). Estas partículas pueden recircularse en el circuito del cubilote, como se explica en el apartado 4.9.4.2. Los sistemas húmedos producen una fracción de lodos.

1. La fundición G está en funcionamiento durante 3 turnos al día y 5 días a la semana y tiene una capacidad de fusión de 50 t/h. Los gases residuales se recogen por debajo del agujero de carga y se queman en el recuperador. Después el gas de combustión se separa: una parte se dedica a la producción de viento caliente ($T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la otra va a parar a la caldera de vapor. El vapor se conduce a una turbina que suministra energía a un generador o compresor. El calor residual se utiliza para precalentar el aire de combustión del recuperador. A continuación se limpia el gas de combustión en un filtro de mangas. En el apartado 4.7.3 se incluye un esquema técnico de funcionamiento y más datos de instalación. El polvo se recicla y reutiliza en el cubilote tras mezclarlo con el coque de petróleo, como se trata en el apartado 4.9.4.2.
2. La fundición H está en funcionamiento durante 3 turnos al día y 5 días a la semana y tiene una capacidad de fusión de 70 t/h. Los gases residuales se recogen por debajo del agujero de carga y se limpian en un desintegrador antes de quemarse en recuperador por postcombustión. El calor se utiliza para precalentar el aire de inyección y se somete a un proceso de recuperación adicional antes de salir por la chimenea a una temperatura de $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el apartado 4.7.3 se aportan más datos sobre la instalación de recuperación de calor. El agua residual se recircula al circuito tras la sedimentación. El volumen del agua en circulación es de $440\text{ m}^3/\text{h}$. Los lodos del tanque de sedimentación se secan en un filtro prensa hasta reducir el contenido de sólidos secos al 50% antes de su eliminación. La cantidad de agua diaria que va a parar a las alcantarillas para su tratamiento es de aproximadamente 80 m^3 .

Tabla 4.37. Datos operativos correspondientes a cubilotes de viento caliente dotados de filtro de mangas y un desintegrador para la extracción de partículas [17, Strauß, 1983], [27, Kran, et al., 1995], [202, TWG, 2002]

	Unidades	Planta G	Planta H
Capacidad de fusión	toneladas/h	50	50
Caudal de gas residual	Nm³/h	75.000	55.000
Temperatura de inyección	°C	600	570
Temperatura de los gases de salida	°C	127	220
Año de construcción del equipo de tratamiento de gases		1989	1983
Datos de las mediciones		10/1990	Medición de control 09/1993
Emisiones	mg/Nm³		
– Partículas			
• Gas bruto		1.300 – 4.300	8.000 – 20.000
• Gas limpio: media¹		1,1	6,1
máximo		1,8	7,3
– Gaseosas²			
• SO ₂		33	15,6
• NO _x		44	52,5
• C _{total}		< 5	28,6 (FID)
• CO		32	< 100
• O ₂	%	12,2	6,4
Emisión de metales pesados	mg/Nm³	Gas limpio³	Gas limpio
– Cr		< 0,001	< 0,0022
– Cr _{total}		< 0,001	s.d.
– Pb		< 0,001	0,11
– Zn		< 0,011	0,36
– Ni		s.d.	< 0,004

.../...

	Unidades	Planta G	Planta H
Emisiones de PCDD/F ¹			
– Gas limpio ⁴	ng TEQ/Nm ³	0,048	0,003
– Factor de emisión	µg TEQ/t de Fe	0,089	0,004
Polvo filtrado/lodo		Reciclaje de partículas	Tortas de desecho del filtro
– Cantidad	kg/t de Fe	4,5	5,5
– Contenido de PCDD/F	µg TEQ/kg	0,176	1,4
Utilización de calor residual		Inyección, vapor para la producción de electricidad (hasta 3 MW)	Inyección, aceite térmico para convertir el calor en apto para calefacción y secado (hasta 21 MW)
Costes de inversión	‘000 DEM	26.400	22.700 en 1980/81
Costes operativos	DEM/tonelada de pieza buena	Véase información en el texto sobre la fundición G	Véase información en el texto sobre la fundición H

¹ Media de partículas calculada según datos obtenidos tras 5 – 6 mediciones efectuadas cada media hora (2 veces durante dos horas en el caso de PCDD/F)

² Las concentraciones de dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, carbono total, monóxido de carbono y dióxido de carbono son promedios calculados a partir de mediciones continuas realizadas durante varias horas de muestreo de polvo o PCDD/F

³ Cuando se realizó la medición no existían sistemas de reciclaje de partículas en funcionamiento

⁴ Tiempo de muestreo de 2 horas

s.d.: sin datos

nota: El muestreo de gas se realizó antes del filtro de mangas en el caso de G y después del desintegrador en el caso de H. Las muestras de gas limpio se obtuvieron después del filtro de mangas en el caso de G y después del recuperador en el caso de H

Quemar los gases en la cámara de postcombustión no consume excesiva energía, siempre que el humo contenga monóxido de carbono suficiente, como sucede normalmente. Sin embargo, el sistema de tratamiento de humos en su totalidad (cámara de combustión + intercambiador de calor + filtro o lavador húmedo + ventiladores) también requieren energía y mantenimiento periódico. La Tabla 4.38 proporciona algunos ejemplos de consumo de energía de cubilotes de viento caliente.

Tabla 4.38. Consumo de energía de cubilotes de viento caliente

Producción del cubilote (por hora)	Sistema de depuración de partículas	Consumo de gas de la cámara de combustión (kWh/t de carga)	Consumo de electricidad del sistema de tratamiento de humos (kWh/t de carga)
12	Filtro	59	46
12	Filtro	124	72
26	Filtro	42	s.d.
17	Filtro eléctrico (húmedo)	16	38

Aplicabilidad

En la fase de diseño debe prestarse gran atención a la minimización del flujo total de gases destinados a tratamiento. La entrada de aire de combustión debe restringirse al mínimo imprescindible. Por este motivo siempre se utiliza conjuntamente con una unidad de combustión independiente dotada de abertura por debajo del agujero de carga.

Por cuestiones económicas (véase más abajo) la cámara de postcombustión sólo se utiliza en los cubilotes de viento caliente.

Datos económicos

El elevado consumo energético de la unidad de postcombustión sólo se compensa económicamente si se puede reaprovechar el calor liberado por los gases residuales, como sucede en los cubilotes de viento caliente con recuperación de calor. Por ello, convertir un cubilote de viento frío en un cubilote de viento caliente únicamente por la combustión del gas puede no ser económicamente viable en algunos casos. Los CVC, sobre todo los de larga campaña, tienen costes de inversión más altos y sólo se utilizan si la producción de la fundición supera como mínimo las 10 toneladas de Fe/h. Si las instalaciones son más pequeñas puede que este método no sea el más apropiado.

La Tabla 4.37 muestra los datos económicos de dos plantas a modo de ejemplo. La planta G muestra los costes de inversión de un cubilote de viento caliente dotado de filtro de mangas y un extenso sistema de recuperación de calor. Los costes operativos correspondientes a 1994 (tras remodelar el área de colada) fueron un 25% inferiores a los de 1985, cuando aún utilizaba el antiguo horno de colada. Tras la remodelación los costes operativos descendieron aproximadamente un 2% por tonelada de hierro líquido.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de los valores límite de emisión y seguimiento continuo del CO y los valores de emisión de los compuestos orgánicos.

Ejemplos

Esta técnica es ampliamente utilizada en CVC de toda Europa.

Publicaciones de referencia

[17, Strauß, 1983], [27, Kran, et al., 1995], [32, CAEF, 1997], [157, Godinot, et al., 1999], [202, TWG, 2002]

4.5.2.3. Postcombustión en la zona de fusión del horno

Descripción

Los gases se queman al inyectar aire en la parte superior de la carga o en un punto situado por encima del nivel superior de carga. El caudal se ajusta de modo que los gases de combustión se inflaman espontáneamente a causa del contenido de CO y la temperatura. Las toberas de inyección pueden colocarse formando uno o dos niveles. La división del flujo de aire en varios niveles, la elección del diámetro y la posición de las toberas se realizan en base a la experiencia. El objetivo de la optimización es quemar el CO sin que llegue a encenderse el coque. La corriente también absorbe aire a través de la puerta de carga; este exceso de aire propicia una combustión completa del CO.

Para mantener la llama puede utilizarse un quemador auxiliar. Si el contenido de coque de las cargas es muy bajo (por ejemplo inferior al 6 – 8%) la medida de precaución es razonable.

La postcombustión de gases residuales debe combinarse con el enfriamiento de los gases si se utiliza un filtro de mangas. En los cubilotes de viento caliente este enfriamiento se combina con el precalentamiento del aire de inyección. En los CVF puede llevarse a cabo un enfriamiento rápido inyectando agua en la zona de fusión del horno. Como alternativa puede usarse un intercambiador de calor (gases residuales – aire); véase Figura 4.15.

La instalación de un sistema de postcombustión en un cubilote de viento frío puede hacerse coincidir con una reconversión completa a un cubilote de viento caliente, una decisión que normalmente se basa en consideraciones operativas. Las características de la inyección de aire caliente y los hornos de larga campaña se analizan en el apartado 2.4.1.

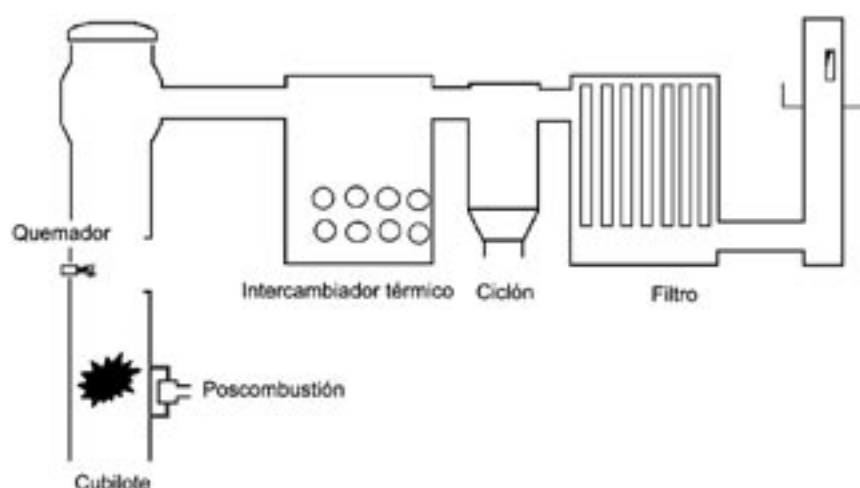


Figura 4.15.
Postcombustión y enfriamiento de gases de combustión en un cubilote de viento frío [157, Godinot, et al., 1999]

Ventajas medioambientales

La postcombustión limita las emisiones de CO y elimina la mayoría de compuestos orgánicos que, de no someterse a combustión, serían capturados junto con las partículas a través de la chimenea. Por otro lado, la postcombustión reduce el riesgo de que se incendie el filtro.

Esta técnica destaca por ser capaz de evitar los riesgos de explosión en determinadas circunstancias, aunque el efecto medioambiental positivo se limita cuando el gas residual se inflama constantemente por su propia temperatura. De no ser así el consumo de energía compensaría la reducción de CO.

Efectos colaterales

Si los gases de combustión del cubilote no se inflaman espontáneamente es necesario instalar un quemador auxiliar o con ignición. Estos equipos aumentan considerablemente el uso de energía y el volumen global de gases de combustión.

Datos operativos

La Tabla 4.39 muestra los datos operativos de un estudio realizado a escala industrial por CTIF sobre dos opciones de (postcombustión en la zona de fusión y) enfriamiento en cubilotes de viento frío. El cubilote I está equipado de un sistema de inyección de agua en la zona de fusión, un ciclón y un filtro de mangas y el J de un intercambiador de calor, un ciclón y un filtro de mangas. Los resultados de las mediciones y las referencias a la legislación aplicable se muestran en la Tabla 4.40.

Tabla 4.39. Datos operativos de dos posibles sistemas de postcombustión, con refrigeración por agua (I) y por aire (J) [157, Godinot, et al., 1999]

Parámetro	Unidades	Fundición I	Fundición J
Capacidad de colada	t/h	10,3	9,2
Caudal primario + secundario	Nm ³ /h	7.389	6.484
Caudal de postcombustión	Nm ³ /h	2.372	1.549
Caudal de agua	l/h	2.678	
Caudal de gases de combustión (chimenea)	Nm ³ /h	26.780	39.179

.../...

.../...

Parámetro	Unidades	Fundición I	Fundición J
Tiempo de residencia (combustión – filtro de mangas)	s	10,5	12,3
Tiempo de residencia (fase de enfriamiento)	s	< 1.7	6,01
Eficiencia general de la combustión de CO	%	66	96,5

Tabla 4.40. Resultados analíticos y legislación (francesa) aplicable sobre la postcombustión en cubilotes de viento frío con refrigeración de los gases de combustión por agua (I) y por aire (J) [157, Godinot, et al., 1999]

Compuesto	Fundición I		Fundición J		Arrêté du 02/02/98	
	Concentración	Flujo	Concentración	Flujo	Valor límite	Límite de estudio*
Partículas	1,7 – 2,8 mg/Nm ³ 3 – 5 g/t	0,04 – 0,07 kg/h	1 mg/Nm ³ 34 g/h		100 mg/Nm ³ 200 g/t	< 1 kg/h colada = 8 t/h
CO	450 Nm ³ /h	560 kg/h	35 Nm ³ /h	44 kg/h		50 kg/h
HCl	22 mg/Nm ³	0,4 kg/h	9,2 mg/Nm ³	0,35 kg/h	50 mg/Nm ³	1 kg/h
HF	13 mg/Nm ³	0,24 kg/h	4,8 mg/Nm ³	0,18 kg/h	5 mg/Nm ³	0,5 kg/h
HCN	< 0,007 mg/Nm ³	0,13 g/h	< 0,01 mg/Nm ³	0,38 kg/h	5 mg/Nm ³	50 g/h
NH ₃	0,61 mg/Nm ³	12 g/h	0,10 mg/Nm ³	3,8 g/h	50 mg/Nm ³	100 g/h
NO _x	9 mg/Nm ³	0,17 kg/h	15 mg/Nm ³	0,57 kg/h	500 mg/Nm ³	25 kg/h
COV (excepto metano)	13 mg/Nm ³	0,25 kg/h	6 mg/Nm ³	0,23 kg/h	110 mg/Nm ³	2 kg/h

* Si el flujo se sitúa por debajo del límite de estudio los valores de medición podrían superar los valores límite

La pulverización de agua alcanza una eficiencia de eliminación de CO del 66% y permite cumplir con la legislación vigente. El enfriamiento de gases de combustión en un intercambiador de calor logra un nivel de eficiencia superior (98%). Para obtener más información sobre el rendimiento de los sistemas de refrigeración véase también el apartado 4.5.2.1.

Aplicabilidad

Cambiar el sistema de descarga de un cubilote existente de la parte superior del agujero de carga a la inferior es imposible en la mayoría de casos. La postcombustión de los gases en la zona de fusión del horno es, pues, una opción más viable para los cubilotes dotados de descarga por encima del agujero de carga.

Por motivos económicos la implantación de las técnicas de postcombustión se ha limitado normalmente a los cubilotes de viento caliente. Sin embargo, recientemente se ha desarrollado un sistema de postcombustión para los cubilotes de viento frío que resulta menos complejo que el utilizado en los CVC. Este sistema se emplea en la actualidad en Francia. Así pues, la postcombustión en la zona de fusión del horno puede adaptarse hoy por hoy tanto a los CVC como a los CVF.

En la República Checa se analizó la viabilidad de la postcombustión en la zona de fusión del horno en todas las instalaciones dotadas de cubilotes de viento frío existentes en el país. No se produjo combustión espontánea en ninguna de las configuraciones de sistema y en ningún momento del período de colada. En todos los casos fue necesario instalar quemadores con ignición de considerable potencia. También aumentó el volumen de emisiones.

Datos económicos

Es necesario evaluar el elevado consumo energético de los sistemas de postcombustión, además de los beneficios. En los CVC el calor liberado por los gases de combustión puede reutilizarse, lo que hace que la inversión sea más viable.

Este elevado consumo sólo es económicamente viable si el calor liberado por los gases de salida puede aprovecharse, como sucede en los cubilotes de viento caliente con recuperación de calor. A pesar de todo, convertir un cubilote de viento frío en un CVC sólo por la combustión de gas no resulta posible. Los CVC, especialmente los de larga campaña, tienen unos costes de inversión elevados que sólo están justificados si la producción de la planta es de 10 toneladas de Fe/h o más. Si las fundiciones son más pequeñas puede que este método no sea el más apropiado.

Los costes de inversión de un cubilote de viento frío doble con un diámetro interno de 850 mm y una producción de 4,5 toneladas a la hora, durante 10 horas al día y 5 días por semana, se sitúa entorno a los 300.000 EUR.

Ventajas de la implantación

Limitar los valores de las emisiones y realizar un seguimiento continuo de los niveles de emisión permitidos para los compuestos orgánicos del CO.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en dos fundiciones de Francia.

Publicaciones de referencia

Inyección caliente: [150, ETSU, 1998], [202, TWG, 2002].

Inyección fría: [157, Godinot, et al., 1999], [202, TWG, 2002].

4.5.3. HEA

4.5.3.1. Captura de gases residuales

Descripción

Los HEA generan partículas muy finas y difíciles de capturar. De hecho, la captura de partículas y gases es el principal problema a resolver al instalar un sistema de depuración en un horno eléctrico de arco. Existen varios métodos, cada uno de los cuales tiene ventajas e inconvenientes. La Figura 4.16 muestra cómo funcionan las campanas extractoras colocadas en el tejado, de aspiración lateral y por evacuación a través del cuarto agujero.

- *Campanas extractoras de montaje en el techo*: la campana fijada al techo del horno recoge los humos por un orificio situado entre la estructura del horno y el tejado. Los gases procedentes de la puerta de trabajo y del agujero de colada también deben capturarse. Las campanas que se instalan en el tejado son pesadas y se ven afectadas por el calor. Si se instalan en un HEA existente puede haber problemas a causa del aumento de la carga estructural del mecanismo de elevación y rotación. Los valores de extracción característicos de este sistema oscilan entre 7,500 y 15,000 Nm³/tonelada.
- *Campanas de aspiración lateral*: estas campanas se montan en el techo del horno y recogen los humos emitidos a través de los agujeros de paso del electrodo gracias a unas palas que lo dirigen hacia el techo. Se utilizan también campanas adicionales situadas sobre la puerta de trabajo y el agujero de colada para capturar las emisiones que allí se generan. En este caso se requieren velocidades de extracción más elevadas en comparación con las campanas de montaje en techo, ya que se necesita una gran corriente de aire para capturar los humos. En cualquier caso, a menos que las campanas se sellen exhaustivamente, siempre se produce alguna fuga de contaminantes al interior de la planta. Se sabe que las campanas de extracción lateral aumentan el consumo de electrodos.

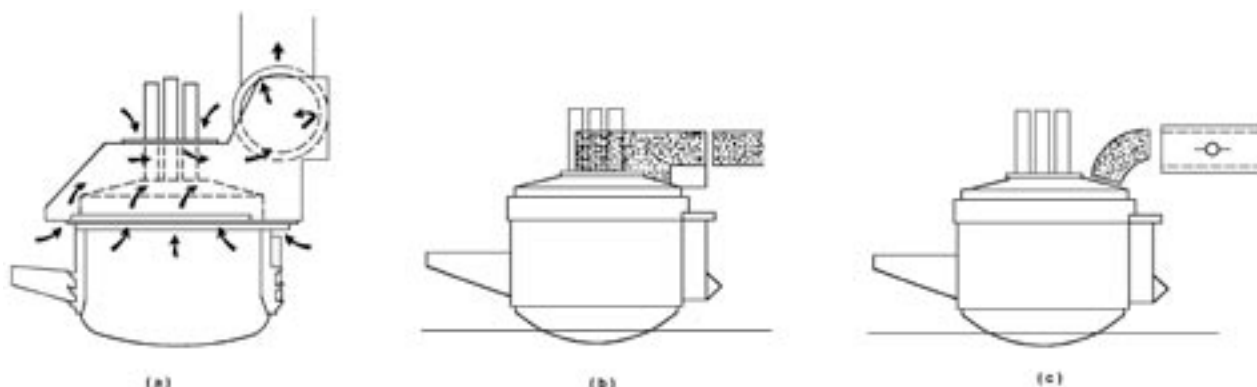


Figura 4.16. Diseño de (a) una campana de montaje en el tejado, (b) una campana de aspiración lateral y (c) un sistema de evacuación directa por el cuarto agujero [173, Huelsen, 1985]

- **Campanas de cúpula:** en este caso se coloca una campana de captura de gases de salida de grandes dimensiones que cubre la totalidad de la estructura del horno, por encima del sistema de carga. Esta estructura deja un gran espacio abierto entre el horno y el sistema de extracción, dificultando el control del humo y el polvo que se elevan, incluso a velocidades altas de extracción. Las corrientes transversales pueden afectar seriamente a la eficacia de la captura. Estas desventajas hacen que sea un sistema de extracción poco atractivo.
- **Evacuación directa del horno o a través del «cuarto agujero»:** los humos se recogen a través de un conducto refrigerado por agua y revestido de refractario conectado a un cuarto agujero situado en el techo del horno. El aire ambiente se aspira por medio de una conexión existente en las tuberías que proporciona el oxígeno necesario para quemar el gas CO que se encuentra en los humos de descarga, aún calientes y sin diluir. De este modo se evitan las explosiones en el sistema de captura de partículas. Las dimensiones de la cámara de combustión son de vital importancia para garantizar un nivel de combustión suficiente en todas las etapas del ciclo de fusión. El gas quemado (900 °C) se enfría desde la parte inferior del conducto diluyéndolo con el aire ambiente, a través de la inyección de agua, intercambiadores de calor (camisas de refrigeración) o mediante el empleo de largos tubos. Este proceso de enfriamiento es necesario para proteger el equipo de filtración de partículas. El uso de sistemas de control de la presión en el horno proporciona una velocidad de extracción relativamente baja en el horno del orden de 2.000 a 4.000 Nm³/tonelada. El consumo de electrodos suele ser más alto a causa de la oxidación.
- **Aislamiento parcial del horno:** consiste en la colocación de estructuras fijas o móviles alrededor del horno y la zona de colada. Las móviles se pliegan para proporcionar espacio suficiente para la carga y la colada, mientras que las fijas están equipadas de un techo y paredes móviles con el mismo fin. Los gases de salida se recogen a través del conducto de salida principal situado en la parte superior de la estructura y los conductos incorporan ventiladores en su interior para contribuir a elevar los humos. Este sistema permite obtener una eficacia de captura de hasta el 98%.
- **Aislamiento total del horno:** este sistema consiste en colocar una gran cámara fija de aire alrededor del horno y el foso de colada. Esta estructura dispone de un techo móvil y/o paneles laterales para proporcionar espacio suficiente para la carga y la colada. Pueden estar equipadas de cortinas de aire para reducir las pérdidas de gas. Sus desventajas son las temperaturas y niveles de ruido elevados que se producen en el interior de la cámara, y sus ventajas, la reducción de ruidos externos y el bajo consumo energético que, según estimaciones, es entre un 30 y un 50% inferior al de las campanas de cúpula.

Ventajas medioambientales

La captura de gases residuales permite controlar la evacuación y el tratamiento del caudal de gases residuales y minimiza tanto las emisiones fugitivas como las conducidas.

Efectos colaterales

La captura de gases residuales aumenta el consumo de energía. Además de depurar los gases de salida genera partículas que deberán eliminarse o reutilizarse.

Datos operativos

La Tabla 4.41 muestra las velocidades de flujo de gases de salida típicas, así como la eficiencia de extracción de varios sistemas de captura.

Tabla 4.41. Velocidades de flujo de gases de salida características (en m³/s) y eficiencia de extracción de partículas de los sistemas de captura de gases de salida de hornos HEA [173, Huelsen, 1985]

	Velocidades de flujo de gases de salida según capacidad del horno			Eficiencia de extracción de partículas (%)	
	3,9 t/h	9,1 t/h	22,7 t/h	Margen	Máximo característico
Campana de extracción lateral	12,9	19,8	50,00	90 – 100	99
Campana de techo	7,7	11,9	30,00	95 – 100	99
Evacuación directa	3,2	5,0	12,5	90 – 100	99
Aislamiento total			35 – 42		

En una fundición de Polonia, la instalación de un aislamiento total en dos hornos HEA con una capacidad de 8,5 toneladas cada uno permitió reducir el nivel de ruido de colada de 91 a menos de 85 dBA.

Aplicabilidad

Las técnicas arriba descritas son válidas para cualquier horno HEA, nuevo o existente, con las siguientes limitaciones:

- cuando se instala una campana de montaje en el techo en un horno existente puede haber problemas a causa de la mayor carga estructural que supone el mecanismo de elevación y rotación del techo;
- la evacuación directa del horno a través del cuarto agujero se limita a los hornos eléctricos de arco de gran tamaño, ya que el techo debe ser lo suficientemente resistente para acomodar el cuarto agujero sin debilitar la estructura. Esta técnica no es válida para la fusión del hierro a causa de la entrada de aire fresco, que provoca una excesiva oxidación del carbono.

Datos económicos

La construcción y montaje de una boca de carga en dos hornos HEA con una capacidad de 8,5 toneladas cada uno representó una inversión de 275.000 euros (precios de 1996), sin incluir los gastos de adaptación de la línea de gases y filtración.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las medidas de prevención en materia de seguridad de los trabajadores. Permite la implantación de una técnica de depuración de gas al conducir el caudal de gases residuales.

Ejemplos

Boca de carga: fundición Metalodlew, Cracovia (Polonia).

Captura de gases residuales: Metso Lokomo Steels y fundición Sulzer Pumps Karhula (Finlandia).

Publicaciones de referencia

[29, Batz, 1986], [32, CAEF, 1997], [173, Huelsen, 1985], [199, Metalodlew s.a., 2002]

4.5.3.2. Depuración de gases de salida

Descripción

Los sistemas de depuración de gas de los HEA tienen que ser muy eficientes a causa del pequeño tamaño de las partículas. Los filtros de manga se utilizan ampliamente para la depuración de partículas de gases de salida; los lavadores venturi o desintegradores son menos utilizados a causa de su mayor consumo energético, el necesario tratamiento del agua antes de su descarga y la necesidad de eliminar o reciclar los lodos húmedos del filtro. Los filtros de manga se prefieren a los electrostáticos, que presentan grandes fluctuaciones en la temperatura del gas y en la concentración de partículas en los gases de salida.

Si se utiliza un filtro de mangas deben adoptarse algunas precauciones para proteger el filtro, como se ha descrito anteriormente en el apartado 4.5.1.3:

- utilización de un ciclón o multiciclón de alta temperatura;
- utilización de equipos de enfriamiento del gas. En los HEA los gases se enfrían al diluirse en el aire ambiente, mediante la inyección de agua, intercambiadores de calor o bien a causa de la longitud de las tuberías. La inyección de agua, en concreto, tiene una ventaja adicional: al enfriar rápidamente los gases de salida evita la recombinación de cualquier sustancia de origen orgánico parcialmente quemada, lo que mejora la calidad de las emisiones. El sistema de refrigeración requiere un control efectivo para evitar que entren en el filtro de mangas gases demasiado calientes.

Ventajas medioambientales

Reducción de la emisión de partículas de los HEA.

Efectos colaterales

La implantación de técnicas húmedas de depuración de partículas provoca un mayor consumo energético y hace necesario tratar las aguas antes de su descarga y eliminar o reciclar los lodos húmedos del filtro.

Datos operativos

Los datos operativos se muestran en el apartado 3.2.3.4. Los filtros de mangas actuales tienen una relación entre aire y tejido de entre 2:1 y 3:1. La relación aire-tejido es la proporción de caudal volumétrico que atraviesa el filtro hasta el material del filtro y se expresa en $(\text{m}^3/\text{s})/\text{m}^2$; su resultado corresponde a la velocidad con la que el aire atraviesa el material del filtro.

Aplicabilidad

Estas técnicas resultan válidas para todas las instalaciones nuevas y existentes.

Datos económicos

En la Tabla 4.42 se resumen los costes de instalación de una nueva unidad de depuración de partículas y filtrado en una fundición polaca dotada de dos hornos de colada HEA con una capacidad de 8,5 t/h. Las emisiones de partículas se han reducido de 10 – 13 kg/h y 145 – 150 mg/Nm³ a 0,2 – 0,25 kg/h y 2,8 – 2,9 mg/Nm³. También se ha registrado una importante reducción de las emisiones difusas generadas en las zonas de colada.

Tabla 4.42. Costes correspondientes a los equipos de depuración y captura de gases de combustión de hornos HEA [199, Metalodlew s.a., 2002]

Costes de inversión	EUR*
Cimientos y remodelación del antiguo colector	115.000
Construcción y montaje de estructuras para la boca de carga de los 2 hornos	275.000
Adquisición y montaje de la unidad de filtrado y dispositivos eléctricos	560.000
Investigación, implementación y supervisión	80.000
Costes operativos	EUR/año
Coste de amortización	100.000
Energía eléctrica	88.000
Mantenimiento y reparaciones	1.500

* Pecios convertidos de zlotys (1999)

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las normas que limitan las emisiones de partículas durante la colada.

Ejemplos

Boca de carga con unidad de filtro de mangas: Fundición Metalodlew, Cracovia (Polonia).

Aceros Metso Lokomo y fundición Sulzer Pumps Karhula (Finlandia).

Publicaciones de referencia

[173, Huelsen, 1985], [32, CAEF, 1997], [29, Batz, 1986], [199, Metalodlew s.a., 2002]

4.5.4. Hornos de inducción

4.5.4.1. Captura de gases de combustión

Descripción

La captura de los gases y las partículas es el principal problema a resolver a la hora de instalar un sistema de captura de gases de combustión en un horno de inducción sin núcleo, ya que no dispone de chimenea de salida. En la pasada década se han desarrollado varios métodos de captura, cada uno de los cuales tiene sus propias ventajas e inconvenientes:

- *Ventilación general del lugar de trabajo:* se trata de una combinación de celosías de ventilación montadas en la pared y ventiladores montados en el techo, sobre la plataforma del horno, para aumentar la convección natural de los gases y dirigirlos al exterior. Aunque se utilicen deflectores suspendidos del techo y velocidades altas de extracción la eficiencia de este sistema suele ser escasa; además, se ve afectado fácilmente por la existencia de corrientes.
- *Extracción mediante campanas:* al no ser posible colocar campanas más bajas, ya que interferirían con los sistemas de carga de grúa, deben instalarse grandes campanas por encima del cargador. Sin embargo, el gran espacio intermedio que se crea entre el horno y el sistema de extracción dificulta el control de partículas y gases de salida aunque se utilicen sistemas de alta extracción. Además, las corrientes cruzadas pueden llegar a afectar muy negativamente a la eficiencia del sistema de captura. Por todo ello resultan sistemas poco atractivos.

- *Campanas de desplazamiento lateral:* estas campanas son más eficientes si se utilizan en conjunción con un alimentador vibrante. La campana tiene unas aberturas que facilitan la carga. Durante la colada la campana se desliza hacia la cuchara, lo que permite extraer con eficacia los gases producidos.
- *Campanas de aspiración lateral:* colocar la campana de extracción junto al horno tiene la ventaja de permitir un fácil acceso al mismo, sin que interfieran los sistemas de carga. A causa de la gran ascendencia de los de los gases de salida se obtienen altas proporciones de extracción que se traducen en una elevada eficiencia, sobre todo si la campana se instala fuera de la plataforma del horno, aunque en este caso el control de la extracción durante la colada resulta insuficiente. Este problema se puede solucionar uniendo la campana a la plataforma del horno, pero ello puede dificultar los procedimientos de carga. La eficiencia puede mejorarse instalando toberas de aire en el lado opuesto a la campana para que el humo y el polvo entren mejor en ésta pero, por desgracia, esta técnica no funciona si se producen interferencias en la corriente de aire, lo que sucede durante la carga.
- *Extracción por el borde:* se coloca un anillo de succión sobre el horno de forma que se mueva con éste durante el desescoriado o la colada. Este sistema no interfiere con el proceso de carga. Si la cubierta está cerrada la succión proporciona un excelente control de las emisiones, ya que el anillo se encuentra lo más cerca posible de las fuentes que las generan y la velocidad de extracción es muy baja. Los gases no atraviesan la zona respirable de los operadores del horno. Sin embargo, este grado de control desciende considerablemente si se abre la cubierta del horno, por ejemplo durante la carga.
- *Extracción por la cubierta:* el gas de salida sale por la cubierta del horno gas. Es un método muy efectivo utilizado por la mayoría de productores de hornos. Los gases de salida se controlan en función del régimen del horno (fusión, carga, colada).

Debe prestarse atención al material utilizado en las campanas y los hornos, ya que la temperatura de los gases puede ser elevada si la entrada del sistema de captura se encuentra cerca del horno. En la fase de diseño debe tenerse en cuenta el calor por radiación o convección que necesita el baño de metal. El correcto mantenimiento y el empleo de sensores térmicos reducen el riesgo de incendios.

También aquí es un factor clave el estado de limpieza de la chatarra. Si contiene materia orgánica, la temperatura de los gases capturados puede ascender a causa de la combustión del material, lo que requeriría emplear acero resistente al calor o incluso revestimiento refractario. Los depósitos de aceite formados por la condensación de los vapores de aceite en los conductos acumulan polvo y pueden representar riesgo de incendios si no se extraen periódicamente. Si la chatarra empleada es limpia (libre de impurezas) basta con utilizar un acero blando como material del horno y no es necesario abrir un acceso para limpiarlo.

Ventajas medioambientales

La captura de gases de combustión permite controlar la evacuación y tratar el caudal de gases, lo que minimiza tanto las emisiones fugitivas como las conducidas.

Efectos colaterales

La utilización de sistemas de captura de gases de salida aumenta el consumo energético. Además, durante la depuración de los gases, se generan partículas que deberán desecharse o reutilizarse.

Datos operativos

A través del empleo de sistemas de captura específicos, por ejemplo campanas de extracción laterales, móviles o aislamientos parciales del horno se puede conseguir una eficiencia de más del 95%.

Los datos operativos de una fundición de hierro alemana muestran que la cubierta de los hornos está abierta de media un 25% del tiempo de funcionamiento del horno. Mientras permanece abierto se llevan a cabo operaciones que generan partículas como incorporar aditivos, desescoriar o colar el metal. El sistema de extracción por el borde instalado en la cubierta del horno no permite capturar los humos que se generan. La instalación de una campana de cúpula telescópica permite capturar eficientemente los gases de salida en los períodos de apertura del horno.

Aplicabilidad

Pueden instalarse equipos de captura de gases de salida en todos los hornos de inducción nuevos y existentes y tanto en fundiciones férreas como no férreas.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa sobre emisiones atmosféricas.

Ejemplos

Estas técnicas se emplean habitualmente en los hornos de inducción europeos, por ejemplo en la empresa Walter Hundhausen GmbH & co KG (Alemania).

Publicaciones de referencia

[29, Batz, 1986], [18, Rademacher, 1993], [32, CAEF, 1997].

4.5.4.2. Depuración de gases de salida

Descripción

Los sistemas de depuración de los gases de combustión de los hornos de inducción deben ser muy eficientes, ya que las partículas que tienen que capturar son pequeñas. Para la depuración de partículas de los gases se utilizan habitualmente filtros de manga en vez de precipitadores electrostáticos, ya que resultan más adecuados para las considerables variaciones de temperatura y de concentración de partículas que presentan los gases de salida.

Al utilizar filtros de manga deben extremarse las precauciones si la chatarra contiene aceite, ya que los vapores de aceite podrían condensarse en la tela del filtro, bloquear los poros e impedir la extracción de las partículas adheridas. Existiría, además, riesgo de incendio. La rápida caída de tensión del sistema que tiene lugar al quedar bloqueados los poros reduce rápidamente la proporción de extracción. Así pues, para evitar contaminaciones del lugar de trabajo, el tejido del filtro debe sustituirse o regenerarse (limpiarse) mucho más a menudo que si se utiliza chatarra limpia. Una posible solución al problema consiste en utilizar tejidos con recubrimiento o inyectar cal viva en los conductos. Por otro lado, si existe riesgo de que los vapores de aceite lleguen a quemar los tubos, el proceso deberá ser lo suficientemente largo para permitir que se complete la combustión antes de que el vapor entre en la estructura del filtro. La temperatura del gas no puede exceder las especificaciones del tejido, de modo que en caso necesario habrá que enfriarlo previamente.

Los lavadores húmedos más utilizados suelen ser de alta energía, tipo venturi, a causa del pequeño tamaño de las partículas presentes en los gases. Estos sistemas necesitan ventiladores de considerable potencia para crear la turbulencia necesaria en la depuración y poder así capturar las partículas. El caudal de gases de salida se mantiene al mínimo, pues, si se utilizan sistemas de captura de gases de salida en los que la entrada de aire ambiente sea casi inexistente. En condiciones normales la corrosión no representa un problema. Sin embargo, si se alimenta el horno con carga que contenga virutas de barrenado con restos de taladrina hay que tener en cuenta la posibilidad de que los fluidos contengan azufre, lo que provocaría la formación de SO_2 . En este caso el equipo podría verse afectado negativamente, ya que la absorción de SO_2 por parte de la depuración provoca la acidificación del agua y podría llegar a provocar corrosión si no se instala un sistema de tratamiento del agua.

Algunas fundiciones de aluminio utilizan para la colada material obtenido de la electrolisis del aluminio que podría suponer la formación de contaminantes inorgánicos, por ejemplo ácido fluorhídrico. Estos contaminantes pueden limpiarse de los gases de combustión por un procedimiento de quimiadsorción que puede integrarse en el sistema de depuración de partículas. En este tratamiento pueden utilizarse como absorbentes el hidrato de calcio o el óxido de aluminio.

Ventajas medioambientales

Reducir las emisiones acidificantes y de partículas procedentes de los hornos de colada de inducción.

Efectos colaterales

La depuración de gases de salida aumenta el consumo de energía mientras que la depuración de partículas de los gases, genera polvo que deberá eliminarse o reutilizarse. La utilización de técnicas de depuración húmeda de partículas provoca un mayor consumo energético y obliga a tratar el agua antes de su evacuación y a eliminar o reciclar los lodos húmedos procedentes del filtro.

Datos operativos

Los gases capturados suelen depurarse normalmente mediante filtros. Las emisiones diarias totales de partículas se mantienen por debajo de los 10 mg/Nm³. Los datos operativos se tratan en el apartado 3.2.4.1.

La Tabla 4.43 muestra los datos operativos de una fundición de hierro alemana dotada de un sistema centralizado de captura de gases de salida en el que la depuración de partículas se realiza por medio de un filtro de mangas. El sistema recoge los gases de distintas zonas y etapas de la fundición, por ejemplo: de los cuatro hornos de inducción (cada uno de ellos equipado de un mecanismo de extracción por el borde y campana de cúpula), del almacenamiento y el precalentamiento de chatarra, del tratamiento del metal, de la regeneración de la arena o de la zona de colada. Los siguientes datos corresponden a los gases de combustión brutos procedentes de la colada, el caudal de gas combinado bruto y el caudal de gas limpio.

Tabla 4.43. Datos de emisión de una fundición de hierro dotada de hornos de inducción y un sistema de salida centralizado con filtro de mangas [18, Rademacher, 1993]

Compuesto	Gas emitidos en la fusión	Gas de salida combinado	Gas limpio*
Partículas	89,3	237	< 1
NO _x	1,6	8,3	7,9
CO	2,2	4,2	3,8
SO ₂	3,5	3,9	3,7
C total	21,8	34,7	34,9
PCDD/-F		0,036 x 10 ⁻⁶	0,0027 x 10 ⁻⁶

* NO_x, CO, SO₂ y el C total no se capturan en el filtro de mangas. La diferencia entre gases brutos y limpios se debe a los pequeños cambios que se producen en la mezcla de gas tras el ventilador de tiro inducido

Capacidad de fusión: 14 toneladas/h; caudal total de gases de combustión: 240.000 m³/h

Todos los datos se expresan en mg/Nm³

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todas las instalaciones equipadas de hornos de inducción, sean nuevas o existentes y en fundiciones férreas o no férreas.

Datos económicos

La Tabla 4.44 muestra los datos sobre costes y consumos del filtro de mangas instalado en la unidad de colada de varios hornos de crisol de inducción con una capacidad de fusión de 15 t/h y de tratamiento de 120.000 Nm³/h.

Tabla 4.44. Costes de inversión y de consumo energético de la unidad de filtro de mangas de los hornos de inducción y variación de los niveles finales. Datos correspondientes a Portugal (2003) [225, TWG, 2003]

Niveles de emisión de partículas (mg/Nm ³)	Coste de inversión (EUR)	Consumo de energía (kW)
< 5	350.000	250
< 20	200.000	150

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa que limita las emisiones de polvo generadas al fundir los metales.

Ejemplos

La depuración de los gases de combustión se lleva a cabo en la mayoría de fundiciones férreas dotadas de horno de inducción y también en algunas no férreas.

Publicaciones de referencia

[18, Rademacher, 1993], [32, CAEF, 1997], [29, Batz, 1986]

4.5.5. Hornos rotativos

4.5.5.1. Captura y depuración de gases residuales

Descripción

En la mayoría de casos es necesario utilizar equipos de depuración de partículas para cumplir con la legislación aplicable. Normalmente se utilizan filtros de mangas, pero también es técnicamente posible utilizar sistemas húmedos de depuración de partículas.

Los gases de salida se diluyen con aire ambiente para lograr que descienda su temperatura. Para ello existe una entrada de aire situada que forma un espacio intermedio entre la salida de gases del horno y el tubo de evacuación, con forma de codo. Este espacio intermedio se mantiene en todo momento, ya que permite que el cuerpo del horno pueda girar e inclinarse. La tubería a menudo es retráctil. Por lo general, la dilución no es una técnica de reducción de emisiones aceptable. En caso de que se utilice (y sea necesaria) para el enfriamiento, el sistema situado al final de la cadena deberá tener unas dimensiones adecuadas al mayor flujo de gas. A veces los gases residuales diluidos se conducen a través de un intercambiador de calor de aire-gas para enfriarlos aún más. De este modo la temperatura del gas se reduce de los 1.500 °C iniciales a 200 °C o incluso menos. A esta temperatura ya pueden introducirse en el filtro de mangas para la depuración de partículas.

La utilización de postcombustores permite reducir las emisiones de carbono orgánico y la presencia de partículas de combustible. Esta técnica puede ser eficaz también para reducir el riesgo de formación de dioxinas durante el enfriamiento de los gases. El postcombustor se instala después del horno y antes del intercambiador de calor. Se utilizan los siguientes tipos de postcombustores:

- incinerador térmico: combustión con llama directa;
- incinerador catalítico: combustión a bajas temperaturas mediante el uso de catalizadores; contribuye a aumentar la eficiencia y reducir las emisiones de NO_x;
- incinerador con recuperación de calor: el calor recuperado permite precalentar el aire de combustión, lo que incrementa la eficiencia térmica y reduce el consumo de combustible;
- incinerador catalítico con recuperación de calor: es una combinación de los dos tipos anteriores.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones de partículas de los hornos rotativos.

Efectos colaterales

La depuración de gases de salida aumenta el consumo de energía, mientras que la depuración de partículas, genera una cantidad de partículas de polvo que deberá eliminarse o reutilizarse.

Datos operativos

Los datos operativos de las emisiones figuran en el apartado 3.2.5.3.

La eficiencia de los postcombustores al quemar las partículas de combustible emitidas por los hornos rotativos se sitúa entre el 80% y el 98%. Los gases calientes procedentes del postcombustor pueden conducirse a un recuperador y contribuir así a precalentar el aire de combustión del quemador principal del horno. Los recuperadores proporcionan un ahorro energético en torno al 15%.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para cualquier fundición dotada de horno rotativo, ya sea nueva o existente y férrea o no férrea.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las normas que limitan las emisiones de partículas durante la colada.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones dotadas de hornos rotativos.

Publicaciones de referencia

[23, Brettschneider y Vennebusch, 1992], [32, CAEF, 1997], [163, UK Environment Agency, 2002], [202, TWG, 2002]

4.5.6. Hornos de crisol, de solera y de techo radiante

4.5.6.1. Prevención de emisiones visibles y fugitivas durante la fusión y el tratamiento del metal

Descripción

En condiciones de funcionamiento normal los procesos de fusión que emplean metales puros no generan humos visibles. Sin embargo, es posible que sí se produzcan humos visibles durante la carga del horno al quemarse los contaminantes que pueden contener las materias primas, como por ejemplo aceite o pintura, o bien al apagarse la llama del quemador y seguirse emitiendo combustible sin quemar, como sucede a veces al utilizar combustibles sólidos o líquidos. En estos casos puede instalarse un postcombustor.

También pueden instalarse campanas extractoras para capturar los humos visibles y las emisiones fugitivas. La fusión de chatarra limpia evita o reduce al mínimo este tipo de emisiones.

Ventajas medioambientales

Reducir las emisiones de productos de combustión incompleta a la atmósfera.

Efectos colaterales

Para capturar los humos debe utilizarse energía eléctrica.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para cualquier horno de crisol o solera, nuevo o ya existente.

Para su implantación deben tenerse en cuenta las limitaciones impuestas por el diseño del horno en cuestión y su funcionamiento, entre ellas limitaciones físicas como por ejemplo la existencia de vigas-carril o de elementos estructurales del edificio o del horno. Para que la extracción sea efectiva el sistema debe instalarse de manera que se mueva junto con el horno al inclinarse éste durante la colada, uno de los procedimientos que más emisiones generan, algo que no resulta fácil en los hornos existentes. También pueden surgir problemas físicos derivados del emplazamiento de las tuberías del sistema; en algunos casos es necesario modificar drásticamente la plataforma del horno y el área circundante para poder instalar los conductos necesarios.

Datos económicos

CTI elaboró una estimación de costes partiendo de las peores condiciones posibles (las más extremas): la necesidad de tener que capturar la totalidad de las partículas generadas durante la carga y la colada. La Tabla 4.45 resume estos datos financieros correspondientes a una «fundición media» con una amortización del equipo de extracción y depuración a lo largo de un ciclo de vida estimado de 10 años. Sin embargo, los resultados obtenidos pueden variar considerablemente en función del diseño de la fundición y las técnicas empleadas.

Tabla 4.45. Estimación de costes de instalación de un sistema de depuración de humos visibles generados durante la carga y la colada [161, UK Environment Agency, 2002]

Proporción de extracción m³/minuto	Velocidad de producción toneladas/h	Costes en euros		Energía kW	Costes EUR/tonelada de hierro fundido		
		De inversión	Civiles		De funcionamiento	Financieros	Totales
142	0,5 (1.150 toneladas al año)	117.573	15.676	40	15,24	18,81	34,05

Notas:

Los costes civiles (entendidos como permisos etc) corresponden a un 12% de los costes de inversión

Los costes de funcionamiento se basan en los costes de mantenimiento y eliminación de residuos y equivalen al 10% de los de inversión, más la energía (0,06 EUR/kWh)

Los costes financieros se basan en un período de amortización de planta de 10 años a un tipo de interés del 10%

En el anterior ejemplo, y a partir de las condiciones indicadas, los costes de depuración de las emisiones visibles serían de unos 34,05 euros por tonelada de metal fundido.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa que regula las emisiones visibles.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[161, UK Environment Agency, 2002]

4.5.7. Tratamiento del metal

4.5.7.1. *Convertidores AOD: captura y tratamiento de gases de salida*

Descripción

Los equipos de control de la contaminación deben diseñarse de modo que sean capaces de hacer frente a las condiciones de máximas emisiones, aunque estos picos sólo tengan una duración limitada.

Las campanas de control de gases utilizadas junto con los depósitos de los convertidores AOD pueden tener multitud de formas y tamaños. Como alternativa a la extracción directa existen las campanas extractoras de cúpula. Varias plantas dotadas de tecnología AOD utilizan estas cúpulas de techo, que permiten capturar eficientemente tanto los humos que se generan durante el uso de los convertidores como el humo procedente de otras etapas como carga y colada. Estas estructuras también pueden utilizarse conjuntamente con chimeneas de aceleración situadas sobre la boca de los convertidores. Estas chimeneas llevan a cabo varias funciones de utilidad, entre ellas formar un penacho de humos más constante, reducir el tamaño de la campana necesaria o aislar el equipo de los alrededores, y el personal, de las radiaciones a veces intensas de la llama AOD. La principal ventaja de las campanas extractoras de techo es que una misma estructura sirve para capturar las emisiones fugitivas y las generadas durante los procesos.

Ventajas medioambientales

La captura de gases de combustión permite evacuar y tratar adecuadamente el caudal de gases residuales y limita tanto las emisiones fugitivas como las conducidas.

Efectos colaterales

La depuración de gases de salida aumenta el consumo de energía. La depuración de partículas de los gases, por otro lado, genera partículas que deberán eliminarse o reutilizarse.

Aplicabilidad

Esta técnica puede utilizarse en cualquier instalación dotada de convertidor AOD, nueva o existente.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las normas que limitan las emisiones de partículas durante la colada.

Ejemplos

Existen plantas en Italia y Finlandia que utilizan esta tecnología.

Publicaciones de referencia

[202, TWG, 2002]

4.5.7.2. Nodulización: captura y depuración de partículas de gases de combustión

Descripción

El sistema de captura de gases de salida depende de la técnica empleada para la nodulización (véase apartado 2.4.12.4). Dependiendo de la técnica pueden emitirse cantidades considerables de MgO en forma de humo blanco. Las características de las distintas técnicas de nodulización se muestran en la Tabla 3.20. Normalmente los sistemas con mayor eficiencia de absorción son los que menos emisiones generan, como sucede en los procesos que tienen lugar en el interior del molde, donde se produce la nodulización durante la colada.

En cuanto a la nodulización en el interior del crisol, las técnicas que utilizan cubiertas o tapas reducen significativamente las emisiones.

Si no se recogen los gases de combustión generados por la nodulización, el área de colada podría llenarse de humo blanco y el MgO podría descender. Los sistemas de salida sin filtro pueden producir emisiones visibles. En un período de tiempo relativamente breve puede generarse un gran volumen de partículas visibles, pero normalmente su duración es limitada (5 o 10 minutos por cada tratamiento realizado).

La nodulización en el interior de los crisoles puede realizarse en un lugar concreto del área de colada; el crisol, lleno de metal líquido, se lleva a ese punto tras el vaciado del horno, pero antes de llevarlo al horno o estación de colada. De este modo es posible instalar una campana extractora fija para capturar los gases de salida.

La captura de humos de MgO se ve dificultada por la elevada temperatura de los gases y porque la intensa reacción del Mg produce chispas. A causa de la elevada velocidad de ascenso y la temperatura deben extraerse también grandes volúmenes de aire ambiente, y ello requiere instalaciones muy costosas y de gran tamaño.

El filtrado en seco (con filtros de mangas) de los gases de salida genera residuos con partículas de MgO que pueden reaprovecharse para pigmentos o para la producción de material refractario.

Ventajas medioambientales

El Mg no tiene efectos perjudiciales para el entorno y es un nutriente esencial, en pequeñas concentraciones, para los animales y las plantas. Las autoridades de salud laboral del Reino Unido han asignado un límite de exposición a largo plazo (límite medio ponderado en el tiempo de 8 horas) de 4 mg/m³ de partículas de MgO y humo respirable (expresado como Mg).

Efectos colaterales

La captura de humos de óxido de magnesio requiere un mayor uso de energía que, a su vez, aumenta las emisiones. La reutilización externa de las partículas de polvo de MgO contribuye a reducir el consumo de materias primas.

Datos operativos

La proporción habitual de adición de magnesio en la mezcla ronda el 0,1% del peso de la colada, si se mide en porcentaje de magnesio (la adición real de aleación con contenido de magnesio, por ejemplo ferrosilicio de magnesio, podría llegar al 2% del peso de la colada, en función de la aleación utilizada).

La adición proporciona alrededor del 0,05% del magnesio presente en la colada; la mayor parte de los residuos se oxidan y escapan a la atmósfera en forma de MgO, que se integra en el aire de forma bastante rápida.

da. Si no se dispone de sistema de captura de gases los humos pueden extenderse por la fundición y depositarse parte de ellos en forma de partículas de polvo. No existe información precisa disponible sobre la cantidad que se deposita, aunque un porcentaje del 50% del humo emitido parecería razonable. Así pues, por cada tonelada de metal tratado se liberarían al aire ambiente de la fundición unos 500 g de magnesio en forma de MgO (es decir, 833 g de MgO liberados por tonelada de metal tratado) y alrededor de 400 g de MgO se emitirían a la atmósfera.

Aplicabilidad

Esta técnica de captura y filtrado de gases de salida es válida para las fundiciones que empleen técnicas de nodulización en el interior del crisol. No se dispone de información sobre la aplicabilidad en «Ductilator» o en el interior de los moldes.

Datos económicos

Esta técnica requiere unos niveles de extracción para capturar eficientemente la mayor parte de emisiones de MgO de alrededor de 280 m³/minuto (en la cuchara de tratamiento). Los costes conjuntos de capital e instalación ascenderían a unos 180.000 euros.

La siguiente tabla resume los datos financieros correspondientes a una «fundición media» con una amortización del equipo de extracción y depuración a lo largo de un ciclo de vida estimado de 10 años.

Tabla 4.46. Cálculo de costes correspondiente a la depuración de humos de MgO [161, UK Environment Agency, 2002]

Proporción de extracción m ³ /minuto	Velocidad de producción toneladas/h	Costes en euros		Energía kW	Costes EUR/tonelada de hierro tratado		
		De inversión	Civiles		De funcionamiento	Financieros	Totales
280	0,5 (1.000 toneladas por año)	180.280	23.514	50	21,95	29,35	51,30

Nota:

Los costes civiles corresponden a un 15% de los costes de inversión. Los costes de funcionamiento se basan en los costes de mantenimiento y eliminación de residuos y equivalen al 10% de los de inversión, más la energía (0,06 EUR/kWh). Los costes financieros se basan en un período de amortización de planta de 10 años a un tipo de interés del 10%

Los costes de depuración de las emisiones de humo de óxido de magnesio se estiman en unos 51,30 euros por tonelada de metal tratado.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa que limita las emisiones visibles y medidas para mejorar la calidad del aire en el entorno de trabajo.

Ejemplos

- Römheld & Moelle – Maguncia (Alemania).
- Fuchosa – Atxondo (España).

Publicaciones de referencia

[161, UK Environment Agency, 2002], [110, Vito, 2001]

4.5.8. Producción de machos y moldes

4.5.8.1. *Captura de partículas de los gases de salida generados por la preparación de arena verde y depuración de partículas*

Descripción

Sólo algunas etapas del proceso de preparación de la arena verde presentan una producción significativa de partículas, en concreto las de desmoldeo en la rejilla, depuración de partículas y enfriamiento; todas ellas cuentan con sistema de captura y tratamiento de partículas. Se trata de unidades cerradas y conectadas a un sistema de depuración de partículas central. Al diseñar este sistema debe tenerse en cuenta el punto de condensación del aire de salida así como el tipo de partículas.

El aire que escapa durante la preparación de la arena verde está saturado de agua, por ello los sistemas húmedos (normalmente de baja presión) parecen los más adecuados para capturarlo. Sin embargo, los sistemas húmedos se están sustituyendo rápidamente por otros de depuración de partículas en seco. Estos tienen la ventaja de poder reintroducir en el proceso parte de las partículas y de no generar flujo de aguas residuales. Por otro lado, los sistemas húmedos tienen tendencia a la corrosión interna y a la acumulación de partículas de polvo y productos de oxidación. La separación en húmedo de las impurezas del aire de salida puede complicar la depuración de las aguas residuales, puesto que las partículas contienen bentonita, de difícil eliminación a causa de su comportamiento antisedimentación. [225, TWG, 2003]

Antes de utilizar filtros de manga deben evaluarse los posibles problemas de condensación. La condensación puede provocar la deposición de las partículas y obstrucciones y/o roturas del filtro. Si se añade agua de refrigeración a la arena debe hacerse de forma controlada para limitar en lo posible la formación de vapor. El punto de condensación del flujo de aire puede aumentarse si se utilizan quemadores de gas.

Una de las ventajas es que las partículas recogidas están secas y pueden transportarse fácilmente. Tras la clasificación por tamaño, la fracción de gruesos y parte de la de finos puede devolverse al circuito de mezclado de arena.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones de partículas a la atmósfera.

Efectos colaterales

La utilización de sistemas húmedos genera un caudal de aguas residuales que debe tratarse y una fracción de lodos que debe eliminarse. Existen también algunos sistemas húmedos que no generan agua. Los lodos se comprimen y, si contienen una proporción suficiente de bentonita, se reintroducen en el ciclo de arena de moldeo.

Datos operativos

Si se utilizan equipos dotados de filtro de mangas pueden lograrse concentraciones residuales en el aire de salida bastante inferiores a los 10 mg de partículas por Nm³. Los lavadores húmedos tienen una eficiencia un poco inferior y normalmente proporcionan unos niveles de emisión de 50 – 100 mg de partículas por Nm³, aunque también se tiene constancia de valores inferiores (véase Tabla 4.47).

Tabla 4.47. Valores de emisión de partículas correspondientes a los talleres de moldeo y tratamiento [29, Batz, 1986]

Equipo	Caudal de gases de salida (m ³ /h)	Técnica de depuración	Nivel de emisiones (mg/m ³)
Preparación de arena (160 toneladas/hora)	64.000	Venturi	4
Preparación de arena (11 toneladas/hora)	48.080	Lavador húmedo	7
Preparación de arena	57.400	Filtro de mangas	6
Unidad de desmoldeo	51.070	Lavador húmedo	7
Unidad de desmoldeo	50.000	Filtro de mangas	2
Amoladora	54.000	Filtro de mangas	5
Granallado	17.000	Filtro de mangas	4

En el anexo 2 figuran los datos de seguimiento continuado de una fundición de piezas para la automoción a gran escala. La información muestra los niveles de polvo producido al preparar la arena, al transportarla y al utilizarla en el chorro de arena.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a cualquier planta de preparación de arena verde, sea nueva o existente.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa sobre emisiones de partículas.

Ejemplos

Se utiliza habitualmente en toda Europa.

Publicaciones de referencia

[29, Batz, 1986], [32, CAEF, 1997], [110, Vito, 2001], [225, TWG, 2003]

4.5.8.2. Captura de partículas generadas en el área de moldeo de arena verde y en la etapa de depuración de partículas

4.5.8.3. Captura de gases de salida procedentes de la producción de machos; consideraciones generales

El aglomerante y el endurecedor utilizados determinan el tipo de emisiones que pueden producirse. Los gases de salida generados al confeccionar machos con aglomerantes químicos son básicamente una mezcla de disolventes orgánicos. Las emisiones de fenol, formaldehído, amoníaco, etc., son mucho más escasas y dependen del tipo de aglomerante. Los procesos de mezclado, disparado y secado de machos pueden tener lugar en espacios cerrados en mayor o menor medida, en función de las emisiones que se generen. Existen varias técnicas adaptadas a los distintos aglomerantes que se describen en los siguientes apartados. Las emisiones de carbono orgánico volátil están presentes en todos los tipos de arena química, a excepción de las utilizadas para el vidrio soluble. En cuanto a los aglomerantes utilizados para el autofraguado y el fraguado en frío, las emisiones producidas durante el mezclado son escasas a causa del bajo contenido de resina (presente en una proporción del 1 – 2% en la arena). Las emisiones generadas durante el fraguado, el recubrimiento y el secado pueden someterse a sistemas de captura y tratamiento.

Al regenerar la arena química se generan partículas de polvo en el tambor de desmoldeo. El secado de la arena y la depuración de partículas se llevan a cabo normalmente en una unidad seca al no existir problemas de condensación de agua. Las partículas residuales capturadas no pueden recircularse al circuito de desmoldeo. [110, Vito, 2001]

4.5.8.4. Cajas frías: captura de vapores de aminos y tratamiento de gases de salida

Descripción

La gasificación de machos en caja fría produce gases de combustión que deben depurarse antes de emitirse a la atmósfera. Para proteger el ambiente de trabajo las disparadoras de machos se aíslan y los machos se limpian con aire para extraer los residuos de gas antes de abrir la máquina para retirar el macho recién confeccionado.

Pueden instalarse sistemas de captura de gases de salida para mantener unas buenas condiciones de trabajo durante la comprobación, manipulación y almacenamiento de machos recién confeccionados. Para ello se emplean campanas extractoras o sistemas de evacuación, por ejemplo en la mesa de inspección y por encima del área de manipulación y de almacenamiento temporal (donde se depositan las bandejas que contienen los machos listos, a la espera de utilizarlos).

El vapor de salida con contenido en aminos debe tratarse para evitar olores mediante alguno de los siguientes métodos:

- *Adsorción mediante carbón activo*: se trata de un proceso muy eficiente pero con unos costes operativos excesivos; sólo es practicable si el volumen de gases de salida es pequeño.
- *Combustión*: para que este proceso sea eficiente la cámara de postcombustión debe ser capaz de resistir una temperatura de al menos 800 °C, con un tiempo mínimo de permanencia de 2 segundos. El consumo de energía es elevado y, por tanto, este proceso resulta caro. En fundiciones dotadas de cubilotes los gases de salida pueden alimentar el horno y contribuir a la combustión.
- *Depuración química*: las aminos son muy básicas y reaccionan con el ácido sulfúrico o fosfórico. El pH de la solución normalmente se mantiene de forma controlada por debajo de 3. Como resultado, la solución de depuración debe sustituirse periódicamente para extraerle las sales, que a su vez deben eliminarse como residuos peligrosos. Técnicamente resulta posible procesar la solución de depuración para recuperar la amina y reutilizarla, como se analiza en el apartado 4.6.5.
- *Filtro biológico*: véase apartado 4.5.8.6.

En invierno puede que sea necesario calentar el aire de salida para evitar la condensación de aminos en el interior de los conductos, aunque es posible hacerlo aprovechando el calor residual procedente de los compresores u otros dispositivos cercanos.

Ventajas medioambientales

Recoger los gases de salida de modo que se reduzcan las emisiones de aminos y, en consecuencia, los olores.

Efectos colaterales

Si se utilizan lavadores ácidos las aminos van a parar a la solución de depuración, que requiere por tanto ser tratada. También es posible, sin embargo, recuperar las aminos a partir de la solución, como se analiza en el apartado 4.6.5.

Datos operativos

Sea cual sea el método de tratamiento utilizado, las emisiones de aminos pueden mantenerse por debajo de los 5 mg/Nm³.

MTDs para forja y fundición

Las Tabla 4.48 muestra los datos de emisión de una zona de producción de machos en caja fría dotado de depuración ácida con una solución de ácido fosfórico al 75%. En condiciones de funcionamiento normales la solución de depuración contiene diariamente 15 kg de aminos. Cuando la solución se satura se almacena en un depósito para su tratamiento externo o eliminación. Las instalaciones consumen 35,5 kW de energía y funcionan durante 2.000 h/año.

Tabla 4.48. Datos de emisión de una zona de producción de machos en caja fría dotado de depuración ácida [29, Batz, 1986]

Compuesto	Nivel de emisiones mg/m ³
Polvo	0,42
Aminas	2,4
Fenol	0,53
Oxígeno	21%
Volumen de gases de salida	25.100 m ³ /h

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para todos los casos de producción de machos en caja fría nuevos o existentes.

Datos económicos

Los costes operativos de la planta mencionada en el epígrafe «Datos operativos» son de 6,3 EUR/tonelada de pieza buena.

Los costes de inversión de una planta representativa equipada de depuración húmeda se muestran en la Tabla 4.49.

Tabla 4.49. Características, costes de inversión y datos de emisión de un depurador de aminos para una zona de producción de machos en caja fría. Datos correspondientes a Portugal (2003)

Característica	Valor
Caudal de gases de combustión	30.000 m ³ /h
Concentración de aminos en el gas crudo	150 mg de aminos/Nm ³
Concentración de aminos en el gas limpio	< 1 mg de aminos/Nm ³
Suministro energético	45 kW
Coste de la inversión	187.000 EUR

Ventajas de la implantación

Garantizar la salud de los trabajadores y evitar la generación de olores.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en las fundiciones que emplean aglomerantes para cajas frías.

Publicaciones de referencia

[29, Batz, 1986], [32, CAEF, 1997], [15, Gwiasda, 1984]

4.5.8.5. Captura y extracción de COV

Descripción

Las emisiones de COV (principalmente disolventes, BTEX y en menor medida fenol, formaldehído, etc.) tienen su origen en la preparación de la arena química y también, en etapas posteriores del proceso, en la colada, el enfriamiento y el desmoldeo (véase Tabla 3.35 y Tabla 3.45). Estos componentes son nocivos y generan olores.

La eliminación de COV se ve dificultada por el gran volumen de aire ambiente que penetra en los sistemas de captura (por ejemplo, campanas de extracción de cúpula) utilizados.

Las siguientes técnicas permiten extraer los COV:

- adsorción mediante carbón activo
- postcombustión
- filtros biológicos.

En los sistemas de adsorción mediante carbón activo, los gases de salida fluyen a través de un lecho de carbono. Al saturarse, el carbono se regenera térmicamente. El carbón activo tiene una eficiencia de adsorción (y de depuración) muy elevada (por ejemplo, de más del 99% en el caso del benceno). Sin embargo, presenta las siguientes desventajas:

- se requieren grandes cantidades de carbón activo para tratar grandes volúmenes de gases residuales;
- las partículas y los aerosoles deben separarse por filtración antes de la etapa de adsorción con carbón activo. Las partículas finas tienen tendencia a adherirse, por lo que sólo pueden filtrarse mediante técnicas húmedas de depuración de partículas, que generan aguas residuales.

Para aprovechar realmente la postcombustión realizada para eliminar los COV de los gases de combustión se requieren unas concentraciones mínimas. Estos valores límite varían dependiendo del tipo de compuesto y también de la técnica elegida. Por ejemplo, la postcombustión sí resulta posible en el caso de los gases generados durante el moldeo en cáscara. Por lo general, los gases de combustión procedentes de las zonas de moldeo no tienen un nivel de COV lo suficientemente elevado para permitir la postcombustión. Una alternativa a la postcombustión consiste en usar el aire de salida procedente de la sopladora de machos como aire de combustión de los cubilotes.

El uso de filtros biológicos se trata en detalle en el apartado 4.5.8.6.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones de COV a la atmósfera.

Efectos colaterales

La captura de gases de combustión consume energía y es posible que implique tener que dar entrada a grandes volúmenes de aire ambiente.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la legislación sobre emisiones de COV.

Publicaciones de referencia

[20, Gapp, 1998], [110, Vito, 2001]

4.5.8.6. Depuración de gases de salida mediante filtro biológico

Descripción

El filtrado biológico se basa en la capacidad de los microbios del lecho del filtro de fibras y turba de oxidar los compuestos olorosos y convertirlos en compuestos inodoros. El gas se introduce para su depuración, por medio de un ventilador, a través de un lecho de material de filtrado húmedo y sale por el extremo superior sin olor. El agua adsorbe los compuestos olorosos, que a continuación descomponen los microorganismos del filtro. El correcto funcionamiento del filtro depende del equilibrio entre el suministro de nutrientes (compuestos destinados a eliminación/descomposición) y el número de microorganismos presentes.

En las fundiciones los filtros biológicos se emplean para eliminar los compuestos olorosos, normalmente aminas procedentes de los gases generados en los procesos de producción de machos en caja fría, y también para la extracción de COV (por ejemplo benceno) de los gases de salida del área de moldeo.

Para el buen funcionamiento de los filtros biológicos son críticos los siguientes aspectos:

- *Permeabilidad de la capa del filtro:* los gases deben poder atravesar el lecho y a la vez entrar en contacto suficientemente con el material del filtro. Una excesiva cantidad de material fino en el filtro podría hacer que se bloquee, lo que aumentaría la presión y el material del lecho saldría disparado.
- *Grado de humedad del material del filtro:* puede instalarse un sistema dispersor de agua para que humedezca de forma continua o intermitente el material del filtro.
- *Preparación de los gases de salida:* los gases deben humedecerse antes de entrar en el filtro y para que el funcionamiento sea óptimo la temperatura tiene que ser constante (30 °C). Puede que para ello haya que precalentar el gas de salida.
- *Correcto tratamiento del agua:* el filtro biológico genera aguas residuales que contienen fenol y cresol y se someten a un tratamiento de aguas residuales antes de su evacuación o reaprovechamiento en el circuito. Pero para poder aprovechar las aguas se requiere una fase adicional de extracción de la sal.

La implantación del filtro biológico en una fundición alemana requirió un largo período de optimización para lograr que la técnica funcionase satisfactoriamente. Tras esta fase de adaptación se llegó a la conclusión de que los siguientes aspectos eran importantes:

- cierre del filtro biológico mediante una cubierta para evitar problemas causados por la condensación y el CO en la instalación. El aire filtrado se evacua a través de una chimenea centralizada;
- control preciso de la calidad del agua (por ejemplo el contenido de sal), en especial al emplear un sistema que no produzca aguas residuales;
- adición de sales nutritivas al agua de pulverización para mantener la actividad en el lecho del filtro y
- control del pH del material del lecho y adición de cal viva para que se mantenga neutro.

Ventajas medioambientales

Reducción de olores debidos a aminas y/o COV procedentes de las áreas de producción de machos y moldes. La eliminación del benceno y otros COV que tiene lugar en los filtros biológicos no puede considerarse fiable. La eficiencia varía marcadamente dependiendo de múltiples factores como las condiciones climáticas, la edad de los sustratos, etc. El uso de estos filtros en exclusiva no es una técnica válida, por si sola, para la eliminación de COV; su principal función consiste en reducir los malos olores.

Efectos colaterales

Los filtros biológicos generan un caudal de aguas residuales que puede reaprovecharse internamente tras el tratamiento (se genera una torta de lodos que debe eliminarse).

Se consume energía al conducir los gases de combustión hacia filtro para que lo atraviesen, además de los equipos auxiliares.

Se sabe que las emisiones de N_2O , un gas de efecto invernadero, pueden dar lugar a problemas.

Datos operativos

Existen datos piloto sobre la eliminación de las aminas en una fundición finlandesa. En ella se instaló una unidad de filtro biológico (de un diámetro de 0,8 m y una altura de 1 m) en los conductos de los gases de combustión generados al producir los machos, después de un lavador ácido. El equipo estaba formado por un ventilador y una unidad para aportar humedad que permitían ajustar el grado de humedad del filtro biológico al nivel óptimo. El sistema de extracción de olores contaba con un odorímetro. La Tabla 4.50 muestra los niveles totales de hidrocarburos y olores resultantes. Las variaciones en el análisis de entrada se deben a variaciones en los procesos. Los resultados muestran que gracias al filtrado se consiguen reducir significativamente los niveles olores e hidrocarburos.

Tabla 4.50. Datos operativos correspondientes al filtrado biológico de gases de combustión generados en la producción de machos en caja fría [112, Salminen y Salmi, 1999]

Compuestos	Unidades	Antes del filtro biológico	Después del filtro biológico
Olorosos	UO/m ³	410 – 3.000	150 – 310
Hidrocarburos totales	mg C/m ³	20 – 35	5 – 10

UO = unidades de olor

Los siguientes datos sobre eliminación de COV a escala industrial corresponden a una fundición de Alemania. En ella se instaló una unidad de filtrado biológico (características: 300 m³ de superficie, 1 m de altura y 5 lechos rectangulares, con una producción total de gases secos de 32.330 Nm³/h) para el tratamiento de los gases de salida generados durante la colada y el enfriamiento de piezas de fundición de hierro moldeados en arena verde mediante las técnicas de machos en caja fría y croning. Los datos de emisión figuran en la Tabla 4.51. Las mediciones olfatométricas muestran una reducción media en las emisiones de olores del orden del 94,5%.

Tabla 4.51. Datos de emisión correspondientes al filtrado biológico de gases de salida procedentes de la colada (en arena verde) y una línea de enfriamiento [20, Gapp, 1998]

Parámetro	Unidades	Antes del filtro biológico	Después del filtro biológico	% de reducción
O ₂	%	20,74		
CO ₂	%	0,17		
NO _x	mg/m ³	3,65		
CO	mg/m ³	382	299	21,7
Benceno	mg/m ³	15,80	1,44	90,9
Tolueno	mg/m ³	9,37	0,92	90,1
Etilbenceno	mg/m ³	3,00	0,46	84,7
Xileno	mg/m ³	4,90	1,54	68,6
Formaldehído	mg/m ³	0,37	0,01	68,6
Polvo	mg/m ³	13,63	2,03	85,1
Amoníaco	mg/m ³	8,97	0,16	98,2

.../...

.../...

Parámetro	Unidades	Antes del filtro biológico	Después del filtro biológico	% de reducción
Fenol	mg/m ³	4,67	< 0,02	> 99,6
Cresol	mg/m ³	3,73	< 0,02	> 99,5
PCDD/F	ng/m ³	0,0056	0,0041	26,8
Benzo(a)pireno	mg/m ³	0,0001	0,00003	70,0

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para las fundiciones de arena verde y los talleres de producción de machos en caja fría. Su aplicabilidad se limita a las fundiciones de grandes series en tres turnos, ya que los filtros biológicos requieren condiciones muy estables a lo largo de todo el año. Nótese que en todos los casos conocidos la implantación ha requerido un gran esfuerzo de investigación y desarrollo antes de lograr un rendimiento aceptable.

Datos económicos

Los costes de inversión correspondientes al filtro biológico de la planta alemana antes mencionada (características: 300 m³ de superficie, 1 m de altura y 5 lechos rectangulares, con una producción total de gases secos de 32.330 Nm³/h), incluyendo una unidad de tratamiento de aguas para evitar generar aguas residuales, se estiman en unos 3.247.000 euros, 2.333.000 de los cuales corresponden al filtro y el equipo auxiliar y 914.000 al sistema de captura de gases y las tuberías necesarias. Con unas especificaciones de carga de 40.000 Nm³/h, los costes operativos ascienden aproximadamente a 170.000 euros anuales (costes basados en DEM de 1998).

Esta estimación de costes operativos es muy superior a los costes normalmente atribuidos a la inversión y el funcionamiento de las unidades de filtrado biológico. Probablemente se deba a la gran producción y a la extensión del equipo auxiliar. En un estudio 1998 los costes de inversión de un filtro biológico de lecho abierto de una capacidad de 17.000 Nm³/h se estimaron en 70.000 – 100.000 USD, con unos costes operativos anuales derivados del agua, la mano de obra e imprevistos de 15.000 – 25.000 USD.

Ventajas de la implantación

Reducción de las molestias (principalmente por malos olores) causadas a las localidades de los alrededores.

Ejemplos

Halberg Guss, Saarbrücken-Brebach (Alemania).

Publicaciones de referencia

[20, Gapp, 1998], [112, Salminen y Salmi, 1999], [202, TWG, 2002], [208, Devlin, 1998]

4.5.8.7. Moldeo permanente: captura de emisiones generadas por el agente desmoldeante

Descripción

Al pulverizar el agente desmoldeante al agua sobre las matrices MAP se genera una neblina con bajas concentraciones de productos de descomposición. Esta neblina se recoge mediante una campana extractora y un PE.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones de agente desmoldeante con contenido de compuestos orgánicos. Prevención de emisiones difusas.

Efectos colaterales

Para capturar la neblina se requiere energía.

Datos operativos

La Tabla 4.52 contiene los datos operativos de una planta representativa. La información hace referencia a un agente desmoldeante miscible en agua (a una proporción de dilución de 1:40) con base de polímero sintético y polisiloxano. Cada máquina de inyección está dotada de una campana extractora independiente y un PE. El aire caliente y ya limpio se reintroduce en el sistema (recuperación del calor).

Tabla 4.52. Datos de emisión correspondientes a los gases de combustión del MAP depuración mediante PE [202, TWG, 2002]

Compuesto	Valores de medición cada media hora (mg/Nm ³)	Flujo másico (g/h)
Partículas	1,5 – 4,3	5,5
Sustancias orgánicas (los valores corresponden al contenido de carbono total) (mg/m ³)	4 – 6	9

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para cualquier instalación existente. Se trata de una medida que se aplica al final de la cadena cuando la prevención o minimización de la neblina no ha sido posible. Las medidas de prevención y minimización se describen en el apartado 4.3.5.1.

Ventajas de la implantación

Reducción al mínimo de las emisiones difusas y cumplimiento de la legislación sobre emisiones de neblina de aceite (por ejemplo en Suecia).

Ejemplos

Planta de referencia: TCG Unitech, Kirchdorf/Krems (Austria)

Práctica habitual en máquinas de moldeo a presión antiguas (Alemania, Francia, Bélgica) y en todas las máquinas de inyección de Italia.

Publicaciones de referencia

[202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003]

4.5.9. Colada/enfriamiento/desmoldeo

4.5.9.1. Introducción

Las emisiones que se producen durante la colada, el enfriamiento y el desmoldeo son diversas; su cantidad y calidad varían considerablemente de una fundición a otra. Se trata, básicamente, de emisiones de partículas y de compuestos inorgánicos y orgánicos gaseosos generados principalmente a partir de las reacciones provocadas por las altas temperaturas y la atmósfera reductora existente durante la colada y el enfriamiento. La composición de los humos de colada puede ser compleja; normalmente están formados por CO, CO₂, H₂, y metano, principales representantes de los productos de descomposición orgánica. También puede haber presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos y benceno en función de la composición del sistema de producción de machos y moldes.

La captura y el tratamiento de los gases de combustión generados en estos procesos normalmente es factible en las instalaciones dotadas de dispositivos automáticos de colada y moldeo. [29, Batz, 1986].

Las emisiones relativas (kg/t de metal fundido) van en aumento en la secuencia de procesos de colada-enfriamiento-desmoldeo. Los sistemas de captura de gases de combustión deben tener en cuenta este hecho.

4.5.9.2. Carenado de las líneas de colada y enfriamiento

Descripción

Los sistemas de captura de emisiones durante la colada, el enfriamiento y el desmoldeo normalmente son más extensos a medida que la planta aumenta en tamaño.

Cuanto más pueda confinarse el proceso de colada a un lugar o una posición fijos tanto menor será la cantidad de aire extraído y más fácil resultará recoger las emisiones por medio de ventiladores y aislamientos, lo que aumentará la eficiencia del tratamiento eficiente del aire.

Al realizar coladas en serie las emisiones aumentan a medida que lo hace la capacidad de producción. Sin sistema de extracción el aire de la zona de colada podría llegar a alcanzar niveles de concentración por encima de límites establecidos para sustancias nocivas. Para reducir la contaminación en la zona de trabajo las superficies o ventiladores extractores deben estar lo más cerca posible de los moldes, sin por ello entorpecer el proceso de colada. Los elementos del extractor se distribuyen de manera que todas las emisiones que se producen durante la colada se desplazan del área de trabajo al equipo de extracción. La velocidad del aire en la sección transversal de extracción libre se mantiene entre 0,5 y 1 m/s.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones difusas de CO, HAP y otros productos de descomposición orgánica.

Efectos colaterales

La extracción de aire de salida requiere energía.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a instalaciones nuevas o existentes donde se lleve a cabo colada o enfriamiento en serie.

Ventajas de la implantación

Reducción de emisiones difusas. Captura de emisiones para su posterior tratamiento.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza habitualmente en fundiciones de grandes series.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997]

4.5.9.3. Captura y tratamiento de gases generados en el desmoldeo

Descripción

La técnica empleada para recoger las emisiones producidas en el desmoldeo depende del grado de mecanización, de las características de las emisiones y del promedio de tamaño de las piezas, siendo especialmente importantes el más pequeño y el más grande que se fabrica con una misma máquina.

El sistema de reducción de emisiones más utilizado es un panel de ventilación que se sitúa al lado de la máquina de desmoldeo; normalmente se instala un panel a cada lado de la máquina, independientemente de su tamaño y, siempre que resulta posible, se cubre también del mismo modo la parte posterior de la máquina de desmoldeo. A menudo el punto de extracción se encuentra por debajo de la máquina de desmoldeo, en la caja de arena, y la extracción se lleva a cabo a través de un conducto de extensión, lo que aumenta el riesgo de extracción de arena si el nivel de ésta dentro de la caja alcanza el tubo. Como resultado, la entrada del tubo frecuentemente se halla obstruida por pegotes de arena o formados al mezclarse el polvo con el vapor.

La mejor manera de lograr niveles de emisión adecuados y mantener a la vez una velocidad de extracción baja es llevar a cabo el desmoldeo en recintos cerrados. El uso de aperturas en el tejado, preferentemente dotadas de una pantalla móvil, puertas y canales de entrada y salida hace posible el empleo de vigas-carril u otros mecanismos de transporte. Los aislamientos, además, reducen los niveles de ruido.

En las plantas con moldeo automático el conjunto formado por molde-pieza a menudo se extrae de la caja de moldeo por desfondado (con un empujador hidráulico dotado de placa de presión). A continuación se separa la pieza de la arena primero por medio de una parrilla vibrante y posteriormente de un tambor o tromel desmoldeador dotado de un enfriador de arena. Los trómeles o tambores desmoldeadores, cada vez más utilizados, son más adecuados para la captura de emisiones que las parrillas clásicas, pero tienen la desventaja de que pueden generar olores.

La cantidad de aire extraído no viene determinada exclusivamente por los valores límite establecidos para el lugar de trabajo, sino también por las necesidades de procesamiento. Por ejemplo, para enfriar y proteger los filtros de mangas pueden necesitarse grandes volúmenes de aire, que deberán adaptarse a los requisitos de las técnicas de tratamiento de la contaminación utilizadas, que para ser efectivas normalmente requieren altas cargas de gases residuales con caudales de aire pequeños.

Los sistemas de depuración de partículas más adecuados son los ciclones, en combinación con lavadores húmedos o filtros secos. Los filtros biológicos también se utilizan, como se analiza en el apartado 4.5.8.6.

En las colada por gravedad y centrífugas se emplea postcombustión, lavado químico y adsorción mediante carbón activo para reducir las emisiones orgánicas y los olores. Estos sistemas ya se han descrito anteriormente.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones de COV y partículas a la atmósfera.

Efectos colaterales

La captura de partículas genera residuos.

Datos operativos

Si se utiliza una única pantalla de ventilación lateral las máquinas de desmoldeo independientes de hasta 2 metros de anchura extraen entre 7.000 y 9.000 Nm³/h de aire por cada m² de superficie de desmoldeo. En cambio, si se utilizan paneles en ambos lados la potencia es de 5.000 Nm³/h por m² de superficie de desmoldeo.

Si el punto de extracción se encuentra por debajo de la máquina de desmoldeo, en la caja de arena, la cantidad de aire extraído por m² de superficie debe ser de aproximadamente 700 Nm³/h.

En una fundición de Polonia dedicada a la producción de pieza grande de acero se ha construido una cubierta extraíble tipo boca de carga sobre la rejilla de desmoldeo. La boca de carga consiste en dos puertas de desplazamiento lateral de apertura y cierre hidráulicos, como muestra la Figura 4.17. La cubierta reduce las emisiones de ruido y partículas al interior de la fundición. Los gases de salida se depuran mediante un sistema seco de extracción de partículas. Los niveles de ruido durante el desmoldeo se redujeron de 100 dBA a menos de 85 dBA.

Figura 4.17.
Cubierta de boca de
carga para la rejilla
de desmoldeo
(moldeo discontinuo
de pieza grande) [209,
Metalodlew s.a., 2003]



Aplicabilidad

En plantas donde se lleva a cabo el desmoldeo de moldes de arena ligados con arcilla la emisión de vapores es significativa. La combinación de partículas y vapor puede provocar enormes obstrucciones en los conductos si la temperatura desciende por debajo del punto de condensación o, aún peor, por debajo del de congelación. Para evitar este problema debe inyectarse aire caliente en los tubos y tuberías y aislar convenientemente la cámara de filtros o bien deberá pulverizarse agua (sin polvo) en los conductos del ventilador a fin de evitar obturaciones.

Datos económicos

Los costes de inversión de la boca de carga instalada en la fundición polaca descrita anteriormente ascendieron a 220.000 EUR, incluyendo algunos equipos auxiliares.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa sobre emisiones de COV y partículas.

Ejemplos

Metalodlew s.a., Cracovia (Polonia).

Publicaciones de referencia

[16, Gerber y Gwiasda, 1981], [32, CAEF, 1997], [209, Metalodlew s.a., 2003]

4.5.9.4. Depuración de gases residuales mediante filtros biológicos

Descripción

Los filtros biológicos permiten tratar las emisiones de COV y benceno, por lo que se utilizan para la depuración de los gases de colada, enfriamiento y desmoldeo. Esta técnica se describe y analiza en detalle en el apartado 4.5.8.6.

Ejemplos

Varias fundiciones de Alemania.

Publicaciones de referencia

[225, TWG, 2003]

4.5.10. Procesos de desmoldeo y acabado: captura y tratamiento de gases de combustión

4.5.10.1. Captura de gases de combustión de los procedimientos de acabado

Descripción

Si se utilizan técnicas de separación térmica las cantidades de gases que deben capturarse y extraerse son considerables. El área de trabajo debe aislarse en la medida de lo posible sin restar libertad de movimiento y asegurando un suministro de aire asistido a los trabajadores. Las técnicas de captura de partículas durante el corte y amolado abrasivos varían en función del tipo de máquina utilizada (fija o manual). Las máquinas fijas suelen incorporar campanas extractoras rígidas conectadas en parte a aislamientos parciales.

En cuanto a las máquinas amoladoras fijas, el limitado chorro abrasivo va a parar a un embudo, de donde es extraído. Si se utilizan estaciones de corte por abrasión resulta recomendable instalar un mecanismo adicional de extracción de emisiones de la cabina para proteger la salud y la seguridad de los trabajadores. Las emisiones de las máquinas de accionamiento manual se extraen en ocasiones a través de una campana protectora adosada, un método efectivo pero poco apreciado a causa del incremento del peso que provoca en la máquina y que dificulta su uso. Por lo general las máquinas de amolado y corte manuales se aíslan en aislamientos parciales o cabinas.

La captura de partículas se lleva a cabo a través de paredes de extracción, cúpulas, campanas móviles o bancos de taller dotados de extracción. Las cortinas de aire caliente, que aportan aire adicional a la cabina, contribuyen a capturar las emisiones. El aire suplementario aportado puede ser aire limpio reciclado ya extraído para ahorrar así parte de la energía necesaria para el calentamiento. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que siempre se necesita una proporción de aire fresco procedente del exterior.

Aparte del desmoldeo, que cuando se trata de moldes de arena es uno de los principales focos de partículas ya descrito en capítulos anteriores, la captura de partículas y contaminantes no es necesaria, normalmente, para los procesos de corte, prensado (cuando se refiere a enderezado, o rebabado por troquel), cizallado, estampado y fresado. En ocasiones se emplean pantallas de protección para resguardar al operador de las partículas más gruesas. La soldadura se divide en dos procesos, según se utilicen o no materiales adicionales. Las normativas de protección normalmente requieren la instalación de sistemas de extracción para la mayoría de procesos.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones difusas de partículas metálicas y polvo.

Efectos colaterales

La captura de gases de combustión con contenido de partículas consume energía.

Datos operativos

Los datos operativos pueden consultarse en el apartado 3.11; demuestran que las emisiones generadas durante el corte oxiacetilénico, por electrodo arco-aire y por electrodos convencionales (sin depuración de gases residuales) son escasas en comparación con las del rebabado o granallado.

Aplicabilidad

Como se indica en la Tabla 4.53, algunas técnicas de acabado no generan partículas y, por tanto, no requieren sistema de captura de gases residuales.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las normativas sobre emisiones de partículas y salud y seguridad.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en la gran mayoría de fundiciones europeas.

Tabla 4.53. Aplicabilidad de las técnicas de captura de partículas en los distintos procesos de acabado [32, CAEF, 1997], [225, TWG, 2003]

	Ventilación por el techo	Techo de cúpula	Campana rígida	Campana ajustable	Aislamiento
Corte abrasivo			x	x	x
Quemado	x	x	x	x	x
Cizallado, punzonado	No es necesario casi nunca capturar los gases				
Desmazarotado		x	x	x	x
Fresado	No es necesario capturar los gases				
Desmoldeo	Salvo en moles de arena, no es necesario capturar los gases				
Prensado	No es necesario capturar los gases				
Corte	No es necesario capturar los gases				
Amolado lateral	x	x	x	x	x
Granallado					x
Estampado	No es necesario capturar los gases				
Soldadura	x		x	x	x

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997]

4.5.10.2. Técnicas de depuración de gases de salida

Descripción

- *Granallado*: el granallado genera muchas partículas de polvo. La captura de gases de salida no presenta grandes problemas, ya que el proceso se lleva a cabo dentro de una cabina completamente cerrada. Los sistemas de depuración de aire empleados tradicionalmente se basan en el uso de filtros secos o húmedos, normalmente acompañados de un ciclón (prefiltro).
- *Muelas correderas, amolado en tambores*: en ninguno de los dos procesos se requiere sistema de reducción de las emisiones en condiciones normales. Los aerosoles que pueden formarse por el rápido movimiento de los tambores se consideran despreciables.
- *Corte*: todos los procesos de separación térmica generan emisiones. La captura de los gases de salida se lleva a cabo aislando el área de trabajo y llevando a cabo una extracción intensiva de los humos ascendentes. Es importante colocar los elementos de captura lo más cerca posible de las fuentes de emisión, siempre que no entorpezcan los distintos procesos que se realizan. En algunos casos ha sido útil combinar un brazo móvil para la extracción directa con una cabina de extracción adicional. Si se distribuyen cuidadosamente los diferentes elementos de extracción, el aire cargado de partículas puede conducirse lejos de la zona de respiración de los empleados. Los procesos de depuración más habituales son el lavado húmedo y los filtros secos. Hay que tener en cuenta que los sistemas están preparados para capturar las partículas de tamaño más pequeño de los humos emitidos. Los separadores inerciales se utilizan para la separación previa.
- *Corte abrasivo*: las instalaciones fijas de corte abrasivo cuentan con un sistema de extracción propio. Los sistemas de depuración de gases de salida utilizados tradicionalmente son los ciclones y lavadores húmedos y secos.
- *Corte, desmoldeo (cuando no se trata de moldes de arena), prensado, etc*: estas operaciones de acabado provocan pocas emisiones y no necesitan medidas de reducción en circunstancias normales.
- *Cizallado, punzonado*: en estos procesos se producen principalmente partículas gruesas, difíciles de recoger mediante extracción. Los procedimientos se llevan a cabo principalmente en cabinas por motivos de seguridad. En casos especiales, por ejemplo al extraer arena quemada, las partículas generadas pueden extraerse por medio de un brazo. Los gases de salida se hacen pasar por ciclones o filtros húmedos o secos.
- *Amolado*: la captura de emisiones generadas por las máquinas de amolar fijas se realiza de modo parecido al corte abrasivo; es decir, a través de embudos fijos a los que se conduce el chorro abrasivo. Para el amolado y el corte abrasivo manuales se utiliza un recinto de trabajo cerrado, lo que permite instalar paredes extractoras en la estructura. Para limpiar el aire se utilizan ciclones y filtros húmedos y secos.
- *Estampado, fresado*: estos tratamientos de acabado provocan pocas emisiones y no necesitan medidas de reducción en circunstancias normales.
- *Soldadura*: según el proceso de soldadura elegido se generan más o menos emisiones; los sistemas de extracción más adecuados son los de brazo. Para la depuración de los gases de salida se utilizan sistemas húmedos y secos y, ocasionalmente, filtros electrostáticos.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones de partículas.

Efectos colaterales

La extracción y la depuración de gases de combustión cargados de partículas consumen energía.

Datos operativos

Los lavadores húmedos y filtros de manga llevan instalándose y utilizándose desde hace muchos años. Las cabinas de desmazarotado dotadas de unidades de depuración de partículas de alta eficiencia a veces no tienen chimenea, ya que el aire de salida está más limpio que el propio aire del taller. Además, contribuyen a mejorar las condiciones del entorno de trabajo.

Los datos operativos pueden consultarse en el apartado 3.11; de ellos se desprende que los factores de emisión del corte oxiaetilénico, por electrodo arco-aire y por electrodos convencionales (sin depuración de gases de combustión) son bajos en comparación con los del rebabado y granallado.

Si se utilizan filtros de manga los niveles de emisión pueden situarse por debajo de 10 mg de partículas por Nm³.

Con sistemas de depuración húmeda de partículas los niveles de emisión se sitúan por debajo de 20 mg de partículas por Nm³.

Aplicabilidad

Estas técnicas son aplicables a las instalaciones nuevas y existentes. Por lo general las fundiciones no férreas no emplean procedimientos de acabado intensivos (generadores de partículas).

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las normativas sobre emisiones de partículas y salud y seguridad en el trabajo.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en la gran mayoría de fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [180, Assofond, 2002]

4.5.11. Captura y depuración de gases residuales generados por el tratamiento térmico

4.5.11.1. *Uso de combustibles limpios en hornos de tratamiento térmico dotados de quemador*

Descripción

Una medida básica e integrada a la vez en el proceso que permite reducir las emisiones de los tratamientos térmicos realizados con quemadores es utilizar combustibles limpios, por ejemplo gas natural o combustible con bajo nivel de azufre.

También el funcionamiento automatizado del horno permite controlar de cerca el régimen de trabajo y la temperatura y minimiza el consumo de energía en exceso.

Ventajas medioambientales

Reducción de contaminantes procedentes de la combustión como CO, SO₂ o NO_x.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

En una fundición de Polonia el tratamiento térmico se realizó hasta 1998 mediante 3 hornos de gas de carbón dotados de quemadores controlados manualmente. El gas carbón se suministraba directamente del horno de coque y tenía una calidad variable (por ejemplo, un contenido de CO de hasta el 15%). Como resultado el control de la temperatura era escaso, el nivel de emisiones alto y existía riesgo de intoxicación.

En 1998, 2 de los 3 hornos se equiparon con nuevos quemadores de gas natural, controlados por ordenador. Se renovó, además, el material refractario del horno. Los resultados de estos cambios en el funcionamiento fueron los siguientes:

- control automatizado del perfil de temperatura;
- reducción de un 40% del consumo de gas (volumen);
- reducción de costes a consecuencia del menor precio del gas natural;
- reducción de las emisiones de SO₂, NO_x, CO y aromáticos (véase Tabla 4.54).

Tabla 4.54. Niveles de emisión de un horno de tratamiento térmico antes y después de instalar quemadores de gas natural

Compuesto	Quemadores de gas de carbón		Quemadores de gas natural	
	Concentración (g/Nm ³)	Emisión (kg/h)	Concentración (g/Nm ³)	Emisión (kg/h)
CO	0,006	0,074	0,000	0,000
SO ₂	0,011	0,136	0,003	0,064
NO _x	0,016	0,197	0,004	0,085
Aromáticos	0,001	0,012	0,00025	0,0054

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para los hornos de tratamiento térmico alimentados por quemador.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa que regula las emisiones de SO₂, NO_x o CO.

Ejemplos

Metalodlew, Cracovia (Polonia)

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997]

4.5.11.2. Baños de temple

Descripción

En este caso la captura y reducción de las emisiones consiste básicamente en recoger los humos procedentes de los baños de temple, en especial los de aceite. Para ello se utilizan sistemas de ventilación en el techo, cúpulas de extracción y extractores en los extremos. Los problemas que provoca del proceso de desmoldeo sobre la rejilla son parecidos a los mencionados más arriba. Los baños a menudo se cargan con grúas, lo que obliga a instalar las campanas de extracción muy por encima del piso.

Normalmente no se suelen emplear sistemas de depuración en esta etapa, aunque, de utilizarse, los más habituales son los filtros electrostáticos.

Ventajas medioambientales

Reducción de las emisiones difusas de neblinas de aceite.

Efectos colaterales

La extracción de los productos de salida requiere energía.

Aplicabilidad

La Tabla 4.55 muestra las técnicas aplicables en función del tipo de baño.

Tabla 4.55. Aplicabilidad de las técnicas de captura de los gases de los baños de temple [32, CAEF, 1997]

	Ventilación por el techo	Techo en forma de cúpula	Cúpula, rígida	Cúpula ajustable	Extracción por los extremos
Agua	x				
Emulsión	x	x	x	x	x
Aceite de endurecimiento	x	x	x	x	x

Nota: x: aplicable

Los extractores situados en los extremos sólo son efectivos hasta ciertos volúmenes por encima de los cuales pierden su efectividad casi por completo, por ejemplo en el momento de máxima emisión, que se produce al sumergir en el baño la pieza caliente. Con todo, estos extractores son los sistemas de captura más adecuados al combinar baños de gran tamaño con cortina de aire y un techo en forma de cúpula.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las normativas sobre salud y seguridad en el trabajo.

Ejemplos

Varias fundiciones europeas utilizan esta técnica.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997]

4.6. Prevención y tratamiento de aguas residuales

4.6.1. Medidas de prevención de producción de aguas residuales

Descripción

Las siguientes medidas tienen como resultado una reducción considerable del nivel de aguas residuales:

- *Utilización de sistemas de depuración de partículas:* los sistemas de depuración de partículas en seco se pueden emplear para la mayoría de los gases de salida de las fundiciones. Hay excepciones donde puede que

sea necesario emplear un sistema de depuración húmedo para extraer las fracciones de partículas ultrafinas con contenido en hierro. La aplicabilidad de las técnicas de depuración húmeda y seca se analiza en el apartado 4.5.

- *Lavadores biológicos de gases residuales o filtros de compost:* el uso de lavadores biológicos de gases residuales es una alternativa si los gases que requieren tratamiento contienen sustancias fácilmente biodegradables como por ejemplo fenoles. Los lavadores biológicos generan menos aguas residuales que los sistemas húmedos convencionales al poderse reintroducir en el circuito más a menudo el agua tratada biológicamente.

Nota: Los filtros de compost (filtros biológicos) no generan aguas residuales, aunque el material de compost debe estar suficientemente húmedo. El filtrado biológico se trata en el apartado 4.5.8.6.

- *Reciclaje interno de aguas generadas en los procesos:* para someter a reciclaje intensivo el agua generada al limpiar se requiere disponer de instalaciones de tratamiento formadas por depósitos de sedimentación, a ser posible con una etapa de floculación integrada, y de equipo de filtrado. Dependiendo de las características del proceso es posible que el enfriamiento sea necesario. Las pérdidas por evaporación y la entrada de sustancias procedentes de la depuración del gas provocan la acumulación de sales en el agua del circuito. Según el grado de concentración de sal y los límites de descarga establecidos (en caso de descarga indirecta) puede que el agua del circuito deba descartarse. Es posible que resulte económicamente viable evaporar estas aguas residuales y utilizar el líquido obtenido por condensación para compensar las pérdidas por evaporación.
- *Múltiples usos del agua residual tratada:* utilizar el agua tratada para distintos fines puede ser también una alternativa; por ejemplo, se podría utilizar el agua generada por los procesos en el ciclo de preparación de la arena o para la granulación de la escoria. También puede plantearse la posibilidad de usar el agua de refrigeración en los lavadores húmedos.
- *Empleo del calor residual para evaporar las aguas residuales:* esta técnica sólo sirve si el aire caliente residual está disponible constantemente. Para su implantación se requiere un estudio pormenorizado de las instalaciones y de la viabilidad económica.
- *Control de aguas residuales procedentes de la chatarra almacenada:* puede evitarse la formación de aguas residuales a partir de la chatarra contaminada cubriendo la zona de almacenamiento. De este modo el agua de la lluvia podrá recogerse, ya que no estará contaminada. Las distintas técnicas de almacenamiento se describen en el apartado 4.1.
- *Evitar la formación de haluros orgánicos adsorbibles en el agua residual:* si seleccionan con cuidado los distintos tipos de chatarra puede evitarse la absorción de compuestos clorados durante el ciclo de producción. Una medida útil en este sentido consiste en analizar la presencia de haluros orgánicos adsorbibles antes de adquirir la chatarra. Estos compuestos también pueden encontrarse en las sustancias utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, por ejemplo el ácido clorhídrico, cloruro férrico o cloruro de aluminio comerciales.
- *Separar los distintos tipos de agua:* los caudales de agua con distintos niveles de contaminación deben mantenerse separados para minimizar los tratamientos a los que se somete al agua y optimizar su uso.

Ventajas medioambientales

Prevención de la producción de aguas residuales.

Efectos colaterales

Pueden existir efectos colaterales, dependiendo de la técnica elegida. La información al respecto se incluye en los distintos apartados.

Datos operativos

Los datos operativos coinciden con los de la planta descrita en el apartado 4.6.3.

El sistema de aguas residuales de una fundición de aluminio característica se divide en cuatro caudales distintos:

- aguas de escorrentía superficial: se unen a la canalización central de recogida de aguas residuales, atraviesan un separador de aceite (2xNG80) y van a parar a un río cercano;

- aguas utilizadas = aguas procedentes de procesos (baños de enfriamiento abiertos) y aguas sanitarias: se conducen a un canal al aire libre situado en las instalaciones, a la canalización pública y después al alcantarillado municipal;
- agua de refrigeración: se capta inicialmente de un río cercano, atraviesa un filtro de arena y se introduce en un circuito cerrado de enfriamiento con filtro, de donde se envía nuevamente al curso de agua a una temperatura máxima de 28 °C. Las aguas que recoge el tejado también van a parar a este circuito;
- agua procedente de los lavadores de gases de combustión (arena verde, posmoldeo): este agua se evapora parcialmente para que de la planta salgan únicamente los lodos restantes.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todas las instalaciones, nuevas o ya existentes.

Datos económicos

Los datos económicos pueden consultarse en los apartados correspondientes de las distintas técnicas alternativas y bajo el epígrafe «Ejemplos» del apartado 4.6.3.

Ventajas de la implantación

Minimización de la producción de aguas residuales.

Ejemplos

Honsel, Meschede (Alemania)

Publicaciones de referencia

[195, UBA, 2003]

4.6.2. Tratamiento de las aguas de depuración y otros flujos de aguas residuales

Descripción

Los sistemas de filtrado en seco utilizados para limpiar los gases que generan los hornos no generan flujo de aguas residuales; tampoco los sistemas de depuración húmeda deberían generar agua de descarga si se adoptan las medidas necesarias para limpiar el agua y reciclarla. Siempre que los sólidos se extraigan hasta obtener unos niveles aceptables para el equipo de depuración los compuestos solubles normalmente consiguen alcanzar el punto de saturación sin efectos adversos de ningún tipo. Existen varias técnicas, o combinaciones de ellas, que permiten separar adecuadamente los sólidos.

Se utilizan las siguientes técnicas de tratamiento:

- sedimentación;
- precipitación del hidróxido;
- precipitación en varias etapas;
- oxidación húmeda;
- procedimientos de filtrado.

Las aguas residuales pueden contener metales pesados disueltos y no disueltos, fenoles y cianuros. El tratamiento debe adaptarse a los contaminantes presentes.

Los **metales pesados no disueltos** deben extraerse del agua residual por métodos físicos (sedimentación, filtrado, posiblemente flotación). Utilizando estos métodos se alcanzan concentraciones bastante inferiores a los 0,5 mg/l.

Los **metales pesados disueltos** deben transformarse en primer lugar en compuestos poco solubles utilizando para ello los precipitadores adecuados. Las bases especialmente fuertes (como la lechada de cal, soluciones de sosa cáustica, sosa) se emplean como precipitadores en la precipitación del hidróxido. Si no son suficientes habrá que recurrir a la precipitación con sulfuros orgánicos o alcalinos.

Los **fenoles** y **cianuros** pueden degradarse biológicamente o eliminarse mediante un tratamiento fisicoquímico. Normalmente están presentes en concentraciones tan bajas que no hay necesidad de realizar un pretratamiento específico; suele bastar con el tratamiento combinado en una planta de tratamiento de aguas residuales lo suficientemente grande.

Ventajas medioambientales

Reducción de la cantidad de contaminantes en el agua residual.

Efectos colaterales

Los tratamientos de aguas residuales generan una fracción de sólidos residuales.

Datos operativos

Las aguas residuales de las fundiciones contienen principalmente zinc, además de hierro. La precipitación del hidróxido dentro de un margen de pH de 8,5 a 11 puede reducir la concentración de zinc a valores inferiores a 2 mg/l. El margen de pH indicado debe respetarse, ya que si aumentase el zinc anfotérico volvería a disolverse en forma de cincatos.

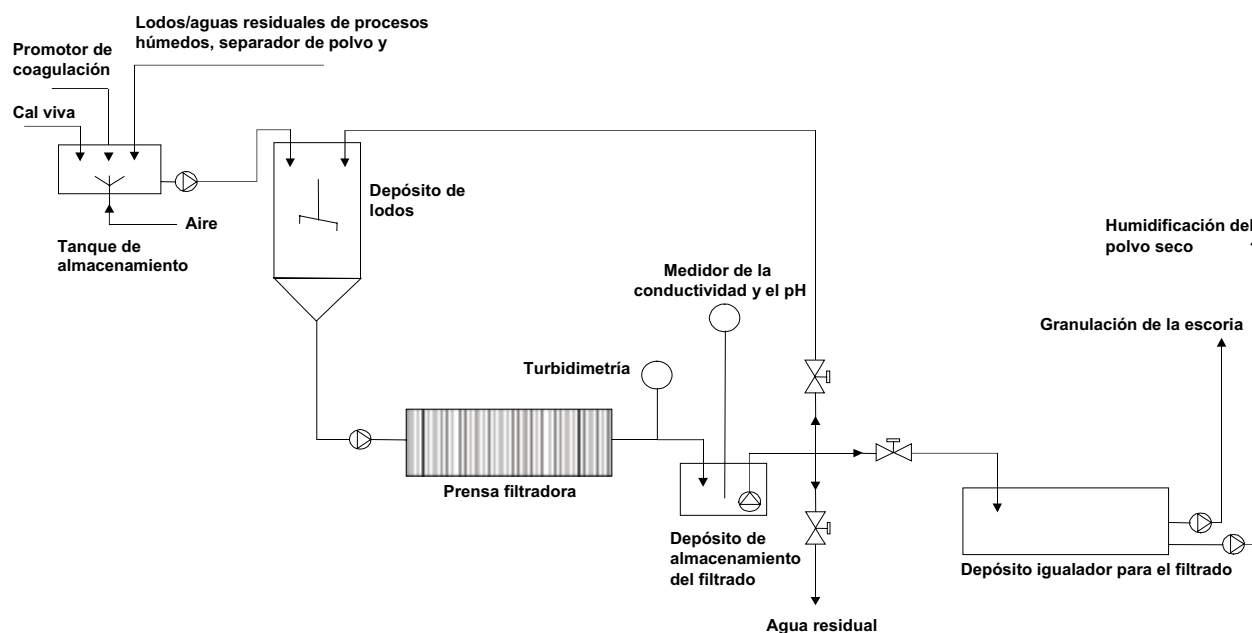


Figura 4.18. Tratamiento de aguas residuales y lodos procedentes del sistema de depuración húmeda de partículas de un cubilote [195, UBA, 2003]

La Figura 4.18 es un ejemplo de preparación combinada y reacción de precipitación de los lodos no deshidratados procedentes de lavadores húmedos de cubilotes. Tras su extracción del sistema de tratamiento de aguas procedentes de la depuración húmeda los lodos se preparan, en una fase de tratamiento aparte, mediante cal viva. El resultado es un aumento del valor del pH y de la precipitación de los metales pesados. Los contaminantes orgánicos también se adsorben. A continuación los lodos se deshidratan en un filtro prensa. Tras la medición de la turbidez el líquido filtrado pasa a un depósito de almacenamiento dotado de un sistema de medición del pH y la conductividad. En función de su composición y necesidades, el líquido filtrado se devuelve al silo de lodos, se somete a granulación de la escoria, se envía a través de los depósitos igualadores para humidificar el polvo seco o bien se desecha descargándolo como sobrante (siguiendo los requisitos de descarga exigidos por la planta local de tratamiento de aguas residuales).

Los datos operativos adicionales figuran bajo el epígrafe «Ejemplos» del apartado 4.6.3.

Aplicabilidad

El tratamiento de las aguas residuales debe seleccionarse en función de la composición del agua y de las condiciones de eliminación de agua procedente de las plantas en los cursos de agua locales.

Datos económicos

Los datos económicos se incluyen en la planta que sirve de ejemplo en el apartado 4.6.3.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las normativas sobre contaminantes en el agua residual.

Ejemplos

Véase apartado 4.6.3

Publicaciones de referencia

[195, UBA, 2003], [160, UK Environment Agency, 2002]

4.6.3. Ejemplo de prevención y reducción de aguas residuales

Descripción

El ejemplo corresponde a una planta alemana dedicada a la producción de piezas de fundición de hierro (fundición gris y nodular) y de aluminio por presión.

En ella se realizan los siguientes procedimientos:

- *Fusión*: hornos de fusión alimentados con gas y planta de tratamiento de gases de combustión (filtro seco).
- *Fabricación de piezas por inyección*: colada en matrices metálicas para inyección de aluminio.
- *Moldeo en arena*: fabricación de aleaciones especiales.
- *Moldeo de hierro (producción de machos)*: en la producción de machos se utilizan los procesos de caja fría y Croning. La depuración de aminas genera lodo concentrado.
- *Moldeo del hierro (colada)*: el área de colada está formado por las instalaciones de mezclado, un cubilote de viento caliente, varios hornos eléctricos, un convertidor y un horno de mantenimiento.
- *Moldeo del hierro (moldeo)*: uso de moldes perdidos elaborados con arena aglomerada con bentonita.

La Tabla 4.56 muestra los datos de producción y consumo de agua de la planta.

Tabla 4.56. Datos de producción y consumo de agua (anuales) de una planta característica [195, UBA, 2003]

Producción	
Moldeos de hierro de calidad, total	46.710 t
Moldeos de metales no féreos de calidad, total	2.355 t
Consumo de agua	
Agua potable (red de suministro)	59.630 m ³
Aguas superficiales/freáticas	64.998 m ³

Se utilizan lavadores húmedos si se generan grandes volúmenes de gases residuales con concentraciones relativamente altas de sustancias orgánicas (gases residuales procedentes de la producción de machos) o cuando las temperaturas de los gases son elevadas (gases de combustión procedentes de cubilotes de viento caliente).

La Figura 4.19 representa de forma esquemática el circuito de agua del sistema húmedo de depuración de partículas. Los gases residuales procedentes del punto de extracción (situado debajo del agujero de carga) se envían a un separador (ciclón) y después a un lavador (venturi) para llevar a cabo la depuración de partículas. La posterior extracción de contaminantes gaseosos se efectúa mediante un lavador de lecho compacto. Las aguas residuales generadas por el lavador venturi se someten a tratamiento previo en un separador por flotación, de donde se envían a una tanque de decantación para el tratamiento secundario. El líquido de lavado procedente de la torre compacta va a parar directamente al tanque de decantación. Los lodos decantados en el depósito pueden bombearse de forma discontinua al separador por flotación. Los lodos del separador se bombean a su vez a un transportador de rasquetas, se aglomeran por la acción de los floculantes y se conducen al tanque de almacenamiento. De ahí el lodo se envía al silo de lodos y se solidifica en una planta de mezclado añadiéndole polvo seco.

Este diseño básico ocasionaba ciertos problemas operativos a la fundición a causa de la acumulación de sales y la pésima calidad del agua final. Se decidió ampliar la planta por los siguientes motivos:

- aumentar la velocidad de la decantación mediante el empleo de distintos floculantes;
- reducción del contenido de contaminantes del material del filtro;
- mejorar el proceso de deshidratación del lodo;
- reutilizar el material de depuración del ciclo de lavado de gas.

Para ello se instalaron un filtro prensa con un volumen de 2 m³ y un depósito de recogida de lodos (con un volumen de 30 m³) dotado de un agitador. Los lodos iban a parar del transportador de rasquetas directamente al tanque de almacenamiento previamente acondicionado con cal viva.

En la fase de ensayo, que se prolongó varios meses, se descubrió que se necesitaban aproximadamente 25 kg de cal viva por lote para lograr los mejores resultados desde el punto de vista de la deshidratación y la extracción de metales pesados. El contenido medio de materia seca era del 70%. Los análisis del sistema de filtrado de metales pesados dieron como resultado valores que se encontraban en los límites de detección. Sin embargo, la concentración relativamente elevada de sulfato (aproximadamente 1 g/l) dificultaba la reutilización del filtrado procedente del ciclo de depuración.

Una alternativa factible consistió en prolongar el tratamiento de los lodos con otros compuestos, como muestra la Figura 4.20. Las mezclas de agua/sólidos procedentes del lavado húmedo se acondicionan previamente añadiéndoles floculante; los lodos resultantes se conducen al depósito de mezclado a través de un transportador. La cantidad de cal viva que se añade a este depósito debe determinarse previamente por medio de ensayos. Los lodos se introducen en el silo mediante una bomba (bomba P1 en la Figura 4.20) y la bomba 2 se encarga de enviarlos al filtro prensa.

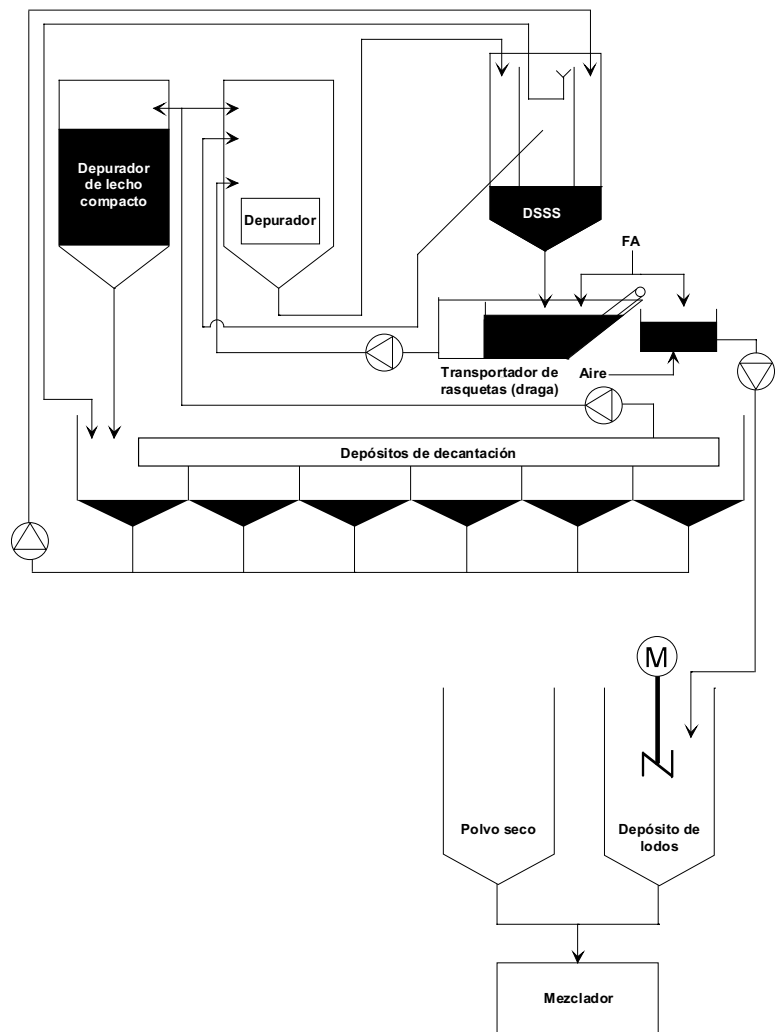


Figura 4.19.
Circuito de agua del sistema
húmedo de depuración de
partículas de un cubilote
(DSSS: separador por
flotación de doble capa;
FA: floculante, M: motor)
[195, UBA, 2003]

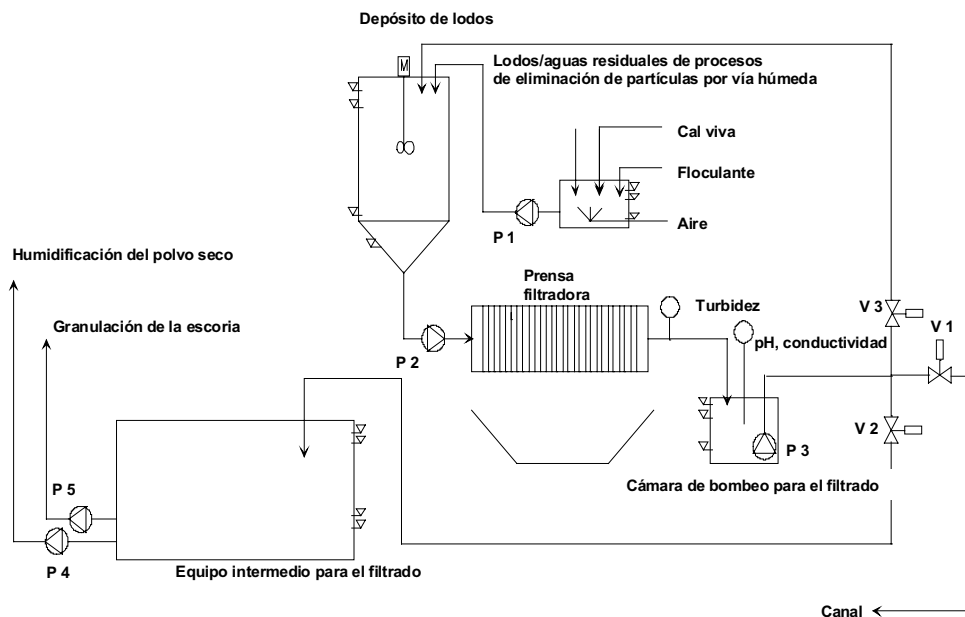


Figura 4.20. Sistema de tratamiento de lodos procedentes del sistema húmedo de depuración de partículas de los gases de combustión de un cubilote [195, UBA, 2003]

El filtrado pasa por un medidor de turbidez y se almacena en un depósito dotado de control del pH y la conductividad. De allí puede enviarse a tres destinos distintos:

- a un equipo de granulación de escoria o de humidificación de polvo seco a través del depósito igualador
- de vuelta al silo de lodos (si supera los límites de turbidez)
- al desagüe (sólo en caso de emergencia).

Datos económicos

Los datos económicos correspondientes a la ampliación de las instalaciones y el sistema de tratamiento de lodos se muestran en la Tabla 4.57.

Tabla 4.57. Costes de eliminación correspondientes a la ampliación de un sistema de tratamiento de aguas residuales con tratamiento para lodos [195, UBA, 2003]

Antes de la ampliación		Tras la ampliación	
Lodos generados con un contenido en materia seca del 30%	2.000 t/año	Lodos generados con un contenido de materia seca del 70%	850 t/año
Partículas secas para la solidificación del lodo	1.100 t/año	Polvo seco para la solidificación del lodo	0 t/año
Precio de vertedero	100 EUR/t	Precio de vertedero	100 EUR/t
Costes anuales de eliminación	31.0000 EUR		85.000 EUR

El lodo que contiene un 70% de materia seca no necesita estabilizarse más antes de desecharse. El lodo húmedo, en cambio, debe solidificarse a base de polvo seco. El ahorro en costes de eliminación es de 310.000–85.000 = 225.000 euros, si bien los costes de inversión de la ampliación alcanzaron los 175.000 euros, a los que hay que sumar un coste operativo adicional anual de 50.000 euros. Así pues, el ahorro total de costes asciende a 175.000 EUR/año con un período de retorno energético de 1 año. Los cálculos no incluyen los ahorros de costes derivados de la reutilización del filtrado.

Ejemplos

Sach Giesserei GmbH, Kitzingen (Alemania).

Publicaciones de referencia

[195, UBA, 2003]

4.6.4. Interceptores de aceite

Descripción

Las aguas de esorrentía procedentes de espacios abiertos, en especial de las áreas de almacenamiento de materias primas, contienen sólidos en suspensión que pueden extraerse por decantación u otras técnicas. Los interceptores de aceite se utilizan para el drenaje de las zonas de manipulación de la chatarra. Los sumideros tienen un tamaño suficiente para poder absorber precipitaciones copiosas y hacer frente a posibles temporales sin que los materiales sueltos lleguen a desplazarse.

Los interceptores de aceite se utilizan para tratar las aguas residuales generadas por las fundiciones de moldeo permanente. Los sistemas hidráulicos de los procesos automatizados de inyección pueden tener pérdidas de aceite, por lo que el sistema de recogida de aguas está diseñado de modo que cualquier cantidad de aceite sea recogida y el caudal de aguas residuales restante tratado mediante el interceptor de aceite.

Ventajas medioambientales

Prevención de la contaminación del agua.

Efectos colaterales

Los interceptores de aceite generan residuos.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a las antiguas y nuevas fundiciones de inyección (moldes permanentes) y a todas las demás que cuenten con un sistema de evacuación de aguas residuales directo a las aguas superficiales.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa que regula el vertido de contaminantes en el agua.

Ejemplos

Honsel, Meschede (Alemania).

Publicaciones de referencia

[160, UK Environment Agency, 2002]

4.6.5. Recuperación de aminas a partir del agua de depuración

Descripción

El lavado ácido de los gases de combustión de las cajas frías genera sulfatos (véase apartado 4.5.8.4). Esta amina puede extraerse por neutralización con hidróxido de sodio seguida de destilación.

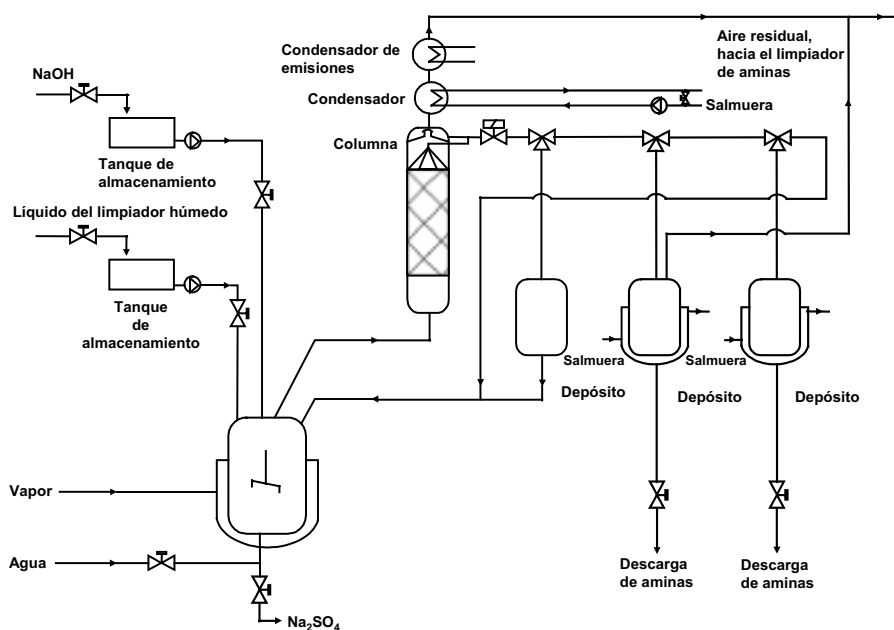


Figura 4.21.
Planta de reciclado de aminas [195, UBA, 2003]

Como muestra la Figura 4.21, la sal que se forma a partir de aminas terciarias (por ejemplo DMEA, DMIA y trietanolamina (TEA)) en la depuración ácida y el propio ácido utilizado para el lavado (por ejemplo ácido sulfúrico) se transforman al reaccionar con una base fuerte (por ejemplo una solución de sosa cáustica), lo que da lugar a aminas libres y, por ejemplo, sulfato de sodio. Las aminas se expulsan junto con el vapor de agua y a continuación se limpian y se acumulan formando una columna que permite su reaprovechamiento. La solución de sulfato de sodio (junto con la solución de lavado contaminada) pueden recuperarse o bien desecharse.

Ventajas medioambientales

Recuperación de un compuesto químico que puede reutilizarse.

Efectos colaterales

Si el proceso se lleva a cabo en una planta centralizada será necesario transportar el líquido de lavado a la unidad de tratamiento.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para cualquier licor de depuración de gases residuales de producción de machos que contenga aminas. La implantación se ve limitada por factores económicos (por ejemplo los costes de transporte), ya que es necesario disponer de cantidades suficientes de líquido de lavado de aminas. Por ello normalmente el tratamiento se realiza en una planta centralizada que recibe y trata los efluentes de varias fundiciones. Puesto que el procedimiento entraña riesgos de explosión deben adoptarse las medidas necesarias para reducirlos.

Ventajas de la implantación

Recuperación de compuestos químicos. Coste de vertido de residuos industriales.

Ejemplos

- Plantas de reciclaje centralizado de Voerde (Alemania)
- Planta centralizada para los residuos de un grupo de fundiciones dedicadas a la automoción de Poitou (Francia).

Publicaciones de referencia

[195, UBA, 2003]

4.6.6. Reducción de glicoles de los caudales de aguas residuales generados por la inyección

Descripción

Los sistemas hidráulicos empleados en la inyección utilizan mezclas de agua y glicol, por ejemplo el líquido hidráulico. Una fuga del sistema hidráulico iría a parar al líquido transportado hasta la canalización de agua y provocaría la presencia de glicoles en el agua residual de la fundición. El glicol no puede extraerse a partir de técnicas de filtrado o flotación.

Las técnicas de depuración disponibles son las siguientes:

MTDs para forja y fundición

- destilación o evaporación a vacío, y
- degradación biológica.

Las aguas, una vez limpias, pueden reutilizarse como disolvente del agente desmoldeante.

Ventajas medioambientales

Reducción de la contaminación del agua.

Efectos colaterales

El tratamiento del agua genera una torta de lodos que debe desecharse.

Datos operativos

En una fundición belga el agua generada durante los procesos se trata en una planta de evaporación a vacío (con una capacidad de 3 m³/día). El agua procede de tres puntos distintos: excedentes de agente desmoldeante (recogidos en la parte baja de las unidades de MAP), fugas de fluido hidráulico procedente de la automatización de la colada (agua y glicol) y agua de lavado generada por el filtro eléctrico. La evaporación a vacío produce una torta de lodos que deberá eliminarse, además de efluentes con una elevada DQO y baja dureza (alcalinidad), lo que permite reutilizarlos como disolvente para el líquido desmoldeante.

Aplicabilidad

Esta técnica puede aplicarse a todas las fundiciones de inyección nuevas o existentes.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la normativa que regula el vertido al agua de contaminantes.

Ejemplos

Metaalgieterij Giessen, Hoboken (Bélgica): fundición de aluminio dotada de tecnología de moldeo a presión y por gravedad.

Publicaciones de referencia

[202, TWG, 2002]

4.7. Eficiencia energética

4.7.1. Introducción

Fundir el metal y mantenerlo en estado líquido consume normalmente una parte significativa de la energía que entra en la fundición. De hecho, en muchas fundiciones se utiliza más energía para mantener el metal en estado líquido que durante el proceso de fusión en sí. Pero también se consumen grandes cantidades de energía en otras áreas que no tienen que ver con el suministro del metal. Por ejemplo, las fundiciones son grandes consumidoras de aire comprimido. También consumen considerable energía algunos dispositivos como las máquinas de inyección, cuyas unidades, básicamente hidráulicas, se accionan mediante electricidad. Las fundiciones que realizan moldeos en arena y por gravedad en matrices utilizan en ocasiones procesos de producción de machos en caliente, por ejemplo en cáscara o en cajas calientes, y para calentar las cajas se necesita gas o

electricidad. El calentamiento de matrices, cucharas y revestimientos del horno también puede suponer una elevada proporción del consumo energético total. La Tabla 4.58 muestra la distribución relativa característica del uso de energía en dos tipos distintos de fundición. [64, ETSU, 1997]

Tabla 4.58. Uso característico de energía en una fundición de acero dotada de horno HEA y en una fundición no férrea [64, ETSU, 1997], [202, TWG, 2002]

Procedimiento	Fundición no férrea (%)	Fundición de acero (HEA) (10.000 t/año de pieza buena) (%)
Fusión	30	44
Mantenimiento	30	
Funcionamiento de la planta	15	
Compresión de aire	14	10
Calentamiento de dispositivos	3	
Tratamiento térmico (gas)		7
Otros*	8	39

* Incluye todos los procedimientos indicados, aunque no aparezcan datos en las columnas, y también otros procedimientos no especificados

Los datos incluidos en la Tabla 4.58 muestran que a los procedimientos auxiliares (es decir, todos excepto la fusión y el mantenimiento) se les atribuye prácticamente la mitad de la energía consumida en la fundición. Destacan entre ellos los procedimientos que emplean mecanismos como motores y accionadores, aire comprimido, iluminación, calentamiento y planta de calderas. Las medidas destinadas a aumentar la eficiencia energética deberían tener en cuenta, pues, tanto los procesos de colada como los auxiliares. [46, ETSU, 1995].

Para que el funcionamiento sea eficiente deben ponerse en marcha buenas prácticas de reducción del uso energético en todas las fases mencionadas. Mejorar la eficiencia energética es, de hecho, una de las principales ventajas medioambientales que se obtiene de las distintas técnicas que presenta este apartado. Las siguientes secciones se centran en técnicas específicas que contribuyen a recuperar el calor y a transferirlo a otras zonas de la fundición.

4.7.2. Hornos de inducción: uso del calor residual

Descripción

Un porcentaje significativo de la energía eléctrica suministrada a los hornos de inducción de fusión se convierte en calor residual. Entre el 20 y el 30% de la energía de entrada total se disipa en el sistema de enfriamiento. El circuito de refrigeración del horno no sólo hace frente a las pérdidas eléctricas de la bobina de inducción, sino que también la protege del calor transmitido por el revestimiento del horno, que genera el metal caliente en el crisol. El calor que llega al circuito de refrigeración del horno se utiliza en algunas instalaciones para calefacción, calentar el agua de uso sanitario o secar materias primas.

- *Secado de materias primas:* si se añaden materiales de carga metálicos al material residual del horno de fusión por inducción la presencia de agua en la chatarra puede llegar a ser potencialmente muy peligrosa. Aunque la chatarra se haya almacenado a cubierto en la fundición es posible que estuviera húmeda en el momento de la entrega por parte del proveedor. El calor del agua de refrigeración del horno puede extraerse con un intercambiador de calor de aire-agua y conducir el aire caliente resultante por medio de un ventilador hasta la base de los depósitos de almacenamiento. La Figura 4.22 muestra un diagrama de este tipo de instalación.

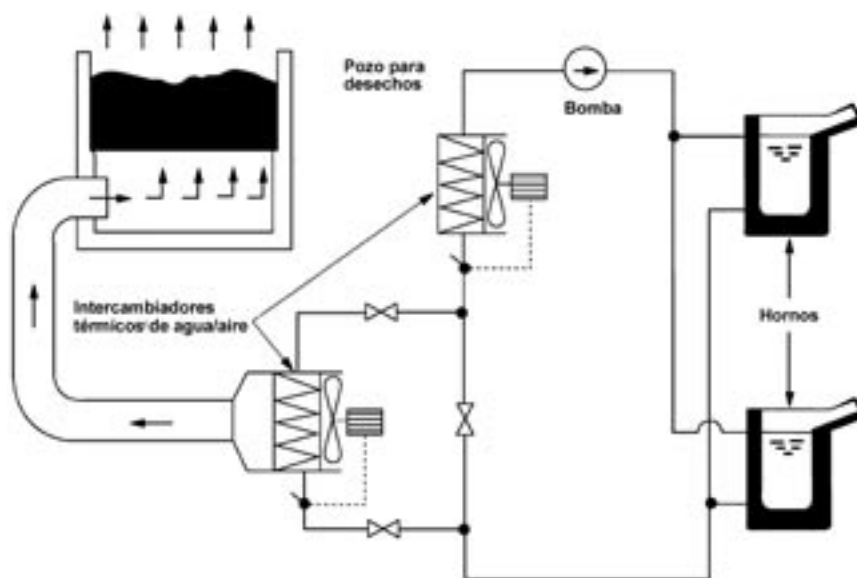


Figura 4.22.
Uso del calor residual
para el secado de la
chatarra [47, ETSU, 1992]

- **Calefacción y suministro de agua caliente:** mediante un sistema parecido al descrito más arriba puede conducirse el aire caliente al interior de la fundición para caldear distintos espacios. Otra alternativa consiste en emplear un intercambiador de calor de agua-agua para calentar el circuito de agua de los radiadores o bien suministrar agua caliente de uso sanitario.

Puesto que la temperatura de agua de refrigeración en un sistema no presurizado normalmente no suele sobrepasar los 60 – 70 °C, los radiadores deberán tener un área superficial muy grande para poder transferir el calor eficientemente. Como alternativa puede aumentarse la temperatura del agua con algún dispositivo de calentamiento, por ejemplo quemadores auxiliares de gas o petróleo o bien un calentador eléctrico. Además, debe habilitarse un sistema de calefacción auxiliar que funcione cuando los hornos no estén encendidos; así, por ejemplo, podría aumentarse la temperatura de las zonas de trabajo a primeras horas del día hasta que sean agradables.

Las instalaciones de refrigeración habituales de los hornos deben mantenerse en funcionamiento durante el verano y en otros períodos en los que las instalaciones de calefacción no extraen del sistema de refrigeración todo el calor necesario. Resulta esencial mantener en todo momento la integridad del sistema de refrigeración, que deberá diseñarse a prueba de fallos para proteger a su vez la integridad de los hornos de forma continua. Por otro lado, el agua que regresa al sistema de refrigeración no puede estar excesivamente fría (es decir, con una temperatura inferior a los 30 °C). Por ello deberían instalarse alarmas de accionamiento térmico y tuberías de derivación de emergencia dotadas de válvulas de control manuales fácilmente accesibles para asegurar que los sistemas de recuperación del calor puedan aislarse rápidamente del circuito de refrigeración principal si se produce una incidencia.

Ventajas medioambientales

Aumento de la eficiencia energética.

Efectos colaterales

No se conocen efectos colaterales.

Datos operativos

En una fundición belga se ha instalado un sistema de recuperación del calor que utiliza el aceite de refrigeración de los hornos de inducción. La fundición cuenta con dos hornos de inducción de mantenimiento en funcio-

namiento dúplex con un cubilote. Los inductores de los hornos eléctricos se enfrían mediante aceite térmico, que se calienta hasta los 200 – 300 °C y después se deja enfriar en un intercambiador de calor de aceite-aire situado en el exterior. Antes de instalar el sistema de recuperación del calor se disipaba 1 MW de calor a la atmósfera. El sistema alternativo instalado permite aprovechar el calor residual para la calefacción, ya que el aire caliente se introduce en el área de machos y de este modo se recupera un tercio del calor disipado y se sustituye el sistema anterior, que utilizaba quemadores de gas. Este sistema pudo instalarse sin grandes desembolsos porque el intercambiador de calor de aceite-aire se encuentra junto al taller de machos. Es posible llevar este tipo de calefacción a otros lugares de la fundición en el futuro, pero para ello se requieren más tuberías (lo que a su vez implica mayores pérdidas).

Aplicabilidad

Para poder implementar un sistema de recuperación de calor deben cumplirse los siguientes requisitos:

- una parte significativa del calor residual debe utilizarse en instalaciones cercanas; además, los períodos de utilización del calor deben coincidir con los períodos de funcionamiento del horno. En cualquier caso, el calor disponible normalmente no es de gran calidad, ya que la temperatura del agua de refrigeración no puede sobrepasar los 70 °C;
- las temperaturas relativamente bajas obligan a utilizar intercambiadores de calor mucho más grandes de lo normal;
- el agua no puede volver al horno a una temperatura inferior a los 30 °C, de lo contrario podría haber problemas de condensación;
- mantener la integridad de los circuitos de refrigeración resulta absolutamente esencial. Estos circuitos protegen la bobina, y si ésta deja de funcionar los resultados podrían ser desastrosos.

Los anteriores aspectos, en particular el que hace referencia a la integridad, provocan que los titulares ni siquiera se planteen la posibilidad de utilizar el calor generado por el circuito de refrigeración.

Datos económicos

Las fundiciones que quieran utilizar el calor procedente del circuito de refrigeración deben evaluar antes las ventajas que conlleva y sopesar los posibles costes de instalación de equipos adicionales y la seguridad del horno y sus operadores.

Ventajas de la implantación

Aumentar el uso eficiente de la energía en las fundiciones.

Ejemplos

Calefacción por aire caliente: Proferro, Oudenaarde (Bélgica).

Fundición Metso Paper Jyväskylä (Finlandia).

Publicaciones de referencia

[47, ETSU, 1992]

4.7.3. Uso del calor residual de los cubilotes

Descripción

La necesidad de enfriar los gases de combustión de los cubilotes antes de conducirlos al filtro de mangas conlleva la posibilidad de dar un uso alternativo al calor que permita su aprovechamiento. Los posibles usos alternativos son, por ejemplo:

- calderas de vapor;
- circuitos de aceite térmico;
- circuitos de calefacción;
- circuitos de agua caliente.

Ventajas medioambientales

Recuperar el aire caliente, que de otro modo se disiparía y perdería, para reducir el consumo de combustible (u otras fuentes de energía).

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

Las dos plantas que sirven de ejemplo en el apartado 4.5.2.2 están equipadas de un sistema de utilización del calor residual. Los datos correspondientes son los que figuran en la Tabla 4.37.

La planta G utiliza el calor residual del cubilote para producir energía eléctrica. Parte del caudal de gases se destina a calentar una caldera que a su vez acciona una turbina acoplada a un generador o compresor. En la Figura 4.23 se muestra una representación esquemática de la instalación. Como resultado, el 29% del calor generado por el coque se reaprovecha para otros usos y se generan alrededor de 2,9 MW de energía eléctrica. Dicho de otro modo, la planta genera una energía eléctrica correspondiente a 75 kWh/tonelada de hierro líquido.

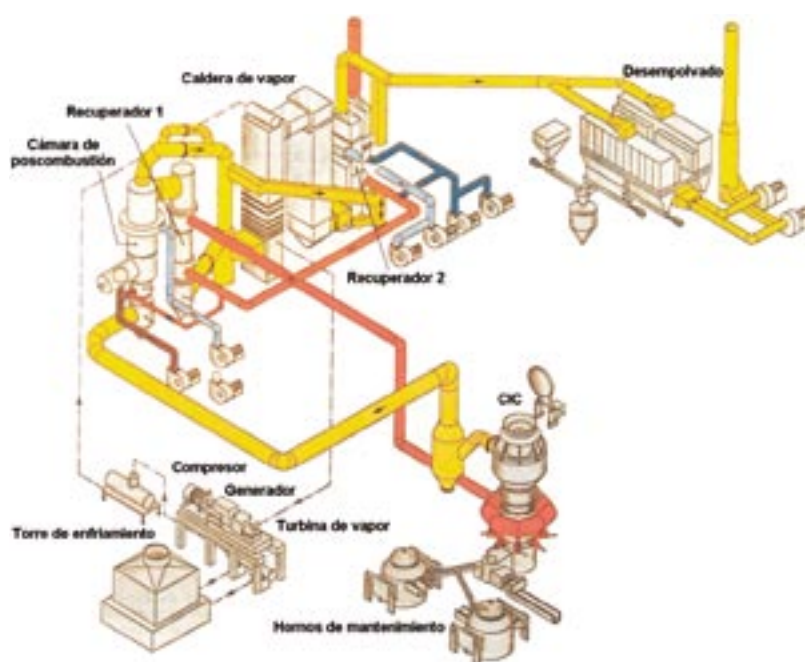


Figura 4.23.
Representación
esquemática del cubilote
de viento caliente con la
caldera, turbina y generador
[27, Kran, et al., 1995]

La planta H emplea el calor residual generado por el cubilote en un circuito de aceite térmico. Tras el intercambio de calor (para el precalentamiento del aire de inyección) los gases de combustión se envían a un intercambiador de calor de gas-aceite. El aceite calentado se emplea para secar los machos, con una recuperación máxima del calor de 21 MW. En la Figura 4.24 puede verse el correspondiente diagrama de flujo.

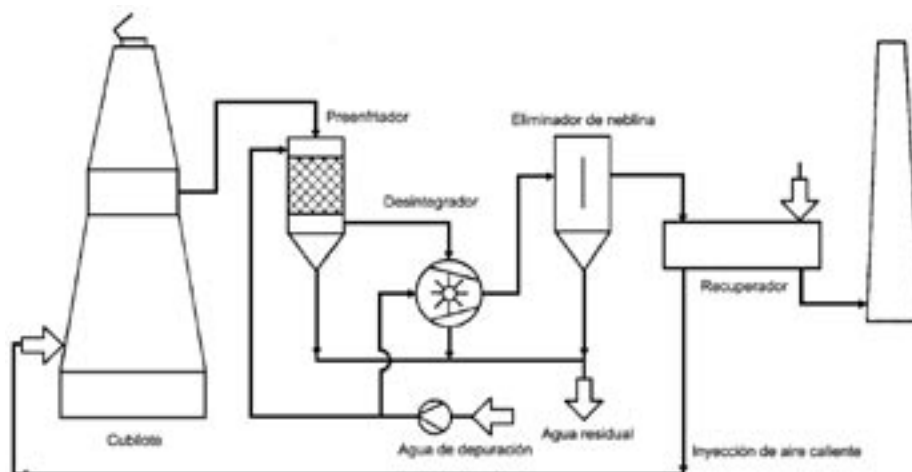


Figura 4.24.
Diagrama de flujo de procesos de un cubilote de viento caliente con recuperación del calor
[17, Strauß, 1983]

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para las nuevas instalaciones, pero debería tenerse en cuenta al diseñar los procesos. En las fundiciones existentes también se puede implantar previa remodelación, si bien también es posible añadir pequeñas unidades adicionales a las instalaciones ya existentes.

Datos económicos

Los ejemplos indicados forman parte de un proceso de reforma integral de las instalaciones. Por lo tanto, no resulta posible aportar datos de costes concretos.

Ventajas de la implantación

Aumentar la eficiencia energética de los procesos industriales.

Ejemplos

Las dos plantas mencionadas se encuentran en Alemania.

Publicaciones de referencia

[17, Strauß, 1983], [27, Kran, et al., 1995], [202, TWG, 2002]

4.7.4. Reducción de pérdidas de energía/mejora del precalentamiento en la cucharas

Descripción

Se pierde energía si el sistema de transferencia de metal fundido provoca un descenso excesivo de la temperatura del metal entre el vaciado del horno y el llenado de los moldes. Estas pérdidas pueden evitarse si se llevan a cabo buenas prácticas, por ejemplo:

MTDs para forja y fundición

- utilización de cucharas limpias precalentadas hasta el rojo vivo;
- utilización de cucharas de distribución y cazos, mucho más largos y dotados de tapas para retener el calor;
- tapar las cucharas que estén vacías (boca arriba) o bien darles la vuelta cuando no se utilicen;
- minimizar las transferencias de metal entre cucharas;
- transferir el metal tan pronto como sea posible sin por ello dejar de cumplir las exigencias de seguridad.

Ventajas medioambientales

Reducir las pérdidas de energía.

Efectos colaterales

No se producen efectos colaterales.

Aplicabilidad

Puesto que esta técnica implica medidas basadas en las mejores prácticas puede implantarse en todas las fundiciones, nuevas y existentes.

Datos económicos

No se dispone de datos económicos.

Ventajas de la implantación

Gestión eficiente de la energía en la fundición.

Ejemplos

Estas medidas se utilizan en mayor o menor grado en las fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[44, ETSU, 1993]

4.8. Arena: regeneración, reciclaje, reutilización y eliminación

4.8.1. Introducción

Puesto que las fundiciones utilizan grandes cantidades de arena como materia prima inerte, su regeneración se convierte en un aspecto de máxima importancia en cuanto al rendimiento medioambiental de las mismas. Conviene distinguir claramente, no obstante, entre la arena verde y la arena química. La primera puede reacondicionarse fácilmente tras su uso y, de hecho, una vez utilizada muestra mejores cualidades técnicas que la arena nueva. La mayoría de fundiciones de arena verde llevan a cabo regeneración primaria.

La regeneración primaria, también llamada desgaste o disgregación, consiste en romper los moldes o machos aglomerados hasta restituir la arena a su tamaño de grano original. Para ello la arena se tamiza, se le extraen los fragmentos de metal desprendido y se separan y extraen los finos y las aglomeraciones de tamaño excesivo. A continuación se enfría antes de llevarse a la zona de almacenamiento, reincorporarse al sistema de arena o mezclarse con arena nueva. En esta fase es posible que los granos de arena todavía estén recubiertos de una capa parcial de aglomerante usado; esta capa afecta a la calidad de arena recuperada a la hora de

confeccionar moldes o, en especial, machos. Ello obliga a introducir arena nueva para asegurar que la mezcla de arena aporte a los moldes y machos la fuerza necesaria y contribuya a producir piezas buenas. La arena de recuperación primaria normalmente no tiene la calidad suficiente para confeccionar machos sin procesarla previamente para extraerle los materiales aglomerantes residuales, por lo que se utiliza principalmente para los moldes. Las principales técnicas de regeneración primaria son la vibración, el tambor giratorio y el granallado.

La regeneración secundaria implica un mayor procesamiento de la arena previamente disgregada para extraerle los restos de aglomerante. De este modo recupera (o hasta mejora) las características de la arena nueva. Algunas fundiciones que realizan esta regeneración secundaria han llegado incluso a prescindir de la arena nueva. Para eliminar el aglomerante residual se necesitan técnicas más agresivas que las propias de la regeneración primaria. Las principales técnicas son las siguientes:

- tratamiento mecánico en frío:
 - desgaste de baja energía: fricción, impacto (resinas de endurecimiento en frío);
 - desgaste de alta energía: fricción neumática, rozamiento, fricción centrífuga;
- tratamientos térmicos (normalmente en lecho fluidizado);
- depuración húmeda.

Tabla 4.59. Aplicabilidad de los distintos métodos de regeneración en sistemas de arena única [128, IHOBE, 1998], [225, TWG, 2003]

Tipo de arena	Técnica de regeneración	Equipo de regeneración	Empleo	Limitaciones	Cantidad mínima (t/h)
Sistemas orgánicos de arena única					
Resinas de curado en frío	Mecánica o térmica	<i>Mecánico:</i> fricción, impacto, fricción neumática <i>Térmico:</i> lecho turbulento, lecho fluidizado u horno rotativo	– producción de moldes con resinas de curado en frío – sustitución de arena nueva (20–25%) en la producción de machos por fraguado en frío	– mecánicas: sólo si la cáscara de aglomerante se ha debilitado en exceso tras la colada – deben cumplirse los mínimos de calidad exigidos para la arena regenerada	1,5
Arena utilizada en los procesos de caja fría, SO ₂ , caja caliente y Croning	Mecánica o térmica	<i>Mecánico:</i> fricción neumática, centrífuga y en lecho fluidizado <i>Térmico:</i> lecho turbulento, lecho fluidizado u horno rotativo	En la producción de machos en sustitución de la arena nueva	– mecánicas: sólo si la cáscara de aglomerante se ha debilitado en exceso tras la colada – deben cumplirse los mínimos de calidad orientativos para la arena regenerada – reutilización de finos	0,75
Arena curada con resoléster (formiato de metilo)	Mecánica	<i>Mecánico:</i> fricción, impacto, fricción neumática	Con limitaciones, en la producción de moldes en arena con formiato de metilo	– regeneración comparable al método de resoléster con fraguado en frío, pero con un rendimiento menor – fragilización de los componentes del aglomerante	
Sistemas inorgánicos de arena única					
Arena verde	Mecánica	Fricción neumática, rozamiento	Renovación del circuito de arena verde	– requiere secado previo – reutilización de finos	0,75
Arena con silicato de sodio	Mecánica		Sólo para la producción de moldes y machos en arena con silicato de sodio	Fragilización de los componentes del aglomerante a 200 °C	0,5

Las arenas aglomeradas con resinas de curado en frío pueden regenerarse siguiendo técnicas de tratamiento sencillas a causa de la fragilidad de la capa formada. Los sistemas de regeneración mecánica (por ejemplo los de lecho fluidizado) se basan en la fricción entre partículas o en impactos.

Las arenas aglomeradas con resinas curadas térmicamente o por gas deben someterse a un tratamiento más intensivo para eliminar la capa de aglomerante. Entre los procesos utilizados destacan el rozamiento, la fricción neumática o la fricción centrífuga. Las arenas con silicato sólo se pueden regenerar mecánicamente mediante un tratamiento mecánico.

El tratamiento térmico supone quemar el aglomerante orgánico. La bentonita se inactiva a altas temperaturas. Si el circuito de arena incluye también arena verde los tratamientos térmicos deberían combinarse con tratamientos mecánicos.

La regeneración húmeda elimina el aglomerante mediante un proceso de fricción entre partículas. Esta técnica sólo es válida para las arenas verdes, con silicato o aglomeradas con CO₂ y no se utiliza mucho.

La regeneración secundaria de la arena verde en sistemas de arena única tiene una implantación limitada. En cuanto a la aglomerada químicamente, la técnica más utilizada es la regeneración mecánica (> 200 unidades en Alemania en 1999) [80, ERM Lahmeyer International GmbH, 1999]. La aplicabilidad de los distintos sistemas de regeneración y de la arena regenerada se resumen en la Tabla 4.60 (arena mezclada). Las distintas técnicas que presenta la tabla se analizan más abajo.

Los flujos de **arena única** más significativos que se someten a regeneración secundaria son los que se generan al confeccionar machos en fundiciones no férreas. A causa de la escasa carga térmica se separan fácilmente de la arena verde. También se utiliza arena única en el proceso de producción de moldes y machos en sistemas completamente orgánicos como el croning, la resina furánica o el uretano en caja fría. El flujo de arena única es menor si la arena de los machos no se somete a curado, por ejemplo cuando procede de machos rotos o rechazados en el taller, así como en el caso de la arena residual de máquinas de producción de machos.

Las **arenas mezcladas** normalmente contienen tanto arena química como arena aglomerada con bentonita. Se generan especialmente en fundiciones de hierro y representan cerca del 75% de la producción total de arena residual.

Tabla 4.60. Aplicabilidad de los distintos métodos de regeneración en sistemas de arena mezclada [128, IHOBE, 1998]

Tipo de arena	Técnica de regeneración	Equipo de regeneración	Empleo	Limitaciones	Cantidad mínima (t/h)
Sistemas de arena mezclada	Mecánica o térmica	<i>Mecánico:</i> fricción neumática, centrífuga y en lecho fluidizado <i>Térmico:</i> lecho turbulento, lecho fluidizado u horno rotativo	– En la producción de machos en sustitución de la arena nueva	– mecánicas: sólo si la cáscara de aglomerante se ha debilitado en exceso tras la colada – deben cumplirse los mínimos de calidad orientativos para la arena regenerada – reutilización de finos	0,75
Arenas mezcladas con bentonita	Mecánica o mecánica-térmica-mecánica	<i>Mecánico:</i> rozamiento, fricción neumática y en lecho fluidizado <i>Térmico:</i> lecho turbulento, lecho fluidizado u horno rotativo	– En la producción de machos en sustitución de la arena nueva – Renovación del circuito de arena verde	– requiere secado previo – la regeneración térmica combinada requiere una regeneración mecánica eficiente para eliminar la bentonita activa – reutilización de finos	0,75

La Tabla 4.61 resume la aplicabilidad de los distintos sistemas de tratamiento que se analizarán a fondo en las páginas que siguen.

Tabla 4.61. Aplicabilidad de varias técnicas de regeneración de arena en función del tipo de arena

	Sistemas mecánicos simples	Sistemas mecánicos en frío			Regeneración húmeda	Regeneración térmica	Regeneración mecánica -térmica - mecánica
		Rozamiento	Tambor de impacto	Fricción neumática			
Arena única							
Fraguado en frío	x	x	x	x	x	x	0
Caja fría, SO ₂ , caja caliente, Croning	0	x	x	x	0	x	0
Silicato (CO ₂ o éster)	0	0	0	x	x	0	0
Arena verde (primaria)	x	0	0	0	0	0	0
Arena verde (secundaria)	0	x	0	x	x	0	0
Arena mezclada							
Orgánica	0	x	x	x	0	x	0
Verde + orgánica	0	x	0	x	x	0	x

x: Aplicable; 0: No aplicable

La Figura 4.25 muestra un ejemplo de utilización conjunta de sistemas de regeneración primaria y secundaria en una fundición de arena mezclada con unos niveles totales de regeneración del 92%. Este esquema simplificado no tiene en cuenta las pérdidas dadas en las distintas etapas de los procesos. La necesidad de añadir arena nueva puede minimizarse integrando (la fracción de gruesos) de la arena presente en el filtro de partículas (procedente del aire de salida de las líneas de moldeo manual, líneas de vaciado de machos, depósitos de almacenamiento, etc.).

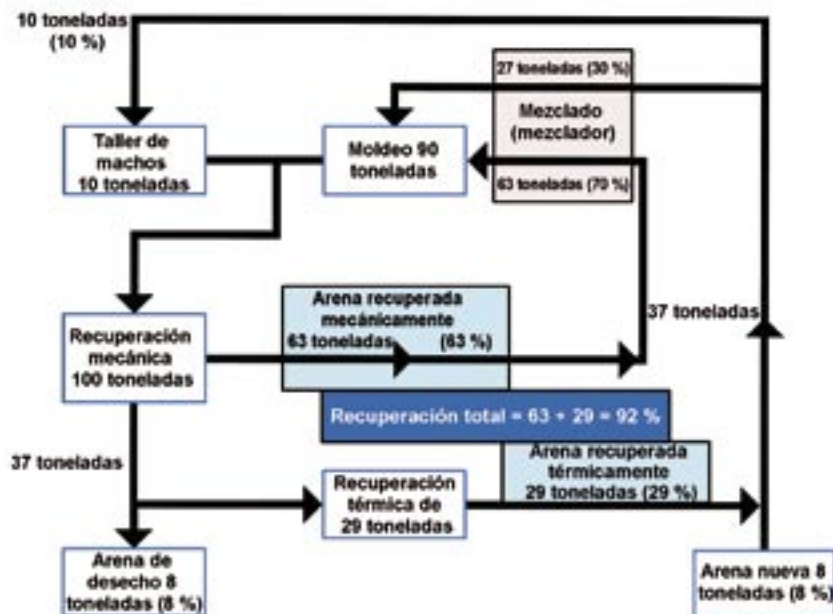


Figura 4.25.
Diagrama de distribución de la arena en un sistema de regeneración térmica/mecánica [70, ETSU, 1998]

Un porcentaje de regeneración total del 92%, como se indica arriba, es normal en un sistema mixto de arena verde y arena química. Se sabe que en algunos casos ha llegado incluso al 98%. La proporción depende en realidad del volumen y la composición química de los machos utilizados. Los valores correspondientes a los sistemas furánicos de arena única con fraguado en frío se sitúan en torno al 78%.

Por lo general, mezclar arenas de distinto tipo tiene un efecto negativo sobre la resistencia de los machos y, en consecuencia, en los moldes elaborados con la arena regenerada, aunque hay algunas excepciones. Para producir arena regenerada de buena calidad resulta crucial por tanto separar los tipos de arena incompatibles, mientras que para optimizar el potencial de regeneración puede que sea necesario adoptar sistemas de aglomeración compatibles, si se utiliza arena mezclada, o aplicar técnicas (de desmoldeo) que permitan separar los distintos tipos de arena. La Tabla 4.62 muestra las posibles compatibilidades e incompatibilidades.

[37, Winterhalter, et al., 1992], [70, ETSU, 1998], [128, IHOBE, 1998], [138, Metaalgieterij Giesen B.V., 1996], [153, Umweltbundesamt, 2002], [202, TWG, 2002], [225, TWG, 2003].

Tabla 4.62. Compatibilidad entre arenas regeneradas y aglomerantes de distinto tipo [37, Winterhalter, et al., 1992], [225, TWG, 2003]

Sistema de llegada Sistema de partida		Bentonita	Silicato	Fraguado en frío	Caja caliente	Croning	Caja fría		
							Formiato de metilo	Amina	SO ₂
Bentonita		+	0	0	–	0	0	0	0
Silicato		0	+	–	–	–	–	–	–
Fraguado en frío		+	–	+	–	0	–	0	+
Caja caliente		0	–	+	+	+	–	0	+
Croning		+	+	+	+	+	+	+	+
Caja fría	Formiato de metilo	0	+	0/–	–	–	0	0	–
	Amina	+	+	+	+	+	0	+	+
	SO ₂	+	–	+	–	0	0	+	+

+: Compatible, 0: Compatibilidad limitada, –: Incompatible

4.8.2. Regeneración de la arena verde en condiciones óptimas (regeneración primaria)

Descripción

Una de las principales ventajas de utilizar el moldeo en arena verde es que la arena extraída puede reacondicionarse una vez empleada y destinarse a múltiples usos. Sólo se añade un pequeño porcentaje de arena nueva para mantener la calidad de la arena de moldeo; esta cantidad está determinada por el volumen de arena del molde y las pérdidas dadas durante el proceso. En cuanto al moldeo sin núcleo, la renovación media de la arena alcanza el 2 – 5%. En los procesos de moldeo en machos la renovación de la arena se realiza introduciendo en el ciclo la arena de los machos. En cualquier caso, la arena sobrante se retira del circuito después de la rejilla de desmoldeo o de los depósitos de almacenamiento. En la Figura 2.28 se muestra el proceso de tratamiento general. Esta recirculación interna de la arena verde sin apenas someterla a tratamiento se conoce como regeneración primaria y tiene tres objetivos principales: (1) disgregar la arena y que los granos recuperen su tamaño original, (2) extraer los finos y (3) enfriar la arena antes de añadirle arena nueva.

Para desmenuzar y separar la arena se utilizan las siguientes técnicas:

- **Vibración:** la rejilla o parrilla vibrante es la técnica más extendida para la recuperación primaria de la arena. Ésta se tamiza y se somete a un tratamiento posterior, por ejemplo enfriamiento, clasificación por tamaño o regeneración térmica; el material residual se recoge y se desecha.

- *Tambor*: la arena de desmoldeo se introduce en un tambor giratorio dotado de barras de movimiento transversal y ascendente-descendente. A medida que la arena avanza por el tambor la rotación del mismo y los movimientos ascendentes provocan que las partículas de arena rocen unas con otras y se desmenucen hasta formar granos individuales. Estos granos caen a través de la rejilla situada al final del tambor, mientras que los materiales de tamaño excesivo o los fragmentos desprendidos se extraen y se llevan a un vertedero.
- *Granallado*: la pieza y el molde se introducen directamente en la máquina granalladora. La acción de la granalla desintegra por completo el molde y también limpia la superficie de la pieza. A continuación se separa la arena de la granalla. Esta técnica no está muy extendida.

Durante el enfriamiento de las piezas aumenta la temperatura de la arena. Para que las condiciones de mezclado sean las adecuadas la arena debe enfriarse hasta los 40 – 45 °C. Para ello se emplean enfriadores por evaporación conjuntamente con lechos turbulentos o fluidizados, además de intercambiadores de calor. Si el desmoldeo se realiza en los transportadores vibrantes de tambores desmoldeadores el enfriamiento se produce de forma simultánea.

Si se utiliza un enfriador de lecho fluidizado el aire de secado puede calentarse por medio de gas o electricidad. El tiempo medio de tratamiento en el lecho es de 10 minutos. Normalmente la arena entra en el lecho fluidizado con una humedad del 2 al 3% y una temperatura de 250 – 300 °C. El control de la humedad y la temperatura puede llevarse a cabo antes del enfriador añadiendo cantidades adicionales de agua de forma controlada. De este modo se minimiza la cantidad de finos extraídos durante el secado en el lecho fluidizado. Los finos contienen bentonita que puede reactivarse. El nivel de humedad de la arena regenerada debe mantenerse entre un 2 y un 2,2% y a una temperatura de 35 °C. Así pues, la bentonita que contiene la arena enfriada y humedecida se empieza a activar durante el almacenamiento y el agua y la bentonita que deben añadirse se reducen durante el mezclado, al igual que la duración del ciclo.

La adecuada homogeneización mantiene un nivel de calidad constante de la arena y facilita y mejora el proceso de preparación. Los sistemas de homogeneización utilizan varios depósitos pequeños en vez de uno solo de gran tamaño o bien se encargan de recircular la arena en el depósito.

En los sistemas de producción de machos aglomerados químicamente el mezclado de la arena utilizada puede afectar negativamente a la calidad de la arena, según el tipo de aglomerante y la cantidad de arena recuperada que se hayan utilizado. Estos efectos negativos lo son más en los machos ácidos y alcalinos que en los sistemas neutros (epoxi SO₂, cajas frías de poliuretano). Durante el desmoldeo la arena de moldeo y la de los machos inevitablemente se juntan. Sin embargo, los machos no curados (ni descartados) pueden dejarse fuera o bien extraerse de la arena antes de someterse a la regeneración primaria.

Ventajas medioambientales

Reducción del uso de materias primas (arena y bentonita), reducción de la cantidad de material de desecho.

Efectos colaterales

Al regenerar la arena se utiliza electricidad, lo que aumenta el consumo general de energía eléctrica de las instalaciones. Con todo, dado que se utilizan principalmente técnicas mecánicas, el incremento es escaso.

Los gases de salida generados durante enfriamiento de la arena y la separación de los finos están cargados de partículas. El polvo recogido se envía al vertedero o bien se reutiliza (véase apartado 4.8.12).

Datos operativos

La proporción de arena nueva añadida depende de varios factores, pero lo normal es que corresponda a un 10 - 20% del peso del metal de llenado. Resulta más cómodo, sin embargo, medir el porcentaje de arena nueva que se incorpora al ciclo. En la mayoría de procesos una adición del 5% se considera suficiente, aunque muchas fundiciones utilizan porcentajes menores.

En un sistema de arena única (arena verde) el grado de regeneración puede alcanzar 98%, mientras que en los sistemas que cuentan con un elevado nivel de incompatibilidad de machos los porcentajes pueden llegar al 90 – 94%.

Aplicabilidad

Esta técnica puede utilizarse en cualquier fundición de arena verde nueva o existente.

Datos económicos

La Tabla 4.63 muestra el ahorro potencial que supondría la regeneración en una planta que en la actualidad no recupera la arena.

Tabla 4.63. Ahorro propiciado por la regeneración primaria (estimación de 1995, Reino Unido)

Descripción	Coste (EUR/t de arena)
Precio medio de la arena sílicea	32,64
Precio medio del vertido de arena residual	14,56
Coste total de compra y eliminación de la arena	47,2
Coste de amortización necesario para recuperar los gastos en equipo en un año	18,24
Coste operativo medio	7,76
Ahorro de costes previsto para el primer año	21,2
Ahorro de costes previsto para años siguientes	39,44

La inversión en equipos de mezclado, dosificación y control de procesos asciende a entre 0,05 y 1 millón de euros. Los costes necesarios para reducir el tamaño de rotura de los machos son de 0.1 millones de euros, pero sólo son aplicables si la reducción del tamaño no puede realizarse en una unidad de regeneración mecánica o neumática existente. Los costes operativos (anuales) se estiman en un 5 – 10% de los de inversión.

Ventajas de la implantación

Muchos titulares de fundiciones indican la reducción de costes como único motivo para iniciar programas de recuperación de la arena, ya que la normativa busca reducir la cantidad de material vertido a través de un aumento de los costes que aplican los vertederos.

Ejemplos

La recuperación primaria es una técnica utilizada en la práctica totalidad de fundiciones de arena verde, aunque el nivel de complejidad de la planta de regeneración varía considerablemente y va desde un simple procedimiento manual a equipos totalmente automatizados y controlados por ordenador.

Publicaciones de referencia

[72, ETSU, 1995], [73, ETSU, 1995], [108, Feaf, 1999], [110, Vito, 2001], [128, IHOBE, 1998], [140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001], [143, Inasmet y CTIF, 2002]

4.8.3. Regeneración mecánica simple de la arena de fraguado en frío

Descripción

Las técnicas mecánicas simples se utilizan para regenerar la arena de fraguado en frío de sistemas de arena única (por ejemplo furánicos) y la arena de machos no curados. Consisten en la rotura de la arena sin disgregar, la separación de los granos y su depuración por fricción mecánica, y depuración de partículas seguido de enfriamiento hasta la temperatura operativa. Para ello se utilizan distintos tipos de trituradoras y molinos, por ejemplo de impacto, de mandíbulas o de bolas.

Ventajas medioambientales

Reducción de la cantidad de arena de desecho y del consumo de arena nueva.

Efectos colaterales

La regeneración de la arena consume energía y genera emisiones adicionales, además de partículas que deben eliminarse.

Datos operativos

El nivel de regeneración de los sistemas furánicos de arena única y fraguado en frío alcanza el 78%.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para cualquier proceso de fraguado en frío de la arena excepto el de arena con silicato. La arena regenerada puede reutilizarse en el mismo ciclo de moldeo, con pequeñas adiciones de arena nueva para compensar la pérdida de calidad.

También puede utilizarse en arenas con aglomerante orgánico de machos no curados. La arena regenerada puede reutilizarse para confeccionar machos con el mismo tipo de aglomerante, tras mezclarla con arena nueva. También puede emplearse, con ciertas limitaciones, para renovar la arena del moldeo.

Ventajas de la implantación

La legislación prevé costes elevados de disposición de residuos para reducir la cantidad de los mismos.

Ejemplos

La regeneración mecánica simple de la arena furánica se lleva cabo en numerosas fundiciones de toda Europa, en especial de Alemania y Finlandia.

Publicaciones de referencia

[153, Umweltbundesamt, 2002], [202, TWG, 2002]

4.8.4. Regeneración mecánica en frío mediante muelas abrasivas

Descripción

Se trata de un sistema de amolado comercial muy extendido (véase Figura 4.26). Se desarrolló inicialmente para regenerar las arenas orgánicas mezcladas con bentonita. Consiste en una muela abrasiva giratoria horizontal que extrae la dura capa de bentonita oolítica de la arena. La muela también puede extraer los aglomerantes químicos de los granos de arena. Alrededor de ella hay una rueda de paletas que gira constantemente y desplaza la arena hacia la muela. En la parte superior, la unidad de depuración de partículas se encarga de extraer las partículas incluyendo los finos. Pero para poder utilizarla en el proceso la arena debe estar seca. Para reducir el contenido de humedad a menos del 0,2% se requiere una fase de secado previo en lecho fluidizado o mediante otros sistemas de secado.

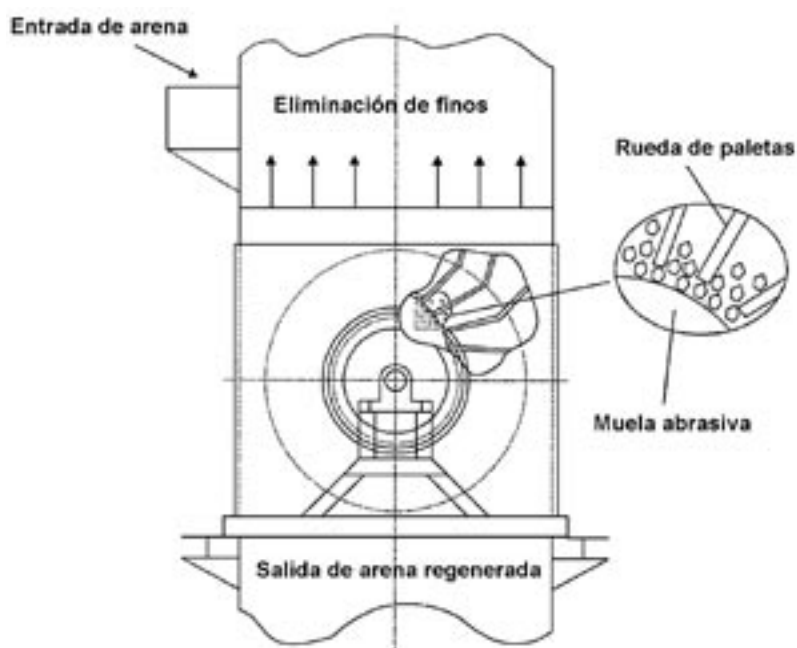


Figura 4.26.
Regeneración mecánica
en frío mediante muela
[128, IHOBE, 1998]

Se extraen las partículas del caudal de gases de combustión del regenerador mediante un ciclón y un filtro de mangas. Las partículas filtradas contienen bentonita activa residual y partículas de carbón, que pueden reintegrarse en el circuito de producción de machos y permitir así una reducción del uso de carbón brillante. Además, los moldes adquieren mejor calidad técnica (resistencia a la tracción en húmedo, colabilidad) gracias a los restos de bentonita presentes, que por otro lado propicia una reducción de la cantidad de desechos de moldes y de rebabas en las piezas.

Ventajas medioambientales

Reducción de la cantidad de arena de desecho y del consumo de arena nueva.

Reducción del consumo de carbón brillante en sistemas de arena verde.

Mejora de las propiedades de la arena de moldeo que permite una reducción de la cantidad de moldes descartados y del número de defectos.

Efectos colaterales

La regeneración de la arena consume energía adicional y provoca un aumento de las emisiones de partículas y del polvo residual que debe ser depositado en vertedero. Sin embargo, el uso de arena regenerada en el proceso de moldeo permite una reducción de la cantidad de carbón brillante necesario.

Datos operativos

El nivel de regeneración de la arena ligada con arcilla es del 65 - 75%, ya que depende del contenido en granos de cuarzo del material. En arenas químicas el porcentaje de arena de cuarzo reciclable alcanza el 90 – 95%.

El volumen total de arena del circuito y las necesidades de incorporar arena nueva dependen de la cantidad de machos (y de arena de machos) utilizada. Así pues, los datos varían en realidad en función del proceso elegido. La Figura 4.27 muestra los datos correspondientes a una planta de los Países Bajos.

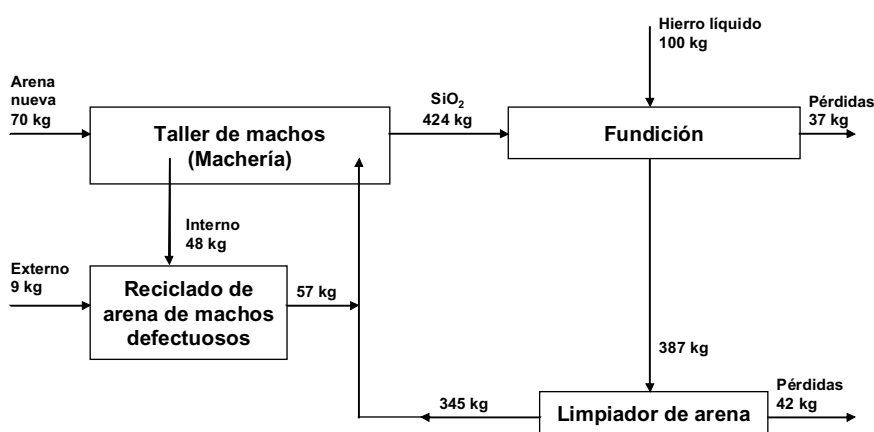


Figura 4.27.
Datos operativos del circuito de arena de una fundición de arena verde de los Países Bajos [140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001]

Por lo general, la arena verde de desecho está formada en un 80%, aproximadamente, por granos de cuarzo y en un 20% por finos (bentonita, polvo de carbón, etc.). Del total de arena de desecho cerca del 70% se recicla a la zona de producción de machos en forma de arena recuperada. Respecto a cuarzo, el grado de eficiencia es del 88%.

Las partículas procedentes del filtro se componen en un 40% de bentonita activa, con pérdidas por calcinación del 17% y con un contenido en finos del 43%. La reutilización de esas partículas en la planta de arena supone un ahorro de carbón brillante de hasta el 30%. Además, la mejora de la calidad de la arena conseguido en la planta del ejemplo ha supuesto reducir prácticamente a la mitad la cantidad de moldes fallidos obtenidos.

Las partículas recogidas en los ciclones (20% del peso de la arena verde regenerada) contienen entre un 25 y un 30% de bentonita y niveles elevados de sustancias orgánicas, pero su composición química y sus especificaciones imposibilitan su reaprovechamiento como material secundario. En los Países Bajos está permitido depositarlo en capas cubiertas de vertederos, pero en otras regiones esta fracción deberá eliminarse, una eliminación que, sin embargo, podría verse limitada por la legislación que regula el contenido de material orgánico de desecho.

El hecho de que los granos de la arena se van desgastando por la fricción conjuntamente y que se reintroducen en el ciclo partículas recogidas por el filtro, da lugar a variaciones en la distribución de tamaño de la arena. Es por ello por lo que es necesario llevar un control y un seguimiento de la composición general de la arena.

Aplicabilidad

La regeneración mecánica en frío se utiliza esencialmente para extraer las capas de bentonita de la arena verde y los aglomerantes químicos de sistemas sin estufado. La técnica de amolado es el tratamiento mecánico

en frío más extendido. Los sistemas de vibración e impacto también se utilizan para arenas químicas, pero la arena que producen sólo es de calidad media o baja. Estas técnicas resultan más apropiadas en los ciclos de arena convencionales (regeneración primaria). La regeneración secundaria de la arena verde tiene una implementación limitada.

Datos económicos

Los costes de inversión correspondientes a una unidad de 50 toneladas/día dotada de sistemas de secado, enfriamiento, unidad de regeneración, ciclón y filtro de mangas se sitúan en unos 1.135.000 euros. Según datos recogidos en Alemania, el coste de inversión de una unidad de 1,5 t/h asciende a 600.000 euros.

Los niveles de consumo (media anual) son los siguientes:

Electricidad: 39 kWh/tonelada

Gas natural: 3 Nm³/ tonelada (según contenido de humedad de la arena)

Aire comprimido: 36 Nm³/ tonelada

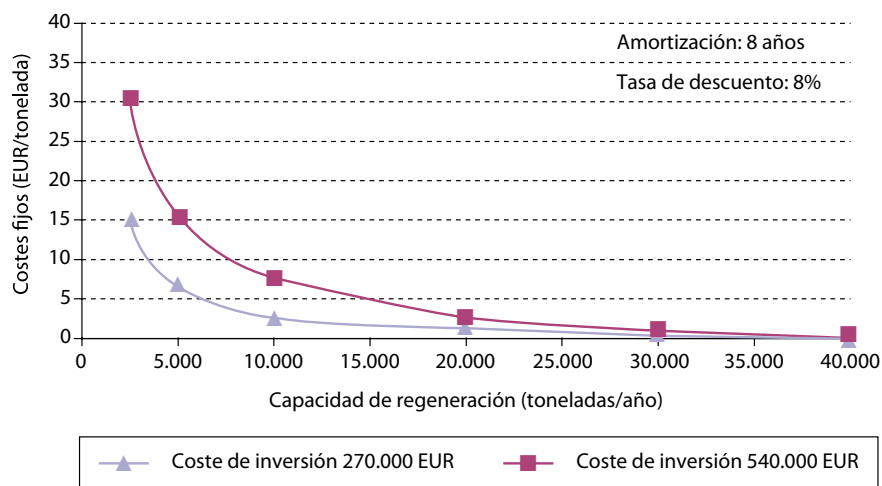
Mecanismos de abrasión: 1,18 euros/tonelada

Personal: 0%

Mantenimiento: rutinario.

La Figura 4.28 muestra la curva de costes de la regeneración mecánica de arena aglomerada orgánicamente. Los costes fijos varían en función de la capacidad total y la inversión. Los costes variables pueden ascender hasta los 11 euros por tonelada, aunque los reales dependen de las características concretas de la instalación y de las condiciones locales. Los costes totales (fijos más variables) oscilan entre 12 y 40 EUR/tonelada de arena regenerada, según el tamaño y tipo de equipo utilizado.

Figura 4.28.
Costes fijos en euros por
tonelada de arena
regenerada (recuperación
mecánica de arena con
aglomerantes de
fraguado en frío)
[82, IfG – Institut für
Gießereitechnik, 1996]



Ventajas de la implantación

La legislación prevé costes elevados de disposición de residuos para reducir la cantidad de los mismos.

Ejemplos

- De Globe, Weert, Países Bajos, 60 toneladas al día en dos líneas, en funcionamiento desde 1995
- Eisenwerk Brühl, Brühl; Alemania (1,5 t/h), 1999
- Giesserei Fritz Winter GmbH & Co KG, Stadtallendorf, Alemania (9,5 t/h)
- Mercedes-Benz AG, Mannheim, Alemania (9 t/h).

Publicaciones de referencia

[82, IfG – Institut für Gießereitechnik, 1996], [110, Vito, 2001], [128, IHOBE, 1998], [133, De Globe B.V., 1999], [140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001], [151, Gemco, 1999].

4.8.5. Regeneración mecánica en frío mediante tambor de impacto

Descripción

Este tipo de regeneración mecánica se basa en el rozamiento y es el que mejor resultados proporciona en sistemas de arena química única. La arena se introduce en un tambor dotado de un eje giratorio interno equipado de pequeñas cuchillas. Los granos de arena chocan contra las paredes del tambor y unos contra otros. Estos impactos producen una acción mecánica de tipo abrasiva que da lugar a depuración. Los finos se extraen junto con el gas de salida. El tambor de impacto funciona de forma discontinua, de modo que si se requiere regeneración continua deberá instalarse un segundo tambor.

Si se utiliza el tambor para la regeneración de la arena mezclada (bentonita y aglomerante orgánico), ésta deberá pasar por un separador magnético para extraerle la arena verde. Debido a la presencia de bentonita sin reaccionar, la arena verde tiene un magnetismo muy débil que hace posible someterla a separación magnética. El sistema de regeneración permite la incorporación de un porcentaje limitado (15%) de arena de machos no estufados (machos rotos). La acción conjunta del separador magnético y el tambor de depuración por impacto optimiza la regeneración de la arena química en ciclos de arena mixta y permite reutilizarla para la producción de machos.

Ventajas medioambientales

Reaprovechamiento interno de la arena de los machos y limitación de la cantidad de material de desecho y de las necesidades de materias primas.

Efectos colaterales

La regeneración de la arena consume energía adicional y provoca un aumento de las emisiones de partículas y de las partículas de polvo residual generado a disponer en vertedero.

Datos operativos

El funcionamiento del tambor es discontinuo con un tiempo de tratamiento de 20 minutos por cada 1,5 toneladas de arena tratadas. El consumo de energía de toda la instalación (separador magnético, tratamiento de gases de salida y transporte de la arena incluidos) es de 55 kWh/tonelada de arena tratada, del cual un 35% podría corresponder al transporte y la alimentación de la arena. La cantidad de aire comprimido necesaria es de 48 Nm³/tonelada de arena.

La arena regenerada por este sistema tiene el siguiente nivel de calidad:

- tamaño medio de grano: 0,30 – 0,33 mm;
- proporción de finos: 0,4 – 1%;
- pH: 8,7;
- Pérdidas por calcinación: 0,25 – 0,5%.

Los machos producidos exclusivamente a partir de arena regenerada tienen unas propiedades aceptables. En la práctica, entre el 10 y el 70% de la arena regenerada se destina a producir nuevos machos, en una proporción que depende del tipo de macho confeccionado.

La regeneración de partículas en la instalación alcanza un nivel del 10% del material de entrada y se capturan mediante ciclones (90%) o filtros de mangas (10%).

Aplicabilidad

La técnica de separación-generación combinada puede utilizarse para el tratamiento de arena verde mezclada y arena química. La regeneración se realiza sobre el flujo de arena química, que podría contener arena de machos sin curar. Es un sistema válido tanto para las fundiciones nuevas como ya existentes.

Datos económicos

Los costes de inversión de una unidad de 3 t/h dotada de un tambor de impacto, separador magnético, sistema de depuración de partículas de gases de salida y sistema de transporte y alimentación ascienden a 1,3 millones de euros. Los costes operativos son de 10 euros/tonelada, incluyendo el consumo energético, el desgaste y la rotura de piezas, el mantenimiento y la eliminación de residuos. Estas cifras representan un beneficio neto de 37 euros/t en comparación con la suma de los costes de adquisición de arena nueva y los de vertido de la arena usada (transporte incluido en ambos casos).

En Francia, según los datos aportados, los costes operativos de una unidad de 380 t/día son de 15 euros por tonelada. Para la planta en cuestión estos costes representan un beneficio neto de 18 euros por tonelada en comparación con los derivados de la adquisición de arena nueva sumados a los de vertido de la arena usada (transporte incluido en ambos casos).

Ventajas de la implantación

La legislación prevé costes elevados de disposición de residuos para reducir la cantidad de los mismos.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en las siguientes plantas:

- PSA, Sept-Fons (Francia): 6 separadores magnéticos y dos muelas en funcionamiento alterno.
- GF, Leipzig (Alemania): 2 separadores magnéticos y una muela.
- Döktas – Turquía: 5 separadores magnéticos y 2 muelas.

Publicaciones de referencia

[185, Spitz, 2002], [122, Kirst, 1999], [153, Umweltbundesamt, 2002]

4.8.6. Regeneración en frío mediante sistemas neumáticos

Descripción

En un sistema neumático los aglomerantes se extraen de los granos de arena mediante abrasión e impacto. La energía cinética se genera mediante un flujo de aire comprimido, que, a su vez, se encarga simultáneamente de realizar la depuración de partículas. La ventaja de este tipo de sistemas es que la dirección y la velocidad de la arena se pueden controlar. A causa de la baja eficiencia energética de la compresión de aire el consumo de energía es superior en comparación con el del tratamiento exclusivamente mecánico. En la Figura 4.29 se ilustra el principio de funcionamiento del reactor.

El reactor contiene un lecho fluidizado con un tubo elevador central. La arena se sopla en el tubo mediante el aire comprimido e impacta en una placa deflectora de goma o bien en una placa cónica, de donde cae para iniciar nuevamente el ciclo. La depuración se realiza por abrasión intergranular, abrasión contra la placa de impacto e impactos «puros». La forma de la placa determina el mecanismo principal de depuración: de impacto

(forma acampanada) o abrasión (forma cónica). Las partículas regeneradas se extraen junto con el caudal de aire por medio de un filtro de mangas. El tratamiento puede consistir en un sistema discontinuo o en una serie de unidades neumáticas acopladas. En este último caso, la arena limpia se aspira fuera del reactor a través de un deflector situado debajo de la placa de impacto.

Ventajas medioambientales

Reducción de la cantidad de arena de desecho y del consumo de arena nueva.

Efectos colaterales

La regeneración de la arena consume energía adicional y provoca un aumento de las emisiones de partículas y de las partículas de polvo residual generado a disponer en vertedero.

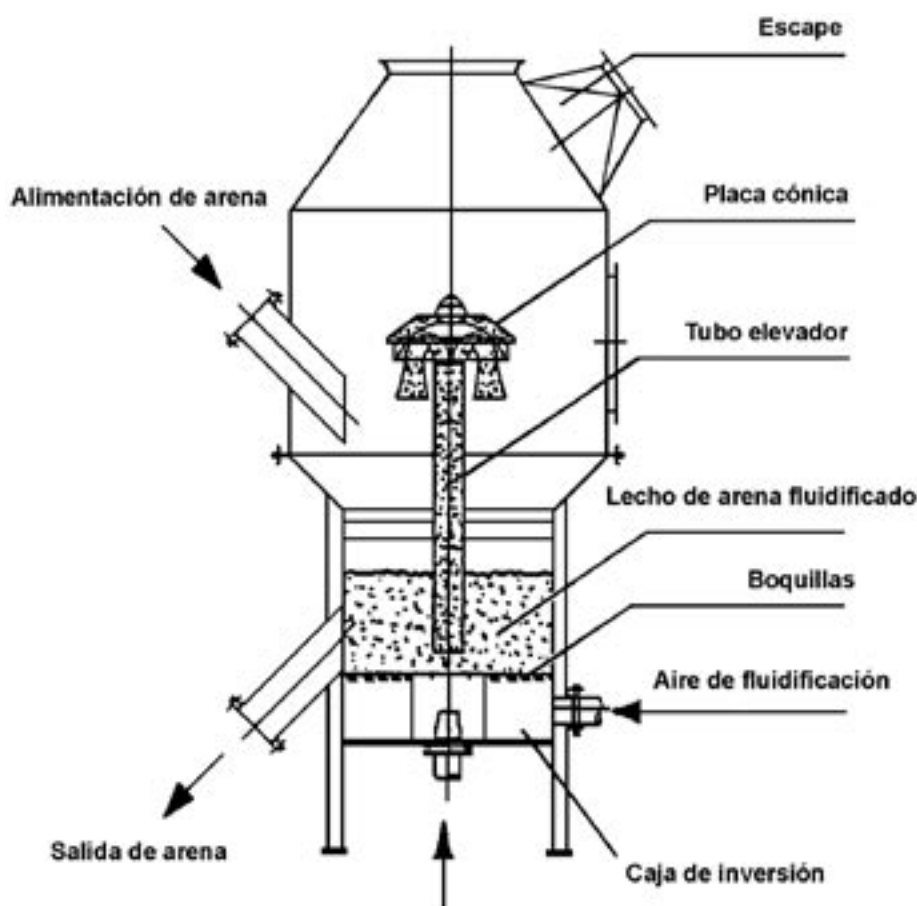


Figura 4.29.
Regeneración mecánica en frío mediante sistemas neumáticos
[122, Kirst, 1999]

En los siguientes apartados se analizan, por separado, las ventajas y desventajas de la regeneración interna frente a la reutilización externa, además de sus correspondientes efectos colaterales.

Datos operativos

Una arena de desecho obtenida como mezcla de arena verde y arena química proveniente de machos tiene las siguientes características: 8 – 12% de finos, 3 – 5% de pérdidas por calcinación (PPC) y < 2% de humedad, y da lugar a arena regenerada de las siguientes características:

- rendimiento de regeneración, según contenido en SiO_2 de la arena de desecho: 70 – 80%;
- contenido en ultrafinos ($< 0,063$ mm): máx. 2%;
- contenido en finos: $< 2\%$;
- pérdidas por calcinación: $< 0,5\%$;
- tamaño medio del grano: no sufre alteraciones.

En la regeneración se emplean unas instalaciones modulares ampliadas dotadas de unidades básicas con una capacidad de 0,8 a 1,2 t/h. Según la empresa suministradora el consumo de electricidad es de 15 – 20 kWh/t (equipo de depuración de partículas incluido). Los datos operativos correspondientes a Alemania muestran un consumo eléctrico de 41 kWh/t en una unidad de 8 t/h y de 62 kWh/t en otra de 0,75 t/h. La eficiencia de regeneración registrada se encuentra entre el 65% y el 85%. En los datos recogidos en España figura un consumo de energía total correspondiente a la arena regenerada de 120 kWh/t en una unidad de 1,2 t/h.

Aplicabilidad

El sistema neumático puede utilizarse para regenerar arenas orgánicas tanto mixtas como únicas, y arenas mixtas que contengan bentonita. También es aplicable al pre/postratamiento en sistemas combinados mecánicos-térmicos-mecánicos, principalmente para extraer las partículas residuales de los granos de arena y para el enfriamiento. La arena regenerada siguiendo procedimientos mecánicos simples puede reutilizarse en la producción de moldes (con un 100% de arena regenerada) o en producción de machos empleando un porcentaje de arena nueva (arena regenerada entre un 40 – 60%).

Además, esta técnica sirve también para regenerar la arena de machos de tipo CO_2 -vidrio soluble de fundiciones de aluminio, aunque se tratará sobre ello por separado más adelante.

Datos económicos

Los costes de inversión de una única unidad de 0,8 – 1,2 t/h son de 330.000 euros. Los costes operativos estimados ascienden a 22 EUR/t, lo que proporciona un coste total de regeneración de la arena de 36,5 euros por tonelada.

Ventajas de la implantación

La legislación prevé costes elevados de disposición de residuos para reducir la cantidad de los mismos.

Ejemplos

Varias empresas fabrican este tipo de equipos, por ejemplo: KGT Jet Reclaimer, Künkel-Wagner GmbH Turbo Dry o Kernfest Webac AB. La técnica se utiliza en varias plantas de Europa Occidental y de China.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [82, IfG – Institut für Gießereitechnik, 1996], [108, Feaf, 1999], [110, Vito, 2001], [122, Kirst, 1999], [128, IHOBE, 1998]

4.8.7. Regeneración térmica

Descripción

La regeneración térmica emplea calor para calcinar el aglomerante y los contaminantes. Todos los procesos térmicos requieren una fase previa mecánica que devuelva a la arena el tamaño de grano original y permita tamizar los contaminantes metálicos. Este pretratamiento puede consistir también en la abrasión (parcial) de la bentonita y en la depuración de partículas. La arena se calienta normalmente en un horno de lecho fluidi-

zado con unas temperaturas de funcionamiento de 700 a 800 °C. También se utilizan hornos rotativos o de solera múltiple. El calor se obtiene por la combustión de gas, mediante calentadores eléctricos o a través de emisores de infrarrojos de onda corta. La capacidad de estos sistemas se encuentra entre los 250 kg/h y más de 5 t/h.

Los gases generados se queman para eliminar el monóxido de carbono y cualquier COV presente. Para ello puede utilizarse el espacio libre del horno, si es lo suficientemente grande, añadirse aire suplementario o emplear postcombustores de gas. Si la temperatura de los gases de combustión no es lo suficientemente alta o si el tiempo en el que se mantienen a altas temperaturas no basta deberá acoplarse un dispositivo de postcombustión adicional. En todos los casos las emisiones se consideran insignificantes.

Los gases de combustión se filtran principalmente a través de filtros de manga. Estos filtros requieren enfriamiento, que puede realizarse inyectando agua, mediante un intercambiador/recuperador térmico o dejando entrar de forma natural el aire exterior por las aberturas, ranuras, etc. El proceso de enfriamiento puede constar asimismo de una fase de precalentamiento del aire de fluidización.

Ventajas medioambientales

Reducción de la cantidad de arena de desecho y del consumo de arena nueva.

Efectos colaterales

La regeneración térmica consume combustible y genera emisiones de partículas y de compuestos propios de la combustión (NO_x , CO y, en el caso del fuel, SO_2).

El elevado consumo energético y la complejidad de la instalación se ven compensados por el escaso desgaste de los granos de arena y la recuperación del polvo en forma térmicamente inerte.

La regeneración térmica de arena furánica fraguada con ácido paratoluensulfónico requiere depuración de los gases residuales; es decir, postcombustión de CO y adsorción de SO_2 .

Datos operativos

La arena se suele calentar a temperaturas de 700 – 850 °C. En teoría para ello se requieren 200 kWh/t, pero en la práctica los datos revelan consumos de 150 – 350 kWh/t, dependiendo del grado de recuperación de energía y del valor calorífico de la arena.

La Tabla 4.64 muestra los datos operativos de tres plantas de regeneración térmica de diferentes capacidades en las que se tratan arenas de distintos tipos.

Tabla 4.64. Datos operativos de tres fundiciones alemanas de referencia equipadas con sistemas térmicos de regeneración de arena [153, Umweltbundesamt, 2002]

Característica	Unidades	Planta		
Plantas de referencia		Fundición K	Fundición L	Fundición M
Tipo de arena		Para machos en caja fría	Moldeo de arena verde, machos en caja fría	Moldeo manual en arenas furánicas
Fabricante del equipo de regeneración		CEC/VAW	Richards	Siempelkamp

.../...

.../...

Característica	Unidades	Planta		
		Fundición K	Fundición L	Fundición M
Técnica		Hornos de solera múltiple (500 °C) con sistemas de tamizado y clasificación	Horno de lecho fluidizado (780 °C), disgregación y depuración de partículas de tipo mecánico	Cámara de combustión fluidificante con preseparación magnética, procesamiento simultáneo de la arena y las partículas procedentes de la regeneración mecánica de arena furánica
Producción de arena	t/h	12 – 16	1,0	2,0 arena usada, 0,5 polvo
Capacidad	t/año	28.600	3.840	5.000
Proporción de regeneración, basada en la producción de arena	%	95	95 (99 ⁽¹⁾)	95
Utilización de la arena regenerada		Producción de machos	Producción de machos	Producción de moldes y machos
Criterios de calidad de la arena regenerada		Polvo < 1% AFS 60 – 70 PPC < 0,1%	Los mismos que la arena nueva F33	PPC < 0,5% pH 6,0 – 6,5 Resistencia del molde tras añadir un 1% de aglomerante y un 0,3% de endurecedor: 350 N/cm ² después de 24 h
Consumo de energía eléctrica	kWh/t	119	65	
Consumo de gas natural	m ³ /t	24,5	38	
Generación de residuos	t/año	660	Polvo: 10 Arena bentonítica: 1.700	200
Destino final de los residuos		Relleno de minas	Producción de cemento	Industria de la construcción/vertedero
Caudal de gases residuales	Nm ³ /h	7.000	16.509	6.560
Temperatura de los gases residuales	°C	75	60	35
Tipo de filtro		Postcombustión y filtro de mangas	Filtro de mangas	Inyección de cal viva + filtro de mangas
Niveles de emisión ⁽²⁾	mg/Nm ³			
• partículas		0,1	4,9	0,4
• C _{total}		2,2	5,7	10
• CO	%	2,3	1,6	0
• O ₂	ng	14	s.d.	20,95
• PCDD/F	TEQ/Nm ³	0,006	s.d.	s.d.

¹ La proporción de regeneración más alta (99%) sólo se alcanza si se regenera exclusivamente arena de machos interna. Con arenas de macho mixtas (externas e internas) el porcentaje es del 95%

² Los niveles de emisión son valores medios calculados a partir de datos de seguimientos continuos a lo largo de varias horas, durante el muestreo de partículas o PCDD/F

El rendimiento de la técnica de regeneración y los requisitos de calidad de la arena recuperada se analizan junto con las características de las distintas fundiciones. Los datos concretos pueden consultarse acudiendo a las publicaciones de referencia: [186, Stephan, 1996], [187, Stephan, 1997], [188, Stephan, 2000].

Aplicabilidad

Los sistemas térmicos normalmente se utilizan con arena química y en sistemas mixtos, siempre y cuando la proporción de arenas químicas (machos) sea lo suficientemente alta. No obstante, cabe hacer las siguientes distinciones:

- algunos aglomerantes pueden dejar residuos inorgánicos de sal en la superficie de los granos. Cuando la temperatura se eleva por encima del punto de fusión se dispersan por la superficie de la arena y pueden hacer que los granos se sintericen al enfriarse. Algunos ejemplos conocidos son la resina de resol o las arenas aglomeradas con silicato;
- el reciclaje térmico de las resinas furánicas provoca la emisión de SO_2 si el agente de curado utilizado es ácido sulfónico. La temperatura del sistema de salida debe ser lo suficientemente alta para evitar la condensación del ácido sulfónico. Si el nivel de emisiones es alto puede que sea necesario utilizar un sistema de depuración de gases por vía húmeda. El fósforo (procedente del ácido fosfórico empleado como endurecedor) no se evapora y permanece sobre la superficie de la arena en forma de sales, lo que puede provocar una acumulación de P durante el reciclaje. Si la concentración de P sobrepasa el 0,5 – 0,7% podría producirse una reacción metalúrgica que obligaría a rechazar la pieza.

El grado de implantación de la regeneración térmica es bajo si lo comparamos con la mecánica. En Alemania sólo hay diez instalaciones que utilicen esta técnica, según datos de 1999 (lo que contrasta con 200 unidades mecánicas).

La unidad de regeneración térmica de Siempelkamp, Krefeld, tiene la capacidad de tratar las partículas de fundición junto con la arena de desecho. También se han realizado pruebas con otros residuos de origen mineral.

Datos económicos

Los costes de inversión que se muestran en la Figura 4.30 varían según el tamaño y el tipo de equipo utilizado. Los datos corresponden a sistemas térmicos con fase de pre/postratamiento mecánico y sistema de regeneración mecánica intensivo (por ejemplo muelas). Las instalaciones a pequeña escala tienen una capacidad de 0,75 t/h o bien 1.500 t/año. La producción de una fundición de tamaño medio se sitúa entre 2.500 y 5.000 t/año. En las instalaciones pequeñas los costes de inversión (con una amortización de 8 años al 8% de interés) ascenderían a 55 EUR/t. En ellos no se incluyen los gastos de energía, personal o vertido de los residuos.

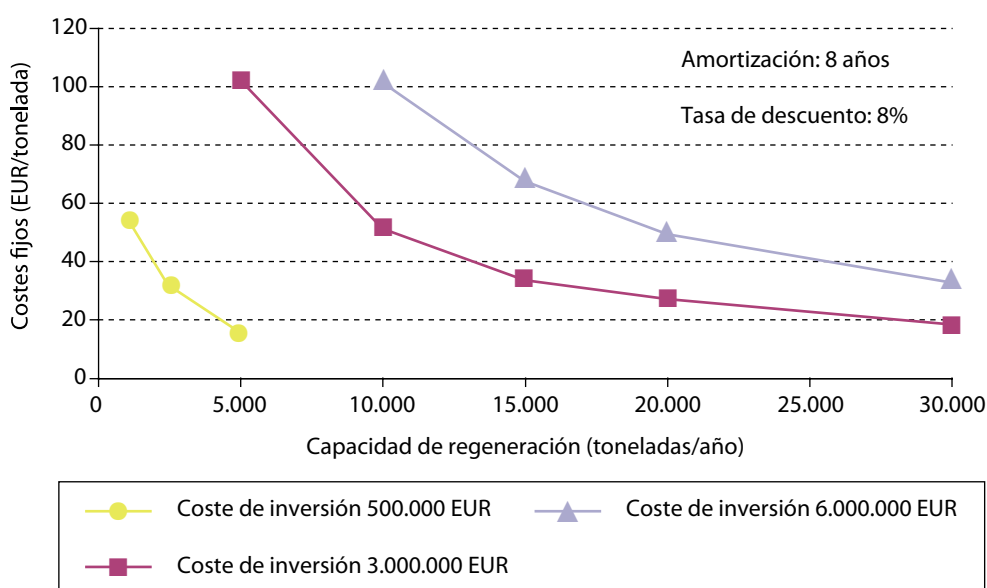


Figura 4.30. Costes fijos en euros por tonelada de arena regenerada por procesos térmicos y regeneración mecánica intensiva de arenas mixtas [82, IfG – Institut für Gießereitechnik, 1996]

Ventajas de la implantación

La legislación prevé costes elevados de disposición de residuos para reducir la cantidad de los mismos.

Ejemplos

- Lecho fluidizado, Metaalgieterij Giesen, Países Bajos.
- Planta de regeneración centralizada con lecho fluidizado, Bielefeld, Alemania.
- VAW Alucast GmbH, Dillingen, Alemania, sistema CEC/VAW.
- Werner Rietschle GmbH, Schopfheim, Alemania, sistema Richards.
- Siempelkamp Giesserei GmbH & Co, Krefeld, Alemania, sistema Siempelkamp.
- Sofogir, Ronchamp (Francia) sistema Regetherm 500.
- Durantion Sicfond, Vénissieux (Francia), sistema Richards.
- FOAM, Leumann (Italia), sistema Eco-rec.
- Fonderie Bréa, Montluçon (Francia).

Publicaciones de referencia

[9, Schneider, 1993], [32, CAEF, 1997], [80, ERM Lahmeyer International GmbH, 1999], [128, IHOBE, 1998], [138, Metaalgieterij Giesen B.V., 1996], [186, Stephan, 1996], [187, Stephan, 1997], [188, Stephan, 2000]

4.8.8. Regeneración combinada (mecánica-térmica-mecánica) de arenas mixtas orgánicas bentoníticas

Descripción

En las arenas mixtas de tipo orgánico y bentonítico, la bentonita curada y los aglomerantes orgánicos utilizados están presentes en los granos. Las partículas se componen de bentonita activa y curada, polvo de carbón (sólo en fundiciones de hierro), finos de cuarzo y residuos de aglomerante orgánico. Las arenas mixtas se utilizan principalmente en fundiciones de hierro y representan aproximadamente el 75% de la producción total de arena usada. La regeneración puede realizarse siguiendo procedimientos mecánicos, neumáticos, térmicos o combinados.

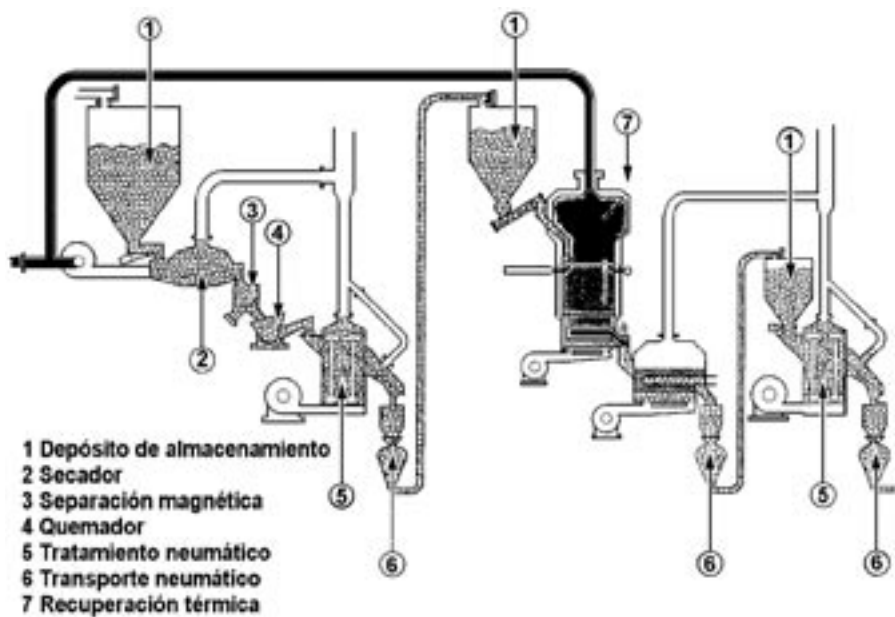


Figura 4.31.
Unidad de regeneración
de arena mecánica-
térmica-mecánica
[108, Feaf, 1999]

La arena se somete a tratamiento previo (tamizado, separación magnética) y se seca para reducir su contenido en agua a menos del 1%. A continuación la arena se limpia mecánica o magnéticamente para extraerle parte del aglomerante. En la fase térmica los compuestos orgánicos se calcinan, mientras que los inorgánicos se transfieren a las partículas o se queman y se adhieren a los granos. El tratamiento mecánico final se encarga de retirar mecánicamente la capa formada neumática o mecánicamente, que se desecha en forma de partículas. La Figura 4.31 muestra el diseño característico de un sistema basado en tratamiento neumático y dotado de lecho fluidizado de tratamiento térmico.

Ventajas medioambientales

Reducción de la cantidad de arena de desecho y del consumo de arena nueva.

Efectos colaterales

La regeneración de la arena consume energía adicional y provoca un aumento de las emisiones de partículas y de las partículas de polvo residual generado a disponer en vertedero.

En los siguientes apartados se analizan, por separado, las ventajas y desventajas de la regeneración interna frente a la reutilización externa, además de sus correspondientes efectos colaterales.

Datos operativos

Los datos operativos correspondientes al tratamiento mecánico-térmico-mecánico se muestran en la Tabla 4.65.

Tabla 4.65. Datos operativos de un sistema de tratamiento mecánico-térmico-mecánico (neumático – lecho fluidizado – neumático) [108, Feaf, 1999]

Parámetro	Unidades	Fundición N	Fundición O	Fundición P
Flujo de arena	(t/h)	1	2	3
Humedad máxima de la arena de entrada	(%)	1	1	1
Máxima potencia eléctrica instalada	(kW)	150	215	400
Gas natural	(Nm ³ /h)	31	62	155
Tratamiento térmico • caudal de aire medio (fluidización + combustión)	(Nm ³ /h)	700	1.200	3.000
Temperatura de tratamiento	(°C)	800	800	800
Tiempo medio de tratamiento	(min.)	20	20	20
Flujo de gases de combustión	(Nm ³ /h)	200	300	500
Enfriamiento • sistema • caudal de agua del circuito	(m ³ /h)	Lecho fluidizado con circulación del agua		
		15	30	75
Temperatura de la arena a la salida	(°C)	30 – 40		
Consumo energético total: • eléctrico • gas		100 260	90 260	70 260
Flujo de aire comprimido	(Nm ³ /h)	150	210	330
Eficiencia de la instalación		70 – 80%		

.../...

.../...

Parámetro	Unidades	Fundición N	Fundición O	Fundición P
Calidad de la arena regenerada:				
• granulometría			No varía	
• pérdida por calcinación			≤ 0,1%	
Reutilización de la arena regenerada:				
• producción de moldes			100%	
• producción de machos			70 – 80%	

A continuación se muestran los datos de composición de gases residuales de unas instalaciones alemanas de 85.000 toneladas al año (13 – 15 t/h):

- SO₂: 118 mg/Nm³
- NO_x: 150 mg/Nm³
- C total: 10 mg/Nm³
- CO: 30 mg/Nm³

Aplicabilidad

Esta técnica de regeneración se utiliza para tratar arenas mezcladas con bentonita. El éxito económico y técnico de la regeneración dependen de la arena que se desea regenerar, ya que no es posible reciclar el volumen total de arena generada. La arena que no se ha dañado por los efectos del calor puede reutilizarse directamente en el área de preparación. No es posible someterla a regeneración porque los aditivos y aglomerantes activos se eliminarían. Por ello es necesario separar la arena en el punto de desmoldeo, antes de la homogeneización. Esta técnica no resulta válida para la arena de machos que afectan a las propiedades de la bentonita (un aglomerante de naturaleza ácida) o que modifiquen las características de la arena verde (por ejemplo arena de vidrio soluble).

La arena regenerada puede utilizarse para la producción de machos, siguiendo el procedimiento original, con exigencias geométricas medias o bajas. Su posible aplicación en la producción de machos depende de la cantidad inicial de arena química. Su utilización en otros sistemas aglomerantes debe probarse caso por caso previamente. Por otro lado, estas arenas pueden utilizarse sin restricciones para compensar pérdidas de los sistemas de moldeo en arena verde. Sí puede haber restricciones, sin embargo, en procesos que empleen vidrio soluble o arenas aglomeradas con formiato de metilo.

En los últimos años se han desarrollado distintos tipos de instalaciones para el tratamiento de arenas mixtas, pero todavía son minoritarios en el sector. Algunos de ellos se encuentran en fase de prueba, mientras que otros se han diseñado para una fundición específica y producen arena regenerada que sólo puede reutilizarse en el mismo proceso; además, los resultados no son extrapolables a otras fundiciones.

Datos económicos

Los costes correspondientes a un proceso en tres fases (mecánico-térmico-mecánico) con sistema de depuración neumático como el paso mecánico (3 tubos en una cámara, regenerador de chorro tipo KGT) y una capacidad de 2,5 t/h son los siguientes: costes operativos (consumo de energía, personal, mantenimiento): 21 EUR/t, costes de inversión (amortización en 8 años): 30 EUR/t, lo que proporciona un coste total de regeneración de 51 EUR/t.

Los niveles de consumo son los siguientes:

- Electricidad: 50 kWh/t.
- Gas natural: 18 Nm³/t (depende del contenido de humedad de la arena).
- Aire comprimido: 60 Nm³/t.
- Desgaste de piezas: 5 EUR/t.

Ventajas de la implantación

La legislación prevé costes elevados de disposición de residuos para reducir la cantidad de los mismos.

Ejemplos

Sistema térmico-mecánico de Halberg Guss GmbH, Saarbrücken (Alemania). Esta planta trata 13 – 15 t/h de arena mixta aglomerada (30% orgánica, 70% inorgánica). La arena con aglomerante orgánico es una mezcla al 50% de arena de cajas frías y de Croning. El rendimiento de regeneración calculado a partir de la cantidad de arena usada tratada es del 78%. La arena regenerada se utiliza en la producción de machos (100% Croning; 70 – 100% caja fría).

En una prueba piloto realizada en Alemania en 1993 se demostró que era posible la regeneración primaria + separación de la cromita (de los machos) y arena de cuarzo (ambas químicamente aglomeradas) + tratamiento térmico/mecánico de la arena de cuarzo. La separación de ambos tipos de arena era necesaria, puesto que la arena mixta tenía problemas de sinterización y transformación eutéctica. La planta cerró posteriormente a causa de otros problemas económicos.

Publicaciones de referencia

[11, Schachtner y Müller-Späth, 1993], [37, Winterhalter, et al., 1992], [108, Feaf, 1999], [122, Kirst, 1999], [128, IHOBE, 1998], [153, Umweltbundesamt, 2002], [225, TWG, 2003]

4.8.9. Regeneración de arena húmeda

Descripción

Tras la extracción del metal que contenga la arena, esta se mezcla con agua y forma un lodo que permite separar fácilmente el aglomerante y someterlo posteriormente a tamizado húmedo (1,6 mm). La extracción de los residuos de aglomerante adheridos a los granos de arena se realiza en la unidad de regeneración húmeda por fricción mecánica intensiva de la arena. Los aglomerantes van a parar al agua de lavado, la arena lavada se seca para que su contenido final de humedad no sobrepase el 0,3%, se somete a tamizado en seco (1,2 mm) y finalmente se enfría. Tras estos procesos puede haber una etapa final de extracción magnética del hierro seguida de depuración de partículas. Los residuos de aglomerante se separan de la suspensión y se tratan para permitir su eliminación segura.

La principal ventaja de este proceso respecto a otros mecánicos y térmicos es que posibilita el seguimiento del proceso en tiempo real. A través del control del pH se puede llevar un seguimiento continuo del proceso, corregirlo en tiempo real en caso necesario y producir arena regenerada de calidad constante. La técnica permite además la extracción de la capa de aglomerante a través de la acción mecánica en húmedo combinada con una posible acción química, sin que los granos de arena sufran desgaste.

El objetivo principal del proceso es reducir tanto el nivel de oolitización de la arena usada (PPC máximas del 1%) como el contenido en ácido.

Ventajas medioambientales

Reducción de la cantidad de arena de desecho y del consumo de arena nueva.

Efectos colaterales

El proceso húmedo genera lodos de desecho y un caudal de aguas residuales. Este flujo de aguas residuales se ve afectado por un serio problema, la mala sedimentación de la bentonita y las dificultades a la hora de ex-

traerla. Las aguas residuales producidas al regenerar las arenas de vidrio soluble muestran presencia de iones alcalinos, muy difíciles también de separar.

Aplicabilidad

Los sistemas de regeneración húmeda sólo pueden utilizarse con arenas verdes o aglomeradas con silicato o CO_2 . Se trata de procesos de regeneración que permiten la reutilización completa de la arena tanto de moldes como de machos. Las pruebas realizadas muestran que la arena verde regenerada es capaz de producir machos en caja fría de buena calidad a partir de una cantidad aceptable de aglomerante (1,8% en total).

Datos económicos

En el mercado italiano de la fundición, una planta centralizada de regeneración en húmedo puede ofrecer arena tratada a mejor precio que la arena nueva.

Ventajas de la implantación

Según datos recogidos, este sistema es capaz de hacer frente a las variaciones en la calidad de la arena usada mejor que los procedimientos mecánicos o térmicos, lo que abre la posibilidad de utilizarlo para regenerar la arena de forma centralizada.

Ejemplos

Planta de recuperación de arena verde de Safond, que lleva tratando 230.000 toneladas anuales de arena usada desde 1981.

Una fundición de Polonia (Odlewnia Zeliwa Srem s.a., de Srem (Polonia)) dispone de un sistema de regeneración húmeda de la arena furánica; sin embargo, al ser un proceso que depende de factores propios de las instalaciones no es exportable a otras plantas.

Publicaciones de referencia

[37, Winterhalter, et al., 1992], [140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001], [225, TWG, 2003]

4.8.10. Regeneración de arena de vidrio soluble con sistemas neumáticos

Descripción

La arena de vidrio soluble siempre ha sido difícil de regenerar. El empleo de un sistema neumático ha permitido desarrollar plantas de tratamiento con un nivel de regeneración del 60%. El funcionamiento del sistema sigue los principios mencionados más arriba (véase apartado 4.8.6). No obstante, este tipo concreto de aglomerante obliga a calentar la arena a 220 °C antes de la regeneración para fragilizar la capa de silicato. El nivel de humedad previo a la regeneración de la arena debe ser inferior al 0,3%. La arena regenerada puede reutilizarse en el mismo sistema. Para que el éster sea efectivo la arena debe enfriarse por debajo de los 20 °C antes de reintroducirla en el ciclo de moldeo.

La regeneración de la arena de vidrio soluble se compone de las siguientes etapas de proceso: rotura – secado/ calentamiento – recuperación (mecánica) – enfriamiento – filtrado.

Esta técnica tiene un rendimiento menor al de la regeneración térmica de arenas orgánicas a causa de las posibles limitaciones, por ejemplo:

- menor resistencia a compresión inmediata;
- tiempos de aplicabilidad más breves para las mezclas de arena de machos;

- pérdida de estabilidad durante el almacenamiento de los machos;
- pérdida de resistencia a la compresión remanente, sobre todo si se utilizan aglomerantes de alta capacidad de desintegración.

Para compensar estos problemas es necesario introducir cambios en el esquema de procesamiento de las mezclas de aglomerante.

Ventajas medioambientales

La utilización del vidrio soluble como aglomerante tiene un impacto medioambiental bajo en comparación con los de tipo orgánico. Esta técnica permite la regeneración (parcial) de la arena ligada con vidrio soluble, lo que reduce tanto las cantidades destinadas a desecho como el empleo de materias primas.

Efectos colaterales

Para calentar la arena se utiliza gas natural. Las emisiones de CO₂ correspondientes se calculan en unos 18 kg/tonelada de arena usada. También se producen emisiones de NO_x.

Datos operativos

En una planta alemana dotada de unidad neumática de funcionamiento sucesivo la arena se seca inicialmente mediante aire caliente (5 min./220 °C). Posteriormente se inicia la depuración neumática mediante inyección de aire comprimido (70 min.), fase a la que le sucede la depuración de partículas final durante la cual sólo se inyecta aire fluidizante (2 min.). No hay necesidad de enfriar la arena, ya que se enfría hasta una temperatura apropiada de trabajo.

La rendimiento de la arena regenerada en un único ciclo llega, según los datos aportados, al 85% del peso inicial (en base al SiO₂). Para lograr producir machos estables, y teniendo en cuenta la reducción adicional de la calidad de la arena que supone un segundo ciclo regenerativo, el porcentaje máximo de regeneración alcanzable es del 62% (lo que representa tener que añadir un 38% de arena nueva).

Estos son los niveles de consumo específicos (capacidad de 1.500 toneladas/año; unidad de 0,5 t/h):

- consumo de gas natural: 104,4 kWh/t (arena usada);
- consumo de energía eléctrica: 74,5 kWh/t (arena usada).

Otro ejemplo ilustrativo es el de una planta (fundición de acero) de Polonia equipada de las siguientes unidades: trituradora vibratoria – secador – regenerador de placa de impacto – depuración de partículas en cascada – separador electromagnético. La Tabla 4.66 muestra los detalles técnicos de las instalaciones. La arena regenerada se utiliza nuevamente en la preparación de arena de moldeo aglomerada con silicato, como arena de relleno de moldes, siendo la arena alcalina la que está en contacto directo. El balance total de arena (anual) proporciona unos niveles de utilización de arena regenerada de entre el 45 y el 47%.

Una planta española (fundición de acero) aporta unos niveles de reutilización de arena con silicato-éster regenerada de entre el 80 y el 88% (con una media anual de adición de arena nueva del 12,5%), correspondientes a una línea de moldeo manual utilizada para la producción de piezas grandes. El sistema de regeneración se compone de una trituradora vibratoria, calentamiento mediante reactor indirecto (con el quemador situado en una cámara contigua), enfriamiento en una torre intercambiadora de calor refrigerada por agua y lavado por impacto en cámara de mezclado giratoria.

Los ejemplos de plantas italianas también revelan el uso de equipos especiales para calentar la arena hasta los 140 – 150 °C; temperaturas que permiten extraer los defectos y provocan la fragilización de la capa de vidrio soluble. Tras el calentamiento se somete a tratamiento mecánico en lavador giratorio, depuración de partículas y a enfriamiento final. La Figura 4.32 muestra una representación esquemática de la unidad de regeneración giratoria.

Este equipo tiene un consumo de energía de 35 kW/tonelada de arena regenerada. Las pérdidas operativas de arena alcanzan aproximadamente el 5%, y cerca del 90% de la arena regenerada puede destinarse a la producción de mezclas para moldes y machos. La proporción máxima de regeneración depende de la intensidad y duración del proceso y de las pérdidas de arena, que se producen en todos los procesos (mezclado, preparación, transporte, producción de moldes y regeneración).

Tabla 4.66. Datos operativos de una unidad de regeneración de arena con silicato [200, Metalodlew s.a., 2002]

Característica	Valor
Capacidad	10 t/h
Proporción de regeneración	90%
Contenido de arena regenerada de la arena de moldeo	50 – 60%
Energía necesaria	76 kW
Eficiencia del sistema de depuración de partículas (2 filtros de mangas)	99,4%
Área que ocupan las instalaciones de regeneración	220 m ²

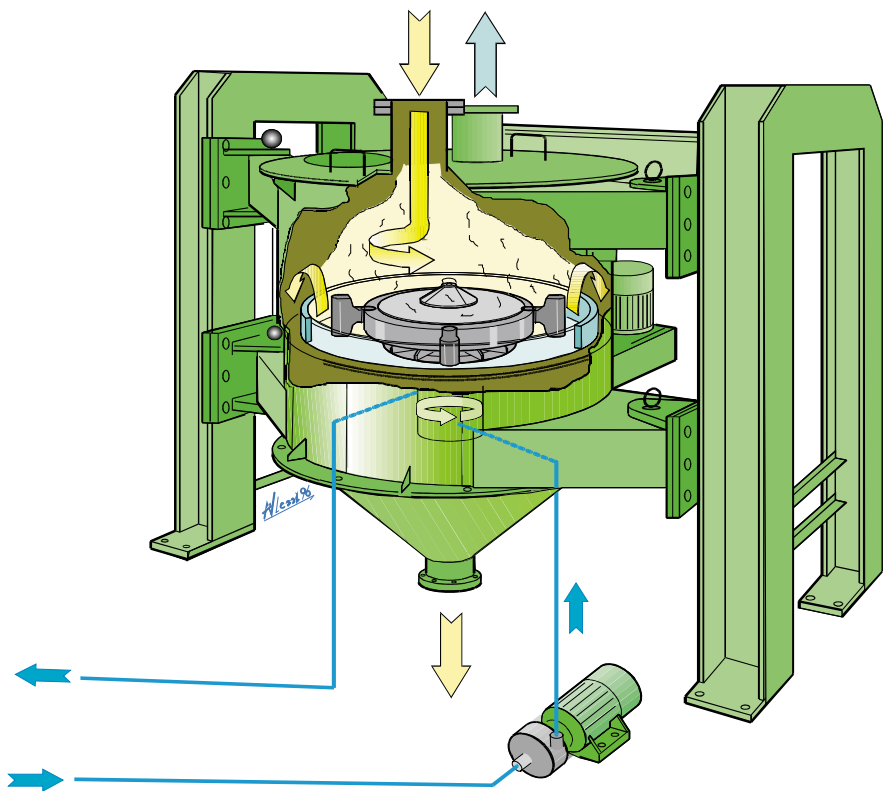


Figura 4.32.
Unidad de regeneración
mecánica giratoria
[225, TWG, 2003]

Aplicabilidad

La aplicabilidad de las arenas aglomeradas con vidrio soluble depende del catalizador utilizado. Los ésteres de glicerol de poliacetato tradicionales no soportan más que un número determinado de ciclos. Los ésteres carbonáceos, en cambio, posibilitan una regeneración que resulta más sencilla incluso que la de la arena con silicato-CO₂. En caso de no poder enfriar la arena por debajo de los 20 °C antes de su reintroducción en el mezclador deberán utilizarse ésteres de baja reacción, que no permiten la regeneración, una situación que ocurre en los meses de verano en los climas más calidos.

La reutilización de la arena de vidrio soluble regenerada para la preparación de moldes y machos con aglomerantes orgánicos es problemática, ya que el elevado contenido de electrolitos (aglomerantes) impide la utilización en otros sistemas de aglomerante para machos. La elevada basicidad del vidrio soluble afecta negativamente a la estabilidad de la aglomeración y de los machos, tanto en sistemas neutros como alcalinos. La reutilización en ciclos de arena verde y sistemas aglomerantes de machos ácidos todavía no ha logrado implantarse con éxito, quizá a causa del escaso interés que despierta este tipo de aplicación.

Dada la poca calidad de la arena de regeneración secundaria es necesario identificar, durante el vaciado y la recogida de la arena de los machos, la cantidad de arena regenerada y su procedencia (por ejemplo número de ciclos) a fin de descartar la que no pueda reaprovecharse.

A causa de los elevados costes y la relativamente baja proporción de regeneración la amortización de las instalaciones en un período razonable sólo está garantizada en plantas cuya producción exceda las 2.500 toneladas/año.

Datos económicos

Los costes de tratamiento de esta técnica correspondientes al ejemplo alemán ascienden a aproximadamente 60 EUR/t. Son tan altos que un titular ha decidido cerrar la planta y volver nuevamente a desechar la arena de vidrio con unos costes muy inferiores de 30 EUR/tonelada.

Los costes de operación aportados por la planta española son de 10 EUR/t.

Ventajas de la implantación

Permitir la regeneración de la arena de vidrio soluble, que muestra un buen rendimiento medioambiental en algunas aplicaciones.

Ejemplos

- KGT Planta de regeneración centralizada con regenerador de chorro para 4 plantas, construida en 1998 en Fa. Bröer, Schwetzingen (Alemania), aunque cesó sus actividades en 2001.
- Metalodlew s.a., Cracovia (Polonia).
- Lur Sue S.L., Lora del Río (España).
- Fonderia Arno Metallurgia, S. Vittore Olona (Italia).
- Faser Spa, Rogeno (Italia).
- Talleres de Amurrio S.A. Amurrio (España).
- Daros Piston Rings AB, Partilla (Suecia).

Publicaciones de referencia

[128, IHOBE, 1998], [152, Notzon y Heil, 1998], [154, Baum, 2002], [200, Metalodlew s.a., 2002], [210, Martínez de Morentin Ronda, 2002], [225, TWG, 2003], [228, Galante, et al., 1997]

4.8.11. Uso interno de arena de machos no curados

Descripción

La producción de machos genera arena residual procedente de la rotura de los machos, de los machos con defectos leves y del exceso de arena en la máquina productora de machos. La arena sobrante de la máquina puede endurecerse en una unidad específica, mientras que los otros tipos de arena de machos sin usar van a parar a una unidad disgregadora. La arena resultante puede mezclarse con nueva para producir nuevos machos.

Ventajas medioambientales

Recirculación interna de un 5 a 10% de arena de machos que de otro modo se desecharía.

Efectos colaterales

No se producen efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a las arenas aglomeradas con poliuretano (cajas frías) y resina furánica, pero no a otros tipos.

La implantación de esta técnica requiere introducir cambios en el control de procesos. Debe determinarse la proporción óptima entre arena recirculada en el circuito y arena nueva. También es posible que haya que modificar la adición o la composición del aglomerante.

Datos económicos

Esta técnica requiere una inversión de 250.000 – 500.000 euros para la unidad mixta de tratamiento y rotura y tiene unos costes operativos de aproximadamente 12 EUR/t. Estos costes se compensan con la reducción de los costes de vertido y de adquisición de arena nueva.

La técnica sólo es viable si la producción de machos es intensiva.

Ventajas de la implantación

Optimización del uso de materias primas y reducción de desechos.

Ejemplos

Varias fundiciones de gran tamaño emplean esta técnica.

Publicaciones de referencia

[82, IfG – Institut für Gießereitechnik, 1996], [110, Vito, 2001]

4.8.12. Reutilización de partículas generadas en el circuito de arena verde de producción de moldes

Descripción

Las partículas se recogen en el filtro de gases de salida situado en la unidad de desmoldeo y de las instalaciones de dosificación y manipulación de arena verde seca. Las partículas capturadas contienen componentes de aglomeración activos y pueden reciclarse y reintroducirse en el circuito de arena verde.

Ventajas medioambientales

Reducción del uso de aglomerantes (bentonita) y aditivos (carbono) a través de la recirculación interna.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Datos operativos

Una fundición dedicada a la producción de hierro para la industria de la automoción dispone de línea de moldeo automatizada, con una producción de 8.000 t piezas/año y de 480 t partículas/año. La arena se recoge, enfría y recicla en la mezcladora. Las partículas capturadas contienen un 23% de bentonita activa y un 10% de carbono y pueden recircularse (hasta un 50%) al sistema sin riesgo de pérdidas de calidad a causa de la presencia de finos.

Aplicabilidad

Esta técnica puede aplicarse a instalaciones de arena verde nuevas y ya existentes.

Datos económicos

La técnica requiere una inversión de 25.000 euros en equipos de almacenamiento y transporte. El período de amortización es de 8 años, con una tasa de descuento del 8%, para un horno de 240 toneladas al año, lo que proporciona unos costes de inversión de 17 euros por tonelada de arena tratada. No hay costes de operación adicionales ya que no es necesario introducir cambios en la estructura general.

Ventajas de la implantación

Optimizar el uso de las materias primas y reducir la cantidad de desechos.

Ejemplos

Fundición alemana dedicada a la producción para el mercado de la automoción.

Publicaciones de referencia

[82, IfG – Institut für Gießereitechnik, 1996]

4.8.13. Reutilización externa de arena usada y granos de tamaño insuficiente generados en el circuito de arena y los procesos de regeneración

Descripción

La arena usada y los granos de arena de tamaño inferior al necesario procedentes de los circuitos o de la regeneración de la arena pueden tener varios usos externos, siendo sus áreas de aplicación las siguientes:

- industria de la construcción (carreteras, autopistas);
- industria de los materiales de construcción (cemento, ladrillos, producción de caliza);
- para rellenar minas;
- construcción de vertederos (carreteras de vertederos, cubiertas permanentes).

La aplicación se ve limitada por motivos técnicos que afectan a los materiales de construcción y/o criterios medioambientales. Estos últimos son consecuencia, normalmente, de las propiedades lixiviantes o del contenido de compuestos orgánicos. Sus características varían de una región de Europa a otra, aunque suelen tener

un bajo potencial de lixiviación de metales. Es posible que se excedan los valores límite si los materiales tienen un elevado contenido en aglomerante orgánico o de aditivos específicos como el carbón brillante.

Gracias a su elevado contenido de cuarzo y adecuada granulometría, la arena usada puede emplearse en sustitución de la arena virgen para la construcción de carreteras. También es técnicamente factible utilizarla para la producción de materiales de construcción (cemento, ladrillos, baldosas, lana de vidrio...), aunque en este caso se requieren un control de la composición y una logística más exhaustivos. Los ensayos realizados a escala industrial han dado lugar a resultados positivos en las siguientes aplicaciones:

- bases de carreteras;
- material de relleno;
- material de drenaje;
- elementos de hormigón;
- producción de cemento (depende de los requisitos de silicio del proceso. Este uso tiene una enorme importancia en Alemania);
- relleno de minas (es un buen material de apoyo, muy utilizado en Alemania);
- cobertura final de vertederos (la arena se mezcla con vidrio soluble y otros desechos, por ejemplo en los Países Bajos);
- material de construcción para el refuerzo de diques;
- vitrificación de residuos peligrosos.

En el apartado 4.9 puede consultarse una tabla con información detallada sobre los resultados del estudio de los distintos tipos de arena.

Otros campos de aplicación son la fabricación de ladrillos, la fusión secundaria del cobre y la recuperación del zinc.

Cabe destacar que el análisis del (tipo de) uso externo de la arena supera los objetivos del presente documento de referencia. Aun así puede afirmarse, por lo general, que la arena normalmente no requiere pretratamiento y se transporta directamente de la fundición tras su recogida y almacenamiento temporal. Para mantener la calidad constante del material se suele habilitar un sistema de recogida y almacenamiento independiente. Por último, la calidad del material debe someterse a controles periódicos.

Ventajas medioambientales

Uso como sustituto de la arena en aplicaciones externas, con el ahorro de materiales naturales que ello comporta. Puesto que la aplicación externa de la arena no requiere tratamiento la fundición no consume energía adicional.

Efectos colaterales

Los residuos de recubrimientos orgánicos son posibles fuentes de hidrocarburos aromáticos.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para las instalaciones nuevas y existentes, siempre y cuando encuentren comprador para la arena residual.

El uso de la arena excedente de las fundiciones no reduce la resistencia al desgaste del hormigón de asfalto. Es posible además emplear la arena usada y las partículas procedentes de una misma fundición para la producción de hormigón de cemento portland. El empleo de arena excedente con cenizas volátiles y escoria de acero permite fabricar lana mineral. Su utilización en el proceso de compostaje de residuos biológicos no afecta negativamente al entorno ni a las características del producto final (por ejemplo tierra vegetal). También es técnica y medioambientalmente posible utilizar arena verde para producir revestimientos minerales para las capas superficiales de los vertederos.

Datos económicos

Los costes correspondientes al uso externo dependen del mercado local y de los posibles costes de transporte y almacenamiento.

Los costes de inversión en un sistema de recogida y almacenamiento independiente son mínimos y a menudo pueden evitarse adoptando únicamente medidas organizativas. Los costes operativos de análisis y gestión pueden llegar a los 5.000 euros anuales. En cuanto a los beneficios de esta técnica destaca la reducción de los costes de vertido (hasta 125 EUR/t).

Ventajas de la implantación

La legislación prevé costes de vertido elevados para reducir la cantidad de residuos eliminados.

Ejemplos

Son muchos los ejemplos de fundiciones de toda Europa, por ejemplo de Finlandia, Países Bajos, Bélgica, Alemania o Reino Unido.

Publicaciones de referencia

[82, IfG – Institut für Gießereitechnik, 1996], [110, Vito, 2001], [128, IHOBE, 1998], [169, Orkas, 2001], [171, The Castings Development Centre, 1999]

4.9. Partículas y residuos sólidos: tratamiento y reutilización

4.9.1. Introducción

La correcta separación de los materiales es esencial para potenciar su recuperación, reciclaje y reutilización. Los residuos deben reciclarse o recuperarse siempre a menos que exista una justificación aceptada por el regulador de que es «técnica y económicamente imposible».

Por lo general los residuos generados por los distintos ciclos y flujos se componen de:

- partículas de materias primas capturadas mediante filtros de mangas o de cartuchos cerámicos;
- escoria generada durante la desulfuración;
- escoria de colada;
- partículas y gases de colada recogidos en instalaciones de filtrado;
- partículas y gases de moldeo recogidos en instalaciones de filtrado;
- partículas generadas durante el rebabado y recogidas en instalaciones de depuración;
- virutas del rebabado;
- materiales abrasivos usados en el granallado;
- licores cáusticos y lodos producidos por instalaciones de tratamiento de efluentes;
- residuos de refractario de canales y cucharas;
- arena;
- depósitos de productos químicos y aceite;
- residuos industriales generales inertes.

Los residuos deberían recuperarse siempre que sea practicable. A excepción de la arena, los más significativos son los siguientes:

- escoria procedente de los procesos de colada y tratamiento del metal;
- partículas recogidas por las instalaciones de depuración;
- escoria;

- residuos de refractario;
- [160, UK Environment Agency, 2002]

4.9.2. Pretratamiento de residuos sólidos para su reutilización externa

Descripción

Para poder destinar los residuos sólidos a usos externos puede que sea necesario someterlos previamente a tratamiento. La Tabla 4.67 muestra los requisitos de tratamiento de los distintos residuos sólidos (a excepción de la arena) y las posibles limitaciones de cara a su reutilización.

Por lo que respecta a la escoria generada por los cubilotes, la forma física, y por tanto hasta cierto punto las posibilidades de reutilización, dependen de la forma en la que se ha llevado a cabo el desescoriado. El desescoriado en seco (vertido de la escoria en un depósito para que se seque y solidifique) produce un mineral cristalino y no poroso. Esta escoria, desde un punto de vista técnico, es comparable a la de los altos hornos. El lavado húmedo en cambio, genera escoria granular por enfriamiento de la misma mediante chorro de agua.

Tabla 4.67. Requisitos de tratamiento y posibles limitaciones de residuos sólidos destinados a reutilización externa [171, The Castings Development Centre, 1999]

Tipo de residuo	Tratamiento	Limitaciones
Escoria de cubilote con enfriamiento por aire	Machacado	• generación de partículas vítreas • requisitos de manipulación a causa de su naturaleza vítrea
Escoria de cubilotes enfriada por agua	Ninguno	• generación de partículas vítreas • requisitos de manipulación a causa de su naturaleza vítrea
Escoria de colada por inducción	Machacado	• generación de partículas vítreas • requisitos de manipulación a causa de su naturaleza vítrea • a penas existen datos sobre los lixiviados
Escoria de HEA	Machacado	• generación de partículas vítreas • requisitos de manipulación a causa de su naturaleza vítrea • a penas existen datos sobre los lixiviados
Escoria de desulfuración	Extracción del metal y otras partículas gruesas	• requisitos de manipulación: el CaC_2 debe manejarse con cuidado para evitar lesiones • escorrentía • puede ser un residuo especial
Partículas y lodos	El prensado, secado y granulado es necesario para la mayoría de usos	• requisitos de salud y seguridad de algunos tipos de partículas • problemas de transporte de materiales particulados • potencial de lixiviación elevado a causa de la naturaleza del producto y la gran área superficial

Ventajas medioambientales

En aplicaciones externas el material reacondicionado puede utilizarse como material de construcción secundario y en sustitución de arenas vírgenes. El reciclaje representa una reducción en la cantidad de material a eliminar.

Efectos colaterales

El pretratamiento requiere energía y puede generar emisiones de partículas.

Aplicabilidad

La técnica es válida para instalaciones nuevas y existentes, siempre y cuando exista un mercado local apropiado para los residuos.

La Tabla 4.68 resume las posibles aplicaciones de los residuos sólidos tratados.

Tabla 4.68. Resumen de las posibilidades de reutilización externa de los residuos sólidos generados por las fundiciones (datos de 1999) [171, The Castings Development Centre, 1999], [202, TWG, 2002]

Reutilización de residuos sólidos (resumen)	Arena						Escoria				Otros		
	Arena verde	Fenólica alcalina	Uretano fenólico	Furánica	Cáscara de resina	Silicato de sodio	Cubilotes ref. por aire	Cubilotes refrigerados por agua	Inducción	Horno eléctrico de arco	Desulfuración	Moldeo en cáscara de cera perdida	Polvos y lodos
Usos relacionados con la construcción													
Asfalto	x	x	+	+	+	O	x						
Lastres							+			+			
Confección de bloques	+	x	+	+	x	+		x					
Fabricación de ladrillos	x	x	+	+	+		+	+					
Cemento	x	x	+		x	x							
Sustituto de gruesos							x		x	x		x	
Hormigón		x	+	+	+								
Sustituto de finos	x	x	+	+	+	+							
Hormigón espumado, etc.	x	x	+										
Lanas aislantes/minerales/de vidrio	+	+	+	+	+	+	+	+					+
Producción de sustitutos ligeros													+
Producción de mortero						+							
Construcción de bases de carreteras		x	+		+	x	x		x	x		x	
Filtro impermeable				x									
Reutilización en otras fundiciones													
Como arena nueva añadida a la arena verde				x									
Usos relativos al suelo													
Tierras artificiales	x	+	+	x	+								+
Cubiertas de tierra decorativa							+	+					
Cubiertas para establos (equitación)								+					
Relleno de fertilizantes													x
Vertederos: cobertura	x	x	+										+
Vertederos: capas de material	x	x	+	x	x	x							

.../...

.../...

Reutilización de residuos sólidos (resumen)	Arena						Escoria				Otros		
	Arena verde	Fenólica alcalina	Uretano fenólico	Furánica	Cáscara de resina	Silicato de sodio	Cubilotes ref. por aire	Cubilotes refrigerados por agua	Inducción	Horno eléctrico de arco	Desulfuración	Moldeo en cáscara de cera perdida	Polvos y lodos
Vertederos: revestimiento	+												+
Modificación/mejora de suelos	+	+	+	+	+	+		+			+		+
Varios													
Materiales abrasivos y de inyección		x	+					x	+				
Materiales absorbentes												+	
Fabricación de cemento con escoria de cubilote						+					+		
Aplicaciones químicas/industriales													x
Sustitución de cal apagada											+		+
Flujos de colada		+	+		+	+							
Vitrificación de residuos	+	+	+		+	+							

x Aplicación probada, con proyectos en marcha en el Reino Unido

+ Aplicación probada teóricamente pero sin proyectos en marcha en el Reino Unido

O Aplicación incompatible sin tratamiento previo

Datos económicos

Los costes asociados a la reutilización normalmente corresponden al procesamiento y el transporte, aunque en realidad se reducen si se tienen en cuenta los ingresos obtenidos de su venta. Es posible, si embargo, que estos ingresos sean bajos e incluso insignificantes, mientras que los costes de tratamiento mecánico se sitúan alrededor de 8 EUR/t.

Cuanto más lejos deban transportarse los materiales mayor será el aumento de costes. Para valorar la viabilidad económica de la reutilización deberían contabilizarse también los costes aplicados por los vertederos, que varían según el tipo de residuo y de una región a otra.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de la legislación que fomenta el reciclaje de residuos minerales, en parte por medio del establecimiento de elevadas tasas de vertido, para reducir la cantidad de desechos.

Ejemplos

Son muchos los ejemplos de plantas europeas que fomentan la reutilización de la arena y la escoria, por ejemplo en Finlandia, Países Bajos, Bélgica, Alemania, Reino Unido...

Publicaciones de referencia

[171, The Castings Development Centre, 1999]

4.9.3. Minimización de la formación de escoria

Descripción

La producción de escoria puede minimizarse poniendo en práctica algunas medidas en los procesos, por ejemplo:

- utilizar chatarra limpia;
- reducir la temperatura del metal;
- evitar que se produzcan excesos temporales de temperatura;
- evitar tiempos de permanencia prolongados del metal fundido en el horno de colada;
- utilizar adecuadamente los fundentes;
- utilizar/elegir adecuadamente el revestimiento de refractario;
- refrigerar con agua las paredes del horno para evitar usar revestimiento de refractario.

Ventajas medioambientales

Minimización de la producción de residuos y reducción de las emisiones atmosféricas.

Efectos colaterales

Estas medidas de reducción no tienen efectos colaterales. En cuanto a la fusión de chatarra limpia deberían tenerse en cuenta las indicaciones planteadas en el apartado 4.1.4.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todas las instalaciones, nuevas o ya existentes. Las aplicaciones derivadas del uso de chatarra limpia se analizan en detalle en el apartado 4.1.4.

Datos económicos

Esta técnica no supone ninguna inversión, ya que sólo afecta a medidas de operación.

Ventajas de la implantación

Elevado precio del vertido de residuos.

Ejemplos

Esta técnica forma parte de los procedimientos de operación de la mayoría de fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[103, Vereniging van Nederlandse Gemeenten, 1998]

4.9.4. Cubilotes

4.9.4.1. Recogida y reciclaje de menudos de coque

Descripción

La manipulación, el transporte y la carga de coque generan menudos de coque (usualmente denominado como coquillo). Deben adoptarse medidas específicas para recoger y reciclar este material, por ejemplo mediante sistemas de recogida situados bajo las cintas transportadoras o en los puntos de carga.

El material recogido puede reciclarse y reintroducirse en el proceso por inyección en el cubilote o bien utilizarse para la recarburación.

Ventajas medioambientales

Minimización de la producción de residuos.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida en instalaciones nuevas y existentes.

Ventajas de la implantación

Elevadas tasas de vertido de residuos sólidos.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en varias fundiciones europeas.

4.9.4.2. Reintroducción de las partículas del filtro en los cubilotes

Descripción

Las partículas capturadas en los filtros se recirculan a los cubilotes con el objetivo de que se acumule zinc hasta un nivel dado que permita el retratamiento y la recuperación del Zn (> 18%). La recuperación del Zn se efectúa mediante el proceso Waelz.

La reintroducción de las partículas al circuito puede llevarse a cabo inyectándolo en las toberas o bien introduciéndolo en forma de pellet por la puerta de carga. Ambas técnicas se utilizan a escala industrial. Con un balance másico puede observarse cómo se sublima el zinc y reaparece en el polvo recuperado. Tras un cierto número de ciclos las partículas tendrán un contenido de zinc suficiente que permita su recuperación, técnicamente posible a partir de un nivel de Zn del 18%.

No obstante, existen dos limitaciones a la hora de reciclar las partículas:

- el zinc se encuentra principalmente en forma de Zn_2SO_4 , un compuesto que contiene un 64% de Zn. Este porcentaje marca, pues, el nivel máximo de acumulación;
- las partículas también acumulan álcali, que provoca que se extinga la llama de la cámara de combustión. Para evitarlo puede inyectarse vapor de agua en el aire de combustión.

La inyección en las toberas puede realizarse siguiendo distintos principios. Existen quince fundiciones europeas (a mayo de 2001) que reciclan las partículas reinyectándolas en las toberas. Once de ellas utilizan la técnica de la presión positiva y cuatro la técnica de succión venturi. La ventaja de esta última es que consume menos aire de inyección y, por tanto, enfría menos la zona de colada. En ambas técnicas el polvo se vuelve pegajoso en los sucesivos ciclos. La técnica venturi obliga a mezclar las partículas con coque de petróleo para permitir que sea transportable a través de las tuberías.

La recirculación de las partículas a través de la acumulación y la carga es mucho menos habitual que la inyección en las toberas debido a las mayores dificultades de automatización que presenta. Por otro lado, se requiere un buen control y conocimiento del proceso de pelletización para que los pellets adquieran la consistencia necesaria, que puede potenciarse añadiendo ferrosilicio. En las pruebas prácticas realizadas se necesitó una

mezcla de 2/3 FeSi y 1/3 de las partículas para obtener buenos resultados. La técnica de pelletización puede además utilizarse para el tratamiento de grandes cantidades. En los cubilotes de gran diámetro la inyección de partículas en las toberas hasta el centro de la llama es compleja, lo que favorece el uso de pellets.

La Tabla 4.69 compara las características de ambas técnicas.

Tabla 4.69. Características de las técnicas de inyección para la recirculación del polvo de los cubilotes [108, Feaf, 1999]

Reutilización de los finos capturados al depurar los gases de combustión de cubilotes	Inyección a través de toberas	Introducción de pellets	Observaciones
Influencia de los residuos			
Limitan la introducción de finos	7 – 8 kg/tonelada metal		Provoca la extinción de la llama
Reducen la cantidad de finos generada	40%	50%	Aprox. ¹
Aumentan el contenido en zinc de los finos	30%	20%	Aprox. ¹
Aumentan la producción de escoria	?	?	
Influencia del funcionamiento de los cubilotes			
Cantidad de coque necesaria para compensar las pérdidas de temperatura	0,5 – 0,6%	0,2 – 0,3%	Aprox. ¹⁾
Variación en el análisis de gases de combustión	No	No	n.a.
Influencia del metal fundido			
Aumento del contenido metálico (Zn, Pb) del hierro	Limitado	No	(del orden de milésimas)
Influencia de las pérdidas sobre la llama	10 – 30%	No	Aprox. ^{1,2}
Efectividad al añadir otros productos (C, FeSi) siguiendo el mismo método	Sí	No	n.a.
Costes			
Reducción en los costes de vertido de los finos	60%	50%	Aprox. ¹
Procedimientos			
Posibilidad de automatizar el proceso	Sí	No	n.a.
Problemas adicionales	No	Sí	Resistencia al choque de los pellets
Implementación tecnológica			
Instalaciones existentes	Sí	Sí	Preferentemente cubilotes de gran tamaño
Instalaciones nuevas	Sí	Sí	

¹ Datos aproximados; los valores reales dependen del contenido inicial de óxido de zinc, del grado de acumulación necesario para la reutilización y de las características del cubilote

² Porcentaje de acero en la carga del cubilote

n.a.: no aplicable

Ventajas medioambientales

La principal ventaja de la técnica es el descenso en la cantidad neta de partículas que salen de la fundición con destino de disposición en vertedero o recuperación. Los finos que salen de la fundición tienen una menor pro-

porción de polvo pero un mayor contenido en metales, lo que permite recuperar el Zn a partir de las partículas de los cubilotes. La técnica provoca una acumulación de zinc en las partículas del cubilote, mientras que en el caso del Pb, una mayor parte acaba junto con el hierro. Si el zinc logra recuperarse efectivamente de las partículas la técnica reduce la carga de metales pesados del polvo final destinado al vertedero, así como su cantidad. Por otro lado, aumenta la producción de escoria.

Efectos colaterales

Ambas técnicas consumen energía (coque) para fundir el producto. Según los datos disponibles, con una eficiencia térmica de horno del 40% se produce un aumento del uso del coque de 0,15 a 0,25 kg por kg de partículas.

Además, la inyección de partículas frías en la zona de colada caliente reduce la temperatura de la llama, que deberá corregirse inyectando oxígeno. También aumentará la producción total de escoria.

La entrada de partículas que se pueden adherir en varias piezas internas del sistema provocará pérdidas de eficiencia a medio plazo y posiblemente, problemas operativos que todavía no se han cuantificado.

Datos operativos

Un estudio realizado sobre los flujos de entrada y salida de los cubilotes franceses dio como resultado el balance másico que muestran la Figura 4.33 y la Figura 4.34. La contribución de los distintos flujos a las entradas/salidas de Zn se muestra junto con el nivel de zinc (como masa y porcentaje). Las proporciones corresponden a los valores medios registrados durante el período de medición indicado.

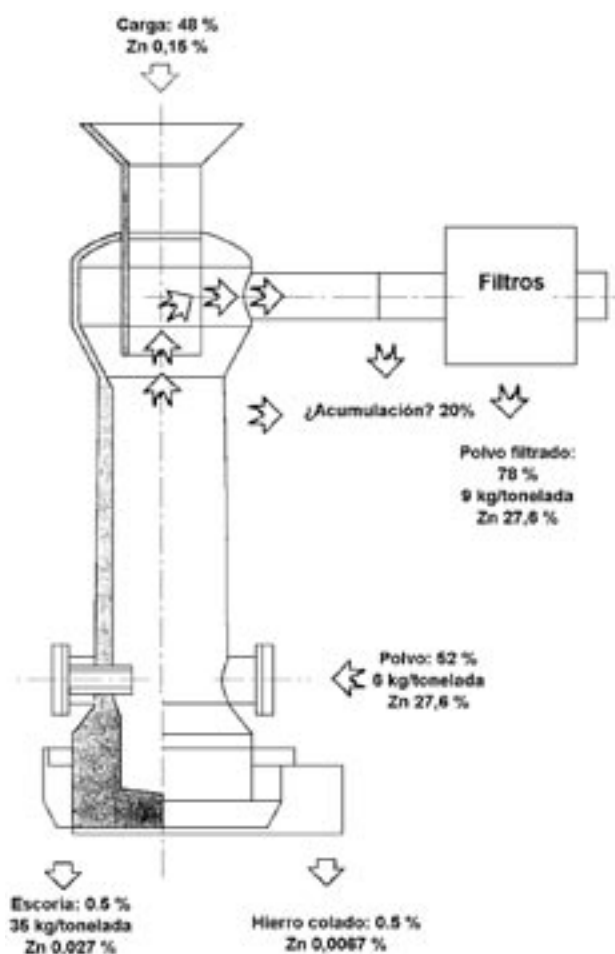


Figura 4.33.
Distribución del zinc
en la inyección de toberas
tras un período de 20 días
[156, Godinot, 2001]

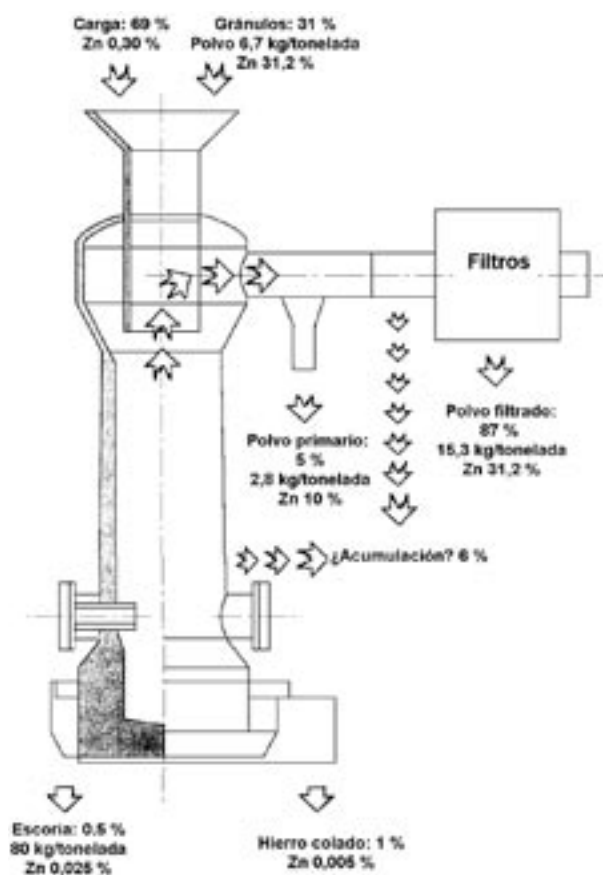


Figura 4.34.
Distribución del zinc en el sistema de recirculación a través de la carga, tras 11 días de carga [156, Godinot, 2001]

El análisis de los flujos de entrada y salida no permite asignar la totalidad del zinc presente, lo que indica que una proporción considerable de este metal (20% en el caso de la inyección en toberas y 10% en la carga de pellets) permanece y se acumula en el sistema. Con la recirculación, las partículas van siendo más adherentes y se depositan en la cámara de combustión, el intercambiador de calor y los filtros. Así pues, la recirculación requerirá una depuración más efectiva que a su vez generará material residual.

La recirculación de partículas de los cubilotes en una fundición de hierro de los Países Bajos con una producción de 30.000 toneladas redujo la cantidad neta de partículas en 156 t anuales sin que se viesen afectadas significativamente las características medioambientales y de formación de escoria.

Aplicabilidad

La recuperación se vuelve técnicamente posible a partir de un nivel de zinc del 18%. Los cubilotes alimentados con cargas ricas en zinc contienen niveles de zinc superiores al 20% sin necesidad de recirculación. Para que la recuperación compense los costes se requiere un contenido mínimo de Zn del 40%.

No es posible reinyectar la totalidad de las partículas generadas por un horno; si se inyectan más de 8 kg/tonelada de metal se apaga la llama.

Pueden dotarse de instalaciones de recirculación de partículas los cubilotes, nuevos y existentes, de funcionamiento continuo.

Datos económicos

Como se ha dicho, la recuperación es técnicamente posible a partir de un contenido de zinc del 18%, si bien, según indican los operarios de los hornos, la recirculación y la recuperación del zinc no empiezan a ser rentables hasta que el nivel supera el 40%.

Los datos prácticos aportados por dos fundiciones francesas han permitido calcular los costes de operación adicionales. Así, la inyección en las toberas tiene un coste de operación adicional de 0,35 EUR/tonelada de hierro y la inyección de pellets de polvo de 0,90 EUR/tonelada de hierro. En el cálculo no se han tenido en cuenta costes suplementarios como los del vertido de escoria o el mantenimiento.

En cuanto a los sistemas venturi, se han analizado los datos de una planta característica alemana que a lo largo de 5 años ha destinado a la industria del tratamiento una media de 7,5 kg de polvo de zinc por tonelada de hierro fundido. El sistema permitió un ahorro de costes en vertido de 1,97 euros por tonelada de hierro líquido. Pero, además, el 20% del coque se sustituyó por coque de petróleo, lo que supuso una reducción del coste del combustible del 15%, equivalente a una reducción de 2,56 EUR/tonelada de hierro líquido. En el cálculo no se han tenido en cuenta costes suplementarios como los del vertido de escoria o mantenimiento.

Ventajas de la implantación

Reducir los elevados costes de eliminación de partículas generadas en los hornos.

Ejemplos

- Venturi (NPT): Pont-à-Mousson, Brebach (Francia).
- Presión positiva (VELCO): John Deere, Mannheim (Alemania).

Publicaciones de referencia

[108, Feaf, 1999], [110, Vito, 2001], [140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001], [156, Godinot, 2001], [181, Ruffin y Godinot, 1998], [198, Georg Fischer,], [202, TWG, 2002].

4.9.5. Hornos eléctricos de arco (HEA)

4.9.5.1. Reciclaje del polvo filtrado y de la escoria (colada en HEA)

Descripción

Las partículas secas extraídas de los hornos pueden, en determinadas circunstancias, reciclarse en el mismo horno aunque, preferentemente, deberían tratarse previamente (por ejemplo mediante pelletización o briquetado) para reducir la cantidad de partículas emitidas por el horno. El objetivo es recuperar la fracción metálica de las partículas y quemar el componente inorgánico para convertirlo en escoria. Normalmente las partículas se añaden al inicio del ciclo de colada.

Como se dijo en el apartado correspondiente a los cubilotes, y en los hornos HEA, para los casos que utilizan cantidades significativas de chatarra con contenido de Zn, el reciclaje permite enriquecer de zinc las partículas del horno hasta un nivel con el que es posible emplearlo en la industria del zinc para la recuperación del metal en caso de que sea económicamente viable (lo que sucede a unos niveles del 30 – 40%).

Ventajas medioambientales

La principal ventaja de la técnica es la disminución de la cantidad neta de partículas que salen de la fundición con destino a vertedero o a recuperación. Además las partículas producidas tienen un mayor contenido en metales, lo que permite recuperar el Zn a partir de las partículas de los hornos HEA. La técnica provoca una acumulación de zinc en las partículas, mientras que en el caso del Pb, la mayor permanece junto al hierro. Si el zinc logra recuperarse efectivamente de las partículas la técnica reduce la carga de metales pesados en el polvo final destinado a vertedero, así como su cantidad. Sin embargo, suele aumentar la producción de escoria.

Efectos colaterales

Es posible que el reciclaje de las partículas reduzca la eficiencia del horno y aumente el consumo de energía eléctrica (aproximadamente 20 – 30 kWh/tonelada). Esta técnica aumenta también la producción de escoria.

Datos operativos

Los datos de operación correspondientes a una planta de fabricación de acero en HEA muestran que el nivel de reciclaje alcanzado es del 75% (de una producción inicial de 20 – 22 kg/t), de modo que la fundición sólo debe hacerse cargo del reciclaje del 50% de las partículas, que tienen un contenido medio de zinc del 35%.

Aplicabilidad

Esta técnica normalmente se utiliza cuando las partículas tienen un elevado contenido metálico. La aplicabilidad real depende de muchos factores que pueden no coincidir de una planta a otra.

Datos económicos

La técnica no supone costes de inversión adicionales.

Ventajas de la implantación

Reducir los elevados costes de desecho de partículas generadas por los hornos.

Ejemplos

Esta técnica se utiliza en varias fundiciones europeas.

Publicaciones de referencia

[32, CAEF, 1997], [211, European IPPC Bureau, 2000].

4.9.5.2. Reciclaje de escoria y residuos de aluminio

Descripción

Las posibilidades de reciclaje dependen del producto y de los residuos generados. Las virutas suelen recuperarse sobre todo para la refusión interna, mientras que los otros tipos de chatarra (que contienen niveles muy altos de otros metales) normalmente se venden a empresas dedicadas a la producción de aluminio secundario.

Ventajas medioambientales

Minimización de la producción de residuos.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para las instalaciones nuevas y existentes.

Ventajas de la implantación

Reducir los elevados costes de vertido de residuos sólidos.

Ejemplos

La técnica se suele emplear habitualmente en las fundiciones de aluminio.

Publicaciones de referencia

[225, TWG, 2003]

4.10. Reducción del ruido

Descripción

Varios procedimientos del proceso de fundición originan ruido, en especial:

- manipulación de la chatarra;
- proceso de carga del horno;
- quemadores;
- MAP automatizadas;
- desmoldeo;
- inyección de arena;
- disparadoras de machos (y moldes);
- acabado;
- todos los sistemas hidráulicos y motores;
- transporte (vertido, carga, etc.).

Para lograr una reducción global de los niveles de ruido es necesario desarrollar un plan de reducción que deberá incluir la comprobación y evaluación de cada una de las fuentes. Es posible que, como resultado, deban adoptarse técnicas alternativas con menores niveles de ruido y/o que haya que aislar los puntos de origen. En el apartado 4.2.4.2 se dan ejemplos de sistemas alternativos (quemadores de oxigás en el caso de los hornos rotativos), y también en el 4.2.2.2 (escoria espumosa en los HEA). Asimismo se han propuesto algunos ejemplos de aislamientos para los hornos (apartado 4.5.3.1) y la zona de desmoldeo (4.5.9.3).

Entre las medidas generales destacan:

- utilización de compuertas reductoras de ruido en todas las puertas exteriores y cierre de todas las puertas (que deberán mantenerse cerradas todo el tiempo que sea posible), especialmente de noche;
- soplado intensivo de aire al interior de la fundición, ya que aumenta ligeramente la presión interna y limita la salida de ruido al exterior;
- aislamiento de ventiladores, aislamiento de conductos de ventilación y empleo de amortiguadores
- reducción al mínimo de los procesos de transporte durante la noche.

También puede plantearse la posibilidad de aislar mediante aislamiento el edificio de la fundición, si bien requerirá la puesta en marcha de un sistema de control climático que limite la temperatura en el interior.

Ventajas medioambientales

Reducción de la contaminación acústica.

Efectos colaterales

Aislar las instalaciones de la fundición, totalmente o en parte, puede requerir la puesta en marcha de un sistema de climatización que consume energía.

Datos operativos

Una fundición de aluminio belga está desarrollando actualmente un plan de reducción del ruido. El objetivo es reducir el nivel de ruido general de 50 a 40 dBA. Para ello se ha realizado un estudio de 170 puntos de origen y se han adoptado medidas especiales para reducir el nivel de ruido general entre las 22.00 y las 6.00 h. También se ha conducido el aire al interior de la fundición, lo que ha dado lugar a una ligera diferencia de presión que mantiene el ruido dentro de las instalaciones. El volumen de aire interior total se regenera 36 veces por hora.

Otra fundición belga se encuentra en proceso de implantación de un proyecto de reducción del ruido general consistente en aislar el edificio de la fundición. Para ello se requiere poner en marcha un sistema de climatización que permita lograr una diferencia máxima de temperaturas de 8 °C entre el interior y el exterior. Este sistema todavía se encuentra en fase de revisión, por lo que las pruebas aún no han concluido.

Aplicabilidad

Esta técnica es aplicable a todas las instalaciones, nuevas o ya existentes. El nivel de las medidas adoptadas depende de la ubicación de la fundición.

Ventajas de la implantación

Cumplimiento de las medidas de reducción del ruido de las instalaciones industriales.

Ejemplos

- MGG, Hoboken (Bélgica): plan de reducción del ruido.
- Hayes-Lemmerz, Hoboken (Bélgica): aislamiento completo del edificio.

Publicaciones de referencia

[225, TWG, 2003]

4.11. Desmantelamiento

Descripción

Técnicas a considerar:

- plantear la posibilidad del desmantelamiento de las instalaciones en la fase de diseño de las mismas; así se minimizarán riesgos y costes excesivos en el momento de llevarlo a cabo;
- en cuanto a las instalaciones existentes, es aconsejable poner en marcha un programa de mejoras de los puntos potencialmente problemáticos detectados. El objetivo de las mejoras es lograr:

- evitar en la medida de lo posible la existencia de depósitos y tuberías subterráneos (a menos que estén protegidos por barreras de contención de algún tipo o cuenten con un programa de seguimiento adecuado);
 - que se prevea el drenaje y posterior depuración de los depósitos y tuberías con anterioridad al desmantelamiento;
 - que las balsas y vertederos se diseñen teniendo en cuenta su posible lavado o clausura;
 - la utilización de aislante fácilmente desmontable que no genere partículas ni riesgos;
 - que todos los materiales usados sean reciclables (sin que por ello dejen de cumplir los objetivos operativos o de tipo medioambiental).
- desarrollo y mantenimiento de un plan de cierre de las instalaciones que demuestre que en el estado actual es posible desmantelarlas para evitar riesgos de contaminación y restituirlas a un estado de funcionamiento satisfactorio. Este plan debería actualizarse a medida que los materiales vayan cambiando. En cualquier caso, el plan de cierre deberá incluir, incluso en sus etapas iniciales, lo siguiente:
 - la extracción o depuración por descarga de todas las conducciones y depósitos en caso necesario así como su completo vaciado si el contenido llega a ser potencialmente peligroso;
 - planes que contemplen la totalidad de las canalizaciones y depósitos subterráneos;
 - el método y los recursos necesarios para limpiar las balsas;
 - el método que permita garantizar que cualquier vertedero existente en las instalaciones cumpla las condiciones de clausura necesarias;
 - la retirada del amianto u otros materiales potencialmente peligrosos a menos que exista un acuerdo que contemple que es razonable dejarlos en manos de los futuros propietarios;
 - los métodos que se han de seguir para desmantelar los edificios y construcciones, para la protección del suelo y las aguas subterráneas en instalaciones en proceso de construcción y desmantelamiento;
 - muestreos en el suelo para determinar el grado de contaminación causada por las actividades y la necesidad de adoptar las medidas pertinentes para que las instalaciones vuelvan a estar en un estado satisfactorio, tal y como se defina en el informe inicial de las mismas.

Ventajas medioambientales

Evita problemas medioambientales durante el desmantelamiento de las instalaciones.

Aplicabilidad

Las técnicas mencionadas son aplicables durante todo el ciclo de vida operativo de las instalaciones, en las fases de diseño, construcción y funcionamiento e inmediatamente después del cierre.

Publicaciones de referencia

[236, UK Environment Agency, 2001].

4.12. Herramientas de gestión medioambiental

Descripción

El mejor rendimiento medioambiental se logra normalmente instalando la mejor tecnología y utilizándola del modo más eficiente y eficaz posible como, de hecho, señala la Directiva IPPC al definir las «técnicas» como «la tecnología utilizada junto con la forma en que la instalación esté diseñada, construida, mantenida, explotada y paralizada».

Los sistemas de gestión medioambiental (SGA) son una herramienta que permite a los titulares de las instalaciones IPPC acometer el diseño, la construcción, el mantenimiento, el funcionamiento y el desmantelamiento arriba indicados de forma sistemática y demostrable. Los SGA incluyen la estructura organizativa, responsabilidades, prácticas, procedimientos, procesos y recursos necesarios para desarrollar, implementar, mantener, revisar y realizar un seguimiento de la política medioambiental. Los sistemas de gestión medio-

ambiental son realmente útiles si son parte inherente de las prácticas globales de gestión y explotación de las instalaciones.

En la Unión Europea son muchas las empresas que han decidido de forma voluntaria implantar sistemas de gestión medioambiental basados en la normativa EN ISO 14001:1996 o en el sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales EMAS (siglas en inglés). El EMAS incorpora los requisitos de gestión medioambiental de la certificación EN ISO 14001, pero además hace hincapié en el cumplimiento de la legislación, el rendimiento medioambiental y la participación de los empleados y requiere verificación externa del sistema, así como la validación por parte de una autoridad medioambiental pública (la norma EN ISO 14001 considera la puesta en conocimiento como una alternativa a la verificación externa). También hay muchas empresas que han decidido poner en marcha sus propios SGA (no estándar).

Aunque tanto los sistemas estandarizados (EN ISO 14001:1996 y EMAS) como los no estandarizados («a medida») aluden en principio a la *organización* como entidad, este documento toma una aproximación más restrictiva que no incluye todas las actividades de la organización (por ejemplo los productos o servicios), puesto que la Directiva IPPC considera que la entidad regulada es la *instalación* (como se define en el artículo 2).

El sistema de gestión medioambiental (SGA) de una instalación IPPC puede estar formado, por ejemplo, por los siguientes componentes:

- (a) definición de una política medioambiental;
- (b) planificación y establecimiento de objetivos;
- (c) implantación y procedimientos de explotación;
- (d) comprobación y acciones correctivas;
- (e) revisión por parte de la dirección;
- (f) preparación de un informe medioambiental periódico;
- (g) validación por parte de un organismo de certificación o verificación externa de SGA;
- (h) consideraciones de diseño de cara al desmantelamiento de la planta al final de su ciclo de vida útil;
- (i) desarrollo de tecnologías más limpias;
- (j) evaluación comparativa.

Los puntos anteriores se desarrollan con más detalle en las páginas siguientes. En caso de necesitar más información sobre los componentes (a) a (g), todos ellos incluidos en el EMAS, el lector puede acudir a la documentación de referencia que se indica más abajo.

(a) Definición de una política medioambiental

La dirección ejecutiva es la responsable de definir la política medioambiental de una instalación y de garantizar que:

- sea apropiada a la naturaleza, escala e impacto medioambiental de las actividades;
- incluya el compromiso de reducir la contaminación y aumentar los controles;
- incluya el compromiso de cumplir con todas las normativas y leyes medioambientales aplicables, así como con otros compromisos suscritos por la empresa;
- proporcione un marco adecuado para establecer y revisar los objetivos medioambientales;
- se documente y sea comunicada a todos los empleados;
- esté disponible para el público y todas las partes interesadas.

(b) Planificación y establecimiento de objetivos

- procedimientos de identificación de aspectos medioambientales de la instalación para determinar qué actividades tienen o pueden tener un impacto significativo sobre el medio ambiente; mantener actualizada esta información;
- procedimientos de identificación y consulta de requisitos legales o de otro tipo suscritos por parte de la empresa que sean aplicables a los aspectos medioambientales de sus actividades;
- establecimiento y revisión de los objetivos medioambientales puestos por escrito teniendo en cuenta los requisitos legales y de otro tipo, además de los puntos de vista de las partes interesadas;
- establecimiento y actualización periódica de un programa de gestión medioambiental en el que se asigne la responsabilidad de lograr los objetivos en cada uno de los departamentos y niveles afectados e indique los procedimientos y el período de tiempo en que deben lograrse.

(c) Implantación y procedimientos de explotación

Es importante disponer de mecanismos que garanticen que los procedimientos se conozcan, comprendan y cumplan, por ello la estrategia de gestión medioambiental debe incluir lo siguiente:

(i) Estructura y responsabilidad

- definir, poner por escrito e informar sobre los distintos cometidos, responsabilidades y autoridades; nombrar a un representante concreto de la dirección;
- proporcionar los recursos esenciales para la implantación y el control del sistema de gestión medioambiental, recursos humanos y habilidades personales, tecnología y recursos financieros incluidos.

(ii) Formación, concienciación y competencia

- identificar las necesidades de formación para que todos los empleados cuyo trabajo pueda afectar significativamente al impacto medioambiental de las actividades de la empresa tengan los conocimientos necesarios.

(iii) Comunicación

- establecimiento y mantenimiento de vías de comunicación interna entre los distintos niveles y departamentos, así como de procedimientos que propicien el diálogo entre las partes externas interesadas, además de procedimientos de recepción, redacción y, cuando sea razonable, respuesta a las partes externas afectadas.

(iv) Participación de los empleados

- participación de los empleados en los procesos de optimización del rendimiento medioambiental a través de los mecanismos adecuados de intervención (libro de sugerencias, grupos de trabajo de proyecto, comités medioambientales).

(v) Documentación

- establecer y mantener al día la información, en formato papel o electrónico, que describa los principales elementos del sistema de gestión y su interrelación; sugerir documentación de consulta relacionada.

(vi) Control eficiente de procesos

- control adecuado de los procesos en todas las etapas de funcionamiento posibles: preparación, puesta en marcha, funcionamiento de prueba, apagado y anomalías;
- identificación de los indicadores de rendimiento principales y los métodos de medición de los mismos (por ejemplo caudal, temperatura, composición y cantidad);
- poner por escrito y analizar las condiciones de funcionamiento anómalas para detectar el origen del problema y posteriormente atajarlo para que no se vuelva a repetir (a ello puede contribuir una cultura de empresa que no busque culpables, sino que considere que encontrar la raíz del problema es más importante que buscar un culpable).

(vii) Programa de mantenimiento

- establecimiento de un programa estructurado de mantenimiento basado en las descripciones técnicas de los equipos, normas, etc., así como en los posibles fallos y sus consecuencias;
- contribuir al programa de mantenimiento registrando adecuadamente la información relativa a los sistemas y pruebas de diagnóstico;
- asignar claramente sobre quién recae la responsabilidad de planificar y ejecutar el programa de mantenimiento.

(viii) Preparación y respuesta ante situaciones de emergencia

- establecer y mantener procedimientos de detección y respuesta ante potenciales accidentes y situaciones de emergencia, así como para evitar o mitigar el impacto medioambiental de las mismas.

(d) Comprobación y acciones correctivas**(i) Seguimiento y medición**

- establecer y mantener por escrito de forma periódica los procedimientos necesarios para el seguimiento y la medición de puntos claves de los procesos y actividades que tengan un impacto significa-

tivo sobre el medio ambiente; mantener un registro con la información necesaria para el seguimiento del rendimiento, control operativo y cumplimiento de los objetivos medioambientales de las instalaciones (*véase también el documento de referencia sobre seguimiento de las emisiones*);

- establecer y mantener por escrito un procedimiento de evaluación periódica del cumplimiento de la legislación y las normativas medioambientales aplicables.

(ii) Acciones preventivas y correctivas

- establecimiento y mantenimiento de procedimientos que determinen sobre quién recae la responsabilidad y la autoridad de hacer frente e investigar las condiciones o situaciones no autorizadas por el permiso medioambiental, otros requisitos legales u objetivos; actuaciones para mitigar las consecuencias de los posibles impactos medioambientales y para poner en marcha y completar las acciones correctivas y preventivas necesarias acordes a la gravedad del problema y al impacto medioambiental causado.

(iii) Registros

- establecimiento y puesta al día de procedimientos de identificación, mantenimiento y acceso a los registros medioambientales, que deberán ser legibles, comprensibles y permitir realizar seguimientos, además de incluir información sobre la formación así como de los resultados de las auditorías y procesos de revisión.

(iv) Auditoría

- establecimiento y mantenimiento de programas y procedimientos periódicos de auditoría de los sistemas de gestión medioambiental que prevean la participación del personal, inspección de las condiciones de funcionamiento de los equipos y revisión de registros y documentación. Todo ello deberá dar lugar a un informe escrito imparcial y objetivo a cargo de los empleados (auditorías internas) o entidades externas (auditorías externas) en el que se tratarán los siguientes aspectos: objetivos auditados, frecuencia y metodologías, responsabilidades y requisitos a la hora de realizar e informar de los resultados con el fin de determinar si el sistema de gestión medioambiental responde o no a lo planificado y si se ha implantado y desarrollado correctamente;
- completar la auditoría o ciclo de auditoría, según corresponda, en un período no superior a los tres años, en función de las características, la escala y la complejidad de las actividades, la importancia de los posibles impactos medioambientales, la importancia y gravedad de los problemas detectados en auditorías previas y el historial de problemas medioambientales, teniendo en cuenta que las actividades más complejas y con mayor impacto medioambiental posible se inspeccionan más a menudo;
- disponer de los mecanismos adecuados que garanticen el seguimiento de los resultados de la auditoría.

(v) Evaluación periódica del cumplimiento de las exigencias legales

- revisar el cumplimiento de la legislación medioambiental aplicable y las condiciones del permiso o permisos medioambientales otorgados a las instalaciones;
- poner por escrito la evaluación.

(e) Revisión por parte de la dirección

- revisión por parte de la dirección ejecutiva, con una periodicidad que deberá determinar, del sistema de gestión medioambiental para comprobar su adecuación y efectividad;
- garantizar la recopilación de información suficiente que permita a la dirección llevar a cabo la evaluación
- poner por escrito la revisión.

(f) Preparación de un informe medioambiental periódico

- preparación de un informe medioambiental que se centre de forma especial en los resultados obtenidos en comparación con los objetivos medioambientales previamente asumidos. Este informe debe tener un carácter periódico, anual o de una periodicidad mayor, dependiendo de las características de las emisiones, la generación de residuos, etc. También debe tener en cuenta las necesidades informativas de las otras partes afectadas y ser de libre acceso (por ejemplo a través de publicaciones electrónicas, bibliotecas, etc.).

Al redactar el informe el titular puede utilizar indicadores de rendimiento medioambiental existentes que sean relevantes, asegurándose en cualquier caso de que los indicadores:

- i. sirvan para evaluar con precisión los datos relativos al rendimiento de las instalaciones;
 - ii. sean comprensibles y no resulten ambiguos;
 - iii. permitan la realización de comparaciones anuales para valorar el progreso del rendimiento medioambiental de las instalaciones;
 - iv. permitan realizar comparaciones dentro del sector o a escala nacional o regional, según sea necesario;
 - v. permitan realizar las necesarias comparaciones respecto a los requisitos exigidos por las normativas.
- (g) Validación por parte de un organismo de certificación o verificación externa de SGA
- la revisión y validación del sistema de gestión, proceso de auditoría e informe medioambiental por parte de una entidad de certificación acreditada o una entidad de revisión de SGA externa pueden, si se llevan a cabo correctamente, aportar un mayor grado de credibilidad al sistema.
- (h) Consideraciones de diseño de cara al desmantelamiento de la planta al final de su ciclo de vida útil
- prestar la debida atención al impacto medioambiental potencial del desmantelamiento de las instalaciones en la fase de diseño de las mismas; plantearlo de antemano ayuda a que el proceso sea más fácil, limpio y económico;
 - el desmantelamiento implica riesgos medioambientales de contaminación de suelo (y de las aguas subterráneas) y genera grandes cantidades de residuos sólidos. Las técnicas de prevención dependen del proceso en cuestión, aunque pueden destacarse las siguientes recomendaciones generales:
 - i. evitar estructuras subterráneas;
 - ii. dotar a las instalaciones de mecanismos que faciliten su desmantelamiento;
 - iii. escoger acabados superficiales que contribuyan a la descontaminación;
 - iv. configurar los equipos de modo que se minimice la retención de sustancias químicas y se facilite el drenaje por descarga o el lavado de las mismas;
 - v. diseñar unidades flexibles y autónomas que permitan aislar las distintas fases;
 - vi. utilizar materiales biodegradables y reciclables siempre que sea posible.
- (i) Desarrollo de tecnologías más limpias
- la protección medioambiental debería ser un aspecto inherente al diseño de cualquier proceso emprendido por el titular de las instalaciones, ya que las técnicas que se incorporan en las fases iniciales de diseño (cuanto antes mejor) son más efectivas y económicas. Así, por ejemplo, plantearse el desarrollo de tecnologías más limpias puede ser una consecuencia de los estudios o las actividades de I+D. Una alternativa a las iniciativas internas podría ser mantenerse al día de las iniciativas o trabajos, según sea el caso, realizados por otros titulares o entidades dedicadas a la investigación en el mismo campo.
- (j) Evaluación comparativa
- realización de comprobaciones sistemáticas y periódicas en el sector, a nivel nacional o regional, que incluyan los siguientes aspectos: eficiencia energética y medidas de ahorro, elección de los materiales de entrada, emisiones atmosféricas y al agua (por ejemplo a partir del Registro Europeo de las Emisiones Contaminantes, EPER), consumo de agua y producción de residuos.

SGA estándar y no estándar

Los SGA pueden ser estándar o no estándar («a medida»). La implantación y el cumplimiento de un sistema internacional comúnmente aceptado, por ejemplo la norma EN ISO 14001:1996, puede dar mayor credibilidad al sistema de gestión medioambiental, sobre todo si se somete a una verificación externa apropiada. Los EMAS resultan aún más creíbles porque tienen en cuenta la opinión del público a través de los informes medioambientales y un mecanismo que asegura el cumplimiento de la legislación medioambiental aplicable. Sin embargo, en principio un sistema no estándar puede ser igualmente efectivo siempre que se diseñe e implante correctamente.

Ventajas medioambientales

La implantación y el cumplimiento del SGA hacen que el titular centre su atención en el rendimiento medioambiental de las instalaciones. En concreto, el mantenimiento del SGA y la adopción de procesos de funcionamiento claros tanto en situaciones normales como anómalas y la responsabilidad derivada de su aceptación

debería garantizar el mantenimiento en todo momento de las condiciones que han llevado a la concesión del permiso y de los demás objetivos medioambientales.

Los sistemas de gestión medioambiental también suelen ser una garantía de mejora continua del rendimiento medioambiental de las instalaciones. Cuanto peor sea la situación de partida más mejoras significativas a corto plazo pueden esperarse. Si las instalaciones ya muestran un rendimiento medioambiental global apropiado el sistema ayuda al titular a mantenerlo.

Efectos colaterales

Las técnicas de gestión medioambiental intentan hacer frente a los impactos medioambientales generales, de acuerdo con el enfoque integral que propugna la Directiva IPPC.

Datos operativos

No se ha aportado información al respecto.

Aplicabilidad

Las pautas arriba citadas normalmente son aplicables a todas las instalaciones IPPC. El alcance (nivel de detalle) y las características del SGA (es decir, estándar o no estándar) normalmente dependen de la naturaleza, la escala y la complejidad de las instalaciones, así como de los impactos medioambientales potenciales.

Datos económicos

Es difícil atribuir costes y ventajas económicas a la implantación y cumplimiento de un SGA. A continuación se presentan algunos estudios, aunque en realidad no son más que ejemplos y sus resultados no son del todo coherentes, por lo que posiblemente no sean representativos de todos los sectores de la UE y deberían sopesarse con cautela.

En un estudio sueco de 1999 se analizaron todas las empresas (en total 360) con certificación ISO o registradas en el EMAS. El porcentaje de respuestas obtenido fue del 50%; de ellas se obtienen las siguientes conclusiones:

- los costes de implantación y mantenimiento de un SGA son altos, pero no desorbitados, excepto en el caso de empresas muy pequeñas. Los costes deberían descender en el futuro;
- una de las posibles vías indicadas para rebajar los costes sería una mayor coordinación e integración de los SGA en otros sistemas de gestión;
- la mitad de los objetivos medioambientales establecidos tienen un período de retorno de un año gracias al ahorro de costes o al aumento de ingresos;
- los ahorros de costes más significativos se lograron a través del descenso en el consumo de energía, tratamientos de residuos y materias primas;
- la mayoría de empresas creen que su posición en el mercado se ha visto reforzada con los SGA. Un tercio de ellas consideran que sus ingresos han aumentado gracias al sistemas de gestión medioambiental.

En algunos países miembro el importe de las inspecciones se reduce si las instalaciones cuentan con certificación.

Algunos estudios¹ demuestran que existe una relación inversa entre el tamaño de la empresa y el coste de implantación del SGA. Una relación igualmente inversa se produciría en el período de retorno energético del

¹ Por ejemplo Dyllick y Hamschmidt (2000, 73) citado en Klemisch H. y R. Holger, *Umweltmanagementsysteme in kleinen und mittleren Unternehmen – Befunde bisheriger Umsetzung*, KNI Papers 01/02, enero de 2002, pág. 15; Clausen J., M. Keil y M. Jungwirth, *The State of EMAS in the EU. Eco-Management as a Tool for Sustainable Development – Literature*

capital invertido. De ambos elementos se deduce que la relación coste-beneficio es menos favorable para las pymes que implementan un SGA que para las grandes empresas.

De acuerdo a un estudio suizo, el coste medio de preparación e implantación de la norma 14001 es variable:

- para una empresa de entre 1 y 49 trabajadores: 64.000 CHF (44.000 EUR) para la preparación del SGA y 16.000 CHF (11.000 EUR) por cada año de funcionamiento;
- para una instalación industrial de más de 250 trabajadores: 367.000 CHF (252.000 EUR) para la preparación del SGA y 155.000 CHF (106.000 EUR) por cada año de funcionamiento.

Estos valores medios no representan necesariamente el coste real correspondiente a una instalación industrial, ya que éste depende en buena medida del número de elementos afectados (contaminantes, consumo de energía, etc.) y de la complejidad de los problemas estudiados.

Un estudio alemán reciente (Schaltegger, Stefan y Wagner, Marcus, *Umweltmanagement in deutschen Unternehmen – der aktuelle Stand der Praxis*, febrero de 2002, pág. 106) aporta los siguientes costes de SGA de varias sucursales. Nótese que las cifras son muy inferiores a las del estudio suizo citado más arriba, lo que confirma la dificultad de determinar los costes de un SGA con precisión.

Costes de preparación (EUR): ;

- Mínimos: 18.750.
- Máximos: 75.000.
- Medios: 50.000.

Costes de validación (EUR):

- Mínimos: 5.000.
- Máximos: 12.500.
- Medios: 6.000.

Un estudio realizado por el Instituto alemán de emprendedores (Unternehmerinstitut/Arbeitsgemeinschaft Selbständiger Unternehmer UNI/ASU, 1997, *Umweltmanagementbefragung – Öko-Audit in der mittelständischen Praxis – Evaluierung und Ansätze für eine Effizienzsteigerung von Umweltmanagementsystemen in der Praxis*, Bonn.) proporciona datos sobre el ahorro medio anual propiciado por el EMAS y sobre el tiempo de retorno energético. Así, por ejemplo, a unos costes de implantación de 80.000 euros al año les correspondería un ahorro anual de 50.000 euros, equivalente a un tiempo de retorno aproximado de un año y medio.

Los costes externos relativos a la verificación del sistema pueden calcularse de forma aproximada a partir de la guía publicada por el International Accreditation Forum (<http://www.iaf.nu>).

Ventajas de la implantación

Los sistemas de gestión medioambiental son una ventaja en aspectos como los siguientes:

- mejoran el conocimiento de los aspectos medioambientales de la empresa;
- sirven de base para la toma de decisiones;
- motivan al personal;
- proporcionan nuevas oportunidades para reducir los costes operativos y mejorar la calidad de los productos;
- mejoran el rendimiento medioambiental;
- mejoran la imagen de la empresa;
- reducen los costes derivados de posibles responsabilidades, seguros e incumplimientos;
- hacen que la empresa sea más atractiva para los empleados, clientes e inversores

Study, Institute for Ecological Economy Research (Berlín) y Ecologic – Institute for International and European Environmental Policy (Berlín), 2002, pág. 15.

- aumentan la confianza en los reguladores, lo que podría llevar a reducir las omisiones de las normativas;
- mejoran las relaciones con los grupos ecologistas.

Ejemplos

Los puntos (a) a (e) figuran en la norma EN ISO 14001:1996 y el sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS), mientras que los puntos (f) y (g) son específicos del EMAS. Estos dos sistemas estandarizados se utilizan en varias instalaciones IPPC. Por ejemplo, 357 empresas pertenecientes a las industrias químicas y de productos químicos europeas (código NACE 24) estaban registradas en el EMAS en julio de 2002, la mayoría de las cuales explota instalaciones IPPC.

En el Reino Unido, la agencia medioambiental de Inglaterra y Gales realizó un estudio sobre las instalaciones reguladas por el IPC (precursor del IPPC) en 2001 que demostró que el 32% de los encuestados que respondieron a las preguntas contaban con certificación ISO 14001 (el 21% de todas las instalaciones IPC) y el 7% estaban registrados en el EMAS. Todas las fábricas de cemento del Reino Unido (unas 20) han obtenido la certificación ISO 14001, y la mayoría están registradas en el EMAS. En Irlanda, donde la puesta en marcha de un SGA (no necesariamente estandarizado) es un requisito para obtener la licencia IPC, unas 100 empresas (de un total aproximado de 500 instalaciones con licencia) han desarrollado un SGA acorde a la norma ISO 14001, mientras que las otras 400 han optado por SGA no estandarizados.

Publicaciones de referencia

[78, ETSU, 1996].

(Reglamento (CE) n° 761/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se permite que las organizaciones se adhieran con carácter voluntario a un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS), OJ L114, 24/4/2001. http://europa.eu.int/comm/environment/emas/index_en.htm)

(EN ISO 14001:1996, <http://www.iso.ch/iso/en/iso9000-14000/iso14000/iso14000index.html>; <http://www.tc207.org>).

Capítulo 5.

Mejores Técnicas Disponibles para fundiciones

Para comprender mejor este capítulo y su contenido se remite al lector al prefacio del presente documento, en particular a la quinta sección del mismo titulada «Cómo interpretar y utilizar este documento». Las técnicas y los niveles de emisiones y/o consumo asociados (o márgenes de niveles) que se presentan en este apartado se basan en un proceso reiterativo compuesto por las siguientes fases:

- identificación de aspectos medioambientales clave para el sector de la fundición;
- análisis de las técnicas más importantes para resolver los aspectos clave;
- identificación de los mejores niveles de rendimiento medioambiental en base a los datos disponibles sobre la Unión Europea y el resto del mundo;
- examen de las condiciones necesarias para lograr los niveles de rendimiento necesarios, por ejemplo costes, efectos colaterales, ventajas de la implantación de las técnicas...
- elección de las mejores técnicas disponibles (MTD) y los niveles de emisiones y/o consumo correspondientes asociados al sector en el sentido general recogido por el artículo 2(11) y el anexo IV de la Directiva.

Las opiniones de los expertos de la Oficina Europea de IPPC y del grupo de trabajo técnico (GTT) creado han sido de vital importancia en cada una de las fases y en el modo en el que se presenta la información en este documento.

En base a su valoración se presentan en este capítulo técnicas, y en la medida de lo posible niveles de emisión y consumo asociados al uso de MTD, consideradas apropiadas para el sector en conjunto y que en muchos casos reflejan el rendimiento actual de algunas instalaciones del sector. En caso de proporcionar datos sobre niveles de consumo o emisiones asociados a las mejores técnicas disponibles, éstos deberán interpretarse como los resultados que propiciaría la aplicación de la técnica en cuestión en el sector, teniendo siempre presente el equilibrio entre costes y ventajas que caracteriza a las MTD. No se trata, pues, de fijar niveles límite de emisiones o consumo y no deberían interpretarse como tales. En algunos casos puede que sea técnicamente posible lograr mejores niveles de emisión o consumo, pero a causa de los costes o de efectos colaterales las MTD no se consideran apropiadas para el conjunto del sector. En algunos casos concretos con condicionantes especiales, por el contrario, sí podrían considerarse apropiadas.

Los niveles de emisión y consumo asociados al empleo de MTD deben considerarse conjuntamente con las condiciones especiales que se indiquen en cada caso (por ejemplo los períodos medios).

El concepto de «niveles asociados a las MTD» arriba descrito debe distinguirse del «nivel alcanzable» utilizado hasta ahora en el presente documento. Los niveles alcanzables derivados del uso de una técnica concreta o de un conjunto de ellas deberían considerarse como los resultados que se espera alcanzar a lo largo de un período de tiempo considerable, con las instalaciones correctamente explotadas y mantenidas, al igual que los procesos que implican el uso de las técnicas.

En el capítulo anterior, siempre que se disponía de datos sobre costes se han aportado junto con la descripción de la técnica analizada. Con ello se pretendía dar una indicación aproximada del alcance económico de los costes. Sin embargo, los costes reales de implantación de una técnica dependen en gran medida de las condiciones locales relativas, por ejemplo, a los impuestos o las tasas, así como a las características técnicas de la propia instalación. En el presente estudio resulta imposible evaluar exhaustivamente esos parámetros que dependen específicamente de las instalaciones. A falta de datos sobre costes se aportarán conclusiones sobre la viabilidad económica de las técnicas descritas a partir de la observación de las instalaciones existentes.

En este capítulo se pretenden aportar MTD generales que sirvan de punto de referencia para contrastar el rendimiento actual de las instalaciones existentes o sobre las que basar las propuestas de nuevas instalaciones. Así, se intenta que resulten útiles al determinar las condiciones más apropiadas, basadas en las MTD, para cada instalación o a la hora de establecer normas vinculantes generales como señala el artículo 9(8), con el convencimiento de que las nuevas instalaciones pueden diseñarse para que su funcionamiento cumpla o

supere incluso los niveles generales establecidos en las MTD tratadas. También se analiza si las instalaciones existentes podrían alcanzar (o superar) los niveles indicados en las MTD generales, en función de la aplicabilidad técnica y económica de las técnicas presentadas en cada caso.

Los documentos de referencia sobre MTD no crean un marco legal vinculante, su objetivo es aportar información que sirva de guía a la industria, los Estados miembros y el público en la consecución de niveles de emisión y consumo a partir del empleo de determinadas técnicas. Los valores límite concretos aplicables en cada caso deberán determinarse tomando en consideración los objetivos de la Directiva IPPC y los condicionantes locales.

La industria de la fundición es heterogénea y muy variada. Los elementos de las MTD aplicables a una fundición específica deben determinarse de acuerdo con el tipo de actividad que desarrolla. Las fundiciones están formadas, a grandes rasgos, por un área de fusión y otro de moldeo, cada uno de ellos con su propia cadena de suministro. En el caso de los moldes perdidos la cadena de suministro incluye todas las actividades relacionadas con el moldeo y la producción de machos. En este capítulo se distinguirá entre si se trata de fundiciones férreas o no férreas y si utilizan moldes permanentes o perdidos. Cada fundición puede además clasificarse en función de la técnica de fusión y el tipo de moldeo empleados. Las MTD que se presentan son aplicables a técnicas concretas o bien de carácter general, válidas para todas las instalaciones.

5.1. MTD genéricas (para la industria de la fundición)

Algunos elementos de las MTD son genéricos y afectan a todas las fundiciones, independientemente de los procesos que utilicen y del tipo de productos que fabriquen. Estas MTD hacen referencia a los flujos de material, acabado de piezas, ruido, aguas residuales, gestión medioambiental y desmantelamiento.

Gestión de flujos de material

El proceso de fundición implica utilizar, consumir, combinar o mezclar materiales de distintos tipos. El objetivo de las MTD es minimizar el consumo de materias primas y fomentar la recuperación y el reciclaje de residuos. Dicho de otro modo, las MTD buscan optimizar la gestión y el control de los flujos internos.

Objetivos de las MTD:

- proponer métodos de almacenamiento y manipulación de sólidos, líquidos y gases, como se analiza en el BREF sobre almacenamiento;
- almacenar por separado los distintos materiales de carga y las distintas calidades de un mismo material (apartado 4.1.2) para evitar riesgos y posibles deterioros (apartado 4.1.3);
- lograr que el almacenamiento se lleve a cabo de modo que la chatarra del área de almacenamiento tenga la calidad apropiada en el momento de cargarla en el horno y se evite la contaminación del suelo, como se describe en el apartado 4.1.2. En este caso las mejores técnicas disponibles consistirían en crear una superficie de almacenamiento impermeable dotada de sumidero y sistema de tratamiento, aunque la colocación de una cobertura para el pozo de almacenamiento podría ser una alternativa;
- fomentar el reciclaje interno de la chatarra en las condiciones indicadas en los apartados 4.1.4, 4.1.5 y 4.1.6;
- almacenar por separado los distintos tipos de residuos y desechos de forma que se puedan reciclar, reutilizar o eliminar;
- utilización de contenedores reciclables o de gran volumen (apartado 4.1.7);
- empleo de modelos de simulación y de procedimientos operativos y de gestión para mejorar el rendimiento de molde (apartado 4.4.1) y optimizar los flujos de materiales;
- implantar las mejores prácticas al transferir el metal fundido y manipularlo mediante cucharas (apartado 4.7.4).

Acabado de piezas

Las MTD correspondientes al corte abrasivo, granallado y rebabado consisten en capturar y tratar los gases residuales generados durante el acabado mediante un sistema seco o húmedo. El nivel de emisiones asociado

(NEA) a esta MTD en el caso de las partículas es de 5 – 20 mg/Nm³. Las técnicas de captura y depuración de los gases de salida se analizan en los apartados 4.5.10.1 y 4.5.10.2.

Las MTD aplicables al tratamiento térmico son:

- empleo de combustibles limpios (por ejemplo gas natural o combustibles con bajo nivel de azufre) en los hornos de tratamiento (apartado 4.5.11.1);
- automatización del funcionamiento del horno y del control del quemador/calentador (apartado 4.5.11.1);
- captura y evacuación de gases de salida generados por los hornos de tratamiento térmico.

Disminución de los niveles de ruido

Son MTD:

- desarrollar y poner en marcha una estrategia de reducción del ruido, con medidas generales y específicas;
- utilización de aislamientos para los procedimientos que mayor ruido generan, por ejemplo el desmoldeo (véase apartado 4.5.9.3);
- establecer medidas adicionales, como se describe en el apartado 4.10, adecuadas a las condiciones locales.

Aguas residuales

Son MTD:

- separar los distintos tipos de aguas residuales en función de su composición y carga de contaminantes;
- recoger las aguas de escorrentía superficiales y utilizar interceptores de aceite en la canalización de recogida antes de que se produzca la descarga a las aguas superficiales, como se analiza en el apartado 4.6.4;
- maximizar el reciclaje interno del agua utilizada en los procesos y destinar a distintos usos las aguas residuales tratadas (apartado 4.6.1);
- emplear sistemas de tratamiento y depuración del agua y otros caudales de aguas residuales a partir de una o más técnicas indicadas en los apartados 4.6.2 y 4.6.3.

Reducción de emisiones fugitivas

Las MTD consisten en minimizar las emisiones fugitivas originadas en varias fuentes descubiertas de la cadena de procesos mediante una combinación de las siguientes medidas. Las emisiones corresponden básicamente a pérdidas producidas durante los procedimientos de transferencia y almacenamiento, además de los derrames, como se indica en el apartado 4.5.1.1.

- evitar almacenes al aire libre o descubiertos y, en caso de que estos primeros sean imprescindibles, utilizar rociadores, aglomerantes, técnicas de gestión de almacenes, cortavientos, etc.
- cubrir las cucharas y los depósitos;
- limpiar mediante aspiración las áreas de colada y moldeo de las fundiciones con moldes de arena, como se indica en el apartado 4.5.1.1;
- limpiar las ruedas de vehículos y las carreteras;
- mantener las puertas exteriores cerradas;
- llevar a cabo un mantenimiento periódico;
- gestionar y controlar posibles fuentes de emisiones fugitivas al agua.

Estas técnicas se desarrollan en el apartado 4.5.1.1. En el documento BREF sobre almacenamiento y se describen técnicas de almacenamiento adicionales.

También es posible que las emisiones procedan de la evacuación incompleta de los gases de combustión originados a partir de fuentes confinadas, por ejemplo las generadas por los hornos durante la colada o la apertura. Las MTD consisten en minimizar estas emisiones fugitivas optimizando su captura y su depuración, teniendo en cuenta los niveles de emisión asociados que figuran en los apartados 5.2 y 5.3. En esta optimización se em-

plean una o más de las siguientes medidas, dando siempre preferencia a la recogida de los humos lo más cerca posible de la fuente que los genera:

- diseño de campanas extractoras y conductos que capturen los gases emitidos por el metal caliente, la carga del horno, la transferencia de escoria y la colada;
- utilizar aislamientos para el horno y evitar la emisión de pérdidas de humo a la atmósfera;
- colocar sistemas de recogida en el tejado/techo, si bien consumen mucha energía y sólo deberían considerarse un último recurso.

Gestión medioambiental

Existen varias técnicas de gestión medioambiental que se consideran MTD. El alcance (nivel de detalle) y las características del SGA (por ejemplo, que sea o no estandarizado) normalmente dependen de la naturaleza, la escala y la complejidad de las instalaciones, así como de la cantidad de riesgos medioambientales potenciales.

Las MTD consisten en implementar y cumplir las directrices de un sistema de gestión medioambiental (SGA) que incluya, en función de las circunstancias concurrentes, los siguientes puntos: (véase apartado 4.12)

- definición de una política medioambiental de las instalaciones a cargo de la dirección ejecutiva (su compromiso se considera una condición previa para lograr aplicar con éxito los otros aspectos del SGA);
- planificación y establecimiento de los procedimientos necesarios;
- implementación de los procedimientos, con especial atención a los siguientes aspectos:
 - organigrama y responsabilidad,
 - formación, concienciación y competencia,
 - comunicación,
 - participación de los empleados,
 - documentación,
 - control eficiente de procesos,
 - programa de mantenimiento,
 - preparación y respuesta ante posibles emergencias,
 - cumplimiento estricto de la legislación medioambiental.
- comprobación del rendimiento y adopción de medidas correctivas, con especial atención a los siguientes aspectos:
 - seguimiento y medición (ver documento de referencia sobre seguimiento de las emisiones),
 - acciones correctivas y preventivas,
 - mantenimiento de registros,
 - auditorías internas independientes (cuando sea posible) para determinar si el SGA se somete o no a la planificación acordada y si su implantación y mantenimiento han sido correctos.
- revisión por parte de la dirección ejecutiva.

Existen tres medidas complementarias más que pueden contribuir sucesivamente a las medidas anteriores, aunque su ausencia no es incongruente con las MTD:

- solicitar a un organismo acreditado de certificación o a un auditor externo al SGA que examine y valide el sistema de gestión y el proceso de auditoría;
- preparación y publicación (y, a ser posible, validación externa) de un informe medioambiental periódico que describa todos los aspectos medioambientales significativos de la instalación y permita realizar comparaciones interanuales respecto a los objetivos medioambientales fijados y otras referencias del sector;
- implementar y atenerse a un sistema internacional acreditado de cumplimiento voluntario como por ejemplo el EMAS o la norma EN ISO 14001:1996. Esta iniciativa voluntaria puede aportar mayor credibilidad al SGA, en especial el EMAS, ya que engloba todas las medidas arriba citadas. Los sistemas no estandarizados pueden ser, en principio, igualmente efectivos, siempre y cuando se diseñen y lleven a la práctica adecuadamente.

También conviene tener en cuenta las siguientes consideraciones, que podrían formar parte de los SGA y son específicas para la industria de la fundición:

- impacto medioambiental del posible desmantelamiento de la unidad en fase de diseño de nuevas plantas;
- desarrollo de tecnologías más limpias;
- siempre que sea posible, aplicación de medidas propuestas por el sector de forma periódica, entre ellas las relativas a la eficiencia y la conservación de la energía, la elección de los materiales de entrada, emisiones a la atmósfera, vertido al agua, consumo de agua y generación de residuos.

Desmantelamiento

Las MTD consisten en adoptar las medidas necesarias para evitar contaminaciones en el momento de desmantelar la planta. Como se ha descrito en el apartado 4.11, estas medidas consisten en:

- minimizar riesgos y costes futuros a través del diseño minucioso en la etapa de diseño;
- desarrollo e implementación de un programa de mejora de las instalaciones existentes;
- desarrollo y mantenimiento de un plan de cierre de las instalaciones, tanto nuevas como existentes.

En esas medidas deberán considerarse al menos los siguientes elementos de los procesos: depósitos, contenedores, tuberías, aislante, balsas y vertederos.

5.2. Fusión de metales férreos

Elección del tipo de horno

El acero puede fundirse tanto en hornos eléctricos de arco (HEA) como de inducción (HI). La elección de uno u otro tipo depende de criterios técnicos (capacidad, calidad del acero...). Gracias a su capacidad de refinado, los hornos HEA permiten fundir chatarra de peor calidad, lo que representa una ventaja desde el punto de vista del reciclaje, pero que requiere la puesta en marcha de un sistema adecuado de captura y depuración de gases residuales, como se explica más abajo.

Para fundir el hierro pueden utilizarse cubilotes, hornos eléctricos de arco, rotativos y de inducción. La elección depende de criterios económicos y técnicos.

Las MTD que se proponen a continuación son válidas para el funcionamiento de los tipos de hornos indicados.

Fusión de hierro en cubilotes

A continuación se detallan las MTD que afectan al funcionamiento de los cubilotes:

- dividir la inyección de aire (en dos filas de toberas) en el caso de los cubilotes de viento frío (apartado 4.2.1.5);
- enriquecer con oxígeno el aire de inyección, de forma continua o intermitente, con unos niveles de oxígeno de entre el 22 y el 25% (es decir, un enriquecimiento del 1%-4%) (apartado 4.2.1.6);
- minimizar los períodos de ausencia de inyección (cubilotes de viento caliente) mediante viento continuo o largas campañas (apartado 4.2.1.8). También puede considerarse la posibilidad de establecer un funcionamiento dúplex de las líneas de colada y moldeo;
- utilizar buenas prácticas de colada (citadas en el apartado 4.2.1.1) durante el funcionamiento del horno;
- utilizar coque de composición conocida y en cantidades controladas (apartado 4.2.1.2);
- depurar los gases de combustión de los hornos capturándolos, enfriándolos y sometiendo a extracción de partículas utilizando mediante una combinación de las técnicas descritas en el apartado 4.5.2.1. En cuanto a la extracción de partículas, se consideraría MTD utilizar un filtro de mangas o un lavador húmedo. Los niveles de emisión asociados a las MTD se muestran más abajo (Tabla 5.1, Tabla 5.2);
- someter los gases residuales a postcombustión en la chimenea de los CVF, en caso de que se quemen espontáneamente, y a continuación recuperar el calor para uso interno (apartado 4.5.2.3). En el caso de los CVC, utilizar una cámara de combustión aparte (apartado 4.5.2.2), y reaprovechar el calor para calentar el aire de inyección y para otros usos internos (apartado 4.7.3);

- considerar la posibilidad de utilizar el calor residual procedente de los hornos de mantenimiento en el funcionamiento dúplex e implantar un sistema de recuperación de calor en caso necesario (apartado 4.7.2);
- prevenir y minimizar las emisiones de dioxinas y furanos hasta niveles inferiores a los 0,1 ngTEQ/Nm³ mediante varias de las medidas propuestas en el apartado 4.5.1.4. En algunos casos ello puede llevar a la adopción de sistemas húmedos. La industria de la fundición ha expresado sus dudas respecto a la implantación de medidas secundarias que sólo se han ensayado en otros sectores; se cuestiona, en particular, su aplicabilidad a las fundiciones más pequeñas;
- utilizar un sistema de depuración húmeda si la colada tiene presente escoria básica (con una basicidad máxima de 2, apartado 4.2.1.3).

Los residuos generados por los cubilotes a causa de la colada son partículas, escoria y menudo de coque (usualmente denominado como coquillo).

Las MTD para gestionar los residuos son las siguientes:

- minimizar la formación de escoria adoptando una o más de las medidas de proceso incluidas en el apartado 4.9.3;
- precalentar la escoria para permitir su reutilización externa (apartado 4.9.2);
- recoger y reciclar los menudos de coque (apartado 4.9.4.1).

Fusión de acero y hierro en hornos eléctricos de arco

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos eléctricos de arco:

- poner en marcha mecanismos de control de procesos fiables y eficientes que reduzcan el tiempo de fusión y tratamiento (apartado 4.2.2.1);
- empleo de la técnica de la escoria espumosa (apartado 4.2.2.2);
- captura de los gases residuales del horno a partir de una de las técnicas estudiadas en el apartado 4.5.3.1;
- enfriar los gases residuales y realizar una depuración de partículas mediante un filtro de mangas (apartado 4.5.3.2).

Los residuos producidos por la fusión en HEA son partículas y escoria.

La MTD de gestión de los residuos consiste en:

- reciclar la partículas de polvo capturadas en el filtro reintroduciéndolas en el horno HEA (apartado 4.9.5.1).

Los niveles de emisión asociados a las MTD se muestran a continuación (Tabla 5.1, Tabla 5.3).

Fusión de acero y hierro en hornos de inducción

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos de inducción:

- utilizar chatarra limpia y evitar materiales de entrada oxidados, sucios o con arena adherida;
- emplear las buenas prácticas de carga y funcionamiento del horno descritas en el apartado 4.2.3.1;
- utilizar energía de frecuencia media y, al instalar un nuevo horno, cambiar cualquier horno de frecuencia de red por uno de frecuencia media (apartado 4.2.3.2);
- evaluar la posibilidad de recuperar el calor residual y poner en marcha cuando resulte posible un sistema de recuperación de calor (apartado 4.7.2);
- utilizar campanas de extracción, cubas de extracción por el borde o sistemas de extracción situados en la cubierta en cada horno de inducción para capturar los gases residuales (apartado 4.5.4.1) y maximizar el grado de captura en todo el ciclo de funcionamiento del horno;
- emplear sistemas secos de depuración de gases (apartado 4.5.4.2), teniendo en cuenta los niveles de emisión asociados a las MTD que figuran en la Tabla 5.1;
- mantener las emisiones de partículas por debajo de los 0,2 kg/tonelada de hierro fundido.

Fusión de hierro en horno rotativos

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos rotativos:

- implementar medidas que optimicen el rendimiento del horno según se describe en el apartado 4.2.4.1;
- utilizar un quemador de oxigás (apartado 4.2.4.2);
- capturar los gases de combustión cerca de la salida del horno, utilizar postcombustión, enfriar los gases mediante un intercambiador de calor y realizar la depuración de partículas en seco (apartado 4.5.5.1), teniendo en cuenta los niveles de emisión asociados a las MTD que figuran en la Tabla 5.1 y la Tabla 5.4;
- prevenir y minimizar las emisiones de dioxinas y furanos hasta niveles inferiores a los 0,1 ngTEQ/Nm³ mediante varias de las medidas propuestas en el apartado 4.5.1.4. En algunos casos ello puede llevar a la adopción de sistemas húmedos. La industria de la fundición ha expresado sus dudas respecto a la implantación de medidas secundarias que sólo se han ensayado en otros sectores; se cuestiona, en particular, su aplicabilidad a las fundiciones más pequeñas.

Tratamiento de metales férreos

La siguiente MTD es válida si se utiliza un convertidor AOD para el refinado del acero:

- extraer y capturar los gases de salida con una campana extractora de cúpula.

La fundición nodular se obtiene mediante nodulización, un proceso al que afectan las siguientes MTD:

- seleccionar una técnica de nodulización que no produzca gases de combustión o bien capturar el humo de MgO generado mediante una cubierta o tapa equipada de sistema de extracción o bien una campana extractora fija o móvil y
- extraer las partículas de los gases de salida con un filtro de mangas y preparar las partículas capturadas para reciclarlas.

Los niveles de emisión asociados a las MTD se muestran a continuación (Tabla 5.1).

Niveles de emisión asociados a las MTD

Los valores que se muestran a continuación son los niveles de emisiones asociados a las MTD arriba descritas. Todos ellos corresponden a la media obtenida en un período de medición factible. Si ha sido posible realizar un seguimiento continuo los datos corresponden a medias diarias. Las emisiones atmosféricas se basan en condiciones promedio (273 K, 101,3 kPa y gas seco).

Tabla 5.1. Emisiones atmosféricas asociadas al empleo de MTD en la fusión y el tratamiento del hierro

Parámetro	Nivel de emisión
Partículas ¹	5 – 20 mg/Nm ³
PCDD/PCDF	≤ 0,1 ng TEQ/Nm ³

¹ Los niveles de emisión de partículas dependen de su composición (metales pesados, dioxinas) y su flujo másico.

Tabla 5.2. Emisiones atmosféricas asociadas al empleo de MTD en la fusión en cubilotes de metales férreos

Tipo	Parámetro	Nivel de emisión (mg/Nm ³)
CVC	Monóxido de carbono	20 – 1.000
	SO ₂	20 – 100
	NO _x	10 – 200

.../...

.../...

Tipo	Parámetro	Nivel de emisión (mg/Nm ³)
CVF	SO ₂	100 – 400
	NO _x	20 – 70
	COV – NM	10 – 20
Sin coque	NO _x	160 – 400

Tabla 5.3. Emisiones atmosféricas asociadas al empleo de MTD en la fusión en hornos eléctricos de arco de metales férreos

Parámetro	Nivel de emisión (mg/Nm ³)
NO _x	10 – 50
CO	200

Tabla 5.4. Emisiones atmosféricas asociadas al empleo de MTD en la fusión en hornos rotativos de metales férreos

Parámetro	Nivel de emisión (mg/Nm ³)
SO ₂	70 – 130
NO _x	50 – 250
CO	20 – 30

5.3. Fusión de metales no férreos

Por lo que respecta a la fusión de metales férreos, el presente documento analiza únicamente la fusión de lingotes y chatarra interna al tratarse de una práctica estándar en las fundiciones no férreas.

Para fundir aluminio se emplean diversos tipos de hornos, cuya elección depende de criterios técnicos (régimen, capacidad, tipo de línea de moldeo, etc.) que se describen en el apartado 3.3 y figuran en la Tabla 3.21. Una misma fundición puede utilizar distintos tipos de hornos. De la práctica y el análisis se deduce que la fusión centralizada en hornos de alta capacidad es más eficiente desde el punto de vista energético que los crisoles pequeños utilizados para la colada en instalaciones a gran escala. No se dispone de datos, sin embargo, que permitan incluir esta técnica entre las MTD.

Para la fusión de cobre, plomo y zinc y sus aleaciones se utilizan hornos de crisol, y también de solera en las aleaciones de cobre. La elección dependen de criterios técnicos.

En cuanto a la fusión del magnesio, sólo se utilizan hornos de crisol. Para evitar la oxidación se utilizan capas protectoras de gas.

Fusión de aluminio, cobre, plomo y zinc en hornos de inducción

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos de inducción:

- emplear las buenas prácticas de carga y funcionamiento del horno descritas en el apartado 4.2.3.1;
- utilizar energía de frecuencia media y, al instalar un nuevo horno, cambiar cualquier horno de frecuencia de red por uno de frecuencia media (apartado 4.2.3.2);

- evaluar la posibilidad de recuperar el calor residual y poner en marcha cuando resulte posible un sistema de recuperación del calor (apartado 4.7.2);
- minimizar las emisiones de acuerdo con los niveles asociados a las MTD que figuran más abajo y, en caso de que sea necesario capturar los gases residuales (apartado 4.5.4.1), maximizar la recogida de los mismos a lo largo de todo el ciclo de funcionamiento y efectuar depuración de partículas en seco.

Fusión de aluminio en hornos rotativos

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos rotativos:

- implantación de medidas de optimización del rendimiento del horno, como se analiza en el apartado 4.2.4.1;
- captura de gases residuales cerca de la salida del horno y evacuación de los mismos a través de una chimenea, teniendo presentes los niveles asociados a las MTD que figuran más abajo.

Fusión de aluminio y cobre en hornos de solera

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos de solera:

- captura de gases residuales y evacuación de los mismos a través de una chimenea, teniendo presentes los niveles asociados a las MTD que figuran más abajo;
- captura de emisiones fugitivas y visibles en base a los elementos indicados en las MTD relativas a las emisiones fugitivas (más arriba, apartado 5.1) e instalación de campanas extractoras según se describe en el apartado 4.5.6.1.

Fusión de aluminio en hornos de cuba

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos de cuba:

- lograr recoger eficientemente los gases de salida al inclinar el horno y evacuarlos a través de una chimenea teniendo presentes los niveles asociados a las MTD que figuran más abajo.

Fusión de aluminio en hornos de techo radiante

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos de techo radiante:

- captura de emisiones fugitivas y visibles en base a los elementos indicados en las MTD relativas a las emisiones fugitivas (más arriba, apartado 5.1) e instalación de campanas extractoras según se describe en el apartado 4.5.6.1.

Fusión de aluminio, cobre, plomo y zinc en hornos de crisol

Las siguientes MTD afectan al funcionamiento de los hornos de crisol:

- captura de emisiones fugitivas y visibles en base a los elementos indicados en las MTD relativas a las emisiones fugitivas (más arriba, apartado 5.1) e instalación de campanas extractoras según se describe en el apartado 4.5.6.1.

Desgasificación y depuración del aluminio

Las siguientes MTD afectan a la desgasificación y la depuración del aluminio:

- uso de un impulsor móvil o fijo de gas Ar/Cl₂ o N₂/Cl₂ gas (apartado 4.2.8.1).

Fusión de magnesio

Las MTD que afectan a la fusión del magnesio son las siguientes:

- utilización de SO_2 como gas protector o aislante, también en sustitución de SF_6 . Afecta a las instalaciones que tengan una producción anual de 500 toneladas o más (apartado 4.2.7.1);
- en plantas más pequeñas, empleo de SO_2 como gas protector o aislante o adopción de medidas destinadas a minimizar el consumo y las emisiones de SF_6 , como se analiza en el apartado 4.2.7.1. En caso de utilizar SF_6 , los niveles de consumo asociados a las MTD son de $< 0,9$ kg/tonelada en técnicas de moldeo en arena y de $< 1,5$ kg/tonelada en técnicas de inyección.

Nota: en el momento en el que se llegaba a esta conclusión, se estaban poniendo en práctica precisamente otras alternativas al SF_6 (ver 4.2.7.1). El SO_2 puede ser un asunto de salud y seguridad pero también es corrosivo para los equipos.

Niveles de emisión asociados a las MTD

Los valores que se muestran a continuación son los niveles de emisión asociados a las MTD arriba descritas. Todos ellos corresponden a la media obtenida en un período de medición factible. Si ha sido posible realizar un seguimiento continuo los datos corresponden a medias diarias. Las emisiones atmosféricas se basan en condiciones promedio (273 K, 101,3 kPa y gas seco).

El nivel de emisión correspondiente a las partículas generadas en la fusión de metales no férreos es de 1 – 20 mg/Nm³. En la Tabla 5.5 figuran los valores adicionales relativos a la fusión del aluminio.

El factor de emisión asociado a las MTD relativas a las partículas generadas durante la fusión de aluminio es de 0,1–1 kg/t de aluminio fundido.

Para poder cumplir los niveles indicados de emisión asociados a las MTD puede que sea necesario instalar un equipo de depuración de gases residuales; en este caso la MTD sería utilizar un sistema húmedo de depuración de partículas.

Tabla 5.5. Emisiones atmosféricas asociadas al uso de MTD en la fusión del aluminio

Tipo de horno	Parámetro	Nivel de emisión (mg/Nm ³)
General	Cloro	3
Cuba	SO_2	30 – 50
	NO_x	120
	CO	150
	COV	100 – 150
Solera	SO_2	15
	NO_x	50
	CO	5
	COT	5

5.4. Colada en moldes perdidos

La colada en moldes perdidos consta de los procesos de moldeo, producción de machos, colada, enfriamiento y desmoldeo, incluyendo la producción de moldes de arena verde o química y la producción de machos arena química. Una vez contruidos o ensamblados los moldes y machos se procede a su llenado con metal fundido.

A continuación se dejan solidificar y enfriar antes de extraer la pieza (desmoldeo). Las técnicas de moldeo y colada disponibles y sus efectos sobre el medio ambiente están estrechamente relacionados. Los distintos aspectos de las MTD se presentan en tres categorías: moldeo en arena verde, moldeo en arena química y colada/enfriamiento/desmoldeo.

Moldeo en arena verde

La preparación de la arena verde se inicia mezclando la arena con la arcilla aglomerante y los aditivos necesarios. Puede hacerse en mezcladoras de tipo atmosférico (las más habituales) o por vacío (véase apartado 4.3.2.1). Ambos métodos se consideran MTD. Respecto al mezclado atmosférico existe un condicionante adicional: la capacidad de procesamiento de arena debe ser superior a 60 t/h.

También son MTD los siguientes aspectos relativos a la preparación de la arena verde:

- aislar las operaciones unitarias de la planta de arena (vibración sobre rejilla, depuración de partículas de la arena, enfriamiento, mezclado) y realizar una depuración de partículas en los gases de salida (apartado 4.5.8.1) teniendo presentes los niveles asociados a las MTD que figuran en la Tabla 5.6. Si el mercado local lo permite, las partículas recogidas puede reutilizarse externamente (apartado 4.8.13). Las partículas capturadas en los procedimientos de desmoldeo, dosificación y manipulación se recicla y reintegra al circuito de arena verde, hasta un máximo del 50% de la masa recogida (apartado 4.8.12);
- llevar a cabo la regeneración primaria de la arena, como se analiza en el apartado 4.8.2. Las adiciones de arena nueva dependen de la cantidad de machos que se confeccionan y su grado de compatibilidad. En los sistemas de arena verde única, los porcentajes de regeneración (masa de arena regenerada/masa de arena total) asociada a la implantación de MTD alcanzan el 98%. Si existe un alto grado de incompatibilidad entre machos los niveles asociados a las MTD descienden hasta el 90 – 94%.

Producción de machos y moldes con arena química

Se utilizan varios tipos de aglomerante, cada uno de los cuales tiene unas características y una aplicabilidad determinadas. Todos los aglomerantes se consideran MTD si se utilizan de acuerdo con las medidas aquí estudiadas, que consisten principalmente en controlar el proceso y capturar los gases de salida para reducir las emisiones al mínimo (apartados 4.3.3.3, 4.3.3.4). En la Tabla 5.6 figuran los niveles de emisión asociados a las MTD.

MTD para la preparación de arena química:

- minimizar el consumo de aglomerante y arena y las pérdidas de arena a través de medidas de control de procesos, por ejemplo control de mezclado (manual o automático), como se analiza en el apartado 4.3.3.1. Si se fabrican series que implican cambiar frecuentemente de parámetros de producción o si la producción es muy grande las MTD consisten en almacenar electrónicamente los parámetros de producción (véase apartado 4.3.3.2);
- capturar los gases de salida del área de preparación, manipulación y mantenimiento de machos antes de continuar con el proceso de moldeo;
- utilizar recubrimientos de base acuosa y sustituir el refractario de los moldes y machos por recubrimientos con base de alcohol en fundiciones que fabriquen series pequeñas o medias. El uso de recubrimientos con base de alcohol se considera MTD;
 - si los moldes o machos son grandes o complejos;
 - si la arena se aglomera con vidrio soluble;
 - en el moldeo del magnesio;
 - en la producción de acero de manganeso con recubrimiento de MgO.

Tanto las técnicas de recubrimiento al agua como con base de alcohol son MTD en fundiciones pequeñas o fundiciones generales a gran escala (véase el apartado 4.3.3.5). La implantación de la técnica al agua en ambos tipos de fundiciones es posible gracias a la existencia de sistemas de secado por microondas (apartado 4.3.3.6) y otras novedosas técnicas de secado sobre las que no se ha aportado información. Si se emplean recubrimientos con base alcohólica las MTD consisten en evacuar correctamente los gases residuales en el área de recubrimiento mediante el uso de campanas móviles o fijas, teniendo en cuenta que en las fundiciones generales afectadas no es posible realizar el moldeo en suelo.

En cuanto a la preparación de machos aglomerados con uretano y endurecidos con aminas (cajas frías), las MTD son:

- tratar el gas de salida generado durante la preparación de machos en caja fría siguiendo uno de los métodos descritos en el apartado 4.5.8.4. Las emisiones de aminas pueden mantenerse por debajo de los 5 mg/Nm³;
- recuperar las aminas del licor de lavado de gases de salida producidas por las cajas frías, siempre que su volumen total lo haga económicamente viable (apartado 4.6.5);
- utilización de disolventes con base aromática o vegetal (es decir, no aromáticos). Ambos métodos son MTD (apartado 4.3.3.7).

Las MTD consisten en minimizar la cantidad de arena destinada a ser eliminada mediante la adopción de una estrategia de regeneración y/o reutilización (véase apartado 4.8.13) de arenas químicas (en sistemas de arena única o mixta). La regeneración se ve afectada por las siguientes condiciones:

- las arenas de sistemas únicos y fraguado en frío (por ejemplo las furánicas) se regeneran a partir de técnicas mecánicas simples, como se explica en el apartado 4.8.3, en todos los casos excepto en el de las arenas con silicato. Permite alcanzar un nivel de regeneración de entre el 75 y el 80%;
- las arenas de cajas frías sin curar y los machos de curado en frío se endurecen y rompen en una misma unidad que permite una recirculación interna mínima de la arena de machos del 5 – 10% (apartado 4.8.11);
- las arenas con silicato (sistemas únicos) se regeneran someténdolas a tratamiento térmico y mecánico. El nivel de regeneración alcanzado es del 45 – 85% (media anual, apartado 4.8.10). Debería minimizarse el uso de ésteres de baja reacción;
- las arenas únicas generadas en los métodos de caja fría, SO₂ y caja caliente y las arenas orgánicas mixtas se regeneran a partir de una de las siguientes técnicas: regeneración mecánica en frío (abrasión, tambor de impacto, fricción neumática) o regeneración térmica (apartados 4.8.4, 4.8.5, 4.8.6, 4.8.7). El nivel global de regeneración depende de la cantidad de machos utilizados. En la producción de machos puede utilizarse entre un 40 y un 100% de arena regenerada, y en la producción de moldes un 90 – 100%;
- las arenas verdes y orgánicas mezcladas pueden regenerarse siguiendo el método mecánico-térmico-mecánico (apartado 4.8.8), por abrasión (apartado 4.8.4) o por fricción neumática (apartado 4.8.6). En la producción de machos puede utilizarse entre un 40 y un 100% de arena regenerada, y en la producción de moldes un 90 – 100%;
- la calidad y la composición de la arena regenerada se someten a control;
- la arena regenerada sólo puede reutilizarse en sistemas de arena compatibles. Las arenas no compatibles deberán mantenerse aparte (véase apartado 4.8.1).

Existen otros métodos de moldeo (apartado 4.3.4) y aglomerantes inorgánicos (apartado 6.5) alternativos que podrían contribuir a minimizar el impacto medioambiental de los procesos de moldeo y colada.

Colada, enfriamiento y desmoldeo

Estos tres procedimientos generan emisiones de partículas, COV y otros productos orgánicos. Las MTD en este caso consisten en:

- aislar las líneas de colada y enfriamiento e instalar un sistema de extracción para las líneas de colada en serie (apartado 4.5.9.2), y
- aislar igualmente el equipo de desmoldeo y tratar los gases de salida con un sistema de depuración de partículas seco o húmedo, como se analiza en el apartado 4.5.9.3. Los niveles de emisión asociados a las MTD figuran en la Tabla 5.6.

Niveles de emisión asociados a las MTD

A continuación se muestran los niveles de emisiones asociados a las MTD arriba descritas. Todos ellos corresponden a la media obtenida en un período de medición factible. Para casos en los que ha sido posible realizar un seguimiento continuo los datos corresponden a medias diarias. Las emisiones atmosféricas se basan en condiciones promedio (273 K, 101,3 kPa y gas seco).

Tabla 5.6. Emisiones a la atmósfera asociadas al uso de las MTD en el moldeo y colada a partir de moldes perdidos

Fuente de emisión	Parámetro	Nivel de emisión (mg/Nm ³)
General	Polvo	5 – 20
Taller de machos	Aminas	5
Unidades de regeneración	SO ₂	120
	NO _x	150

5.5. Fundición de molde permanente

La fundición con molde permanente consiste en inyectar metal fundido en un molde metálico; una vez solidificada la pieza se extrae para someterla al acabado. Los machos de arena química se utilizan hasta cierto punto en el moldeo por gravedad y el moldeo por llenado a baja presión.

Los utillajes de MAP deben recubrirse y enfriarse para una correcta solidificación y separación del molde, por eso se pulverizan con agente desmoldeante y agua de refrigeración. Las MTD para la preparación de moldes permanentes son:

- minimizar el consumo de agente desmoldeante y agua a partir de una o más de las medidas indicadas en el apartado 4.3.5.1; de este modo se evita la formación de neblina. Si las medidas de prevención no permiten lograr los niveles de emisión de sustancias orgánicas asociados a las MTD que se indican en Tabla 5.7 deberán utilizarse una campana de extracción y un PE, como se indica en el apartado 4.5.8.7;
- recoger las aguas de escorrentía mediante un circuito de aguas residuales y someterlas a tratamiento;
- recogida de fugas de líquidos de los sistemas hidráulicos a través un circuito de aguas residuales para su posterior tratamiento mediante interceptores de aceite (apartado 4.6.4) y destilación, evaporación a vacío o degradación biológica, tal y como se trata en el apartado 4.6.6.

Las MTD correspondientes a la preparación de arena química coinciden con los aspectos mencionados en el apartado 5.4. Puesto que la cantidad de arena residual generada es menor, las MTD de desmoldeo y gestión de la arena usada son distintas. Las MTD relativas a la gestión de arenas usadas en fundiciones de moldes permanentes son:

- aislar la unidad de vaciado de machos y tratar los gases de salida por medio de un sistema de depuración húmedo o seco, según se explica en el apartado 4.5.9.3, teniendo presentes los niveles asociados a las MTD que figuran en la Tabla 5.7 y
- si existe un mercado local, preparar la arena extraída de los machos para su reciclaje (apartado 4.8.13).

Niveles de emisión asociados a las MTD

A continuación se muestran los niveles de emisiones asociados a las MTD arriba descritas. Todos ellos corresponden a la media obtenida en un período de medición factible. Si ha sido posible realizar un seguimiento continuo los datos corresponden a medias diarias. Las emisiones atmosféricas se basan en condiciones promedio (273 K, 101,3 kPa y gas seco).

Tabla 5.7. Emisiones a la atmósfera asociadas al uso de las MTD en el moldeo permanente (MAP incluidas)

Parámetro	Nivel de emisión (mg/Nm ³)
Partículas	5 – 20
Neblina de aceite (C total)	5 – 10

Capítulo 6.

Técnicas emergentes

6.1. Uso de material combustible de bajo coste en los cubilotes

Descripción

Para reducir el consumo de coque (de alta calidad) se han desarrollado algunas técnicas que permiten emplear como combustible residuos sólidos de gran poder calorífico o coque de menor calidad.

Un tipo concreto de cubilote llamado horno FAR, desarrollado en Brasil, permite fundir cargas convencionales a partir de neumáticos usados y piezas de plástico (residuos de prensado de la industria de la automoción, fibras, etc.) mezclados con coque de segunda categoría. La estructura del cubilote FAR es completamente distinta a la convencional, ya que la carga metálica únicamente se introduce por la parte superior. El combustible sólido se alimenta por el lateral, lo que hace que alcance enseguida la zona caliente en la que los hidrocarburos se descomponen y queman.

Los sistemas de inyección alternativos permiten añadir fibras o polvo directamente desde las toberas o a través de unos inyectores especiales.

Ventajas medioambientales

Reducción del consumo de coque, que se sustituye por residuos sólidos (prensados de la industria de la automoción, fibras, etc.), difíciles de tratar en sistemas de combustión convencionales.

Datos operativos

Por lo que respecta al horno FAR los mejores resultados se han obtenido a partir de un 35% de fibras y un 65% de coque. Esta técnica se encuentra en fase piloto.

Efectos colaterales

La utilización de combustibles alternativos provoca cambios en la composición de los gases de combustión, que pasan a contener más partículas residuales y posiblemente más contaminantes y un mayor riesgo de presencia de dioxinas, HAP y metales pesados. Además, la eficiencia térmica se reduce.

Aplicabilidad

Este tipo de cubilote sólo puede instalarse en fundiciones nuevas, ya que el horno requiere un diseño específico. Los sistemas de inyección de combustibles sólidos más o menos densos (fibras o esponjosos de otros tipos) pueden adaptarse a los cubilotes existentes.

Datos económicos

Puesto que este proceso sólo se ha desarrollado a escala piloto no existen datos económicos sobre su utilización a escala industrial.

Ventajas de la implantación

Reducir los costes de los combustibles e impulsar la política de gestión de residuos en la fundición.

Publicaciones de referencia

[140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001]

6.2. Reciclaje de partículas eliminadas en el filtro y que tengan contenido metálico (metales féreos)

Descripción

Las partículas con contenido metálico pueden ligarse utilizando un aglomerante (preferentemente cemento) o mezclándolas con virutas de mecanizado, para aquellas fundiciones que realicen mecanizado. En este último caso, junto con las partículas podrían aglomerarse también los lodos con contenido de metal. Los aglomerados resultantes se mezclan con la carga de los hornos de inducción y se funden. El rendimiento de molde puede superar el 90%. El resto de partículas pasarán a formar parte de la escoria. En el mercado existen máquinas aglomerantes especiales.

Ventajas medioambientales

Se reduce la cantidad de residuos eliminados en los vertederos, así como la necesidad de adquirir material metálico exterior. La fracción mineral del polvo metálico no se funde y va a parar a la escoria, lo que reduce su nivel de peligrosidad.

Datos operativos

No hay datos operativos disponibles actualmente.

Efectos colaterales

Es posible que la escoria formada aumente el desgaste del refractario. La energía utilizada en la fusión también puede aumentar ligeramente. En las fundiciones de acero existe riesgo de absorción del carbono.

Aplicabilidad

Esta técnica puede implantarse en fundiciones nuevas o existentes que dispongan horno de inducción como dispositivo de fusión.

Datos económicos

En la fase de desarrollo actual no existen todavía datos económicos disponibles. Sin embargo, según cálculos iniciales correspondientes a una fundición de hierro equipada donde realicen mecanizado, el tiempo de retorno energético oscilaría entre dos y cuatro años.

Ventajas de la implantación

La principal ventaja de la implantación sería que fundir las partículas, al menos en algunos casos, podría considerarse una actividad peligrosa para la salud que implicaría costes de eliminación muy elevados para las fundiciones.

Ejemplos

No existen ejemplos de plantas en la actualidad.

Publicaciones de referencia

Esta técnica se está desarrollando en la UE en un programa de crecimiento del FP5 (BRICETS) «Metal By-Product Recovery in Induction Furnaces – Commercial, Environmental and Technical Solutions», con número de contrato G1RD-CT-2001-00482. Se prevé que el proyecto finalice en la primavera de 2004.

[140, EU Thematic Network Foundry Wastes, 2001], [202, TWG, 2002]

6.3. Recuperación de aminas por permeación de gas a partir del gas residual generado en la producción de machos

En una planta piloto logró reciclarse la amina (DMIA) a partir del gas residual de la zona de producción de machos mediante permeación de gas, siendo su composición la siguiente:

- 80 – 90% amina (DMIA),
- 10 – 20% disolvente,
- 0% agua.

Tras varios ciclos de prueba la amina reciclada se utilizó para llenar de gas machos para producir frenos de disco. La conclusión fue que no existían diferencias entre los machos experimentales y los llenados de gas con DMIA comercial. Los machos de prueba se llenaron en condiciones de producción normales y los frenos de disco resultantes se sometieron a las habituales pruebas técnicas.

Todos los resultados obtenidos se encontraron dentro de las tolerancias permitidas, lo que vino a demostrar que la DMIA reciclada puede utilizarse en condiciones de producción normales. La eficiencia económica es posible si se realiza una nueva optimización de la planta.

[217, Paul, et al., 1994]

6.4. Pulverización separada del agente desmoldeante y el agua en coladas a presión de aluminio

Descripción

En la producción de aluminio por colada a alta presión los moldes permanentes se enfrían y pulverizan con agente desmoldeante antes de la colada para evitar que el caldo se adhiera al molde. En la técnica convencional el agente desmoldeante es una mezcla de desmoldeante y agua que se pulveriza de una sola vez sobre los moldes calientes a través de varias boquillas dispuestas en línea. Parte del agua se evapora y enfría el molde sin perturbar el agente desmoldeante, mientras otra parte de la mezcla escapa del molde, lo que conlleva pérdidas de agua y agente desmoldeante. La evaporación, además, puede provocar formación de neblina (véase apartado 4.5.8.7)

En los procesos alternativos el agua y el agente desmoldeante se pulverizan por separado. Para ello se ha añadido una nueva fila de boquillas que permite pulverizar el agente desmoldeante de forma independiente. Las boquillas se pueden accionar una a una a través de un ordenador (véase Figura 6.1).

Primero se pulveriza el agua, que enfría el molde en aproximadamente 20 °C, y a continuación el agente desmoldeante. El enfriamiento inicial provoca una menor evaporación de agente desmoldeante y mejora su adherencia al molde. De este modo se reduce el consumo de desmoldeante en aproximadamente un 25%. Las mediciones termográficas revelan que esta técnica enfría los moldes de forma más intensiva y uniforme. Los ensayos demostraron que no hay fugas de agente desmoldeante que, de producirse, habría que recogerlas y posteriormente eliminarlas.



Figura 6.1.
*Boquillas múltiple
para pulverizar agua
y agente desmoldeante*

El agente desmoldeante se pulveriza sólo en las partes del molde que van a entrar en contacto con el aluminio fundido, lo que representa un ahorro adicional de desmoldeante del 30%.

La activación asistida por ordenador para las boquillas de pulverización de desmoldeante hace que la hilera de boquillas utilizada hasta ahora para el aire comprimido sea innecesaria, ya que su función la realizan las boquillas del agente desmoldeante.

Una de las ventajas de esta técnica en caso de series pequeñas o frecuentes cambios de molde es que el programa de pulverización puede guardarse en el ordenador y recuperarse posteriormente en caso necesario.

Ventajas medioambientales

El consumo de agente desmoldeante puede reducirse hasta en un 25% si se pulverizan por separado el agua y el agente desmoldeante. La activación independiente de las boquillas hace posible lograr un ahorro adicional de hasta el 30%, en función de la geometría de las piezas, ya que el agente desmoldeante se aplica sólo en las zonas de contacto molde-pieza.

Por su parte, el consumo de agua puede reducirse en un 15%. No se producen pérdidas de agua ni de agente desmoldeante (que debería eliminarse), ni tampoco emisiones gaseosas a causa de la evaporación del agente desmoldeante.

Efectos colaterales

No tiene efectos colaterales. No se prevé un aumento de los costes energéticos.

Aplicabilidad

Las pruebas analizadas en los párrafos anteriores corresponden a la inyección del aluminio. La técnica también es válida para la inyección del zinc y en el moldeo por inyección de plásticos. Si la boquilla de pulverización se utiliza a temperaturas más altas será necesario introducir modificaciones, que todavía no se han ensayado.

Datos económicos

Las ventajas económicas son consecuencia del considerable ahorro de agente desmoldeante y agua, así como de costes de eliminación, que ya no es necesaria.

Otras ventajas derivan del sensible ahorro de tiempo que se logra al cambiar de molde gracias a la posibilidad de almacenar y recuperar posteriormente los programas de pulverización.

Los costes de inversión de esta técnica son más elevados que los del proceso convencional; en contrapartida, sin embargo, pueden pulverizarse por separado diferentes moldes con la misma boquilla de pulverización.

Ventajas de la implantación

Sensible ahorro de materiales y agua.

No se producen pérdidas de mezcla de agente desmoldeante y agua (que sería necesario recoger).

Se necesita menos tiempo para configurar y adaptar la máquina.

Gran reproducibilidad de los resultados (calidad consistente).

Ejemplos

Un productor alemán fabrica y comercializa las boquillas de pulverización desde finales de 2003, y ya ha recibido solicitudes por parte de la industria. Se espera que su empleo a escala industrial se inicie también desde finales de 2003.

Publicaciones de referencia

[234, Anders, 2003].

6.5. Aglomerantes inorgánicos para la producción de machos

Descripción

Para reducir el consumo de material aglomerante inorgánico, que genera emisiones, entre ellas olores, en las fundiciones (y que pueden dar lugar a quejas por parte de los vecinos) se han desarrollado diferentes composiciones de materiales que pueden emplearse en la producción de machos por inyección de aluminio y que, de hecho, ya se han utilizado para la producción de tubos de admisión de aire para motores de coches.

Los machos se fabrican con aglomerante que contiene sulfato de magnesio y/o polifosfato. Los aglomerantes inorgánicos son básicamente mezclas de sal y agua con pequeñas cantidades de aditivos (por ejemplo cerámicos) para evitar que la arena se adhiera a la pieza. La proporción de aglomerante respecto a la cantidad en peso de la arena se sitúa entre el 3 y el 8%. Aproximadamente la mitad de este porcentaje corresponde a disolvente y agua de cristalización.

Para lograr reducir los tiempos de secado comprendidos entre 10 y 20 segundos se sopla arena precalentada (60–80 °C) en las herramientas de producción de machos calentadas (120–140 °C), de modo que el agua disolvente y de cristalización se evaporen y vayan a parar al aire. Con ello el macho cerámico inorgánico alcanzará una temperatura estable de más de 1.000 °C y retendrá toda su resistencia. Si el macho entra en contacto directo con el agua se desintegra en unos pocos segundos. El mezclado y soplado de arena caliente es un método de producción de machos patentado.

Tras la colada, el desmoldeo puede realizarse en seco o en húmedo. En la técnica en seco los grumos de arena se trituran hasta dejar sólo los granos de arena, lo que provoca que la capa de aglomerante quede prácticamente intacta si las arenas son de cuarzo. Por ello, una vez la arena de los machos se encuentra ya dentro del circuito el aglomerante deberá añadirse en proporciones de sólo un 5% de la cantidad de aglomerante utilizada inicialmente. En la extracción en húmedo las piezas se enfrían rápidamente en un baño, gracias al cual se mejora la microestructura de la pieza y se disuelve por completo el aglomerante.

Las distintas propiedades de flujo de la arena obligan a revisar los modelos de los machos y a poner en marcha un sistema de ventilación al implantar esta técnica en las plantas ya existentes. En la fase de secado los machos deben perder toda la humedad, lo que limita sus dimensiones potenciales.

Ventajas medioambientales

A diferencia del método de cajas frías, que genera emisiones de compuestos orgánicos como las aminas, productos de pirólisis y humo, en esta técnica el agno produce ningún tipo de emisión, ni durante el disparado ni durante la colada. Tampoco se generan residuos a partir de la arena residual ni se requieren costosos sistemas de regeneración de la arena. La cantidad de arena que debe sustituirse es muy pequeña.

Los aditivos cerámicos que contiene el aglomerante evitan tener que recubrir los machos.

Si los machos se extraen a partir de una técnica en seco todo el aglomerante que permanezca en la arena puede reutilizarse.

Datos operativos

La fluidez de la mezcla de aglomerante y arena es suficiente para producir machos de formas complejas como camisas de agua (culatas). La estabilidad de los machos de prueba es de 250–300 N/cm³, pero puede adaptarse a las exigencias del macho añadiendo más aglomerante.

Al no formarse gases durante la colada no hay problemas de permeabilidad del gas, lo que permite utilizar aglomerante con arenas de grano muy fino y mejora considerablemente la calidad superficial (por ejemplo la profundidad de rugosidad). El elevado grado de regeneración hace que la técnica sea viable económicamente incluso con arenas cerámicas sintéticas muy costosas o, por ejemplo, arena de zirconia.

Efectos colaterales

Puesto que el aglomerante no genera emisiones no es necesario recoger y tratar los gases residuales. El calentamiento de la mezcla de aglomerante y arena y el precalentamiento de las herramientas para disparar machos aumentan el consumo de energía en comparación con otras técnicas de producción de machos.

Aplicabilidad

Esta técnica es válida para la producción de machos por inyección de aluminio en plantas nuevas y existentes previamente adaptadas a los procesos de automatización. Se está trabajando para adaptar el aglomerante a la fundición del hierro y como material de moldeo.

Datos económicos

A pesar de que requiere calentar las herramientas disparadoras, esta técnica posibilita ahorros generales en los costes de producción de machos, gracias, entre otras cosas, al menor consumo de arena nueva y a que ya no es necesario regenerar térmicamente la arena residual ni llevarla a vertederos (ambos procedimientos son costosos). También se reducen los costes al reintroducir el aglomerante en el circuito. Por último, al ser innecesaria la etapa de tratamiento de gases residuales para extraer los compuestos orgánicos, por ejemplo aminas o productos de pirólisis, que podrían generarse al disparar y realizar el llenado de los machos confeccionados con aglomerante orgánico, los costes se reducen sensiblemente.

Según cálculos aproximados el empleo de esta técnica podría reducir los costes de producción de machos entre un 30 y un 50% en comparación con el proceso en cajas frías.

Ventajas de la implantación

Sensible reducción de costes.

Reducción de los problemas de malos olores provocados por la emisión de componentes orgánicos.

Ejemplos

Fundición VW AG, Hanover, Alemania

Publicaciones de referencia

[235, Bischoff, 2003]

Capítulo 7.

Conclusiones

7.1. Coordinación del estudio

El primer pleno del TWG tuvo lugar en abril de 1999. Sin embargo, el proyecto se suspendió en seguida, a partir de enero de 2000, a consecuencia de la sustitución de uno de los principales cargos de la Oficina europea de IPPC y no se retomó hasta noviembre de 2001. En enero de 2002 se organizó un segundo pleno del TWG para revisar el estado del estudio y las conclusiones de la primera reunión teniendo en cuenta los posibles nuevos desarrollos en el sector. En noviembre de 2002 se envió el primer borrador del BREF al TWG para que lo sometiera a estudio en noviembre de 2002. Los comentarios se valoraron e incorporaron en el documento y un segundo borrador con propuestas sobre MTD se envió a revisar en mayo de 2003. El pleno final del TWG tuvo lugar en octubre de 2003; tras ella se procedió a consultar brevemente las observaciones finales y el resumen ejecutivo antes de elaborar la versión definitiva del presente documento.

7.2. Fuentes de información

Han sido muchos los documentos de referencia aportados por centros de investigación, la industria y las autoridades para la realización de este estudio. Los documentos de MTD aportados por Bélgica [110, Vito, 2001] y la industria [32, CAEF, 1997] pueden considerarse el principio básico del presente trabajo, ya que se han tomado como punto de partida en la redacción del capítulo en el que se analizan las técnicas para la determinación de las MTD (capítulo 4). De forma complementaria se han utilizado documentos sobre MTD y guías de mejores prácticas medioambientales del Reino Unido, España, Dinamarca y Países bajos. La documentación de Alemania sobre las distintas técnicas y su implantación ha sido de gran valor. Durante la redacción del documento se han mantenido abiertos canales de información muy útiles con expertos en fundición de centros de investigación y asociaciones de Francia, Alemania, España, Reino Unido, Finlandia, Bélgica, Italia, Suecia y Portugal. Además, se visitaron plantas de Alemania, Francia, España, Bélgica y Polonia. En la ronda de consultas se obtuvo información concreta por parte de los titulares de las fundiciones, observaciones sobre la aplicabilidad y la implantación de algunas técnicas y datos operativos adicionales. A lo largo de todo el proyecto se ha prestado especial atención a la participación de los nuevos Estados miembros que cuentan con una potente industria de la fundición. Como resultado, la participación de Polonia, la República Checa y Hungría en particular en el intercambio de información ha sido activa.

Para conseguir una perspectiva global sobre la información disponible respecto a la emisión y reducción de dioxinas la delegación de la industria organizó un taller especial en septiembre de 2003. Asistieron 30 participantes, tanto miembros del TWG como expertos del sector, que aportaron datos operativos adicionales e información técnica de utilidad.

La mayoría de los documentos obtenidos durante el intercambio de información trataban sobre fundiciones férreas, lo que ha motivado una falta de representatividad de los procesos desarrollados en la industria no férrea. Con todo, los contactos con algunos expertos del sector fueron fructíferos a pesar de que no asistieran a los plenos del TWG. Durante las visitas a instalaciones de Alemania, Francia y Bélgica se obtuvo información de gran importancia al respecto. La International Magnesium Association proporcionó datos relevantes sobre los gases de cobertura utilizados en la fusión del magnesio.

Los datos incluidos en el documento muestran ciertos desequilibrios, por ejemplo entre los niveles de emisión y consumo correspondientes a los resultados de estudios realizados en un país, los datos que conciernen a las plantas utilizadas de ejemplo y los datos concretos de una única fundición.

Los datos de emisión de metales no férreos se basan principalmente en mediciones realizadas en una misma instalación. En cuanto a la fusión del cobre y el zinc, sólo se aportaron datos sobre los factores de emisión (expresados en kg/tonelada de metal o kg/tonelada de piezas). No se han facilitado datos sobre los niveles de

emisión o consumo derivados de la fusión del magnesio y el plomo. Por lo que respecta a la fusión del aluminio, no se dispone de información sobre los hornos de inducción, rotativos o de crisol. Todos los datos sobre factores de emisión recopilados se incluyen en el capítulo 3, aunque en realidad no existe una correlación clara entre los factores mencionados y las técnicas implantadas. Así pues, es posible que las conclusiones sobre MTD que incluyen niveles de emisiones asociados no sean extrapolables a la fusión de otros metales no férreos aparte del aluminio.

Este documento contiene información sobre prevención de aguas residuales y técnicas de tratamiento, a pesar de que no se dispone de datos relativos a dichas técnicas. Tampoco se han aportado datos operativos sobre la calidad del agua residual en función del tratamiento llevado a cabo. Por ello ha sido imposible determinar MTD asociadas a los niveles de emisión de aguas residuales.

No se tienen datos sobre las técnicas de reducción de emisiones de COV, lo que junto a la falta de información sobre los niveles de emisión que les corresponderían ha hecho imposible formular MTD. Algunas técnicas de reducción de emisiones de COV de los procesos de recubrimiento (también de machos y moldes) se explican en el documento BREF sobre tratamiento superficial mediante disolventes.

Por lo que respecta a la reutilización de partículas y residuos, no se han obtenido datos sobre técnicas de tratamiento o reutilización de partículas de hornos de inducción, de la escoria generada en procesos de fundición de aluminio, de las partículas generadas en el rebabado, de abrasivos o chorros de arena a pesar de que es posible reutilizar la mayoría de estos materiales para la producción secundaria de metal.

Dos países miembros facilitaron estudios sobre la legislación, pero no son necesariamente representativos de la Unión Europea en su conjunto. La información sobre la legislación vigente en ambos países puede consultarse en las siguientes direcciones de Internet:

- Austria: <http://www.ris.bka.gv.at/>
- Alemania: http://www.bmu.de/de/txt/download/b_taluft/

7.3. Grado de consenso alcanzado

Las conclusiones del trabajo fueron acordadas en el último pleno celebrada en octubre de 2003 con un elevado nivel de consenso. La industria expresó sus reticencias respecto a un asunto relativo a las dioxinas, como se ha explicado en detalle en el apartado 5.2. Al margen de esta cuestión, el consenso en las conclusiones sobre MTD, tal y como se exponen en el presente documento, fue total.

Los principales temas debatidos en la reunión final guardaban relación con técnicas de captura y tratamiento de gases residuales, minimización de emisiones fugitivas, reducción de ruido, el papel de las consideraciones medioambientales a la hora de elegir una técnica y los niveles de emisión asociados a las distintas MTD. Respecto a algunos procesos, especialmente de la industria de metales no férreos, la información disponible era incompleta y, por tanto, no pudieron determinarse niveles asociados a las MTD. Durante la reunión apenas se analizaron las técnicas específicas para fundiciones no férreas, en parte a causa de la ausencia de expertos de la industria en este campo.

La importancia de las consideraciones medioambientales en la elección inicial del tipo de horno de fusión y de los métodos de colada, según se describen en el capítulo 4 de este documento, se debatió en profundidad. Se llegó al acuerdo general de que estas elecciones son complejas y deberían basarse en motivos técnicos y de mercado, caso por caso. Ello explica que esta cuestión no figure entre las MTD.

En cuanto al tratamiento de los gases residuales, el debate concluyó con el acuerdo de que en la mayoría de procedimientos de las industrias férreas tanto los sistemas secos como los húmedos más eficientes son MTD. Los niveles de emisión asociados se basan en la información que aparece en el mismo documento.

Por lo que respecta a la reducción de las emisiones fugitivas y el ruido, se produjo cierto debate sobre la presentación de los temas y el nivel de detalle de los capítulos 4 y 5. Se llegó al acuerdo conjunto de no establecer un nivel de ruido específico que pudiera asociarse a las MTD.

7.4. Recomendaciones para líneas de trabajo futuras

El intercambio de información y su incorporación en el presente documento representan un gran paso adelante para lograr la prevención y el control integrados de la contaminación en la industria de la fundición. Sin embargo, la información disponible en algunos ámbitos descritos en el apartado 7.2, es incompleta y no ha permitido determinar conclusiones sobre las MTD. Sería de gran utilidad que investigaciones futuras estuvieran dirigidas a recopilar información sobre los siguientes aspectos:

- *Técnicas de disminución de COV*: las emisiones de COV se consideran uno de los problemas medioambientales claves del sector y se generan por descomposición térmica de los aglomerantes durante la colada, recubrimiento de moldes y machos y por fusión de chatarra con impurezas. Las emisiones de COV en las fundiciones normalmente se producen en forma de flujos de gran volumen y baja concentración que representan una carga medioambiental considerable que puede originar además olores. Se necesita información sobre las técnicas eficientes de captura y tratamiento de los flujos de gases, así como sobre los datos económicos y de emisiones asociados. También merece la pena estudiar las medidas de prevención de emisiones de COV a través del empleo de materiales aglomerantes y de recubrimiento alternativos. Los datos deberían obtenerse y comunicarse desde el momento en que se implanta y se pone en marcha la técnica;
- *Tratamiento de aguas residuales*: el tratamiento de las aguas residuales se describe de forma general en el presente documento, con datos operativos de una única fundición. Debería ampliarse, por tanto, el marco del debate mediante un intercambio de información sobre el rendimiento de un mayor número de plantas de tratamiento y la aportación de más datos operativos. La inclusión de la elección de los sistemas de depuración húmeda entre las MTD aconseja recopilar más información sobre los tratamientos de aguas residuales asociados y los niveles de emisión de los flujos de aguas residuales superficiales y canalizadas;
- *Fusión de metales no férreos*: el análisis sobre la fusión de metales no férreos se basa en la fusión de lingotes limpios y retornos internos igualmente limpios, por lo que los niveles de emisión previstos son bajos. Se necesita información más exhaustiva tanto sobre las emisiones controladas como fugitivas (por ejemplo de metales o componentes orgánicos) de fundiciones de metal no férreo basadas en prácticas operativas y expresadas como nivel de emisiones (masa/volumen de salida) y de flujo (masa/producción de metal o piezas);
- *Datos económicos*: muchas de las técnicas presentadas en el capítulo 4 carecen de información económica. Sería necesario que la industria y los Estados miembros recopilasen información sobre los proyectos en ejecución relativos a la implantación de las técnicas analizadas;
- *Eficiencia energética*: se exponen en este documento ejemplos de técnicas de recuperación de calor para hornos de inducción y cubilotes. Se necesitan ejemplos adicionales de sistemas de recuperación de calor, con resultados concretos. La información debería agruparse para todo tipo de hornos según su consumo de energía y sus pérdidas, relacionado todo ello con las técnicas específicas para el incremento de la eficiencia energética. Esto permitiría determinar los niveles de consumo de energía para la fusión de metal asociados a las BAT/MTD utilizados.

7.5. Posibles temas de estudio para futuros proyectos de I+D

El intercambio de información ha permitido identificar algunas áreas de las que se podría obtener más información a partir de proyectos de investigación y desarrollo, en concreto:

- *Seguimiento y eliminación de dioxinas*: para poder implementar completamente las medidas primarias de prevención de la formación de dioxinas se requiere entender mejor cómo contribuyen los parámetros de proceso a dicha formación. Para ello debe realizarse un seguimiento de las emisiones de dioxinas de varias instalaciones y en condiciones distintas. Además, también se necesita investigar el uso y la eficacia de algunas medidas secundarias de eliminación de dioxinas para la industria de la fundición. Estas medidas (por ejemplo la inyección de aditivos, o los filtros de manga catalíticos) se han implantado en otros sectores (por ejemplo el del acero, la incineración de residuos o la producción de metales no férreos), pero apenas se tiene información práctica sobre los posibles problemas operativos que podrían surgir al adaptarlas a las fundiciones;
- *Emisiones de mercurio*: la emisión de metales a través de la chimenea está muy relacionado con las partículas, de modo que minimizar las emisiones de partículas de polvo, como se describe en el BREF, implica minimizar también las de metales. Esto es cierto para todos los metales problemáticos utilizados en el sector, a excepción del mercurio. A diferencia de otros metales, la gran volatilidad del mercurio puede provocar emisiones gaseosas no asociadas a las partículas de polvo. Para poder diseñar una política europea sobre las

emisiones de mercurio se requiere investigar en mayor profundidad las emisiones de mercurio generadas en los procesos de fusión en general y, en concreto, en las fundiciones (no férreas);

- *Utilización en cubilotes de quemadores de oxigás:* la utilización de quemadores de oxigás en los cubilotes se describe en el apartado 4.2.1.10. La técnica presenta algunas ventajas medioambientales, pero las dificultades a la hora de implementarla limitan su adopción generalizada. El TWG constató que las investigaciones en curso han dado pie a nuevas aplicaciones, lo que abre la puerta a nuevas investigaciones y desarrollos que lleven la técnica a un nivel de desarrollo que posibilite una mayor aplicación;
- *Gases alternativos al SF_6 en la fusión del magnesio:* los gases de cobertura que sustituyen al SF_6 , por ejemplo HFC-134a y Novec 612, se han desarrollado y ensayado con éxito recientemente en algunas industrias. Estos gases representan una alternativa a la sustitución del SF_6 por SO_2 . Si se llevaran a cabo más proyectos de investigación y demostración se dispondría de información más detallada sobre las propiedades protectoras y el comportamiento durante la descomposición y la emisión de estos compuestos. De este modo se tendría una visión más clara de la aplicabilidad que podría propiciar su implantación a escala industrial;
- *Gases de sustitución alternativos al SF_6 en la fusión del magnesio:* gases de protección alternativos que sustituyan al SF_6 como el HFC-134a y el Novec 612 han sido desarrollados y probados satisfactoriamente en algunas aplicaciones industriales recientes. Estos gases representan una alternativa a la sustitución por SO_2 . Diversas investigaciones y proyectos de demostración avanzados proporcionarán mayor conocimiento sobre las propiedades protectoras, sobre el comportamiento a la descomposición y sobre el modelo de emisión de estos compuestos. Esto debería aportar una idea más clara de su aplicabilidad y podría ayudar en su incorporación a la industria.

Capítulo 8.

Referencias

- 2 Hoffmeister, J.; Reichardt, N. y Alwast, H. (1997). «NE-Metallindustrie – Betreiberleitfaden für Anlagen zum Gießen in verlorenen Formen – Sandgußverfahren», Ministerium Umwelt, Raumordnung u. Landwirtschaft NRW.
- 9 Schneider, B. (1993). «Verwertung von Gießereialtsanden durch thermisch-mechanische Aufbereitung in einer zentralen Anlage», Umweltbundesamt, 30 441-5/9.
- 11 Schachtner, J. y Müller-Späth, G. (1993). «Demonstrationsanlage zur thermischen Altsandregenerierung mit Komponententrennung für Quarz- und Chromerzsand (Demonstration Plant for Thermal Regeneration of Used Sand with Components Separation of Silica and Chromite Sand – Final Report 9010)», Umweltbundesamt, UBA3 0 441-2/4.
- 15 Gwiasda, F. (1984). «Erfassung und Reinigung von Abgasen bei der Kernfertigung einer Gießerei», Umweltbundesamt.
- 16 Gerber, E. y Gwiasda, F. (1981). «Erfassung und Reinigung von Abgasen an Ausschlagrosten einer Gießerei», Umweltbundesamt.
- 17 Strauß, D. (1983). «Emissionsminderung durch Umbau einer Kupolofenanlage (Reduction of Emissions by Reconstruction of Cupola Furnace Melting Plant – Final Report 1018)», Umweltbundesamt.
- 18 Rademacher, H. (1993). «Errichtung und Betrieb einer Absaugung der Induktionsofen-Schmelzerei und Nebenbetriebe (Establishment and Operation of Exhausting the Induction Furnaces Melting Equipment and its Sub-Plants – Final Report 1107)», Umweltbundesamt, 50 441-5/168.
- 20 Gapp, H. (1998). «Reduzierung des Gehaltes an Benzol in den Abgasen von Gieß- und Kühlstrecken durch den Einsatz eines Bio Filters (Reduction of the Benzene Content in the Exhaust Gas from Casting and Cooling Lines by Using of a Biological Filter – Final Report 2041)», Umweltbundesamt, 50 441 – 7/10.
- 21 Strauß, D. (1994). «Emissionsminderung durch Anwendung moderner Prozesstechniken in einer Gießerei (Reduction of Dust and Gaseous Emissions in a Foundry by Applying Modern Process Techniques – Final Report 1095)», Umweltbundesamt, 0 441-5/145.
- 23 Brettschneider, D. y Vennebusch, B. (1992). «Luftreinhaltung – Verbesserung der Emissionssituation eines Gießereischmelzbetriebes mit zwei Drehtrommelöfen (Improvement of Conditions for Emissions of a Melting Range with Two Rotary Furnaces) – Final Report 1119», Umweltbundesamt, 50 441 – 1/56.
- 27 Kran, H.-P.; Rudolph, A. y Reinhold, M. (1995). «Reduction of Emissions of a Hot Blast Copula Furnace by Application of a Fabric Filter and by Using of Waste Heat and Residue – Final Report», Umweltbundesamt, UBA 0 441-/ZII 1.1-50 441-5/178.
- 29 Batz, R. (1986). «Stand der Technik bei der Emissionsminderung in Eisen-, Stahl- und Tempergießereien», Umweltbundesamt.
- 32 CAEF (1997). «MTD for the Abatement of Atmospheric Pollution in the Ferrous Foundry Industry», European Commission – DG XI.E.1.
- 34 Binninger, W. (1994). «Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren – Reststoffe aus Schelzanlagen für Nichteisenmetalle (NE-Schwermetallguß)», Abfallberatungsagentur (ABAG).

- 36 Winterhalter, J.; Mauersberger, G.; Bars, P. y Toussaint, D. (1992). «Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren – Gießereialtsande aus Nichteisenmetallgießereien», Abfallberatungsagentur (ABAG).
- 37 Winterhalter, J.; Mauersberger, G.; Bars, P. y Toussaint, D. (1992). «Vermeidung von Abfällen durch abfallarme Produktionsverfahren – Gießereialtsande aus Eisen-, Stahl- und Tempergießereien», Abfallberatungsagentur (ABAG).
- 42 US EPA (1998). «EPA Office of Compliance Sector Notebook Project: Profile of the Metal Casting Industry», U.S. EPA, EPA/310-R-97-004.
- 43 Batz, R. (1996). «Dioxin- und Furanemissionen aus Schmelzanlagen in Eisen-, Temper- und Stahlgießereien», Umweltbundesamt, 0722 186X.
- 44 ETSU (1993). «Cupola Melting of Cast Iron in Iron Foundries (Good Practice – Guide 58)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 45 ETSU (1990). «Achieving High Yields in Iron Foundries (Good Practice – Guide 17)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 46 ETSU (1995). «Energy Saving in Foundry Services (Good Practice – Guide 166)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 47 ETSU (1992). «Guidance Notes for the Efficient Operation of Coreless Induction Furnaces (Good Practice – Guide 50)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 48 ETSU (1994). «Improving Metal Utilisation in Aluminium Foundries (Good Practice – Guide 142)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 55 ETSU (1993). «Electric Holding of Hot Metal in Iron Foundries», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 64 ETSU (1997). «Non-Ferrous Foundries (second edition)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 70 ETSU (1998). «Optimising Sand Use in Foundries», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 71 ETSU (1998). «Cost-Effective Management of Chemical Binders in Foundries (GG104)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 72 ETSU (1995). «Chemically Bonded Sand: Use and Reclamation (EG4)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 73 ETSU (1995). «Foundry Greensand: Use and Reclamation (EG 5 Guide)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 75 ETSU (1996). «Improved Process Control Reduces Mould Losses», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 78 ETSU (1996). «Environmental Management Systems in Foundries (GG 43 Guide)», Energy Efficiency Office – Department of the Environment.
- 80 ERM Lahmeyer International GmbH (1999). «Aufkommen und Entsorgung von Gießereialtsanden (Amount of Waste Foundry Sand and Disposal)», Umweltbundesamt.
- 82 IfG – Institut für Gießertechnik (1996). «Untersuchung von Eisen- und NE-Metallgießereien – Branchengutachten», Ministerium Baden-Württemberg, 0941-780 X.

- 96 Spillner, A. (1997). «Vermeidung von Kernsanden und Aminabfällen durch den Einsatz des Lost-foam-Verfahrens im Leichtmetall-Serienguß», Abfallberatungsagentur (ABAG).
- 103 Vereniging van Nederlandse Gemeenten (1998). «Werkboek milieumaatregelen Metaal – en Elektrotechnische Industrie», VNG Uitgeverij.
- 108 Feaf (1999). «Fundición de Metales Férreos», Fundación Entorno Empresa y Medio Ambiente.
- 110 Vito (2001). «Beste Beschikbare Technieken voor de Gieterijen», Vito, ISBN 90 382 0312 8.
- 112 Salminen, S. y Salmi, J. (1999). «The Biological Air Purification System in Purifying Odours Produced in a Foundry Process», Vapo Oy Biotech.
- 122 Kirst, J. (1999). «Regenerierung von Kernformstoffen und Formstoffen», Umweltbundesamt, UBA III 2.2-50441-14/7.
- 126 Teknologisk (2000). «A Survey of the Pollution and Environmental Conditions in the Foundry Industry», Danish Technological Institute.
- 128 IHOBE (1998). «Arenas de Moldeo en Fundiciones Ferreas», Gobierno Vasco.
- 129 infoMil (1999). «Reductie van de uitstoot van isopropylalcohol door ijzergieterijen», infoMil.
- 130 de Wilde, J. M. y ten Houten, M. R. (1999). «LCA van drie gietsystemen voor gietijzer op basis van de LCA van een compressor casing ten behoeve van een rotorhuis Z3», TNO Industrie.
- 133 De Globe B.V. (1999). «Aanvraag revisievergunning Wet milieubeheer», Provincie Limburg.
- 138 Metaalgieterij Giesen B.V. (1996). «Emissiemeetprogramma Thermische Zandregeneratie», Provincie Limburg.
- 140 EU Thematic Network Foundry Wastes (2001). «Foundry Waste Possibilities in the Future», Inasmet.
- 141 CERP (1999). «Foundry Process Emission Factors: Baseline Emissions from Automotive Foundries in Mexico», Casting Emission Reduction Program.
- 143 Inasmet y CTIF (2002). «Eurofond 2002: Sand Moulding: Key to Competitiveness» *Eurofond 2002, San Sebastian (E)*.
- 144 US Dept. of Energy (1998). «Advanced Lost Foam Casting», Office of Industrial Technologies, <http://www.oit.doe.gov/factsheets/metacast/pdfs/lostfoam.pdf>.
- 145 Inductotherm (2002). «Inductotherm Safety Manual On-line», Inductotherm, <http://www.inductotherm.com/safety/safety.htm>.
- 148 Eurofine (2002). «European Foundry Internet Network», http://eurofine.reflexe.fr/BDdebut_an.html.
- 149 Beauvais, P. y Choplin, L. (2001). «New technologies for the application of water-based coatings», *Fonderie Fondeur Aujourd'hui*, 201, pp. 9-29.
- 150 ETSU (1998). «Long campaign hot-blast cupolas in iron foundries», GPCS366.
- 151 Gemco (1999). «Sand Cleaner», Gemco Engineers Foundry Projects.
- 152 Notzon, I. y Heil, D. (1998). «Verminderung von Kernsanden aus dem CO2-Wasserglas-Verfahren durch mechanische Regenerierung», Abfallberatungsagentur (ABAG).

- 153 Umweltbundesamt (2002). «Techniken zur Regenerierung von Mono- und Mischsand aus Giessereien», Umweltbundesamt, personal communication.
- 154 Baum (2002). «personal communication», firma Bröer, personal communication.
- 155 European IPPC Bureau (2001). «Reference Document on Best Available Techniques in the Non-Ferrous Metal Industries», European Commission.
- 156 Godinot, P. (2001). «Evolution of the Cupola in Europe», Fonderie Fondateurs Aujourd'hui, 205, pp. 28-40.
- 157 Godinot, P.; Charbonnier, M.; Dervin, B. y Morin, A. (1999). «Le traitement des fumées de cubilot», Fonderie Fondateurs d'Aujourd'hui, 188, pp. 37-43.
- 158 Charbonnier, M.; Godinot, P. y Stephan, J. (1998). «Devenir des poussières de cubilots dépoussiérés à sec», Fonderie Fondateur Aujourd'hui, 174, pp. 44-52.
- 160 UK Environment Agency (2002). «Interim Guidance for the A2 Ferrous Foundries Sector – External Consultation Draft», IPPC S(A2)2.01 (2002).
- 161 UK Environment Agency (2002). «Process Guidance Note Draft Electrical, Crucible and Reverberatory Furnaces», UK Environment Agency, PG 2/3 (2002).
- 163 UK Environment Agency (2002). «DRAFT Process Guidance Note: Hot and Cubilote de viento fríos and Horno rotativos», UK Environment Agency, 163.
- 164 UK Environment Agency (2002). «Draft Process Guidance Note Processes for melting and producing aluminium and its alloys», UK Environment Agency, PG 2/6a(2002).
- 165 UK Environment Agency (2002). «Draft Process Guidance Note Processes for melting and producing magnesium and its alloys», UK Environment Agency, PG 2/6b(2002).
- 168 CAEF (2002). «Data relating to the European Foundry Industry», Committee of European Foundry Associations, <http://www.caef-eurofoundry.org/industry.htm>.
- 169 Orkas, J. (2001). «Technical and environmental requirements for surplus foundry sand utilisation», Helsinki University of Technology.
- 170 Godinot, P. y Carlier, P. (1999). «Le Cubilot sans Coke», Fonderie – Fondateurs d'Aujourd'hui, 185, pp. 32-38.
- 171 The Castings Development Centre (1999). «Beneficial Re-use for Managers», The Castings Development Center.
- 172 Neumann, F. (1994). «Gusseisen», expert verlag.
- 173 Huelsen, W. B. (1985). «Arc furnace emission control», The British Foundryman, July 1985, pp. 302-309.
- 174 Brown, J. R. (2000). «Foseco Ferrous Foundryman's Handbook», Butterworth-Heinemann, ISBN0 7506 4284 X.
- 175 Brown, J. R. (1999). «Foseco Non-ferrous Foundryman's Handbook 11th Ed.», Butterworth Heineman, ISBN 0 7506 4286 6.
- 176 ETSU (1998). «Induction Melting of Aluminium», Good practice guide 229.
- 177 Silva Ribeiro, C. A. (2002). «Mass balance data for non-ferrous foundries», Associação Portuguesa de Fundição.

- 178 Wenk, L. (1995). «Use of hexachloroethane for refinement of aluminium alloys and grain refinement of aluminium containing magnesium alloys», Verein Deutscher Giessereifachleute (VDG), personal communication.
- 179 Hoppenstedt (2002). «Guss Produkte Jahreshandbuch», Giessereien – Zulieferer – Ausstatter.
- 180 Assofond (2002). «Italian Foundry dust emission data», Assofond.
- 181 Ruffin, A. y Godinot, P. (1998). «Recyclage des poussières du cubilot», Fonderie Fondateurs Aujourd'hui, 175, pp. 18-41.
- 182 Closset, B. (2002). «SF6 replacement», International Magnesium Association, personal communication.
- 183 Goovaerts, L. (2002). «Emission data from site visits», Vito, personal communication.
- 184 Godinot, P. y Rissent, S. (2002). «Bibliographical study and survey on the coke-gas cupola», Fonderie fondeur d'aujourd'hui, 216, pp. 32-41.
- 185 Spitz, G. (2002). «Los datos operativos PSA foundry», PSA Sept-Fons, personal communication.
- 186 Stephan, J. (1996). «Régénération thermique des sables de fonderie – caractérisation d'une installation Regetherm 500», Fonderie Fondateurs d'Aujourd'hui, 158, pp. 37-47.
- 187 Stephan, J. (1997). «Régénération thermique des sables de fonderie – caractérisation d'une installation Richards PX800», Fonderie Fondateurs d'Aujourd'hui, 170, pp. 21-53.
- 188 Stephan, J. (2000). «Régénération thermique des sables de fonderie – caractérisation d'une installation Fataluminium Eco-Rec», Fonderie Fondateurs d'Aujourd'hui, 198, pp. 54-69.
- 189 Hüttenes-Albertus (2002). «Die neue Cold-box Generation».
- 190 Schubert, W. y Gjestland, H. «Use of SO2 as protection gas in magnesium die casting».
- 191 IMA; Erickson, S. E.; King, J. F. y Mellerud, T. «Recommended practices for the conservation of sulphur hexafluoride in magnesium melting operations», International Magnesium Association, technical committee report.
- 192 Gjestland, H. y Westengen, H. (1996). «Use of SF6 in the magnesium industry, an environmental challenge» 3rd International Magnesium Conference, Manchester.
- 194 UNEP IPCC (2002). «Climate change 2001: the Scientific basis», Intergovernmental Panel on Climate Change, http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/001.htm.
- 195 UBA (2003). «Waste Water from Iron, Steel and Malleable Iron Foundry», Umweltbundesamt.
- 196 Unido (2002). «Cleaner Production in Metalworking (foundry)», Unido Information Sources on Cleaner Production, <http://www.unido.org/ssites/env/sectors/sectors303.html#1>.
- 197 Nalonchem (2002). «Foundry coke», <http://www.nalonchem.com/productos.htm>.
- 198 Georg Fischer «Einsaugsystem für Kupolöfen», GF.
- 199 Metalodlew s.a. (2002). «De-dusting system for Horno eléctrico de arcos in the cast steel foundry Metalodlew s.a.», Metalodlew s.a.,.
- 200 Metalodlew s.a. (2002). «A site for regenerating of self-hardening moulding core sands in the cast steel foundry Metalodlew s.a.», Metalodlew.

- 201 CEN (2000). «Definition and classification of grades of steel (EN10020)», European Committee for Standardisation, EN10020.
- 202 TWG (2002). «Comments to first draft».
- 203 Linxe, D. (2002). «Le prototypage rapide et ses applications en fonderie», CTIF.
- 204 Carnicer Alfonso, P. L. (2001). «Emisiones de un Horno Rotativo de Oxigas para la fabricación de fundición férrea. Diagnóstico y medidas correctoras.», Universidad del Pais Vasco.
- 205 European IPPC Bureau (2003). «Reference Document on Best Available Techniques on Emissions from Storage», European Commission.
- 206 Ditze, A. y Scharf, C. (2000). «Remelting of Magnesium type 1 scrap with or without flux?», Magnesium Industry Website, <http://www.magnesium-industry.com/Library/Highlights/Paper%20of%20the%20Month/papers/Remelting%20of%20Magnesium%20Type%201%20Scrap%20with%20or%20without%20Flux.pdf>.
- 207 Drews, B. (1996). «Simultaneous mixing and cooling of moulding sand under vacuum», Casting Plant+Technology International, 2, pp. 4-10.
- 208 Devanny, J. S. (1998). «Cleaning the Air, Biologically», Civil Engineering, september, pp. 46-49.
- 209 Metalodlew s.a. (2003). «Environment-frienly conditions and improvement of work conditions», Metalodlew, <http://metalodlew.nss.pl/eng/produkcja/srodowisko/index.php>.
- 210 Martínez de Morentin Ronda, J. (2002). «Los datos operativos Lur-Sue Foundry», Lur-Sue, personal communication.
- 211 European IPPC Bureau (2000). «Best Available Techniques Reference Document on the production of iron and steel», European Commission.
- 212 Zalensas, D. L. (1993). «Aluminium Castings Technology, 2nd ed.», American Foundrymen Society.
- 213 CTIF y CQRDA (2002). «Cast Aluminium Alloys – The reference guide», Artecomm document engineering.
- 214 Gerl, S. (2003). «Aufbereitung von Feststoffmischungen mit Evactherm-Vakuummischern», Giesserei-Praxis, 1-2003, pp. 17-22.
- 215 Müller, G. (1996). «Direkterfassung von Emissionen aus Formkästen im Groß- und Einzelguß (Hohl- und Vollform)», BIA, ISBN 3-88383-425-4.
- 216 Hobelsberger, H.; Kröger, H. y Nisi, D. (1997). «Erste Erfahrungen met einem weiterentwickelten umweltverträglichen Cold-Box-System bei Daimler-Benz», Giesserei, 84/21, pp. 48-49.
- 217 Paul, H.; Nisi, D. y Timm, J. (1994). «Solvent (amine) recycling from the exhaust air of a core shop by means of gas permeation» GIFA-Kongress Giessereitechnik '94, Düsseldorf (D).
- 218 Harnisch, J. y Schwarz, W. (2003). «Cost and impact on emissions of potential regulatory framework for reducing emissions of hydrofluorocarbons, perfluorocarbons and sulphur hexafluoride», Ecofys GmbH, Öko-Recherche, B4-3040/2002/336380/MAR/E1.
- 219 Castings Technology International (2003). «Replicast (R)», CTI, http://www.castingsdev.com/tech_services/Replicast/Replicast.htm.

- 223 Rauch, E.; Sigmund, A. y Galovsky, U. (2003). «Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte des In-house-Recycling von Mg-Legierungen», http://www.lkr.at/german/news/news1/pdf/technische_betriebswirtschaftliche.pdf.
- 224 Helber, J.; Bautz, H. y Wolf, G. (2000). «PCDD-/PCDF-Emissionen bei Kupolöfen» Conference Internationale sur le Cubilot, Strasbourg.
- 225 TWG (2003). «Comments to the Second draft».
- 226 CTIF (1997). «Evolution des moyens d'élaboration de la fonte liquide», Ademe, 4.02.0025.
- 227 Godinot, P. (2004). «The economical future of cupola» International cupola conference, Trier.
- 228 Galante, G.; Michilli, O. y Maspeto, R. (1997). «No-bake as we see it», Impianti Machine Fonderia.
- 229 Lilja, B. G.; Westberg, H. y Nayström, P. (2000). «Survey of isocyanates in foundries, parts 1-5», Swedish Foundry Association – Svenska Gjuteriföreningen, 000317.
- 230 CAEF (2003). «Presentations of the Dioxin Workshop» Dioxin Workshop 24/09/2003, Brussels.
- 231 UNEP (2003). «Formation of PCDD and PCDF – an overview» Stockholm convention on persistent organic pollutants, expert group on MTD and BEP, Research Triangle Park (USA).
- 232 Novem (2000). «Vervangen cokes-gestookte kroesoven door aardgas/zuurstof-gestookte trommeloven», Tenders Industriële Energiebesparing, 39520/0047.
- 233 IARC (1997). «Silica, some silicates, coal dust and para-aramid fibrils», International Agency for Research on Cancer.
- 234 Anders, U. (2003). «Ökologisch und ökonomisch optimierter Trennstoffeinsatz beim Aluminium-Druckguss», Integrierter Umweltschutz in Gießereien, Verein Deutscher Gießereifachleute.
- 235 Bischoff, U. (2003). «Untersuchungen zum Einsatz eines wasserlosen, anorganischen Kernbinders auf Basis von Magnesiumsulfat in einer Aluminiumleichtmetallgießerei», Universität Bergakademie.
- 236 UK Environment Agency (2001). «Guidance for the recovery and Disposal of hazardous and non-hazardous waste (other than by incineration and landfill)», SEPA, IPPC S5.06.
- 237 HUT (2003). «Foundry pictures database», Helsinki University of Technology.

Nota: Los números no siguen un orden secuencial, sino que hacen referencia a la numeración de la base de datos de la Oficina europea de IPPC (material técnico sobre forja y fundición). Sólo se incluyen las fuentes utilizadas en el presente documento.

Capítulo 9.

Glosario

9.1. Siglas y abreviaturas

ACV	análisis de ciclo de vida
ADI	hierro dúctil austemplado
AF	alcohol furfurílico
AFS	American Foundrymen Society
AFS (número)	medición de la distribución por tamaños de la arena de fundición
AOD (convertidor)	convertidor de decarburación por argón-oxígeno
AOX	haluros orgánicos adsorbibles
BREF	documento de referencia sobre MTD
BTEX	benceno, tolueno, etilbenceno, xileno
BTX	benceno, tolueno, xileno
CAD	(antes de cifras): dólar canadiense, divisa ISO
CAD	(en general): diseño asistido por ordenador
CAEF	Committee of Associations of European Foundries
CAM	fabricación asistida por ordenador
CVC	cubilote de viento caliente
CVF	cubilote de viento frío
CNC	control numérico por ordenador
COV	compuesto orgánico volátil
COV – NM	compuesto orgánico volátil no metánico
DEM	Deutsche Mark (marco alemán, divisa ISO)
der.	derecha
DMEA	dimetiletilamina
DMIA	dimetilisopropilamina
DPMA	dimetilpropilamina
HEA	horno eléctrico de arco
EF	factor de emisiones
EIPPCB	Oficina europea de IPPC
EPER	Registro Europeo de las Emisiones Contaminantes
EPS	poliestireno expandido
EUR	euro
GBP	Libra Esterlina, divisa ISO
GTT	grupo de trabajo técnico

GWP	potencial de calentamiento global
HAP	hidrocarburos aromáticos policíclicos
HCE	hexacloroetano
HFC	hidrofluorocarbono
IFP	compactación isostática en caliente
HP	alta pureza (aleaciones de magnesio)
ID (ventilador)	ventilador de tiro inducido
IEF	Information Exchange Forum (foro de consulta informal en el marco de la Directiva IPPC)
HI	horno de inducción
IMA	International Magnesium Association
IPA	alcohol isopropílico
IPPC	prevención y control integrados de la contaminación
IPTS	Institute for Prospective Technological Studies
izq.	izquierda
JRC	Joint Research Centre (centro común de investigación)
MAP	moldeo a alta presión
MDI	diisocianato de metilo
PM	partículas
MTD	mejores técnicas disponibles
n.a.	no aplicable
NEA	nivel de emisiones asociado
PCB	bifenilo policlorado
PCDD/F	dibenzodioxinas policloradas y furanos
PE	precipitador electrostático
PE	polietileno
PEVA	acetato de polietilenvinilo
PF	fenol – formaldehído
PFC	compuestos perfluorocarbonados
PMMA	polimetilmetacrilato
PPC	pérdidas por calcinación
Ppm	partes por millón
PYME	pequeñas y medianas empresas
HR	horno rotativo
RP	prototipado rápido
RPM	Fracción respirable de partículas
s.d.	sin datos
SGA	sistema de gestión medioambiental
SS	sólidos secos

TEA	triethylamina
TEQ	valor equivalente tóxico
TWA	límite medio ponderado en el tiempo
UF	urea-formaldehído
UO	unidades de olor
USD	dólar de Estados Unidos, divisa ISO
VODC	convertidor de decarburación por oxígeno y vacío

9.2. Términos

Acero	aleación férrea que solidifica por una reacción peritética. El contenido (masa) de hierro es superior al de cualquier otro elemento, mientras que el contenido de carbono suele ser inferior al 2%; la aleación también contiene otros elementos.
Afinado del grano	tratamiento líquido al que se somete el metal en una fase tardía del proceso de fusión para que el grano quede más fino y equiaxial durante la solidificación.
Arena verde	mezcla de arena, arcilla y aditivos utilizada para producir moldes.
Austenizado	proceso de tratamiento térmico que mantiene la aleación por encima de temperatura de transformación durante un período de tiempo suficiente para garantizar que la matriz se transforme por completo en austenita.
Capacidad de fusión	capacidad teórica de producción de caldo de un horno, que a partir de la producción horaria debería multiplicarse por 24 en caso necesario.
Capacidad de producción	producción de «pieza buena» y capacidad, basadas en la capacidad teórica de la fundición si funcionase (y fuese técnicamente posible hacerlo) durante 24 horas.
Circuito de arena	componentes y áreas de la fundición utilizados en el almacenamiento, transporte, preparación y tratamiento de la arena.
Coeficiente	proporción de sílice y sosa ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$); se emplea para distinguir entre silicatos (de sodio).
Contaminante	sustancia concreta o grupo de sustancias que pueden afectar negativamente al medio ambiente.
Diagrama de Jungblüth o diagrama de red	diagrama que representa la influencia de la velocidad de inyección y la carga de coque sobre la temperatura de vaciado del metal y la velocidad de fusión; se utiliza con los cubilotes.
Emisión	liberación directa o indirecta de sustancias, vibraciones, calor o ruidos procedentes de fuentes concretas o difusas de las instalaciones a la atmósfera, el agua o el suelo.
Emisión difusa	emisiones generadas por el contacto directo de partículas volátiles o ligeras con el entorno (la atmósfera, en condiciones de funcionamiento normales). Pueden originarse a partir de: • el diseño mismo de los equipos (p. ej. filtros, equipos de secado...); • las condiciones de funcionamiento (por ej. al transferir materiales entre contenedores); • el tipo de procedimiento (por ejemplo mantenimiento); • un proceso de liberación gradual a otros materiales (p. ej. agua de refrigeración o residual). Las emisiones fugitivas son parte de las emisiones difusas.

Factor atmosférico	λ , proporción de aire añadido respecto a la cantidad estequiométrica de aire necesario para la completa oxidación.
Fundición gris	hierro con fractura de color gris; puede ser de tipo laminar, nodular o de grafito compacto, aunque el término suele emplearse en referencia al hierro laminar.
Fundición laminar	Fundición de hierro con carbono en forma de copos cuya sección tiene forma de láminas orientadas más o menos aleatoriamente.
Fundición maleable	Hierro parcialmente forjable o al que se podría dar algunas formas mecánicamente; se produce por tratamiento térmico de dos tipos de fundición de partida, maleable de corazón blanco y maleable de corazón negro. Normalmente tienen una tasa de carbono en forma de grafito muy baja y una superficie de fractura más o menos blanca en función de cada uno de los tipos.
Fundición nodular	fundición de hierro con carbono en forma nodular/esferoidal, normalmente llamado hierro dúctil.
Fundición de hierro	aleación férrea que solidifica con una reacción de solidificación eutéctica, sea cual sea la composición química pero con un contenido de carbono normalmente superior al 2%.
Horno de solera	horno estático de calentamiento directo también llamado de reverbero o de achique.
Inclusión	(término específico del sector) impureza en la estructura del metal que constituye un defecto posterior.
Instalación existente	instalación en funcionamiento o, de acuerdo con la legislación vigente antes de la fecha de entrada en vigor de la Directiva, instalación autorizada o, desde el punto de vista de la autoridad competente, solicitante de un permiso de autorización completo, siempre y cuando las instalaciones entren en funcionamiento antes de la fecha de entrada en vigor de la Directiva.
Materiales férreos	materiales constituidos en su mayor parte por hierro o con un contenido de hierro superior en porcentaje de peso al cualquier otro elemento presente (según norma EN10020:2000; §2.1).
Materiales no férreos	todos los materiales que no son férreos.
Molde completo	técnica de moldeo perdido en la que se emplea un modelo generalmente de poliestireno en arena química, que se pierde durante la colada; se utiliza normalmente para fabricar grandes piezas.
Molde perdido	o modelo de uso único: modelo especialmente diseñado para cada moldeo y que se destruye tras la colada. Suele estar formado por arena ligada químicamente o con arcilla e incluso suelta. El moldeo a la cera perdida puede incluirse también dentro de esta familia.
Molde permanente	o uso múltiple de un molde; molde empleado en el moldeo por gravedad o a baja presión, inyección a presión o moldeo por centrifugación; los moldes empleados suelen ser metálicos.

Fundición moldeada (sustantivo)	término general referido a productos que han adquirido su forma definitiva o casi definitiva, formados por solidificación de un metal o una aleación en un molde (ISO 3134-4: 1985).
Moldeo en moldes perdidos	cualquier proceso de moldeo y colada para el que se utilicen moldes perdidos, por ejemplo: preparación de la arena, producción de machos y moldes, colada, enfriamiento y desmoldeo.
Moldeo en moldes permanentes	cualquier proceso del área de machos y moldeo en el que se utilicen moldes permanentes; por ejemplo preparación de la arena, producción de machos, inyección, extracción y vaciado de la arena de machos.
Nodulización	tratamiento del magnesio al hierro colado que modifica la forma de las láminas y las convierte en nodulares/esferoidales.
Normalización	proceso de tratamiento térmico que enfría la aleación al aire ambiente a partir de una temperatura superior a la de transformación.
Porcentaje de regeneración	proporción existente entre la masa de arena regenerada y la masa total de arena usada para la producción de moldes y machos, expresada en porcentaje.
Postcombustión	ignición o quemado de inquemados provenientes de gases de combustión mediante la inyección de aire o el uso de un quemador; se emplea para reducir la cantidad de CO y compuestos orgánicos (volátiles).
Proceso a la espuma perdida	técnica de moldeo en la que se emplean modelos de (poliestireno) espuma y arena suelta y el modelo se pierde (quema) al verter el metal.
Reciclaje de arena	preparación en las instalaciones de la arena usada para su reutilización externa.
Recocido	proceso de tratamiento térmico que aporta ductilidad a la aleación gracias al lento enfriamiento del metal a través de su margen de temperatura de transformación.
Regeneración primaria	procesamiento de la arena verde usada mediante rejillas, tamizado, enfriamiento y mezcla con arena nueva para su reintroducción en el circuito de arena de la fundición.
Regeneración secundaria (arena)	conjunto de medidas (mecánicas, neumáticas, térmicas y húmedas) adoptadas para eliminar las capas de aglomerante usado de la arena (= recuperación); restituir la arena a un nivel de calidad igual o superior al de la arena nueva.
Reutilización externa	reaprovechamiento de la arena para diversos fines.
Técnica «al final de la cadena»	Técnica de reducción de las emisiones o consumos finales mediante procesos adicionales pero que no modifica sustancialmente el proceso de producción de machos. sinónimos: «técnica secundaria», «técnica de reducción», «técnica de eliminación». Antónimos: «técnica integrada en los procesos», «técnica primaria» (una técnica que de algún modo altera el funcionamiento del proceso de producción de machos para reducir las emisiones o consumos brutos).
Templado	tratamiento térmico que tras el endurecimiento de la aleación consiste en un calentamiento a una temperatura inferior a A_{c1} seguido de enfriamiento al aire ambiente; tras el austenizado y su inmersión en un líquido la aleación adquiere su dureza y resistencia máximas.

9.4. Equivalencia lingüística de los términos técnicos más comunes

English	Deutsch	Français	Nederlands	Español	Italiano	Magyar
bentonite	Bentonit	bentonite	bentoniet	bentonita	bentonite	bentonit
bridging	Brückenbildung	accrochage	brugvorming	colgadura	formazione di corona	adagfennakadás
burr	Grat	barbe	braam	Rebaba	bava	fánc
cast iron	Gusseisen	fonte	gietijzer	Hierro	ghisa	öntöttvas
cast steel	Stahlguss	acier moulé	gietstaal	acero moldeado	getti d'acciaio	öntött acél
casting	Giessen	couler	het gieten	Moldeo, fundición	colata	öntés
chamfer	Abschrägung	chanfrein	gietsysteem	Chaflán	cianfrinatura	formázási ferdeség
channel induction furnace	Rinnenofen	four à induction à canal	kanaal inductieoven	horno de inducción de canal	forno a canale	csatornás indukciós kemence
coating	Schlichte	enduit, potelage	coating/deklaag	recubrimiento, pintura	vernice, verniciatura	formabevonó anyag
cold-box	kalter Kernkaste, Cold-box	boîte froide	cold-box	caja fría	cassa fredda	cold-box
core	Kern	noyau	kern	Macho	anima	mag
corebox	Kernkasten	boîte à noyaux	kerndoos	caja de macho	cassa d'anima	magszekrény
core-making	Kernfertigung	noyautage	kernmakerij	producción de machos	formatura di anime	magkészítés
crucible furnace	Tiegelofen	four à creuset	kroesoven	horno de crisol	forno a crogiolo	tégelykemence
decoring	Entkernen	debouillage	ontkernen	eliminación del macho	sterratura delle anime	kimagozás
die	Druckgiessform	moule	vorm	Molde	stampo	kokilla, nyomásos öntőforma
die lubricant	Druckgiessschlichte	potelage	koelsmeermiddel	lubricante	distaccante	kokilla-, nyomásos öntőforma kenőanyag
drying oven	Backofen	étuve	droogstoof	horno de secado, estufa	essiccatore	szárító kemence
fettling	putzen	ébarbage	ontbramen	rebabado, desmazarotado	sbavatura	tisztítás
grinding	schleifen	meulage	slippen	amolado	molatura	csiszolás, köszörülés
induction furnace	Induktionsofen	four à induction	inductieoven	horno de inducción	forno ad induzione	indukciós kemence

English	Deutsch	Français	Nederlands	Español	Italiano	Magyar
lamellar iron or grey cast iron	Grauguss, GGL	fonte lamellaire, fonte grise	lamellair gietijzer	fundición gris	ghisa a grafite lamellare, ghisa grigia	lemezgrafitos vagy szürke öntöttvas
lustrous carbon	Glanzkohlenstoff	carbone brillant	glanskoolvormer	Carbono brillante	carbono brillante	fényes karbon
malleable iron	temperguss (GT)	fonte malléable	smeedbaar gietijzer	fundición maleable	ghisa malleabile	tempervas
mixer	Menger	malaxeur	menger	mezclador	mescolatore	keverő
mould	Form	mote	vorm	Molde	forme	forma
nodular iron, ductile iron, SG iron	GGG, Gusseisen mit Kugelgraphit	fonte à graphite sphéroïdal, fonte ductile	nodulair gietijzer	fundición nodular, fundición dúctil, fundición con grafito esferoidal	ghisa sferoidale	gömbgrafitos öntöttvas
pouring	Giessen	couler	gieten	Colada	colata	öntés
sand	Sand	sable	zand	Arena	sabbia	homok
shaft furnace	Schachtofen	four à cuve	schachtoven	horno de cuba	forno a tino	aknás kemence
shake-out	Ausleeren	décochage	uitschudden	desmoldeo, desarenado	distaffatura	űrítés, kirázás
shot blasting	Schleuderstrahlen	grenallage	gritstralen	Granallado	granigliatura	szemcseszórás
sprue	Einguss	canal de coulée	voedingskanaal	canal de colada	canale di colata	álló beömlő
turnings	Späne	copeaux	spanen	Vírutas	trucioli	forgács
veins	rissen	gerces	vinnen	Vetas	crestine	repedések

Capítulo 10.

Anexos

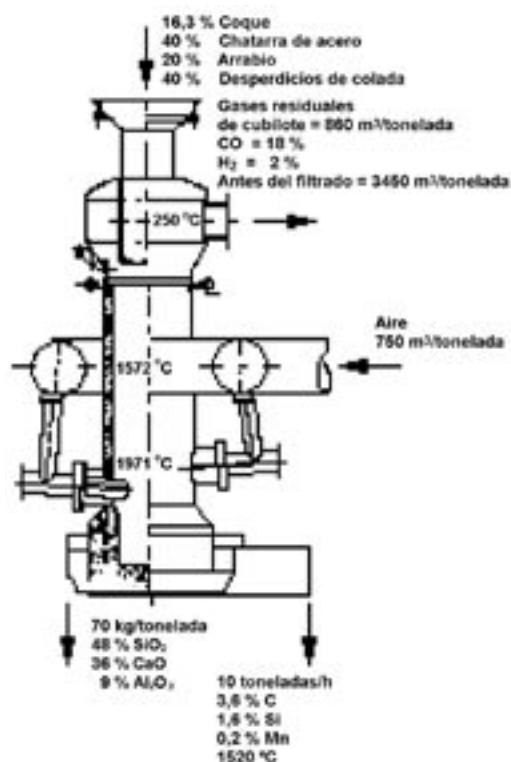
10.1. Anexo 1. Resumen de datos de fundición de hierro en varios tipos de cubilotes y en hornos de inducción

Neumann realizó en 1994 un estudio sobre el consumo y los niveles de emisión de las distintas modificaciones técnicas introducidas en la colada de los cubilotes, cuyos datos se muestran a continuación. Todos la información hace referencia a un sistema de producción de fundición nodular en un horno de 10 t/h con un nivel de C del 3,6% y de Si del 1,6% y una temperatura de vaciado de 1.530 °C. Los balances que aparecen en la Figura 10.1 muestran las entradas, salidas y temperaturas del proceso; estas últimas se contrastan con las distintas prácticas operativas. La comparación de los distintos balances permite evaluar las consecuencias de las modificaciones.

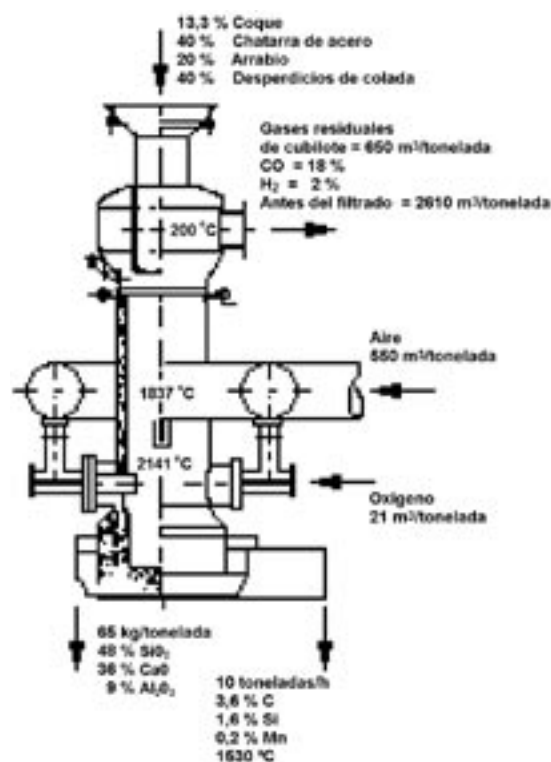
En el apartado 4.5.2 se presentan y analizan datos operativos adicionales correspondientes a los cubilotes de viento caliente y frío equipados de distintos equipos de lavado de gases residuales. Los datos se han obtenido de plantas en funcionamiento.

Las técnicas que muestran las imágenes son las siguientes:

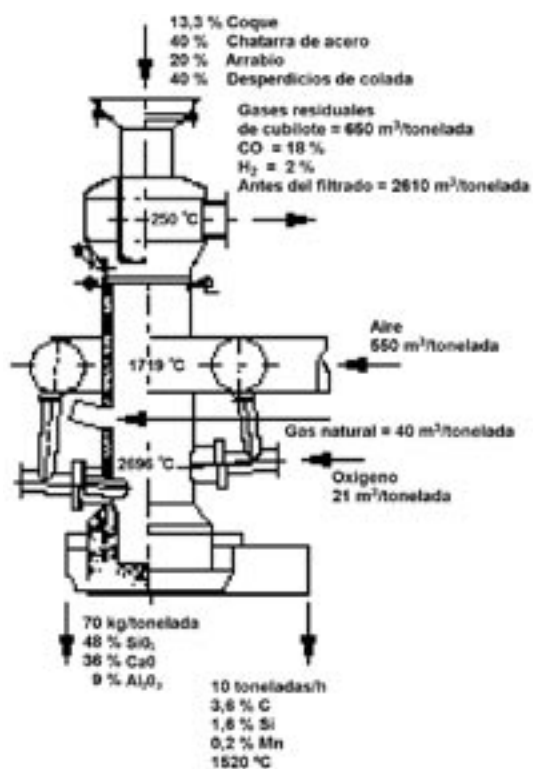
- (A): inyección de aire frío, segunda hilera de toberas,
- (B): inyección de aire frío, inyección de oxígeno,
- (C): inyección de aire frío con quemador de gas, inyección de oxígeno,
- (D): inyección de aire caliente (500 °C), campaña larga,
- (E): inyección de aire caliente con calentador eléctrico auxiliar (750 °C),
- (F): inyección de aire caliente, inyección de oxígeno (6%),
- (G): inyección de aire caliente con calentador de plasma auxiliar (1 450 °C),
- (H): cubilote sin coque en funcionamiento dúplex (sobrecalentamiento eléctrico).



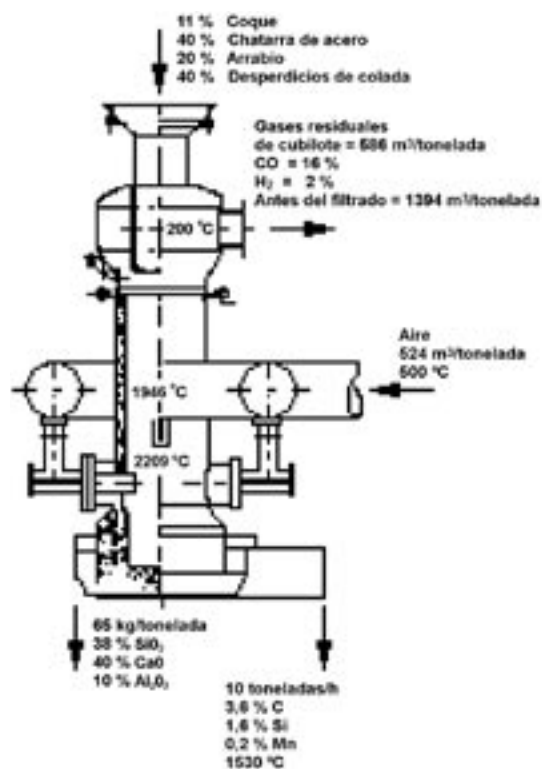
A



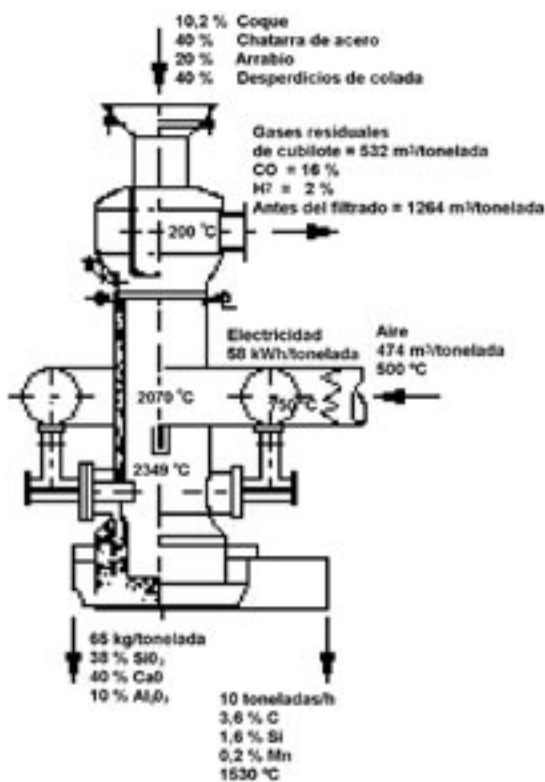
B



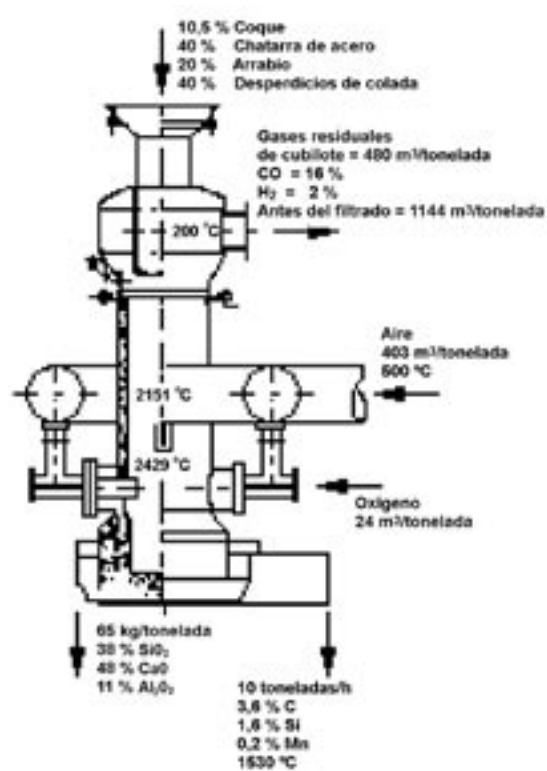
C



D



E



F

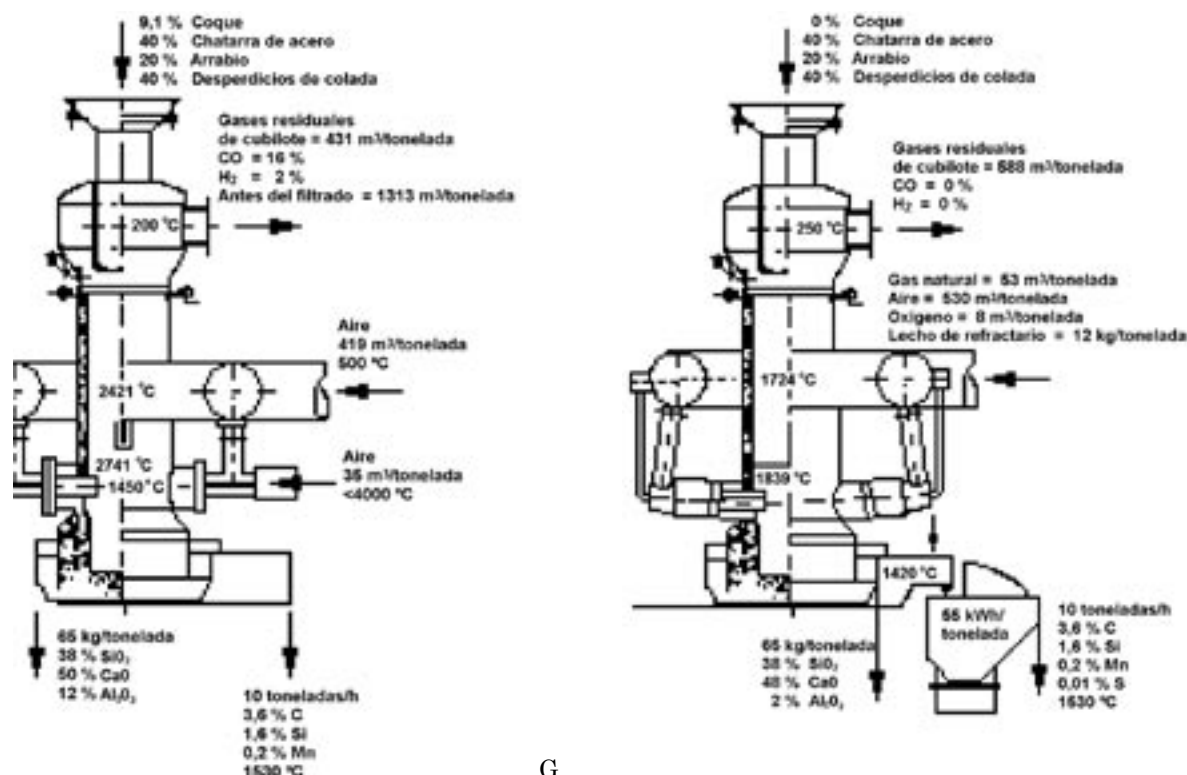


Figura 10.1. Balance de entrada y salida correspondiente a diversas modificaciones técnicas introducidas en la fusión en cubilotes [172, Neumann, 1994]

La información operativa figura en la Tabla 10.1, la Tabla 10.2 y la Tabla 10.3 e incluye datos económicos basados en los costes unitarios aportados. Los datos operativos hacen referencia a la producción de hierro colado con un 3,3% de C y un 2% de Si. En el funcionamiento con viento frío se utiliza un 35% de chatarra de acero, un porcentaje que asciende al 60% en los cubilotes de viento caliente; este aspecto se ha tenido en cuenta al estudiar la carburación necesaria, para la que se utiliza también C, que se suministra a través de briquetas de SiC.

El cálculo del balance térmico da como resultado los valores de eficiencia en la transferencia térmica indicados. El cubilote de viento frío muestra una eficiencia inferior al 30%, aunque la utilización de oxígeno o aire secundario la aumenta al 37 – 40%. El cubilote de viento caliente muestra una eficiencia aún mayor, siempre que la pared del horno esté recubierta de material refractario; de no ser así caería por debajo del 40%, un porcentaje que podría compensarse ligeramente añadiendo oxígeno. La eficiencia del cubilote sin coque con sobrecalentamiento por inducción es muy elevada y se acerca al 60%.

Los costes operativos calculados incluyen la amortización de los costes de inversión, pero no los de personal. La diferencia de costes entre las distintas técnicas es bastante pequeña. En el cálculo se ha tenido en cuenta el mayor consumo de coque y el precio superior de la chatarra/materias primas utilizados en el cubilote de viento frío. En cuanto al precalentamiento del aire mediante antorcha de plasma, el aumento del consumo de electricidad implica un incremento de los costes que, en la práctica, puede compensarse utilizando más virutas como materia prima. El horno sin coque es el que tiene menores costes. En el análisis realizado, sin embargo, no se consideran los efectos de los costes locales e incertidumbres como la influencia de la producción por hora, que deberían tenerse en cuenta. Todos los datos se refieren a instalaciones con una producción por hora significativa, lo que va en detrimento del rendimiento de los cubilotes de viento frío.

Tabla 10.1. Datos operativos de un cubilote de viento frío (10 t/h) [172, Neumann, 1994]

	Unidades o coste unitario	Normal	O ₂	Segunda hilera	2ª hilera + O ₂
Cantidad específica					
Coque (fusión)	kg/tonelada	150	125	120	105
Coque (carburación)	kg/tonelada	10	10	10	10
Gas natural	m ³ /tonelada				
Electricidad	kWh/tonelada	20	20	20	20
Oxígeno	%	–	3	–	2
Aire de inyección	m ³ /tonelada	711	562	604	517
Gases residuales del cubilote	m ³ /tonelada	902	724	731	628
Gases residuales filtrados	m ³ /tonelada	3.022	2.150	1.765	1.646
Escoria	kg/tonelada	36	35	46	45
Refractario	kg/tonelada	5,2	5,2	4,8	4,8
Briquetas de SiC (45% SiC)	kg/tonelada	28,5	28,5	31,3	30,3
Entrada térmica total	MJ/tonelada	5.003	3.643	3.588	3.416
Transferencia térmica al hierro	%	26,9	37,2	37,8	39,8
Costes					
Inversión	millones de euros	2,81	2,91	3,06	3,16
Aleación	332EUR/tonelada	9,44	9,44	10,36	10,36
Aditivos	10 EUR/tonelada	0,20	0,20	0,20	0,20
Coque	204 EUR/tonelada	32,65	27,55	26,53	23,47
Chatarra de acero	128 EUR/tonelada	44,64	44,64	44,64	44,64
Chatarra de hierro	128 EUR/tonelada	12,76	12,76	12,76	12,76
Arrabio	194 EUR/tonelada	38,78	38,78	38,78	38,78
Gas natural	153 EUR/1.000 m ³	0,31	0,31	0,31	0,31
Electricidad	89 EUR/MWh	1,79	1,79	1,79	1,79
Oxígeno	179 EUR/1.000 m ³	–	3,01	–	1,84
Grafito	561 EUR/tonelada	–	–	–	–
Refractario	765 EUR/tonelada	3,98	3,98	3,67	3,67
Capital	10 años/8%	11,22	11,63	12,24	12,65
Coste de fusión total	EUR/tonelada	155,77	154,08	151,28	150,46

Composición del hierro: 3,3% C; 2,0% Si; 0,3% Mn; 0,1 S; 1.500 °C

Composición de la carga: 35% chatarra de acero; 35% desperdicios de colada o retornos; 20% arrabio; 10% chatarra de hierro

Tabla 10.2. Datos operativos de un cubilote de viento caliente de larga campaña (10 t/h) [172, Neumann, 1994]

	Unidades o coste unitario	Tipo A*	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Características						
Cambio de horno diario		Sí	No	No	No	No
Enriquecimiento de oxígeno		No	No	Sí	No	Sí
Revestimiento		Sí	Sí	Sí	No	No
Cantidad específica						
Coque (fusión)	kg/tonelada	95	100	85	115	100
Coque (carburación)	kg/tonelada	8	7	7	8	8
Oxígeno	%	–	–	3	–	3
Aire	m³/tonelada	571	566	425	626	473
Gases residuales del cubilote	m³/tonelada	680	667	519	746	586
Gases filtrados	m³/tonelada	1.798	1.471	1.134	1.819	1.473
Escoria	kg/tonelada	60	60	60	60	60
Refractario	kg/tonelada	15	6	6	1,5	1,5
Briquetas de SiC (45% SiC)	kg/tonelada	50	53	53	50	50
Entrada térmica total	MJ/tonelada	3.756	3.630	3.076	4.098	3.534
Transferencia térmica al hierro	%	39,8	40,2	44,9	36,5	38,7
Costes						
Inversión	millones de euros	3,42	3,57	3,65	3,49	3,55
Aleación	332 EUR/tonelada	16,58	17,60	17,60	16,58	16,58
Aditivos	10 EUR/tonelada	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Coque	204 EUR/tonelada	21,02	21,84	18,78	25,10	22,04
Chatarra de acero	128 EUR/tonelada	76,53	76,53	76,53	76,53	76,53
Chatarra de hierro	128 EUR/tonelada	12,76	12,76	12,76	12,76	12,76
Oxígeno	179 EUR/1.000 m³	–	–	3,06	–	3,42
Refractario	765 EUR/tonelada	11,48	4,59	4,59	1,12	1,12
Capital	10 años/8%	13,67	14,29	14,59	13,98	14,18
Coste de fusión total	EUR/tonelada	152,24	147,81	148,11	146,28	146,84

* Ya no se construyen plantas nuevas

Composición del hierro: 3,3% C; 2,0% Si; 0,3% Mn; 0,1 S; 1.530 °C

Composición de la carga: 60% chatarra de acero; 30% retornos; 10% chatarra de hierro

Tabla 10.3. Datos operativos de un cubilote sin coque y un cubilote con inyección de viento caliente con precalentamiento de aire [172, Neumann, 1994]

	Unidades o coste unitario	Cubilote sin coque con O ₂ + sobrecalentamiento de inducción	Cubilote de viento caliente	
			Precal. de aire con plasma	Precal. de aire con resistencia eléctrica
Cantidad específica				
Coque (fusión)	kg/tonelada	–	81	90
Coque (carburación)	kg/tonelada	–	10	12
Gas natural	m³/tonelada	55	2	2
Electricidad	kWh/t	80	175	82
Oxígeno	%	1,5	–	–
Aire de inyección	m³/tonelada	5,30	419	474
Gases residuales del cubilote	m³/tonelada	692	451	531
Gases residuales filtrados	m³/tonelada	815	1.313	1.264
Escoria	kg/tonelada	58	59	60
Refractario	kg/tonelada	16	9,3	4,3
Briquetas de SiC (45% SiC)	kg/tonelada	–	13,7	15,4
Briquetas de FeSi (1 kg de Si por briqueta)	kg/tonelada	8	–	–
Entrada térmica total	MJ/tonelada	2.562	3.952	3.320
Transferencia térmica al hierro	%	58,4	41,4	41,5
Costes				
Inversión	millones de euros	2,81	5,10	3,83
Aleación	332 EUR/tonelada		4,54	5,10
Briquetas de Fe-Si	454 EUR/tonelada Si	3,62		
Aditivos	10 EUR/tonelada	0,56	0,56	0,56
Coque	204 EUR/tonelada		18,57	23,06
Electricidad	89 EUR/MWh	7,14	15,61	7,30
Gas	128/1.000 m³	6,99	0,31	0,31
Chatarra de acero	128 EUR/tonelada	44,64	44,64	44,64
Chatarra de hierro	128 EUR/tonelada	44,64	44,64	44,64
Grafito	561 EUR/tonelada	6,73		
Oxígeno	179/1.000 m³	1,43		
Refractario	102 EUR/tonelada	0,61	0,31	0,20
Refractario	765 EUR/tonelada	7,65	4,80	1,79
Capital	10 años/8%	11,22	20,41	15,31
Coste de fusión total	EUR/tonelada	135,26	154,39	142,91

Composición del hierro: 3,3% C; 2,0% Si; 0,3% Mn; 0,1 S; 1.530 °C

Composición de la carga: 35% chatarra de acero; 30% desperdicios de colada o retornos; 35% chatarra de hierro

CTIF también ha calculado los costes del hierro líquido en un estudio comparativo sobre los distintos métodos de fusión [226, CTIF, 1997]. El estudio, realizado en 1997, se actualizó en 2003 [227, Godinot, 2004].

Tabla 10.4. Comparación de costes del hierro líquido (junio de 2003; producción en masa de 10 t/h)

Unidades	CALIDAD	Fundición laminar (ENGJL 250)				Fundición nodular (ENGJS 400 – 15)			
		Cubilote de viento frío	Cubilote de viento caliente	Cubilote sin coque	Horno de inducción	Cubilote de viento caliente	Cubilote sin coque	Horno de inducción	
EUR/t	Carga de metal	95,80	59,52	96,68	72,97	49,75	73,52	59,80	
	Ferroaleaciones y aditivos	7,62	13,09	27,22	25,72	5,27	24,17	24,85	
	Energía y fluidos	33,14	35,26	20,29	27,28	40,12	21,07	27,28	
	Revestimientos	3,73	4,29	8,79	1,47	4,55	8,79	1,47	
	Costes de personal	10,05	10	11	9,10	10,42	11	9,10	
	Mantenimiento	1,55	3,15	0,16	0,93	3,15	0,16	0,93	
	Medio ambiente	4,50	4,30	3,15	0,55	4,30	3,15	0,55	
	Desulfuración					10,33			
	Amortización de la inversión	5,92	14,81	8,89	8,89	14,81	8,89	8,89	
	Total por tonelada de carga	162,31	144,42	176,78	146,91	142,70	150,75	132,97	
%	Pérdidas por calcinación	5	5	5	3	5	5	3	
EUR/t	Total por tonelada líquida	170,85	152,02	185,45	151,45	150,21	158,68	136,98	
%	Porcentaje de desperdicios	35	40	35	40	50	50	50	
EUR/t	Total por tonelada de moldeos	262,85	253,36	285,31	252,42	300,42	317,37	273,96	

Tabla 10.5. Precio de la fundición laminar: carga metálica + energía

Característica	Unidad	Cubilote de viento frío			Inducción			Horno sin núcleo			Cubilote de viento caliente			Cubilote sin coque		
		Precio EUR/unidad	%	Precio EUR/t	Precio EUR/unidad	%	Precio EUR/t	Precio EUR/unidad	%	Precio EUR/t	Precio EUR/unidad	%	Precio EUR/t	Precio EUR/unidad	%	Precio EUR/t
Coque	t	210	0,145	30,45												
Electricidad	kWh	0,0513	20	1,027	0,0448	609	27,28	0,0448	609	27,28	210	0,125	26,25	0,0513	165	8,46
Oxígeno	Nm³	0,535	2	1,07							0,0513	128	6,57	0,23	11	2,53
Gas	kWh (NCV)	0,0296	20	0,59							0,535	2	1,07	0,0186	500	9,30
Subtotal				33,14			27,28			27,28			35,26			20,29
Desperdicios	t	0	0,35	0	0	0,40	0	0	0,50	0	0	0,40	0	0	0,35	0
Arrabio	t	185	0,20	37	185	0,15	27,75	200	0,10	20	101,5	0,30	30,45	185	0,25	46,25
Chatarra de hierro	t	167	0,20	33,4	101,5	0,225	22,83	99,5	0,40	39,80	96,9	0,30	29,07	167	0,15	25,05
Chatarra de acero (E3)	t	101,5	0,25	25,4	99,5	0,225	22,39							101,5	0,25	25,38
Chatarra de acero (E8)	t															
Chatarra de acero (E1 C)	t															
Subtotal				95,8			72,97			59,80			59,52			96,68
Grafito	kg				0,70	16,7	11,69	0,80	1792	14,34				0,7	8,12	5,68
FeSi	kg Si	0,68	8	5,44	1,13	10,6	11,98	1,13	9,39	10,61	0,68	15,8	10,74	0,68	11,71	7,96
FeMn	kg Mn	0,595	2,7	1,60	0,79	2,6	2,05				0,59	3,2	1,89	0,595	1,45	0,86
CaCO ₃ + div	t	12,2	0,048	0,58							12,2	0,0375	0,46			12,72
Bolas	t															
Subtotal				7,62			25,72			24,95			13,09			27,22

Tabla 10.6. Precio de la fundición nodular: carga metálica + energía

	Unidad	Cubilote de viento caliente			Cubilote sin coque		
		Precio EUR/unidad	Porcentaje	Precio EUR/t	Precio EUR/unidad	Porcentaje	Precio EUR/t
Coque	tonelada	210	0,14	29,40			
Electricidad	kWh	0,0513	140,5	7,21	0,0513	180	9,23
Oxígeno	Nm ³	0,535	4	2,14	0,23	11	2,53
Gas	kWh (NCV)	0,0228	60	1,37	0,0186	500	9,30
Subtotal				40,12			21,07
Desperdicios	tonelada	0	0,40	0	0	0,40	0
Arrabio	tonelada	99,55	0,50	49,75	199	0,20	39,8
Chatarra de hierro	tonelada				167	0,05	8,35
Chatarra de acero (E8)	tonelada				101,5	0,25	25,38
Chatarra de acero (E3)	tonelada						
Subtotal				49,75			73,52
Grafito	kg				0,7	12,37	8,66
FeSi	kg Si	0,68	7	4,76	0,68	4,11	2,79
FeMn	kg Mn	12,2	0,042	0,51			12,72
CaCO ₃ + div	tonelada						
Bolas	tonelada						
Subtotal				5,27			24,17

La Tabla 10.4 resume los costes de fundición del hierro en los tres tipos de cubilotes principales y los compara con los datos de un horno de inducción sin núcleo. Algunos elementos dependen en buena medida del dispositivo utilizado para fundir el metal y la calidad de éste, como la energía y fluidos, carga metálica y ferroaleaciones, con información más detallada en Tabla 10.5 y Tabla 10.6.

Los dispositivos comparados funden a un ritmo de 10 - 12 t/h, en dos turnos, y se dedican principalmente a la producción focalizada, por ejemplo para la industria de la automoción. El período de amortización de las inversiones es de 10 años y las características y funciones de los distintos equipos se detallan a continuación:

Cubilote de viento frío

- 2 cubilotes de uso diario alternativo (uno por día);
- tratamiento de los humos: combustión, enfriamiento, filtrado en seco.

Cubilote de viento caliente

- cubilote de larga campaña;
- tratamiento de los humos: combustión, calentamiento del aire de inyección, enfriamiento, filtrado en seco;
- mantenimiento en un horno de inducción de canal.

Cubilote sin coque

- cubilote de larga campaña;
- tratamiento de los humos: enfriamiento, filtrado en seco;
- calentamiento y recarburación en un sobrecalentador;
- mantenimiento en un horno de inducción de canal.

Horno de inducción

- 2 hornos de 12 toneladas;
- 1 equipo de suministro energético de 10 MW – 250 Hz.

En los costes del hierro colado debe tenerse en cuenta la recarburación posterior (cubilote sin coque), el mantenimiento y también la importancia del sistema de tratamiento de los humos.

Se comparó el precio del hierro colado de 2 aleaciones distintas destinadas a la industria de producción en masa para la automoción:

- fundición laminar (ENGJL 250);
- fundición con base de grafito nodular (base de ENGJS 400-15).

Los cubilotes de viento frío cada vez se emplean menos para fabricar hierro nodular, por ello no se han tenido en cuenta.

Si se comparan los cálculos de CTIF con los de Neumann:

La clasificación por resultados de los dispositivos de fusión de metales, de más barato a más caro, no coincide entre los autores y tampoco entre los tipos de aleación:

- Fundición de grafito laminar:
 - CTIF: horno de inducción, cubilote de viento caliente, cubilote de viento frío, cubilote sin coque;
 - Neumann: cubilote sin coque, cubilote de viento caliente, cubilote de viento frío.
- Fundición de base nodular:
 - CTIF: horno de inducción, cubilote de viento caliente, cubilote sin coque (ligeramente diferente).

Tras comparar los distintos elementos estudiados por Neumann y Godinot se llega a las siguientes conclusiones:

1. Energía y fluidos

- los cubilotes sin coque son los más económicos en todos los casos;
- cabe destacar que los precios de la energía son muy variables de un país a otro, en especial por lo que respecta al precio y la disponibilidad de la electricidad y el gas. En el estudio de CTIF los costes energéticos hacen referencia a Francia (publicados en «Energy Plus»).

2. Cargas metálicas y ferroaleaciones

El sistema de clasificación utilizado penaliza las desventajas del cubilote sin coque en el caso de CTIF, pero no en el estudio de Neumann. Las principales diferencias son las siguientes:

- Neumann indica un porcentaje de arrabio (hierro de 1ª fusión) del 0% en el caso del cubilote sin coque, mientras que Godinot le asigna un porcentaje mínimo del 25% en función de la técnica industrial. El arrabio es el material de carga metálica más caro.
- Neumann asigna el mismo coste a la chatarra de acero y la de hierro. En el caso de Francia, la proporción entre ambos costes se ha mantenido entre el 2 y el 1,3 durante 10 años. En junio de 2003 (fecha en que se realizaron los cálculos) era de 1,6, como se indica en la Figura 10.2.

Conviene señalar que los costes de las materias primas, incluida la chatarra, se fijan en la actualidad a nivel internacional.

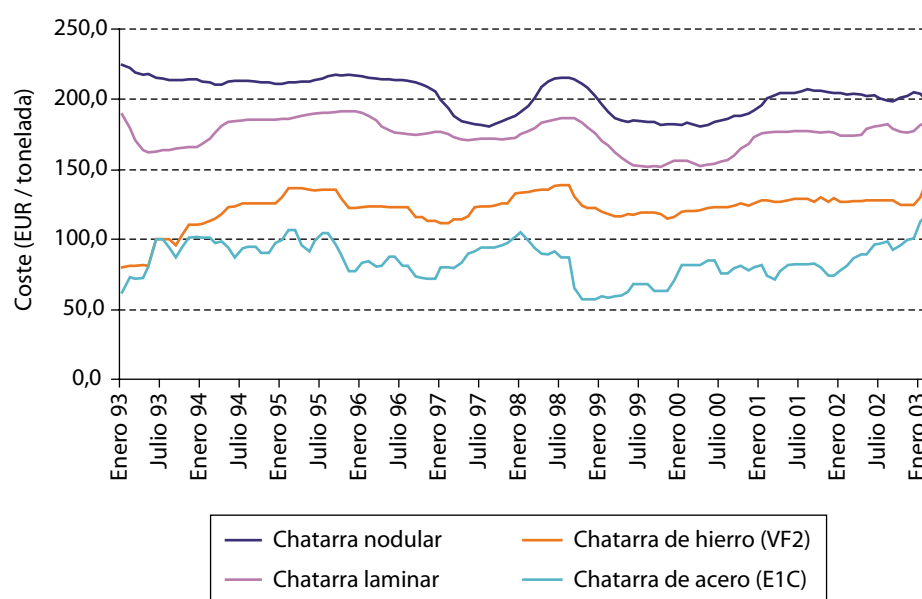


Figura 10.2.
Coste de las materias primas (Francia: de 1993 a 2003)

3. Otros elementos

La inversión es menos significativa que en el caso de los cubilotes de viento frío, sin coque y hornos de inducción sin núcleo.

- respecto al cubilote de viento frío, el hierro líquido se produce a una temperatura adecuada, con posibilidad de analizarlo en el pico del cubilote; sin embargo, los resultados metalúrgicos apenas dependen de la producción por hora. No es necesario el mantenimiento del hierro en un horno de inducción de canal;
- en cuanto al cubilote de viento caliente, o el cubilote sin coque, la modificación de la producción por hora resulta complicada. Se necesita un depósito intermedio de metal líquido entre el cubilote y el área de moldeo; normalmente se utiliza para ello horno de inducción de canal;
- en el caso de los cubilotes sin coque, el volumen específico de humos que deben tratarse es bajo, sin que sea necesario quemar el CO;
- por último, en los cubilotes con coque (de viento frío o caliente) se suele llevar a cabo una desulfuración antes de la fase de mantenimiento del hierro líquido nodular. Los costes de esta operación son elevados, lo que beneficia al cubilote sin coque, donde el hierro colado no contiene azufre.

4. Conclusión

Desde el punto de vista de las prácticas industriales, según Godinot, los cubilotes sin coque tienen la ventaja de consumir poca energía, si bien hay que tener en cuenta los costes adicionales de las materias primas de carga.

En cuanto a la fundición nodular, los cubilotes sin coque producen metal sin azufre y a unos costes similares a los del cubilote de viento caliente. En Francia, la fundición laminar resulta más cara en cubilotes sin coque que en cubilotes con coque.

En la actualidad, la producción de este tipo de metal en Francia muestra unos límites entre cubilotes y hornos de inducción de 10 t/h (fundición laminar), un límite que probablemente supere la fundición nodular (los cubilotes son más económicos con una producción de 20 t/h).

Los anteriores cálculos se han realizado sobre la base de la producción en masa de piezas para la automoción. Para otras aplicaciones sería necesario realizar ligeras modificaciones. Sí es posible afirmar, al menos, que el orden relativo depende de las condiciones locales, especialmente los costes de la energía, que varían muy considerablemente de un país a otro.

10.2. Anexo 2. Equipo de control de polvo en una fundición a gran escala dedicada a fabricar piezas de automoción

Los datos de seguimiento de las emisiones de polvo corresponden a una fundición sueca dedicada a la producción a gran escala de piezas para la industria de la automoción. La fundición utiliza un sistema de seguimiento continuo de la emisión de partículas conectado a la salida de salida de 17 filtros de mangas. Los datos, en forma de gráfico, de la Figura 10.3, la Figura 10.4 y la Figura 10.5 corresponden a distintos márgenes de tiempo y 4 puntos de medición. Los valores muestran que el nivel de polvo se mantiene constantemente por debajo de 1 mg/Nm^3 durante la preparación de la arena y el granallado. En cuanto al transporte de la arena, la media correspondiente a 24 horas se sitúa entre $1,3$ y $1,6 \text{ mg/Nm}^3$.

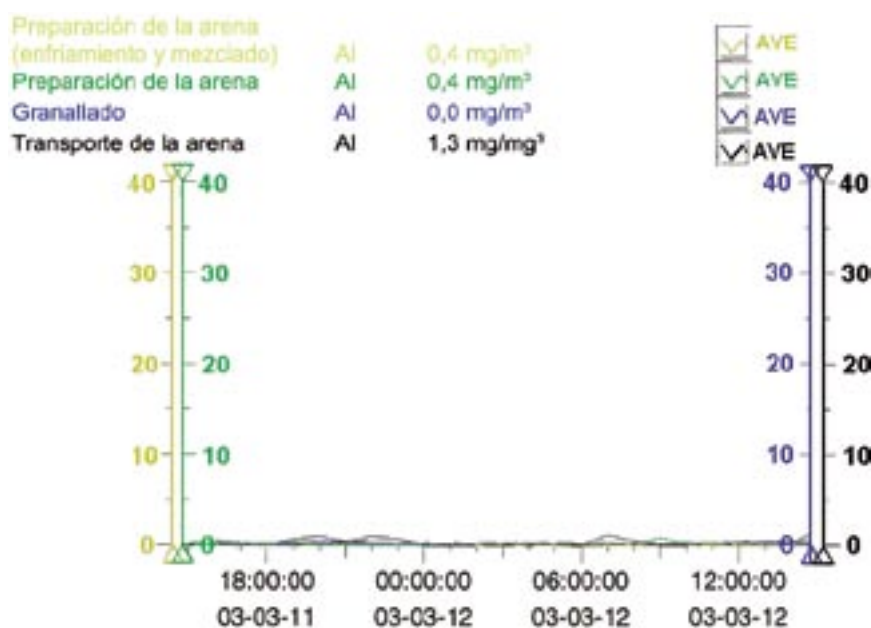


Figura 10.3.
Datos de seguimiento de las emisiones de polvo en cuatro puntos distintos de la planta de arena (seguimiento continuo durante 24 horas)

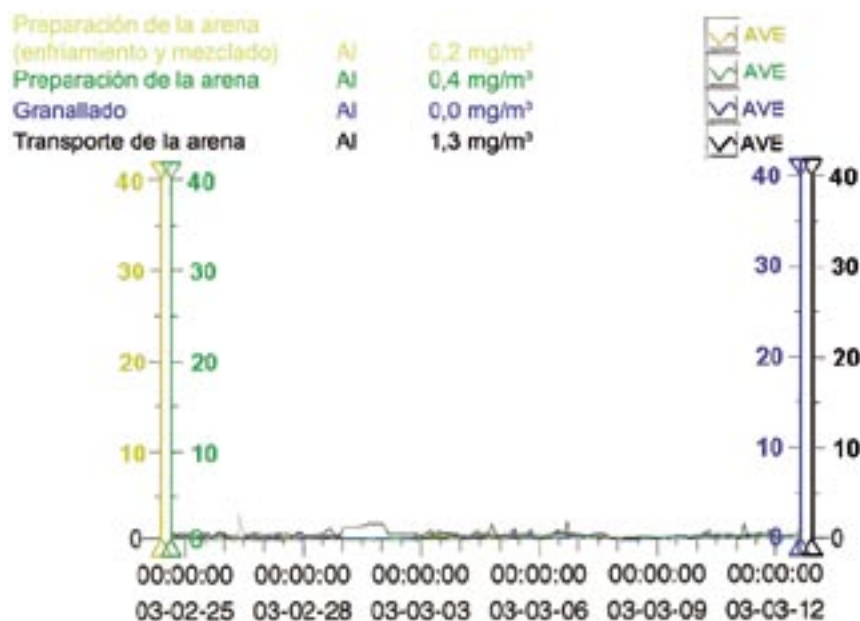


Figura 10.4.
Datos de seguimiento de las emisiones de polvo en cuatro puntos distintos de la planta de arena (seguimiento continuo durante 2 semanas)

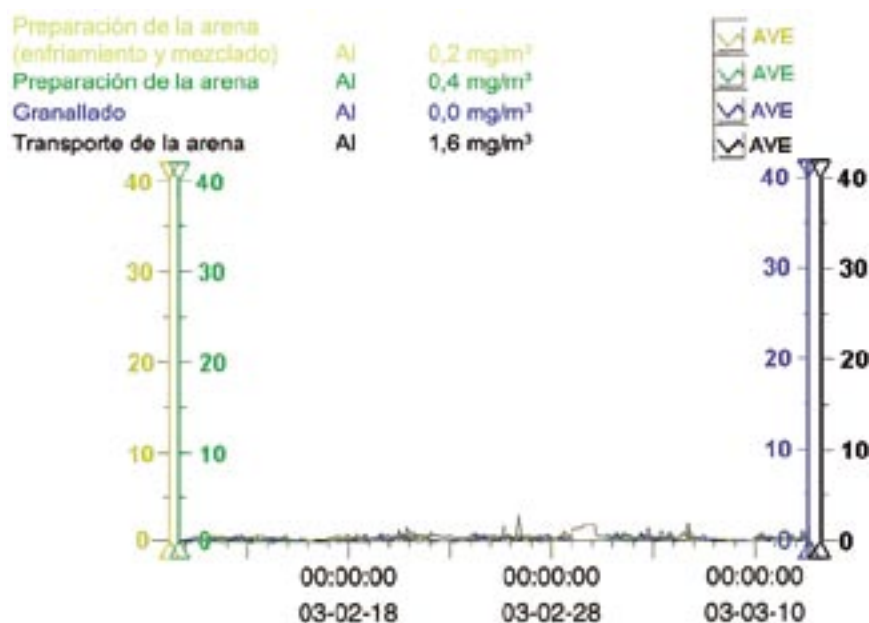


Figura 10.5.
Datos de seguimiento de las emisiones de polvo en cuatro puntos distintos de la planta de arena (seguimiento continuo durante 30 días)

La planta analizada tiene un valor límite de emisiones permitido de 10 mg/Nm³. El sistema de seguimiento dispone de una alarma que se dispara por encima de los 5 mg/Nm³. Cuando se supera el límite se comprueba y verifica el filtro con material fluorescente. Si los valores de medición sobrepasan los 10 mg/Nm³, se detienen tanto la producción como el filtro. La calibración del equipo de seguimiento la lleva a cabo dos veces al año una empresa externa contratada.

Las instrucciones de mantenimiento y reparación consisten en lo siguiente:

- diariamente:
 - comprobación de la caída de presión;
 - inspección visual;
 - comprobación de la válvula magnética;
 - drenaje del agua de condensación.
- mensualmente:
 - comprobar apriete.
- trimestralmente:
 - control con material fluorescente.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL Y MARINO

I.S.B.N.: 978-84-491-0976-8



9 788449 109768