

PROCESOS DE FUNDICION

GUIA DE ESTUDIO

UNIDAD No. 2: HORNOS DE FUNDICION.

Competencia específica a desarrollar: Conocer e identificar los hornos para llevar a cabo la fundición y seguir los procedimientos adecuados para cada uno de ellos.

2.1. Tipos de calentamiento y Hornos de Fundición.

Dependiendo de la calidad que se exija a la masa fundida, la productividad y la eficiencia energética, se pueden usar distintos tipos de calentamiento. En principio, pueden usarse hornos con calentamiento eléctrico o por gas. En este contexto y desde el punto de vista de los costes, los niveles locales de precios son determinantes para el tipo de energía elegido.

Los hornos industriales son los equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan los materiales y las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente. El objeto de este calentamiento puede ser muy variado, por ejemplo:

- Alcanzar la temperatura necesaria para que se produzcan las reacciones químicas necesarias para la obtención de un determinado producto.
- Cambios de estado (Fusión de los metales y vaporización).
- Ablandar para una operación de conformado posterior.
- Tratar térmicamente para impartir determinadas propiedades.
- Recubrir las piezas con otros elementos, operación que se facilita frecuentemente operando a temperatura superior a la del ambiente (Vitrificado de los productos cerámicos).

En el trabajo de los metales, la temperatura desempeña un papel de gran importancia. Las temperaturas elevadas vuelven más blandos la mayoría de los metales, capacitándolos para las operaciones de deformación por flexión, forja, estampación, extrusión o laminación.

Las temperaturas todavía más elevadas funden los metales y también eliminan la acritud de los mismos; el proceso de calentamiento de los metales con este fin, enfriando después de modo que no se produzca ninguna deformación, se conoce como recocido. La elevación de la temperatura por encima de un cierto punto crítico, seguida de un enfriamiento brusco, vuelve el acero más duro y resistente pero con una ductilidad menor.

Un nuevo calentamiento a una temperatura inferior al punto crítico disminuye la dureza y aumenta la ductilidad. Se conoce como tratamiento térmico el proceso completo que tiene por objeto producir unas propiedades físicas deseadas, controlando la estructura cristalina.

Las operaciones industriales abarcan una amplia gama de temperaturas, las cuales dependen del material a calentar y también (para un material dado) del objeto del proceso de calentamiento y de las operaciones subsiguientes. Así, atendiendo al tipo de efecto que el horno produce en el producto, se pueden tener:

⌘ Hornos para producir **efectos físicos** en el producto, que a su vez pueden dividirse en:

- Hornos de calentamiento
- Hornos de fusión

⌘ Hornos para producir **efectos químicos** en el producto (Reducción sin fusión, fusiones reductoras, sinterización, tostación, calcinación, volatilización reductora, volatilización, metalotermias, etc).

Tabla 1.1. Contiene con cierta aproximación las temperaturas de calentamiento de algunos materiales y procesos.

Proceso de calentamiento u operación subsiguiente	Temperatura a la que se calienta el material, °C (temperatura más elevada durante el proceso de calentamiento)
Secado de alambre de acero	149
Secado de lacas.	149
Laqueado	82-232
Estufado de machos de piezas moldeadas en hierro fundido	149-232
Pavonado	260
Estañado en baño caliente.	260
Revenido en aceite	260
Revenido de aceros rápidos.	332
Recocido de aluminio.	398
«Cracking» del petróleo bruto.	398
Calentamiento del aluminio para laminación	454
Nitruración del acero.	510
Recocido del latón	538
Recocido del vidrio.	621
Recocido del cobre.	621
Recocido de alpaca.	649
Esmaltado, proceso en húmedo.	649
Normalizado.	649-704
Recocido de bandas laminadas en frío	676-760
Aporcelanado para decoración.	760
Calentamiento para la laminación de latones	787
Recocido de chapas y alambres de níquel o monel	799
Recocido de los aceros con elevado contenido en carbono.	815
Tratamiento térmico del acero medio en carbono (0,3 %).	843
Temple isotérmico (patenting) de alambre	871
Recocido en cajas de chapas finas de acero.	871
Esmaltado vítreo de chapa de acero	871
Calentamiento del cobre para laminar.	871
Forja del titanio comercialmente puro.	871
Recocido de piezas moldeadas de acero.	899
Normalizado de tuberías de acero	899
Calorización (impregnación de una superficie metálica con aluminio en polvo).	926
Calentamiento de llantas para chapa fina (llantones)	926
Normalizado de chapas finas de acero	954
Cementación.	954
Calentamiento en paquetes de chapa fina de acero.	954
Recocido de ciclo corto de fundición maleable.	982
Cianuración.	982
Vitrificado de la porcelana.	999
Esmaltado vítreo (de piezas fundidas)	1010
Calentamiento de barras y paquetes de acero inoxidable	1037
Normalizado de acero inoxidable	926-1093
Laminación del acero inoxidable	954-1232
Forja de las aleaciones de titanio	871-1065
Recocido de piezas fundidas de acero al manganeso	1037
Calentamiento para la laminación de los aceros de herramientas.	1037
Calentamiento para estampación de chapa de acero.	1049
Calentamiento para la laminación del acero para muelles	1093
Cocción de vidriado de la porcelana.	1121
Temple del acero rápido.	1204
Calentamiento de bizcocho de porcelana.	1232
Calentamiento para la laminación de lingotes y palanquillas de acero; también calentamiento para remachar	1246
Calentamiento del acero para forja libre o en estampa	1299
Calcinación del carbonato cálcico	1371
Soldadura de tubos de acero a partir del fleje previamente conformado.	1399
Calcinación del ladrillo refractario.	1315-1482
Calcinación del cemento Portland	1426
Fusión del vidrio.	1426
Fusión del acero	1676
Fusión del acero al cromo.	1787

Esta transmisión de calor puede realizarse por llamas (lecho fluidificado), convección (hornos con fuerte recirculación de los humos, del aire o de la atmósfera protectora sobre las piezas) y radiación (de resistencias, de tubos radiantes, de llamas o de las paredes refractarias interiores). Únicamente consideramos los hornos industriales, es decir, los utilizados en todo tipo de industria. La energía calorífica requerida para el calentamiento de los hornos puede proceder de:

- Gases calientes producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que calientan las piezas por contacto directo entre ambos o indirectamente a través de tubos radiantes o intercambiadores en general.
- Energía eléctrica en diversas formas:
 - ⊙ Arco voltaico de corriente alterna o continua
 - ⊙ Inducción electromagnética
 - ⊙ Alta frecuencia en forma de di-electricidad o microondas
 - ⊙ Resistencia óhmica directa de las piezas
 - ⊙ Resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor. A los hornos industriales que se calientan por este medio se denominan hornos de resistencias.

CLASIFICACION

La clasificación más completa y amplia posible atiende a los siguientes aspectos:

- | | |
|---|------------------------|
| ↖ Forma de Funcionamiento: | ↖ Continuo |
| | ↖ Discontinuo |
| ↖ Dispositivos de calentamiento: | ↖ Combustible |
| | ↖ Energía eléctrica |
| ↖ Disposición de la calefacción: | ↖ Superior |
| | ↖ Inferior |
| | ↖ Lateral |
| | ↖ Por un extremo |
| ↖ Tipo de recinto: | ↖ Solera de rodillos |
| | ↖ Cinta transportadora |
| | ↖ Solera giratoria |
| | ↖ De mufla |
| | ↖ De carro |
| | ↖ De crisol |
| ↖ Forma de recuperación del calor de gases: | |
| ↖ Tipo de efecto en el producto: | ↖ Fusión |
| | ↖ Recalentamiento |
| | ↖ Tratamiento térmico |
| | ↖ Especiales |

Figura 2.1. Clasificación de los tipos de equipos industriales que requieren, acumulan y/o recuperan energía térmica en el proceso en el que son empleados.

Utilización de combustibles para el calentamiento de hornos.

La energía necesaria para la fusión de metales se extrae de la de ciertos combustibles como lo son en el caso el carbón o coque mineral, fuel oíl, gasoil o propano u otros. Estos combustibles se utilizan tanto para el encendido como para el mantenimiento de los hornos de fusión como para el mantenimiento de la carga térmica para el correcto transcurrir de la operación.

Se debe estudiar la posibilidad de canalizar adecuadamente los gases de combustión para aprovechar su carga térmica, como por ejemplo la calefacción de naves. Todo elemento que pueda ceder parte de la carga térmica que posea deberá ser eficientemente calorifugado. Esto llevara a un importante ahorro, siempre que el aislamiento sea el correcto.

Tipos de combustibles

Los combustibles usuales en la industria, ya sean líquidos, sólidos, etc., presentan una serie de características que le son propias. Para quemarlos eficientemente, es necesaria la adopción de medidas y la utilización de equipos especiales, adecuados a cada uno de ellos. El petróleo, carbón, gas natural, o sea los combustibles que podemos llamar nobles, producen de 15 a 18 kg de gases cada 10.000 calorías liberadas. Los procesos usados en una refinería de petróleo implican el uso de calor y este calor se obtiene quemando combustible, directamente en un horno.

Los combustibles se suelen clasificar de acuerdo a su estado en condiciones normales, es decir:

a) Gaseosos

- Naturales: gas natural
- Procesados: gas residual de refinерías, gas de coque, propano, butano, etc.

b) Líquidos

- Naturales: betún, petróleo
- Procesados: destilados de petróleo, alquitrán, residuos de refinерía

c) Sólidos

- Naturales: hulla, madera, etc.
- Procesados: coque, carbón de leña, carbón pulverizado

Por Fase		Por Aplicación	
Producción Natural	Producción Sintética	Transferencia de Calor	Generación de Energía
SÓLIDOS			
Carbón	Coque	Hornos de Proceso	Combustión interna
Madera	Carbón Vegetal	Unidades de secado	Generadores
Vegetación	Desechos orgánicos	Generación de vapor	Cogeneración
Desechos inorgánicos			Turbinas
LÍQUIDOS			
Crudo	Destilado petróleo		
Aceites biológicos	Alcoholes		
Combustibles vegetales	Combustibles coloidales		
GASEOSOS			
Gas Natural	Hidrogeno		
Biogás	Metano		
Gas metano	Propano		

Selección de combustibles:

- Costo
- Disponibilidad
- Transporte
- Reglamentación Ambiental

Figura 2.2. Clasificación de los tipos de combustibles y el criterio de selección.

✚ CALENTAMIENTO POR TIPO DE COMBUSTIBLE O ENERGÍA ELÉCTRICA.

Para evitar ambigüedades se denominará hornos a todos aquellos equipos o instalaciones que operan, en todo o en parte del proceso, a temperatura superior a la ambiente.

2.1.1. Combustión:

- **Gases calientes** (Llama) producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que calientan las piezas por contacto directo entre ambos o indirectamente a través de paredes o tubos radiantes o intercambiadores en general.
- **Calentamiento de hornos por combustible sólido.** En la actualidad son pocos los equipos empleados, ya que los diversos carburantes de este tipo han dejado de ser de los principales combustibles industriales, debido al encarecimiento de su extracción de las minas que cada vez son más profundas y de su difícil mecanización; a la masiva producción y al menor coste de los combustibles derivados del petróleo (en algunas industrias, el carbón se sustituyó por el fuel-oil).

Sin embargo, contradictoriamente su importancia económica va en aumento ante el encarecimiento y previsible escasez del petróleo y también por las modernas técnicas de la industria química, que lo utiliza como materia prima para producir gran variedad de productos. Los combustibles sólidos son inflamables a temperatura y presión ambiente y al quemarse producen cenizas y humos. Las principales características que afectan a su combustión son: contenido de humedad, conductividad térmica, temperatura de ignición, grado de combustión, carga térmica, velocidad propagación del calor, naturaleza del foco del calor, forma, etc.

El carbón mineral como coque es el combustible sólido más utilizado, en la industria siderurgia. El carbón mineral se comercializa, clasificado por su tamaño, en cualquiera de sus cuatro variedades. Para aprovechar el polvo y los pedazos demasiado pequeños se fabrica el carbón aglomerado en formas prismáticas u ovoidal, que se consiguen por compresión de las partículas.

La combustión del carbón produce problemas de contaminación química en la atmósfera, la lluvia ácida, debida al desprendimiento de gas sulfuroso (SO₂) derivado de la combustión del azufre que acompaña al carbón como impureza. Este gas se convierte en ácido sulfúrico en contacto con la humedad atmosférica y produce daños importantes.

<p>COMBUSTIBLES SÓLIDOS</p> <p>La buena combustión depende de la facilidad de acceso del aire a las partículas del combustible</p> <p>CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Carbón mineral✓ Carbón vegetal: Madera✓ Biomasa: Bagazo✓ Desechos sólidos: cauchos, polietileno, etc <p>FORMAS DE USO</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Pulverizado: Fluidizado y Banda Transportadora✓ Emulsión✓ Estado Natural <p>COMBUSTIBLES SÓLIDOS</p> <p>CARACTERÍSTICAS</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Alto contenido de oxígeno, nitrógeno y azufre✓ Poder calorífico✓ Contenido material volátil✓ Contenido de cenizas✓ Humedad✓ Granulometría✓ Temperatura de fusión de las cenizas	<p>COMBUSTIBLES SÓLIDOS</p> <p>El proceso de combustión de un combustible sólido posee las siguientes fases:</p> <ul style="list-style-type: none">❖ Secado del combustible: Humedad contenida en el combustible❖ Destilación: Separación de los componentes volátiles contenidos en el combustible.❖ Quema de los componentes menos volátiles debido al calor generado por la combustión de los volátiles.❖ Residuo de cenizas en el proceso de combustión <p>El uso de combustibles sólidos requiere una mayor inversión para el almacenamiento, preparación, manejo y transporte del combustible, pero a su vez su costo es mucho más bajo que los combustibles líquidos y gaseosos.</p> <p>COMBUSTIBLES SÓLIDOS</p> <p>EVALUACION COMO COMBUSTIBLES</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Mayor inversión para el almacenamiento, manejo, preparación y transporte✓ Alta contaminación atmosférica✓ Menor eficiencia✓ Costos bajos respecto a combustibles líquidos y gaseosos <p>COMPOSICION DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS</p> <p>CONSIDERACIONES DE SELECCION</p> <ul style="list-style-type: none">✓ Disposición y tipo de cenizas✓ Efectos de corrosión / abrasivos✓ Mezcla con otros combustibles
---	---

Figura 2.3. Clasificación, formas de uso, fases de acondicionamiento, características, composición y evaluación de los combustibles sólidos.

- **Calentamiento de hornos por combustible líquido.** Son equipos que solo en casos específicos son empleados en la industria metalurgia, más no muy recomendados, debido a su manejo, almacenamiento y que son de no muy alto poder calorífico los que pueden proporcionar un adecuado poder calorífico tienen elevada viscosidad. Aun para tal efecto algunos de estos combustibles industriales pesados se entregan en carros tanques calentados con vapor. Mediante este procedimiento el combustible se conserva a la temperatura correcta para ser quemado y se mantiene una presión constante en los quemadores, de modo que el control del encendido es relativamente sencillo. Los hornos instalados aisladamente pueden tener unidades combinadas de bombeo y calentamiento localizadas cerca del punto de uso.

Los combustibles líquidos, desde el punto de vista industrial, son aquellos productos que provienen del petróleo bruto o del alquitrán de hulla. Se clasifican según su viscosidad o según su fluidez si es que proceden del alquitrán de hulla.

Los combustibles líquidos son los materiales de generación de energía o combustibles que pueden ser aprovechados para generar energía mecánica, o energía cinética. La mayoría de los combustibles líquidos son derivados de combustibles fósiles, sin embargo, hay otros tipos.

Los combustibles líquidos requieren una buena atomización para mejorar el contacto con el aire, la llama producida es mucho más sucia que la de los gaseosos y requieren de mayor exceso de aire. La relación hidrógeno-carbono de los combustibles líquidos está por el orden de 0,15.

A partir del crudo de petróleo podemos obtener un gran número de combustibles líquidos. El petróleo resulta ser la fuente por antonomasia de combustibles líquidos. Los principales combustibles líquidos son:

- ✓ Gasolinas: Abarcan compuestos hidrocarbonados que van desde C4 a C10.
- ✓ Kerosenos: C10 a C14: cadenas hidrocarbonadas de 10 a 14 átomos de C
- ✓ Turboreactores: C10 - C18/C14
- ✓ Gasóleos: C15-C18
- ✓ Fuel-oil: Van a ser lo que tengan un punto de destilación más altos; es decir, los de mayor número de átomos de carbono y los más pesados.

CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES LIQUIDOS	ESTRUCTURA MOLECULAR DE LOS COMBUSTIBLES LIQUIDOS
<p>Son mezclas de hidrocarburos derivados del petróleo por medio de procesos de refinación. En el petróleo se pueden distinguir diferentes compuestos, además de hidrocarburo, el petróleo contiene pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno, azufre, vanadio, níquel, hierro, trazas de otros metales e impurezas tales como agua y sedimentos.</p>	<p>Crudo y Destilados</p> <ul style="list-style-type: none"> • Parafínicos Nafténicos • Aromáticos Olefinas <p>Residuales</p>
<p>CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES LIQUIDOS <i>Composición química parecida, propiedad física diferente</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Gravedad específica ✓ Viscosidad ✓ Poder calorífico ✓ Curva de destilación ✓ Punto de inflamación ✓ Contenido de carbón conradson ✓ Contenido de cenizas ✓ Contenido de sedimento y agua ✓ Contenido de azufre 	<p>COMPOSICION DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis Químico C, H, S, N, O • Contenido de C: 83 – 88% • Contenido de H: 7 – 12% <p>CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES LÍQUIDOS</p> <p>VISCOSIDAD La medida de la resistencia a fluir. Para un combustible líquido es la facilidad para ser bombeado y atomizado. Los combustibles líquidos se manejan a diferentes niveles de viscosidad Comportamiento de la viscosidad con la temperatura A mayor temperatura menor viscosidad (GPSA FIG 23.21)</p> <p>PODER CALORIFICO Energía liberada como calor en la combustión Relación poder calorífico y gravedad específica</p>

Figura 2.4. Clasificación, características, estructura, composición y evaluación de los combustibles líquidos.

- **Calentamiento de hornos por combustible gaseoso.** Son idóneos para el servicio de los procesos de fundición, especialmente cuando cuentan con evacuación de gases de escape a través del borde del crisol. Cuando se persigue una alta calidad de la masa fundida, es aconsejable usar una evacuación lateral de los gases de escape. No obstante, la calidad de la masa fundida aumenta en proporción inversa a la eficiencia energética, porque el horno de fusión con calentamiento por combustible y evacuación lateral de los gases de escape consume un 20-25 % más de energía que un horno con canalización por gases a través del borde del crisol.

Los hornos de fusión con calentamiento por combustible, con sistemas de quemadores que incluyen recuperación del calor mediante recuperadores permiten un óptimo aprovechamiento de la energía además de la máxima calidad de la masa fundida. Con los gases de escape calientes del horno se precalienta el aire de combustión para los quemadores a través de un intercambiador de calor. El sistema genera un ahorro de hasta el 25 % en comparación con los hornos de fusión ordinario con calentamiento por combustible y salida lateral de los gases. Actualmente se dispone para el uso los siguientes gases combustibles:

- Gas Natural y LP
- Gas de Hulla y de Alto Horno

Los combustibles gaseosos tienen sus características propias, que conviene conocer para su correcto manejo y para el proyecto adecuado de las instalaciones. Ellas son: el poder calorífico, la composición química, la densidad, la velocidad de ignición, las condiciones explosivas, las formas de suministro, los datos para la combustión y usos comerciales. En el caso de los líquidos, esta preparación consiste en precalentar el combustible hasta la temperatura requerida y luego atomizarlo, es decir convertirlo en partículas pequeñas. Esto se hace con el fin de ofrecer una gran superficie de exposición al calor del horno, logrando de esta manera vaporizar rápidamente el combustible líquido.

<p>COMBUSTIBLES GASEOSOS</p> <p>Un combustible gaseoso es más fácil de manejar y su combustión es limpia y sin problemas de operación.</p> <p>El gas es un combustible de fácil quemado, ya que para su combustión sólo requiere ser mezclado con determinada cantidad de aire a condiciones óptimas de temperatura.</p> <p>CLASIFICACIÓN DE LOS GASES COMBUSTIBLES</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ PRIMERA FAMILIA: Gases manufacturados ✓ SEGUNDA FAMILIA: Gas Natural ✓ TERCERA FAMILIA: GLP, Propano, Butano 	<p>CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Gravedad Específica: Relación de densidad con respecto al aire. $\rho_{\text{aire}} = 0.0763 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \quad \text{ó} \quad 1.225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad @ \text{ c.s}$ <ul style="list-style-type: none"> ✓ Composición del gas ✓ Poder calorífico: energía liberada en el proceso de combustión. ✓ Temperatura de Ignición: Temperatura mas baja a la que sucede la combustión auto-sometida. ✓ Límites de Inflamabilidad: Rango de concentración aire-combustible en el que sucede la combustión.
<p>APLICACIONES DEL GAS NATURAL COMO COMBUSTIBLE</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilización térmica clásica: gasodomésticos, calderas, hornos, turbogás. ✓ Utilización térmica especial: tratamientos térmicos (oxi-red). ✓ Utilización térmica particular: características químicas y termodinámicas tanto del gas como productos de combustión. 	<p>COMPOSICION TÍPICA DEL GAS NATURAL</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ METANO: 70 – 96% ✓ ETANO: 1 – 14% ✓ PROPANO: 0 – 4% ✓ C₄⁺: 0 – 2%

Figura 2.5. Clasificación, características, aplicaciones y composición de los combustibles líquidos (Gas LP).

2.1.2. Eléctricos

➤ **Energía eléctrica en diversas formas.** Si lo principal es la calidad de la masa fundida y la eficiencia energética, es recomendable usar hornos de fusión con calentamiento eléctrico. La regulación del calentamiento es pausada y precisa. La masa fundida no se contamina con las emisiones del calentamiento por combustible. Los hornos de fusión con calentamiento eléctrico pueden alcanzar hasta el 85 % de la potencia de fusión de los hornos de fusión con calentamiento por combustible con salida lateral de gases. Si los hornos se usan exclusivamente para mantener el calor de la masa fundida, es recomendable emplear los modelos que, debido a su buen aislamiento y a la reducida potencia de conexión, funcionan con especial eficiencia energética.

- Arco voltaico de corriente alterna o continua.
- Inducción electromagnética.
- Alta frecuencia en forma de dielectricidad o microondas.
- Resistencia óhmica directa de las piezas.
- Resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor.

La forma de calentamiento da lugar a la clasificación de los hornos en dos grandes grupos, con diversos tipos:

- Hornos de resistencias.
- Hornos de arco eléctrico
- Hornos de inducción

Son evidentes algunas de las ventajas del calentamiento eléctrico que se señalan a continuación:

- Ausencia de humos de combustión.
- Mejores condiciones de trabajo alrededor del horno y ambientales por el exterior.
- Mayor seguridad del personal.
- Posibilidad de mantener los hornos sin vigilancia fuera de las horas de trabajo por eliminación del peligro de explosiones.
- Más simple utilización de las fibras cerámicas como aislamiento del horno.
- Gran elasticidad de funcionamiento y sencilla automatización de los hornos.

Ha sido frecuente la instalación de los diversos hornos de una planta industrial en un recinto propio denominado departamento de hornos o de tratamientos térmicos, con el coste que ello supone por el transporte de las piezas desde el mecanizado y hasta la línea de montaje o proceso posterior. Los hornos eléctricos permiten instalar los hornos dentro de las líneas de producción, ya que se consiguen condiciones ambientales perfectamente aceptables.

CLASIFICACION DE LOS HORNOS ELECTRICOS

Los varios tipos de hornos eléctricos usados actualmente en las industrias metalúrgicas pueden clasificarse como sigue:

- 1) Hornos de arco eléctrico
- 2) Hornos de inducción
- 3) Hornos de resistencia

Para la fabricación de aceros, el horno de arco es el tipo más utilizado; le siguen los hornos de inducción. Los hornos de resistencia no se utilizan debido a las altas temperaturas involucradas pero si para el calentamiento de otros metales.

HORNO ELECTRICO

El primitivo desarrollo del acero eléctrico y la aplicación de los hornos eléctricos a la metalurgia del acero, fue principalmente estimulada por el deseo de obtener un producto que compitiera con el acero al crisol, bastante caro. El horno eléctrico obtuvo gran éxito. La idea de la construcción de hornos eléctricos comenzó a tomar forma a mitad del siglo XVIII. Su utilización efectiva a escala industrial se inició solamente después de 1900 (Siglo XX), es también utilizado para la fabricación de importantes cantidades de acero de calidad corriente.

Figura 2.6. Clasificación, características, aplicaciones y ejemplos de hornos que emplean energía eléctrica.



Figura 2.7. Tipos de hornos que requieren energía eléctrica.

2.1.3. Radiación o convección.

Las necesidades de las empresas actuales se enfocan en los procesos que les permitan las producciones en masa, de la forma más rápida, económica y sin tener que poner en riesgo la calidad de los productos finales. Dentro del área industrial es común encontrar los procesos que requieren calor, elevando las temperaturas de forma progresiva hasta alcanzar los grados ideales para poder obtener las funciones que se buscaban. Uno de los hornos más comunes para procesos industriales es el horno de convección forzada, en el cual un gas (generalmente aire) fluye a través del horno para transferir el calor.

El mecanismo de transferencia de calor por movimiento de la masa es lo que conocemos como convección, mientras que la convección forzada es el mecanismo de transferencia de calor entre una superficie y la atmósfera de una cámara, con un movimiento que fluye alrededor de la pieza transfiriendo el calor.

Los hornos de convección forzada deben contar con la capacidad de operar sin perder su homogeneidad, llevando el aire de una temperatura ambiente hasta los máximos niveles de calor, pero también de llevarlo a un punto intermedio. En estos hornos no todos los patrones de circulación de aire se aplican a un mismo proceso, ya que las cámaras de flujo tienen diseños horizontales, verticales y combinados.

Al interior de los hornos de convección forzada se utiliza acero, después una capa de fibra aislante y el cuerpo exterior puede ser acero, u aluminio. Los hornos de convección son muy utilizados para el polimerizado de pinturas, o para los curados a temperaturas menores a 500°C. Cuando la temperatura del horno es superior a los 500C se recomienda el uso de acero inoxidable en el interior del horno, así como aumentar el grosor de la fibra aislante.

Un horno de convección forzada puede utilizarse a gas, electricidad o a vapor como fuente de energía, siendo el vapor el más recomendable para las bajas temperaturas; los hornos eléctricos o electro-térmicos son los más utilizados en las industria porque producen el calor de forma sencilla, al hacer pasar la corriente eléctrica a través de una resistencia que rodea al horno, calentando desde el exterior a través de una bobina enrollada en un material, que puede ser un tubo de material metálico o refractario.

Estos hornos se utilizan con el fin de controlar la temperatura con mayor precisión, ya que el tipo de resistencia que se utilicen puede ofrecer un mayor desempeño, siendo el principal inconveniente de estos hornos el costo de operación, pues el uso de electricidad representa un costo más elevado que con el uso de gas, que en vez de una resistencia utilizan un sistema generador de combustión del oxígeno y el gas, que produce una llama para calentar al interior del horno.



Figura 2.8. – a. Hornos de convección e inducción.

Los hornos de convección forzada suelen utilizar el sistema de gas, por lo que son una alternativa económica y eficaz para las industrias; los quemadores de estos hornos se pueden encontrar en diferentes tamaños y potencias, con lo que se puede satisfacer las necesidades especiales de cada industria o sector. Además de estos quemadores, el horno a gas debe contar con suficiente aire que circule al interior, por lo que suelen contar con ventiladores que se ubican en las cámaras de circulación al exterior para evitar que la llama producida tenga contacto directo con las piezas que van a curarse en el horno.

Cuando buscamos un horno de convección, es muy importante tener en cuenta el tipo de aplicación y las características de las piezas y materiales con los que se van a trabajar, con el fin de utilizar la mejor opción, que brinde los resultados esperados y ayude a reducir los costes de operación. Recordemos que los hornos que utilizan los procesos de convección llevan a las piezas a la temperatura de curado calentando el aire al interior de las cámaras, donde se pueden colocar piezas mediante el uso de resistencias eléctricas o de quemadores de gas y mejorar la circulación con sistemas especiales (que provocan la convección forzada) y que permiten las operaciones de forma continua o estática.

Además podemos encontrar otros hornos de curado, que son los infrarrojos y los de radiación; los hornos de paneles infrarrojos son hoy en día una forma más eficaz de complementar a los hornos de convección, se pueden utilizar para el curado de esmaltes o pinturas en polvo, secado de solventes, procesos de moldeo, calentamiento, incubado o termoformado. Estos hornos funcionan a través de energía infrarroja irradiada por el aire y re-direccionada y enfocada por un cuerpo cercano, sin un medio para transmitir la energía.

Cuando la energía infrarroja se absorbe, la temperatura del recubrimiento incrementa y transmite el calor a la superficie por un proceso de conducción, por lo que los materiales de conductividad térmica absorben y distribuyen esta energía, por lo que aceleran los procesos y reducen los costes. Suelen utilizarse previo al horno de convección, con el fin de que las piezas incrementen su calor y alcancen con mayor rapidez la temperatura de curado, que terminará con el proceso de convección.



Figura 2.8. – b. Hornos de convección e inducción.

2.1.4. Otros.

Existen diferentes tipos de hornos industriales, generalmente segmentados según su tipo de energía y su forma de procesarla. La fundición de metales es el principal uso de la construcción de este tipo de hornos, pero existen diferentes tipos de hornos, y la fabricación del más adecuado va a depender de factores como la rapidez con que se quiera conseguir el metal, su productividad, etc. Como se ha mencionado antes, la elección de fabricación de hornos de fundición va a depender de ciertos factores, por ejemplo:

La necesidad de mantener la pureza del metal, el costo de operación, la velocidad en la que se necesita fundir el metal, la producción a la que se necesite llegar, el tipo de material a fundir, el volumen del material, el tipo de industria, entre otros.

Debido a los requerimientos de fabricación, cualquier tipo de horno puede ser el recomendable para una particular operación. La elección puede ser dictada por consideraciones de costo inicial, costo relativo promedio de mantenimiento y reparación, costo base de operación, disponibilidad y costos relativos de las fuentes de energía en una localidad en particular, condiciones ambientales y nivel de ruido en operación, eficiencia de fusión (particularmente velocidad de fusión), grado de control de composición química del metal, temperatura de fusión del material metálico, y experiencia del personal.

Un horno rotativo se compone de una envuelta cilíndrica de acero, revestido con material refractario, y que puede girar u oscilar lentamente alrededor de su eje principal. El horno suele terminar por sus extremos en troncos de cono; en uno de ellos está el quemador y en el otro la salida para los gases quemados, que frecuentemente pasan a un sistema de recuperación para precalentar el aire empleado en la combustión.

El combustible puede ser gas, petróleo diesel o residual, o carbón pulverizado, y el aire se suministra mediante un ventilador o máquina soplante. En los hornos pequeños la rotación se puede dar a mano, pero la mayoría están montados sobre rodillos y se les hace girar por un dispositivo de cadena o de fricción. La elevada temperatura de la llama funde y sobrecalienta la carga y lleva una temperatura superior al refractario, que cede su calor a la superficie inferior del metal cuando al girar el horno se pone en contacto con ella.

Este efecto acorta el tiempo de fusión y ayuda a salvar el efecto de aislante térmico de la capa de escoria. Se puede fundir en condiciones neutras, oxidantes o reductoras. La capacidad de un horno rotatorio puede variar mucho. Para latones y bronce oscila entre unos 50 Kg. y 5 Ton. Y normalmente son de 50 Kg. a 2 Ton. Para la fundición de hierro, y en algunos casos acero, las capacidades pueden ser mucho mayores.

El metal puede sangrarse por un agujero de colada único situado en la pared del cilindro, que se mantiene taponado con refractario mientras el horno gira. Las unidades grandes tienen un control para que el flujo sea uniforme durante la colada.

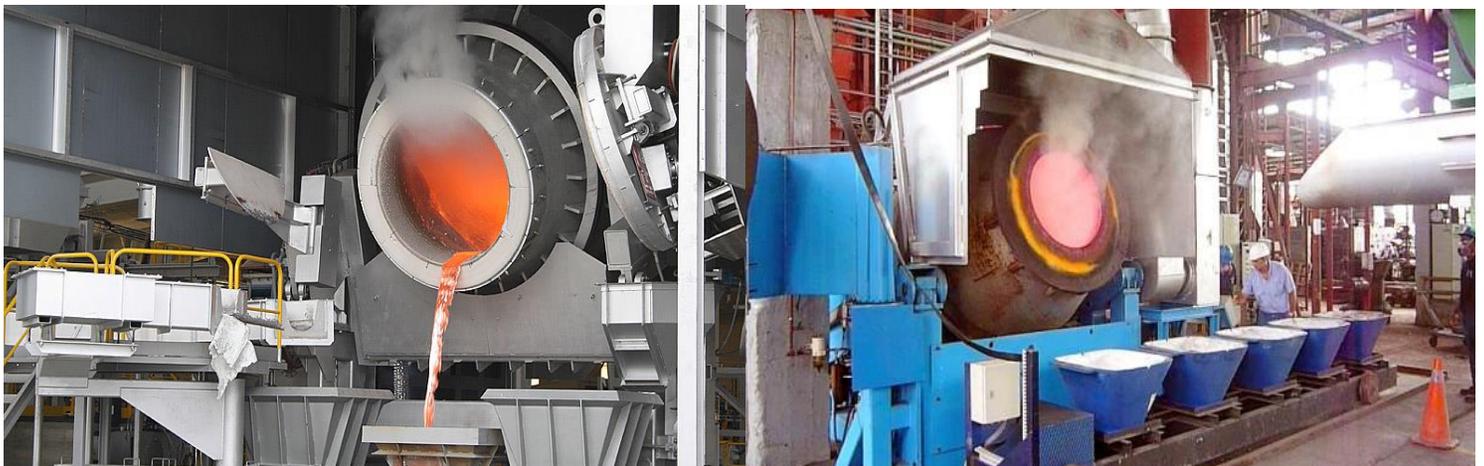


Figura 2.9. Hornos rotatorios basculantes para fundición.

2.2. Tipos de Hornos.

Un horno es un dispositivo que permite generar calor y mantenerlo dentro de un cierto compartimiento. De esta manera, puede cumplir con diversas funciones, como el secado, el calcinado, la tostación y/o descomposición térmica de minerales o la fundición de sus concentrados.

Entendemos por hornos industriales los equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan o funden materiales metálicos, piezas o elementos colocados en su interior a una temperatura controlada y específica. El objeto de este calentamiento puede ser muy variado, por supuesto, existen distintos tipos de hornos según el uso, por ejemplo:

- Fundir.
- Ablandar para una operación de conformación posterior.
- Tratar térmicamente para impartir determinadas propiedades.
- Recubrir las piezas con otros elementos, operación que se facilita frecuentemente operando a temperatura superior a la del ambiente.

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y diseño. Varían desde los pequeños hornos de crisol que contienen unos pocos kilogramos de metal hasta hornos de varios centenares de toneladas de capacidad del horno.

El horno de fundición es usado para crear metales a partir de su forma mineral como el aluminio o acero. En algunos casos se puede emplear un mismo tipo de horno tanto para aleaciones férreas como no férreas. En los casos en que es conveniente, se señalan las aplicaciones particulares de los hornos descritos. Los hornos de fusión de las fundiciones modernas se describen agrupándolos de acuerdo a como se usan en un proceso específico:

⌘ Horno de crisol.- La carga se encuentra aislada tanto del combustible como de los productos de combustión. Teniendo incluso la dualidad en algunos casos que sea inducida eléctricamente a través de una cámara por medio de una resistencia eléctrica. Sus tipos más empleados son:

- ▲ Hornos de crisol móvil.
- ▲ Hornos de crisol fijo no basculantes.
- ▲ Hornos basculantes (de crisol fijo)

⌘ Horno de hogar abierto y/o reverbero.- La carga se encuentra aislada del combustible pero en contacto con los productos de combustión.

- ▲ Horno de Siemens Martin

⌘ Horno de cubilote.- La carga se encuentra en contacto íntimo con el combustible y los productos de combustión.

⌘ Hornos eléctricos.- La carga queda por completo libre de contaminación del gas combustible. Puede controlarse perfectamente la atmósfera en contacto con la masa fundida, haciéndola oxidante o reductora a voluntad, e incluso en algún tipo de horno (de inducción) puede operarse en vacío.

- ▲ De arco eléctrico.
- ▲ De inducción.
- ⊙ De alta frecuencia
 - Hornos de inducción sin núcleo
 - Hornos de inducción de canales
- ⊙ De media y baja frecuencia
 - ▲ De resistencia.

Los procesos para los que se utilizan los hornos son muy amplios e incluyen diversos campos de aplicación auxiliares o complementos a los procesos de fundición por lo que se enuncian a continuación algunos importantes:

⌘ Industria siderúrgica.

- ▲ Hornos altos de reducción de mineral de hierro.
- ▲ Mezcladores de arrabio calentados por llamas o por inducción.
- ▲ Convertidores de acero.
- ▲ Hornos de arco para fusión de chatarra.
- ▲ Hornos de fusión por inducción de chatarra.
- ▲ Hornos de recalentar para las operaciones de laminación, forja, extrusión, de muy diferentes tipos.
- ▲ Hornos de tratamientos térmicos de barras, redondos, chapas, perfiles, bobinas, etc.
- ▲ Equipos auxiliares, tales como: precalentadores de cestas de carga y de cucharas de colada, hornos de laboratorio, atmósferas controladas, etc.
- ▲ Hornos de fabricación de ferroaleaciones (Fe-Si, Fe-Mn, Si-Mn, Fe-W, Fe-Mo, Fe-Ti, Fe-V, etc.), incluyéndose en este apartado, por la gran semejanza del procedimiento, la fabricación del silicio metal, carburo de calcio, etc.

⌘ Industria del aluminio.

- ▲ Celdas de electrólisis ígnea para transformar alúmina en aluminio fundido.
- ▲ Hornos de fusión y mantenimiento, a partir de chatarra o aluminio fundido.
- ▲ Hornos de recalentar placas o redondos para laminación o extrusión.
- ▲ Hornos de tratamientos térmicos, fundamentalmente recocido, pero también solubilización, maduración o envejecimiento.
- ▲ Equipos auxiliares, tales como: atmósferas controladas para tratamientos térmicos, precalentadores de matrices para extrusión, precalentadores de chatarra, hornos de tratamiento térmico de utillajes, etc.
- ▲ Se incluyen en este campo, no sólo las aleaciones de aluminio, sino también el magnesio y sus aleaciones que denominamos metales ligeros en general.

⌘ Industria del cobre y sus aleaciones que se denominan en general metales no férricos pesados, tales como bronces, latones, cuproníqueles, alpacas, etc.

- ▲ Hornos de reducción de minerales.
- ▲ Hornos de fusión de chatarra del tipo de reverbero o crisol.
- ▲ Hornos de recalentamiento para laminación, forja, extrusión o estampación.
- ▲ Hornos de tratamientos térmicos, fundamentalmente recocidos y del tipo adecuado al producto a tratar.
- ▲ Equipos auxiliares, tales como: atmósferas controladas o al vacío, equipos de barnizado o esmaltado de hilos de cobre, etc.

⌘ Industria de automoción. Incluye la fabricación de coches, camiones, tractores, motocicletas y bicicletas. Es, tal vez, el campo de aplicaciones más variado y que exige mayor número de unidades y mayor sofisticación en los hornos, aunque su importancia económica sea inferior a la de otros campos. En este campo se tienen:

- ▲ Hornos de fusión de metales férricos y no férricos.
- ▲ Hornos de tratamientos térmicos, de todos los tipos posibles prácticamente, dada la gran variedad de piezas existentes.
- ▲ Hornos de preparación y pintado de carrocerías, de gran valor económico.
- ▲ Instalaciones auxiliares, tales como: generadores de atmósferas controladas, tanques de temple, cámaras de enfriamiento, desengrasadores y hornos de lavado y secado, etc.

⌘ Fundiciones, tanto de metales férricos, como de metales no férricos.

- ▲ Hornos de fusión y mantenimiento.
- ▲ Hornos de tratamientos térmicos, continuos o intermitentes, de los tipos adecuados a la producción, forma de las piezas, temperatura requerida, etc.
- ▲ Equipos auxiliares, tales como hornos de secado de moldes y machos y, en alguna proporción, también atmósferas controladas.

⌘ Industrias de productos manufacturados.

- ▲ Se incluyen la fabricación de materiales eléctricos (transformadores y motores, sobre todo), la industria de electrodomésticos (fundamentalmente la serie blanca), los talleres de calderería, la fabricación de piezas mecánicas, la industria de la máquina-herramienta, la industria electrónica, etc.
- ▲ Hornos de recocido de chapa magnética y de soldadura brillante de pequeñas piezas.
- ▲ Hornos de sinterizado y los utilizados en pulvimetalurgia.
- ▲ Grandes hornos de recocido para eliminación de tensiones de piezas fundidas y soldadas.
- ▲ Instalaciones completas formadas por varios hornos para tratamiento de herramientas.
- ▲ Hornos de difusión de hidrógeno en semiconductores y de secado al vacío de derivados de transformadores.



Figura 2.10. Hornos industriales para fundición.

2.2.1. Hornos de Crisol

Los crisoles son recipientes de arcilla mezclada con grafito y otras sustancias, provistos de tapa para cierre hermético, que una vez cargados y cerrados se caldean en los denominados hornos de crisoles, utilizando como combustible carbón o, más modernamente, gasoil. La fusión en crisoles es uno de los procedimientos más antiguos y sencillos para elaborar metales, y todavía se emplea, y probablemente se empleara siempre por la economía de su instalación sobre todo para fundir pequeñas cantidades.

Los hornos de crisoles clásicos eran de tipo de foso, y se colocaban en ellos los crisoles rodeados de carbón, a una distancia mínima de 10 cm. de las paredes del horno. Pero los hornos de crisoles más modernos se construyen para el caldeo de un solo crisol, cuya parte superior sobresale del horno. Si los hornos son fijos se extrae el caldo con cuchara, pero también se construyen hornos de crisol basculantes. En los que la colada resulta más cómoda. En estos tipos de hornos se calienta primero el crisol vacío, hasta que llega al rojo cereza y después se carga.

La ventaja de los hornos de crisoles modernos, tanto fijos como basculantes, es que la carga queda totalmente aislada, y por tanto, no se altera su composición por efecto de los gases producidos en la combustión. La duración de los crisoles no llega en general, a las veinticinco fusiones. El proceso de fundir los metales en crisol es uno de los más antiguos y sencillos. Se emplea todavía mucho en la funderías modernas, y probablemente se seguirá usando porque el costo inicial es barato y el metal se funde fuera del contacto con el combustible. Los hornos de crisol suelen dividirse en tres clases, según el procedimiento empleado para colar el caldo contenido en los crisoles.

En los hornos de crisol propiamente dichos, los crisoles están totalmente dentro de la cámara del horno y se extraen de ella para coser el metal. En los hornos de crisol fijo no basculables (hornos estáticos de crisol fijo) existe un solo crisol fijo al horno y que sobresale de la cámara de calefacción, por lo que los gases de combustión no pueden tener ningún contacto con el caldo: como no es posible bascularlos para colar, su contenido de caldo solo puede pasarse a los moldes sacándolo del crisol del horno con una cuchara.

Los hornos basculables de crisol fijo son análogos a los anteriores, pero toda la estructura del horno puede inclinarse para colar el caldo por vertido en cucharas o directamente a los moldes; el eje de rotación del horno puede ser central o transversal a la piqueta de colada y situada precisamente en el pico de ésta; en este último caso el contenido del crisol del horno se vierte íntegramente en la cuchara sin mover ésta. O bien directamente en los moldes.

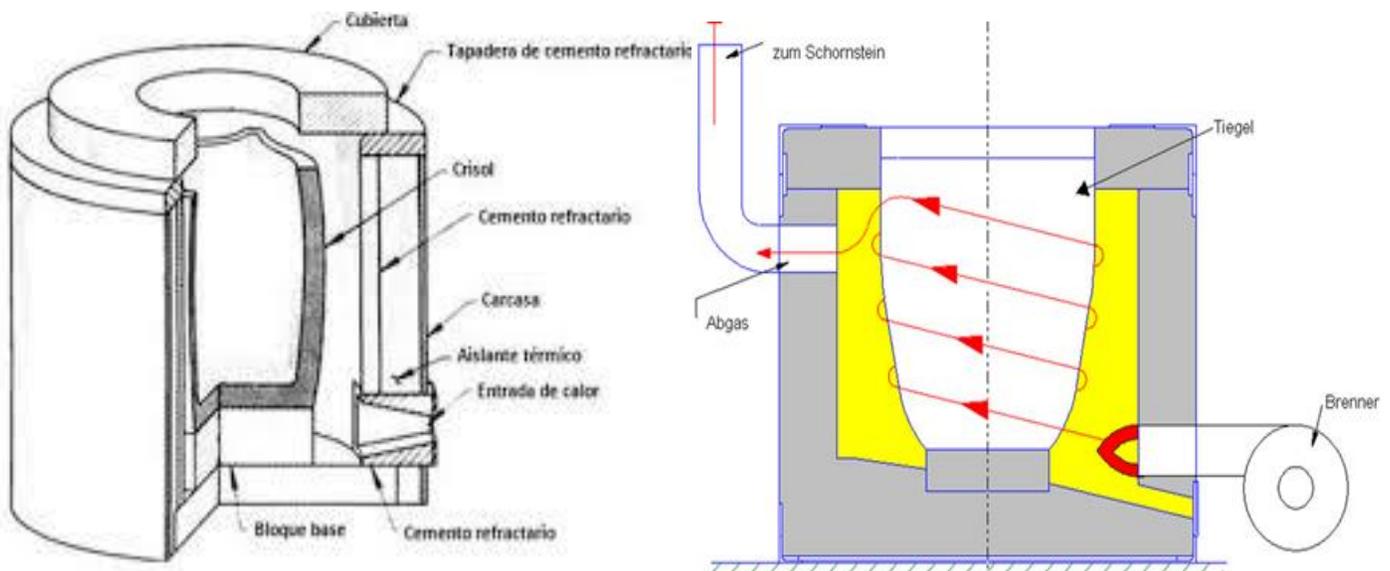


Figura 2.11. Partes del Horno de Crisol.

- **Hornos de crisol móvil**

Pueden ser hornos de foso, hornos a nivel del suelo o bien hornos levantados respecto al suelo. El tipo de foso, suele calentarse por coque que se carga alrededor y por encima de los crisoles (que se sierran con una tapa de refractario) para producir la fusión y el sobrecalentamiento sin necesidad de cargar más coque. El combustible descansa sobre una parrilla bajo la cual hay un cenicero y foso de cenizas. Estos hornos se emplean también para fabricar acero al crisol.

El tiro puede ser natural o forzado, es decir, producido por una chimenea o mediante un pequeño ventilador que trabaja a presiones de 50 a 75 mmH₂O. El último método es preferible para controlar mejor el calor y la atmósfera del horno. El espacio destinado al coque entre los crisoles y el revestimiento del foso debe ser de por lo menos 75mm, y entre el fondo de los crisoles y las caras de la parrilla suelen haber aproximadamente 180mm.

El borde de los crisoles debe quedar debajo de la salida de humos. Las parrillas y todas las entradas de aire deben mantenerse libres de productos sintetizados para que el aire pueda circular libremente a fin de conseguir una combustión completa y una atmósfera ligeramente oxidante.

Los hornos calentados por gas o aceite son más fáciles de controlar y funden más rápidamente que los otros, pero imponen condiciones más duras a los crisoles y los refractarios. Los crisoles son de capacidad variable, pueden contener hasta aproximadamente 160 Kg. de acero, aunque son más corrientes las capacidades de 49 a 90 Kg.: para latones, la capacidad suele ser de 70 Kg.

Los crisoles grandes exigen algún mecanismo de elevación que permita sacarlos del horno, mientras los mas pequeños pueden ser manejados con tenazas por uno o dos hombres. En algunos casos se han usado en estos hornos crisoles de hasta 180 Kg. de capacidad; la ventaja que se les admite es que hay menos perturbaciones y menos salpicaduras del caldo cuando se le transfiere desde la unidad de fusión hasta los moldes.



Figura 2.12. Tipos del Horno de Crisol móvil.

- **Hornos de crisol fijo no basculables**

En estos el crisol está fijo al horno, sus bordes salen fuera de la cámara de caldeo y no hay posibilidad de contacto con los gases de combustión. Como no pueden bascularse para verter el contenido del crisol, es necesario extraer el caldo con una cuchara; son adecuados cuando se necesita tomar pequeñas cantidades de metal a intervalos frecuentes, como, p.ej., cuando se cuele en coquillas.

Pueden emplearse como hornos de espera con la sola misión de mantener el metal en estado líquido, pero en algunos casos también se efectúa en ellos la fusión. Su rendimiento térmico es más bajo para la fusión, sobre todo cuando se trabaja a temperaturas altas, pero representan una verdadera unidad de fusión, de no mucha capacidad, que sirve para una gran variedad de trabajos.



Figura 2.13. Tipos de Hornos de crisol fijo no basculables.

- **Hornos basculables (de crisol fijo)**

También hemos indicado anteriormente que estos hornos son análogos a los del tipo anterior, pero con la diferencia de que la estructura total del horno puede inclinarse alrededor de un eje horizontal para efectuar la colada sin tener que recurrir a la extracción del caldo del crisol mediante cucharas introducidas en él. Lo mismo que los hornos de foso se pueden calentar con coque, con gas o con aceite. El horno no es más que una carcasa de acero suave revestida con materiales refractarios, en forma de ladrillos o apisonados. Suelen ser cilíndricos como en el que se muestra en la figura.

Algunos hornos basculables calentados por coque tienen una parrilla con una caja cenicero, y el aire soplado pasa a través de los muñones a una caja de viento que rodea la parte inferior del horno o a veces de conductos en una carcasa de paredes delgadas para producir algún precalentamiento. La capacidad para; el coque es importante, especialmente para aleaciones férreas; si es suficiente evita la recarga de coque durante la fusión y las consiguientes pérdidas de calor.

Para encender un horno basculante de coque se empieza por un fuego moderado de madera y coque y cuando todo el coque quema uniformemente alrededor de crisol se completa la carga de coque (algunos hornos poseen un quemador anular de gas para iniciar la combustión). Con el aire a un cuarto de soplado, se calienta el crisol al rojo y entonces se carga con el metal. Entre el encendido y la carga de los hornos de crisol de 100 Kg. de capacidad de carga deben transcurrir 30 min., y 45 min. para los de 450 Kg. (capacidades de carga de latón).



Figura 2.14. Tipos de Hornos basculables (de crisol fijo).

Los hornos calentados por aceite o gas son de diseño parecido, salvo que no necesitan caja de viento ni se precisa la parrilla, por lo que el crisol descansa en un soporte refractario. El quemador se fija en el horno de tal forma que el calentamiento pueda continuar mientras que el horno se bascula. Esto es ventajoso cuando se necesita el metal en cantidades pequeñas cada vez y el período de colocada es prolongado.

En los hornos de gas hay que tomar precauciones para evitar explosiones, especialmente durante el encendido. Debe evitarse la acumulación de mezclas explosivas de gases no quemados o de vapores inflamables y aire, principalmente recurriendo a dispositivos de alarma y seguridad para caso de que la llama se apague, y hade procurarse que el aire sea suficiente en todo momento.

Cuando se encienden los hornos de crisol basculables se calienta el crisol vacío, al principio suavemente, con la menor llama posible que puedan dar los quemadores durante los primeros 10 min. Después se aumenta por etapas la velocidad de calentamiento hasta, que el crisol se ponga al rojo, en cuyo momento se le carga y se pone el quemador al máximo.

El tiempo necesario para llevar los crisoles al rojo debe ser de, aproximadamente 30 minutos para capacidades de hasta 300 Kg. de latón, 45 minutos para 450 a 700 Kg. de latón o 225 Kg. de aluminio y de 75min para 450 Kg. de aluminio.

Los crisoles deben cargarse con el horno vertical, empleando tenazas suficientemente largas para que puedan llegar al fondo del crisol. En los casos en que en el crisol no quepa toda la carga de una vez, se pueda colocar un manguito de prolongación encima del manguito mufla para poder cargar la mayor cantidad posible. El metal no se añade frío a la carga ya fundida, porque se precalienta en los manguitos de extensión. Para evitar la oxidación deben taparse el crisol, el manguito mufla o es manguito de extensión con una tapadera refractaria.

Los experimentos de precalentamiento del aire no han sido muy satisfactorios, pues solo se conseguían disminuciones insignificantes en el consumo de combustibles y la duración de la fusión. Al parecer, los hornos de crisol han alcanzado un grado de desarrollo que no deja esperar ninguna mejora esencial en los diseños modernos. Actualmente interesa más conseguir mayores facilidades de control y comodidad de trabajo.

También se presta atención (especialmente para la colocada en coquilla) a las dos posibilidades de fundir y mantener el metal durante el tiempo de espera en el mismo horno, o a la de fundir en hornos de gran capacidad, a los que se asocian varios hornos de espera. El primer método permite seguramente más economía de combustible, pero el segundo es más flexible y conveniente para aleaciones que han de modificarse o sufrir otros tratamientos.

Rendimientos térmicos relativos de diferentes tipos de hornos de crisol calentados con combustibles

Tipo de horno	Rendimiento Térmico
Horno de crisol de foso, calentado con coque, tiro natural.	3 a 7 %
Horno de crisol basculante, calentado con coque, tiro forzado.	8 a 13 %
Horno de crisol basculante, calentado con aceite o gas.	7 a 18 %

Tabla 2.2. Rendimientos térmicos de los principales tipos de hornos de crisol.

El proceso de crisol es el proceso más viejo para la fabricación de acero, pero éste, hoy en día se usa muy poco excepto en fundiciones no ferrosas. Los crisoles se hacen en general de una mezcla de grafito y arcilla. Son completamente frágiles cuando se enfrían, debiendo ser manejados con cuidado, poseen resistencia considerable cuando están calientes. Los crisoles son calentados con coque, aceite o gas natural y deben sujetarse con unas tenazas especiales ajustadas para prevenir daños.

El hierro dulce, metal enjuagado, chatarra de acero, carbón vegetal y ferroaleaciones constituyen la materia prima para la fabricación de acero por este proceso. Estos materiales son colocados en crisoles que tienen una capacidad de más o menos 50 kg y son fundidos en un horno regenerativo.

Por lo regular son hornos que sólo se cargan con chatarra de acero de alta calidad. Son utilizados para la fusión de aceros para herramientas, de alta calidad, de resistencia a la temperatura o inoxidable. Considerando que estos hornos son para la producción de aceros de alta calidad siempre están recubiertos con ladrillos de la línea básica.

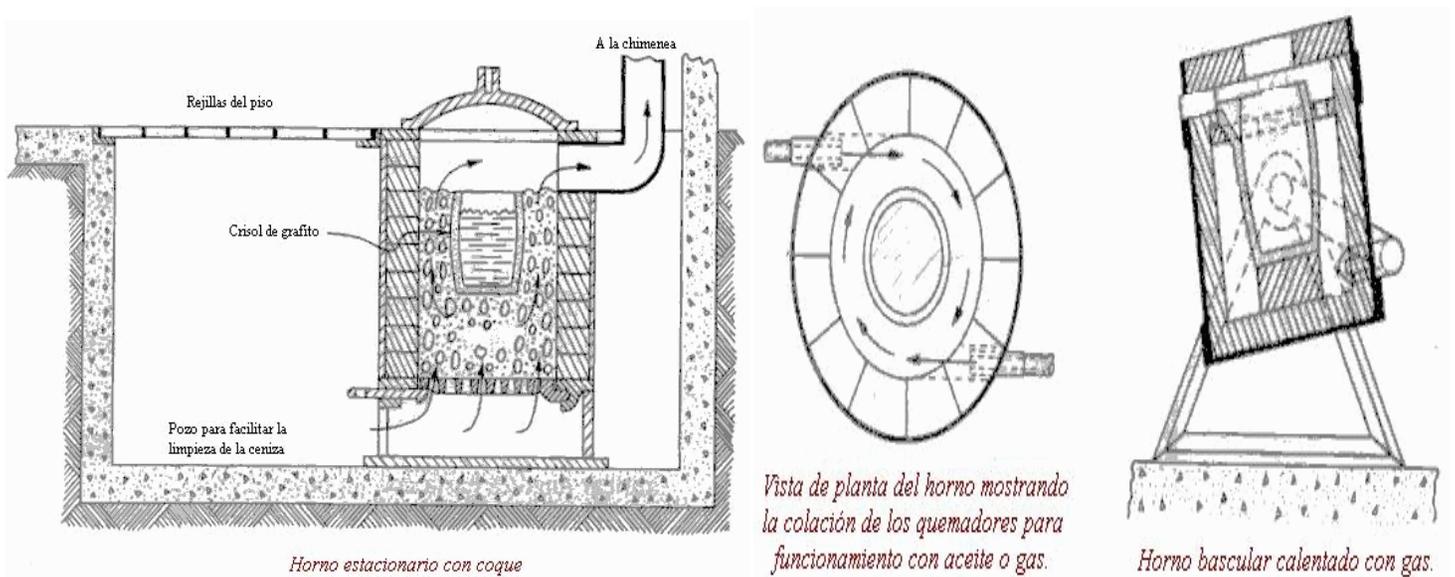


Figura 2.15. Tipos de Hornos basculables para hierro.

2.2.2. Hornos de Cubilote

Este es un tipo de horno cilíndrico vertical de aproximadamente 6 metros de alto, el cual lleva los metales en el colocados, hasta el estado líquido y permite su colado, puede ser utilizado para la fabricación de casi todas las aleaciones de Hierro, tiene ventilación forzada por toberas ubicadas en la parte inferior del mismo.

El material se distribuye en forma de capas de aproximadamente 30 o 40 cm en su interior, alternado con carbón el cual permite que el proceso sea continuo. Este tipo de horno está recubierto de material refractario en su interior, el cual debe ser inspeccionado antes de cada carga ya que debido a la temperatura que se evidencia en su interior (aprox. 1500 C) podría perforar la estructura tubular y caer sobre los operarios que se encuentran realizando el proceso de colado en la base del horno.

Este material refractario esta usualmente constituido por ladrillos refractario que como tales tiene caras lisas, y son muy resistentes a la temperatura y la abrasión, su precio suele ser superior a 10 veces el del ladrillo convencional, se los suele clasificar según su composición en 4 grandes grupos; Los ácidos aquellos que contiene arcilla, sílice y sulfato de aluminio, suelen ser más baratos que el resto y mientras más sílice son más resistentes al metal.

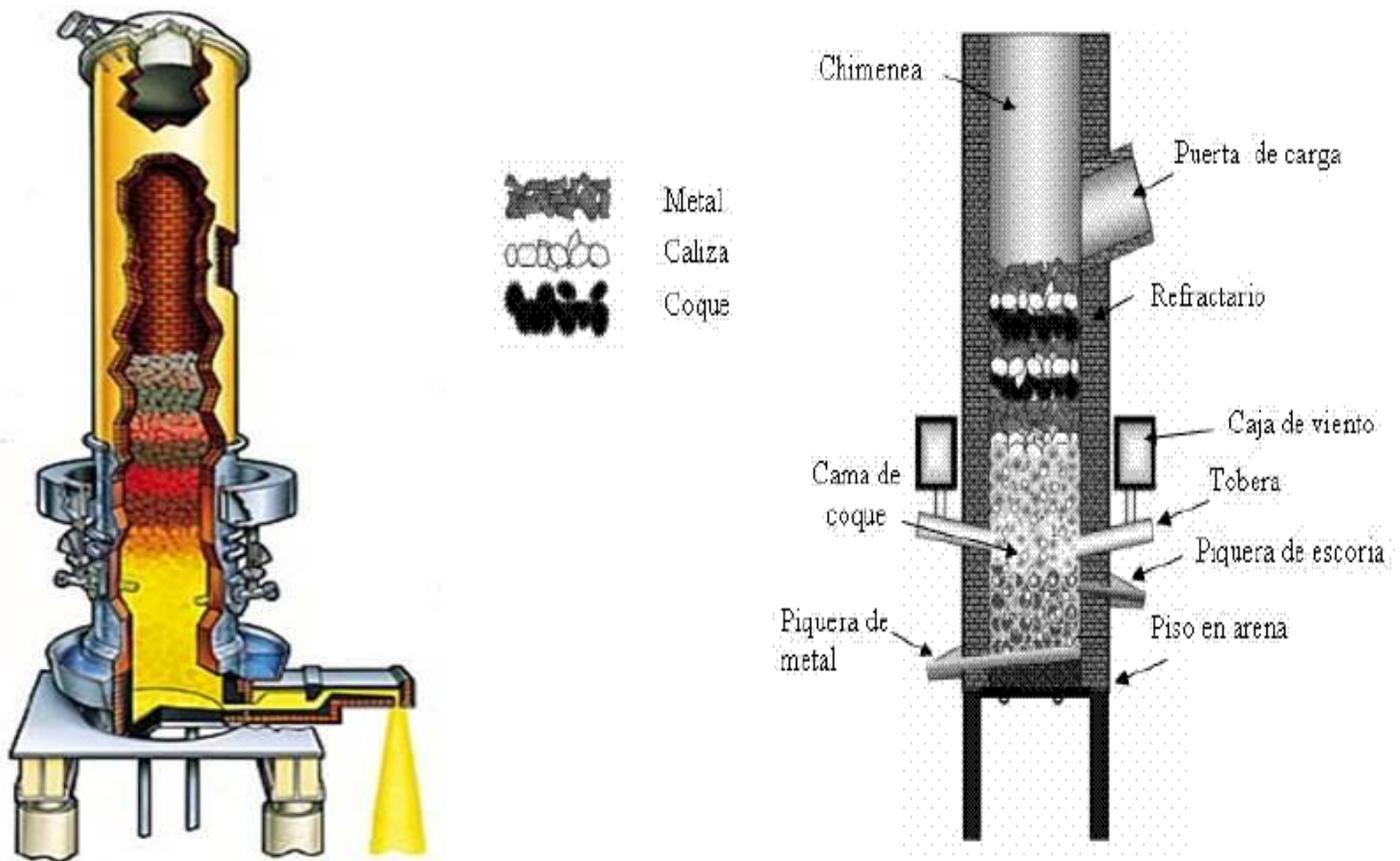


Figura 2.16. Ejemplos esquemáticos de Hornos de Cubilote para fundición de minerales o chatarra de hierro.

La segunda clasificación la hace aquellos denominados como Básicos constituidos por Oxido de Manganeseo son más resistentes que los anteriores, pero más costosos, tenemos también los neutros que son elaborados por elementos neutros como la magnesia. Y aquellos denominados especiales constituidos por carburos y circonio útiles por su capacidad de lubricación, eventualmente se colocan elementos cerámicos en todas estas mezclas con el objetivo de mejorar aún más la resistencia mecánica y térmica del conjunto.

Es usual que el colado se realice en moldes de arena en la base del mismo, el proceso comienza con la elaboración del modelo que es la pieza que se desea reproducir, usualmente es hecha en madera o yeso, pero cuando la producción es en masa se la maquina en metales “blandos” como el aluminio, es evidente que debe ser ligeramente más grande que la pieza que se desea fabricar ya que existe contracciones del metal cuando se enfría, son necesarias las previsiones para evacuación de gases, usualmente conocidos como venteos.

Luego se procede a la fabricación de la matriz de arena o molde la cual se comienza compactando la arena alrededor del modelo, cuando se requiere fabricar una pieza que es hueca se debe provisionar un “macho” que es un elemento sólido colocado en la matriz para que allí no ingrese el metal fundido, es importante anotar que siempre se está trabajando se lo hace en negativo.

Es decir donde no se requiere metal se coloca el macho y donde si se lo requiere se lo coloca el modelo que evidentemente deberá ser extraído previo al colado, es usual también que se coloquen modelos de cera, la cual se derrite conforme ingresa el metal ocupando su lugar para ulteriormente enfriarse. El personal asignado a este proceso es muy experimentado y debe tener las protecciones respectivas.

Son equipos muy económicos y de poco mantenimiento, se utilizan para hacer fundición de hierros colados. Consisten en un tubo de más de 4 metros de longitud y pueden tener desde 0.8 a 1.4 m de diámetro, se cargan por la parte superior con camas de chatarra de hierro, coque y piedra caliza.

Para la combustión del coque se inyecta aire con unos ventiladores de alta presión, este accede al interior por unas toberas ubicadas en la parte inferior del horno. También estos hornos se pueden cargar con pellets de mineral de hierro o pedacería de arrabio sólido.

Por cada kilogramo de coque que se consume en el horno, se procesan de 8 a 10 kilogramos de hierro y por cada tonelada de hierro fundido se requieren 40kg de piedra caliza y 5.78 metros cúbicos de aire a 100 kPa a 15.5°C. Los hornos de cubilote pueden producir colados de hasta 20 toneladas cada tres horas.

Este tipo de equipo es muy parecido al alto horno, sólo sus dimensiones disminuyen notablemente. El mayor problema de estos hornos es que sus equipos para el control de emisiones contaminantes es más costoso que el propio horno, por ello no se controlan sus emisiones de polvo y por lo tanto no se autoriza su operación.



Figura 2.17. Empleo en la industria de los Hornos de Cubilote para la producción de diversos tipos de hierro.

Descripción

Los colados de hierro, se hacen volviendo a fundir chatarra junto con arrabio, en un horno llamado cubilote. La construcción de este horno es simple, de operación económica y funde hierro continuamente con un mínimo de mantenimiento. De vez en cuando el metal se funde con el combustible, algunos elementos se aprovechan mientras otros se pierden.

El cubilote es un horno que funciona con combustible sólido y en el cual la carga metálica, el combustible y el carburante están en íntimo contacto entre sí. Esto permite un intercambio térmico directo y activo, y por lo tanto, un rendimiento elevado. Sin embargo, por causa de este mismo contacto entre el metal, las cenizas y el oxígeno, el hierro colado producido no puede ser rigurosamente controlado desde el punto de vista metalúrgico.

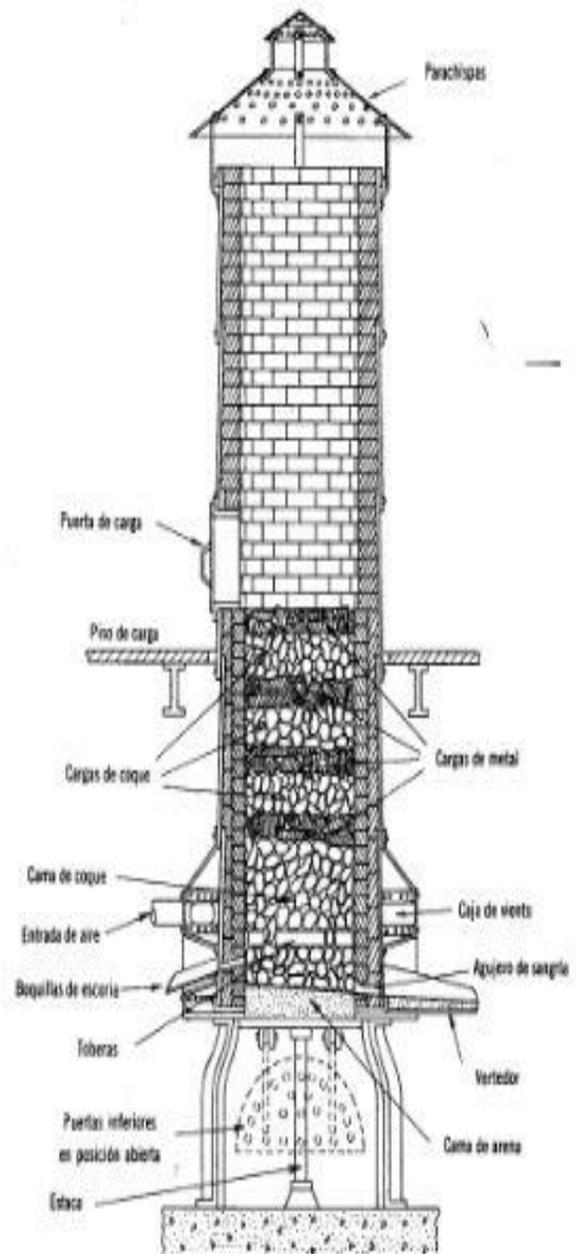
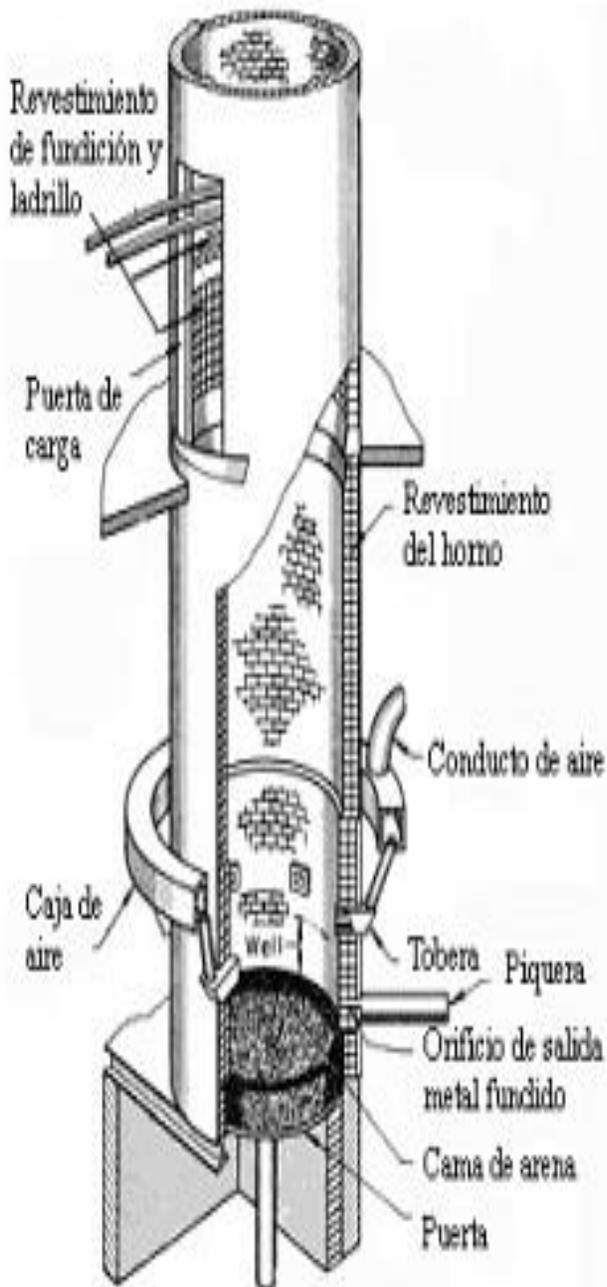


Figura 3.9 Vista seccional de un cubilote.

Figura 2.18. Descripción esquemática de Hornos de Cubilote.

▲ Construcción

El cubilote consiste en un tubo de acero vertical con una altura de 10 mts., aproximadamente y un diámetro que varía entre 4 y 6 mts., recubierto con material refractario: Ladrillo refractario, con la disposición necesaria para introducirle una corriente de aire cerca del fondo.

Todo el cubilote descansa sobre una placa circular que es soportada arriba del piso mediante cuatro columnas separadas convenientemente para que las puertas abisagradas puedan caer libremente. Estando en operación, estas puertas se giran hasta una posición horizontal y se mantienen en su lugar por medio de una estaca vertical.

La puerta de carga está localizada más o menos a la mitad de la cubierta vertical y la parte superior del cubilote queda abierta, a excepción de una pantalla de metal o para chispas. Las aberturas para introducir el aire a la cama de coque se conocen como toberas. La práctica común es la de tener sólo una serie de toberas en una circunferencia de la pared, aun cuando algunos cubilotes grandes tienen dos hileras.

Las toberas de forma acampanada, tienen el extremo mayor en el interior del horno para provocar que el aire se difunda uniformemente, van distribuidas a distancias muy precisas unas de otras, para obtener la distribución del aire tan uniforme como sea posible. El número de toberas varía con el diámetro del cubilote, siendo desde cuatro en los cubilotes pequeños y hasta ocho o más en los cubilotes grandes.

Alrededor del cubilote y en la zona de las toberas, se encuentra una caja, para el suministro del aire. Opuestas a cada tobera se encuentran unas pequeñas ventanas cubiertas con mica de tal forma que puedan inspeccionarse las condiciones dentro del cubilote. El aire, suministrado por un ventilador centrífugo entra por un lado de la caja. Opuesto al vertedero de colada, se encuentra otro vertedor para la escoria, en la parte de atrás del cubilote. Esta abertura está colocada debajo de las toberas para evitar un posible enfriamiento de la escoria, provocado por la corriente de aire.

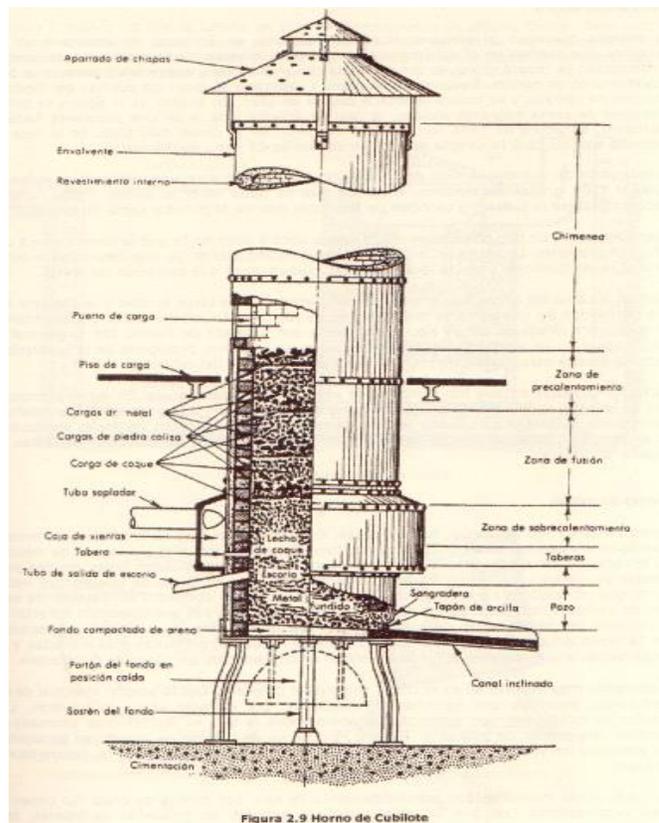


Figura 2.9 Horno de Cubilote

DESCRIPCIÓN Y DATOS CONSTRUCTIVOS DEL CUBILOTE

El cubilote consiste en una coraza cilíndrica de acero revestida de materiales refractarios y equipada con una caja de viento y toberas para la admisión de aire, esta reposa verticalmente sobre una placa base sostenida usualmente por cuatro columnas o vigas de acero, las mismas que están ancladas a un cimiento de ladrillo o de hormigón. Cerca del fondo tiene orificios y conductos para sacar el material fundido y la escoria. En la placa base lleva compuertas centradas que pueden abrirse hacia abajo.

- a) CIMENTACION
- b) SOPORTE O PATAS
- c) PLACA DEL FONDO
- d) CORAZA
- e) CAJA DE VIENTOS
- f) TOBERAS
- g) PIQUERAS DE SANGRIA Y ESCORIA
- h) PUERTA DE CARGA
- i) CHIMENEA

Figura 2.19. Descripción esquemática de la construcción del Horno de Cubilote.

▲ Funcionamiento

La primera operación al preparar el cubilote consiste en limpiarlo de escoria y de los desechos que quedan en el refractario en torno a las toberas, de las coladas anteriores. A continuación se repara cualquier zona dañada con arcilla fina y arena sílica refractaria para recubrimiento de hornos.

Después de limpiarlo y repararlo se giran las puertas del fondo a posición de cerrado y se coloca la estaca debajo de ellas. En el piso de la solera se coloca una capa de arena negra de moldeo, la cual se apisona y se le da una pendiente hacia el vertedero. La altura no debe ser menor a 10 cms., en el punto más bajo, se le deja un pequeño agujero para la sangría de aproximadamente 25 mm., de diámetro.

El encendido del cubilote se hace de 2 a 3 horas para que alcance una temperatura entre los 1200 y 1500 grados centígrados, antes de que se deba tener el primer metal fundido, deberá utilizarse la suficiente cantidad de leña para quemar la primera cama de coque. Cuando se inicia un tipo natural, se añade coque poco a poco hasta que la cama crece a una altura conveniente.

La altura de la cama de coque es importante, ya que determina la altura de la zona de fundición y afecta tanto a la temperatura como a la oxidación del metal. Cuando la cama del coque está encendida completamente se carga arrabio y la chatarra con una proporción de una parte de coque por 10 de hierro, esta relación es en masa.

Además se suministra alrededor de 34 kg., de fundente por tonelada de hierro, por lo general es piedra caliza, cuyo objetivo es eliminar impurezas en el hierro, protegerlo de la oxidación y hacer la escoria más fluida para retirarla con mayor facilidad del cubilote.

Tanto los cubilotes de aire frío como los de aire caliente están en uso. En estos últimos, el aire de entrada se precalienta en alguna forma de recuperador, utilizando los gases calientes del cubilote. El recuperador puede ser una unidad externa o por tubos verticales construidos en el propio cubilote. El aire de entrada pasa por estos tubos, calentándose así antes de llegar a las toberas.

Refrigeración por agua.- Los cubilotes modernos, que han de funcionar ininterrumpidamente largos periodos de tiempo, llevan camisas de agua para refrigeración de la zona de fusión; esta refrigeración exige un gasto de combustible algo mayor pero queda compensado con creces con el ahorro de refractario y gastos de reparación.

Carga mecánica.- Los cubilotes pequeños se cargan a mano, pero los grandes están provistos de montacargas verticales o inclinados, con descarga automática de las vagonetas en el tragante.

Insuflación de viento caliente.- Los cubilotes más modernos llevan instalación de precalentamiento del aire soplado hasta una temperatura de 400°C utilizando el calor sensible y el de combustión completa de los gases extraídos del mismo cubilote, que se queman en un recuperador, por el que pasa previamente el aire soplado antes de ser introducido en el horno. El recalentamiento del aire soplado tiene las siguientes ventajas:

1. Permite alcanzar temperaturas hasta de 1500°C, lo que facilita la obtención de fundiciones blancas y especiales y las adiciones en el canal y en la cuchara de coladas.
2. Se ahorra combustible.
3. Permite emplear coque de calidad inferior.

Ante-crisol.- La sangría del metal fundido, que en los cubilotes es intermitente, puede hacerse continua vertiendo el caldo en un ante-crisol colocado junto a la piqueta de colada. Estos ante-crisoles pueden ser fijos, de ladrillo refractario o bien móviles y basculantes, construidos con chapa revestida con refractario. Algunos llevan también un sistema de caldeo para mantener fundido el metal.

Los ante-crisoles mejoran la calidad de la fundición haciéndola más homogénea, mejor desulfurada y con una más completa separación de la escoria.

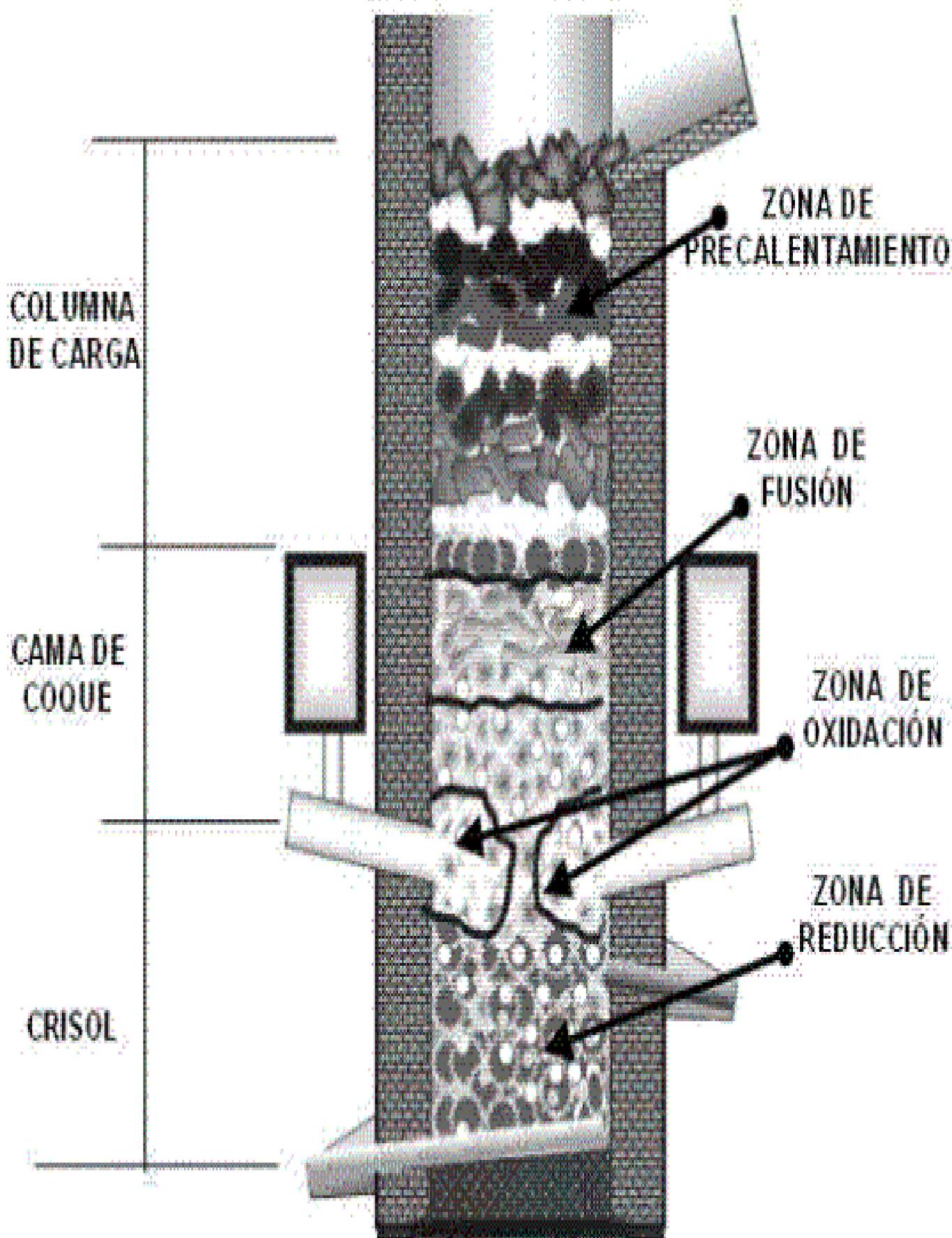


Figura. 2.20. Descripción de las zonas del Horno de Cubilote.

2.2.3. Hornos de cama o lecho fluidizado.

⊙ Horno de Hogar Abierto y/o Reverbero.

El horno de hogar abierto semeja un horno enorme, y se le denomina de esta manera porque contiene en el hogar (fondo) una especie de piscina larga y poco profunda (6 m de ancho, por 15 m de largo, por 1 m de profundidad, aproximadamente). El horno se carga en un 30% a un 40% con chatarra y piedra caliza, empleando aire pre-calentado, combustible líquido y gas para la combustión, largas lenguas de fuego pasan sobre los materiales, fundiéndolos. Al mismo tiempo, se quema (o se oxida) el exceso de carbono y otras impurezas como el fósforo, silicio y manganeso.

Este proceso puede acelerarse introduciendo tubos refrigerados por agua (lanzas), los que suministran un grueso flujo de oxígeno sobre la carga. Periódicamente, se revisan muestras de la masa fundida en el laboratorio para verificar la composición empleando un instrumento denominado espectrómetro. También se determinan los niveles de carbono. Si se está fabricando acero de aleación, se agregarán los elementos de aleación deseados. Cuando las lecturas de composición son correctas, el horno se cuela y el acero fundido se vierte en una olla de colada.

Es uno de los hornos más populares en los procesos de producción del acero. Un horno de este tipo puede contener entre 10 y 540 toneladas de metal en su interior. Tiene un fondo poco profundo y la flama da directamente sobre la carga, por lo que es considerado como un horno de reverbero. Su combustible puede ser gas, breá o petróleo, por lo regular estos hornos tienen chimeneas laterales las que además de expulsar los gases sirven para calentar al aire y al combustible, por lo que se consideran como hornos regenerativos.

Los recubrimientos de los hornos de hogar abierto por lo regular son de línea básica sin embargo existen también los de línea ácida ((ladrillos con sílice y paredes de arcilla). Las ventajas de una línea básica de refractario, sobre una ácida son que con la primera se pueden controlar o eliminar el fósforo, el azufre, el silicio, el magnesio y el carbono y con la línea ácida sólo se puede controlar al carbono. El costo de la línea básica es mayor que el de la ácida.

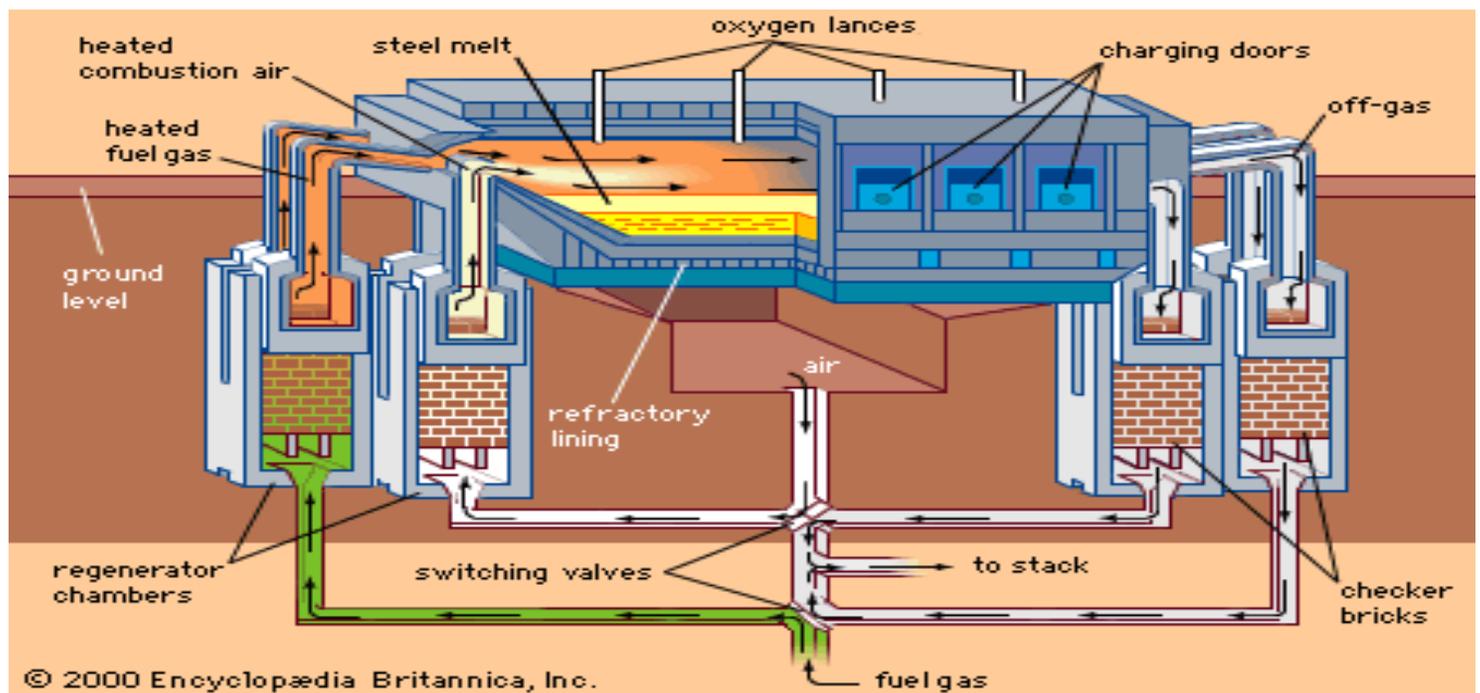


Figura 2.21. Esquema de un Horno de Hogar Abierto.

En estos hornos se quema el combustible en uno de los extremos de la cámara; la llama y los otros productos de la combustión son dirigidos por la forma de bóveda hacia la carga existente en la solera, que se encuentra en el trayecto de los gases hacia la salida de humos y la chimenea.

El calor de la bóveda se transmite por radiación hacia la carga que queda debajo. Son ejemplos de esos tipos de hornos los de pudelado, que se empleaban para fabricar el llamado hierro forjado, y los utilizados en la fabricación de fundición maleable, y la fundición de metales no ferrosos.

La carga se funde en una solera de poca profundidad, mediante la llama producida en un quemador o lugar situado en uno de los extremos de la solera. Los primeros solo tenían capacidad solo de 350 a 450 kilogramos de metal, pero en los modernos la capacidad es de 10 a 30 toneladas llegando incluso a 80. la figura muestra un clásico horno de reverbero.

Es muy adecuado para la fabricación de piezas coladas de fundición maleables de núcleo negro, para cilindros de laminación y grandes piezas de bronce por ejemplo, hélices de barco, la lentitud de la fusión y el sistema de control por cargas permiten una gran precisión en la fusión.

En los hornos para fundición maleable las paredes suelen ser de ladrillos refractarios neutros, encerrados en una vuelta de acero o fundición y la solera es de ladrillos o arena de sílice fritada. El ancho interior es de generalmente de entre 150 y 300 cm. de ancho y su longitud varía entre 450 a 1500 cm.

La bóveda está formada por una serie de arcos de ladrillos refractarios. La bóveda es inclinada descendiendo desde el hogar hasta el extremo en que se encuentra la chimenea. La altura de la bóveda depende de el volumen que ocupa la carga no fundida, que es de 0.5 a 0.6 m por tonelada de carga.



Figura 2.22. Horno de Hogar Abierto.

Si el horno se calienta con carbón en trozos es necesaria una parrilla separada de la solera por un muro bajo el altar del hogar de 45 a 90 cm. de altura. La solera tiene una inclinación hacia la piquera de la colada, situada generalmente entre el centro del horno y el extremo del hogar.

Los hornos grandes suelen calentarse con carbón pulverizado o con aceite, es importante la altura del baño. Una solera extensa y un baño de poca altura aseguran un rápido sobrecalentamiento del metal fundido a expensas de pérdidas por oxidación. El diseño debe procurar una compensación económica.

La práctica usual de carga consiste en empujar chatarra ligera hacia cilindros de laminación, y finalmente se pone de arrabio por encima. De esta forma el material más pequeño queda próximo al fondo y es protegido de la oxidación excesiva por el más grueso que se encuentra arriba.

En la parte superior quedan los materiales de más bajo punto de fusión, la carga suele efectuarse a través de la bóveda, pero, algunos hornos se cargan por las puertas, que sirven también para el rebelo y la toma de muestras. Las puertas deben ser lo más estancas al aire que se queda para que se mantenga al máximo el tiro de la chimenea.

Una colada de 30 toneladas se puede fundir a mayor velocidad que una de 15 toneladas, pero la duración total de la fusión es mayor que en la colada más grande. Esto lleva muchas veces a instalar hornos mas pequeños que puedan producir mayor número de coladas al día. En un buen horno se pueden fundir 25 toneladas de carga en 6 horas. Algunas veces se recuperan los gases de salida para precalentar el aire de combustión.

Cuando se empieza a sangrar el horno conviene sacar todo el metal más rápidamente posible para evitar que las pérdidas de silicio y manganeso sean mayores, de alrededor del 20%. Los hornos de reverbero pueden emplearse acoplados a un cubilete en un proceso dúplex.

Algunas veces se emplean pequeños hornos de reverbero, con capacidad de 45 kilos a 2 toneladas para la fusión de metales no férreos. Por ejemplo, latones y bronce. Pueden ser estacionarios o basculables. Uno de los tipos más pequeños son los hornos moderno llamados de solera seca, que se emplean para los metales de punto de fusión más bajo, el metal líquido, sobre una solera inclinada fluye muy rápidamente, a un recipiente desde la cual se saca con cucharas para su utilización.

Esto evita el sobrecalentamiento del metal y la formación de óxido en la solera. El calentamiento es por gas, aceite o una combinación de ambos directamente sobre la carga. Las capacidades de fusión varían de 140 a 900 kilos de aluminio por hora, con baños de capacidades de 230 va 900 kilogramos.



Figura 2.23. Hornos de Hogar Abierto para fundición de aluminio.

- **Horno de Siemens Martin**

El horno Siemens Martin es un tipo de horno generalmente rectangular, cubierto por una bóveda de ladrillo refractario, que refleja (o reverbera) el calor producido en un sitio independiente del hogar donde se hace la lumbre. Tiene siempre chimenea. El combustible no está en contacto directo con el contenido, sino que lo calienta por medio de una llama insuflada sobre él desde otra cámara siendo por tanto el calentamiento indirecto.

Es utilizado para realizar la fusión del concentrado de cobre y separar la escoria, así como para la fundición de mineral y el refinado o la fusión de metales. Tales hornos se usan en la producción de cobre, estaño y níquel, en la producción de ciertos hormigones y cementos y en el reciclado del aluminio. Los hornos de reverbero se utilizan para la fundición tanto de metales féreos como de metales no féreos, como cobre latón, bronce y aluminio.

Durante el proceso, se remueve desde una ventana el mineral fundido para que el calor actúe lo más uniformemente posible sobre toda la masa. Constan esencialmente de un hogar, un laboratorio con solera inclinada que permite que “escurra” el metal fundido hacia una canal por la que sale al exterior donde se vierte en los moldes. Sobre esta solera se dispone el material a tratar, extendido y con poca altura y bóveda y de una chimenea.

El tipo más sencillo quema hulla en una parrilla y la llama, con los productos de la combustión se refleja (reverbera) en la bóveda o techo del horno, atraviesan el espacio que hay sobre la solera (donde se sitúa la carga metálica) y son evacuados por la chimenea, colocada en el extremo opuesto a la parrilla. En la actualidad se emplean más los combustibles gaseosos, Líquidos y el carbón pulverizado, los cuales se insuflan en el horno, mezclados con aire precalentado, por medio de un quemador situado en un extremo.

La capacidad de estos hornos es muy variable, y su campo de aplicación es muy amplio, ya que pueden fundir latones, bronces, aleaciones de aluminio, fundiciones y acero. Consta de un recuperador de calor, al igual que el alto horno, destinados a economizar combustible y alcanzar una temperatura suficientemente elevada para fundir el metal. Están constituidos por dos pares de cámaras, formadas interiormente por una serie de conductos sinuosos de ladrillo refractario. Su funcionamiento es como sigue:

Los gases calientes que salen del horno, al pasar a través de los recuperadores, les comunican su calor y, cuando están suficientemente calientes, mediante un dispositivo automático de válvulas, se invierte el sentido de circulación, de forma que el gas y el aire, antes de entrar en el horno, pasan por los recuperadores calientes y alcanzan temperaturas de 1000 °C a 1200 °C llegando a conseguir de esta forma los 1800 °C. Mientras tanto los gases de la combustión pasan a través de los otros recuperadores que ahora están en periodo de calentamiento.

Los hornos de reverbero son de poca altura y gran longitud. En uno de los extremos se encuentra el hogar donde se quema el combustible, y en el extremo opuesto la chimenea. Las llamas y productos de la combustión atraviesan el horno y son dirigidos, por la bóveda de forma adecuada hacia la solera del horno, donde está situada la carga del metal que se desea fundir. Esta carga se calienta, no solo por su contacto con las llamas y gases calientes sino también por el calor de radiación de la bóveda del horno de reverbero.

Aproximadamente, la superficie de la solera es unas tres veces mayor que la de la parrilla y sus dimensiones oscilan entre un ancho de 150 a 300 cm y una longitud de 450 a 1500 cm. La capacidad de los hornos de reverbero es muy variable y oscila entre los 45 Kg a los 1000 Kg que tienen los empleados para la fusión de metales no féreos, hasta las 80 Tm que tienen los mayores empleados para la fusión de la fundición de hierro.

Las bajas temperaturas de fusión del aluminio y su facilidad para oxidarse hacen que el cambio a fusión con oxígeno en los Hornos de Reverbero requiera diseños de quemadores específicos para evitar sobrecalentamientos. Este problema no ocurre en los hornos rotativos debido por una parte al giro del horno, que hace que la temperatura en su interior se homogeneice con facilidad y por otra a la utilización de sales de protección que evitan sobrecalentamientos del material.

La primera de las tecnologías consiste en la utilización de un quemador de baja temperatura de llama que evita sobrecalentamientos, bien de la bóveda bien del aluminio, y amplio desarrollo de la misma, con lo que se asegura una gran homogeneidad tanto en la transmisión del calor como en la temperatura. La tecnología de quemador está basada en la combustión por etapas, que como ventaja adicional reduce enormemente las emisiones de NOx.

Las tecnologías de combustión con oxígeno en los hornos de reverbero para fusión de aluminio permiten, respecto a la utilización de quemadores de aire frío:

- ✓ Incrementar la producción alrededor del 50%
- ✓ Reducir el consumo energético entre un 40 y un 50%
- ✓ Reducir el volumen de humos emitidos más del 70%
- ✓ Reducir las oxidaciones del aluminio más de un 20%

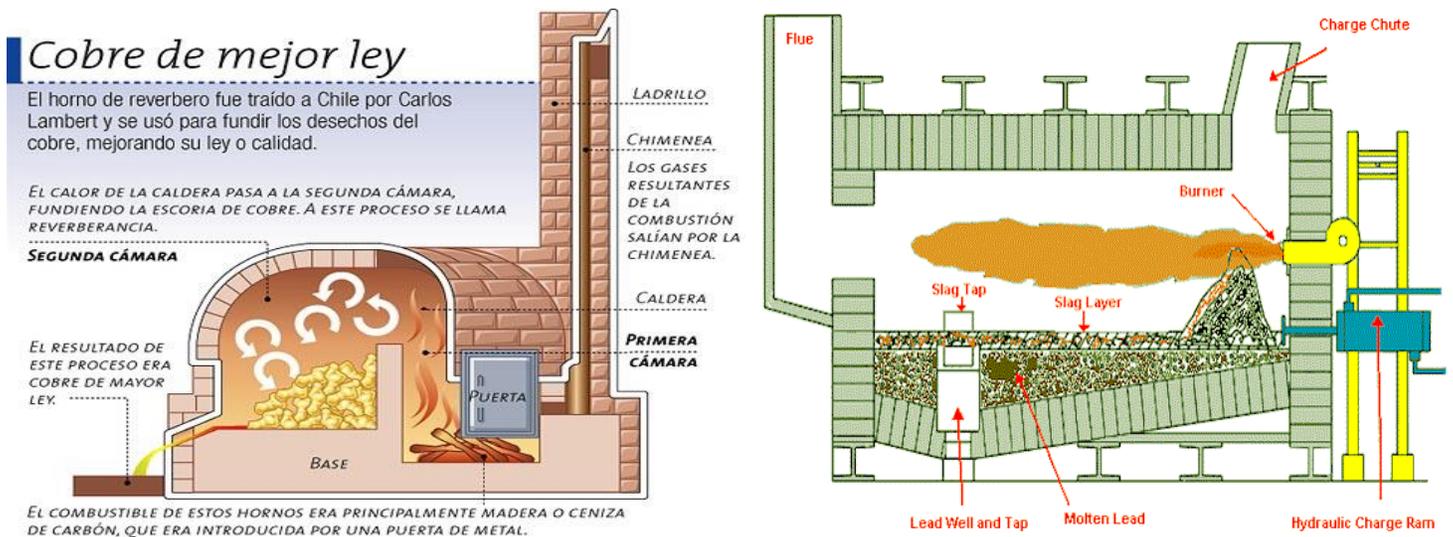
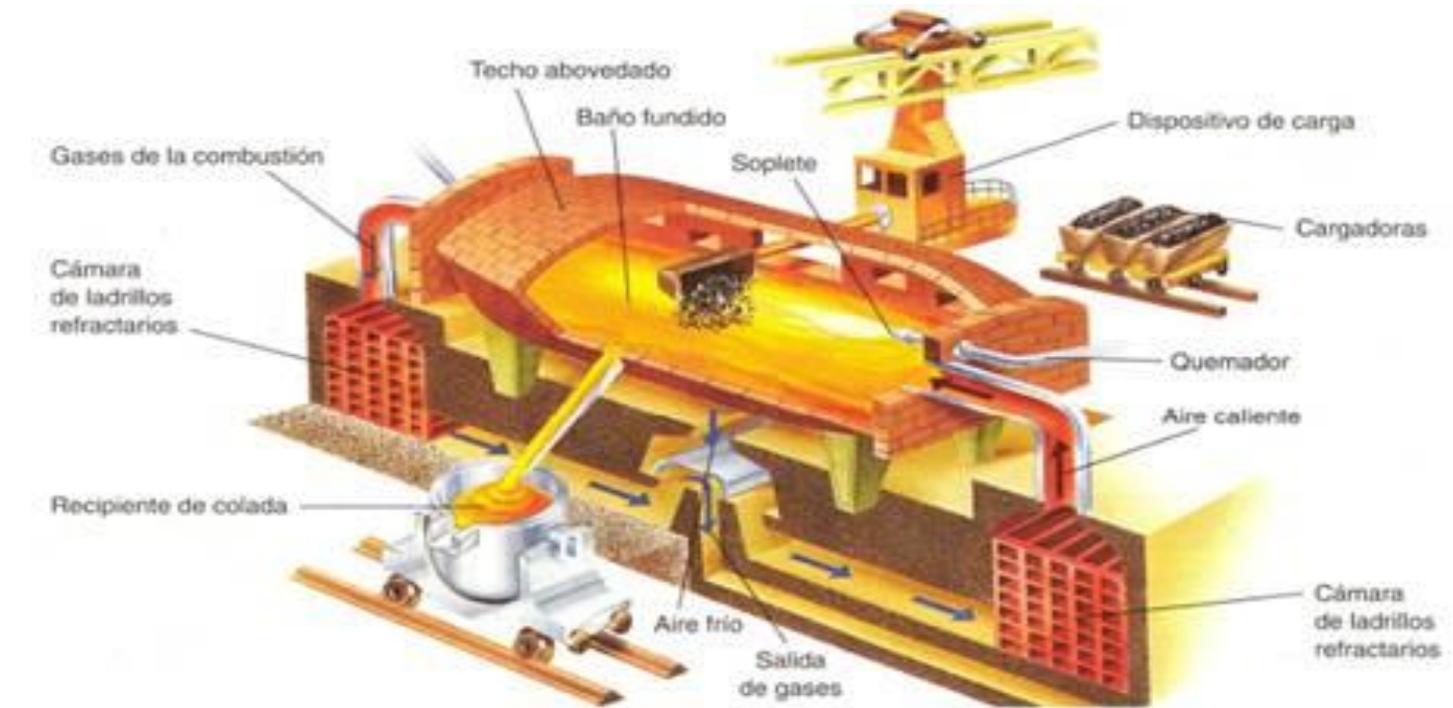


Figura 2.24. Horno Siemens Martin para fundición de cobre.

2.2.4. Hornos Eléctricos

Los hornos eléctricos se emplean cada vez más para fundir los metales y en los últimos años han aparecido tipos nuevos y perfeccionados. Hay, sin embargo que hacerse cargo de su importancia relativa por lo que describiremos los diversos tipos en el orden de su importancia industrial. Los hornos eléctricos de fusión se clasifican en tres grupos fundamentales:

- Hornos de arco eléctrico.
 - Hornos de inducción.
 - Hornos de resistencia.
-
- **Horno de Arco Eléctrico**

Un **horno de arco eléctrico** (siglas en inglés: EAF ('Electric Arc Furnace')) es un horno que se calienta por medio de un arco eléctrico. Los tamaños de un horno de arco eléctrico van desde la tonelada de capacidad (utilizado en fundiciones) hasta las 400 toneladas de capacidad utilizado en la industria metalúrgica. Además, existen hornos de laboratorio y usados por dentistas que tienen una capacidad de apenas doce gramos. La temperatura en el interior de un horno de arco eléctrico puede alcanzar los 1800 grados Celsius.



Figura. 2.25. Taller de fundición con dos hornos de arco eléctrico.

El primer horno eléctrico de arco se desarrolló por el francés Paul Héroult, con una planta comercial establecida en EE.UU. en 1907. En principio, el acero obtenido por horno eléctrico era un producto especial para la fabricación de máquinas herramienta y de acero resorte. También se utilizaron para preparar carburo de calcio para las lámparas de carburo.

En el s. XIX, el horno de arco eléctrico se empezó a emplear en la fundición de hierro. Sir Humphry Davy llevó a cabo una demostración experimental del horno en 1810; el método de soldadura por arco eléctrico fue investigado por Pepys en 1815; Pinchon intentó crear un horno electrotérmico en 1853; y, en 1878 - 79, Sir William Siemens patentó el horno de arco eléctrico. El horno eléctrico de Stessano era un horno de arco que rotaba para mezclar la colada.

Los hornos de arco eléctrico fueron utilizados en la Segunda Guerra Mundial para la producción de aleaciones de acero, fue después cuando la fabricación de acero por este método comenzó a expandirse. El bajo coste en relación a su capacidad de producción permitió establecerse nuevas acerías en Europa en la postguerra, y también permitió competir en bajo coste con los grandes fabricantes de Estados Unidos, tales como Bethlehem Steel y U.S. Steel, con productos de vigería, embarrados, cables y laminados para el mercado estadounidense.

El hecho de que un horno de arco eléctrico use acero procedente de chatarra como materia prima tiene un impacto en la calidad de un producto laminado, debido al control de calidad limitado sobre las impurezas que contienen un acero procedente de chatarra.

El horno de arco eléctrico para acería consiste en una recipiente refractario alargado, refrigerada por agua para tamaños grandes, cubierta con una bóveda también refractaria y que a través de la cual uno o más electrodos de gráfico están alojados dentro del horno. El horno está compuesto principalmente de tres partes:

- ❖ El *armazón*, que consiste en las paredes refractarias y la cimentación.
- ❖ El *hogar*, que consiste en el lecho refractario que bordea la cimentación.
- ❖ La *bóveda o cubierta*, de aspecto esférico o de frustrum (de sección cónica), cubre el horno con material refractario. Puede estar refrigerada con agua. La bóveda está construida con materiales de alta resistencia pirosfópica (generalmente hormigón refractario) para soportar grandes choques térmicos y en el cual entran los electrodos de grafito que producen el arco eléctrico.

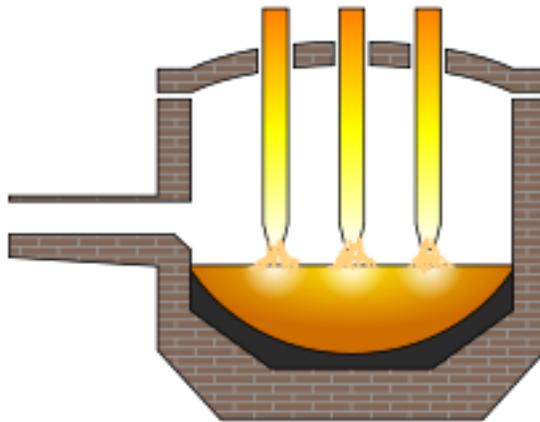


Figura. 2.26. Un esquema de la sección transversal de un horno de arco eléctrico. Tres electrodos, material fundido, desembocadura a la izquierda, bóveda extraíble de ladrillo refractario, paredes de ladrillo y un hogar con forma de tazón y de material refractario.

El hogar puede tener una forma hemiesférica u ovoidal. En talleres de fundición modernos, el horno suele levantarse del suelo, así la cuba y los vertederos y las cucharas de colada pueden maniobrar sobre la base del horno. Separado de la estructura del horno está el sistema eléctrico y el soporte del electrodo, además de la plataforma basculante sobre la que descansa el horno.

Un horno típico de corriente alterna tiene tres electrodos. Los electrodos tienen una sección redonda y, por lo general, en los segmentos con acoplamientos roscados, de modo que a medida que se desgastan los electrodos, se pueden agregar nuevos segmentos.

El arco se forma entre el material cargado y el electrodo, así la carga se calienta tanto por la corriente que pasa a través de la carga como por la energía radiante generada por el arco. Los electrodos suben y bajan automáticamente mediante un sistema de posicionamiento, que puede emplear ya sean montacargas eléctricos o cilindros hidráulicos.

El sistema de regulación mantiene aproximadamente constante la corriente y la potencia de entrada durante la fusión de la carga, a pesar de que la chatarra puede moverse debajo de los electrodos a medida que se derrite. Los brazos del mástil de sujeción de los electrodos llevan pesados embarrados, los cuales pueden estar huecos con tuberías de cobre refrigeradas por agua llevando corriente eléctrica a las sujeciones de los electrodos.

Los modernos sistemas utilizan "brazos calientes", donde el brazo entero conduce la corriente, aumentando el rendimiento. Éstos se pueden fabricar de acero revestido de cobre o de aluminio. Puesto que los electrodos se mueven arriba y abajo de forma automática para la regulación del arco y se levantan para permitir quitar la bóveda del horno, cables refrigerados por agua pesada conectan el haz de tubos y brazos con el transformador situado junto al horno. Para proteger el transformador del calor, éste se instala en una cámara acorazada.

El horno está construido sobre una plataforma basculante para que el acero líquido se vierta en otro recipiente para el transporte. La operación de inclinación del horno para verter el acero fundido se conoce como "tapping". Originalmente, todos los hornos de producción de acero tenían un caño para verter que estaba revestido de refractario que aliviaban cuando estaban inclinados, pero a menudo los hornos modernos tienen una desembocadura excéntrica en la parte inferior (EBT) para reducir la inclusión de nitrógeno y de escoria en el acero líquido. Estos hornos tienen una abertura que pasa verticalmente a través del hogar y el armazón, y se encuentra fuera del centro en la estrecha "nariz" del hogar ovalado.

Las plantas modernas pueden tener dos armazones con un solo sistema de electrodos que se pueden transferir entre las dos armazones; un armazón precalienta la chatarra mientras que el otro armazón se utiliza para la fusión. Otros hornos basados en corriente continua tienen una disposición similar, pero tienen electrodos para cada armazón y un solo sistema electrónico.

Existen hornos de CA que por lo general exhiben un patrón de calor y puntos fríos alrededor del perímetro del hogar, con los puntos fríos situados entre los electrodos. Hay hornos modernos donde montan quemadores de combustible de oxígeno en la pared lateral y los utilizan para proporcionar energía en esos puntos fríos, consiguiendo un calentamiento del acero más uniforme.

La energía química adicional se proporciona mediante la inyección de oxígeno y carbono en el horno; históricamente esto se hacía a través de lanzallamas en la puerta de la escoria, ahora esto se hace principalmente a través de múltiples equipamientos de inyección empotrados en la pared.

Un moderno horno de fabricación de acero de tamaño mediano que tiene un transformador de 60 MVA de capacidad, con una tensión secundaria entre 400 y 900 voltios y una corriente secundaria de más de 44.000 amperios. En un taller moderno, un horno debería producir una cantidad de 80 toneladas métricas de acero líquido en aproximadamente 60 minutos de carga con chatarra fría para aprovechar el horno.

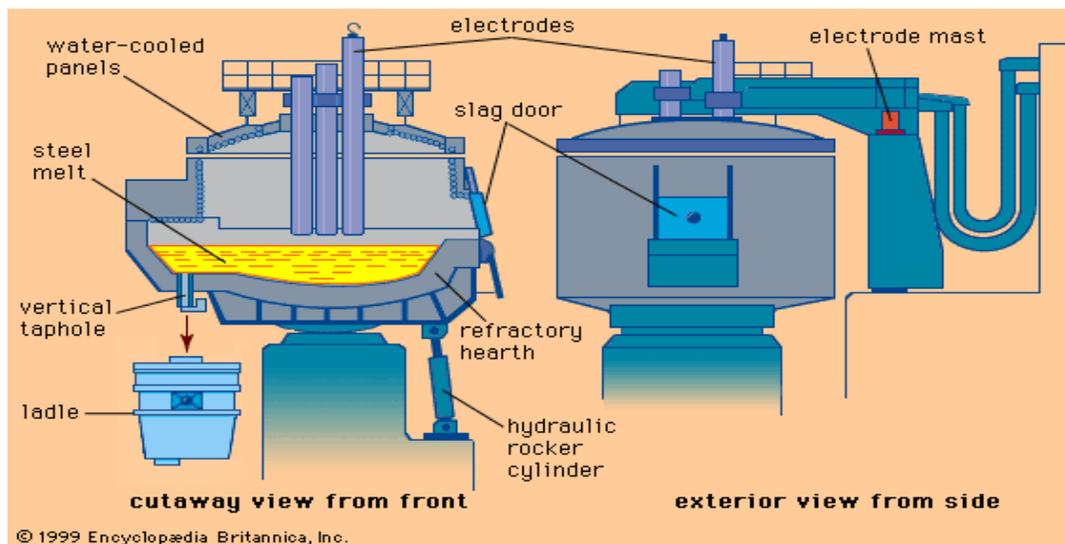


Figura. 2.27. Sistema de Funcionamiento de un Horno de Arco Eléctrico.

En comparación, los hornos básicos de oxígeno pueden tener una capacidad de 150-300 toneladas por lote, y pueden producir un lote entre 30 y 40 minutos. Existen enormes variaciones en los detalles del diseño y el funcionamiento del horno, dependiendo del producto final y las condiciones locales, así como los últimos estudios para mejorar la eficiencia del horno, el mayor horno dedicado a chatarra (en términos de capacidad y de tamaño de transformador) se encuentra en Turquía, con una capacidad de 300 toneladas métricas y un transformador de 300 MVA.

Producir una tonelada de acero en un horno de arco eléctrico requiere aproximadamente de 400 kilovatios-hora de electricidad por tonelada corta, o alrededor de 440 kWh por tonelada métrica; la cantidad mínima teórica de energía requerida para fundir una tonelada de chatarra de acero es de 300 kWh (punto de fusión 1520°C/2768°F). Por lo tanto, dicho horno de arco eléctrico de 300 toneladas y 300 MVA requeriría aproximadamente de 132 MWh de energía para fundir el acero, y un "tiempo de encendido" (el tiempo que el acero se funde con un arco) de aproximadamente 37 minutos. La fabricación de acero con arco eléctrico es sólo rentable donde hay electricidad abundante, con una red eléctrica bien desarrollada.

Los hornos eléctricos de inducción utilizan una corriente inducida para fundir la carga. La energía es del tipo de inducción sin núcleo dada por una corriente de alta frecuencia que suministra a la bobina primaria, enfriada por agua que circunda al crisol. La corriente de alta frecuencia es alrededor de 1000 Hz, suministrada por un conjunto motor-generador o un sistema de frecuencia con arco por vapor de mercurio.

El crisol es cargado con una pieza sólida de metal, chatarra o virutas de operaciones de mecanizados, al cual se le induce una alta corriente secundaria. La resistencia de esta corriente inducida en la carga se hace en 50 o 90 min, fundiéndola en grandes crisoles que contienen arriba de 3.6 Ton de acero.



Figura. 2.28. Tipos de Hornos de Arco Eléctrico.

- **Hornos de Resistencia**

Los hornos industriales de resistencias son aquellos en que la energía requerida para su calentamiento es de tipo eléctrico y procede de la resistencia óhmica directa de las piezas o de resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto Joule y ceden calor a la carga por las diversas formas de transmisión de calor.

Hay 2 clases fundamentales de hornos de resistencia. Los de la primera se calientan mediante resistencias de aleaciones tales como la S níquel-cromo 80/20, en forma de cintas o varillas; generalmente un crisol o recipiente para el metal líquido y sirven para aleaciones de bajo punto de fusión, como las de soldadura, las de tipos de imprenta, los metales antifricción para cojinetes y algunas veces las de aluminio.

Los elementos de caldeo se disponen alrededor del exterior del crisol y todo el horno queda dentro de una carcasa rellena con un material refractario y aislante térmico. Los elementos de caldeo suelen estar soportados por el revestimiento refractario. La figura 13 muestra un horno de este tipo.

El segundo tipos de hornos de resistencia sirve para temperaturas más elevadas y recuerda a los hornos basculantes de arco indirecto. La diferencia fundamental es que la calefacción no la produce el arco indirecto que salta entre los 2 electrodos.

Sino que calienta por resistencia; los hornos son siempre cilíndricos, revestidos con un refractario adecuado; la barra de grafito está colocada horizontalmente y coincidiendo con el eje del cilindro. Bascula alrededor del eje horizontal del cilindro para distribuir mejor el calor radiado y bañar casi todo el refractario con el metal líquido, la barra- resistencia esta mentada en soportes de grafito y se puede sacar del horno para efectuar la carga. Este tipo de horno se ha empleado para fundir y sobrecalentar fundiciones de hierro especiales, y también sirve para fundir bronce y otras aleaciones de cobre.

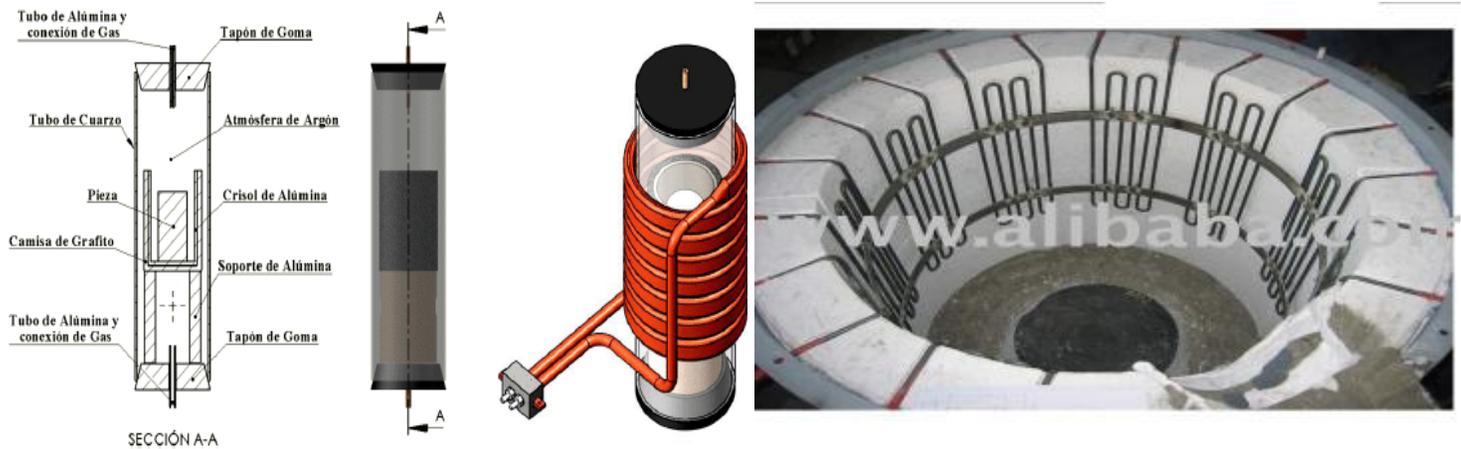


Figura 4. Prototipo de cámara de fundición y bobina



Figura 2.29. Ejemplos de Hornos de Resistencia.

El calentamiento de piezas por resistencias eléctricas puede ser directo, cuando la corriente eléctrica pasa por las piezas, o indirecto, cuando las piezas se calientan por radiación, convección o una combinación de ambas, procedente de las resistencias propiamente dichas dispuestas en las proximidades de las piezas.

El calentamiento por resistencia directa es adecuado para piezas metálicas de gran longitud y sección pequeña y uniforme, tales como barras, palanquillas, varillas, alambres y pletinas. Como se obtienen tiempos de calentamiento muy cortos, pueden acoplarse los equipos a la cadencia de laminación, forja o conformado en caliente.

La distribución de temperatura en la sección de la pieza se puede ajustar por el tiempo de calentamiento, y es posible obtener en el centro una temperatura ligeramente superior a la de la superficie. Durante el corto tiempo de calentamiento la oxidación superficial es despreciable y tampoco se produce una descarburación superficial que afecte a la calidad.

Dimensiones interiores $3.200 \times 1.000 \times 1.000$ mm.
Potencia 200 kW. Temp. 1.100°C . Tensión 380 V.

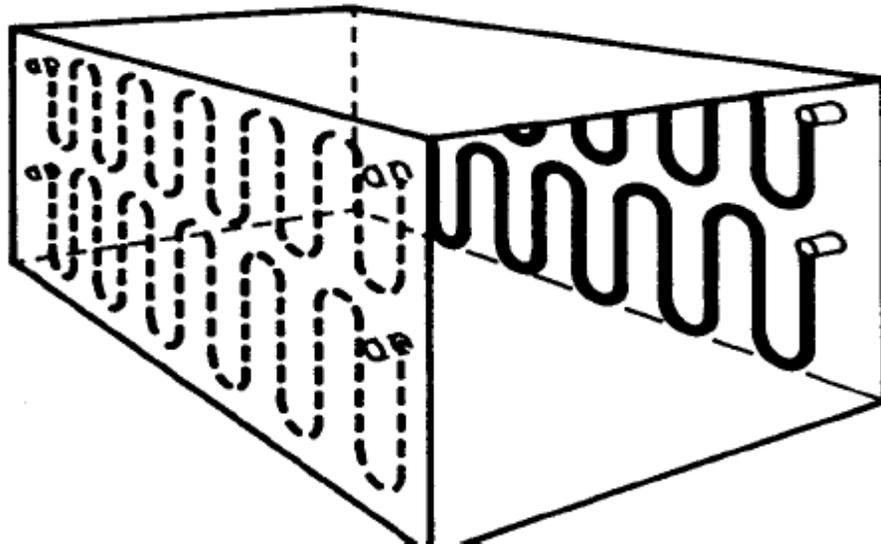


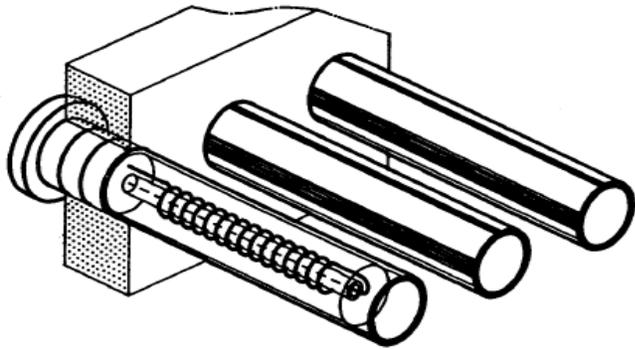
Figura 2.30. Ejemplos de la disposición de las resistencias en los hornos.

En la industria es mucho más frecuente el calentamiento indirecto por resistencias eléctricas. Dichas resistencias pueden ser:

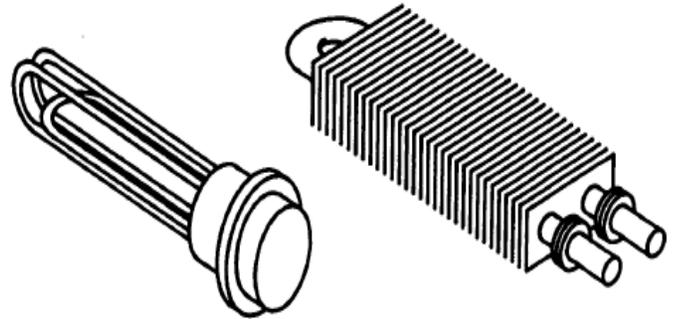
1. Barras, varillas, alambres o pletinas, dispuestos en las paredes de la cámara de calentamiento del horno, transmitiendo calor a las piezas por radiación.
2. Paquetes de resistencias de los mismos materiales que transmiten el calor por convección al aire o gases, y de éstos, también por convección, a las piezas.
3. Los mismos materiales, dispuestos en el interior de tubos radiantes, cuando la atmósfera interior del horno sea perjudicial para una vida razonable de las resistencias expuestas directamente.
4. Resistencias blindadas, dispuestas en el interior de fundas metálicas de pequeño diámetro con un material cerámico de llenado de las fundas metálicas. Se adquieren de fabricantes especializados y, normalmente, se aplican a temperaturas inferiores a las de las anteriores.

Las resistencias de calentamiento indirecto se clasifican del siguiente modo:

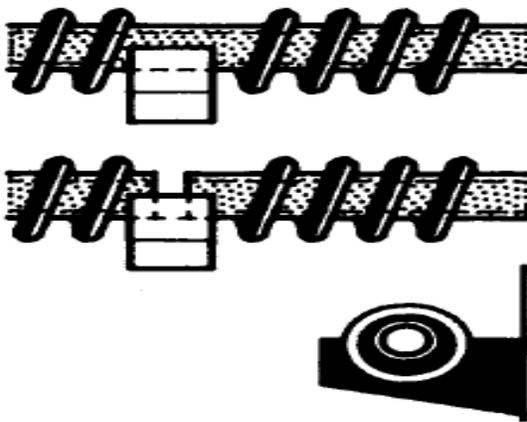
- ✓ Metálicas,
- ✓ No metálicas,
- ✓ Tubos radiantes (Figura 2.2.1), van colocados en la bóveda del horno
- ✓ Resistencias blindadas, típicas para calentamiento de líquidos en baños, tanques de temple, precalentadores de combustión, etc., que en el caso de calentamiento de gases van provistos, normalmente, de aletas para aumentar la superficie de intercambio.



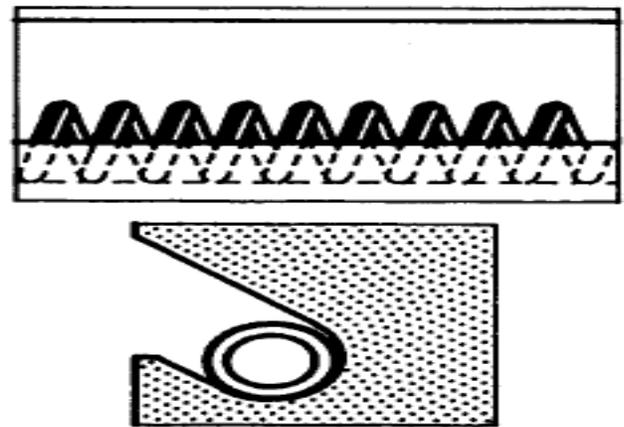
Tubo radiante con resistencia de alambre en espiral sobre soporte cerámico.



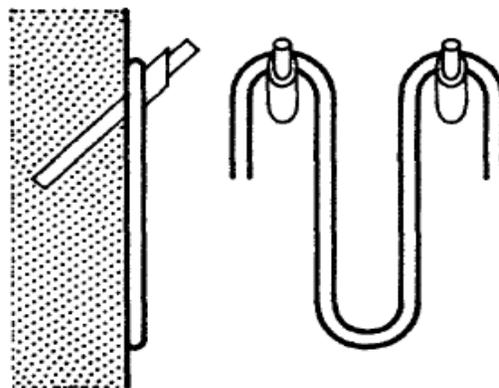
Resistencias blindadas de comercio.



Alambre en espiral sobre tubos



Alambre en espiral sobre ranuras.



Ondulado sobre qanchos.

Figura 2.31. Ejemplos de la forma y colocación de las resistencias dentro de los hornos.

2.2.5. Hornos de Inducción

Los hornos de inducción se utilizan sobre todo porque son bastante limpios, pueden derretir materiales con rapidez, y en general son asequibles para mantener y operar. También permiten un control preciso de la temperatura y el calor. Debido a que ganan calor muy rápidamente no se deben dejar en marcha entre operaciones para así ahorrar en recursos energéticos y ayudar a administrar los costos de operación.

✓ Calor de inducción

El calor por inducción es un medio de calentamiento o de fundición de metal que utiliza corrientes eléctricas para calentar el material. El calor eléctrico es limpio y eficiente. Proporciona calor rápido y consistente a lo largo del horno y permite que el material se caliente uniformemente.

El calor de inducción se basa en una bobina hecha con un tubo de cobre. El agua fluye a través de las bobinas que trabajan junto a los elementos de calefacción de cobre y ayudan a enfriar el horno según sea necesario. El tamaño y forma de la bobina puede ser determinada según la aplicación específica para la que se utilice el horno.

En los hornos de inducción el rango de frecuencias de operación va desde la frecuencia de red (50 ó 60 Hz) hasta los 10 kHz, en función del metal que se quiere fundir, la capacidad del horno y la velocidad de fundición deseada - normalmente un horno de frecuencia elevada (más de 3000 Hz) es más rápido, siendo utilizados generalmente en la fundición de aceros, dado que la elevada frecuencia disminuye la turbulencia y evita la oxidación. Frecuencias menores generan más turbulencias en el metal, reduciendo la potencia que puede aplicarse al metal fundido.

✓ Tipos de Hornos de Inducción

Existen tres clases fundamentales de hornos de inducción:

- Alta frecuencia: el calor lo producen las corrientes de Foucault, ordinariamente consideradas como parásitas, inducidas en el metal, que actúa como núcleo de un selenoide.
- Baja frecuencia: el calor se produce por el efecto Joule de la corriente inducida por corriente alterna a través del metal que queremos fundir.
- Hornos electrónicos: el calor se produce por la vibración molecular del cuerpo que se trata de calentar cuando es sometido a un fuerte campo de radiaciones electromagnéticas de muy alta frecuencia.

✓ Funcionamiento del Horno de Inducción

Durante el funcionamiento normal de un horno de inducción se emite un zumbido, silbido o chirrido (debido a la magnetostricción), cuya frecuencia puede ser utilizada por los operarios con experiencia para saber si el horno funciona correctamente o a qué potencia lo está haciendo.

- Por medio del control de velocidad se hace funcionar el motor para proporcionarle energía mecánica al alternador de alta frecuencia.
- El alternador de alta frecuencia proporciona la energía alterna utilizada por el horno de inducción, esta energía pasa a través de un banco de capacitores automáticos para poder regular el factor de potencia.
- Un sensor de temperatura sensa la temperatura del horno, la señal es transmitida a un indicador de temperatura y a su vez a un controlador o variador de velocidad.
- El variador de velocidad regula las revoluciones por minuto, al hacer esto está variando la frecuencia del alternador.

✓ Principales Cualidades de los Hornos de Inducción

Los hornos de inducción se utilizan sobre todo porque son bastante limpios, pueden derretir materiales con rapidez, y en general son asequibles para mantener y operar. También permiten un control preciso de la temperatura y el calor. Debido a que ganan calor muy rápidamente no se deben dejar en marcha entre operaciones para así ahorrar en recursos energéticos y ayudar a administrar los costos de operación los mismo presentan:

- Buen rendimiento, puesto que el calor se genera en la masa de metal fundido.
- Las corrientes electromagnéticas producen un movimiento beneficioso, puesto que uniformizan la masa a fundir.
- El control de la transmisión de temperatura se haga más o menos rápido es muy preciso.
- Se puede fundir en vacío.
- Las oxidaciones son muy pequeñas.

✓ Ventajas de los Hornos de Inducción

Dentro de las principales ventajas que trae la utilización de los hornos de inducción tenemos:

- Es limpio, eficiente desde el punto de vista energético
- Generar una gran cantidad de calor de manera rápida.
- Es un proceso de fundición y de tratamiento de metales más controlable que con la mayoría de los demás modos de calentamiento.
- Puede ser empleado en la fusión de materiales ferrosos y no ferrosos y todas sus aleaciones.
- Eficiente, ecológico y mayormente controlable en comparación con otras tecnologías.
- Maneja un rango de capacidades entre menos de 1 Kg y varias decenas de toneladas, y frecuencias desde las de red (50-60 Hz), llegando a los 400KHz.

✓ Principales usos de los Hornos de Inducción

Las fundiciones más modernas utilizan este tipo de horno y cada vez más fundiciones están sustituyendo los altos hornos por los de inducción, debido a que aquellos generaban mucho polvo entre otros contaminantes. Los hornos de inducción pueden ser utilizados para fundir, soldar, tratar o ajustar por contracción cualquier material que sea adecuado para su uso con calor por inducción. El tratamiento puede incluir materiales de recocido, endurecimiento o templado.

La inducción de calor puede ser utilizada para soldaduras fuertes o soldadura simple de cobre, bronce, latón o acero. El ajuste por contracción puede implicar el montaje de piezas para una fabricación precisa. Los procesos de fundición se pueden hacer con material de hormigón que sea compatible con calor por inducción. Estos metales incluyen el acero, bronce, cobre y latón.



Figura. 2.32. Tipos de Hornos de Inducción.

⊙ De Alta Frecuencia.

Las muchas variantes existentes de hornos de inducción no es posible en la actualidad clasificarlos rígidamente por la frecuencia de la corriente usada. Los hornos que trabajan a frecuencias superiores a los 500 ciclos por segundo tienen un baño en forma de crisol cilíndrico y no llevan un núcleo de hierro. Estos hornos se llaman corrientemente hornos de inducción sin núcleo.

En los últimos años se han construido muchos hornos de este tipo que trabajan a 50 ciclos por segundo, es decir, la frecuencia normal de las redes de suministro. Los primitivos hornos de inducción tenían un canal de fusión que formaba el secundario en cortocircuito de un transformador; estos se pueden denominar hornos de inducción de canal.

- Hornos de inducción sin núcleo

La capacidad de estos hornos puede variar desde pocos gramos para fundir metales preciosos y para trabajos de laboratorio, hasta unas 15 Ton de acero en las unidades, para producciones grandes. El baño es normalmente cilíndrico con revestimiento ácido o básico, aunque los de este último tipo no son todavía muy satisfactorios, en especial para los hornos muy grandes.

Por tal razón la mayoría de los hornos implican revestimientos silíceos; generalmente se forman mediante un cemento seco que lleva incluido el aglutinante y se sintetiza o fritada en posición utilizando un modelo cilíndrico en el que se coloca la primera carga.

Este modelo es normalmente de acero soldado o moldeado y es esencial para fritar el revestimiento a la temperatura máxima de trabajo. El revestimiento va rodeado por la bobina inductora de tubo de cobre en forma aplastada; está normalmente protegido por un barniz aislante y amianto.

En los hornos pequeños, de hasta p.ej., 250 Kg. de capacidad, la envuelta del horno es de cartón de amianto con cemento aplicado sobre un armazón no magnético, porque si se utilizara una carcasa de material magnético, como el acero, se produciría un calentamiento por el flujo disperso hacia el exterior de la bobina.

Cuando los hornos son grandes no se puede prescindir de una carcasa de acero y entonces hay que recurrir a una pantalla magnética formada por paquetes de chapa de acero al silicio que forman un yugo magnético alrededor de la bobina y que puede servir para soportarla.



Figura. 2.33. Hornos de Inducción de Alta Frecuencia.

Los hornos suelen ser basculables y a veces por pivoteo alrededor del pico de colada, en cuyo caso el horno se levanta mediante un dispositivo hidráulico o un torno eléctrico y un cable. Estos hornos de inducción suelen trabajar a frecuencias mayores de las normales y corrientemente se llaman de media frecuencia los que funcionan a 500 ciclos por segundo, mientras se llaman de alta frecuencia a los que emplean más de 1000 ciclos por segundo.

La mayoría de los hornos grandes, de más de aproximadamente 250 Kg. suelen alimentarse con un equipo motor generador, pero los pequeños de p.ej., 10 Kg. pueden utilizar osciladores de chispa en mercurio que engendran corrientes con frecuencias de 10000 a 20000 ciclos por segundo.

También pueden emplearse generadores de válvulas termoiónicas, con capacidades de hasta 50 KW y que trabajan a frecuencias de 200 a 1000 ciclos por segundo. Todavía hay otros tipos de generadores de arco de mercurio que producen frecuencias del orden de los 2000 ciclos por segundo.

Las instalaciones más extendidas son las de motor generador, que suponen aproximadamente el 90% de la capacidad de fusión de este tipo de hornos. El equipo de alimentación se compone de un motor trifásico que mueve a un generador de alta frecuencia y un excitador.

El factor de potencia de estas instalaciones es de solo 0.1, por lo que hay que acoplar en paralelo: con la bobina de inducción una batería de condensadores, parte de la cual por lo menos debe ser variable porque la capacidad del circuito depende de las condiciones de fusión.

Este tipo de hornos ha sustituido ampliamente a los hornos de crisoles para la fabricación de aceros de herramientas y de alta aleación, y se le prefiere para aleaciones níquel-plomo resistente al calor, aceros inoxidable, aceros para imanes y en general para todas aquellas aleaciones que contienen grandes cantidades de elementos caros como cobalto, wolframio, vanadio, cromo y níquel.

También es preferido para aleaciones que deben contener muy escaso carbono, porque el metal no tiene en ellos contacto alguno con carbón. Los hornos de inducción sin núcleo se basan en la ley física según la cual los cuerpos metálicos sometidos a la acción de un campo magnético de corriente alterna se calientan tanto más cuanto más intenso es el campo magnético y cuanto más elevada es la frecuencia.

Están constituidos por una espiral cilíndrica (enfriada por circulación interior de agua) de tubo de cobre de sección rectangular o cuadrada, dentro de la cual va instalado un crisol que contiene el metal que se ha de fundir.

Por efecto del campo magnético generado por la espiral se induce una corriente a la masa metálica y la energía eléctrica absorbida se transforma en calor. El crisol refractario no impide la acción del campo magnético. Mientras que en los hornos de baja frecuencia se emplea la corriente industrial de 42 a 50 Hz, en los hornos de alta frecuencia puede variar de 500 a 3000 Hz, pudiendo llegar a 20000 y más en pequeños hornos experimentales.

En los hornos de tipo industrial, la corriente de alta frecuencia es obtenida con grupos giratorios motor-alternador de alta frecuencia. Siendo bajísimo, sin embargo, el factor de potencia, hace falta disponer en serie o en paralelo una batería de condensadores de capacidad tal que equilibren la corriente desfasada.

El revestimiento del horno se forma con una masa de granalla de cuarcita en diversas gradaciones de tamaño, que se hace plástica con la adición del 6 al 8 % de caolín. Se debe poner un gran cuidado al efectuar el revestimiento y el secado que le sigue, que será muy lento para evitar resquebrajaduras. También se puede efectuar el revestimiento usando granos de cuarcita y ácido bórico en la proporción del 1,5 al 3 %. La capacidad de esta clase de hornos puede variar desde unos pocos kilogramos hasta 10 a 12 toneladas con potencias que alcanzan los 2000 kW y frecuencias de 500 a 600 Hz.



Figura. 2.34. Aplicación de los Hornos de Inducción de Alta Frecuencia.

Los hornos de inducción, con crisoles aprovechables desde pocos kilogramos hasta 3.6 Ton son relativamente bajos en costo, casi libres de ruido y por lo mismo producen poco calor. Puesto que la temperatura no necesita ser más alta que la requerida para fundir la carga, la chatarra aleada puede ser para refundir sin que sea "quemada" la calidad del material. Por estas razones a menudo son encontrados en laboratorios experimentales o fundiciones. En hornos de arco eléctrico, la temperatura alta del arco puede refinar el metal, siendo una desventaja de la fundición.

El tipo más sencillo tiene la cámara de fusión unida a un canal que, como ya se ha dicho, forma un circuito eléctrico secundario cerrado en el cual se genera el calor. Al poner el horno en marcha, el canal está lleno de material metálico sólido en íntimo contacto para permitir el cierre del anillo. Primeramente se funde el contenido del anillo (sección más estrecha) y luego, poco a poco, se propaga la fusión a toda la carga. La mezcla del líquido queda favorecida por la acción electrodinámica de la corriente.

Para facilitar las coladas subsiguientes conviene dejar siempre una cierta cantidad de metal líquido en el fondo del horno de forma que el canal esté siempre lleno, es decir, cebado. Éste es uno de los inconvenientes que hay que poner en el pasivo de esta clase de hornos. A pesar de todo, tuvieron mucha aceptación en el campo de la fusión del bronce, cobre, aluminio y aleaciones derivadas, y, más recientemente, incluso para la fusión de la fundición gris.



- A. Paneles: Están contruidos de acero resistente para proteger la bobina durante la operación de horneó.
- B. Casco de protección: Sirve como una barrera impenetrable entre el metal salpicado y la bobina.
- C. Tapas aisladas que minimizan la pérdida de calor.
- D. Anillo recolector de humo: Especialmente diseñado para eliminar humo nocivo y humo durante el ciclo de fundición.
- E. Espiras macizas: Optimizan el rendimiento en la fundición.
- F. Yugos magnéticos: Reducen el calor excesivo.
- G. Espacios entre las espiras: Optimizan eficiencia eléctrica y reducen humedad.
- H. Parte inferior abierta: Ayuda a reducir humedad y ventilar.
- I. Bobinas de enfriamiento: Amplian la vida del recubrimiento
- J. Formas refractarias.
- K. Detección de fugas con polo a tierra para mayor seguridad.
- L. Tubería adecuada para su aplicación.
- M. Aislamiento de alta temperatura. Barrera de aislamiento eléctrico y térmico.

Figura. 2.35. Partes de un Horno de Inducción de Alta Frecuencia.

La limpieza del canal es difícil: para comodidad de funcionamiento estos hornos han sufrido modificaciones importantes en su desarrollo, y se les han añadido dos cámaras, una para la carga y otra para la descarga; de este modo:

- a) Quedan eliminados los tiempos improductivos, porque la temperatura del metal se mantiene constante en la cámara de descarga b incluso cuando se añade metal al vaso de carga a;
- b) El metal de la cámara de descarga está siempre limpio, porque las escorias permanecen en la cámara de carga. El sistema actúa a modo de sifón.
- c) Dado que los canales tienden a estrecharse por las incrustaciones de óxidos que se forman durante el funcionamiento, cada 24 horas, con el horno caliente, se efectúa la limpieza que dura media hora aproximadamente.
- d) Los hornos son siempre rebatibles mecánica o hidráulicamente, y llevan el perno de rotación bajo la piqueta de colada.
- e) Los hornos emplean corriente monofásica si son de poca cabida, y corriente trifásica, con más canales, si son grandes.
- f) El factor de potencia es, aproximadamente, 0,70, lo que obliga, en la mayoría de los casos, a acoplar uno o más condensadores para aumentarlo a 0,80.
- g) Las pérdidas de material por oxidación son mínimas y el funcionamiento resulta económico.
- h) El recubrimiento está constituido por materiales refractarios cuya composición varía según los metales que hay que fundir.

Aplicaciones

Los hornos de inducción de alta frecuencia poseen notables ventajas: su producción es de gran calidad, con oxidaciones muy reducidas y análisis constantes. Se obtiene también la supresión de los electrodos, una economía en los gastos de funcionamiento y un menor consumo de corriente eléctrica.

Sin embargo, los gastos de instalación son muy elevados. Se emplean particularmente en las fundiciones de aceros aleados especiales o de aleaciones de hierro colado y en menor escala en las fundiciones de hierro colado gris.

Modernamente se han conseguido hornos de este tipo que trabajan a la frecuencia normal de la red, es decir, a 50 ciclos por segundo pero la normal es que estos hornos de frecuencia ordinaria solo puedan fundir trozos grandes de metal, con dimensiones medias de 150 a 200 mm. Para fundir material de tamaños mas pequeños es esencial mantener un charco de metal líquido que pueda absorber la carga.

Tales hornos se prefieren para fundir virutas de fundición que alimentan al charco de metal en fusión. La ventaja fundamental es que no es necesario el equipo generador de frecuencias superiores a la ordinaria. Cuando se conectan a la red trifásica de bases y una batería de condensadores para mejorar el factor de potencia.

En todos los hornos de inducción sin núcleo hay un circulación rápida del metal que es ideal para obtener aleaciones, porque produce una gran homogeneidad pero no son adecuados para el afino mediante escorias porque estas se mantienen demasiado frías por no ser calentadas por las corrientes inducidas.

- Hornos de inducción de canales

Los primeros hornos de este tipo consistían de un anillo de metal que formaba un anillo secundario de un transformador de una sola espira. El baño de estos hornos era de forma poco conveniente. La capacidad estaba limitada por razones eléctricas, pero se encontró que el bucle del metal en corto circuito quedaba sumergido bajo un baño y se eliminaban muchos inconvenientes.

Uno de los primeros hornos así concebidos, el canal secundario de una V y el baño principal encima de los palos de la V, pero por efectos eléctricos y térmicos se produce una rápida circulación que sirve para calentar el baño de encima. Es esencial mantener el horno siempre lleno hasta un tercio de su capacidad con un metal, añadiéndose el metal a fundir al charco de metal líquido. Estos hornos se han empleado para fundir latón para lingotes y hoy se utilizan para aleaciones de aluminio coladas en coquilla y para fundición en hierro.

Los otros tipos de hornos no tienen el canal secundario en forma de V; por ejemplo un tipo tiene dos cámaras separadas, una para la fusión y otra para mantener el metal hasta el momento de la colada, y estas cámaras están conectadas por 2 canales inclinados.

El arrollamiento primario y el yugo de hierro del transformador están situados en canales. Se emplea este tipo de horno para fundir aleaciones de aluminio para colar en coquilla y para latones. El metal frío se carga en una de las cámaras mientras la otra sirve como baño de espera desde el que el metal se saca con cucharas o se xifona. La suciedad y la escoria se acumulan en la cámara de función o carga y ellas se desespuman. Los hornos son de 20 a 100 kw. Con capacidades de función de hasta 250 kg. por hora.

Otro tipo de horno con canal sumergido se ha desarrollado especialmente para aleaciones de aluminio y de zinc, el canal sumergido es rectangular y el brazo horizontal es de mayor sección transversal que los 2 verticales, por lo que cualquier suciedad se acumula y se deposita en él, y se puede extraer para limpiarlo. La figura 12 es una vista general del horno, que puede emplearse para latón y otras aleaciones de cobre.

Muchos hornos de canal se construyen con 2 canales, y el primario con arrollamiento y conexión Scout para cargar equilibradamente a una red normal. Suelen emplearse enlazados a una red con tensiones normales de 400 a 440 V y llevan un auto transformador para ajustar el voltaje y variar la carga. La bobina primaria suele refrigerarse con un ventilador.

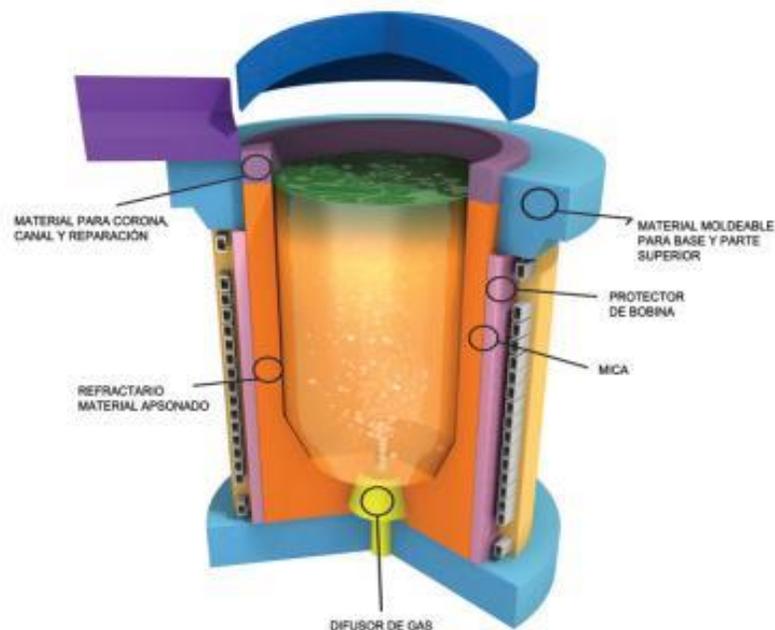


Figura. 2.36. Esquema de un Horno de inducción de canales.

⊙ De Media y Baja Frecuencia.

Los hornos de media y de baja frecuencia no pueden alcanzar las elevadas temperaturas necesarias para fundir el acero, por lo que se emplean casi exclusivamente para aleaciones de cobre-níquel, con más del 30 % de este último metal. Pueden fundir con ciertos equipos algún tipo de hierro colado y metales y aleaciones ligeras. El consumo de corriente (kWh/ton) varía según el metal: funcionando continuamente es de 300 a 450 kWh/ton para el bronce, 600 a 700 kWh/ton para el hierro colado y 400 a 450 kWh/ton para el cobre.

Normalmente, para completar la instalación del horno o de varios hornos se prepara un tambor de reserva, como se ha indicado anteriormente. Siendo estos hornos monofásicos, la instalación de uno solo desequilibra la línea, por lo que es preferible instalar dos o tres con transformadores de toma Scott.

En los hornos de baja frecuencia se emplea la frecuencia industrial o principal de 50 a 60 Hz, y son conocidos como hornos de inducción con núcleo. En los hornos de media frecuencia, ésta puede variar desde 150 a 10.000 Hz, y el método de generación de la media frecuencia puede ser de motor-alternador, de multiplicadores estáticos por transformador de núcleo saturado, y el de tiristores o S.C.R, y los equipos de alta frecuencia pueden operar desde 4.000 Hz hasta 400.000 Hz y estos pueden ser de válvulas electrónicas, de transistores y aperiódicos. En los hornos de media frecuencia de tiristores posee un convertidor de frecuencia.

En la figura 2.28 se puede observar el banco de capacitores con su respectivo tablero de control, la central hidráulica con sus accesorios, el sistema de enfriamiento con sus radiadores, motores y ventiladores. El horno en sí, consta de dos cubas.



Figura. 2.37. Banco operativo de un horno de inducción de baja frecuencia.

Todos los hornos utilizan materiales refractarios los cuales son productos capaces de resistir las elevadas temperaturas sin fundirse y su resistencia pirocópica o como seger es superior a los 1500°C (CONO 18 ver anexo).

Cabe resaltar que la finalidad del aislamiento refractario en el horno de inducción es de:

- ✓ Contener la colada
- ✓ Disminuir las pérdidas de calor
- ✓ Lograr en su exterior un ambiente adecuado.
- ✓ En su interior proteger a la bobina de inducción.
- ✓ Cortar la penetración de metal fundido o derrame de metal. Soportar la temperatura máxima de operación.
- ✓ Ser buen aislante térmico y eléctrico.
- ✓ Soportar los cambios bruscos de temperaturas
- ✓ Resistir la erosión causada por el torrente de gases ascendentes, el descenso de las cargas y de la escoria.
- ✓ Tener alta resistencia a la compresión.
- ✓ Por su comportamiento químico, los materiales refractarios se clasifican en tres grupos: ácidos, básicos y neutros.
- ✓ Los materiales refractarios ácidos tales como la sílice del tipo apisonables son los más usados en los hornos de inducción sin núcleo.

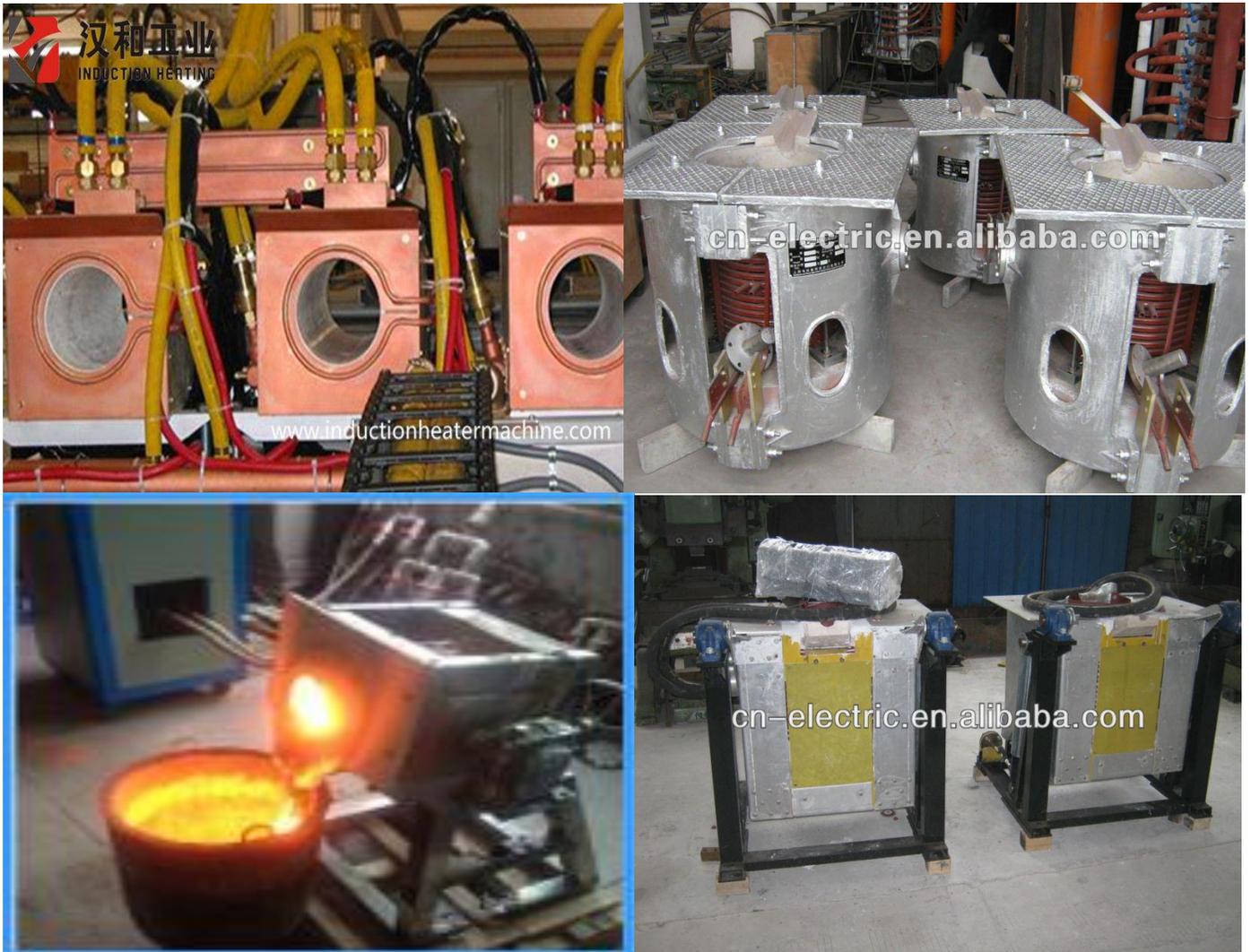


Figura. 2.38. Ejemplos de equipos de hornos de inducción de baja frecuencia.

2.3. Balance del consumo energético de hornos de fundición.

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y diseño. Varían desde los pequeños hornos de crisol que contienen unos cuantos kilogramos de metal a hornos de hogar abierto con capacidades de hasta 200 toneladas. El tipo de horno usado para un proceso de fundición queda determinada por los siguientes factores:

- ❖ Necesidades de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a la temperatura de vaciado requerida.
- ❖ La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición.
- ❖ La producción requerida del horno.
- ❖ El costo de operación del horno.

Pueden clasificarse convenientemente en cuatro grupos principales, según el grado de contacto que tenga lugar entre la carga y combustible o sus productos de combustión:

- Hornos de cubilote: en los cuales la carga se encuentra en contacto íntimo con el combustible y los productos de combustión. El horno más importante en este grupo es el de cubilote.
- Hornos hogar: en los que la carga está aislada del combustible pero en contacto con los productos de la combustión. Este tipo de hornos es el horno hogar abierto para la fabricación de acero.
- Hornos de crisol: en que la carga se encuentra aislada tanto del combustible como de los productos de la combustión. El principal es el horno que se emplea un crisol que puede calentarse ya sea por coque, gas o petróleo.
- Hornos eléctricos: Pueden ser de tipo de acero o de inducción.

La selección del tipo y tamaño de horno dependerá de la aplicación (por ej. si es para fusión o mantención), del número de aleaciones, la producción diaria de cada aleación, la mayor pieza a ser fundida, la continuidad de alimentación de metal, el tipo de combustible. En la fundición de metales no ferrosos, los hornos más utilizados son los hornos de crisol.

⌘ Proceso de Combustión

Se entiende por combustión el proceso de oxidación rápida de un combustible y un oxidante, acompañado de liberación de energía, la cual se aprovecha en diversos procesos industriales. El oxidante puede ser oxígeno o aire, el CO₂ y el H₂O son los productos primarios. La combustión completa requiere la presencia del oxígeno suficiente para que todo el carbono y el hidrógeno del combustible se conviertan en CO₂ y H₂O. Durante una combustión incompleta aparecerán otros productos, el más importante de los cuales será el monóxido de carbono (CO).

La energía liberada por unidad de combustible se conoce como calor de reacción y se evalúa utilizando un calorímetro. En su determinación se puede observar que en las paredes del calorímetro se deposita agua que proviene de la condensación del vapor producido en la combustión, el cual al condensar cede aproximadamente 600 Kcal/kg; éste calor sumado al generado en la combustión recibe el nombre de poder calorífico superior, que es el resultado proporcionado por el calorímetro.

Si ese mismo combustible se quema en un hogar industrial, el vapor de agua existente en los humos no condensa debido a que la temperatura de éstos es siempre superior a 100°C; en estas circunstancias los combustibles no proporcionan las calorías que corresponden al valor obtenido en el calorímetro, sino un valor inferior que recibe el nombre de poder calorífico inferior. Cuando el poder calorífico superior PCS se lista a 25°C, el poder inferior de calentamiento PCI, se puede calcular mediante:

$$PCI = PCS - 2442 \frac{mag}{mc} \text{ kJ/kg de combustible}$$

Dónde:

mag/mc es la masa de agua formada por unidad de masa de combustible.

Las constantes numéricas en las ecuaciones anteriores son simplemente los valores de la entalpía de vaporización a la temperatura dada. Por lo tanto, la energía aportada por el combustible (Q_c) dado en KJ se puede calcular con base en el poder calorífico inferior (PCI):

$$Q_c = m_c * PCI$$

⌘ Combustibles Industriales

Con el nombre de combustibles se designan las sustancias utilizadas para obtener calor. Según sea el estado físico de esas sustancias, los combustibles se clasifican en sólidos, líquidos o gaseosos.

a. Combustibles sólidos

El carbón (con sus variantes), la leña (biomasa), los residuos sólidos, etc., Aunque el carbón desempeñó en su día el papel primordial entre todos los combustibles, hoy en día ha sido desplazado por los combustibles líquidos y gaseosos.

Sin embargo, como las reservas de carbón siguen siendo las más importantes de todos los combustibles (con excepción de los nucleares), van cobrando importancia las nuevas tecnologías de hidrogenación y gasificación, que permiten obtener combustibles líquidos y gaseosos a partir de aquella forma sólida.

b. Combustibles líquidos

Dejando aparte el uso como combustibles de alcoholes (metanol, etc.), los combustibles líquidos más usuales son los derivados del petróleo. Prescindiendo de los carburantes (gasolina), y los combustibles para motores (diesel y queroseno), las fracciones del petróleo usadas como combustibles propiamente dicho son el gasóleo y el fuel-oil.

c. Combustibles gaseosos

Los combustibles gaseosos se clasifican en familias. La primera familia comprende los gases manufacturados y se subdivide en tres grupos (gas de ciudad, gas de coquería e hidrocarburos-aire); la segunda familia incluye a los gases naturales; finalmente, la tercera familia comprende a los gases licuados del petróleo (GLP), es decir, propano, butano y sus mezclas.

El gas natural se presenta como el más apropiado combustible para hornos industriales, por poseer las siguientes ventajas, con respecto a otros combustibles fósiles:

- ▲ Es un combustible relativamente barato.
- ▲ Emite cantidades mucho menores de monóxido de carbono, hidrocarburos reactivos, óxidos de nitrógeno y bióxido de carbono (emite menos CO₂ por unidad de energía producida), que otros combustibles fósiles.
- ▲ Por tratarse de un gas, su mezcla con aire y posterior combustión es más fácil que con otros combustibles fósiles.
- ▲ La ausencia de partículas y compuestos corrosivos de azufre, facilitan la recuperación del calor residual y, por tanto, las eficacias de su utilización.
- ▲ Seguridad en la operación, debido a que en caso de fugas, al ser más ligero que el aire, se disipa rápidamente en la atmósfera. Únicamente, se requiere buena ventilación.
- ▲ Además, las reservas de gas natural son abundantes, y su transporte y distribución mediante tuberías enterradas hacen que su impacto sobre el paisaje sea mínimo.

Por su rendimiento y baja emisión de contaminantes, el gas natural es especialmente apropiado para la generación de electricidad y cogeneración, uso de calderas y hornos industriales, automoción, climatización y otros usos en los sectores comercial y doméstico.

⌘ Desempeño de los Hornos Industriales

Los hornos industriales se miden en función de su eficiencia térmica. Conociendo la cantidad de calor que se suministra al sistema, se entra a calcular cuánto de ese calor es empleado adecuadamente, es decir, cuánto de ese calor es utilizado para fundir el zamak y mantenerlo en su estado líquido a la temperatura requerida en el proceso de fundición. Una vez se conozca esa cantidad de calor, se determina un indicador llamado eficiencia térmica.

La eficiencia térmica de un horno (η) se define como la relación entre el flujo de energía útil (Q_u) y el flujo de la energía aportada por el combustible (Q_c):

$$\eta = \frac{Q_u * 100\%}{Q_c}$$

Este cálculo de la eficiencia se denomina método directo. También se puede hallar la eficiencia utilizando el cálculo de las pérdidas totales (P) o método indirecto así:

$$\eta = \left(1 - \frac{P}{Q_c}\right) * 100\%$$

Puesto que la energía aportada por el combustible será aprovechada en la transformación de la materia prima (Flujo de Energía útil, Q_u) y para suplir las pérdidas en chimenea, por paredes, por inquemados, etc. (pérdidas totales P), o sea:

$$Q_c = Q_u + P$$

⌘ Mecanismos de Transferencia de Calor en un Horno de Crisol.

La transferencia de calor por radiación, convección y conducción se producen simultáneamente en el horno. Aunque a veces con un mecanismo de transferencia más dominante que el otro. En los hornos con temperaturas del orden de 1500°C o más altas, la transmisión de calor es primordialmente por radiación, a estas temperaturas elevadas, la circulación produce muy poca transmisión de calor por convección, pero transporta la llama radiante a otros lugares dentro del horno donde los gases calientes continúan transmitiendo calor principalmente por radiación.

La intensidad de la transmisión del calor por radiación desciende rápidamente con temperaturas de hornos más bajas, es así que a temperaturas de 593°C o más bajas, la transmisión del calor convección reviste la mayor importancia. Las velocidades de los gases circulantes son tan elevadas que se consiguen coeficientes iguales e incluso mayores que $28,75\text{ kcal/m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$.

En los hornos con temperaturas más bajas, los coeficientes de transmisión elevados solamente se consiguen con velocidades muy altas de los gases del horno, porque la transmisión del calor por radiación a 537°C es menor que $1/10$ de la que se produce a 1204°C .

En conclusión, “en la zona de temperaturas del rojo-blanco casi todo el calor se transmite por radiación, cuanto más bajas son las temperaturas menor es la radiación y mayor la convección. A temperaturas del infrarrojo casi todo el calor se transmite por convección”.

En la figura 2., se muestra en forma de diagrama el flujo de calor en un horno de crisol, donde los productos de combustión entran en la cámara de calentamiento tangencialmente cerca de la boca del crisol y salen de ella por el piso del horno; de esta forma las venas frías abandonan el horno y cedan el puesto a las venas calientes.

Los elementos superficiales de las paredes y del crisol, como (2) y (3), se calientan por convección por los gases calientes que fluyen a lo largo de las paredes y del crisol. Una molécula de estos gases, tal como la que se indica por (1), radia en todas direcciones, por ejemplo a (4), a (5) y (6). Estos elementos superficiales radian a su vez en todas las direcciones posibles.

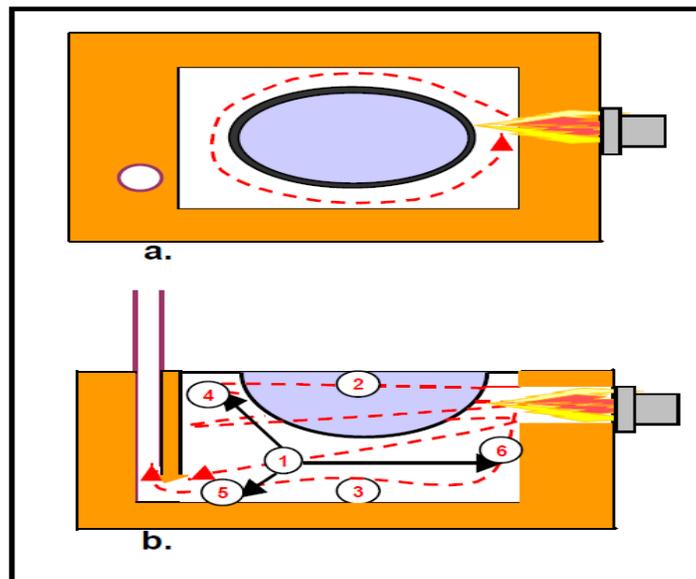


Figura 2.39. Diagrama de transmisión de calor en el interior del horno de crisol. a. Vista superior, b. vista frontal.

La transmisión de calor desde las paredes de la cámara de combustión hacia las paredes externas del horno es realizada por conducción. La cantidad de calor Q transmitida por conducción se determina está por la Ley de Fourier:

$$Q = (kA / L) (T_{INT.} - T_{EXT.})^*$$

Donde:

k se refiere a la conductividad térmica de la pared, A se refiere al área de la pared normal al flujo de calor y L indica el espesor de la pared. Tint y Text son las temperaturas superficiales de la pared por la cual está entrando y saliendo calor respectivamente.

El conjunto (kA/L) se denomina conductancia y su recíproco R es la resistencia al flujo de calor, $R = L/kA$ (h)(°C)/KJ.

En estado estable se cumple que el calor Q transmitido por conducción a través de la estructura del horno es igual al calor Q transmitido al exterior por mecanismos combinados de radiación y convección, el cual se calcula empleando la ecuación general de transferencia:

$$Q_s = U A (T_s - T_a)^*$$

$$1/U = 1/(h_c + h_r)$$

En donde:

Os: Energía perdida por paredes, en W.

A: Área total del equipo expuesta a transferencia de calor, en m².

Ts: Temperatura de pared, en °C.

Ta: Temperatura ambiente, en °C.

U: Coeficiente total de transferencia de calor.

Hc: Coeficiente de transferencia convectiva [W/m²K]

Hr: Coeficiente de transferencia radiactiva [W/m²K]

El coeficiente radiactivo se determina mediante la siguiente ecuación:

$$h_r = E \sigma (T_s^3 + T_s^2 T_a + T_s T_a^2 + T_a^3)$$

Dónde: E es la emisividad de la superficie, σ es la constante de Steffan-Boltzman [W/m²K⁴]

En el caso del coeficiente convectivo, no es tan sencillo debido a que este depende de la geometría de los sólidos y la velocidad del fluido en contacto con el sólido. Para algunas situaciones típicas, los coeficientes convectivos se pueden calcular mediante el siguiente modelo:

$$hc = k \cdot (T_s - T_a)^{0.25} \blacktriangle$$

Donde:

K es una constante que depende de la geometría del sólido y su orientación y toma los siguientes valores:

Pared horizontal orientada hacia arriba **k = 2.50**

Pared horizontal orientada hacia abajo **k = 1.32**

Pared vertical **k = 1.78**

Tubo de *de* mm de diámetro exterior **k = 7.4 * de^{-0.25}**

<p>CALOR UTIL Calentamiento de la carga y en su caso enfriamiento $Q_m = m \cdot C_p \cdot \Delta t$ Transformación de fase: Secado, Fusión, Evaporación, Recristalización. $Q_m = m \cdot q$</p>
<p>CALOR PERDIDAS POR LA ESCORIA $Q_c = W_e \cdot C_e \cdot t_e$</p>
<p>CALOR DE REACCIONES ENDOTERMICAS $Q_{en} = Q_{r} \cdot P$</p>
<p>CALOR PERDIDO POR LOS HUMOS $Q_g = W_c [G_{th} + (e-1) G_a] C_{p_g} t_g$</p>
<p>CALOR POR INQUEMADOS GASEOSOS $Q_{ig} = W_c [V_{th} + (e-1) V_a] \cdot [CO] \cdot 2.900$</p>
<p>PERDIDAS DE CALOR ACUMULADO EN EL REVESTIMIENTO $Q_{re} = (M_r \cdot C_r \cdot t_r) / T_c$</p>
<p>PERDIDAS DE CALOR INCONTROLADAS Algunos autores toman el 10% de la suma de $(Q_{ig} + Q_{es} + Q_p + Q_r + Q_{ct} + Q_{ag} + Q_{re})$</p>
<p>Rendimiento del combustible $E_{co} = 1 - (Q_g + Q_{ig} + Q_{is} - Q_a - Q_c) / Q$</p>
<p>RENDIMIENTO INTERNO DEL HORNO $E_i = Q_m / (Q_m + Q_e + Q_{en} + Q_p + Q_r + Q_{ct} + Q_{ag} + Q_{re} + Q_{in})$</p>
<p>RENDIMIENTO TOTAL DEL PROCESO $E_t = E_{co} \cdot E_i$</p>
<p>CAUDAL DE COMBUSTIBLE $W_c = (Calor\ absorbido - Q_{ex}) / (PCI_h \cdot E_t)$</p>

Tabla. 2.3. Síntesis del cálculo para el balance energético en un horno.

HIDROCARBUROS

Hidrocarburo	Fórmula	Peso Molecular	Densidad kg/lt	T. de fusión ° C
Metano	CH ₄	16	0.42	-182
Etano	C ₂ H ₆	30	0.55	-183
Propano	C ₃ H ₈	44	0.58	-190
Butano	C ₄ H ₁₀	58	0.61	-138
Pentano	C ₅ H ₁₂	72	0,63	-130
Benceno	C ₆ H ₆	78	0.65	5.75
Hexano	C ₆ H ₁₄	86	0,66	-95
Heptano	C ₇ H ₁₆	100	0,68	-91
Gasolina	C ₈ H ₈	104	0.69	30 - 180
Octano	C ₈ H ₁₈	114	0,70	-57
Nonano	C ₉ H ₂₀	128	0,72	-52
Decano	C ₁₀ H ₂₂	142	0,73	-30
Undecano	C ₁₁ H ₂₄	156	0,74	-25
Dodecano	C ₁₂ H ₂₆	170	0,9	-10
Pentadecano	C ₁₅ H ₃₂	212	0,77	10
Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	283	0,79	37
Triacontano	C ₃₀ H ₆₂	423	0,78	66
Polietileno	C ₂₀₀₀ H ₄₀₀₂	28000	0,93	100

Tabla. 2.4. Hidrocarburos útiles para combustibles en hornos de fundición.