

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



HORNOS METALURGICOS DE INDUCCION

M O N O G R A F I A
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A N

Jorge Raúl Sánchez Montiel

— Heriberto Solano Rico ✓

MEXICO, D. F.

1975

309



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS. Tesis
ADQ. 1975
FECHA
PROC. 47-310



QUÍMICA

Presidente, Prof. MANUEL GAVIÑO RIVERA ✓
Vocal " ALBERTO OBREGON PEREZ ✓
Secretario " JOSE CAMPOS CAUDILLO ✓
1er. Suplente " NA. EUGENIA NOGUEZ AMAYA ✓
2o. Suplente " HUMBERTO MALAGON ROMERO ✓

Tema desarrollado en la Fac. de Química

SOLANO RICO HERIBERTO

Solano R.

Sustentante

ALBERTO OBREGON PEREZ

Obregon

Asesor

A MIS PADRES Y HERMANOS

A MIS AMIGOS

A MIS MAESTROS

Presidente, Prof. MANUEL GAVIÑO RIVERA
Vocal " ALBERTO OBREGON PEREZ
Secretario " JOSE CAMPOS CAUDILLO
1er. Suplente " MA. EUGENIA NOGUEZ AMAYA
2o. Suplente " HUMBERTO MALAGON ROMERO

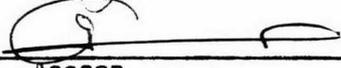
Tema desarrollado en la Fac. de Química

SANCHEZ MONTIEL JORGE RAUL



Sustentante

ALBERTO OBREGON PEREZ



Asesor

A MIS HERMANOS:

Antonio
Martha
Concepción
Josefina
Baltazar

A MI MADRE

EN MEMORIA DE MI PADRE

A NUESTRO ASESOR : ING. ALBERTO OBREGON, CON RESPETO
Y ADMIRACION

A MIS MAESTROS

A MIS AMIGOS

INDICE

	Pag.
I. INTRODUCCION	1
II. HORNOS EMPLEADOS EN METALURGIA	2
Alto Horno	3
Horno de Cubilote	11
Horno de Reverbero	20
Horno Martin-Siemens	22
Hornos Eléctricos de Arco	32
III. HORNOS ELECTRICOS DE INDUCCION	39
Generalidades	40
Horno de Inducción sin canal	43
Horno de Inducción con canal	59
IV. CONCLUSIONES	71
V. BIBLIOGRAFIA	73

INTRODUCCION

En 1916, el Dr. Edwin F. Northrup, sugirió el uso de corrientes inducidas de alta frecuencia, para la obtención de calor a partir de energía eléctrica, teniéndose el primer horno eléctrico de inducción de alta frecuencia. Por muchos años el uso de tales hornos estuvo restringido a investigaciones de laboratorio y a las industrias de metales preciosos, debido principalmente a que no se conocía en esa época un suministro de energía práctico.

Los hornos de inducción de baja frecuencia, hicieron su aparición en Alemania hacia 1945. El ulterior desarrollo de la técnica metalúrgica, ha permitido que 15 años después, existieran cerca de 500 unidades instaladas y en servicio en todo el mundo; en la actualidad, se aproxima al millar el número de unidades en servicio, de las que dos terceras partes se emplean en fundiciones de hierro y acero.

II.. HORNOS EMPLEADOS EN METALURGIA

ALTO HORNO

Un alto horno, es esencialmente un tubo de ladrillos refractarios de unos treinta metros de alto por siete de diámetro interior, revestido exteriormente por una chapa de acero. Dichas medidas varían en distintas instalaciones, pero pueden considerarse como valores medios.

Su gran altura, tiene por objeto facilitar a los gases ascendientes la cesión de su calor y facilitar también al monóxido de carbono la reducción del mineral. Esta altura puede reducirse si en lugar de trabajar con aire, que contiene cuatro volúmenes de gas inerte (nitrógeno), por uno de gas activo (oxígeno), se trabajase con aire enriquecido de oxígeno, lo cual además de disminuir la altura, aumenta considerablemente la capacidad de producción. El diámetro interior del horno, no es constante, la medida antes indicada corresponde a su diámetro máximo. La fig. 2.1, muestra un perfil característico de un alto horno y la fig. 2.2, el esquema de una instalación completa. La parte superior del horno, por donde se introducen los materiales, se llama tragante, sigue después la cuba, que se une en el vientre con el estalaje. La parte inferior, de forma cilíndrica, se denomina crisol. En ella se acumula el metal líquido, para ser extraído periódicamente. En la parte superior del crisol, se encuentran las toberas que son orificios por los

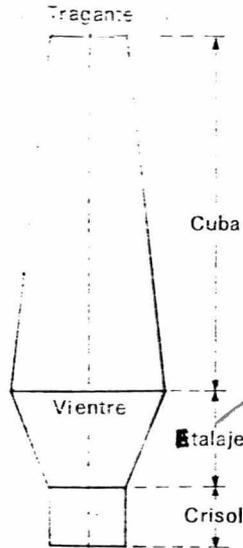


Fig. 2-1 - Perfil de un alto horno.

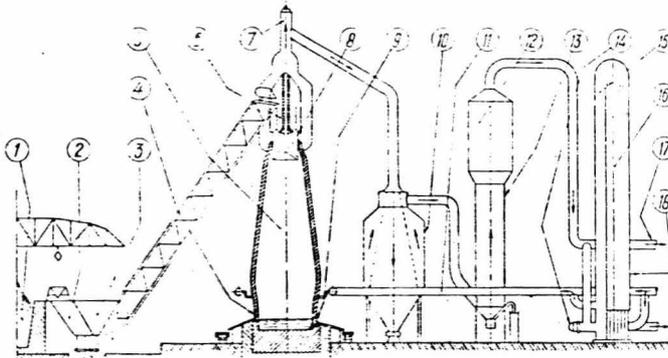


Fig. 2-2 - Esquema de una instalación de alto horno

- | | | |
|-------------------------------------|---|---|
| 1) Materiales. | 8) Segunda zona de carga. | 14) Mezcla de los gases con aire para la combustión de éstos. |
| 2) Tolva para carga del mineral. | 9) Salida del hierro líquido. | 15) Cámara de combustión. |
| 3) Tolva para carga de combustible. | 10) Pescador de polvo. | 16) Recuperador térmico de refractorio. |
| 4) Crificio de escorias. | 11) Entrada de aire caliente a las toberas. | 17) Paso de los gases a otras estufas. |
| 5) Cuerpo de alto horno. | 12) Precipitador electrostático. | |
| 6) Primera zona de carga. | 13) Lavador de gases. | |

Salida de los gases

Salida de los gases

que se insufla aire a presión, a una temperatura de unos 760°C. El combustible, generalmente coque, ocupa la totalidad de la parte inferior del horno, hasta el vientre. Por encima de éste se depositan capas alternadas de mineral y de combustible, junto con piedra caliza, que actúa como fundente para reducir la temperatura de fusión de la ganga. Cerca de las toberas, existe un orificio (fig. 2.2), mediante el cuál se retiran las escorias que flotan sobre el hierro líquido contenido en el crisol.

El arrabio líquido se extrae por un orificio (2.2-9) colocado en el fondo, y que se abre aproximadamente cada seis horas para retirar de 100 a 300 toneladas de metal. En el dispositivo de carga (2.2-6 y 8), tiene gran importancia el sistema de doble campana de cierre indicado en la fig. 2.2. Este dispositivo permite introducir los materiales en el horno sin que escapen los gases a la atmósfera, mediante la apertura alternada de ambas campanas. La evacuación de gases, se hace después de eliminar las partículas sólidas por medio de los siguientes dispositivos : recuperador de polvos (2.2-10), en el cuál los polvos se depositan por disminución de velocidad de los gases ; lavador de gases (2.2-13), en el que se separa el polvo por acción de una lluvia de agua sobre los gases ; y precipitador electrostático (2.2-12), que completa la separación del polvo mediante el depósito, en las paredes de tubos condensadores, de las partículas previamente electrizadas.

El polvo separado en los dispositivos mencionados, contiene elevados porcentajes de mineral y combustible. Estos materiales pueden ser recuperados mediante operaciones de sinterizado. Los trozos así obtenidos, pueden ser incorporados como parte de futuras cargas del horno. Después de la eliminación del polvo, el gas se utiliza en las estufas destinadas al precalentamiento del aire que se alimenta al horno.

Las estufas (2.2-18), cuatro generalmente, desempeñan un papel fundamental en la instalación de un alto horno . Son cilindros huecos que contienen en su interior una cámara de combustión (2.2-15) y un enrejado de material refractario (2.2-16). En éste último, se almacena el calor producido por la combustión de los gases de escape. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se interrumpe la entrada de gases y se hace pasar el aire, que de éste modo, experimenta un precalentamiento. El aire pasa alternativamente por cada una de las estufas, mientras las restantes se van calentando. Ese aire entra luego en el horno por las toberas, previa compresión efectuada mediante equipos de accionamiento a vapor de agua o gas.

El arrabio líquido obtenido del alto horno, se vierte en recipientes de hierro, interiormente revestidos de material refractario. Con ellos se lleva el material a los hornos destinados a la fabricación de acero, o se vierte directamente en lingoteras de pequeño tamaño.

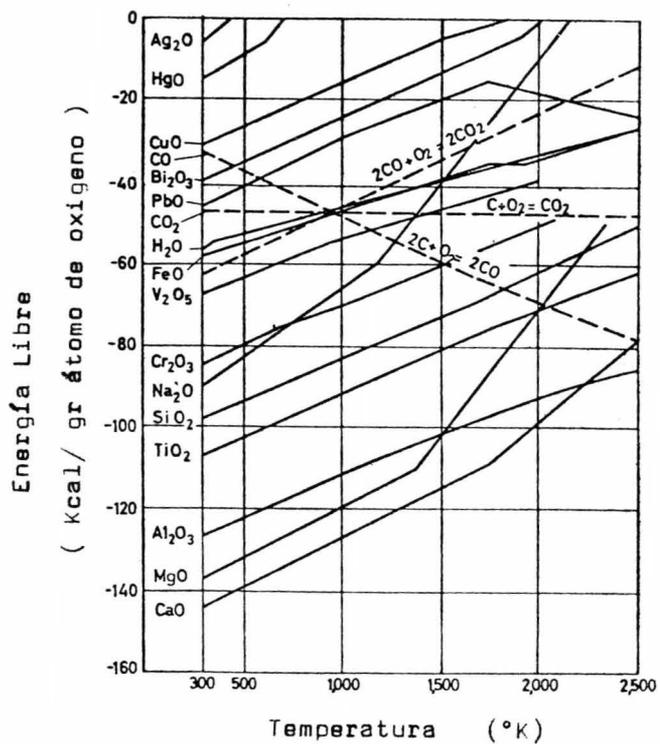
El principal propósito del alto horno, es la producción de arrabio de grado y calidad convenientes, siendo el elemento más importante de control en el proceso, el peso de la capa de coque, ya que ésta influye en la temperatura y el contenido de carbono en el arrabio.

Dentro del horno, el carbón es quemado en presencia del oxígeno del aire introducido por las toberas, y se produce la siguiente reacción :



La temperatura teórica en la zona de combustión, es aproximadamente de 2 000 °C, si el aire ha sido precalentado a 760 °C. La temperatura que alcanza el hierro en el crisol, es de unos 1 500°C. En esas condiciones, los gráficos de energía libre indican que el carbono puede reducir cualquier óxido de hierro. Se admite que, a medida que desciende la carga, aumenta el contenido de hierro del mineral, por reducción progresiva de un tipo de óxido de hierro en otro, hasta que, se obtiene el óxido de hierro llamado wustita, que corresponde a la fórmula : FeO . (Ver gráfica I)

Si bien, puede interpretarse que la reducción de los distintos tipos de óxidos de hierro, es provocada por el carbono mediante reacciones del tipo : $FeO + C = CO + Fe$ (I)



Gráfica I

la presencia de CO_2 en la atmósfera del horno, indica que , en el proceso interviene el CO como reductor de acuerdo con la sig. reacción : $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2 \dots (\text{II})$; en realidad lo que sucede, es que el equilibrio termodinámico del sistema, exige, a cada temperatura, una relación determinada de CO y de CO_2 . Esa relación define la influencia relativa de las reacciones del tipo (I) y (II) . Se deduce así, que más del 85 % de la reducción, se produce por reacciones del tipo (II) es decir, por acción del CO . El 15 % restante, se debe a la acción directa de carbono. La regulación de las características de la escoria, es importante en cuanto a la calidad del material obtenido. Dicha regulación, debe hacerse en base al conocimiento de las reacciones de interacción que ocurren entre la escoria y la masa metálica; para ello se requiere que la escoria tenga gran fluidez , y sea de éste modo, fácil su separación de la masa metálica. Esto se logra, regulando la adición de fundente, constituido principalmente por piedra caliza (CaCO_3) .El fundente, permite reducir el punto de fusión de la ganga ; cuanto menor sea el punto de fusión de la escoria resultante, mayor será su fluidez.

La composición de los gases de escape, determina hasta que punto se han logrado condiciones de equilibrio termodinámico. Cuanto más cerca se encuentre el proceso de las condiciones de equilibrio, mayor será el rendimiento del alto horno.

La eficiencia económica del proceso puede mejorarse si se logra reducir el consumo de coque de alta calidad, ello puede conseguirse inyectando a presión combustibles líquidos o gaseosos de costo reducido, incrementandose asimismo, la producción por hora del alto horno. Otra forma de economizar coque, por unidad de arrabio producido, consiste en utilizar minerales previamente concentrados. El efecto es mayor cuando los minerales concentrados se incorporan en forma de pequeñas bolitas (pellets), en ese caso, razones geométricas de distribución de la carga, contribuyen al mejoramiento de la eficiencia de los altos hornos.

Una instalación de alto horno, transforma diariamente, una gran cantidad de materias primas, debido a lo cual, todas las operaciones, referentes a la preparación y carga de los materiales, están mecanizadas y dotadas, en un grado considerable de mando automático.

El alto horno tiene los inconvenientes de su elevado costo de instalación y mantenimiento, de la poca flexibilidad de su producción y, además, de que ésta debe ser muy grande para que su marcha resulte económica. Por otro lado, los defectos del arrabio, y su funcionamiento en general, no pueden ser corregidos inmediatamente, sino al término de ocho o diez horas después de haber sido hecha la corrección. Pero sobre todo esto, tiene

una gran ventaja que compensa con creces, por ahora, sus defectos y es su excelente rendimiento térmico, llegándose a obtener hasta un 80%, difícil de alcanzar en otros hornos, que usan combustible en forma de coque.

HORNO DE CUBILOTE

El Acero

El arrabio obtenido de los altos hornos, tiene las características de una fundición de hierro, pero su composición química no se adecúa a las exigencias de éste material. Por ello, el arrabio debe ser refinado, mediante procedimientos que permiten ajustar la composición química del material, agregando, cuando es necesario, elementos aleantes. Esa refusión se realiza generalmente, en hornos llamados cubilotes, que funcionan en forma semejante a los altos hornos. En los cuales se tiene contacto directo entre la carga, combustible y productos de la combustión.

Funde, además de arrabios en lingotes de primera fusión, chatarras de acero y hierro, rebabas de fundición y en algunas ocasiones ferroaleaciones de silicio, manganeso, cuando el producto lo requiera. El combustible generalmente empleado, es el coque y como fundentes, carbonato de calcio o de sodio. Se introducen en capas alternadas con la carga metálica. El fundente tiene como función formar la escoria a partir de, arena, arcilla, óxido de hierro, cenizas de coque y el revestimiento; además de abatir el punto de fusión, que de otra manera produciría el enfriamiento del horno. Por lo tanto la escoria elimina impurezas y a la vez retarda la oxidación del metal fundido.

La fig. 2.3, muestra esquemáticamente las características fundamentales del horno llamado cubilote. En la parte inferior del horno, está la cámara de aire (2.3-5), conectada a un ventilador centrífugo o rotativo que provee el aire necesario para la combustión : éste no es previamente calentado, como en los altos hornos, sino que se introduce a temperatura ambiente, salvo en tipos especiales de cubilote. El aire llega al horno a través de toberas (2.3-11) que pueden hallarse en un solo plano como se indica en la figura, o estar repartidas en dos planos próximos entre sí.

Antes de comenzar la carga del horno, sobre la puerta de fondo, se construye una cama de arena, de la usada en moldeo, de relativa baja resistencia y con granos gruesos de sílice, para proveer la permeabilidad necesaria, de unos 15 cm de altura e inclinada hacia la piquera. Sobre ésta se construye la cama de coque, que servirá para el arranque y sostén de los materiales y deberá mantenerse durante toda la marcha del proceso, para lo cual, el que se consume, debe ser reemplazado por el coque que se agrega con las cargas.

Los materiales son introducidos en el cubilote, por la puerta de carga (2.3-2), generalmente por medio de dispositivos mecánicos. Una vez encendido el horno y conectado el ventilador, se producirá la combustión del coque, desarrollándose una tempe

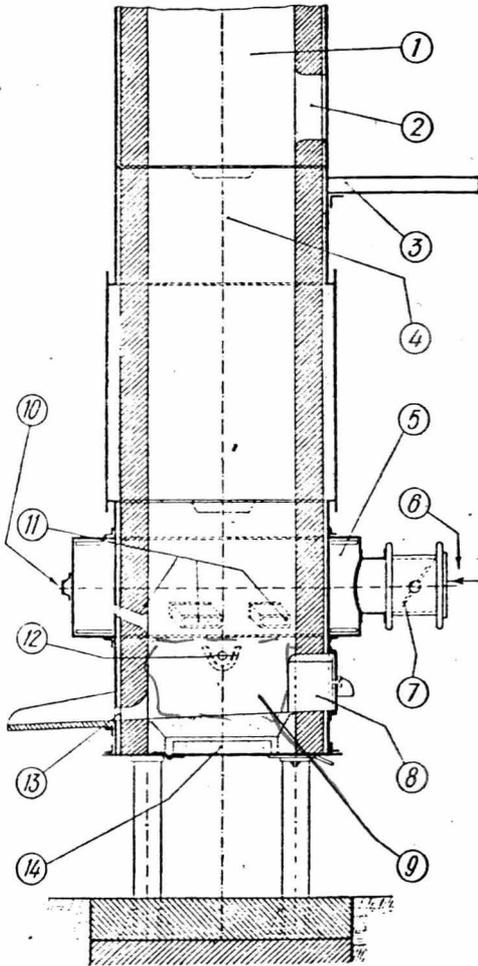


Fig. 1-14.- Esquema de un cubilote.

- 1) Tragante.
- 2) Puerta de carga.
- 3) Plataforma de carga.
- 4) Cuerpo.
- 5) Cámara de aire.
- 6) Llegada del aire del ventilador.
- 7) Diafragma regulador de la entrada de aire.
- 8) Abertura de acceso.
- 9) Crisol o cuba.
- 10) Mirilla.
- 11) Toberas.
- 12) Agujero de salida de escorias.
- 13) Agujero de colada.
- 14) Puerta articulada del fondo.

ratura suficiente para fundir el hierro. Este, en forma líquida irá depositándose en el crisol o cuba entre los trozos de coque.

La abertura de colada (2.3-13), se mantiene cerrada con arcilla hasta que se junta una cantidad determinada de hierro. Se plncha entonces el horno, quitando el tapón de arcilla, y recibiendo el hierro líquido en cucharas, desde las cuales, será vertido en moldes. Vaciado el hierro contenido en la cuba, se tapa nuevamente con arcilla el agujero de colada y se continúa el proceso. El agujero de salidas de escorias (2.3-12), tiene por objeto la separación de éstas, que en virtud de su menor densidad, flotan en la masa líquida. El material refractario que constituye las paredes del horno, debe ser de alto punto de fusión. Se emplean generalmente, ladrillos silicosos de elevado contenido de sílice, sobre todo en la zona de fusión. En el tragante, donde la temperatura es más baja, pueden utilizarse piezas de fundición de hierro en lugar de ladrillos refractarios con lo que se logra una mayor resistencia al efecto de los golpes provocados por la carga al ser introducida.

Antecrisol

Xno
La fig. 2.4, muestra un aditamento que suelen llevar los cubilotes y que se conoce con el nombre de antecrisol. Este dispositivo, está destinado a permitir una mezcla homogénea del metal líquido, y en él, pueden hacerse los agregados necesarios.

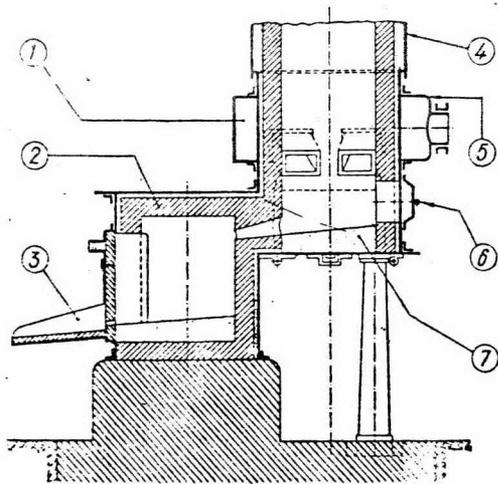


Fig. 1-15.— Antecrisol unido a la parte delantera de un cubilote.

- 1) Cámara de aire.
- 2) Antecrisol.
- 3) Canal de colada.
- 4) Cubilote.
- 5) Entrada de aire.
- 6) Abertura de acceso.
- 7) "Cama" de tierra.

La función del antecrisol, como elemento mezclador y recipiente para agregados, puede cumplirse con una cuchara distribuidora que, con un dispositivo a pantalla (cucharas tipo tetera), permite la separación de la escoria que suele pasar con el hierro líquido.

Procesos de combustión en el cubilote:

El aire, introducido a una presión relativamente baja en la parte inferior del cubilote, provoca la combustión del coque dando lugar a la formación de gases y al desprendimiento del calor necesario para la fusión. La combustión del coque a la entrada del aire, es completa, dando lugar a la formación de CO_2 , de acuerdo con la sig. reacción:



por cada kilogramo de carbono consumido, de acuerdo con esta reacción, se producen 8 050 calorías y se necesitan 2.66 Kg. de aire. Una vez formado el CO_2 , que es un gas oxidante, continúa su ascenso hacia la parte superior del horno y en su trayecto, encuentra más coque, originándose su transformación de acuerdo con la sig. reacción :



Esta reacción es inconveniente, porque sustrae calor al proceso en una proporción de 3 250 cal., por cada kilogramo de carbono consumido de éste modo.

El calor desarrollado o consumido en las reacciones anteriores, se refiere a kilogramos de carbono y no de coque; conociendo el porcentaje de carbono de éste, puede deducirse el número de calorías correspondientes a cada kg. de coque quemado.

En el proceso del cubilote, no sólo debe regularse la composición química del arrabio utilizado, sino que deben eliminar se elementos perjudiciales que pueden incorporarse durante el mismo proceso. Estos pueden provenir de las impurezas contenidas en el combustible, de los materiales refractarios y del aire. Uno de los inconvenientes del proceso, consiste en la incorporación de oxígeno en la masa metálica. Ese oxígeno forma óxidos, que pueden ser transferidos a la escoria por adición del fundente, juntamente con los óxidos provenientes de la deteriorización del refractario. Debe evitarse la oxidación del metal, ya que, aparte de dar un producto de inferior calidad, reduce el contenido de elementos útiles como el silicio y el manganeso. La oxidación se controla con la adecuada relación entre la cantidad de aire y de combustible utilizados.

Ella qui
La reducción del contenido de elementos del arrabio, se logra principalmente, por el agregado de chatarra de acero; ello permite reducir el contenido de carbono, de fósforo y azufre. El silicio y el manganeso también se reducen, pero como éstos elementos son necesarios, y en parte se pierden por oxidación du

rante el proceso, suele ser necesario incorporarlos en forma de ferroaleaciones.

Junto con las cargas se introduce piedra caliza, la principal función de éste agregado, es la obtención de una escoria suficientemente fluida para permitir su separación de la masa metálica. La piedra caliza, que provoca la formación de óxido de calcio, ayuda también a la eliminación de azufre. El fósforo en cambio, no es eliminado por ser el medio poco oxidante, para lograr la fijación de P_2O_5 en la escoria. Para elaborar fundiciones aleadas, el agregado de elementos adicionales, tales como cromo y molibdeno, puede hacerse directamente en la carga - del cubilote, o en la cuchara en forma de ferroaleaciones.

El cubilote de aire caliente, es semejante al cubilote - tradicional, con la diferencia de que cuenta con un recuperador que puede ser una unidad externa del horno, o unos tubos verticales en el horno, que entran aproximadamente a 1.8 ms. sobre las toberas hasta 30 cm. antes de la puerta de carga. Por éstos tubos circula el aire que se precalienta e introduce al horno. Con esto se obtiene un mayor rendimiento térmico, alcanzando temperaturas, en la zona de fusión, de 1 500-1 550 °C.

Las causas del amplio uso del horno de cubilote son : es rápido y fácil de operar, económico en instalación, mantenimieno

to y costos de operación; además de ser un proceso de fusión continua. Presenta la dificultad de no permitir una refinación y aleación adecuadas, debido a las contaminaciones que introduce el combustible, siendo difícil obtener una composición química uniforme en el producto obtenido.

Insta aed

HORNO DE REVERBERO

Este horno tiene la característica, de tener la carga aislada del combustible, pero en contacto con los productos de la combustión. Los hornos constan de una solera poco profunda, (fig. 2.5) cerrados por paredes laterales y cubiertos por una bóveda en arco. El quemador, se encuentra situado en uno de los extremos y en el extremo contrario, la chimenea, para la salida de los gases de combustión. La carga se efectúa, a través de las aberturas existentes en la bóveda, o por puertas que se abren en las paredes laterales. El combustible, generalmente, gas natural y carbón pulverizado, se introduce junto con el aire al quemador, y la energía térmica producida, se transfiere de la llama a la carga y paredes del horno, éstas permutan calor por radiación y es conducido desde la superficie al interior de la carga sólida.

Algunos de éstos hornos son muy pequeños, y unos pocos, fuera de los hornos para la producción de acero, usan un sistema regenerativo de transferencia de calor. Existen muchos hornos de diseño similar que emplean el mismo método de combustión pero se clasifican generalmente, como hornos de reverbero.

Estos hornos se utilizan en la fabricación de hierro maleable, en la reducción de metales no ferrosos, particularmente,

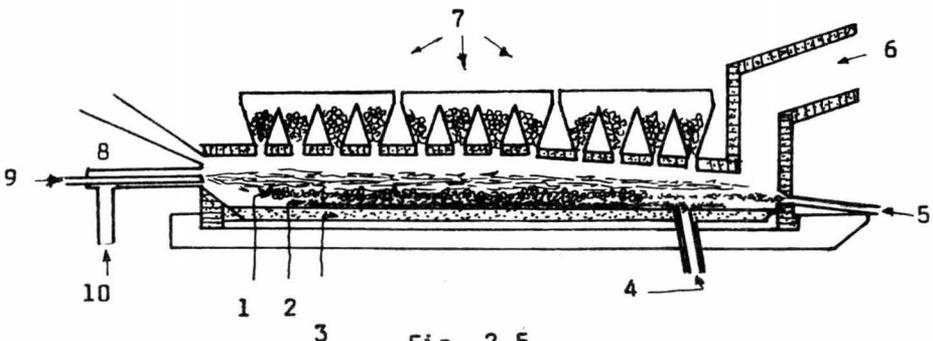


Fig. 2.5

- | | |
|-------------------------|---|
| 1: Carga sólida | 6 : Salida de gases de la combustión |
| 2: Mata | 7 : Mezcla de minerales, con <u>centrados</u> , fundentes |
| 3: Fondo del Horno | 8 : Quemador |
| 4: Salida de la Mata | 9 : Aire |
| 5: Salida de la escoria | 10: Carbón pulverizado y aire. |

para la fusión por masas de cobre. Un horno de uso muy extendido, dentro de los hornos de reverbero, es el Martin-Siemens.

HORNO MARTIN-SIEMENS

Estos hornos, se usan para la obtención de acero, a partir de hierro líquido, en bloques, chatarra de metales ferrosos, pertenecen al tipo de hornos de reverbero con recuperadores de calor. Los recuperadores de calor, constituyen el elemento fundamental de éstos hornos. Ellos permiten el precalentamiento del aire requerido para la combustión, por aprovechamiento de calor de los gases de escape. Si el combustible actúa en forma de gas, el precalentamiento puede aplicarse también. La fig. 2.6, muestra un corte longitudinal de un horno Martin-Siemens, con accionamiento por gas.

Tanto el gas como el aire de combustión, son precalentados en cámaras con celdas de ladrillos refractarios, mediante el paso alternado, por dichas cámaras, de los gases de escape y de los elementos que produce la combustión. Cada 15 min. aproximadamente, se invierte la marcha de los gases, accionando las válvulas, (2.6-9), que envían los elementos gaseosos a la chimenea (conectada al orificio marcado 2.6-8) ó al quemador del horno. Este último, está ubicado alternativamente en cuatro o seis.

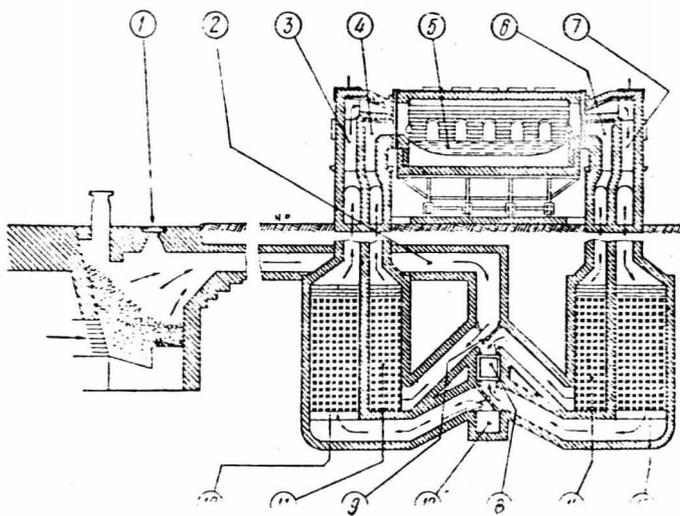


Fig. 14.- Corte longitudinal de un horno Siemens Martin a gas.

Se emplean también como combustibles, petróleo, alquitrán carbón pulverizado, aceite , etc.. La carga del horno se hace, a través de las puertas situadas en una de las paredes longitudinales que se muestran en la fig. 2.6 . En la fig. 2.7, se muestra un corte transversal del horno, en ella puede verse el dispositivo de carga, a través de una de las puertas; la cuchara (4), unida a un puente grúa, trae las cargas desde el depósito y las introduce por la puerta, dejándolas caer en la solera, mediante un movimiento de 180°.

En la pared opuesta a la de las puertas, se halla ubicada la abertura de colada, tapada con material refractario poco resistente que se rompe para vaciar el horno de su carga; debe estar ubicada en la parte más baja de la solera que contiene el metal líquido, salvo en ciertos tipos de hornos que, por ser basculantes, permiten su ubicación por encima del nivel de carga. En ese caso, el horno no necesita ser "pinchado".

El proceso Martin-Siemens, puede ser ácido o básico, según las características del revestimiento del horno. En el procedimiento básico, el revestimiento se hace a base de magnesita y dolomita; en el ácido, a base de sílice de gran pureza. El techo, por no hallarse en contacto con la masa líquida, puede hacerse de sílice, en el proceso básico, lo que significa una reducción de costo.

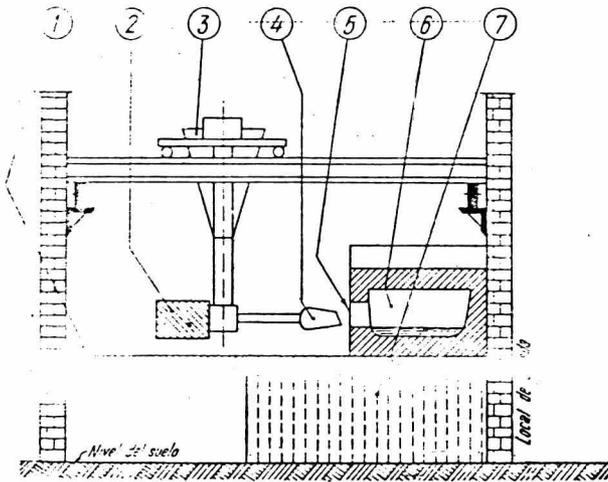


Fig. 2-7. - Corte transversal de un horno Siemens Martin.

- | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|
| 1) Plataforma. | 3) Puente grúa. | 6) Horno. |
| 2) Trapezo. | 4) Cámara. | 7) Recuperador. |
| | 5) Boca de carga. | |

La obtención de aceros, es esencialmente un proceso de refinación por oxidación, complementado por una refinación des oxidante, y la posterior incorporación de los elementos de aleación requeridos. En el proceso Martin-Siemens, la oxidación se logra por la acción de los gases de combustión, ^{chatarra} que contienen un exceso de oxígeno. Actuando sobre la superficie del baño líquido, provocan la oxidación de la carga, ésta acción se complementa con la incorporación de óxido de hierro en forma de mineral, el cuál cede su oxígeno para oxidar las impurezas del arrabio.

Este proceso, permite la incorporación de chatarra en un porcentaje elevado, representando un factor económico importante. La chatarra, normalmente está recubierta de una capa de óxido de hierro, lo cuál es una ventaja para el proceso, pues dicho óxido contribuye a acelerar el proceso de refinación por oxidación del arrabio. La desoxidación, se realiza fundamentalmente con ferroaleaciones de manganeso y de silicio. Parte de éste proceso se realiza en el horno y parte en las cucharas que reciben el acero elaborado. También se agrega aluminio metálico en la cuchara o lingoteras, contribuyendo además de la desoxidación, a la obtención de un tamaño de grano austenítico pequeño en el acero. Los agregados de aleación, se hacen, casi siempre en la cuchara, en forma de ferroaleaciones.

Aaaa

Los procesos básicos, para la obtención de acero, se diferencian de los ácidos, por la posibilidad de eliminación de ciertos tipos de impurezas, en particular el fósforo y el azufre. Esta eliminación exige la presencia en la escoria de un alto contenido de óxido de calcio, lo que a su vez, determina que la reacción química de escoria sea básica. Para evitar un rápido deterioro de las paredes del horno, éstas deberán fabricarse con refractario de reacción química básica.

Para provocar la presencia de óxido de calcio en el proceso Martin-Siemens básico, se incorpora a la carga piedra caliza que se descompone por el calor en óxido de calcio. El anhídrido carbónico que se produce en la reacción, favorece la agitación del baño, el desprendimiento de los gases y la distribución uniforme del calor en toda la profundidad del baño, con lo que se logra que la refinación por oxidación sea más efectiva. La piedra caliza se incorpora, generalmente, después de que se ha cargado en el horno la chatarra liviana; posteriormente conviene agregar la chatarra más pesada, los lingotes de arrabio y el arrabio líquido, en ese orden, si todos éstos materiales son utilizados. Al terminar la carga, que se introduce mientras el horno está funcionando, comienza el proceso de refinación por oxidación.

Las principales impurezas que se eliminan por oxidación,

son: el silicio, el manganeso, el carbón y el fósforo. A la temperatura del proceso, las energías libre de formación de los óxidos correspondientes a los tres primeros, son numéricamente menores a la del óxido de hierro, lo que significa que la oxidación de éstos elementos puede conseguirse sin que la oxidación del hierro alcance un nivel importante.

No sucede lo mismo con el fósforo, pues a la temperatura del proceso, el óxido de hierro es algo más estable que el del fósforo (P_2O_5). Ello hace que no sea posible eliminar el fósforo sin provocar una oxidación importante en el hierro. Para la eliminación del fósforo, se requiere, por lo tanto, que la escoria contenga óxido de hierro. La distribución del P_2O_5 y del FeO en la escoria, vendrá determinada por la constante de equilibrio de la reacción:



que, a la temperatura del proceso, se produce de izquierda a derecha, por las razones de diferencias de energía libre. El valor correspondiente de K será :

$$K = \frac{a_{FeO}^2 \cdot a_p^{4/5}}{a_{Fe}^2 \cdot a_{P_2O_5}^{2/5}}$$

teniéndose que, cuanto menor resulte el valor de a_p , menor será el contenido de fósforo en la masa metálica. La disminución de a_p , puede lograrse reduciendo la actividad del P_2O_5 en la

escoria, ó aumentando la del FeO . El medio más efectivo que se conoce de reducir la actividad del P₂O₅ , es la incorporación de óxido de calcio en la escoria. El aumento de FeO, por otra parte, puede lograrse aumentando la presión parcial del oxígeno, es decir , creando condiciones más oxidantes en el sistema.

El azufre no se elimina por oxidación, sino directamente por transferencia a la escoria. La relación entre la concentración de azufre en el metal y en la escoria, está influenciada por la presencia en ésta de óxido de calcio. Las condiciones de equilibrio, pueden ser establecidas admitiendo que el azufre se incorpora a la escoria en forma de sulfuro de calcio y que en la masa metálica, existe en la forma de sulfuro de hierro.

Si consideramos la siguiente reacción :



cuya constante de equilibrio será :

$$K = \frac{a_{CaS} \cdot a_{FeO}}{a_{FeS} \cdot a_{CaO}}$$

Por lo que, para eliminar azufre de la masa metálica, deberá buscarse que la relación : a_{CaS} / a_{FeS} , sea grande. Ello puede conseguirse disminuyendo la relación : a_{FeO} / a_{CaO} , lo cuál - significa que un elevado contenido de FeO en la escoria es perjudicial para eliminar azufre del acero, contrariamente a lo

que sucede para eliminar el fósforo. Como consecuencia de lo anterior, la composición de la escoria tiene una importancia fundamental para lograr una adecuada eliminación del fósforo y el azufre en el proceso Martin-Siemens. Debe recordarse que la eliminación de las impurezas está muy vinculada a la cantidad de escoria, pues a igualdad de actividades y concentraciones, la cantidad de impurezas contenidas en la escoria - y por consiguiente retirada del acero-, aumenta con la cantidad de escoria. La relación en peso entre escoria y metal, desempeña pues, un importante papel en la eliminación de las impurezas.

Cuando las muestras de metal y escoria son las correctas, se cuela la carga. Con el empleo de oxígeno industrial, se pueden oxidar las impurezas en el propio metal, por debajo de la escoria, eliminando el mayor inconveniente del proceso. El uso de lanzas de oxígeno, dá fusiones más rápidas y económicas, dado que el calor es transferido más efectivamente, reduciendo el flujo de aire y conservando gran cantidad de energía, que de otra manera serían desperdiciadas calentando el nitrógeno inerte. El tiempo requerido se reduce de un 10 a un 25 %, y el consumo de combustible se reduce de 18 a 35 %.

De Aca

El aumento en el rendimiento, a partir de mineral, favorece el procedimiento y lo mismo ocurre con su capacidad para emplear más chatarra y producir una gama más amplia de calida-

des de acero.

En el proceso Martin-Siemens ácido, se emplean materiales de bajo contenido de fósforo y azufre, por lo que resulta costoso, si se quiere obtener aceros de buena calidad. Este procedimiento es muy poco usado. La naturaleza de la escoria obtenida en el procedimiento ácido, permite una mejor desoxidación de la masa metálica y además, un control más riguroso de los elementos oxidables.

A Aca-

HORNOS ELECTRICOS DE ARCO

Estos hornos, funcionan aprovechando el calor que genera un arco eléctrico, que puede formarse, o bien entre dos electrodos colocados encima del baño metálico, o bien entre el electrodo y la carga. A los primeros se les conoce como hornos de arco indirecto y a los segundos como hornos de arco directo.

Los hornos de arco indirecto, (fig. 2.8) tienen una estructura semejante a un barril horizontal, provisto de un revestimiento interior refractario. Esta diseñado para balancearse continuamente 180° , por medio de un eje horizontal, lo cual ayuda a mezclar el metal, a mantener la composición y la temperatura uniformes. Esta oscilación, además, dá por resultado que partes considerables del revestimiento esten cubiertas a intervalos regulares, por el metal fundido y de ésta manera quedan protegidos contra las elevadas temperaturas del arco. Estas condiciones de trabajo aumentan la duración del refractario y hacen más rápida la fusión.

Los electrodos de carbón, se proyectan horizontalmente por ambos lados del horno, uno frente al otro. Conductores flexibles conectan los electrodos a las barras colectoras, - las cuales a su vez, estan conectadas al transformador. Este

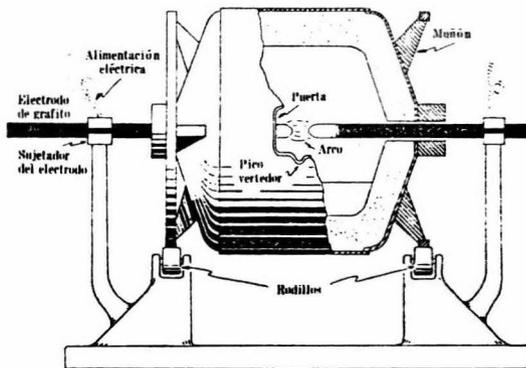


FIG. 2.3. Horno giratorio de arco indirecto

reduce el voltaje de línea hasta un valor adecuado. Estos hornos, se usan, algunas veces, para fundir aceros de aleación pero, esencialmente, en aleaciones de base cobre, como latones y bronce. Su capacidad varía de 40 a 450 Kg.

Los hornos de arco directo, pueden ser: monofásicos, bifásicos o trifásicos, dependiendo de que tengan uno, dos ó tres electrodos, respectivamente, siendo el más común el trifásico y siendo su representativo el horno Heroult. La fig. 2.9, muestra el esquema de un horno de éste tipo. La corriente eléctrica trifásica, llega al horno por tres electrodos de grafito o de carbón amorfo. El arco se cierra entre éstos 3 electrodos, a través de la carga metálica. Los hornos son volcables, pudiendo el mecanismo de accionamiento presentar diferentes posiciones, ya sea para efectuar el vaciado del metal o efectuar la carga.

El horno en sí, es cilíndrico y está constituido, esencialmente, por un crisol refractario, revestido exteriormente con chapa de acero. El crisol está cubierto por una tapa de refractario, también revestido exteriormente con chapa de acero y a través de la cual pasan los electrodos. La carga, puede hacerse por puertas laterales o por la parte superior, en éste caso, la tapa se retira en la forma que muestra la fig. 2.9 .

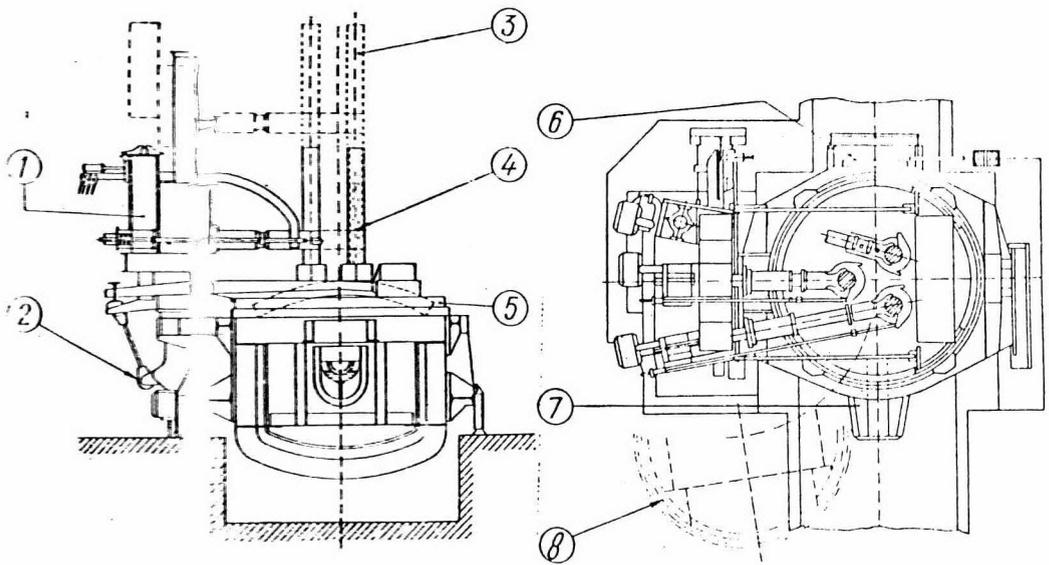


Fig. 3.17. — Horno eléctrico de tres electrodos de tipo Heroult.

- 1) Dispositivo de conducción de la corriente.
- 2) Dispositivo volcador.
- 3) Electrodo en posición elevada.
- 4) Electrodo en posición baja.

- 5) Tapa.
- 6) Escoriador.
- 7) Orificio de salida del metal.
- 8) Tapa en posición de horno abierto.

El calentamiento de la carga se hace por conducción directa desde el arco, y por radiación de las paredes y techo. La capacidad de éste horno, varía entre 3 y 200 tons. La marcha del proceso Heroult, es esencialmente similar a la marcha Martin-Siemens, pero siendo más fácil de controlar. Ello es posible, debido a la ausencia de gases contaminados, por lograrse mayores temperaturas y porque éstas pueden ser bien reguladas y controlables. Estas ventajas, permiten reproducir con bastante exactitud los procesos, y mediante análisis de las escorias, tener un control preciso de las operaciones de refinación.

Cuando se usa carga sólida, exclusivamente, el proceso se inicia bajando los electrodos hasta que hacen contacto con la carga y se forme el arco. Los electrodos actúan luego, automáticamente, bajando y subiendo hasta que se forme un pequeño depósito de metal líquido debajo de cada electrodo. A partir de ése momento, los electrodos se mantienen en contacto con la parte metálica fundida, cuyo nivel va variando, a medida que progresa la fusión. Si se usa carga líquida, la primera parte de éste proceso no es requerida.

La materia prima más importante, en éste tipo de hornos, es la chatarra de acero. Se usa también: hierro fundido, mineral de hierro, junto con los fundentes, desoxidantes y ferro-

aleaciones . La refinación por oxidación, se logra - como en los hornos Martin-Siemens- por el agregado de mineral de hierro u otra forma de óxido de hierro.

Si el revestimiento del horno es básico, se agrega cal como fundente para asegurar la fijación del anhídrido fosfórico en la escoria. En el proceso ácido, el fósforo no puede eliminarse. El azufre se elimina en el proceso básico, de manera análoga a lo que sucede en el procedimiento Martin-Siemens; para que su eliminación resulte más efectiva, es corriente retirar la escoria de oxidación, rica en óxido de hierro, y reemplazarla mediante un nuevo agregado de cal. Esto facilita no sólo la eliminación de azufre, sino también la introducción, sin pérdidas por oxidación, de los elementos aleados fácilmente oxidables (proceso de doble escoria).

La desoxidación, puede hacerse por medio de carbón, por permitirlo la temperatura final del proceso; se emplea polvo de coque, electrodos molidos, o fundición de hierro. Junto con el carbón, o sin él, suelen emplearse los mismos desoxidantes utilizados en el proceso Martin-Siemens, practicándose por lo general los procesos en el horno, con excepción de la desoxidación con aluminio, que se realiza en la cuchara.

La desoxidación con carbono, reduce la cantidad de in-

clusiones del acero, por el carácter gaseoso de los óxidos de carbono que se forman. Además, la ebullición que provoca la la formación de los óxidos de carbono, facilita el contacto de la masa metálica con la escoria y acelera las reacciones de refinación. Puede, sin embargo, ser difícil de controlar el porcentaje de carbono en el acero, con éste método de desoxidación.

Los elementos de aleación, son generalmente en forma de ferroaleaciones, y son introducidos durante el período de desoxidación, debiéndose colocar los más oxidables cuando la desoxidación esté casi terminada.

Los hornos de arco, se utilizan en su mayoría, para fundir y producir aceros de aleación y aceros al carbono de alta calidad.

III. HORNOS DE INDUCCION

GENERALIDADES

Para la transformación de la energía eléctrica en energía térmica mediante el sistema inductivo, se emplean en los hornos eléctricos de inducción dos métodos, basados en el principio del transformador : el sistema por núcleo de hierro del horno de canal con arrollamiento inductor y el sistema sin núcleo de hierro del horno de crisol.

Ambos sistemas transforman en el interior del arrollamiento inductor la energía eléctrica en energía electromagnética. Esta se trasmite a la carga, donde se transforma nuevamente en energía eléctrica, y por tanto, en calor. En el horno de crisol, éste calor se trasmite a la parte no directamente calentada de la carga, a consecuencia del movimiento del baño y de las fuerzas ponderomotrices.

En el horno de canal, es en cambio, el impulso ascensional térmico lo que transporta el calor desde el cuello del arrollamiento inductor al baño. El horno de crisol se diferencia, entre otras cosas, en que el movimiento del baño que provoca la distribución del calor, actúa prácticamente sobre toda la carga del horno, y además el calor se genera prácticamente en toda la superficie que rodea el contenido del horno. En el horno de canal, la generación del calor se limita a una

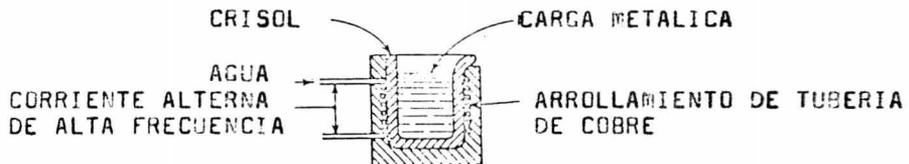
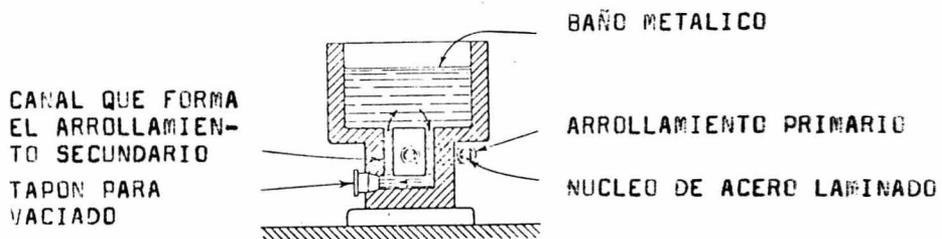


Fig. 3.1 (a) Corte seccional de un horno de inducción de crisol o sin canal



(b) Corte seccional de un horno de canal.

pequeña parte del caldo, que se encuentra en el interior del mismo canal, siendo más difícil su difusión.

La alimentación de los hornos eléctricos de inducción, se realiza con corrientes eléctricas de tres gamas de frecuencia :

De baja frecuencia , 50 - 60 Hz., es decir, la frecuencia normal de la red. Con ésta frecuencia se alimentan los hornos con canal y algunos hornos sin canal de gran capacidad.

De alta frecuencia, de 500 a 10 000 Hz. Algunos autores denominan a esta gama de medias frecuencias, reservando la denominación de altas frecuencias a las superiores a 100 000 Hz. Se utiliza ésta gama para la alimentación de hornos sin canal de capacidad media.

De muy alta frecuencia, superior a los 100 000 Hz., con corrientes eléctricas generadas electrónicamente. Solo se utilizan a escala de laboratorio para la alimentación de hornos de muy pequeña capacidad.

h. b. a. c.

HORNOS DE CRISOL

Estos hornos están formados por : un crisol refractario que contiene el metal, un arrollamiento de tubo de cobre dispuesto concéntricamente y un aislamiento de refractario entre el crisol y el arrollamiento.

El arrollamiento, alimentado por corriente alterna, está refrigerado por una corriente de agua que circula por el interior del tubo y está conectado a una fuente de energía de alta frecuencia. En general todos los hornos son basculantes.

Estos hornos se alimentan por medio de convertidores rotativos compuestos por motores asíncronos o síncronos, acoplados con alternadores monofásicos homopolares con bobinas inductoras fijas. La frecuencia más utilizada es del orden de 600 Hz, con potencias unitarias hasta de 2,000 Kw., pudiendo acoplarse dos o más máquinas para alimentación de hornos de potencias superiores. El rendimiento de estos convertidores es excelente, superando el 80% . Para mejorar el factor de potencia de la instalación, se utilizan baterías de condensadores dispuestos en paralelo con las bornas del arrollamiento del horno.

Los principales requisitos que debe llenar el recipiente del horno son : gran resistencia mecánica, baja conductividad en comparación con los metales, y que no reaccione con el metal que de

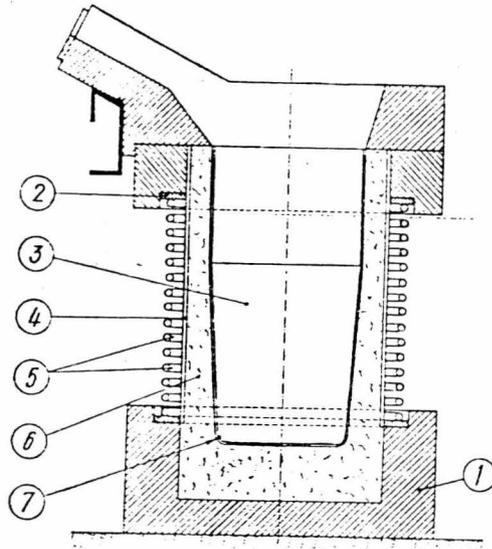


Fig. 3.2 : Elementos fundamentales de un horno eléctrico de inducción sin núcleo.

1. Fondo refractario
2. Anillo de mica
3. Crisol
4. Capa de amianto
5. Arrollamiento
6. Masa calcinada
7. Molde o plantilla

FIG 2

be contener. Hay varios tipos de recipientes o crisoles en uso - corriente : los crisoles abombados autoestables, los crisoles - preformados como parte integral del horno y los crisoles sinterizados que se forman en el sitio.

El cuerpo del horno es siempre de materiales no magnéticos y a menudo incluso de materiales no conductores eléctricamente. Es to es necesario a consecuencia del campo de dispersión que rodea el arrollamiento, que podría inducir corrientes parásitas en una envoltura metálica.

El equipo eléctrico comprende dispositivos para conectar el a rrollamiento a las barras colectoras, condensadores, tablero de control y un sistema de abastecimiento de energía.

Los hornos sin canal o de crisol, pueden considerarse como - transformadores, cuya bobina primaria es el arrollamiento que ro dea el horno y siendo la carga misma el arrollamiento secundario.

El principio de funcionamiento de éstos hornos es el siguiente : el campo magnético creado por la corriente que circula en una bobina que rodea al crisol, induce otra corriente en el seno del material y lo funde por el efecto joule.

Como en un cuerpo conductor, la corriente tiende a circular -

por la superficie, la potencia útil se distribuye, partiendo de la superficie externa del material contenido en el crisol y progresando hacia el interior por una profundidad denominada profundidad de penetración (d) .

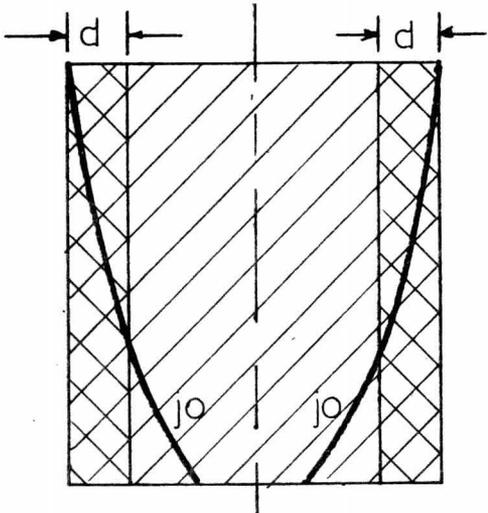


Fig. 3.3 :

d : Profundidad de penetración
jo : Curso de la corriente y de la potencia en el material que llena el crisol.

El valor de esta magnitud está dado por la siguiente fórmula:

$$d = 50.3 \sqrt{\frac{\rho}{m f}}$$

donde:

ρ = resistencia específica del metal en ohms mm²/m

m = permeabilidad magnética del material

f = frecuencia en Hz

Prescindiendo de los valores de ρ y m , que son constantes para cada tipo de material, podemos decir de la fórmula, que la profundidad de penetración es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y que por lo mismo, - cuanto mayor sea la frecuencia, tanto menor será la profundidad de penetración. Teóricamente se ha determinado que el diámetro de un cuerpo conductor para fundir por inducción debe ser mayor o igual de 3.5 d , teniéndose por lo tanto mientras mayor sea la frecuencia, será menor el diámetro del cuerpo que podrá ser fundido con dicha frecuencia. Por ésta causa, para fundir materiales menudos se recurre al empleo de - medias y altas frecuencias.

Si consideramos de acuerdo con la fig.3.4, que la bobina o arrollamiento secundario sea un tubo de espesor e , que

es la única parte de la masa del metal M de diámetro d por la que circula la corriente.

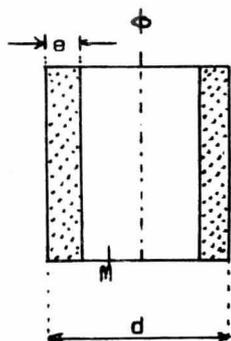


Fig. 3.4 Esquema de principio de funcionamiento de un horno eléctrico de inducción sin canal.

FIG 4

El espesor del tubo ficticio crece con la resistividad del material y decrece con la frecuencia de la corriente.

Prácticamente se ha comprobado que la frecuencia mínima debe ser suficiente para formar un tubo eléctrico de espesor e , inferior a $1/10$ de diámetro de la masa calentada. Por eso las frecuencias mínimas guardan la siguiente relación con el diámetro de la masa a calentar :

Diámetro en mm	Frecuencia en Hz
140	50
70	200
50	500
30	2 000
10	10 000

Hasta hace pocos años se consideraba indispensable la utilización de la alta frecuencia (500 a 10 000 Hz) para la alimentación de los hornos sin canal, pero se ha demostrado - que para diámetros de crisol superiores a los 700 mm. para el acero, o sea, de capacidad de 2 toneladas, pueden alimentarse con baja frecuencia.

En general, las frecuencias que se recomiendan para los hornos de crisol respecto a su capacidad son las siguientes:

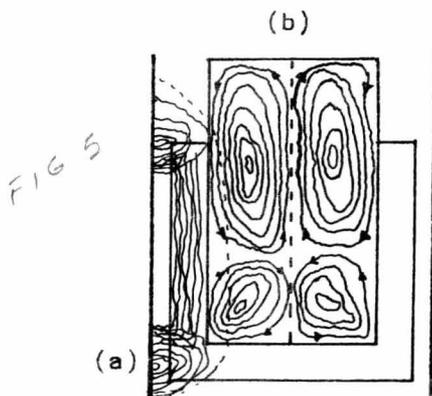
De 50 a	500 Hz	.....	Hornos de 2 o más Tons.
De 500 a	1 000 Hz	.....	Hornos de 500 Kg. a 1 Ton.
De 1000 a	3 000 Hz	.....	Hornos de 50 a 500 Kg.
De 3000 a	10 000 Hz	.....	Hornos de 10 a 50 Kg.
De más de	100 000 Hz	.....	Hornos hasta de 10 Kg.

El efecto contrapuesto de las corrientes que recorren la bobina provoca un movimiento del baño , es decir , por el correspondiente campo electromagnético y las corrientes inducidas desde el campo al interior del baño, que están desfasadas en aproximadamente 180grados con relación a las corrientes inductoras. Este movimiento, producido por las atracciones y repulsiones de dichas corrientes inducidas en el baño, es - tanto más vivo cuanto más baja es la frecuencia. Es decir que a menor frecuencia tendremos mayor agitación en el baño.-

Generalmente el movimiento del baño forma los anillos que se muestran en la fig.3.5.

Fig. 3.5 :

Campo (a) y líneas de flujo en el interior de la fusión.



Como se observa en las disposiciones usuales no simétricas en sentido axial se producen asimetrías definidas entre el anillo superior y el inferior. Estas representaciones del campo, para las cuales se cuenta con métodos numéricos de cálculo, revelan que sobre todo hacia el exterior de la carga, desplazada respecto de la bobina, se forman curvaturas fuertes del campo.

El movimiento del baño determina también las potencias máximas para una magnitud del horno dada, matemáticamente, el campo magnético inducido en el material en fusión se expresa por dos vectores perpendiculares entre sí; uno de los cuales actúa en sentido radial, del exterior al centro del crisol y el otro, paralelamente a las líneas de fuerza, de abajo arriba. La resultante de estas dos fuerzas produce el llamado llamado del baño, dando origen a la cúpula o elevación del baño

como se muestra en la fig.3.6 .

La altura (h) de ésta cúpula resulta de la siguiente fórmula:

$$h = \frac{31,6}{\sqrt{\rho f}} \cdot \frac{P_i}{\pi d l} \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot 10^{-4}$$

de donde, la altura de la cúpula es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia (f) y directamente proporcional a la potencia específica (P_i en Kw/m^2) . De aquí que cuanto mayor sea la frecuencia, tanto menor será la referida altura, por lo que aumentando la frecuencia el baño resultará más tranquilo y aumentando la potencia específica, la cúpula crecerá proporcionalmente en altura. Por esto no se podrá superar una determinada concentración de potencia, si se quiere evitar que el metal fundido sea "expulsado" del crisol.

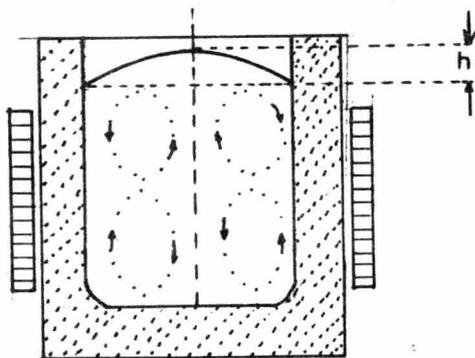


Fig. 3.6 : Elevación del baño.

De acuerdo con lo anterior, la potencia máxima de un horno estará limitada y dependerá asimismo de las dimensiones máximas posibles del crisol que a su vez depende de la magnitud máxima admisible capaz de garantizar también un funcionamiento seguro. El interior del crisol está en contacto con el caldo, que en el caso de fundición gris puede alcanzar temperaturas comprendidas entre 1 450 y 1 600 °C. En el exterior del crisol se aplica la bobina bajo tensión, en la cual no debe penetrar nunca el metal.

Otro factor a considerar en las dimensiones y potencialidad de los hornos, es la dilatación térmica del crisol. Cuando el crisol revestido se calienta por primera vez, esta dilatación térmica es absorbida, en parte, por la ulterior compactación del material de revestimiento, y en parte por la compresión de la capa de amianto dispuesta para el aislamiento térmico. No obstante lo cual existe una notable aportación de esfuerzos transmitidos por la bobina a los núcleos magnéticos, y por éstos nuevamente a la estructura mecánica de apoyo. La bobina por sí sola, no se encuentra en grado de absorber estos esfuerzos, por lo que debe estar siempre bien apoyada por la estructura del sostén.

Por otra parte, en la fase de enfriamiento el crisol

se constriñe hasta tal punto que en los hornos de grandes magnitudes (30 tons.) se produce, entre el crisol y la bobina, rendijas del orden de 10 mm. Por esta razón, antes de introducir en el horno la carga, es importante que el crisol sea precalentado a la temperatura de trabajo.

Se han construido hornos con una cabida de 60 toneladas de fundición que comprenden crisoles para baños con un volumen de unos 8,5 m³. No representan, sin embargo, un valor límite superior, como revela el ejemplo de un horno para aluminio cuyo crisol, (no basculante) presenta un volumen de unos 19 m³.

El revestimiento refractario de los hornos de inducción sin canal, es una de las partes más delicadas, pues se ha de limitar su espesor a 50 ó 100 mm. para no perjudicar el rendimiento eléctrico y ha de soportar la carga del acero, en muchos casos de varias toneladas.

El revestimiento puede ser como para todos los hornos ácido o básico.

El revestimiento básico tradicional está formado por magnesita , la cual presenta dos inconvenientes importantes :

1. Conductibilidad térmica excesiva, anulando la acción protectora que debe tener el revestimiento.
2. Dilatabilidad también excesiva que produce deformaciones y grietas.

En la actualidad, se estudia la fabricación por electrofundición de materiales adecuados para el revestimiento básico de los hornos de inducción, cuya duración sea similar a la del revestimiento ácido, de 75 a 80 coladas.

Los revestimientos ácidos producidos a partir de cuarcita de roca natural son sin duda los más utilizados en todo el mundo para la construcción del crisol refractario en hornos de inducción sin núcleo dedicados a la fusión de metales fé -

ricos, particularmente a la fusión de fundición.

Esta difusión del revestimiento ácido se debe a sus notables cualidades de resistencia al choque térmico (fig.3.7) buena refractariedad, aislamiento térmico elevado, gran densidad de atacado, baja porosidad y permeabilidad, junto a su facilidad de apisonado y sinterizado, que permite rehacer en horas un revestimiento nuevo.

Un análisis típico de una cuarcita de calidad es el siguiente :

SiO ₂	98/99 %
Al ₂ O ₃	0,5 %
Fe ₂ O ₃	0,2 %
Alcalis	0,1 %

Sin embargo, para conseguir una capa sinterizada apropiada es preciso añadir un agente ligante, tal como el ácido bórico, en un porcentaje bien definido de acuerdo con las condiciones operativas a que se somete al revestimiento.

Normalmente los revestimientos de cuarcita presentan una capa sinterizada resistente a la abrasión junto al metal fundido y otra de arena suelta entre ésta y la bobina, que sirve a modo de colchón para las contracciones y dilataciones de

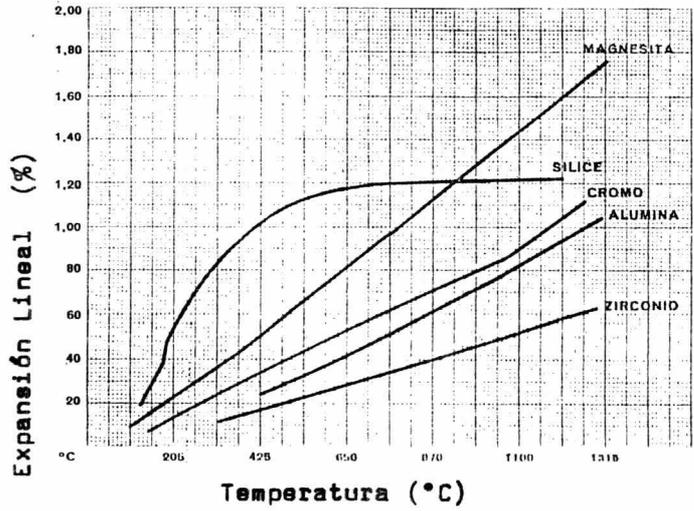


Fig. 3.7

Expansión lineal en porcentaje de 5 óxidos metálicos puros, que suelen utilizarse como materiales refractarios. El circonio y el óxido de cromo no se usan normalmente para la fusión del hierro en hornos de inducción.

de la capa sinterizada y también para detener las posibles filtraciones de metal que se producen a través de las grietas. A medida que envejece el revestimiento avanza la capa sinterizada reduciéndose la de arena suelta, debiendo considerarse - agotado el revestimiento cuando el espesor de la capa de arena sea inferior a una cota mínima que normalmente la fija el usuario por experiencia, de acuerdo con el tamaño del horno condiciones de trabajo y comportamiento del equipo eléctrico.

Otro factor importante es la granulometría de la arena, que debe estar en consonancia con el metal a fundir, su temperatura de colada y el tamaño del horno. En la tabla I se detallan la granulometría y los porcentajes de ácido bórico que deben ser utilizados para distintas temperaturas.

El acabado del borde superior de los revestimientos, no es posible construirlo con la misma cuarcita, y para ello se emplean cementos refractarios de fraguado al aire, mezclados con la cuarcita y con los que se conforma también el canal de colada; estos cementos sirven igualmente para el parcheo de las paredes, reparación de grietas localizadas o coqueras.

TABLA I

Granulometría	% de ácido bórico	Temperatura de trabajo recomendada	Aplicación	OBSERVACIONES
0-4 mm	1	Hasta 1.600 °C	Acero moldeado	Temperatura fritado, 1.630 °C.
0-4 mm	1,6	1.550-1.600 °C	Acero moldeado	Normalmente esta composición se emplea para fundición, pero sirve también para acero. Temperatura fritado, 1.600 °C.
0-4 mm	1,8	1.500-1.550 °C	Fundición	Para las fundiciones en que las temperaturas de colada son superiores a las normales.
0-4 mm	2	1.480-1.520 °C	Fundición	El fritado debe hacerse manteniendo el baño durante una hora a una temperatura de 50 °C superior a la normal de trabajo. Esta composición es adecuada para temperaturas inferiores, a condición de que el fritado se efectúe como para la gama indicada.
0-4 mm	2,5	1.360-1.400 °C	Fundición y no férricos	Se emplea con éxito en la fusión de algunos metales no férricos, alrededor de 1.300 °C. Temperatura fritado, 1.400 °C.
0-7 mm	1	1.650-1.700 °C	Acero	Temperatura fritado, 1.700 °C.

HORNO DE INDUCCION CON CANAL

La construcción de un horno moderno de inducción con canal, es netamente más complicada que la de un horno de inducción de crisol. El horno de canal está formado por dos partes constituyentes diferentes : el horno propiamente dicho, con su cavidad, y la parte del canal llamada inductor; se podría considerar una tercera parte que sería el núcleo de hierro laminado provisto para un acoplamiento magnético entre los dos primeros.

El principio del horno de inducción con canal, es básicamente el mismo del de crisol : el arrollamiento primario lo forma el núcleo de hierro laminado y el secundario el canal en el cuál la carga fundida forma una espira metálica.

Estos hornos se usan principalmente para la fusión de no ferrosos debido a que el uso de un canal ofrece grandes dificultades en la fundición de acero.

El horno de canal, con su función clásica de mantenimiento térmico y acumulación del material, se realiza casi siempre en forma de tambor si está destinado a contener volúmenes muy grandes. Teniendo en cuenta la estabilidad mecánica de los recipientes, a veces más bien grandes (hasta de 200 Ton)

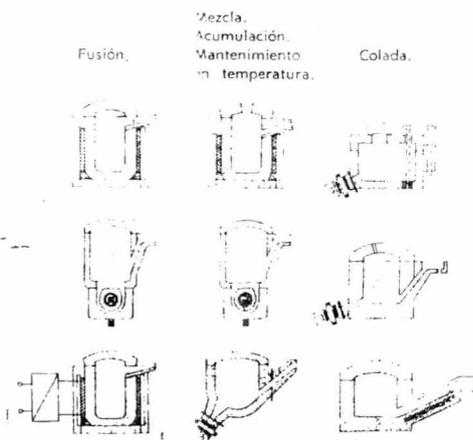


Fig 3.8. Algunos modelos de hornos de inducción para operaciones de fusión, aleación, acumulación, mantenimiento térmico y colada.

- 1a) horno de inducción por frecuencia de red;
- 1b) horno de canal con crisol vertical;
- 1c) horno de inducción de frecuencia media;
- 2a) horno de campo móvil;
- 2b) horno de canal con crisol vertical;
- 2c) horno de canal con recipiente de eje vertical;
- 3a) horno de colada con descarga por tapón;
- 3b) horno de colada con transporte a presión;
- 3c) horno de colada con canal electromagnético.

Fig. 3.8

la forma de tambor resulta la más conveniente. Entre otras cosas el revestimiento de mampostería puede actuar de bóveda autoportadora. La aplicación de un sifón de carga y descarga no presenta problemas. Los recipientes muy grandes se hacen girar alrededor del eje central, por lo que los órganos de mando resultan muy sencillos. El pico, no obstante, se mueve siguiendo un segmento de círculo. Para facilitar las operaciones en la fundición se requiere hoy, cada vez con más frecuencia, la inversión en torno del pico, incluso de recipientes de dimensiones mayores. Los hornos de crisol y los hornos pequeños de canal presentan esta característica desde hace ya mucho tiempo. Para exigencias especiales se pueden también construir hornos con canal al vacío.

Para el tratamiento del aluminio se dispone hoy de hornos de 25-40 toneladas y más. Su recipiente es de eje vertical. Recientemente se han presentado además en el mercado hornos de canal con crisol vertical para la fundición, que permiten la fusión de material sólido. De este tipo funcionan hornos de unas 40 toneladas y potencia de aproximadamente 1.500 kW. Se pueden también realizar hornos de hasta 100 toneladas y mayores. Para el cobre se conocen hornos de canal con una capacidad máxima de 50 toneladas y potencias de hasta 2 400 kW.

La limitación principal de todos estos hornos de canal

reside en el arrollamiento inductor del canal y su conexión al recipiente del horno.

La potencia de los arrollamientos inductores de los canales viene limitada por las fuerzas ponderomotrices en el interior del metal del canal, así como por la posibilidad de transmisión del calor del canal del baño.

Análogamente al horno de crisol, también en el horno de canal se verifican fuerzas radiales que comprimen el metal en el interior del canal.

A consecuencia del cambio de la sección transversal a lo largo del canal, (fig.3.9) tiene lugar también una variación de las presiones, con lo que en el ámbito de éste campo se producen corrientes análogas a las del horno de crisol. La corriente transporta el metal calentado desde el canal al cuello del arrollamiento inductor, de donde alcanza el recipiente del horno. Como en el horno de crisol, esta corriente presenta un punto de inversión que se encuentra, en los canales de tipo convencional, en el centro del mismo canal, es decir, a mitad de trayecto entre los dos puntos de entrada del canal en el cuello del arrollamiento inductor.

Sin embargo, debido a la relación entre la sección del

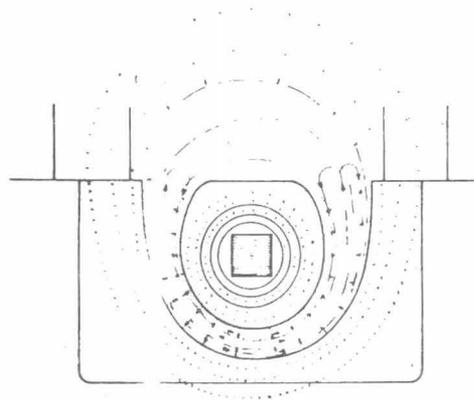


Fig. 3.9. Arrollamiento inductor para horno de canal.

Fig. 3.9

canal y la longitud de recorrido de la corriente, mucho más pequeño que en el horno de crisol, el movimiento es mucho más atenuado, provocando temperaturas mucho más elevadas en el interior del canal. Debido al cambio de la sección del canal a lo largo de su propio eje, dicho punto de rebose se puede desplazar de modo que la corriente resultante fluya en una sola dirección a través de todo el canal. De éste modo se crean mejores condiciones para la disipación del calor. En el caso de metales con punto de fusión muy alto, las sobretemperaturas producidas en el interior del canal limitan la potencia posible del mismo. La situación se torna crítica si a continuación de la periódica aplicación o supresión de la potencia se manifiestan cambios bruscos de temperatura que pueden provocar alguna grieta por fatiga de la cerámica.

Un segundo factor que limita la potencia de los hornos de canal son las fuerzas que actúan radialmente sobre el metal del canal y que tienden a restringir la sección transversal cuando la presión estática del baño no supera la presión que se produce en el canal. A diferencia del horno de crisol, el funcionamiento del horno de canal resulta inestable cuando en algún punto del canal se forma una restricción debida a las fuerzas ponderomotrices, que no pueden ser compensadas por la presión estática. Matemáticamente se ha demostrado que la potencia límite para los hornos de canal, es función del diámetro del canal.

Según la media de un canal de sección circular constante y con un radio r , se produce una presión de :

$$p = K \frac{l^2}{\pi r^2} \cdot 10^{-8} \text{ bar, } l(\text{A}), r(\text{cm})$$

Si la sección del canal es tal que la corriente de penetración pueda ser despreciada, entonces $K=1$.

Introduciendo en la ecuación anterior, para la potencia transformada en el interior del canal, la expresión :

$$p = l^2 \frac{1e}{\pi r^2}$$

(suponiendo un canal de sección constante y distribución uniforme de la corriente en todo el canal, despreciándose la influencia del campo de dispersión), resulta entonces :

$$p = 1,02 \frac{P}{e l} \cdot 10^{-5} \text{ Kp/cm}^2$$

donde:

- P : presión estática del baño
- e : sección del canal
- l : longitud de recorrido de la corriente
- K : constante = 0,5 cuando $r \gg d$

REVESTIMIENTO REFRACTARIO

El revestimiento refractario de los hornos de inducción con canal es más complicado y más lento que el de los hornos de crisol, debido principalmente a las dos partes constitutivas del horno : el horno y el inductor.

La parte del canal está situada la mayoría de las veces bajo el horno, pero en los más modernos va embridado en un lateral, al menos en parte. En los hornos antiguos, estas dos partes van unidas entre sí y el revestimiento refractario debe hacerse en una sola operación. Cuando el revestimiento está fuertemente dañado se procede a rehacerlo en ambas partes. El sucesivo desarrollo del horno de canal ha conducido a un tipo en el cual las dos partes del horno pueden tratarse separadamente. De esta manera, se hace posible cambiar solamente el inductor. Los grandes hornos van dotados de varios inductores, con lo que se hace posible efectuar el cambio del inductor caliente sobre la marcha. Y también es posible revestir el horno propiamente dicho y el inductor con distinto material refractario, de acuerdo con las exigencias de cada uno.

Los hornos más antiguos de inducción con canal iban revestidos con mortero ácido apisonado o con tierra natural. Se eligieron estos materiales de revestimiento porque, dada la for

ma complicada del horno, no era posible emplear ladrillos refractarios y también porque las solicitaciones sobre dicho revestimiento no eran muy altas.

Aquellas instalaciones iban dotadas de una potencia eléctrica limitada y servían tanto para fundir como para mantener caliente el caldo a baja temperatura. En los hornos modernos, que trabajan con mayores potencias eléctricas y son de mayor capacidad, el revestimiento debe durar mucho más, muchos meses, para que la marcha resulte económica. Por ello, en estos hornos de canal, el mortero ácido apisonado no es casi nunca suficiente y se emplea solamente en el revestimiento de las cucharas. Sobre todo en los hornos de canal dedicados a la fusión de metales.

Solamente algunos hornos con canal con capacidad hasta cuatro toneladas se revisten aún con mortero ácido apisonado. Aunque se ha usado la tierra natural se emplea más bien una masa sintética obtenida con granos de cuarcita aglomerados con alúmina. Se trata normalmente de hornos sencillos sin inductor desmontable, en los cuales ambas partes se revisten en una sola operación con el revestimiento apisonado. En primer lugar, se procede al aislamiento. Cerca del inductor, contra el revestimiento de chapa, se colocan láminas de amianto que tienen un espesor de 3-5 milímetros y, sobre ellas, losetas de chamota dura

o ligera, pero compacta, con un espesor de 30 a 40 mm. El mortero se apisona contra este estrato aislante mediante un martillo neumático.

En el inductor, para formar el canal, se sitúa una forma constituida por tubo de pared gruesa o de una pieza fundida maciza que, en ocasiones, también puede ser de acero. Esta forma debe fijarse con un dispositivo adecuado para impedir que se mueva o se levante durante el apisonado. Para evitar una compresión excesiva del estrato apisonado que forma el canal a causa de la dilatación de este último, la forma va revestida de material combustible, con lo que se obtiene un espacio libre para la dilatación. El apisonado del mortero plástico debe hacerse uniformemente con un pisón en forma de cuña.

Cuando se ha acabado el revestimiento del inductor, queda éste sólidamente al horno y puede iniciarse el apisonado de la cavidad del horno. Con éste fin se sitúa una robusta forma en chapa de acero que podrá ser luego desmontada. Mientras que en el inductor se forma un estrato aislante fino, en el horno el aislamiento debe tener un espesor superior para evitar las pérdidas de calor.

Acabado el revestimiento, hay que secar el horno, operación que dura, según sus dimensiones, de diez a catorce días.

El horno se calienta lentamente con un quemador de gas o gas-oil y la parte del canal mediante el calor inducido por la corriente eléctrica. Cuando tras la desecación, la temperatura se eleva hasta 1 200°, la forma del canal comienza a fundir. En ese momento, el horno debe llenarse con el hierro líquido o ir metiendo trozos del material frío en el baño que va haciendo en el canal.

La corta duración del revestimiento del horno de canal con mortero ácido apisonado ha conducido rápidamente al empleo de cuarcita apisonada, como ya se hace en los hornos de crisol. La masa con granulometría 0-4 mm., va aglomerada normalmente con ácido bórico. El revestimiento de un horno de canal con este material seco es mucho más complicada y caro, puesto que la forma es muy costosa y se pierde por fusión. En la mayor parte de los casos se trata de hornos con capacidad inferior a las 6 toneladas. Casi todos no llevan inductor sustituible y son hornos de tipo antiguo con canal simple o doble.

Gracias a su excelente refractariedad y a la buena resistencia a la escoria, se emplean también materiales básicos para el revestimiento de los hornos de inducción con canal en la fundición de hierro. Puesto que, en la mayor parte de los casos, este horno se emplea como mantenimiento del metal fundido en otro horno - generalmente cubilote - , normalmente con escoria -

ácida, la oportunidad de trabajar con una escoria básica es relativamente pequeña. La situación es distinta en el caso de que el caldo provenga de un cubilote de viento caliente básico o de un alto horno o de un mezclador.

El uso del apisonado básico para horno de inducción con canal - hasta ahora raramente empleado en Europa - se ha intensificado notablemente en estos últimos tiempos al comprobar que ciertos morteros básicos de calidad, especialmente americanos, han dado buen resultado. Dichos morteros están constituidos en su mayor parte por MgO , y los americanos están formados con mag nesita sinterizada muy pura.

IV. CONCLUSIONES

En la actualidad, la fundición dispone de hornos de calentamiento eléctrico para realizar los procesos de fusión, mantenimiento térmico, aleación y colada. Su funcionamiento satisface los requisitos tecnológicos y su operación es fácil. Es también posible una amplia automatización del proceso. Se trata de dispositivos con óptimas perspectivas futuras en el campo de la fundición.

V. BIBLIOGRAFIA

1. D.C. Ekey, Ph. D. & W.P. Winter, M. Ed. "Introduction to foundry technology". McGraw-Hill, N.Y. 1958.
2. Richard W. Heine, Carl R. Loper & Philip C. Rosenthal "Principles of Metal Casting". 2a.Ed. McGraw-Hill, N.Y. 1967.
3. A.U. Seybolt & J.E. Burke. "Técnicas de metalurgia experimental". Limusa-Wiley. Mex. 1969 .
4. John L. Bray. "Ferrous Process Metallurgy". J.Wiley & Sons N.Y.
5. Douglas Alan Fisher. "From the iron age to the space age". STEEL. Harper & Row, Publishers. N.Y.
6. Sidney H. Auner. "Introduction to physical Metallurgy". McGraw-Hill, 1964.
7. Merle C. Nutt. "Principles of modern metallurgy". Charles E. Merrill Publishing Co. Ohio. 1968.
8. Schuhmann, Reinhardt. "Ingeniería metalúrgica". Ed. Continental México. 1968.
9. Encyclopedia of science and technology. Tomo 7. McGraw-Hill.
10. Perry & Chilton. "Chemical Engineers' Handbook". 5th. Ed. McGraw-Hill.
11. Enciclopedia de la tecnología Química. Tomo 9. Ed. Hispanoamericana. Mex. 1966.
12. H. Hegelwaldt. "Hornos de Inducción para la fundición". Rev. LA FONDERIA ITALIANA, núm. 4, 1973.
13. L. Otrasi y M. Giuchendi. "Características constructivas del Horno Eléctrico". FUNDICION, núm. 105, Sept. 1968.
14. Juan J. Fernández. "El empleo del Horno de Inducción a baja frecuencia en las fundiciones de hierro y acero". FUNDICION núm. 107, Nov. 1968.
15. Eduardo R. Abril. "Metalurgia". Ed. Marymar. B. Aires 1974.
16. Rafael M. Teillet. "Estudio comparativo de los medios de fusión". FUNDICION, núm. 121, enero 1970.

17. Luigi Sitia. "Hornos de Inducción con crisol". FUNDICION núm, 125, mayo 1970.
18. M. Savaretta, H.G. Feldhus, N. Serratrice, F. Rivalta, L. Sitia. "Revestimiento refractario de los hornos modernos de inducción con canal". FUNDICION, núm. 157, abril 1973.
19. Howell y Campbell y M. Urruticoechea Urquiza. "Recomendaciones para la instalación y sinterizado de revestimientos ácidos en hornos de inducción sin núcleo". Rev. de la Asoc. Técnica de Fund., Vol 5 núm. 3, marzo 1972.
20. R.W. Murray. "Foundry melting: Cupola vs. Induction vs. Arc". STEEL FURNACE MONTHLY. Vol.7, núm. 11, nov. 1972.
21. S.K. Kabi. "Monolithics for small furnaces; a stepping stone for future refractories". STEEL FURNACE MONTHLY. Vol.9, núm. 4, abril 1974.
22. A. Malishev, G. Nikolaiev y Y. Shuvalov. "Tecnología de los Metales". 3a. Ed. , Ed. Mir. 1970.
23. A. Jackson. "Fabricación de Aceros al oxígeno". Ed. URMO
24. Ing. Roberto González Telke. "Consideraciones metalúrgicas en la fusión de aceros aleados en los hornos de inducción a frecuencias de la red. Con crisol, sin núcleo y sin canal". II CONGRESO NACIONAL Y EXPOSICION DE LA INDUSTRIA DE LA FUNDICION. México.
25. S.A. "Materiales Refractarios: su importancia en siderurgia". REVISTA LATINOAMERICANA DE SIDERURGIA. núm. 73, Mayo 1966.
26. José María las Heras Esteban. "Tecnología del acero". Ed. Labor
27. S.A. "Coreless Induction Furnace". STEEL FURNACE MONTHLY. Vol. 9, núm. 2, Feb. 1974.
28. H.O. Hofman. "Metalurgia General". Gustavo Hill Ed. Barcelona.
29. Joe L. Morris. "Procesos Modernos de Fabricación". Ed. Labor 1961.
30. James S. Campbell. "Casting and Forming Process in Manufacturing". McGraw-Hill, 1950.

31. Carl A. Keyser, Lawrence E. Doyle, James L. Leach, George F. Schrader & Morse B. Singer. "Manufacturing Processes and materials for Engineers". 2nd. Ed. N.Y.
32. GÜnter Meyer. "Recientes Evoluciones del Alto Horno". IX CONGRESO DE LA SIDERURGIA. 1969.
33. Horno de Cubilote y su operación. AMERICAN FOUNDRY MEN'S SOCIETY.
34. Raymond A. Higgins. "Ingeniería Metalúrgica". Tomos I y II Ed. CESA. 1963.
35. Sidney H. Avner. " Introducción a la Metalurgia Física". McGraw-Hill. 1974
36. W. Freking. "Revestimiento y explotación de los hornos eléctricos de Inducción, de canal en las fundiciones". Gießerei, núm. 23-4, 1970.