



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**



# **DISEÑO TERMODINÁMICO DE UN HORNO PARA LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO**

---

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTAN**

**ANA SILVIA GARCÍA ISLAS**

**PLACIDO JAHIR RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ**

**CIUDAD DE MÉXICO, 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE: DR. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO**

**VOCAL: M. EN I. CUAUHTÉMOC LAGOS CHÁVEZ**

**SECRETARIO: M. EN I. ALEJANDRO JUVENAL GUZMÁN GÓMEZ**

**SUPLENTE: IQ. ALDO FERNANDO VARELA MARTÍNEZ**

**SUPLENTE: DR. RODOLFO ALBERTO HERRERA TOLEDO**

## **LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA, CUIDAD DE MÉXICO,  
MÉXICO.**

## **ASESOR DEL TEMA**

**M. en I. Cuauhtémoc Lagos Chávez**

## **SUSTENTANTES**

**Ana Silvia García Islas**

**Placido Jahir Rodríguez Hernández**

## **AGRADECIMIENTOS**

## **DEDICATORIAS**

# ÍNDICE

<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>7</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO</b>	<b>8</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
<b>1.2 PROPIEDADES DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES</b>	<b>10</b>
<b>1.3 LA INDUSTRIA DE LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO</b>	<b>13</b>
<b>1.4 PROCESO DE FUNDICIÓN.</b>	<b>14</b>
1.4.1 Fundición en arena.	14
1.4.2 Fundición a la espuma perdida.	16
1.4.3 Fundición a presión.	18
1.4.3.1 Fundición a baja presión.	23
1.4.4 Fundición con molde permanente por gravedad.	24
1.4.5 Fundición con molde permanente al vacío.	25
1.4.6 Fundición por compresión (Squeeze casting or Squeeze forming).	25
<b>1.5 FUNDENTES</b>	<b>26</b>
<b>1.6 FILTRACIÓN.</b>	<b>27</b>
1.6.1 Filtros cerámicos	28
1.6.2 Filtros de SiC	28
1.6.3 Filtros de zirconio.	29
1.6.4 Filtros de alúmina.	29
<b>1.7 NECESIDADES ENERGÉTICAS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN</b>	<b>30</b>
<b>1.8 PROCESO DE REFINACION DE ALUMINA PARA LA OBTENCIÓN DE ALUMINIO</b>	<b>33</b>
<b>1.9 EMISIONES A LA ATMÓSFERA</b>	<b>37</b>

<b>CAPÍTULO 2. GENERALIDADES SOBRE HORNOS FUNDIDORES.</b>	<b>39</b>
<b>2.1 ¿QUÉ ES UN HORNO?</b>	<b>39</b>
2.1.1 Partes de un horno	41
<b>2.2 CLASIFICACIÓN</b>	<b>42</b>
2.2.1 De acuerdo a su forma de calentamiento	42
2.2.2 De acuerdo a la fuente de energía requerida	42
Hornos de llama	42
Hornos Eléctricos	43
2.2.3 De acuerdo a la aplicación del horno	44
<b>2.3 TIPOS DE HORNOS</b>	<b>45</b>
2.3.1. Hornos rotatorios	45
2.3.2. Hornos de cubilote o alto horno	46
2.3.3. Hornos de reverbero	48
2.3.4. Hornos de túnel	55
2.3.5 Hornos de crisol	58
2.3.6 Hornos eléctricos	58
<b>2.4 CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS HORNOS EN LA INDUSTRIA</b>	<b>62</b>
2.4.1 Industria siderúrgica.	62
2.4.2 Industria del aluminio.	62
2.4.3 Industria del cobre y sus aleaciones	62
2.4.4 Industria automotriz	63
2.4.5 Fundiciones, tanto de metales férricos, como de metales no férricos.	63
2.4.6 Industrias de productos manufacturados.	63
2.4.7 Industria química (incluida la petroquímica y la farmacéutica)	64
2.4.8. Industria auxiliar.	64
2.4.9 Industria cerámica y del vidrio.	64
<b>2.5 MATERIALES REFRACTARIOS</b>	<b>64</b>
2.5.1 Generalidades de los materiales refractarios	64
2.5.2 Definición y constitución de los materiales refractarios	65
2.5.3 Clasificación de los materiales refractarios	66
2.5.4 Tipos de materiales refractarios	69

<b>CAPITULO 3. CRITERIOS DE DISEÑO</b>	<b>71</b>
<b>3.1 SISTEMA DE AISLAMIENTO TÉRMICO</b>	<b>71</b>
3.1.1 Criterios de selección para un material aislante	72
3.1.2 Clasificación de los materiales aislantes	73
<b>3.2 REQUERIMIENTOS DEL HORNO DE FUNDICION</b>	<b>74</b>
<b>3.3 CRITERIOS PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO.</b>	<b>74</b>
<b>CAPITULO 4. DISEÑO DEL HORNO DE REVERBERO</b>	<b>76</b>
<b>4.1 CUBA DEL HORNO</b>	<b>76</b>
<b>4.2 CÁMARA DE FUSIÓN Y DE CONTENCIÓN.</b>	<b>79</b>
<b>4.3 CÁLCULO DE LOS ESPESORES DE LAS PAREDES</b>	<b>81</b>
4.3.1 Cálculo de los espesores de las paredes laterales y la bóveda.	81
4.3.2 Cálculo de los espesores de la cuba del horno	87
4.3.2 Cantidad de calor requerido	92
<b>4.4 ARREGLO REFRACTARIO</b>	<b>97</b>
<b>4.5 TÍPICO DE INSTALACIÓN</b>	<b>99</b>
<b>CAPITULO 5. ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA</b>	<b>100</b>
<b>5.1 QUEMADORES AUTORECUPERATIVOS</b>	<b>100</b>
5.1.1 Impacto por el uso de quemadores autorecuperativos.	101
<b>5.2 QUEMADORES AUTOREGENERATIVOS</b>	<b>102</b>
<b>5.3 COMBUSTION OXIGENO-GAS NATURAL (OXY-FUEL)</b>	<b>103</b>
<b>5.4 RECUPERADOR DE CALOR</b>	<b>105</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>107</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>108</b>

# JUSTIFICACIÓN

---

El diseño térmico de un horno para fundición de aluminio implica el manejo y la aplicación de conceptos de química, fisicoquímica, matemáticas y operaciones unitarias como transferencia de calor y flujo de fluidos principalmente, además de la realización de balances de materia y energía. Todo ello con el fin de establecer las características que debe tener el equipo en cuanto a materiales, dimensiones, controles y accesorios, para que opere en forma óptima desde los puntos de vista de eficiencia del horno, ahorro de energía y emisiones a la atmósfera.

Dado que la licenciatura en Ingeniería Química forma profesionistas encargados del análisis, el diseño, la optimización y control de procesos, así como la administración de proyectos para la transformación física y/o química de la materia, a fin de obtener productos y servicios útiles al hombre, económicamente factibles, ya que al año se reciclan más de 650 millones de toneladas de aluminio en el mundo, no queda duda que el diseño de un horno para fundición de aluminio toma en cuenta todos los aspectos antes mencionados. Esta es una tarea que un Ingeniero Químico puede realizar con éxito.

## OBJETIVOS

---

### **Objetivo general.**

- Conocer los fundamentos del proceso de fundición de aluminio para aplicarlos al diseño térmico de un horno fundidor.

### **Objetivos particulares.**

- Realizar el diseño térmico de un horno para la fundición de aluminio efectuando una investigación sobre los tipos y aplicación de hornos industriales de acuerdo a procesos específicos.
- Conocer las formas de optimización de energía para hornos fundidores.
- Diseñar térmicamente un horno para la fundición de aluminio que sea eficiente energéticamente hablando.

# CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO

## 1.1 INTRODUCCIÓN

El aluminio es el segundo elemento metálico con mayor abundancia en la Tierra, se convirtió en un competidor económico en la ingeniería al final del siglo XIX. La aparición de tres progresos industriales importantes que exigieron materiales de características constantes con las calidades únicas del aluminio y de sus aleaciones, fueron beneficiados enormemente por el crecimiento en la producción y el uso del nuevo metal.

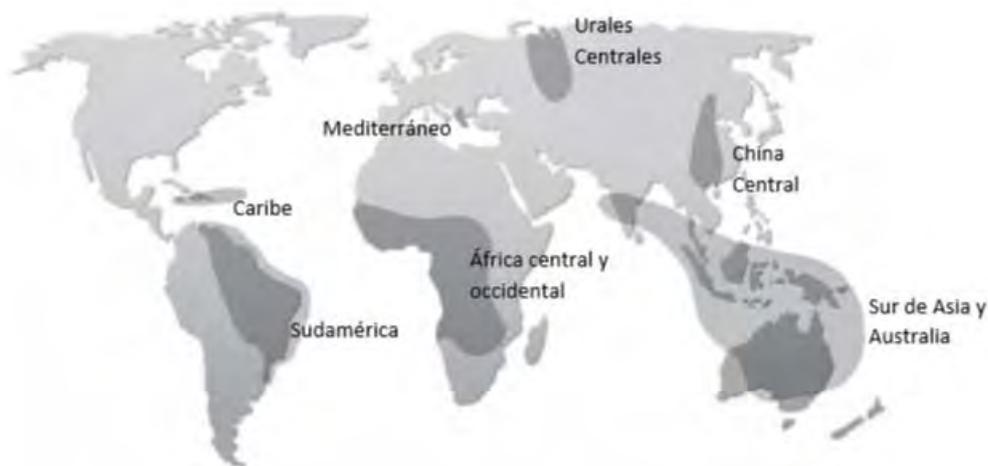
En la producción de aluminio la principal materia prima es la bauxita, que llega a contener al menos 40% de óxido de aluminio. En el mundo existen numerosos depósitos de bauxita principalmente en las zonas tropicales y subtropicales del mundo.

TABLA 1.1 COMPARACIÓN DE DIFERENTES BAUXITAS			
Tipo De Bauxita	Gibsita	Bohemita	Diéspero
Composición	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Contenido Maximo De Alúmina (%)	65.4	85	85
Sistema Cristalino	Minoclinico	Otorrómbico	Otorrómbico
DENSIDAD ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.42	3.01	3.44

El dióxido de silicio es la principal impureza perjudicial en las bauxitas. Está presente en la forma de sílice libre o como un compuesto con otros elementos. Usualmente se requieren de 4 a 6 toneladas de bauxita para producir una tonelada de aluminio, lo que provoca una gran deforestación durante su extracción. En México a pesar de que se refina alúmina no existen yacimientos de bauxita por lo que se tiene que importar.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

Hay solamente siete áreas ricas en bauxita: África Central y Occidental (principalmente Guinea), Sudamérica (Brasil, Venezuela y Suriname), el Caribe (Jamaica), Oceanía y el Sur de Asia (Australia e India), China, el Mediterráneo (Grecia y Turquía), y los Urales (Rusia).



*Figura 1.1 Mapa De Localización De Las Diferentes Áreas Ricas En Bauxita De Alta Calidad.*

*Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM*

La alunita es también una importante materia prima para la producción de aluminio. Pertenece al grupo del sulfato de aluminio. La composición química de este mineral puede variar considerablemente.

La composición másica teórica de la alunita es un 37.0% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 11.4% de  $\text{K}_2\text{O}$ , 38.6% de  $\text{SO}_3$ , 13.0% de  $\text{H}_2\text{O}$ . Además de los compuestos anteriores,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  pueden estar presentes.

La distena (cianita) es un mineral de alta calidad para la reducción electrotérmica de aluminio. Los minerales de este grupo presentan modificaciones polimórficas de la sustancia con la fórmula química de  $\text{AlOAl}[\text{SiO}_4]$ . Su composición química másica teórica es de 63.2% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y 36.8% de  $\text{SiO}_2$ .

En la actualidad, virtualmente todo el aluminio en el mundo es producido a partir de la bauxita, mediante la combinación de los procesos de Bayer y de Hall-Heroult.

## **Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio**

Actualmente gran parte de las aleaciones de aluminio se realiza por medio del proceso de fundición, el cual consiste en llevar al material por arriba de su temperatura de fusión y agregarle los elementos aleantes, ya sea en forma de metales puros o por medio de aleaciones maestras, este proceso se lleva a cabo comúnmente en hornos de crisol, de resistencia, usando como elementos de calentamiento aceites combustibles, gas natural, gas LP, electricidad, o en grandes hornos de reverbero o inducción. Comúnmente en los hornos pequeños se usan de manera batch o por paquetes introduciendo la carga metálica, retirando la escoria y colando de manera manual. En el caso de los hornos grandes estos se mantienen a una temperatura constante para favorecer una fusión rápida, la carga y el retiro de escoria se hace de manera mecánica con maquinaria adecuada, el colado de esta se hace mediante pequeñas ollas y se puede hacer de manera robótica o manual en pequeñas piezas o en lingotes para forjar, extruir, laminar, etc.

### **1.2 PROPIEDADES DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES**

Es notable la gama de propiedades físicas y mecánicas que pueden ser desarrolladas, desde el aluminio de gran pureza hasta las aleaciones más complejas. Se han desarrollado y son reconocidas más de trescientas composiciones de aleaciones de aluminio ya que se han desarrollado internacionalmente y en relación a la demanda de los consumidores.

La resistencia específica del aluminio y sus aleaciones son muy altas, por esta razón ha existido un interés en éste material para emplearlo en aplicaciones muy diversas. Otras propiedades que hacen atractivo el uso del aluminio es que tiene excelentes propiedades para la maquinabilidad, es por esto que existe una diversidad de piezas para decoración de interiores que se fabrican en aluminio.

Además de que exhibe típicamente conductividad eléctrica y térmica excelente, sin embargo, existen aleaciones específicas que se han desarrollado con altos niveles de resistencia eléctrica. Estas aleaciones son útiles, por ejemplo, en motores eléctricos del alto torque.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

Por su alta conductividad eléctrica, se prefiere el aluminio en ciertas aplicaciones, ya que es casi dos veces mayor que la del cobre basándose en un peso equivalente. Los requisitos de alta conductividad y de resistencia mecánica se pueden cumplir por medio del cable de aluminio reforzado con centro de acero para transmisión a larga distancia de alta tensión eléctrica.

El aluminio es un material que no tiene comportamiento magnético y presenta una resistencia natural a la corrosión y a la oxidación excelentes en la mayoría de los ambientes, incluyendo húmedos y salinos, productos petroquímicos, y muchos agentes químicos.

El aluminio tiene una densidad de solamente  $2,700 \text{ kg/m}^3$ , poco menos de la mitad de la del acero ( $7,830 \text{ kg/m}^3$ ), menos de un tercio del cobre ( $8,930 \text{ kg/m}^3$ ), o del latón ( $8,530 \text{ kg/m}^3$ ) y una temperatura de fusión de  $630.3 \text{ }^\circ\text{C}$

Las superficies de aluminio pueden ser altamente reflejantes. La energía radiante, la luz visible, y las ondas electromagnéticas se reflejan eficientemente, mientras que las superficies anodizadas y las superficies anodizadas oscuras pueden ser reflexivas o absorbentes. La reflexión del aluminio pulido, sobre una gama amplia de longitudes de onda, lleva a su selección para una variedad de aplicaciones decorativas y funcionales.

TABLA 1.2 COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN EL ALUMINIO		
ELEMENTO	BENEFICIA (AUMENTA)	EN EXCESO (DISMINUYE)
<b>Silicio</b>	Resistencia a la corrosión Resistencia al desgaste La dureza La fluidez La resistencia a la tensión	La ductibilidad La maquinabilidad La conductividad eléctrica y térmica La contracción o rechupe
<b>Cobre</b>	La resistencia mecánica La dureza La maquinabilidad	La fluidez
<b>Magnesio</b>	La resistencia mecánica La dureza La maquinabilidad La ductibilidad	El efecto de la contracción Formación de escoria e inclusión de óxidos
<b>Manganeso</b>	La duración de los moldes Resistencia mecánica a altas temperaturas	La fluidez
<b>Hierro</b>	El efecto de contracción, el hierro es considerado como impureza en aleaciones de aluminio, cuando sobre pasa el 0.30 %, por que en ausencia de magnesio, forma agujas muy largas y quebradizas, debilitando la estructura.	La resistencia mecánica La ductibilidad
<b>Titanio</b>	Como refinador de grano	Sedimentandose
<b>Estroncio</b>	Modifica el silicio eutéctico	Produciendo segregaciones

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

El hierro es la impureza más común en el aluminio. Presenta alta solubilidad en estado líquido y baja en estado sólido. Se presenta comúnmente como intermetálico secundario. Reduce el tamaño de grano y en aleaciones Al-Ni-Cu aumenta la resistencia a altas temperaturas.

El silicio es la segunda mayor impureza, después del hierro en aluminio comercial y reduce la posibilidad de fractura por fatiga, da junto con magnesio el intermetálico  $Mg_2Si$ , el cual, hace a la aleación tratable térmicamente, sin embargo, solo es en concentraciones del 0.5% al 4%.

### 1.3 LA INDUSTRIA DE LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO

Hoy en día la industria de la fundición de aluminio se ha vuelto de mucha importancia económica debido al aumento en el consumo de productos derivados de la misma. Aunado a las propiedades que proporciona el aluminio lo colocan como un metal no ferroso apto para ser utilizado en una amplia gama de industrias y productos, que van desde aplicaciones en industria automotriz, aeronáutica, construcción, pinturas, etc.

Algunas de estas industrias demandan altos estándares de calidad tanto en el consumo (materia prima) como en su producción de aluminio (piezas terminadas), por lo que se han desarrollado investigaciones encaminadas a la mejora de los procesos, para que estos repercutan en la disminución de defectos y rechazos de piezas de aluminio, lo que directamente disminuiría costos de producción y reprocesamiento.

Las operaciones industriales deben prestar atención a numerosos factores que podrían tener impacto en los objetivos que desean alcanzar en sus procesos de fundición. Algunos de estos factores pueden ser:

- 1) Necesidades de espacio.
- 2) Tipo y variedad de aleaciones que se procesarán.
- 3) Fluctuaciones en la demanda de metal durante la operación.
- 4) Calidad del metal.
- 5) Cantidad de desperdicios.
- 6) Emisiones a la atmósfera.
- 7) Requerimientos de mantenimiento.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

- 8) Inversión de capital o cantidad de metal requerido.
- 9) Requerimientos de la(s) aleaciones.
- 10) Costos de operación, en especial de producción.
- 11) Confiabilidad de los equipos.
- 12) Durabilidad de los hornos

El diseño del horno debe reunir algunos requerimientos para proveer un proceso de fundición eficiente. Estos requerimientos incluyen la habilidad de producir metal de alta calidad mediante un control adecuado de la temperatura del baño y minimizar las pérdidas de energía para cumplir con requerimientos ambientales.

### 1.4 PROCESO DE FUNDICIÓN.

El otro proceso que se emplea para fabricar productos de aluminio es el realizado en las fundiciones. Este es el más antiguo y más simple (en teoría, pero no en la práctica) para la fabricación de productos. Los métodos más comunes incluyen colada a presión, molde permanente y el molde en arena. Las piezas coladas son a menudo modificadas por mecanizado.

El proceso de fundición se puede dividir en dos grupos principales:

- 1) Fundición en arena
- 2) Fundición a presión
- 3) Otras técnicas como la "espuma perdida" o los procesos de "modelos de cera" también se utilizan, pero su importancia económica es considerablemente menor que las dos técnicas anteriormente mencionadas.

#### 1.4.1 Fundición en arena.

La fundición en arena es el proceso más utilizado, la producción por medio de este método representa la mayor parte del tonelaje total de fundición. Casi todas las aleaciones pueden fundirse en arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con altas temperaturas de fusión, como son el acero, el níquel y el titanio. Su versatilidad permite fundir partes muy pequeñas o muy grandes y en cantidades de producción que van de una pieza a millones de éstas.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

La fundición en arena consiste en vaciar el metal fundido a un molde de arena, dejarlo solidificar y romper después el molde para remover la fundición. Posteriormente la fundición pasa por un proceso de limpieza e inspección, pero en ocasiones requiere un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.



*Figura 1.2 Colada en un molde de arena*

*Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM*

La fundición en arena no solamente incluye operaciones de fundición, sino también la fabricación de modelos y manufactura de moldes.

Los moldes de arena verde se hacen de una mezcla de arena, arcilla y agua, el término "verde" se refiere al hecho de que el molde contiene humedad al momento del vaciado. Los moldes de arena verde tienen suficiente resistencia en la mayoría de sus aplicaciones, así como buena refractabilidad, permeabilidad y reutilización, también son los menos costosos. Por consiguiente, son los más ampliamente usados, aunque también tienen sus desventajas. La humedad en la arena puede causar defectos en algunas fundiciones, dependiendo del metal y de la forma geométrica de la pieza.

Un molde de arena seca se fabrica con aglomerantes orgánicos a base de resinas como lo es el formaldehído en lugar de arcilla. El molde se cuece en una estufa grande a temperaturas que fluctúan entre 204°C y 316°C. El cocido en estufa refuerza el molde y endurece la superficie de la cavidad. El molde de arena seca proporciona un mejor control dimensional en la fundición que los moldes de arena verde. Sin embargo, el molde de arena seca es más costoso y la velocidad de producción es reducida

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

debido al tiempo de secado. Sus aplicaciones se limitan generalmente a fundiciones de tamaño medio y grande y en velocidades de producción bajas.



*Figura 1.3 Colada en un molde de arena*  
Fuente: <http://www.fundicion-de-aluminio.es>

### 1.4.2 Fundición a la espuma perdida.

El procedimiento de fundición a la espuma perdida se inicia produciendo un modelo de espuma (FOAM) cuyo material de partida puede consistir en poliestireno o productos similares como el polimetilmetacrilato.

El modelo es una réplica exacta de la pieza a conseguir y se puede alcanzar de una sola vez o en varios trozos que se pegarán posteriormente. Estos modelos se fabrican en prensas similares a las de inyección de plástico donde se introduce el material de partida en forma de pequeñas bolitas en utillajes de aluminio mecanizado de gran precisión.

Mediante una aportación de vapor, agua, vacío y aire se consigue fundir, enfriar y estabilizar los modelos que una vez secos se extraen de la máquina con un aspecto superficial característico, de forma granular, resultado de la fusión de las perlitas de poliestireno. Al tratarse de modelos evaporables, son destruidos durante la colada y, por tanto, cada pieza que deseemos fundir requerirá su correspondiente réplica en poliestireno. Para la formación de aquellos modelos que están constituidos por dos o más partes, previamente se ha de efectuar una operación de pegado a la salida de la prensa.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

Habitualmente se utilizan métodos adhesivos en caliente y en frío o termosoldadura. Una vez formados los modelos de poliestireno el paso siguiente es formar los racimos y pintarlos. La pintura debe ser lo suficientemente refractaria como para impedir filtraciones del metal en la arena y lo suficientemente permeable como para evacuar los gases. Una vez seca la pintura se introduce el modelo en un contenedor metálico donde previamente se ha dispuesto un lecho de arena sin ningún ligante. Posado el modelo en el lecho se comienza a llenar de arena el contenedor que vibra sobre una mesa con uno o dos ejes de vibración. La vibración ayudada por la fluidez de un material sin aglomerante permite el desplazamiento de la arena por todas las cavidades del modelo alcanzando todas las zonas interiores y compactándose alrededor del modelo. De esta forma se va atacando el exterior, es decir el molde y el interior incluyendo las contra-salidas (machos) los cuales en otros procesos hubieran necesitado ser colocados previamente.

Tras la colada y el enfriamiento de la pieza el desmoldeo es sencillo; mediante una parrilla vibratoria se separa la pieza y la arena suelta con restos de pintura que lleva también incorporada algún trozo de metal. Mediante sistemas de separación mecánicos se recupera la arena que puede volver a utilizarse en un 98%.

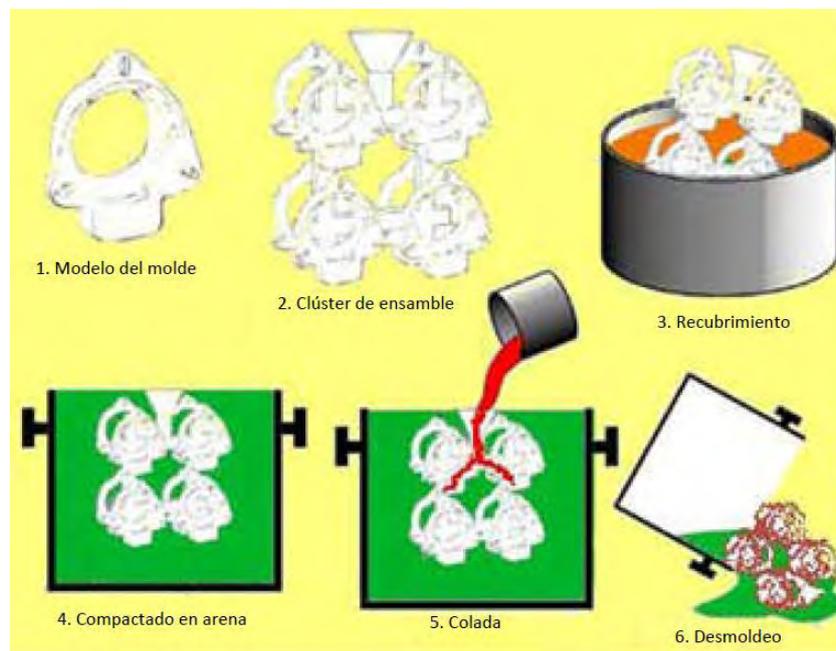


Figura 1.4 Proceso de fundición a la espuma perdida

Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

### 1.4.3 Fundición a presión.

En la fundición a presión la colada se inyecta a gran velocidad en un molde permanente. Un horno de conservación del calor almacena el metal fundido. En un cilindro se dosifica la cantidad a colar y a continuación actúa el émbolo de una bomba de émbolo directamente sobre el metal fundido. La presión generada asciende a entre 70 y 140 bar, por lo que el metal se inyecta a gran velocidad en la cavidad del molde a través de un pequeño orificio llamado bebedero. Este proceso tarda por lo general entre 0,02 y 0,2 segundos. El tiempo de vaciado depende de diferentes factores (volumen de la fundición, grosor del bebedero, espesor de pared de la fundición, longitud de flujo de la colada dentro del molde). Mientras se solidifica el material de fundición, se mantiene constante la alta presión. A continuación, se suprime la presión, se abre el molde, se expulsa la fundición y se prepara el molde para la siguiente colada.

La preparación incluye principalmente la aplicación del agente de desmoldeo, así como el cierre y el precalentamiento del molde. El desmoldeante, que se aplica sobre la superficie interna del molde, mejora la movilidad de los semimoldes, impide la adherencia del metal y facilita así la rápida y cómoda separación de la fundición y el molde. Como desmoldeantes se utilizan emulsiones que contienen, entre otros, siloxanos, glicoles, parafinas y agentes tensoactivos. Antes del vaciado es necesario precalentar el molde (con quemadores de gas, equipos de rayos infrarrojos, radiadores eléctricos de cerámica), a fin de evitar tensiones térmicas y las consiguientes fisuras. Son necesarias instalaciones hidráulicas capaces de generar grandes fuerzas para mantener cerrado el molde durante la colada. El tamaño de las fundiciones depende de las fuerzas de sujeción disponibles. En la fundición a presión no se utilizan machos de arena.

La fundición a presión de cámara caliente y la fundición a presión de cámara fría, dos tecnologías aplicadas en la fundición a presión, se diferencian por la posición de la bomba de émbolo. En la fundición de cámara caliente la bomba se encuentra en posición vertical dentro del baño de metal fundido. El peligro de esta tecnología es que la colada ataque el material de la bomba. La bomba de émbolo de las máquinas de fundición a presión de cámara fría se halla fuera del horno de conservación del calor. Su posición puede ser vertical u horizontal.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

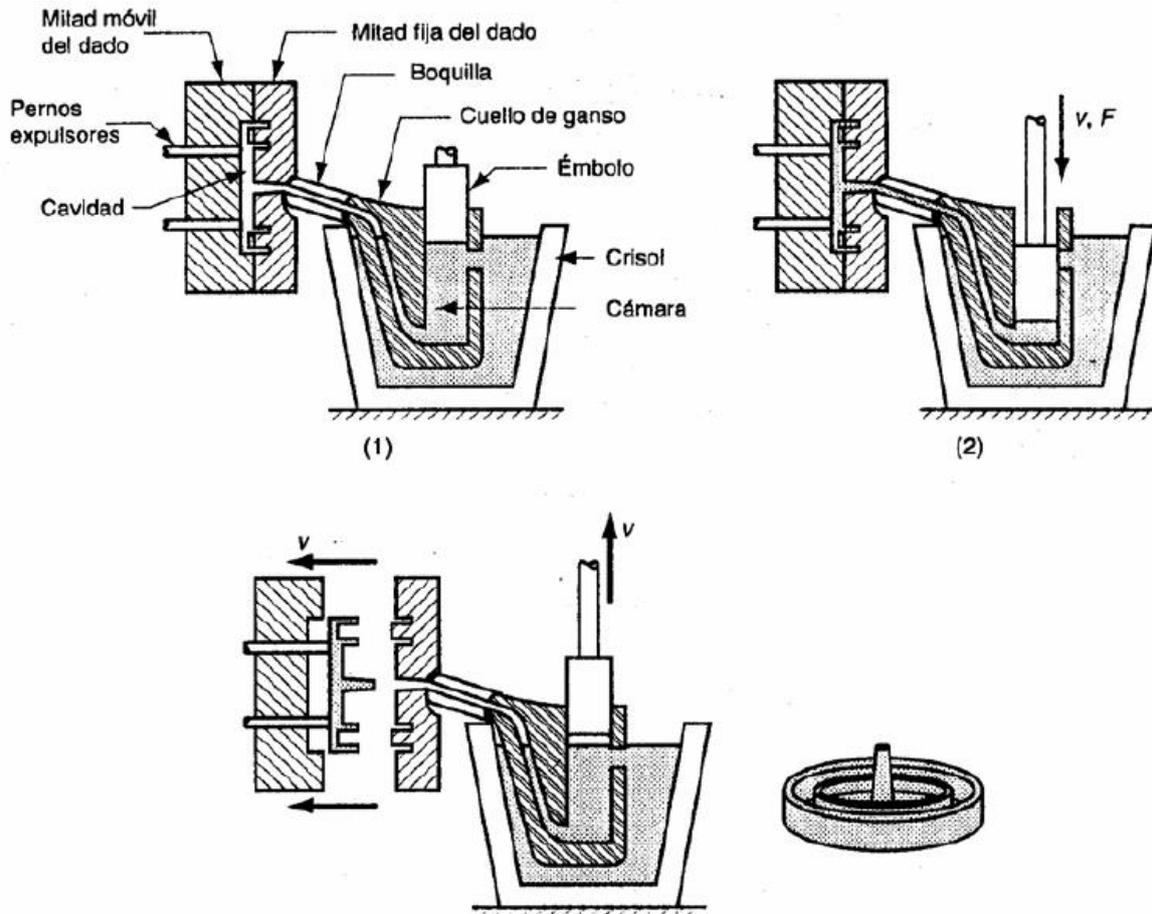


Figura 1.5 Ciclo de fundición de inyección de cámara caliente

Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

La fundición a presión de cámara caliente se emplea principalmente para el vaciado de aleaciones de zinc y de magnesio. La fundición a presión de cámara fría se emplea principalmente para el vaciado de aleaciones de aluminio y, en menor medida, para aleaciones de cobre, de zinc y de magnesio.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

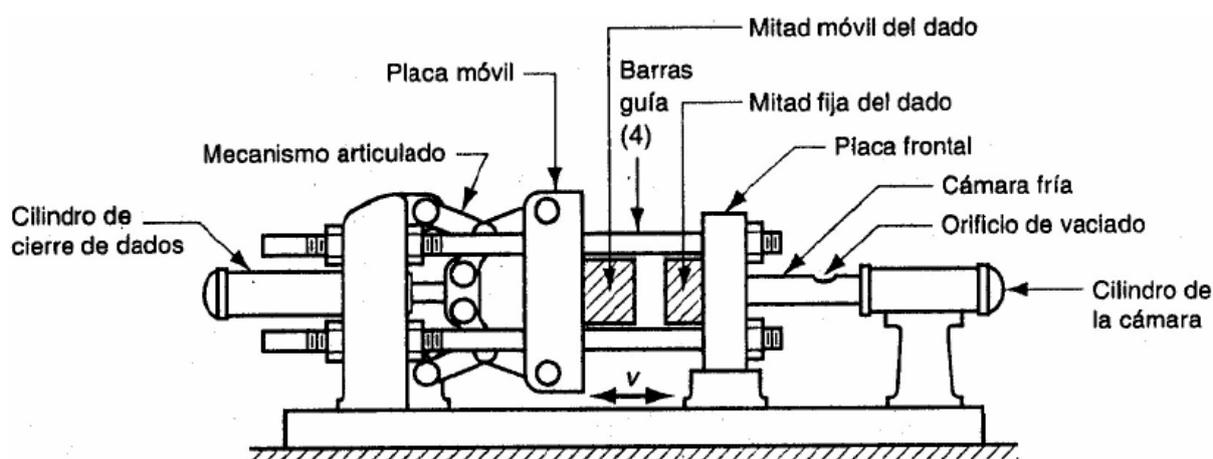


Figura 1.6 Esquema de la máquina de inyección de cámara fría

Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

Las ventajas de la fundición a presión son unas tolerancias generales bastante ajustadas, superficies lisas, contornos precisos y economía de materiales (relación de peso entre la pieza final y los materiales empleados).

En la actualidad se elaboran piezas fundidas bajo presión desde 1 g hasta de unos 40 kg. De peso. En algunos grupos de materiales todavía quedan márgenes de mejora como resultado de evoluciones tecnológicas.

**TABLA 1.3 PESOS MÁXIMOS, DIMENSIONES MÁXIMAS, MÁRGENES DE LOS ESPESORES DE PARED Y ASPEREZA DE LAS FUNDICIONES A PRESIÓN.**

Grupo De Materiales	Peso De La Fundición	Medidas			Espesor De Pared (mm)
		Logitud (mm)	Ancho(mm)	Profundidad (mm)	
Aluminio	35	1200	600	400	A partir de 1.0 -3.0
Zinc	20	1200	600	400	A partir de 0.3 – 2.0
Magnesio	15	1200	600	400	1.0 – 3.0
Cobre	5	400	300	200	1.5 -4.0

Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

En caso de que las piezas satisfagan las correspondientes exigencias (p.ej. precisión dimensional, resistencia, estructura), puede considerarse la fundición a presión en serie como una técnica rentable.

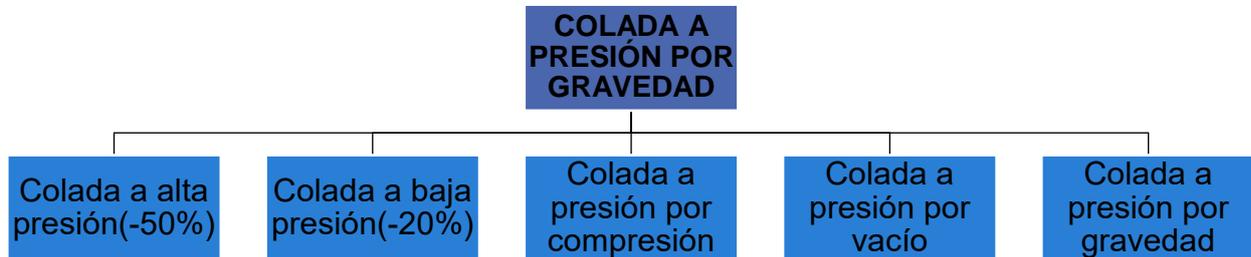


Figura 1.7 Clasificación De Los Procesos De Fundición A Presión

Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

En esta técnica, el molde no se destruye en cada colada, es permanente, hecho de un metal como hierro fundido o acero. Hay varios procesos de fundición a presión, tal como se resume en la Figura. La fundición inyectada a alta presión es la más utilizada, lo que representa aproximadamente el 50% de toda la producción de fundición de aleaciones ligeras. La fundición inyectada de baja presión en la actualidad representa aproximadamente el 20% de la producción y su uso va en aumento. La fundición inyectada por gravedad equivale al porcentaje restante, con la excepción de una contribución pequeña pero creciente de la fundición inyectada al vacío y los procesos de fundición a presión.

La fundición de inyección a alta presión es un proceso de fundición en molde permanente en el cual se inyecta el metal fundido en la cavidad del molde a alta presión. Las presiones típicas son de 7 a 350 (MPa). La presión se mantiene durante la solidificación; posteriormente, el molde se abre para remover la pieza. Los moldes en la operación de fundición se llaman dados. El uso de alta presión para forzar al metal dentro de la cavidad del dado es la característica más notable que distingue a este proceso de otros en la categoría de molde permanente.

Existen dos tipos principales de máquinas de fundición de inyección a alta presión: **1) Cámara caliente** y **2) Cámara fría**; sus diferencias radican en la forma en que se inyecta el metal a la cavidad.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

En las máquinas de cámara caliente, el metal se funde en un recipiente adherido a la máquina y se inyecta en el dado usando un pistón de alta presión. Las presiones típicas de inyección son de 7 a 35 MPa. Son velocidades características de producción de hasta 500 partes por hora. La fundición de inyección a alta presión con cámara caliente impone una dificultad especial en el sistema de inyección, porque gran parte de dicho sistema queda sumergido en el metal fundido. Por esa causa, las aplicaciones del proceso quedan limitadas a metales de bajo punto de fusión que no atacan químicamente al pistón y a otros componentes mecánicos. Estos metales incluyen al zinc, al estaño, al plomo y algunas veces al magnesio.

Los pasos del proceso para obtener piezas por fundición de inyección a alta presión con cámara caliente son:

1. El metal fluye en la cámara con el dado cerrado y el émbolo levantado.
2. El émbolo fuerza al metal de la cámara a fluir hacia el dado, manteniendo la presión durante el enfriamiento y la solidificación.
3. Se levanta el émbolo, se abre el dado y se expulsa la parte solidificada.
4. Se obtiene la pieza terminada.

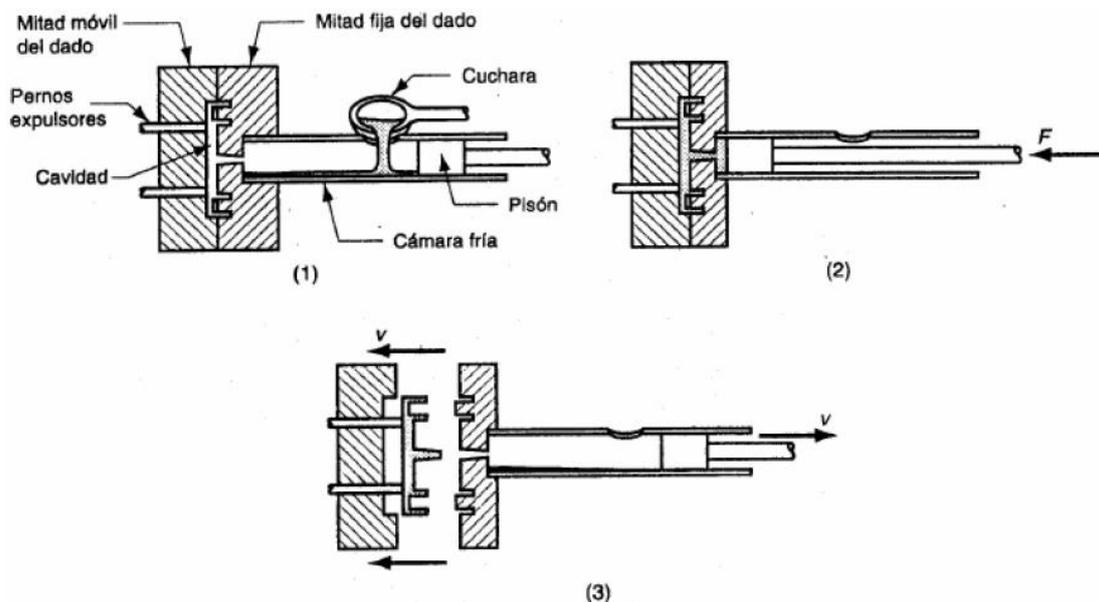


Figura 1.8 Ciclo fundición de inyección a alta presión en cámara fría

Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

En las máquinas de fundición de inyección a alta presión con cámara fría, el metal fundido procedente de un contenedor externo para colar, se vacía en una cámara sin calentar y se usa un pistón para inyectar el metal a alta presión en la cavidad del dado. Las presiones de inyección usadas en estas máquinas van típicamente de 14 a 140 MPa. La velocidad de ciclo no es tan rápida con respecto a las máquinas de cámara caliente, debido a que es necesaria una cuchara de colada para vaciar el metal líquido desde una fuente externa en la cámara. Sin embargo, este proceso de fundición es una operación de alta producción. Las máquinas de cámara fría se usan típicamente para fundiciones de aluminio, latón y aleaciones de magnesio. Las aleaciones de bajo punto de fusión (zinc, estaño, plomo) pueden también fundirse en máquinas de cámara fría, pero las ventajas del proceso de cámara caliente favorecen más el uso de estos metales.

El proceso para obtener piezas por fundición de inyección a alta presión con cámara fría es:

1. Se vacía el metal en la cámara con el dado cerrado y el pistón retraído.
2. El pistón fuerza al metal a fluir en el dado, manteniendo la presión durante el enfriamiento y la solidificación.
3. Se retrae el pistón, se abre el dado y se expulsa la fundición.

### 1.4.3.1 Fundición a baja presión.

En la fundición a baja presión, el metal líquido se introduce dentro de la cavidad a una presión aproximada de 0.1 MPa, aplicada desde abajo, de manera que el metal fluye hacia arriba como se ilustra en la figura 1.7. La ventaja de este método sobre el vaciado tradicional es que se introduce en el molde un metal limpio desde el centro del crisol, en lugar de un metal que ha sido expuesto al aire. Lo anterior reduce la porosidad producida por el gas y los defectos generados por la oxidación, y se mejoran las propiedades mecánicas.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

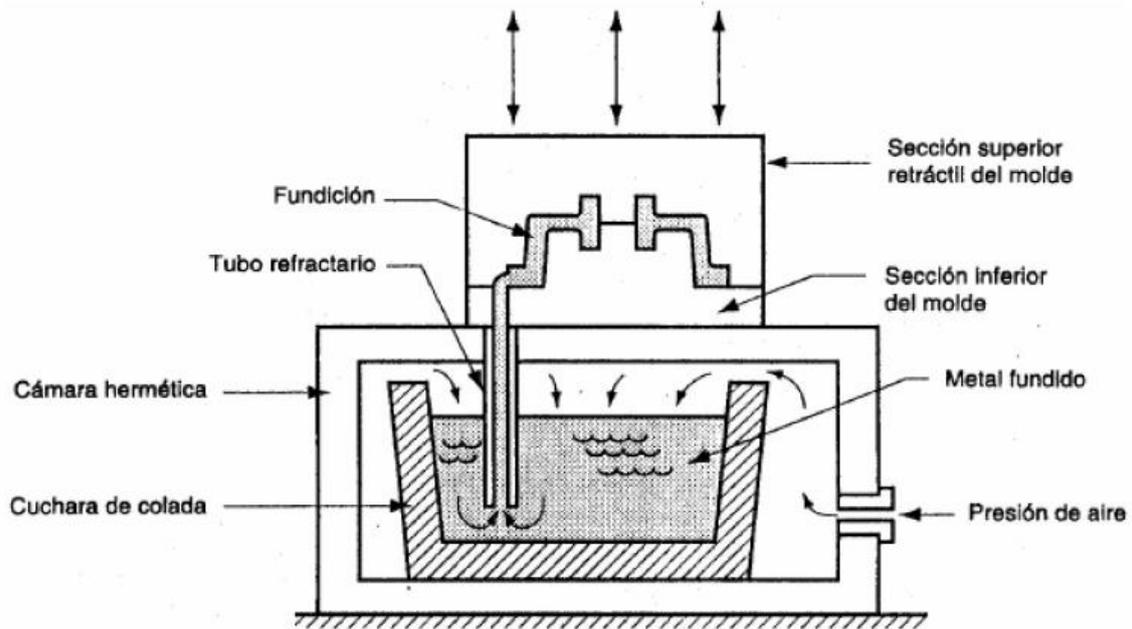


Figura 1.9 Fundición de inyección a baja presión

Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

### 1.4.4 Fundición con molde permanente por gravedad.

Este tipo de fundición es utilizado para piezas en las que la calidad de terminado y dimensional no está sujeto a restricciones de calidad, debido a que la única fuente de energía que obliga al metal a llenar la cavidad del molde es la fuerza de la gravedad, un ejemplo de la utilización de este método es la fabricación de lingotes de metal.



Figura 1.10 Colada de lingotes de aluminio por gravedad

Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

#### 1.4.5 Fundición con molde permanente al vacío.

Es una variante de la fundición a baja presión en la cual se usa vacío para introducir el metal fundido en la cavidad del molde. La configuración general del proceso es similar a la operación de fundición a baja presión. La diferencia es que se usa la presión reducida del vacío en el molde para atraer el metal líquido a la cavidad, en lugar de forzarlo por una presión positiva de aire desde abajo. Los beneficios de la técnica al vacío, en relación con la fundición a baja presión, son que se reduce la porosidad del aire y los efectos relacionados, obteniendo una mayor resistencia en el producto de la fundición.

#### 1.4.6 Fundición por compresión (Squeeze casting or Squeeze forming).

Como se muestra en la Figura 1.4.6, el metal líquido se introduce en un molde abierto. Una vez que todo el metal se introduce los moldes se cierran. Durante las etapas finales de cierre, el líquido se desplaza a las partes posteriores del molde. El metal líquido no requiere gran fluidez, puesto que los desplazamientos son pequeños. Por lo tanto, las aleaciones de conformado, que generalmente tienen poca fluidez, pueden ser utilizadas para la fabricación de piezas por este proceso.

Esta técnica es especialmente adecuada para la fabricación de piezas moldeadas reforzadas con fibras. Las fuerzas de compresión aplicadas en el aluminio líquido sirven para que este fluya a la preforma. En comparación con las aleaciones de aluminio no reforzado, las aleaciones de aluminio compuesto de matriz fabricadas por esta técnica pueden duplicar su resistencia a la fatiga a 300°C. Por lo tanto, los refuerzos se utilizan comúnmente en los bordes de la cabeza del pistón de un motor diésel donde esta propiedad se requiere que sea particularmente alta.

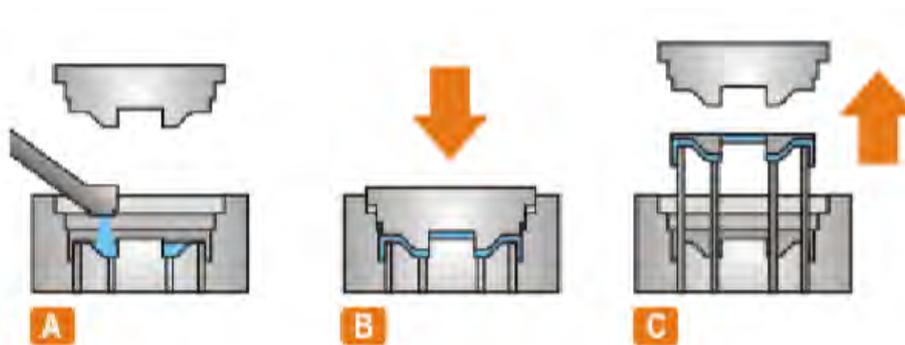


Figura 1.11 Proceso De Colada De Fundición Por Compresión  
Fuente: Ayala Villalobos Carlos David, Sustentante. "Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero". Tesis. 2013. UNAM

## 1.5 FUNDENTES

Los fundentes, son productos químicos agregados para modificar algún aspecto de la fundición de un material, como la fluidez, la afinidad a la oxidación, etc. Los fundentes tienen los 3 aspectos físicos, son: sólidos, líquidos y gaseosos, aunque la mayoría de fundentes se presentan en forma de sales.

Existen diferentes tipos de fundentes que se clasifican de acuerdo al tipo de función que realizan en el material fundido.

- *Fundentes de recubrimiento*. Son aquellos que por medios físicos forman una cubierta en la superficie del metal fundido para inhibir su contacto con agentes oxidantes.
- *Fundentes escorificantes*. Fundentes que aglutinan las escorias para mejorar o facilitar el retiro del metal fundido.
- *Fundentes modificadores y/o refinadores*. Materiales químicos que modifican la estructura final del metal colado.
- *Fundentes desgasificantes*. Realizan la función de capturar y retirar los gases solubles del baño metálico.
- Existen fundentes que tienen dos o más de las funciones anteriores, o realizan funciones diferentes adecuadas para cada material.

Otra clasificación se basa en el carácter químico del fundente con respecto a la carga líquida:

- *Fundentes oxidantes*. Estos fundentes oxidan a la carga metálica, de acuerdo a la técnica de fusión
- *Fundentes neutros*. Este tipo de fundentes no oxidan ni reducen a la carga metálica.
- *Fundentes reductores*. Los fundentes reductores reducen a la carga metálica y esto es lo que se pretende en la mayoría de los casos al fundir una aleación.
- *Fundentes especiales*. Existen fundentes especiales, que suelen ser inyectados al metal para diversos propósitos el ejemplo más ilustrativo de este tipo de aplicaciones son los equipos de inyección de fundente que cuentan hasta con 3 depósitos de fundente con los que se lleva a cabo una limpieza profunda del metal,

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

después una modificación de la aleación y por último una refinación de grano, todo ello inyectando fundente durante el periodo de desgasificado.

Algunas otras especialidades son fundentes son los eliminadores de magnesio, eliminadores de calcio y los fundentes libres de calcio o sodio.

Un punto importante dentro de las sales fundentes para aluminio es que deben cumplir con los requisitos comunes de los fundentes o seguir las siguientes características:

- Punto de fusión por debajo de los 720° C.
- Baja Viscosidad
- Fácilmente desechable
- No reacción con el crisol.
- Menor densidad al metal.
- No higroscópico.
- Baja presión de vapor.
- Bajo costo.
- Tratamiento de Bajo costo

### 1.6 FILTRACIÓN.

La filtración es un procedimiento que ha ganado adeptos a través del tiempo, ya que son muchas las ventajas que ofrece a la hora de obtener las piezas finales. El proceso de filtración consiste en hacer pasar el metal a través de un filtro cerámico o metálico colocado estratégicamente como copa de colada o en el interior del molde concretamente en el sistema de colada de la pieza. Las ventajas que ofrece un filtrado a la hora de colar son las siguientes:

- Disminución de Inclusiones. Las partículas insolubles contenidas en el metal o en la escoria no alcanzan a pasar a través del filtro.
- Control del Flujo. El flujo turbulento de la colada al pasar por el filtro disminuye y genera un menor arrastre, lo cual se convierte en una reducción en el número de inclusiones y un mayor tiempo de vida en el caso de moldes permanentes.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

- Retira Micro-capas de Óxidos. El metal al salir del horno y ponerse en contacto con el aire genera una micro-capas de óxidos que posteriormente se traduce en inclusiones, el filtro detiene el micro-film reduciendo así impurezas en el metal.

### 1.6.1 Filtros cerámicos

Los filtros cerámicos en general están compuestos por materiales como alúmina, fluorspar, magnesita, cuarzo y grafito. Contienen propiedades físicas para mejorar la capacidad del filtrado y ayudar de manera considerable durante el proceso de fundición del metal. Algunas de las propiedades que contienen los filtros son las que se muestran a continuación.

- Ser de Fácil instalación, ya que se requieren poner sistemáticamente y de manera rápida y segura.
- Resistencia al metal líquido.
- Hidrofóbicos, o que no se mojen con facilidad, ya que el agua condensada provoca sopladuras y accidentes, entre otras cosas, por lo cual se requiere un material que no tenga afinidad por la humedad.
- Alta resistencia mecánica a altas temperaturas.
- Dimensionalmente estable.

### 1.6.2 Filtros de SiC

Los filtros de SiC cuentan con conductividad térmica relativamente buena lo que les permite tener menores gradientes térmicos en el filtro mejorando el flujo continuo del metal líquido, es recomendado para fundiciones de hierro, así como para filtro de metales no ferrosos su temperatura de trabajo, es alrededor de 1500 °C.



Figura 1.12 Filtro de SiC

*Fuente: Vargas González Huitzilihuitl, Sustentante. "Tratamiento de escorias de aluminio y recuperación de aluminio por medio de fundición con fundente de NaCl-KCl". Tesis. UNAM.*

### 1.6.3 Filtros de zirconio.

Filtros usados para aceros inoxidable, aleaciones de acero que requieren y aleaciones de precisión, trabaja a temperaturas de 1750 °C.



Figura 1.13 Filtro de Zirconio.

*Fuente: Vargas González Huitzilihuitl, Sustentante. "Tratamiento de escorias de aluminio y recuperación de aluminio por medio de fundición con fundente de NaCl-KCl". Tesis. UNAM*

### 1.6.4 Filtros de alúmina.

Filtros para aluminio y aleaciones de aluminio, con temperaturas de trabajo de 1200 °C.



*Figura 1.14 Filtro de Alúmina*

*Fuente: Vargas González Huitzilihuitl, Sustentante. "Tratamiento de escorias de aluminio y recuperación de aluminio por medio de fundición con fundente de NaCl-KCl". Tesis. UNAM*

### 1.7 NECESIDADES ENERGÉTICAS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN

Los procesos de fundición ya sea de metal, vidrio u otros materiales han sido vitales por varios cientos de años con el objetivo de derretir sólidos que sea posible verter en diferentes moldes de utilidad.

A pesar de que el proceso básico sigue siendo prácticamente el mismo, la utilidad de los productos de la fundición ha recorrido ya un largo camino. Los procesos que crearon diferentes herramientas y bienes en la Era de Bronce contribuyen con componentes utilizados en el 90% de los bienes manufacturados en nuestra sociedad actualmente. Desde el decaimiento de la Era Industrial surgió un enorme desarrollo en los procesos de fundición, incrementó la cantidad de productos, se mejoraron los controles químicos y térmicos y se incrementó la complejidad de los productos terminados lo que derivó en una vasta cantidad de productos como generadores de potencia, sistemas de bombeo, automóviles, trenes, tuberías, equipo militar, instrumentos médicos, etc.

La eficiencia energética de cualquier proceso de fundición generalmente recae en el proceso de vaciado, operación de varios pasos en los que el metal básicamente es calentado, tratado, aleado y transportado a las cavidades de los moldes en los que será vertido. Dicho proceso claramente no es el único responsable del consumo de energía, pero es crítico para el control de calidad, composición y las propiedades fisicoquímicas del producto final.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

Las industrias que se identifican como las mayores consumidoras de energía, de acuerdo al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte son:

- Industria básica del hierro y el acero.
- Fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas.
- PEMEX petroquímica.
- Industria química.
- Fabricación de vidrio y productos de vidrio.
- Fabricación de pulpa, papel y cartón.
- Minería de minerales metálicos y no metálicos, excepto petróleo y gas. o Elaboración de azúcares.
- Elaboración de cerveza.
- Elaboración de refrescos, hielo y otras bebidas no alcohólicas, y purificación y embotellado de agua.
- Construcción.
- Fabricación de automóviles y camiones.
- Fabricación de productos de hule.
- Elaboración de productos de tabaco.

De acuerdo con el reporte anual de fundición de acero del 2004, los procesos más significantes en cuanto a consumo de energía son: fabricación de moldes, reforzamiento de moldes, vaciado, post vaciado, tratamiento térmico, entre otros.

Las fuentes de energía más comunes se muestran en el gráfico 1.1 y claramente se observa una tendencia hacia el uso del gas natural (gráfico 1.2) como combustible; sin embargo, esto depende del tipo proceso de fundición que se lleve a cabo.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

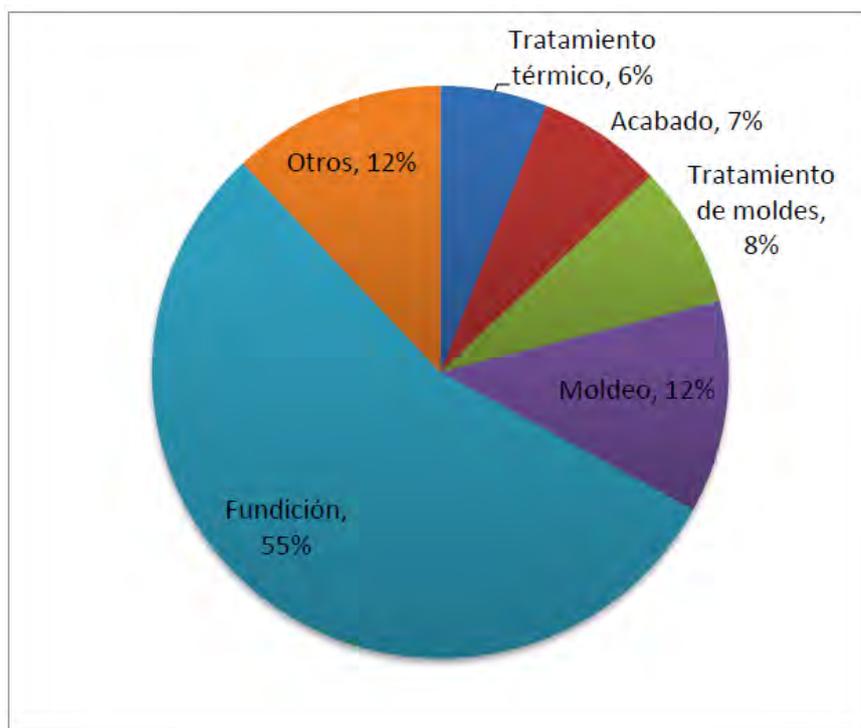


Gráfico 1.1 Distribución de la energía en los procesos de fundición de metal.

Fuente: 2004 Metal Casting Annual Report

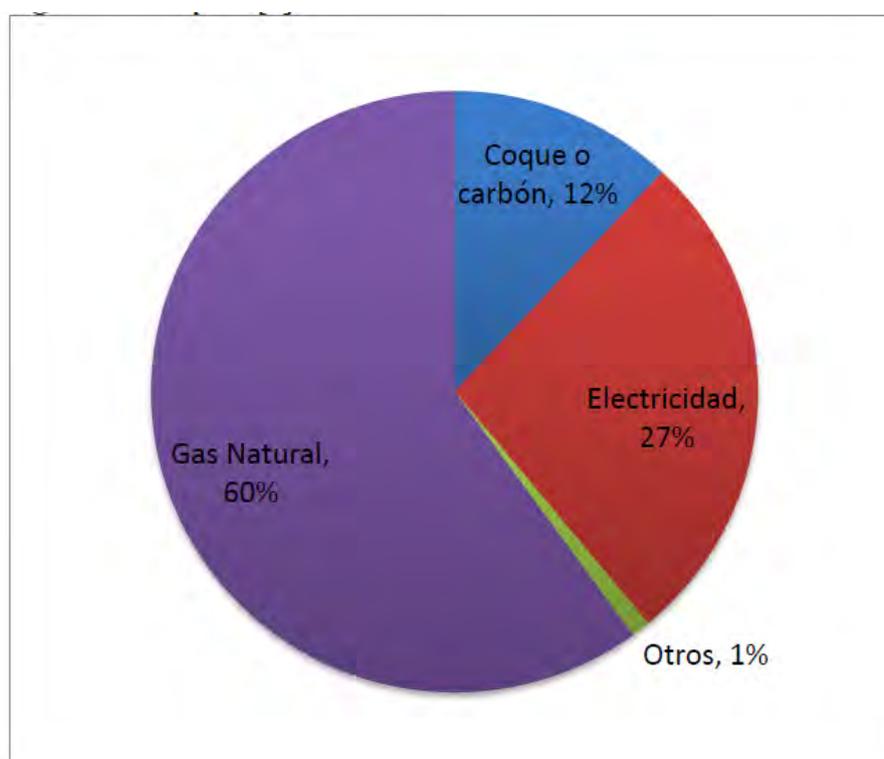


Gráfico 1.2. Fuentes de energía comunes en procesos de fundición.

Fuente: 2004 Metal Casting Annual Report.

## 1.8 PROCESO DE REFINACION DE ALUMINA PARA LA OBTENCIÓN DE ALUMINIO

El proceso Bayer fue inventado y patentado en 1887 por el científico austriaco Karl Josef Bayer. Ésta es la forma más económica de obtener alúmina a partir de bauxita donde se requieren de dos a tres toneladas de bauxita para producir una tonelada de alúmina.

Existen otros procedimientos para la obtención de alúmina a partir de minerales metálicos que también se utilizan en algunas refinerías, particularmente en China y Rusia, aunque éstas constituyen un porcentaje relativamente pequeño de la producción mundial.

La alúmina se utiliza para la producción de aluminio, a través del proceso de fundición electroquímico Hall-Héroult, aproximadamente el 90% de la producción mundial de alúmina se utiliza para la obtención de aluminio.

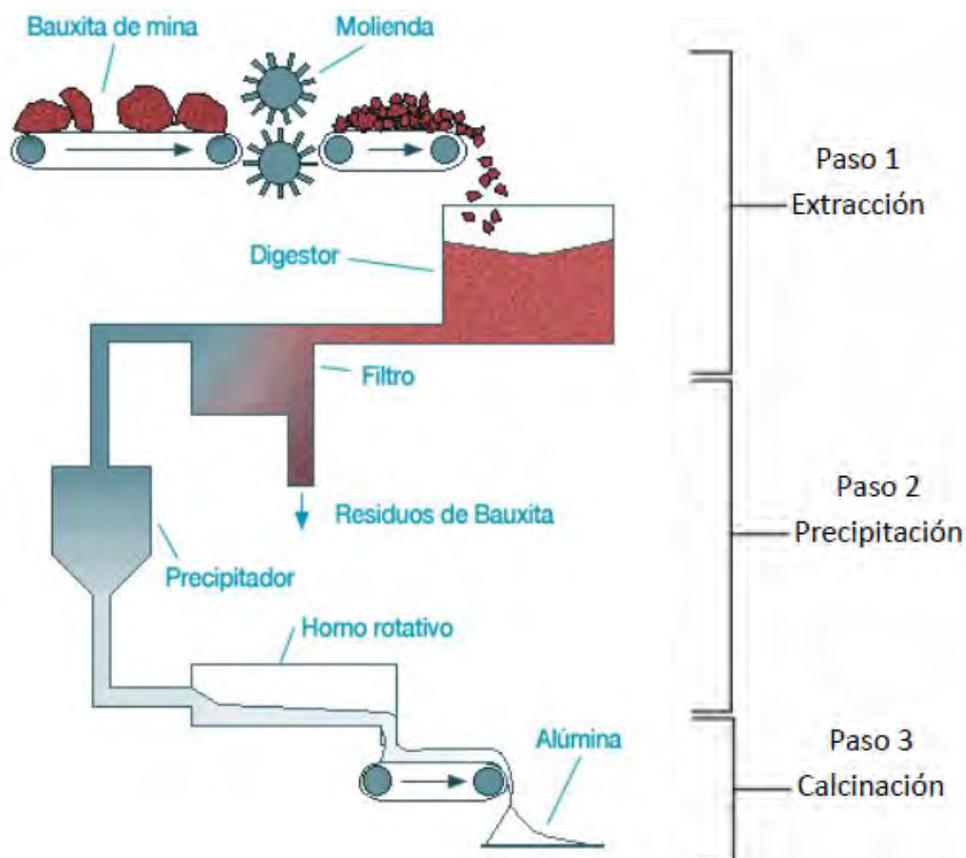


Figura 1.15 Proceso Bayer

Fuente: Vargas González Huitzilhuiatl, Sustentante. "Tratamiento de escorias de aluminio y recuperación de aluminio por medio de fundición con fundente de NaCl-KCl". Tesis. UNAM

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

Las etapas del proceso de producción de alúmina son:

### 1. Molienda

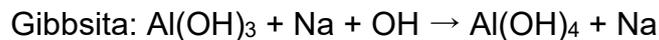
La bauxita se lava y se tritura, se reduce el tamaño de partícula y aumenta el área superficial disponible para la etapa de digestión. Cal y sosa cáustica (licor agotado) se añaden a los molinos para hacer una suspensión bombeable.

### 2. Desilicatación

La bauxita que tiene altos niveles de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) pasa por un proceso para eliminar esta impureza. La sílice puede causar problemas con la formación y la calidad del producto final.

### 3. Digestión

Una solución caliente de sosa cáustica ( $\text{NaOH}$ ) se utiliza para disolver los minerales de aluminio que vengan en la bauxita para formar una solución sobresaturada de aluminato de sodio o "licor fértil".



Las condiciones dentro del digestor (concentración cáustica, temperatura y presión) se establecen de acuerdo a las propiedades del mineral de bauxita. Los minerales con un alto contenido de Gibbsita se pueden procesar a  $140^\circ\text{C}$ , mientras que las bauxitas böhmiticas requieren temperaturas entre  $200$  y  $280^\circ\text{C}$ . La presión no es importante para el proceso como tal, sino que se define por la presión de saturación de vapor del proceso. A  $240^\circ\text{C}$ , la presión es de aproximadamente  $3,5$  MPa.

La suspensión se enfría a continuación en una serie de depósitos de acción rápida a alrededor de  $106^\circ\text{C}$  a presión atmosférica. Este vapor se utiliza para precalentar el licor agotado. En algunas refinerías de digestión a alta temperatura, la bauxita de mayor calidad (trihidrato) se inyecta en el tren flash para aumentar la producción. Este proceso de "edulcorante" también reduce el uso de energía por tonelada de producción.

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

Aunque las temperaturas más altas son a menudo teóricamente ventajosas, hay varias desventajas potenciales, incluyendo la posibilidad de óxidos que no sean de disolución de alúmina en el licor cáustico.

### 4. Clarificación / Asentamiento

La primera etapa de clarificación es para separar los sólidos (residuos de bauxita) del licor cargado (aluminato de sodio permanece en solución) a través de la sedimentación. se añaden aditivos químicos (floculantes) para ayudar al proceso de sedimentación. Los sumideros de residuos de bauxita a la parte inferior de los tanques de sedimentación se transfieren a los tanques de lavado, donde se someten a una serie de etapas de lavado para recuperar la sosa cáustica (que se reutiliza en el proceso de la digestión).

Además, la separación del licor fértil a partir del residuo de bauxita se lleva a cabo utilizando una serie de filtros de seguridad. El propósito de los filtros de seguridad es para asegurar que el producto final no está contaminado con impurezas presentes en el residuo.

Dependiendo de los requisitos de la instalación de almacenamiento de residuos, además de espesamiento, filtración y / o etapas de neutralización se emplean antes de ser bombeadas a la zona de evacuación de residuos de bauxita.

### 5. Precipitación

En esta etapa, la alúmina se recupera por cristalización desde el líquido fértil, que está sobresaturado en aluminato de sodio.

El proceso de cristalización es impulsado por enfriamiento progresivo del licor cargado, lo que resulta en la formación de pequeños cristales de trihidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), conocido comúnmente como "hidrato", que luego crecen y se aglomeran para formar cristales más grandes. La reacción de precipitación es la inversa de la reacción de disolución de Gibbsita en la etapa de digestión:



## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

### 6. Evaporación

El licor gastado se calienta a través de una serie de intercambiadores de calor y posteriormente se enfría en una serie de tanques flash. El condensado formado en los calentadores se reutiliza en el proceso, por ejemplo, como agua de alimentación de calderas o para residuos de detergente en la bauxita. La sosa cáustica restante se lava y se recicla de nuevo en el proceso de digestión.

### 7. Clasificación

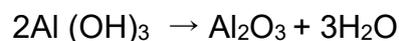
Los cristales Gibbssita formados en la precipitación se clasifican en rangos de tamaño. Esto se realiza normalmente utilizando ciclones o tanques de clasificación por gravedad. Los cristales de tamaño grueso están destinados para la calcinación después de haber sido separados del licor gastado utilizando filtración al vacío, donde los sólidos se lavan con agua caliente.

Los cristales finos, después de ser lavados para eliminar las impurezas orgánicas, se devuelven a la etapa de precipitación en forma de semilla fina para ser aglomerados.

### 8. Calcinación

La torta se alimenta en calcinadores donde se calcina a temperaturas de hasta 1100°C para eliminar la humedad libre y agua, produciendo sólidos de alúmina. Existen diferentes tecnologías de calcinación en uso, incluyendo calcinadores de suspensión de gas, calcinadores de lecho fluidizado y hornos rotatorios.

La siguiente ecuación describe la reacción de calcinación:



La alúmina, un polvo blanco, es el producto de esta etapa y el producto final del proceso Bayer, lista para su envío a las fundiciones de aluminio o la industria química.

## 1.9 EMISIONES A LA ATMÓSFERA

Las emisiones formadas como resultado del proceso de fundición son un aspecto a considerar para la mejora de tales procesos. Dichas emisiones son principalmente generadas por dos medios durante el proceso de fundición:

- Emisiones relacionadas con el suministro de la energía.
- Emisiones relacionadas con la preparación, refinamiento y tratamiento.

Las primeras se refieren a las emisiones generadas durante la quema de combustibles ya sea para la generación de energía eléctrica o durante el proceso de fundición de metal y las segundas se refieren a las emisiones generadas para la obtención de la materia prima que se requiere para llevar a cabo el proceso de fundición.

De acuerdo con análisis realizados a otras plantas, aproximadamente el 60% de la energía utilizada en el proceso de fundición es suministrada por medio del gas natural u otros combustibles equivalentes y aproximadamente un 30% por electricidad.

Uno de los combustibles más limpios que se pueden utilizar con respecto a los combustibles fósiles es el gas natural ya que está compuesto principalmente por metano con una composición de aprox. 90-98%. Los productos de la combustión de este combustible se componen básicamente de CO<sub>2</sub> y vapor de agua. Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxidos de azufre (SO<sub>2</sub>) y otras partículas provenientes de la combustión del gas natural son alrededor de uno a tres órdenes de magnitud menor comparadas con la quema de otros combustibles como carbón o diésel.

**TABLA 1.8. NIVELES DE EMISIONES PROVENIENTES DE LA QUEMA DE COMBUSTIBLES FÓSILES CONOCIDOS.**

<b>Emisiones (kg/billón de kJ combustible)</b>	<b>Gas Natural</b>	<b>Diésel</b>	<b>Carbón</b>
Dióxido de carbono	50,349	70,574	89,509
Monóxido de carbono	17	14	90
Óxidos de nitrógeno	40	193	197
Dióxido de Azufre	0.4	483	1,115
Partículas suspendidas	3	41	1,181
Mercurio	0	0.003	0.0069

## Capítulo 1. Fundamentos del proceso de fundición de aluminio

En la Tabla 1.8, se muestra una comparación entre 3 diferentes tipos de combustible muy comunes para la obtención de energía. Se puede observar que el más limpio es el gas natural tan sólo con la reducción significativa de emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , gases que provocan lluvia ácida y son de efecto invernadero. Por otro lado, los procesos de fundición que utilizan electricidad no producen emisiones in situ; sin embargo, las emisiones producidas para la generación de energía eléctrica y la transmisión de la misma son bastante considerables. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990- 2010 (INEGEI), el sector energía (producción, transformación, manejo y consumo de productos energéticos) es la principal fuente de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en México. Representó 67.3% del total de las emisiones durante 2010. Dentro del contexto internacional, la Agencia Internacional de Energía ha identificado que el sector energético contribuye con aproximadamente 80% de las emisiones de GEI en el mundo. En su mayoría (60%), se derivan de la liberación de  $\text{CO}_2$  durante la combustión, como resultado de la oxidación de carbono en sus combustibles. No obstante, también existen emisiones fugitivas producidas por la liberación de gases como el metano ( $\text{CH}_4$ ). En México, del total de las emisiones de GEI en 2011, 86.8% (432.73 Tg  $\text{CO}_2$  eq.) correspondió a las emisiones asociadas al consumo de combustibles, y el restante 13.2% (65.78 Tg  $\text{CO}_2$  eq.) a emisiones fugitivas.

## CAPÍTULO 2. GENERALIDADES SOBRE HORNOS FUNDIDORES.

---

### 2.1 ¿QUÉ ES UN HORNO?

Los hornos son los equipos o dispositivos utilizados para calentar los materiales y las piezas requeridas, estos son colocados en su interior y trabajan 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).

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 y Hornos de fusión
- Hornos para producir efectos químicos en el producto como reducción sin fusión, fusiones reductoras, tostación, calcinación, volatilización reductora, volatilización, etc.).

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. La tabla 2.1 contiene con cierta aproximación las temperaturas de calentamiento de algunos materiales y procesos.

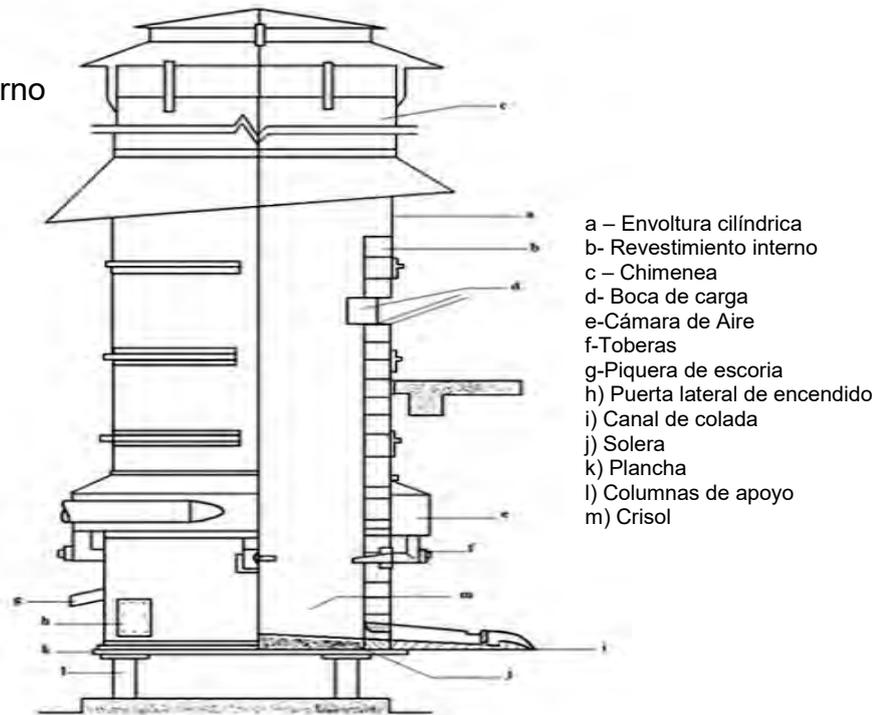
<b>TABLA 2.1 TEMPERATURAS DE CALENTAMIENTO DE ALGUNOS MATERIALES Y PROCESOS</b>	
<b>Proceso u Operación</b>	<b>Temperatura a la que se calienta el material en (°C)</b>
Secado De Alambre De Acero	149
Secado De Lacas	149
Estañado En Baño Caliente	260
Revenido En Aceite	260
Recocido De Aluminio	398
Cracking Del Petróleo Bruto	398
Calentamiento Del Aluminio Para Laminación	454
Nitruración Del Acero	510
Recocido Del Latón	538
Recocido De Vidrio	621
Recocido De Cobre	621
Aporcelanado Para Decoración	760
Temple Isotérmico De Alambre	871
Calentamiento De Cobre Para Laminar	871
Normalizado De Tuberías De Acero	899
Colorización De Superficies Metálicas Con Aluminio En Polvo	926
Cementación	954
Cianuración	982
Vitrificado De Porcelana	999
Normalizado De Acero Inoxidable	926-1093
Laminación De Acero Inoxidable	954-1232
Calcinación Del Carbonato Cálcico	1371
Calcinación De Ladrillo Refractarios	1315-1482
Calcinación De Cemento Portland	1426
Fusión De Vidrio	1426
Fusión De Acero	1676
Fusión De Acero Al Cromo	1787

*Fuente: "Hornos industriales, metalurgia extractiva" Universidad Nacional de Cuyo*

2.1.1 Partes de un horno

- Elemento generador
- Sistema de alimentación de material
- Cámara principal Aislantes térmicos
- Sistemas de medición y control
- Redes de suministro de combustible o cableado de potencia (según el tipo de combustible)
- Ventiladores y sistemas de evacuación de gases (hornos con combustión)
- Redes eléctricas
- Recubrimiento externo

a)



b)

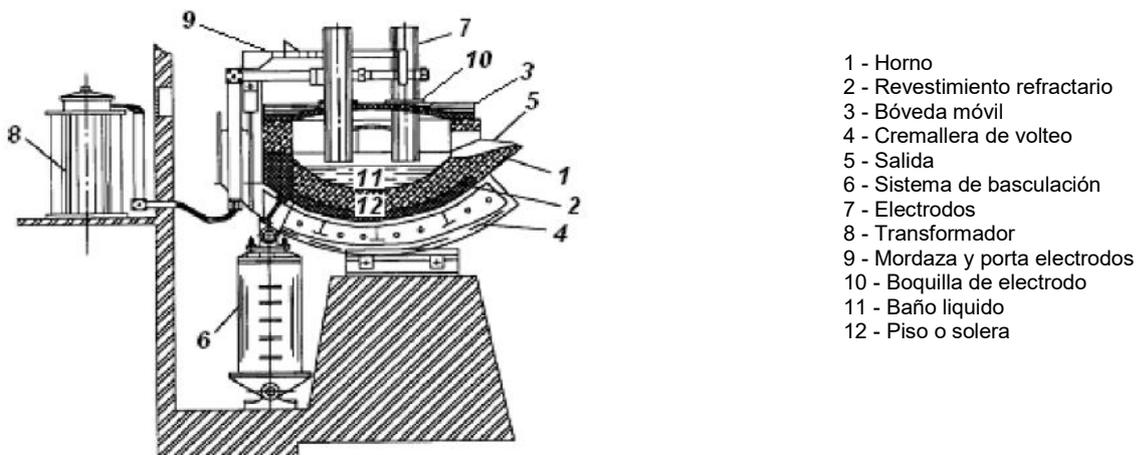


Figura 2.1.

a) Esquema de un horno de cubilote con sus partes.

b) Esquema de un horno de arco eléctrico con sus partes

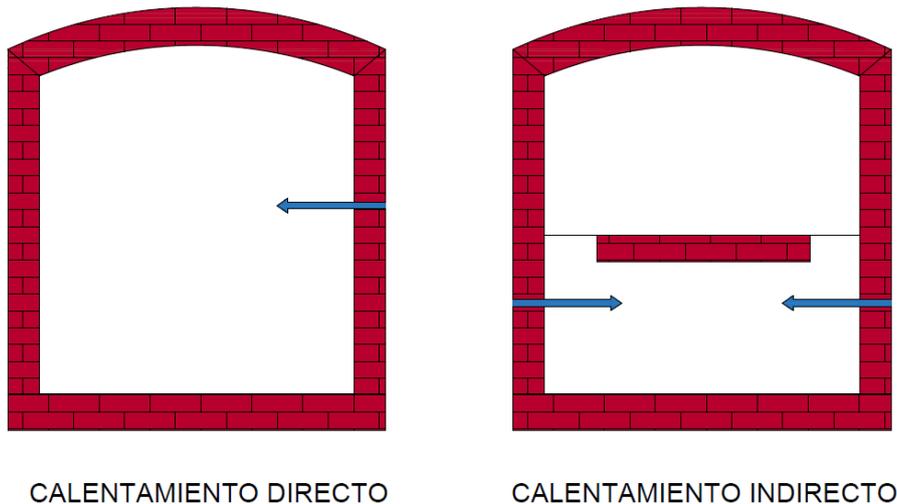
Fuente: "Hornos industriales, metalurgia extractiva" Universidad Nacional de Cuyo

## 2.2 CLASIFICACIÓN

### 2.2.1 De acuerdo a su forma de calentamiento

**Directo:** La llama y los gases entran en contacto con la carga.

**Indirecto:** Los gases entran en contacto con la carga.



*Figura 2.2. Horno de calentamiento directo e indirecto  
Fuente: Pérez Pino Frey Jonathan, Soto Payares Armando Enrique, "Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes". Tesis 2009. Universidad de Pamplona*

### 2.2.2 De acuerdo a la fuente de energía requerida

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

#### Hornos de llama

Produce gases calientes 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.

- Hornos Verticales O De Cuba
- Hornos De Balsa
- Hornos Rotatorios
- Hornos Túnel

TABLA 2.2 PRINCIPALES COMBUSTIBLES UTILIZADOS		
COMBUSTIBLE	TIPO	PODER CALORIFICO (kJ/kg)
Sólido	Leña	19 000
	Carbón mineral	31400 - 33700
	Coque	29300 - 33700
	Coque de petróleo	34100 - 36500
	Carbón vegetal	6500-7000
Líquido	Gasolina	43950 - 46885
	Diésel	45000
	Alcohol etílico	26790 - 29720
	Queroseno	43400 - 46500
	Petróleo	40895 - 47970
	Fuel Oil	40600 - 42695
Gaseoso	Gas licuado	4251 MJ/bl
	Gas de coque	31400 - 35250
	Gas natural	39900 - 44000
	Propano	46350 - 50450

Disponible: [http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/tablas\\_tema\\_3.pdf](http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/tablas_tema_3.pdf)  
Consultado: 15/12/2015 21:30

### Hornos Eléctricos

Tienen ausencia de humos de combustión, presentan mejores condiciones de trabajo alrededor del horno, mayor seguridad del personal y tienen la posibilidad de mantenerse sin vigilancia fuera de las horas de trabajo por la eliminación del peligro de explosiones.

- Hornos de resistencia óhmica directa de las piezas o resistencias eléctricas dispuestas en el horno que se calientan por efecto joule
- Hornos de arco voltaico de corriente alterna o continua.
- Hornos de inducción electromagnética.

### 2.2.3 De acuerdo a la aplicación del horno

Se pueden también plantear las aplicaciones de los hornos industriales en relación con el procedimiento o procesos utilizados. Desde este punto de vista se clasifican de la siguiente forma:

- Sinterizado y calcinación.
- Fusión y mantenimiento de:
  - Metales férricos (fundición, acero, níquel, cromo y aleaciones).
  - Metales no férricos pesados (cobre, aleaciones).
  - Metales no férricos ligeros (aluminio, magnesio y aleaciones).
  - Metales preciosos y aleaciones.
  - Otros metales y aleaciones.
  - Vidrio y productos cerámicos.
  - Materiales de goma y plásticos.
- Extracción por fusión.
- Calentamiento de los materiales para:
  - Laminación y trefilado.
  - Extrusión.
  - Forja.
  - Estampación.
  - Conformado en caliente.
- Tratamientos térmicos de los materiales para:
  - Recocido, normalizado, temple, revenido, homogeneizado, solubilización, maduración o envejecimiento, etc.
  - Cementación, carbonitruración, nitrocarburation, nitruración, cianuración, descarbonización, etc.
- Vulcanizado de gomas y tratamientos de plásticos.
- Recubrimientos de piezas metálicas y no metálicas que incluye:
  - Galvanización.
  - Estañado.
  - Emplomado.
  - Esmaltado.
  - A base de polvos metálicos.
  - De plásticos.
  - Por medio de pinturas y barnices.

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

- Secado o, en general, reducción del contenido de humedad.
- Extracción de polvo que en algunos casos supone la utilización de hornos.
- Procedimientos químicos como la pre reducción y la reducción de minerales, de gran importancia en la industria metalúrgica, la tostación, calcinación, etc.

### 2.3 TIPOS DE HORNOS

#### 2.3.1. Hornos rotatorios

El horno rotativo es un horno continuo, a calentamiento externo y llama libre, cuyo uso principal es en la fabricación del cemento Portland. También se utiliza en la fabricación de cal, aluminio, hierro esponja, etc.

Consiste en un cilindro de acero, recubierto en su interior por ladrillos refractarios, que se encuentran ligeramente inclinado respecto a la horizontal (menos de 10 grados) y que gira lentamente, a velocidades inferiores a 5 r.p.m.

El cilindro cuenta con llantas de acero que se apoyan sobre rodillos. Los rodillos soportan el peso del horno y su carga. En general, se puede señalar que las llantas se encuentran distanciadas entre sí cada 25 o 30 metros.

El calentamiento del horno se efectúa con gases calientes que se producen por combustión, en un quemador, de gas, fuel-oil, u otros combustibles. Habitualmente el quemador se ubica en el extremo más bajo. En la punta opuesta del horno se ubica la chimenea por donde se evacuan los gases del mismo.

En la Figura 2.3 se representan las temperaturas del horno en función de la longitud del mismo. El caso presentado en el gráfico es para la calcinación de piedra caliza, en la producción de cal, para un horno rotativo simple que no cuenta con precalentadores del material entrante.

Del gráfico se infiere que la temperatura del horno es del orden de los 1000°C en la zona más caliente y decrece a 450°C aproximadamente en la zona de salida de los gases por la chimenea.

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

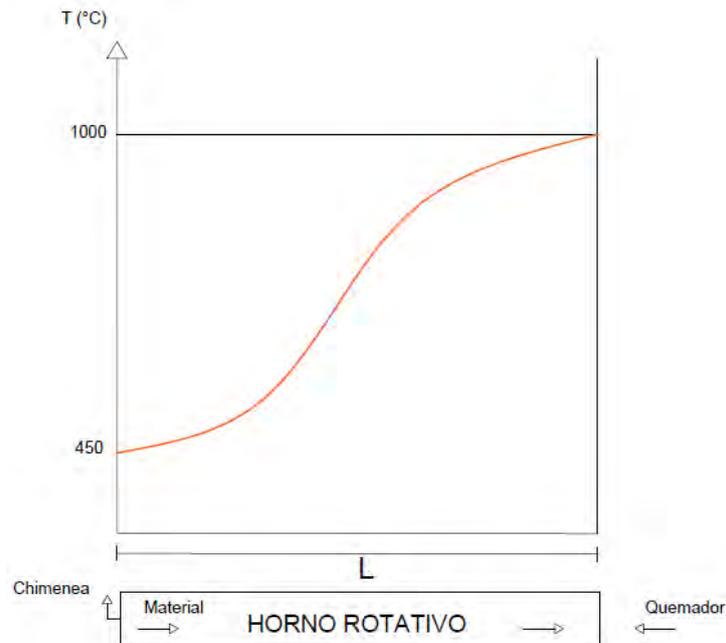


Figura 2.3. Perfil de temperaturas en un horno rotatorio

El material a procesar es alimentado por el extremo superior del horno (lado de la chimenea), mediante dispositivos apropiados tales como roscas transportadoras, rampas, etc. A consecuencia de la inclinación y rotación del horno, el material se desplaza a lo largo del mismo hasta el extremo inferior (lado del quemador), donde sale a través de la boca de descarga. El material circula a contracorriente con respecto al calor.

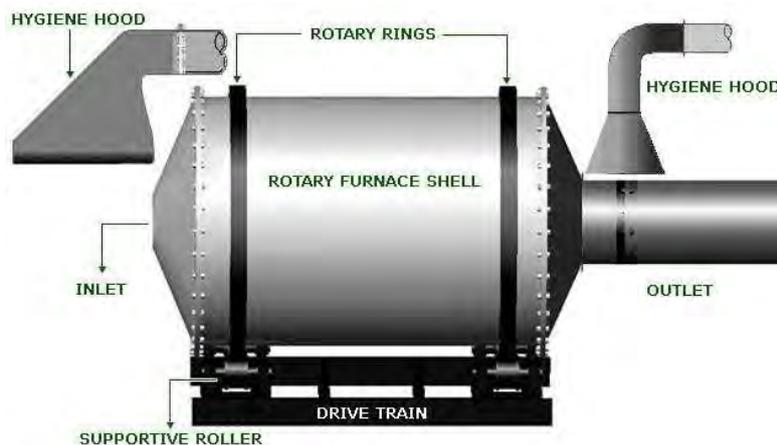


Figura 2.4. Horno Rotatorio

### 2.3.2. Hornos de cubilote o alto horno

Posee una cámara vertical llamada cuba, la cual puede ser cilíndrica o cónica. En su interior puede estar cubierta por un refractario según la temperatura de trabajo. La

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

carga se alimenta por la parte superior llamada tragante. El producto se evacua por la parte inferior.

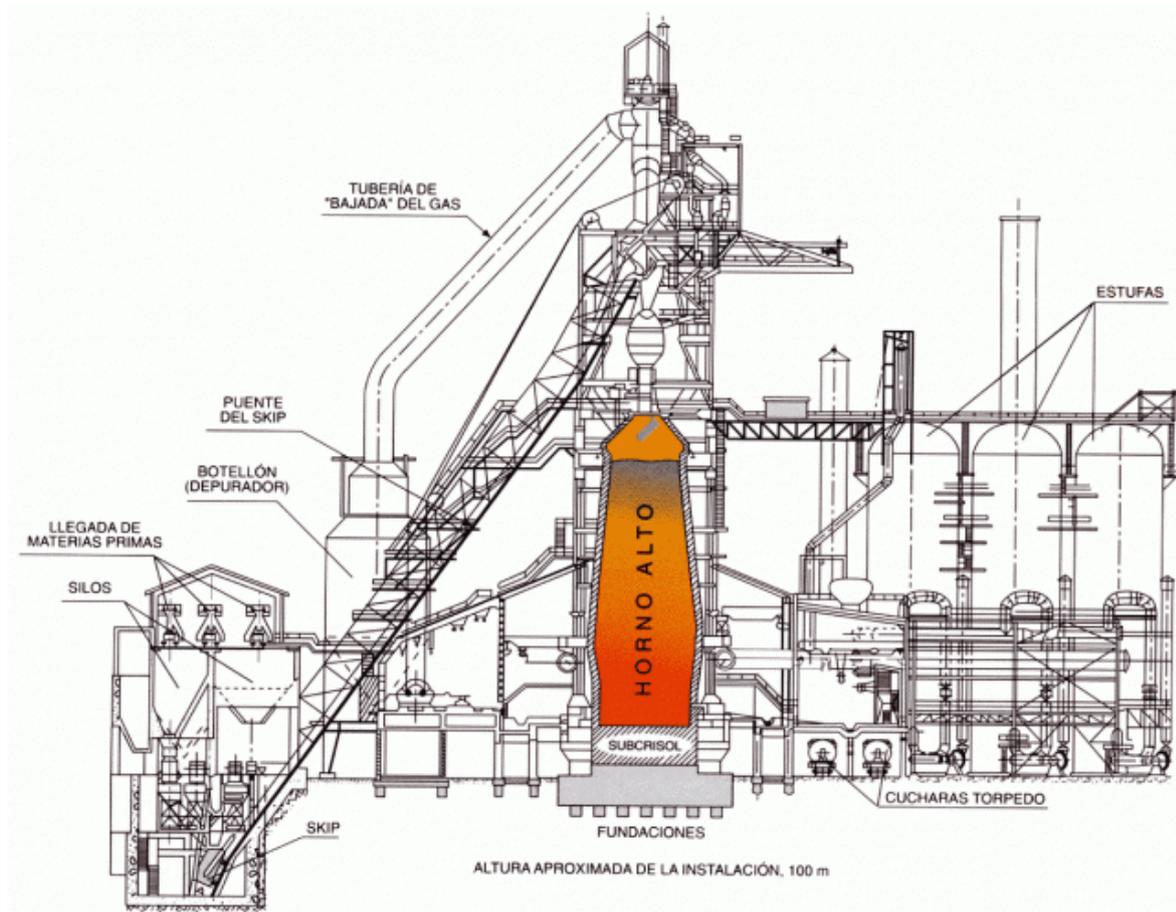


Figura 2.5. Horno de cubilote o alto horno

Fuente: "Hornos industriales, Metalurgia extractiva". Universidad Nacional de Cuyo

El horno se carga con materiales sólidos:

**Carga metálica:** (aportante de hierro), que está constituida por una mezcla de minerales de hierro calibrados, sinter y pellets, en proporciones variables según las condiciones técnico-económicas de la operación en cada planta.

**Coque:** que actúa como combustible, generador del gas reductor (CO) y sostén de carga.

**Fundente:** Cuya función es reaccionar con la ganga para eliminarlas en forma de escoria. Los gases que calientan, la carga entra a la cuba por la parte inferior y se encuentran con la carga en contracorriente.

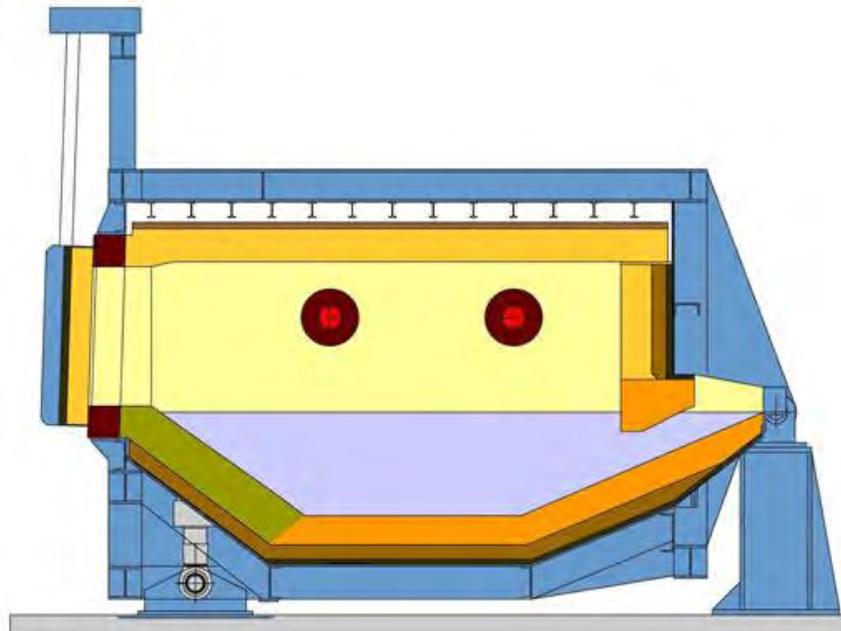
## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

Los productos obtenidos son: **Arrabio o hierro de primera fusión** (material con elevado tenor de carbono). **Escoria**, de menor densidad que el arrabio, que sobrenada a este último.

Dentro de los hornos de cuba se encuentran los hornos para cal, alto horno para obtener arrabio (hierro de primera fundición), hornos de guijas para calentar aire, hidrógeno, metano, vapor de agua, o en algunos casos como recuperador de calor y el Thermoform que se usa para pirolizar (crackear) petróleo y producir oleofinas, gasolinas y aromáticos.

### 2.3.3. Hornos de reverbero

Estos hornos son del tipo de fuego directo, el cual proviene de la reacción combustible/aire, pero no inciden directamente sobre la superficie del metal, ya que esto causaría turbulencia, oxidación excesiva y captación de hidrogeno.



*Figura 2.6. Horno de Reverbero*

*Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)*

Pueden ser de dos tipos de diseño: de solera seca o mojada.

**Horno de solera mojada.** Los productos de combustión están en contacto directo con la superficie del baño fundido, y la transferencia de calor es por una combinación de radiación y convección.

La eficiencia de fusión en un horno de solera mojada se incrementa al precalentar los lingotes y la chatarra pesada. Los materiales de carga pueden ser precalentados, al colocarse cerca de la base de la chimenea antes de que se cargue en el horno. Esta práctica no solo incrementa la eficiencia del horno sin que exista un costo extra de combustible, sino también asegura que el material esté libre de humedad.

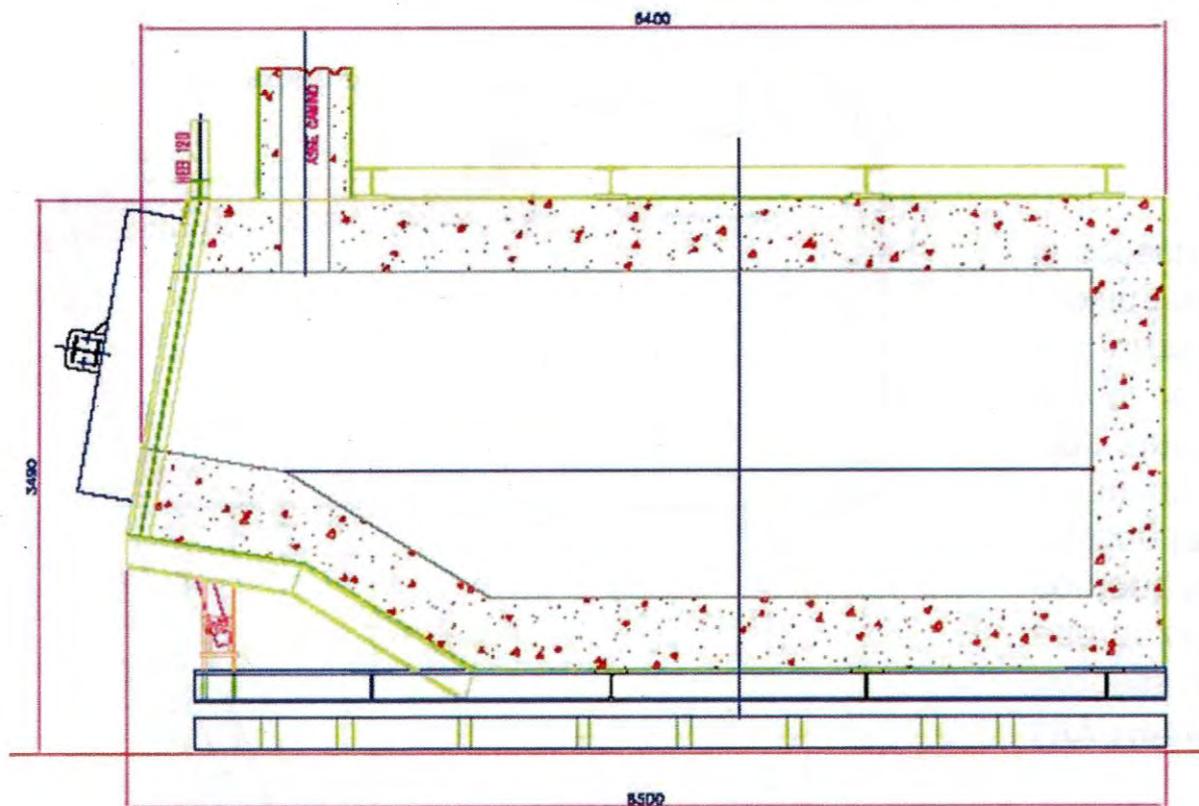


Figura 2.7 Horno de reverbero de solera mojada  
Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)

**Horno de solera seca.** Se utiliza para procesar chatarra de aluminio con alto contenido de hierro y zinc. Para la chatarra con alto contenido de zinc, la chatarra se calienta por encima de la temperatura de fusión de zinc y por debajo de la temperatura de fusión de aluminio. El zinc fundido se saca del horno y a continuación, se funde el aluminio. Para la chatarra con alto contenido de hierro, el horno se calienta por encima

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

de la temperatura de fusión del aluminio. El aluminio fundido se recoge y el hierro sólido se retira.

La carga del aluminio sólido está colocada en una solera inclinada sobre el nivel del metal fundido de manera tal que la carga esté en contacto directo con los gases calientes. El calor es transferido a la carga sólida rápidamente, la cual funde y fluye por la pendiente de la solera.

La solera se inclina con un ángulo de  $10^\circ$  a  $15^\circ$ , en la cual el metal se funde. Los óxidos de hierro y los otros materiales no metálicos permanecen en la solera en forma tal que el aluminio fundido se desplaza hacia el baño.

Los hornos de solera seca pueden fundir más rápidamente que los de solera mojada, pero las pérdidas de metal por oxidación son mayores. Debe conservarse el piso limpio lo cual hace que esto sea una tarea laboriosa. De otra manera, si las impurezas permanecen en la solera el producto tendrá impurezas a base de hierro.

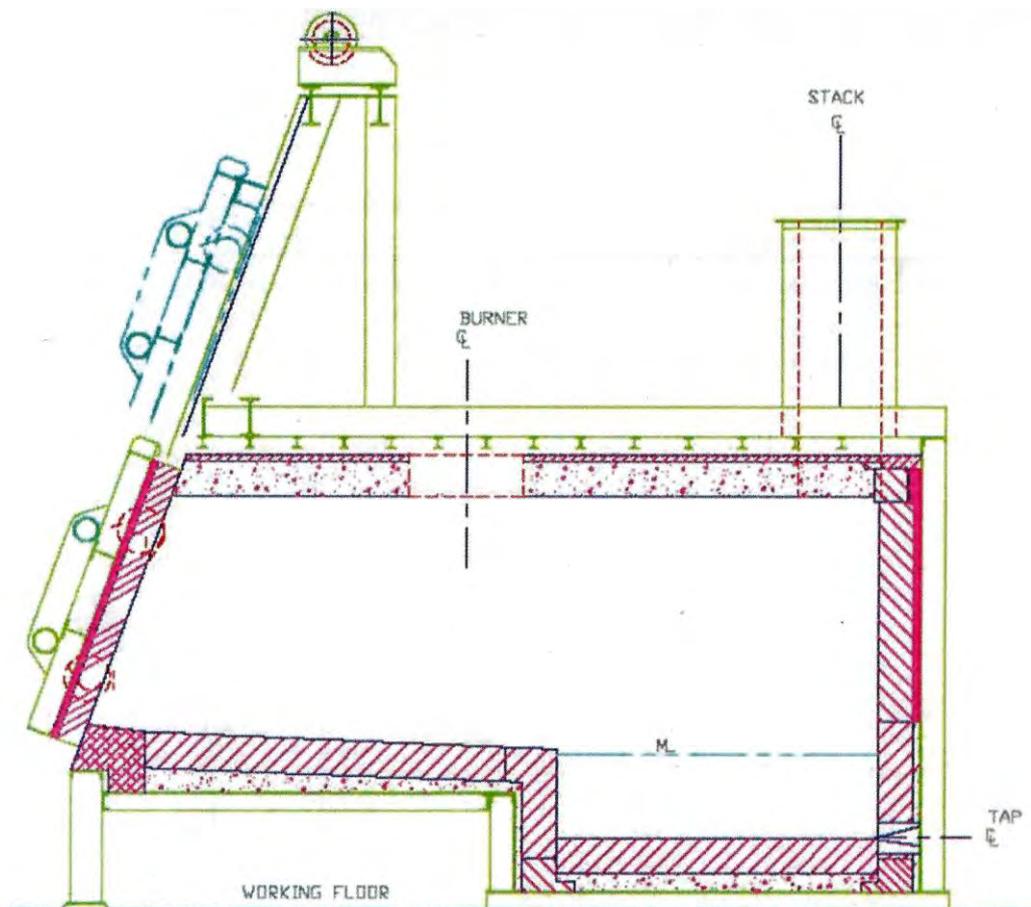


Figura 2.8 Horno de reverbero de solera seca  
Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)

Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

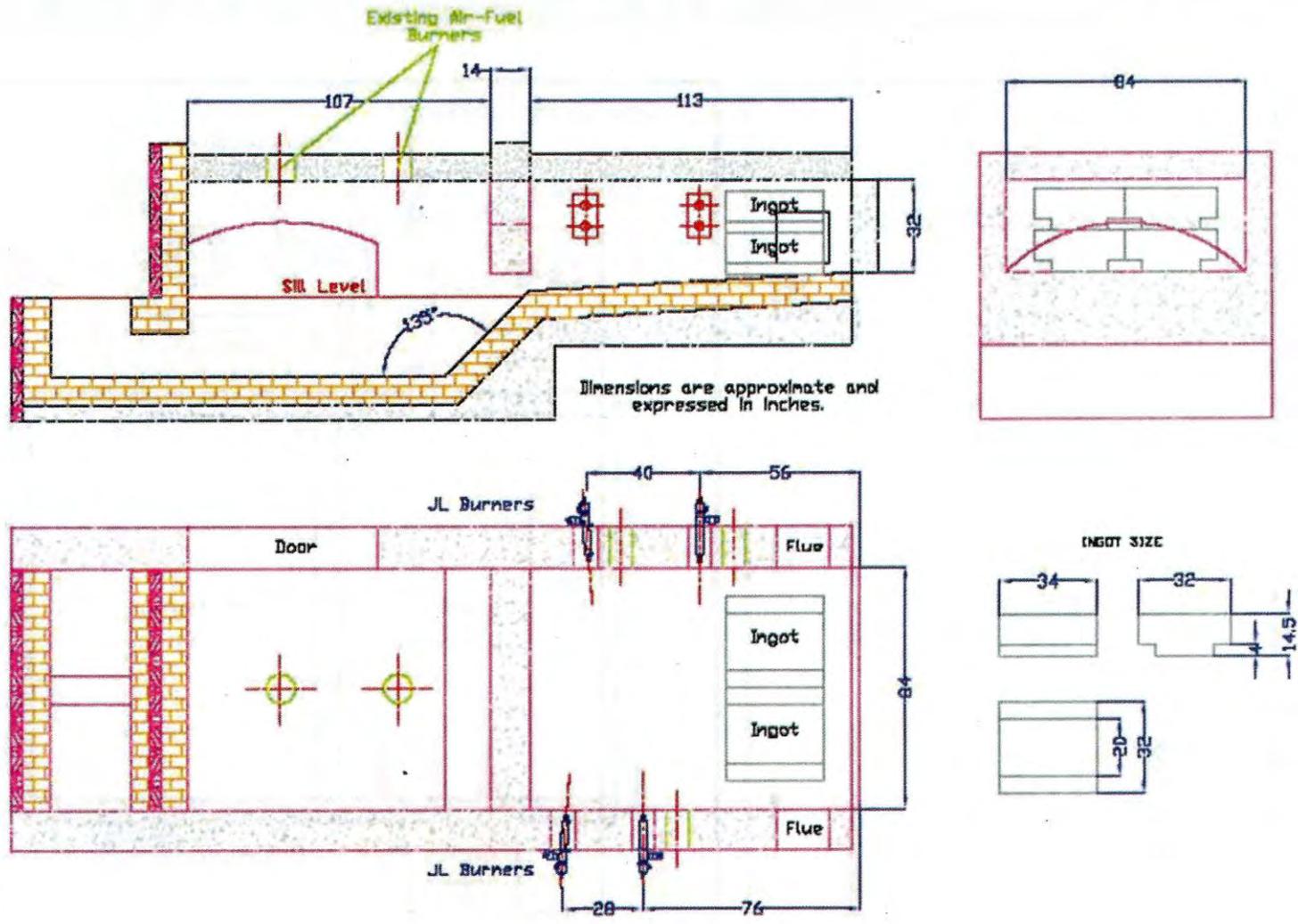


Figura 2.9 Esquema de horno para fundición de aluminio de solera seca

Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

Los hornos de reverbero son usados generalmente para fundir grandes cantidades de aluminio para abastecer a los hornos de retención, o usados para refundir chatarra metálica, y pueden ser lo suficientemente grandes en forma tal que pueden llegar a contener hasta 90 ton. de aleación de aluminio fundido.

Los hornos de reverbero pueden ser calentados por gases o combustóleos. Algunos quemadores pueden usar mezclas de gas y aceite. Esto dependerá de la disponibilidad y el costo del combustible. El tamaño y el número de quemadores para un horno son seleccionados de acuerdo a la velocidad de fusión que se requiera. Una eficiencia del combustible del orden del 30% en la fundición de aluminio, es considerada buena.

La mayoría de los hornos de reverbero utilizan el quemador con tobera de mezcla que lanza una flama larga haciendo uso de “alimentación de paso doble”. Esto comienza con una flama luminosa o semiluminosa, relativamente alta en la cámara de combustión que radia energía al refractario de las paredes y del techo. Como las paredes y el techo están incandescentes ellos radian el calor hacia el baño. La disposición más normal de los quemadores está colocados a un lado a un costado del horno y los gases de combustión se evacuan por una chimenea en el lado opuesto.

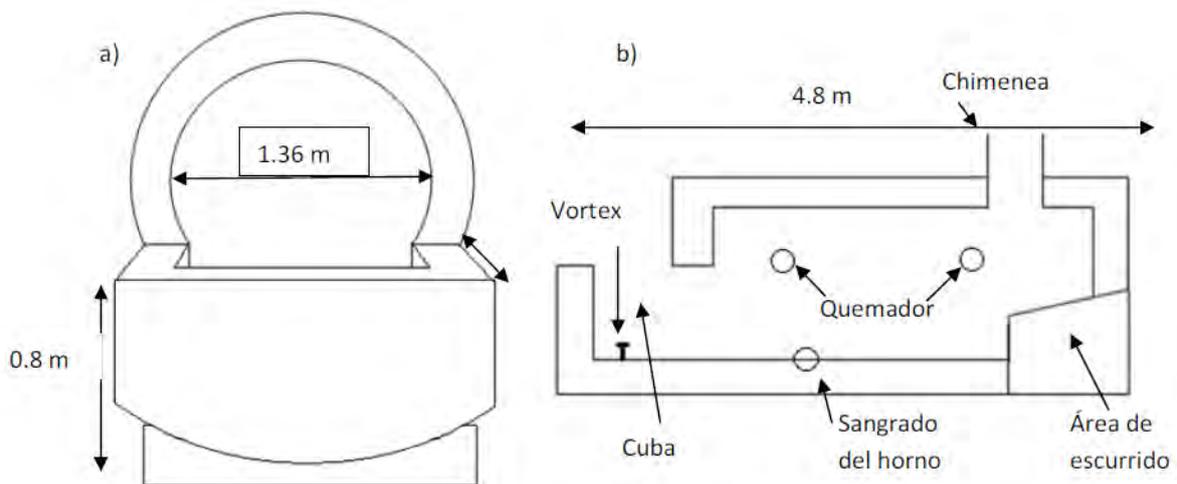


Figura 2.10.

a) esquema frontal del horno de reverbero basculante

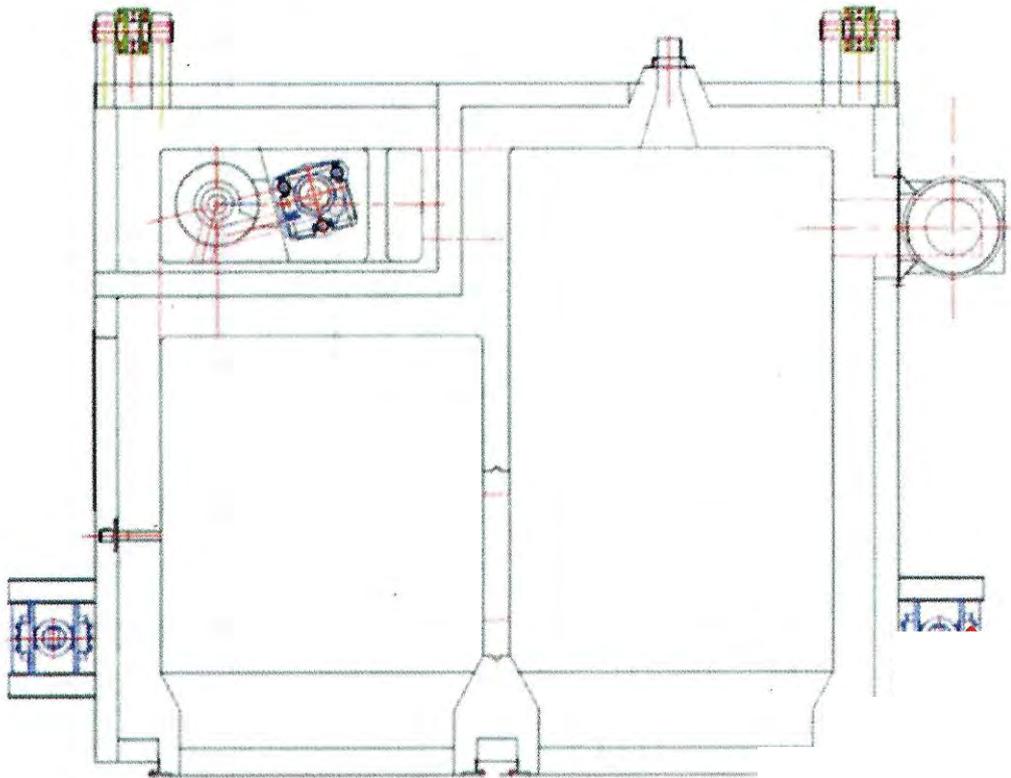
b) Esquema lateral del horno de reverbero basculante

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

Es preferible adoptar una disposición en la que la estancia de los gases dentro del horno sea la mayor posible, antes de ser evacuado, incrementando los intercambios térmicos con la carga.

Estos hornos deben contar con sistemas de extracción de gases y polvos, ya que pueden contener productos sulfurados.

**Horno de Doble Cámara.** Una pared divide el horno en dos cámaras, una para la fusión y la otra para la contención, cada cámara tiene un sistema de combustión independiente. La pared también conserva la escoria en la cámara de fusión, esta característica permite que el aluminio fundido se mantenga a temperatura constante.



*Figura 2.11 Esquema de horno de reverbero de doble cámara*

*Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)*



#### 2.3.4. Hornos de túnel

Como su nombre los dice, consta de un túnel que puede ser recto o circular, y por el interior del cual se mueve la carga de un extremo a otro.

La característica principal es llevar a cabo una carga y ejecutar el horno a muy altas tasas de fusión.

Para darle movimiento a la carga se utiliza una vagoneta movida sobre rieles o una banda de tela metálica. Por excelencia este es un horno a contracorriente, las piezas pasan en una dirección mientras que los gases circulan en dirección contraria.

Los hornos de túnel son usados en la industria cerámica, ladrillera y de alimentos entre otros.

El túnel se divide en 5 zonas:

- Caldeo preliminar (dsecación y calentamiento)
- Cocción
- Primera zona de enfriamiento
- Segunda zona de enfriamiento
- Tercera zona de enfriamiento o antecámara de salida

**Zona de caldeo preliminar:** Se halla precedida de una antecámara de admisión en la que se introducen las vagonetas con los materiales crudos a hornear. Los productos van calentándose por los gases de la combustión que se dirigen hacia la chimenea.

**Zona de cocción:** Se disponen numerosos mecheros para la combustión del gas generado en el gasógeno y una serie de entradas auxiliares de aire.

**Primera zona de enfriamiento:** Se caracteriza por el considerable espesor de sus paredes exteriores evitando pérdidas exageradas por irradiación y un enfriamiento excesivamente rápido de los productos cocidos.

**Segunda zona de enfriamiento:** Se caracteriza por sus paredes de mucho menor grueso que en la zona anterior, para que sean mayores las pérdidas de calor a través

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

de la mampostería y unos conductos verticales de paso de aire fresco permiten la regulación del enfriamiento.

**Tercera zona de enfriamiento o antecámara de salida:** Se halla constituida por una cámara de paredes delgadas, o mejor aún, de chapa de hierro atirantada exteriormente, formando paramentos dobles, entre los que circula aire fresco, constituyendo una envolvente de refrigeración de la pared metálica interior.

Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

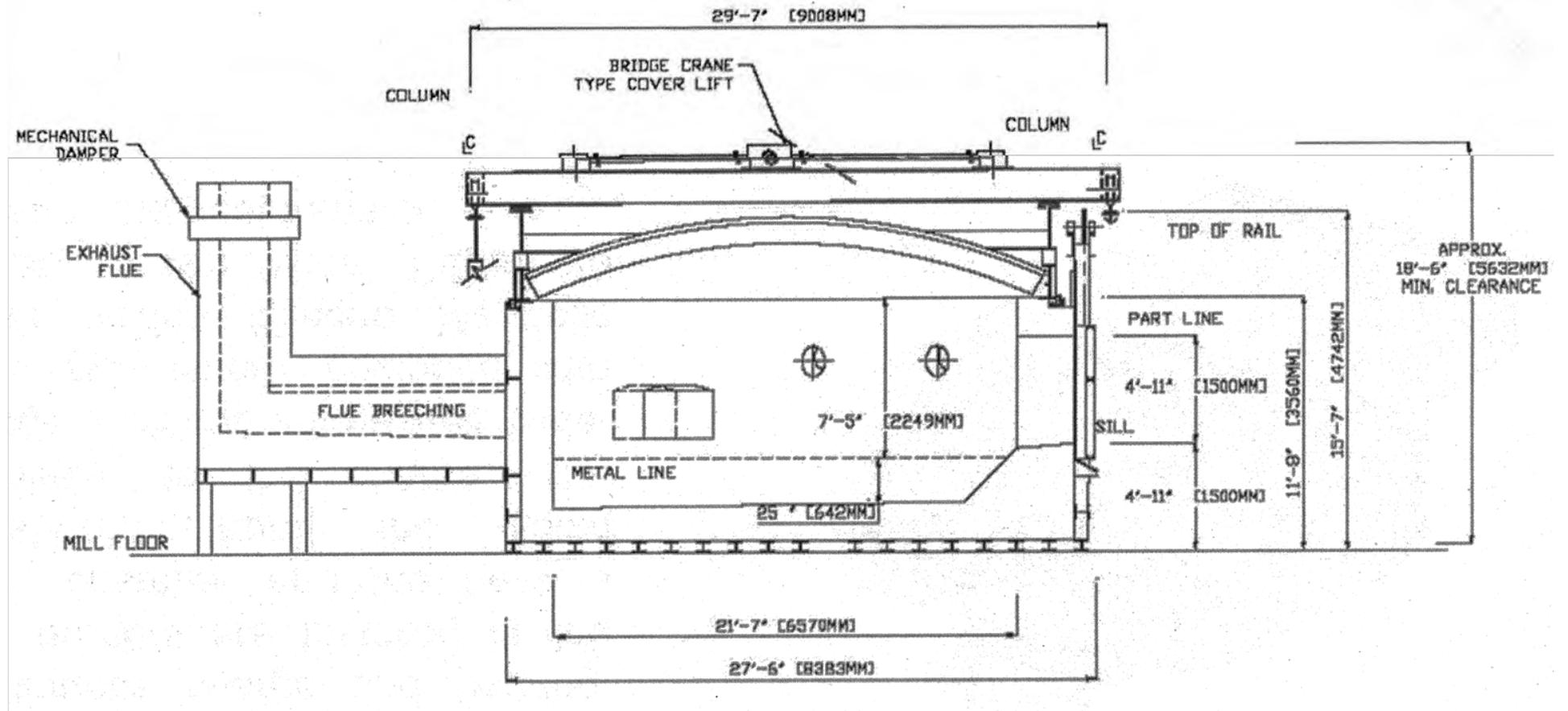


Figura 2.14. Esquema de horno de túnel  
Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)

### 2.3.5 Hornos de crisol

Los hornos de crisol ya casi no son utilizados en fábricas de transformación, sin embargo, existen todavía algunos hornos basculantes en fundiciones pequeñas; normalmente están equipados con un crisol de carburo de silicio o de arrabio recubierto con pintura refractaria, con una capacidad de 50-250 Kg.

El calentamiento se efectúa con gas y la flama producida por el quemador ataca tangencialmente la base del crisol con el fin de que los gases de combustión giren alrededor de él con un movimiento ascendente y helicoidal. Los modelos más recientes de estos hornos basculan alrededor del pico de colada, para mantener una altura constante de caída del metal mientras dura el movimiento de basculamiento.

La transmisión de energía al metal que se quiere fundir, al realizarse indirectamente a través de la pared de crisol, causa un escaso rendimiento térmico y un consumo de combustible importante, además, la necesidad de reemplazar periódicamente los crisoles aumenta el costo.

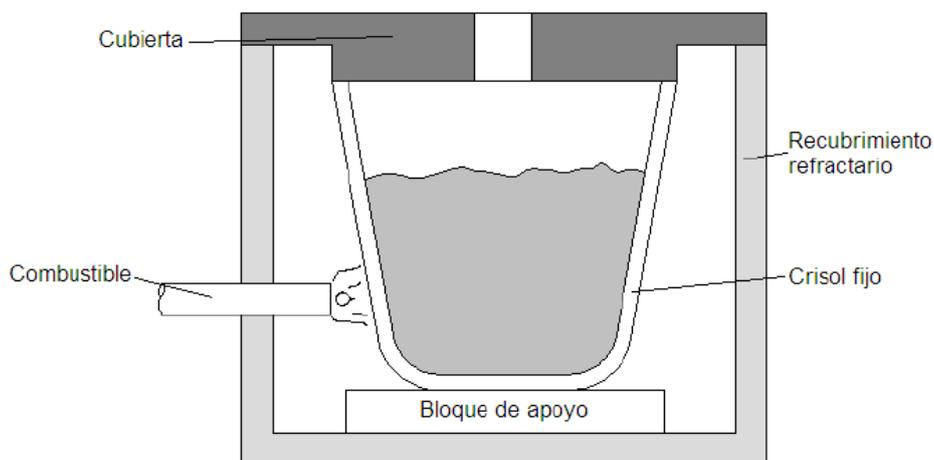


Figura 2.15. Esquema de Horno de crisol.

Fuente: Álvarez Brito Omar, Sustentante. "Modelo numérico de transferencia de calor para fundido de aluminio mediante alta concentración solar" Tesis. UNAM

### 2.3.6 Hornos eléctricos

Se clasifican de la siguiente manera:

- Hornos De Resistencia
- Hornos De Inducción

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

- Hornos De Arco

**Hornos de resistencia.** En los hornos eléctricos de resistencia, la energía necesaria para la fusión se obtiene por efecto joule en las resistencias dispuestas en la bóveda del horno. Es irradiada directamente sobre el metal. Las resistencias están constituidas por alambres en espiral, formados por aleaciones refractarias como: Ni-Cr (80-20 %), Ni-Cr-Fe o Cr-Al-Fe-Co.

Las resistencias se instalan sobre la bóveda: parcialmente, embebidas en ladrillos de forma rectangular; montaje practicado sobre todo para alambres en espiral o como resistencias suspendidas de la bóveda

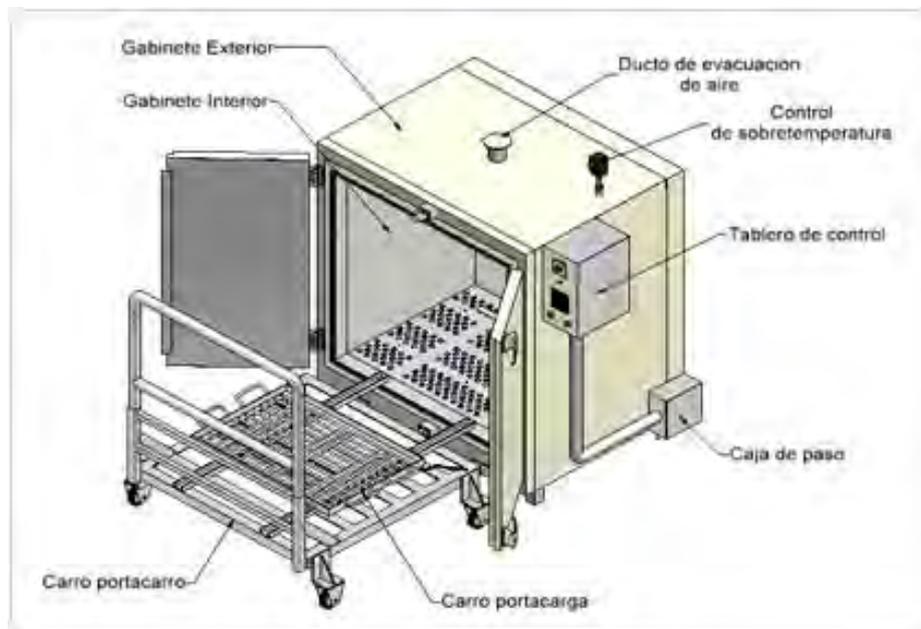


Figura 2.16. Horno de resistencia  
Fuente: <http://jararesistencias.com>

### a) Resistencias metálicas

- Aleaciones austénicas. Son aleaciones Ni-Cr-Fe para temperaturas de hasta 850°C, dependiendo de los contenidos de estos elementos.
- Aleaciones férricas. Son aleaciones Cr-Fe-Al para temperaturas de 1100 a 1300°C. Se utilizan en forma de hilos con diámetros variables de fracción de mm a unos 6 mm, comúnmente enrollados en forma helicoidal.

b) Resistencias no metálicas

- Tubos a base de carburo de silicio para temperaturas de hasta 1500 °C.
- Silicato de molibdeno para temperaturas de hasta 1700 °C.
- Grafito y molibdeno (en pastillas, cilindros o granulados en tubos) para temperaturas de hasta 1800°C.

Constituidas por tubos fijados horizontalmente entre dos paredes del horno o verticalmente entre el piso y la cubierta.

### Hornos de inducción

Hornos de alimentación tipo batch o por bloques, que llevan a cabo el calentamiento por medio de inducción magnética sobre el material para así calentarlo y llevarlo a su punto de fusión. Recomendado en materiales magnéticos, cargas pequeñas hasta de altos tonelajes.

El horno de inducción consiste en un embobinado de cobre recubierto de refractario, debido al paso de corriente eléctrica en la bobina se produce un campo magnético que genera resistencia en la carga y esta se calienta.

Para evitar que haya sobrecalentamiento de las estructuras metálicas externas a la bobina por la acción del campo electromagnético disperso, la bobina es circundada por núcleos constituidos de acero al silicio que conducen el campo externo evitando su dispersión y actuando como blindaje.

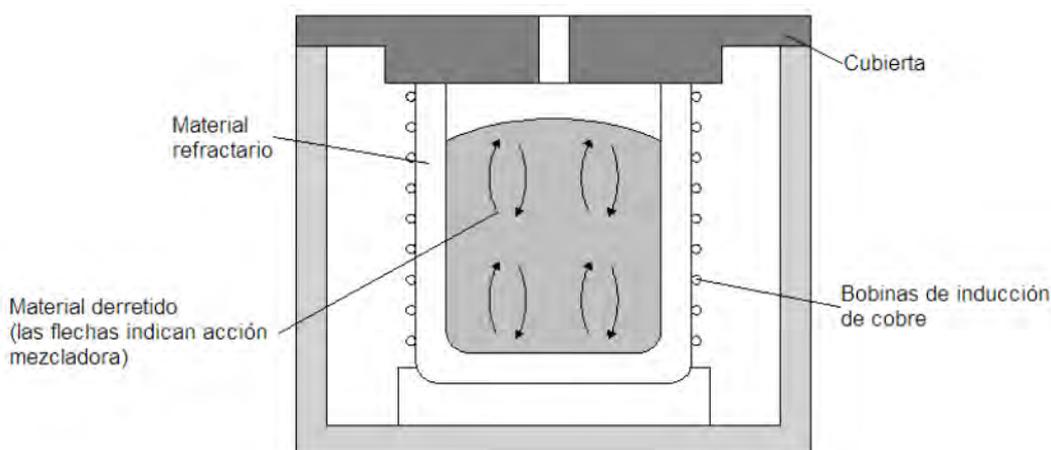


Figura 2.17. Horno de inducción.

Fuente: Álvarez Brito Omar, Sustentante. "Modelo numérico de transferencia de calor para fundido de aluminio mediante alta concentración solar" Tesis. UNAM.

### Hornos de arco

Consiste en una campana de vidrio con un crisol de cobre cuya configuración se elige según el trabajo a realizar para colocar el material a fundir.

Dentro de la campana se genera vacío o atmósfera inerte de Argón. Mediante la utilización de una torcha de cobre con punta de Wolframio se genera un arco eléctrico contra la pieza produciendo altas temperaturas en ella y causando la fundición, tal arco se genera con un dispositivo tipo gatillo igual al utilizado en la soldadora T.I.G. (Tungsten Inert Gas).

Debido a las altas temperaturas producidas en la punta de Wolframio, la torcha posee un circuito de refrigeración por agua, y el horno permite desplazar o girar las piezas que se encuentran en el interior de la campana mediante un dispositivo para tal fin.

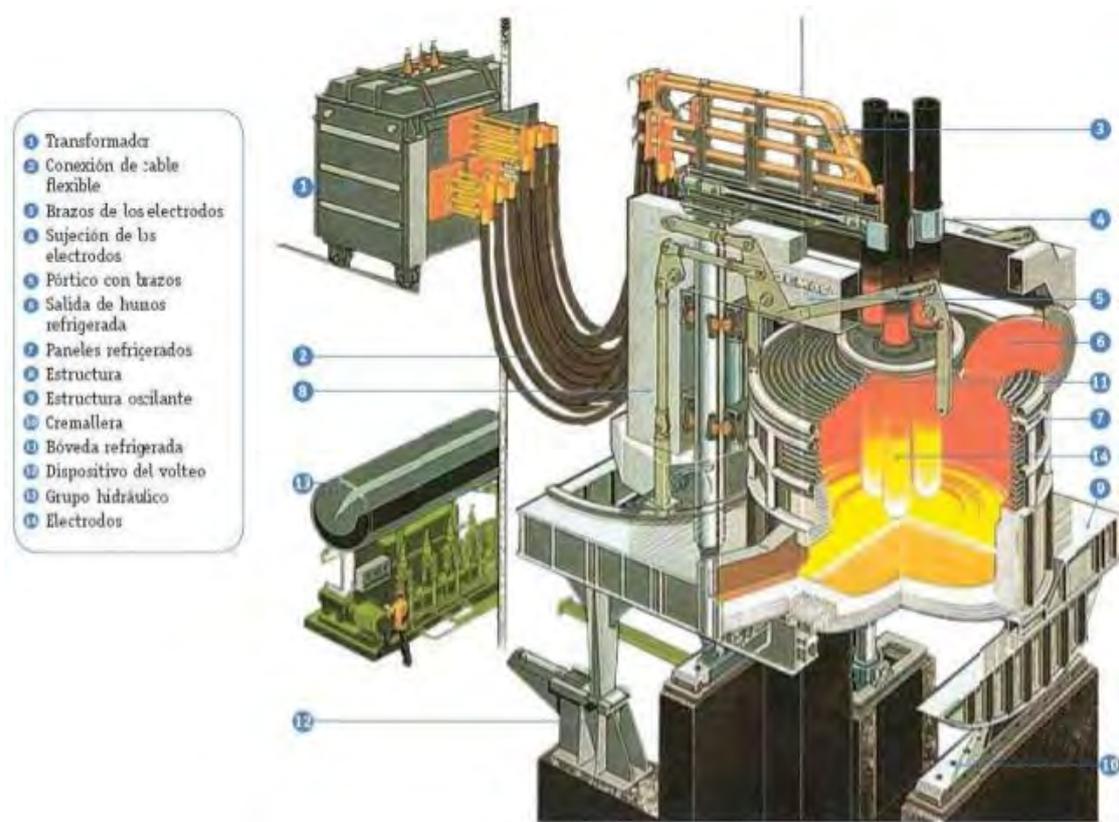


Figura 2.18. Horno de arco eléctrico  
Fuente: <http://www.mme-co.de/en>

## 2.4 CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS HORNOS EN LA INDUSTRIA

### 2.4.1 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 precalentar para las operaciones de laminación, forja o extrusión.
- Hornos de tratamientos térmicos de barras, 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 la fabricación del silicio metal, carburo de calcio, etc.

### 2.4.2 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 precalentar 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.

### 2.4.3 Industria del cobre y sus aleaciones

- Hornos de reducción de minerales.
- Hornos de fusión de chatarra del tipo de reverbero o crisol.
- Hornos de precalentamiento 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 vacío, equipos de barnizado o esmaltado de hilos de cobre, etc.

#### 2.4.4 Industria automotriz

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.

#### 2.4.5 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.

#### 2.4.6 Industrias de productos manufacturados.

Fabricación de materiales eléctricos (transformadores y motores).

Fabricación de electrodomésticos (fundamentalmente la serie blanca).

Industria de la máquina-herramienta, la industria electrónica, etc.

- Hornos de recocido de chapa magnética.
- Hornos de soldadura brillante de pequeñas piezas.
- Hornos de sinterizado y, en general, todos 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 recocido de bancadas de máquinas-herramientas.
- Hornos de difusión de hidrógeno en semiconductores.
- Hornos de secado al vacío de derivados de transformadores.

### 2.4.7 Industria química (incluida la petroquímica y la farmacéutica)

- Hornos de reformado (reforming) en la industria petroquímica.
- Hornos de esterilizado de productos medicinales.

### 2.4.8. Industria auxiliar.

Entra dentro de este campo la fabricación de reductores, rodamientos, bujías, accesorios de tubería, frenos, direcciones, etc.

Merecen mención especial los talleres de tratamiento térmico cuyos elementos de trabajo son únicamente hornos y equipos auxiliares.

### 2.4.9 Industria cerámica y del vidrio.

- Hornos rotativos de fabricación de clinker en la industria del cemento.
- Hornos continuos tipo túnel de fabricación de piezas cerámicas industriales y hornos intermitentes, por ejemplo, para cerámica artística.
- Hornos de fusión de vidrio y de materiales cerámicos (materiales cerámicos fundidos y fibras cerámicas).
- Hornos de tratamientos térmicos, fundamentalmente de vidrio.

## 2.5 MATERIALES REFRACTARIOS

### 2.5.1 Generalidades de los materiales refractarios

En las operaciones de fundición, los materiales refractarios cumplen un papel fundamental dentro del proceso, ya que tienen la función de mantener la temperatura y otorgar estabilidad estructural al horno o convertidor. Una de las dificultades que tiene la construcción del horno tipo basculante es el cálculo del revestimiento refractario. Por esta razón la determinación del espesor de ladrillo, manto cerámico y chapa de acero es relevante para determinar el estado del equipo, que se requiere para planificar los trabajos de mantenimiento pertinentes y optimizar el proceso de fusión.

La metodología para estimar el espesor de los revestimientos refractarios en base a la temperatura de la superficie externa de los hornos, se basa en balances de energía que describen la transferencia de calor ocurrido en el horno que considera los perfiles de temperatura y los espesores de los ladrillos, manto y carcaza.

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

Por otra parte, un revestimiento refractario- aislante protege a la estructura portante de las altas temperaturas y hace que las pérdidas de calor a través de las paredes de los hornos sean menores, contribuyendo de ese modo al ahorro energético, debido a un menor consumo de calor. Además, los materiales refractarios ayudan a proteger el ambiente asegurando que las temperaturas altas necesarias en muchos procesos no presentan un impacto perjudicial.

Hoy en día los refractarios son materiales muy importantes en cualquier lugar donde se requieren altas temperaturas, ya sea en equipos tales como calderas, hornos de vidrio, cerámica, Hierro, cobre, acero, etc. Además de proporcionar aislamiento térmico, los refractarios pueden soportar abrasión e impactos, resistir polvos, humo, metales fundidos y escorias, en tal extensión como sean las exigencias.

### 2.5.2 Definición y constitución de los materiales refractarios

Es aquel cuerpo que resiste la acción del fuego sin cambiar de estado ni descomponerse. Por tanto, se considera como material refractario a todo aquel compuesto o elemento que es capaz de conservar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas a elevada temperatura.

La norma española UNE (150 R836-68) define a los materiales refractarios como a aquellos productos naturales o artificiales cuya Refractabilidad (Resistencia pirosfópica o cono pirométrico equivalente) es igual o superior a 1500 °C.

En la Tabla 2.3, se enumeran las condiciones que usualmente deben soportar los materiales refractarios. Se encuentran clasificadas en tres grupos y hay que tener presente que en la mayoría de los casos dichas sollicitaciones pueden actuar de forma simultánea.

TABLA 2. 3. CONDICIONES QUE DEBEN SOPORTAR LOS MATERIALES REFRACTARIOS		
REQUERIMIENTOS		
TÉRMICOS	MECÁNICOS	QUÍMICOS
Temperaturas Elevadas	Compresión, Flexión Y Tracción	Escorias
Cambios Bruscos De Temperaturas (Choque Térmico)	Vibración	Productos Fundidos
	Abrasión Y Erosión, Alto Impacto	Gases Y Vapores
	Presión	Ácidos

*Fuente: Pérez Pino Frey Jonathan, Soto Payares Armando Enrique, Sustentantes. "Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes" Tesis. 2009 Universidad de Pamplona*

Dependiendo de las aplicaciones se les exigirán otras propiedades en mayor o menor grado, por ejemplo, la estabilidad química frente a los metales fundidos, las escorias, el vidrio fundido, los gases y vapores, etc. Y resistencia a los cambios bruscos de temperatura (Choque térmico).

En su mayor parte los materiales refractarios están constituidos por silicatos, óxidos, carburos, nitruros, boruros, siliciuros, carbono, grafito, etc.

### 2.5.3 Clasificación de los materiales refractarios

#### Refractarios ácidos

Son resistentes a escorias del tipo ácidas, los básicos. De acuerdo a su composición química, se tienen ladrillos de arcilla refractaria, de alta alúmina, de sílice, y básicos de liga directa, convencional y química.

#### Refractarios básicos

Son resistentes a las escorias básicas. Varios refractarios se basan en el MgO (magnesia o periclasa). El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractabilidad, buena resistencia al ataque por los entornos que a menudo se encuentran en los procesos de fabricación de acero.

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

Típicamente, los refractarios básicos son más costosos que los refractarios ácidos.

### **Refractarios neutros**

Son resistentes a escorias ácidas y básicas. Normalmente incluyen la cromatina y la magnesita, pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que uno ataque al otro.

### **Refractarios especiales**

El carbono, el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando no hay oxígeno fácilmente disponible. Estos materiales refractarios incluyen la circonia ( $ZrO_2$ ), el circón ( $ZrO_2 \cdot SiO_2$ ) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros.

Los principales sectores de aplicación de los materiales refractarios, así como el tipo de instalación en la que se usan pueden verse en la Tabla 2.4. En ella también se da la temperatura del proceso y el tipo o tipos de refractarios utilizados. Se observa que se corresponden con sectores industriales básicos de la economía de un país.

**TABLA 2.4. REFRACTARIOS EMPLEADOS EN PROCESOS INDUSTRIALES A ALTA TEMPERATURA.**

Sector	Instalacion	Temperatura De Proceso (°C)	Refractarios
<b>Industria Petroquimica</b>	Cracking	900 – 1200	Monoliticos, aislantes
	Hornos	1650	Ladrillos: silimanita, mullita
<b>Quimica</b>	Hornos Negro De Humo	1600	Ladrillos: corindon, aislantes
	Carbon Activo	1400	Monoliticos sin hierro
	Reactores (Obtencion De Fosforo)	1550	Ladrillos monoliticos de carbono, sin hierro a base de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> son SiC
<b>Aceria</b>	Hornos De Coque		Ladrillos: silicioso
	Preparacion De Materias Primas	900 – 1200	Silicoaluminoso, monoliticos
	Horno Alto/ Cubilote	1700	Ladrillos de carbono, semigrafito, SiC, mulliticos silicoaluminosos de alta calidad
	Estufas	1800	Ladrillos: silicoaluminosos, silice, magnesita
	Convertidores	1600 – 1700	Ladrillos basicos (magnesita, dolomia MgO-C)
	Cucharas De Transporte De Acero	1600	Monoliticos y ladrillos siliceos, dolomia, bauxita
	Horno Tratamiento Termico	900 – 1100	Monoliticos, ladrillos, mullita, corindon
<b>Fundicion</b>	Cupula	1100 – 1400	Monoliticos: siliciosos, silicoaluminosos
	Horno De Induccion	1400	Monoliticos: siliceos
<b>Metales No Ferreos</b>	Hornos De Fusion	700 – 900	Carbono, aislante monolitico
<b>Aluminio</b>	Horno De Fusion	900	Ladrillos: bauxitas, silicoaluminosos de alta calidad, monoliticos
<b>Plomo</b>	Hornos De Cubilote/ Rotatorio	100	Ladrillos: magnesiticos, cromo-magnesita
<b>Cobre</b>	Horno De Cubilote, Convertidores	1250	Refractarios silicoaluminosos

## Capítulo 2. Generalidades sobre hornos fundidores

	Horno De Arco Electrico	1100	Monoliticos
	Horno De Refusion	1100	Monoliticos
<b>Zinc</b>	Hornos Rotatorios	1100	Ladrillos magnesicos
	Celdas De Galvanizado	420	Monoliticos
<b>Cemento</b>	Hornos Rotatorios	800 – 1600	Ladrillos: silicoaluminosos, mullitico, magnesita, monoliticos sin hierro resistentes a la abrasion
	Pre calentadores	800 – 1100	Monoliticos: resistentes a la abrasion
<b>Ceramica</b>	Horno Tunel	900 – 1800	Ladrillos: silicoaluminosos, mulliticos, monoliticos
	Hornos De Arrastre	900 – 1800	Ladrillos: silicoaluminosos, corindon, mulliticos
	Hornos Multicanal	800 – 1100	Ladrillos silicoaluminosos mulliticos, monoliticos
<b>Vidrio Y Fibras</b>	Horno De Rodillos	1400 – 1700	Piezas alta alumina
	Horno De Fusion	1650	Ladrillos mulliticos, monoliticos
<b>Esmaltes</b>	Hornos De Fusion	1550	Ladrillos mulliticos, sillimanita, monoliticos

*Fuente: Pérez Pino Frey Jonathan, Soto Payares Armando Enrique, Sustentantes. "Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes" Tesis. 2009 Universidad de Pamplona.*

### 2.5.4 Tipos de materiales refractarios

#### Refractario de arcilla calcinada.

Estos materiales se denominan también sílicos aluminos por ser la Sílice y Alúmina, los constituyentes principales de ellos. Son los más utilizados, hay dos tipos generales y cinco clases de ladrillo.

#### Refractario de sílice.

Están constituidos fundamentalmente por Óxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Se distinguen dos clases de ladrillos calcinados.

### **Refractarios aislantes.**

Están fabricados a base de Sílice. Existen dos grandes divisiones en los cuales se agrupan los ladrillos aislantes o sea los ladrillos aislantes quemados, o ladrillos aislantes prensados.

### **Refractarios de tipos especiales.**

Son refractarios que se pueden obtener de fabricantes particulares, empleados para condiciones específicas severas, son muy costosos. Entre estos tenemos: Caolín de alto cocido, Carburos, Sulfuros, Boruros, Nitruros, entre otros.

### **Especialidades refractarias.**

Bajo esta denominación se agrupan los refractarios no conformados. Empleados en la construcción de revestimiento monolíticos, vaciado de pieza de gran tamaño, reparaciones y para pegar ladrillos.

### **Concretos refractarios.**

Son mezclas de materiales refractarios molidos con adecuada granulometría y aditivos ligantes.

### **Morteros refractarios.**

Utilizados para pegar ladrillos entre si y rellenar las juntas entre ellos. El mortero refractario se debe seleccionar cuidadosamente como el ladrillo en el cual va a ser usado y debe ser compatible con la composición química del ladrillo.

## CAPITULO 3. CRITERIOS DE DISEÑO

---

Hablar de diseño de un horno, es un asunto complejo. En este proyecto, por diseño se entiende la definición de la configuración geométrica y física del horno y lo referente al cálculo térmico que implica los procesos de transferencia de calor, que definen la eficiencia energética esperada del sistema, y por ende los requerimientos de energía para el proceso de fusión del aluminio.

### 3.1 SISTEMA DE AISLAMIENTO TÉRMICO

Los refractarios son materiales inorgánicos, no metálicos, porosos y heterogéneos, compuestos de minerales agregados térmicamente estables, fases de aglutinante, y algunas veces otros aditivos. Los refractarios se utilizan en casi todos los procesos que implican altas temperaturas y / o ambientes corrosivos debido a su excelente resistencia al calor, al ataque químico, y los daños mecánicos. Las materias primas utilizadas en la producción de materiales refractarios son los óxidos de: silicio, aluminio, magnesio, calcio y circonio. Además, algunos materiales no óxidos se pueden utilizar, incluyendo: carburos, nitruros, boruros, silicatos, y grafito. Las principales formas de refractarios incluyen ladrillos, hormigones, productos de fibra cerámica y materiales aislantes.

Los hornos se construyen básicamente con ladrillos de arcilla (ladrillo no quemado) o de ladrillos refractarios (ladrillos quemados en horno). Los primeros son más baratos y se utilizan cuando las construcciones son temporales o para usar en el sistema de sellado que debe ser montado y desmontado con cada quema que se realice. Para hornos permanentes, el material base del cuerpo del horno es ladrillo rojo refractario y los sellos y recubrimientos exteriores podrían ser de ladrillo de arcilla para abaratar la construcción. Para el ingeniero es de sumo interés el valor de la conductividad térmica  $k$  de los materiales usados como aislamiento.

Los hornos de retención para la fusión de aluminio pueden ser considerados como un conjunto de varias zonas distintas en función de su entorno de exposición: la zona superior (bóveda), que tiene los quemadores y contiene la atmósfera del

### Capítulo 3. Criterios de diseño

horno caliente y la zona inferior que está en contacto con el aluminio fundido (cuba). Los límites entre la bóveda y la cuba, el llamado bellyband, estas dos áreas se exponen a una combinación de fundido de aluminio-escoria /flujo de aluminio y la atmosfera, y representa el entorno más difícil.

La mayoría de los hornos están llenos de materiales a base de aluminio -silicato debido a sus ventajas sobre la disponibilidad y el costo. En general, las diferentes calidades se utilizan para las zonas de los hornos superior e inferior con el fin de atender mejor sus distintas necesidades. En términos generales, el material refractario en contacto con el metal, la zona inferior, se desgasta como resultado de la reacciones químicas del aluminio con los componentes de revestimiento, daños mecánicos resultantes de la limpieza para eliminar la escoria de las paredes y el fondo del horno así como el choque térmico, más daños mecánicos debido a la práctica de carga, mientras que las zonas superiores están expuestas a temperaturas más altas, álcalis y los choques térmicos resultantes de la apertura de la puerta del horno. Los materiales refractarios de la bellyband tienen que soportar todo lo anterior a causa del cambio en el nivel del metal y las altas temperaturas requeridas para el proceso.

#### 3.1.1 Criterios de selección para un material aislante

Además de la forma, los materiales aislantes tienen una variedad de propiedades clave que se debe considerar al elegir el producto correcto para una aplicación determinada.

**1. Ingredientes refractarios:** Considerar los aspectos beneficiosos, si el material puede trabajar a alta temperatura, si los materiales pueden ser semiconductores, etcétera.

**2. Los aglutinantes refractarios.** Considerar las propiedades de un refractario durante su “estado verde”. Considerar lo que sucede en general a un ligante después de que el refractario es elevado a temperatura alta, sus propiedades generales, cuáles de estos tipos son permanentes.

Conocer las técnicas generales utilizadas para unir los materiales refractarios que utilizan fosfatos. Considerar refractarios de sinter (o unión cerámica).

**3. Materiales aislantes:** Conocer las cinco categorías generales de materiales

aislantes. Saber lo que significa para un refractario de ser "moldeable". Saber cómo los "colables" difieren de los aislamientos "moldeables", etcétera.

#### 3.1.2 Clasificación de los materiales aislantes

Los materiales aislantes se pueden definir por su forma general en:

**-Moldeable:** Un material aislante moldeable se define como uno que se vierte en un estado líquido en su forma final. Este tipo de aislamiento se ve favorecido cuando la capa de aislamiento debe encajar en lugares estrechos o cuando la entrada en particular es pequeña. El aislamiento moldeable también requiere secado y curado después de haber sido colocado. Un ejemplo de material refractario aislante moldeable es un material Wollite® de Pyrotek®, que es una espuma que se puede verter, es de peso ligero, compuesto principalmente de silicato de calcio ( $\text{CaSiO}_3$ ), lo que supone una conductividad térmica muy baja y baja pérdida térmica.

**-Vertible seco:** Se refiere a uno que se vierte como un polvo seco, y no incluye la adición de agua (u otros líquidos). Típicamente se agita o se hace vibrar en su lugar para la compactación. La instalación del material no implica un estado líquido, sin embargo, generalmente sinteriza debido al calor del horno.

**-Tableros/Placas:** Como la placa aislante, no se encuentran en materiales como asbesto. Existen algunas marcas con paneles aislantes compresibles, por ejemplo, Pyrotek®, los cuales son libres de asbesto. También existen tableros de fibra de cerámica refractaria (RCF) incluyendo, que son rígidas, las juntas de alta temperatura construidas a partir de fibras de alúmina-sílice y aglutinantes tienen peso relativamente ligero, se fabrican con una densidad uniforme.

**-Capas/Mantas:** Las mantas aislantes incluyen una gama de materiales de fibra de vidrio y lana de cerámica. Están disponibles en una gama de formas, tamaños, y para su uso con diversas temperaturas máximas de funcionamiento.

**-Papeles Aislantes:** Son, de hecho, lanas de cerámica finamente tejidas, dando a las excelentes propiedades aislantes de papel para un material tan especialmente delgado. Debido a su delgadez, los papeles refractarios son también útiles para el

### Capítulo 3. Criterios de diseño

llenado de pequeños huecos y para proporcionar capas adicionales de aislamiento, donde otros materiales no podían encajar. Por otra parte, los papeles de cerámica se pueden pegar en su sitio.

#### 3.2 REQUERIMIENTOS DEL HORNO DE FUNDICION

Se requiere del diseño del nuevo horno, que sea capaz de fundir 40 toneladas/lote, con una duración promedio 4 horas/lote, 3 lotes/día, operando 6 días/semana, para tener una capacidad de producción estándar aproximada de 2,880 toneladas mensuales. Con esta producción, se espera cubrir el promedio de demanda, respondiendo a periodos de alta, media y baja demanda, propios de un año de trabajo.

#### 3.3 CRITERIOS PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO.

Los siguientes criterios definen restricciones a respetar en el diseño, dada la experiencia de diseños anteriores que han resultado eficientes y han mejorado el desempeño de los hornos.

- a. Forma de cubo. Según experiencias por simulación y mediciones experimentales, se ha encontrado que esta figura es la que garantiza mayor uniformidad de las temperaturas de punto a punto al interior del horno, pero por la capacidad se dimensionará según convenga considerando el Modulo de solidificación (Ms), el que mejor cumpla con las necesidades del horno y mantenga por mayor tiempo la temperatura del aluminio líquido.
- b. El piso de la cámara de fusión deberá tener una inclinación entre 10° y 15° para garantizar que el metal fundido fluya con facilidad hacia la cámara de contención.
- c. El largo del piso de la cámara de fusión será del 60 % de la longitud del piso de la cuba, y la altura de la cámara de contención será del doble a la altura del baño metálico.
- d. Se utilizará 1 m<sup>2</sup> de área de combustión por cada 6 m<sup>2</sup> de área de piso. Con esto se garantiza un apropiado tiro natural en la chimenea.

### Capítulo 3. Criterios de diseño

- e. El diámetro equivalente de la chimenea estará entre  $1/4$  y  $1/5$  del diámetro equivalente de la cámara.
- f. El horno será internamente de tiro descendente por lo que, por cada metro interno de altura, la chimenea tendrá 3 metros de alto. Con esto se asegura una altura que garantiza permanencia de gases calientes internamente sin causar mucho quemado y uniformar al máximo las temperaturas internas. Esto favorece la calidad del producto y protege a la estructura del horno de los peligrosos choques térmicos y gradientes de temperatura.
- g. El material de construcción a utilizar será una combinación de ladrillos sólidos para los cimientos, los pisos y partes del horno con carga y de ladrillos de menor densidad para la parte de aislamiento térmico. Esto garantiza facilidad y seguridad en la construcción, con presupuesto minimizado, según experiencias de especialistas del área. El material para pegar los ladrillos será el mortero refractario.
- h. El quemador de uso más común en hornos de fundición, es el de pre mezcla, en el cual hay mezcla de gas-aire previa a la reacción de combustión.
- i. La bóveda para el horno debe tener una chimenea para cada cámara.
  - La tapa y las chimeneas deben tener aislamiento térmico.
- j. Sistema de vaciado.
  - Vaciar el horno de forma fácil y sin obstáculos.
  - Permita tener control del flujo de material y cantidad.
  - Se tenga un mejor sellado, evitando fugas.
  - Permita ser removido para facilitar la limpieza del mismo y del horno

## CAPITULO 4. DISEÑO DEL HORNO DE REVERBERO

---

Teniendo en cuenta los criterios para el diseño del horno se propone lo siguiente.

### 4.1 CUBA DEL HORNO

La capacidad propuesta para el horno de reverbero es de 40 Ton. de aluminio fundido. La consideración principal es el volumen que ocupara las 40 Ton., se tiene en consideración capacidad extra, debido al coeficiente de expansión del aluminio.

La densidad del aluminio puro es 2.7 g/cm<sup>3</sup>, siendo esta mayor a la presentada por aleaciones de aluminio, y tiene un coeficiente de expansión del 6 %.

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{40000 \text{ kg}}{2700 \text{ kg/m}^3} = 14.814 \text{ m}^3$$

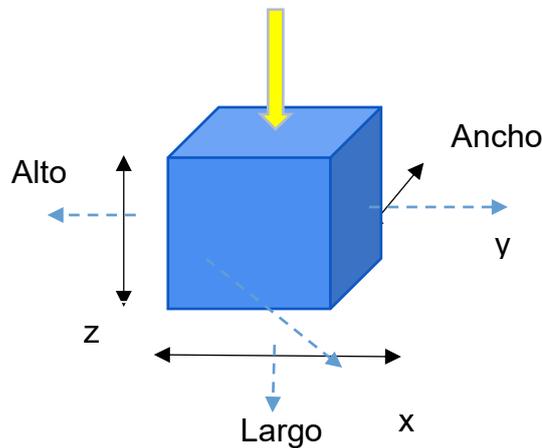
Considerando el 6% por la expansión el volumen requerido será de:

$$V = 14.814 + 0.888$$

$$V = 15.702 \text{ m}^3$$

Comenzando a dimensionar de acuerdo al primer criterio de diseño será en forma de cubo.

## Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero



*Figura 4.1 Lugares por donde ocurre la transferencia de calor*  
*Fuente: Rivas López Francisco Enrique, "Diseño, construcción y determinación de la eficiencia de un horno de reverbero", Tesis. 2006. UNAM.*

En la figura 4.1 la flecha gruesa con dirección hacia abajo, indica la entrada de calor sobre esa cara, mientras que las flechas con línea seccionada indican la transferencia de calor hacia el exterior.

Las medidas iniciales serán:

$$V = L^3$$

$$L = \sqrt[3]{15.702}$$

$$L = 2.504 \text{ m}$$

Donde:

$L$  = Longitud de la tina

$V$  = Volumen de la tina

Comenzando a calcular el MS más adecuado, se mantienen el volumen y ancho constante, se va disminuyendo la altura de 5 en 5 cm. El MS da una idea de qué tan rápido podría enfriarse un cuerpo de determinado volumen y con un área de transferencia de calor específica.

$$MS = \frac{V}{A}$$

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

Donde:

$MS$  = Módulo de solidificación

$V$  = Volumen de la tina

$A$  = Área de la tina

$$MS = \frac{V}{2(z * y) + 2(x * z) + (x * y)}$$

El criterio para elegir las dimensiones es en el que el MS sea mayor, ya que indica cuantitativamente las dimensiones con las que la tina se mantiene más tiempo caliente.

TABLA 4.1 VARIACIÓN DEL MS CON RESPECTO A LAS LONGITUDES					
	Largo	Alto	Ancho	Volumen	MS=V/A
1	2.50419	2.50419	2.50419	15.70370	0.50084
2	2.55521	2.45419	2.50419	15.70370	0.50281
3	2.60835	2.40419	2.50419	15.70370	0.50470
4	2.66375	2.35419	2.50419	15.70370	0.50652
5	2.72155	2.30419	2.50419	15.70370	0.50825
6	2.78192	2.25419	2.50419	15.70370	0.50989
7	2.84502	2.20419	2.50419	15.70370	0.51142
8	2.91106	2.15419	2.50419	15.70370	0.51284
9	2.98023	2.10419	2.50419	15.70370	0.51414
10	3.05277	2.05419	2.50419	15.70370	0.51530
11	3.12893	2.00419	2.50419	15.70370	0.51631
12	3.20899	1.95419	2.50419	15.70370	0.51716
13	3.29325	1.90419	2.50419	15.70370	0.51783
14	3.38205	1.85419	2.50419	15.70370	0.51831
15	3.47578	1.80419	2.50419	15.70370	0.51858
16	<b>3.57485</b>	<b>1.75419</b>	<b>2.50419</b>	<b>15.70370</b>	<b>0.51862</b>
17	3.67974	1.70419	2.50419	15.70370	0.51841
18	3.79096	1.65419	2.50419	15.70370	0.51793
19	3.90912	1.60419	2.50419	15.70370	0.51716
20	4.03488	1.55419	2.50419	15.70370	0.51606
21	4.16900	1.50419	2.50419	15.70370	0.51461
22	4.31234	1.45419	2.50419	15.70370	0.51279
23	4.46590	1.40419	2.50419	15.70370	0.51055
24	4.63079	1.35419	2.50419	15.70370	0.50787
25	4.80832	1.30419	2.50419	15.70370	0.50470

Tabla 4.1 Variación del MS con respecto a las longitudes

Fuente: Elaboración propia.

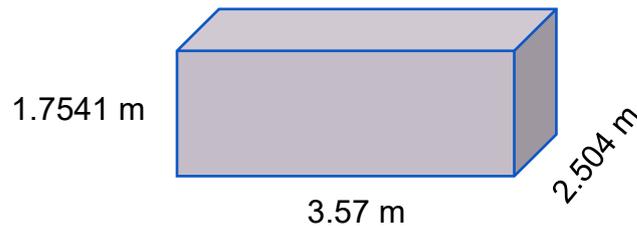
## Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

Las dimensiones que proporcionan una mayor superficie de contacto de la flama hacia el metal líquido y un MS alto, por lo que estas son las dimensiones finales de la tina de metal líquido de la cámara de contención.

*Largo* = 3.57 m

*Ancho* = 2.504 m

*Alto* = 1.7541 m



*Figura 4.2 Medidas finales para la cuba del horno*  
*Fuente: Elaboración propia*

### 4.2 CÁMARA DE FUSIÓN Y DE CONTENCIÓN.

Las dimensiones finales de la cámara de contención están en función de las dimensiones de la cámara de fusión, esta última se ubica por encima del nivel del baño. El piso de la cámara de fusión deberá tener una inclinación entre 10° y 15° para garantizar que el metal fundido fluya con facilidad hacia la cámara de contención. La inclinación propuesta para nuestro horno será de 13°.

El largo del piso de la cámara de fusión será del 60 % de la longitud de la cuba del horno, y la altura de la cámara será del doble a la altura del baño metálico, permitiendo cargar las 40 toneladas de aluminio en la misma.

Una pared refractaria del mismo espesor divide a las cámaras con solo una abertura de 0.5m \* 0.5m que permite la transferencia de aluminio entre ellas.

Aplicando lo anterior y considerando la configuración geométrica del horno, las dimensiones finales para la cámara de fusión y contención son las siguientes:



### 4.3 CÁLCULO DE LOS ESPESORES DE LAS PAREDES

El cálculo de los espesores de los aislantes para el horno de realizará con el algoritmo para calcular paredes compuestas.

Se dividirá en dos secciones que será las paredes laterales y la bóveda que contarán con tres capas y la cuba del horno que llevara solo dos.

#### 4.3.1 Cálculo de los espesores de las paredes laterales y la bóveda.

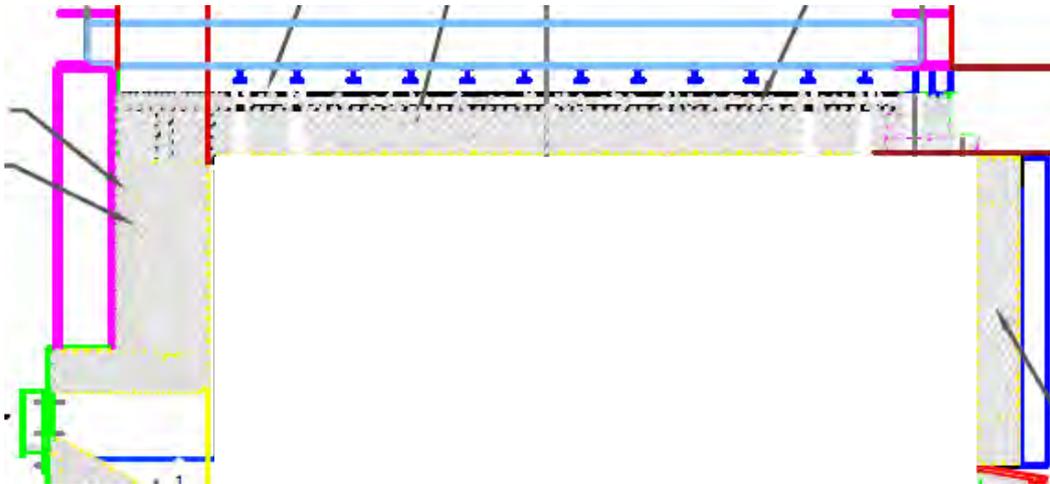


Figura 4.4 Representación de los espesores de los aislantes de las paredes laterales y bóveda  
Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)

Capa	Material	Espesor (in)	K	Espesor (ft)
1	LW 28	9	$(0.00003 * T) + 0.1541$	0.755033557
2	LHV-124 PDS	9	$(0.00000003 * T^2) - (0.00005 * T) + 0.1499$	0.755033557
3	Thermbrake 403 G	4.5	$(-0.00000005 * T^2) + 0.0001 * T + 0.085$	0.377516779

Los criterios para elegir las temperaturas fueron los siguientes:

1. T interior: Temperatura a la que trabaja el horno para fundir aluminio.
2. T exterior: Temperatura segura para los operarios.
3. T ambiente: Temperatura estándar.

Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

$T_{ambiente}$	25 °C	77 °F
$T_{interior}$	1150 °C	2102 °F
$T_{exterior\ supuesta}$	70 °C	158 °F
$\epsilon_{LW\ 28}$	0.94	
$\epsilon_{LHV-124\ PDS}$		
$\epsilon_{Thermbrake\ 403\ G}$		
$V$ (ft/s)		
$\sigma$ (BTU/h ft <sup>2</sup> R <sup>4</sup> )		

1. Suponer una  $T_{ext}$

$$T_{ext\ supuesta} = 158^{\circ}F$$

2. Cálculo de las conductividades térmicas de los  $n - 1$  materiales (LW-28 y LHV-124 PDS) evaluados a una temperatura intermedia entre  $T_{int}$  y  $T_{ext\ sup}$

$$\bar{T} = \frac{T_{int} + T_{ext}}{2} = \frac{2101 + 158}{2} = 1130^{\circ}F$$

$$k_1 = (0.00003 * T) + 0.1541$$

$$k_2 = (0.00000003 * T^2) - (0.00005 * T) + 0.1499$$

$$k_1 = (0.00003 * 1130) + 0.1541$$

$$k_1 = 0.188 \frac{BTU}{h\ ft\ ^{\circ}F}$$

$$k_2 = (0.00000003 * 1130^2) - (0.00005 * 1130) + 0.1499$$

$$k_2 = 0.131 \frac{BTU}{h\ ft\ ^{\circ}F}$$

3. Cálculo de  $q_{conv-rad}$

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

$$q_{conv-rad} = (h_{conv} + h_{rad})(T_{ext} - T_{amb})$$

$$h_{conv} = 0.3 * (T_{ext} - T_{amb})^{0.25} * w$$

$$w = \sqrt{0.87586 V + 1} \quad V \approx 0 \quad \text{velocidad del viento}$$

$$w = \sqrt{(0.87586 * 0) + 1} \quad w = 1$$

$$h_{conv} = 0.3 * (158 - 77)^{0.25} * 1$$

$$h_{conv} = 0.9 \frac{BTU}{h ft^{\circ}F}$$

$$h_{rad} = \frac{\sigma \varepsilon [(T_{ext sup} + 459.67)^4 - (T_{amb} + 459.67)^4]}{T_{ext sup} - T_{amb}}$$

$$h_{rad} = \frac{0.1713 * 10^{-8} (0.94) [(158 + 459.67)^4 - (77 + 459.67)^4]}{158 - 77}$$

$$h_{rad} = 0.9929 \frac{BTU}{h ft^{\circ}F}$$

$$q_{conv-rad} = \left(0.9 \frac{BTU}{h ft^{\circ}F} + 0.99294 \frac{BTU}{h ft^{\circ}F}\right) (158^{\circ}F - 77^{\circ}F)$$

$$q_{conv-rad} = 153.3281 \frac{BTU}{h ft^2}$$

4. Igualando  $q_{conv-rad} = q_{cond}$

$$q_{cond} = 153.3281 \frac{BTU}{h ft^2}$$

5. Calcular las temperaturas de interfase

$$q_1 = \frac{T_{int} - T_{1-2}}{R_1}$$

$$T_{1-2} = T_{int} - q \left( \frac{L_1}{k_1} \right)$$

$$T_{1-2} = 2102^\circ F - 153.3281 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2} \left( \frac{1.1325 \text{ ft}}{0.188 \frac{BTU}{h \text{ ft}^\circ F}} \right)$$

$$T_{1-2} = 1486.21^\circ F$$

$$T_{2-3} = T_{1-2} - q \left( \frac{L_2}{k_2} \right)$$

$$T_{2-3} = 1486.21^\circ F - 153.3281 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2} \left( \frac{0.75503 \text{ ft}}{0.1317 \frac{BTU}{h \text{ ft}^\circ F}} \right)$$

$$T_{2-3} = 607.2328^\circ F$$

6. Calculo de  $\bar{T}$  de cada material con las temperaturas de interfase

$$\bar{T}_1 = \frac{T_{int} + T_{1-2}}{2} \qquad \bar{T}_2 = \frac{T_{1-2} + T_{ext}}{2}$$

$$\bar{T}_1 = \frac{2102^\circ F + 1486.21^\circ F}{2} \qquad \bar{T}_1 = 1794.1067^\circ F$$

$$\bar{T}_2 = \frac{1486.21^\circ F + 607.2328^\circ F}{2} \qquad \bar{T}_2 = 1046.723^\circ F$$

$$\bar{T}_3 = \frac{607.2328^\circ F + 158^\circ F}{2} \qquad \bar{T}_3 = 382.6163^\circ F$$

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

7. Calculo de la conductividad térmica de cada material (LW 28. LHV-124-PDS y Thermbrake 403 G) a su respectiva  $\bar{T}$

$$\bar{k}_1 = (0.00003 * \bar{T}_1) + 0.1541$$

$$\bar{k}_2 = (0.00000003 * \bar{T}_2^2) - (0.00005 * \bar{T}_2) + 0.1499$$

$$\bar{k}_3 = (-0.00000005 * \bar{T}_3^2) + (0.0001 * \bar{T}_3) + 0.085$$

$$\bar{k}_1 = (0.00003 * 1794.106 \text{ } ^\circ F) + 0.1541 \qquad \bar{k}_1 = 0.2079 \frac{BTU}{h \text{ ft } ^\circ F}$$

$$\bar{k}_2 = (0.00000003 * 1046.72^2 \text{ } ^\circ F) - (0.00005 * 1046.72) + 0.1499$$

$$\bar{k}_2 = 0.1304 \frac{BTU}{h \text{ ft } ^\circ F}$$

$$\bar{k}_3 = (-0.00000005 * 382.6163^2) + (0.0001 * 382.6163) + 0.085$$

$$\bar{k}_3 = 0.1159 \frac{BTU}{h \text{ ft } ^\circ F}$$

8. Calculo de  $q_{cond}$  para la pared compuesta

$$q_{cond} = \frac{(T_{int} - T_{ext})}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3}}$$

$$q_{cond} = \frac{(2102^\circ F - 158^\circ F)}{\frac{0.75503 \text{ ft}}{0.2079 \frac{BTU}{h \text{ ft } ^\circ F}} + \frac{0.75503 \text{ ft}}{0.1304 \frac{BTU}{h \text{ ft } ^\circ F}} + \frac{0.37751 \text{ ft}}{0.1159 \frac{BTU}{h \text{ ft } ^\circ F}}}$$

$$q_{cond} = 153.359 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2}$$

## Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

9. Igualando  $q_{cond} = q_{conv-rad}$

$$q_{conv-rad} = 153.359 \frac{BTU}{h ft^2}$$

10. Encontrar una nueva  $T_{ext}$  para la cual las ecuaciones de  $q_{conv-rad}$  arrojen el valor obtenido en el paso anterior

$$q_{conv-rad} = (h_{conv} + h_{rad})(T_{ext} - T_{amb})$$

$$153.359 \frac{BTU}{h ft^2} = \left\{ [0.3 * (T_{ext} - T_{amb})^{0.25} * w] + \left( \frac{\sigma \varepsilon [(T_{ext} + 459.67)^4 - (T_{amb} + 459.67)^4]}{T_{ext} - T_{amb}} \right) \right\} \{T_{ext} - T_{amb}\}$$

11. Comparar  $|T_{ext\ supuesta} - T_{ext\ calculada}| < 0.5\ ^\circ F$

Iteración	$T_{ext}$	$q_{conv-rad}$ (paso 9)	$q_{conv-rad}$ (paso 10)	$ T_{ext\ supuesta} - T_{ext\ calculada}  < 0.5\ ^\circ F$
1	158	153.3597328	153.360373	-14.52
2	172.52	147.0068447	147.0188824	3.17
3	169.35	148.3884061	148.3733189	-0.68
4	170.03	148.092742	148.0942012	0.14
	<b>169.89</b>			

$$|170.03 - 169.89| = 0.14 \rightarrow < 0.5\ ^\circ F$$

12. Si con los espesores propuestos no se alcanza una  $T_{ext}$  parecida a la necesitada se tendrá que aumentar o disminuir dichas medidas y volver a repetir los cálculos desde el paso 1.

## Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

Resultados de espesores y temperatura exterior para la bóveda y las paredes laterales.

Capa	Material	Espesor (in)
1	LW 28	9
2	LHV-124 PDS	9
3	Thermbrake 403 G	4.5

$$T_{\text{exterior}} = 169.89 \text{ }^{\circ}\text{F} = 76.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

### 4.3.2 Cálculo de los espesores de la cuba del horno

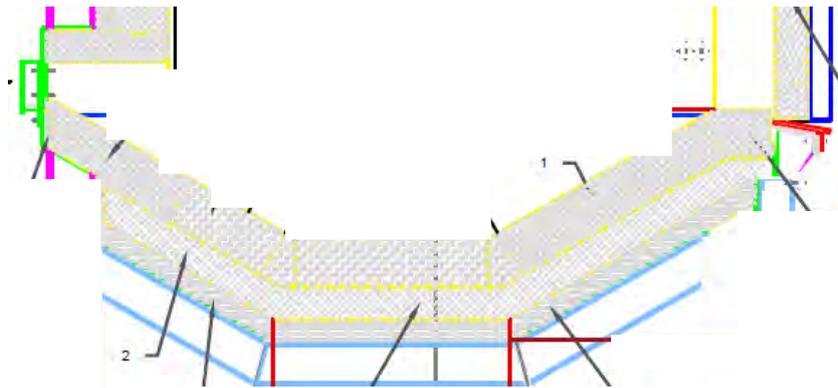


Figura 4.4 Representación de los espesores de los aislantes de la cuba

Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)

Capa	Material	Espesor (in)	$K$	Espesor (ft)
1	LW 28	9	$(0.00003 * T) + 0.1541$	0.755033557
2	LW 20 PDS	9	$(0.00004 * T) + 0.0729$	0.755033557

Los criterios para elegir las temperaturas fueron los siguientes:

1.  $T_{\text{interior}}$ : Temperatura a la que trabaja el horno para fundir aluminio.
2.  $T_{\text{exterior}}$ : Temperatura segura para los operarios.
3.  $T_{\text{ambiente}}$ : Temperatura estándar.

Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

$T_{ambiente}$	25 °C	77 °F
$T_{interior}$	750 °C	1382 °F
$T_{exterior\ supuesta}$	80 °C	176 °F
$\epsilon_{LW\ 28}$	0.94	
$\epsilon_{LW\ 20\ PDS}$	0.75	
$V$ (ft/s)	0	
$\sigma$ (BTU/h ft <sup>2</sup> R <sup>4</sup> )	1.713E-09	

1. Suponer una  $T_{ext}$

$$T_{ext\ supuesta} = 176^{\circ}F$$

2. Cálculo de las conductividades térmicas de los  $n - 1$  materiales (LW 28) evaluados a una temperatura intermedia entre  $T_{int}$  y  $T_{ext\ sup}$

$$\bar{T} = \frac{T_{int} + T_{ext}}{2} = \frac{2101 + 176}{2} = 779^{\circ}F$$

$$k_1 = (0.00003 * T) + 0.1541$$

$$k_2 = (0.00004 * T) + 0.0729$$

$$k_1 = (0.00003 * 779) + 0.1541$$

$$k_1 = 0.1774 \frac{BTU}{h\ ft\ ^{\circ}F}$$

3. Cálculo de  $q_{conv-rad}$

$$q_{conv-rad} = (h_{conv} + h_{rad})(T_{ext} - T_{amb})$$

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

$$h_{conv} = 0.3 * (T_{ext} - T_{amb})^{0.25} * w$$

$$w = \sqrt{0.87586 V + 1}$$

$V \approx 0$  velocidad del viento

$$w = \sqrt{(0.87586 * 0) + 1}$$

$$w = 1$$

$$h_{conv} = 0.3 * (176 - 77)^{0.25} * 1$$

$$h_{conv} = 0.946302 \frac{BTU}{h ft^{\circ}F}$$

$$h_{rad} = \frac{\sigma \varepsilon [(T_{ext sup} + 459.67)^4 - (T_{amb} + 459.67)^4]}{T_{ext sup} - T_{amb}}$$

$$h_{rad} = \frac{0.1713 * 10^{-8} (0.94) [(176 + 459.67)^4 - (77 + 459.67)^4]}{176 - 77}$$

$$h_{rad} = 1.042402 \frac{BTU}{h ft^{\circ}F}$$

$$q_{conv-rad} = \left(0.946302 \frac{BTU}{h ft^{\circ}F} + 1.0424024 \frac{BTU}{h ft^{\circ}F}\right) (176^{\circ}F - 77^{\circ}F)$$

$$q_{conv-rad} = 196.881807 \frac{BTU}{h ft^2}$$

4. Igualando  $q_{conv-rad} = q_{cond}$

$$q_{cond} = 196.881807 \frac{BTU}{h ft^2}$$

5. Calcular las temperaturas de interfase

$$q_1 = \frac{T_{int} - T_{1-2}}{R_1}$$

$$T_{1-2} = T_{int} - q \left( \frac{L_1}{k_1} \right)$$

$$T_{1-2} = 2102^\circ F - 196.881807 \frac{BTU}{h \text{ ft}^2} \left( \frac{0.7550 \text{ ft}}{0.1774 \frac{BTU}{h \text{ ft}^\circ F}} \right)$$

$$T_{1-2} = 544.3802^\circ F$$

6. Calculo de  $\bar{T}$  de cada material (LW 28 y LW 20 PDS) con las temperaturas de interfase

$$\bar{T}_1 = \frac{T_{int} + T_{1-2}}{2} \qquad \bar{T}_2 = \frac{T_{1-2} + T_{ext}}{2}$$

$$\bar{T}_1 = \frac{2102^\circ F + 544.38^\circ F}{2} \qquad \bar{T}_1 = 963.19^\circ F$$

$$\bar{T}_2 = \frac{544.38^\circ F + 176^\circ F}{2} \qquad \bar{T}_2 = 360.19^\circ F$$

7. Calculo de la conductividad térmica de cada material (LW 28 y LW 20 PDS) a su respectiva  $\bar{T}$

$$\bar{k}_1 = (0.00003 * \bar{T}_1) + 0.1541$$

$$\bar{k}_2 = (0.00004 * \bar{T}_2) + 0.0729$$

$$\bar{k}_1 = (0.00003 * 963.19^\circ F) + 0.1541 \qquad \bar{k}_1 = 0.18299 \frac{BTU}{h \text{ ft}^\circ F}$$

**Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero**

$$\bar{k}_2 = (0.00004 * 360.19 \text{ } ^\circ F) + 0.0729$$

$$\bar{k}_2 = 0.0873 \frac{BTU}{h \text{ } ft \text{ } ^\circ F}$$

**8.** Calculo de  $q_{cond}$  para la pared compuesta

$$q_{cond} = \frac{(T_{int} - T_{ext})}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}}$$

$$q_{cond} = \frac{(2102^\circ F - 176^\circ F)}{\frac{0.75503 \text{ } ft}{0.18299 \frac{BTU}{h \text{ } ft \text{ } ^\circ F}} + \frac{0.75503 \text{ } ft}{0.0873 \frac{BTU}{h \text{ } ft \text{ } ^\circ F}}$$

$$q_{cond} = 94.411 \frac{BTU}{h \text{ } ft^2}$$

**9.** Igualando  $q_{cond} = q_{conv-rad}$

$$q_{conv-rad} = 94.411 \frac{BTU}{h \text{ } ft^2}$$

**10.** Encontrar una nueva  $T_{ext}$  para la cual las ecuaciones de  $q_{conv-rad}$  arrojen el valor obtenido en el paso anterior

$$q_{conv-rad} = (h_{conv} + h_{rad})(T_{ext} - T_{amb})$$

$$94.411 \frac{BTU}{h \text{ } ft^2} = \left\{ [0.3 * (T_{ext} - T_{amb})^{0.25} * w] + \left( \frac{\sigma \varepsilon [(T_{ext} + 459.67)^4 - (T_{amb} + 459.67)^4]}{T_{ext} - T_{amb}} \right) \right\} \{T_{ext} - T_{amb}\}$$

**11.** Comparar  $|T_{ext \text{ } supuesta} - T_{ext \text{ } calculada}| < 0.5 \text{ } ^\circ F$

Iteración	$T_{ext}$	$q_{conv-rad}$ (paso 9)	$q_{conv-rad}$ (paso 10)	$ T_{ext \text{ } supuesta} - T_{ext \text{ } calculada}  < 0.5 \text{ } ^\circ F$
1	179	94.41101425	94.41251091	37.485
2	141.515	102.5885194	102.5994295	-4.537
3	146.052	101.544693	101.5950345	0.552
4	145.5	101.672236	101.6859179	0
	145.5			

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

$$|145.5 - 145.5| = 0 \rightarrow < 0.5 \text{ } ^\circ F$$

12. Si con los espesores propuestos no se alcanza una  $T_{ext}$  parecida a la necesitada se tendrá que aumentar o disminuir dichas medidas y volver a repetir los cálculos desde el paso 1.

#### Resultados de espesores y temperatura exterior para la cuba.

Capa	Material	Espesor (in)
1	LW 28	9
2	LW 20 PDS	9

$$T_{exterior} = 145.5 \text{ } ^\circ F = 63.08 \text{ } ^\circ C$$

#### 4.3.2 Cantidad de calor requerido

1. Fusión

$$Q_{fusión} = \sum Q_{sol}, Q_{liq}, \Delta H_{fusión}$$

$$Q_{sol} = W * C_p * \Delta T \quad Q_{sol}, liq = \text{calor de sólido, líquido. (1)}$$

$Q = \text{Calor}$

$\Delta T = \text{Diferencia entre dos valores de Temperatura}$

$W = \text{Flujo másico}$

$C_{pAl} = \text{Calor específico del aluminio}$

$qr = \text{Flux de calor de radiación}$

$$W = 11013.216 \frac{lb}{hr}$$

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

$$CpAl@660^{\circ}C f(T) = 7 + 0.0032(T) = .3708 \frac{Cal}{gr^{\circ}C} \quad (2)$$

$$CpAl@660^{\circ}C = .6674 \frac{BTU}{lb^{\circ}C}$$

$$\Delta T = T_{fusión} - T_{ambiente} = 660^{\circ}C - 23^{\circ}C \quad (3)$$

$$\Delta T = 637^{\circ}C$$

$$Q_{sol} = \left(11013.216 \frac{lb}{hr}\right) \left(.6674 \frac{BTU}{lb^{\circ}C}\right) (637^{\circ}C) \quad (4)$$

$$Q_{sol} = 4663148.738 \frac{BTU}{hr}$$

$$\Delta H_{fusión} = 171.6361 \frac{BTU}{lb}$$

$$Q_{fusión} = \left(171.6361 \frac{BTU}{lb}\right) \left(11013.216 \frac{lb}{hr}\right)$$

$$Q_{Fusión} = 1890265.143 \frac{BTU}{hr}$$

$$Q_{liquido} = (T_{pouring} - T_{fusión})(CpAl @ T_{pouring})(W) \quad (5)$$

$$CpAl@750^{\circ}C f(T) = 7 + 0.0032(T) = .3815 \frac{Cal}{gr^{\circ}C}$$

$$CpAl@750^{\circ}C = .6867 \frac{BTU}{lb^{\circ}C}$$

$$Q = (750^{\circ}C - 660^{\circ}C) \left(.6867 \frac{BTU}{lb^{\circ}C}\right) \left(11013.216 \frac{lb}{hr}\right)$$

$$Q_{liquido} = 680649.788 \frac{BTU}{hr}$$

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

$$Q_{fusión} = \left(4663148.738 \frac{BTU}{hr}\right) + \left(1890265.143 \frac{BTU}{hr}\right) + \left(680649.788 \frac{BTU}{hr}\right)$$

$$Q_{1fusión} = 7234063.669 \frac{BTU}{hr}$$

#### 2. Pérdidas del cuerpo negro

$$qr = \sigma(T_{gases}^4 - T_{amb}^4) \quad (6)$$

$$\sigma = 1.7113 * 10^{-9} \frac{BTU}{hr \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ R}$$

$$T_{gases} = 1250 \text{ } ^\circ C = 2561.67 \text{ } ^\circ R$$

$$T_{amb} = 25 \text{ } ^\circ C = 533.67 \text{ } ^\circ R$$

$$qr = 1.7113 * 10^{-9} \frac{BTU}{hr \text{ ft}^2 \text{ } ^\circ R} (2561.67 \text{ } ^\circ R^4 - 533.67 \text{ } ^\circ R^4) = 73552.9426 \frac{BTU}{hr \text{ ft}^2}$$

$$Area_{chimenea} = 8 \text{ ft}^2$$

$$Q = qr * A_{chimenea} \quad (7)$$

$$Qr = \left(73552.9426 \frac{BTU}{hr \text{ ft}^2}\right) (8 \text{ ft}^2)$$

$$Q_{2r} = 588423.5413 \frac{BTU}{hr}$$

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

### 3. Pérdidas a través de las paredes (desarrollado anteriormente)

Area bóveda y paredes  $482.5917 \text{ ft}^2$

$$Q_{\text{bóveda y Paredes Laterales}} = 74998.3692 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$q_r \text{ Cuba} = 224.8318 \frac{\text{BTU}}{\text{hr ft}^2}$$

Area cuba =  $205.2057 \text{ ft}^2$

$$Q_{\text{cuba}} = 4136.7689 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$Q_{\text{total}} = Q_{\text{bóveda y paredes}} + Q_{\text{cuba}}$

$$Q_{3\text{total}} = 121135.1361 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$Q_{\text{Total requerido por el horno}} = Q_{1\text{fusión}} + Q_{2r} + Q_{3\text{ total}} \text{ (8)}$

$$Q_{\text{total requerido}} = 7586771.815 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

### 4. Cálculo de la eficiencia del horno

$$\eta = \frac{(T_{\text{flama}} - T_{\text{gases de salida}})}{(T_{\text{flama}} - T_{\text{ambiente}})} * 100 \text{ (9)}$$

$$T_{\text{flama Gas natural-aire}} = 1927 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{gases de salida}} = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ambiente}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

#### Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

$$\eta = \frac{(1927^{\circ}\text{C} - 1250^{\circ}\text{C})}{(1927^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})} * 100$$

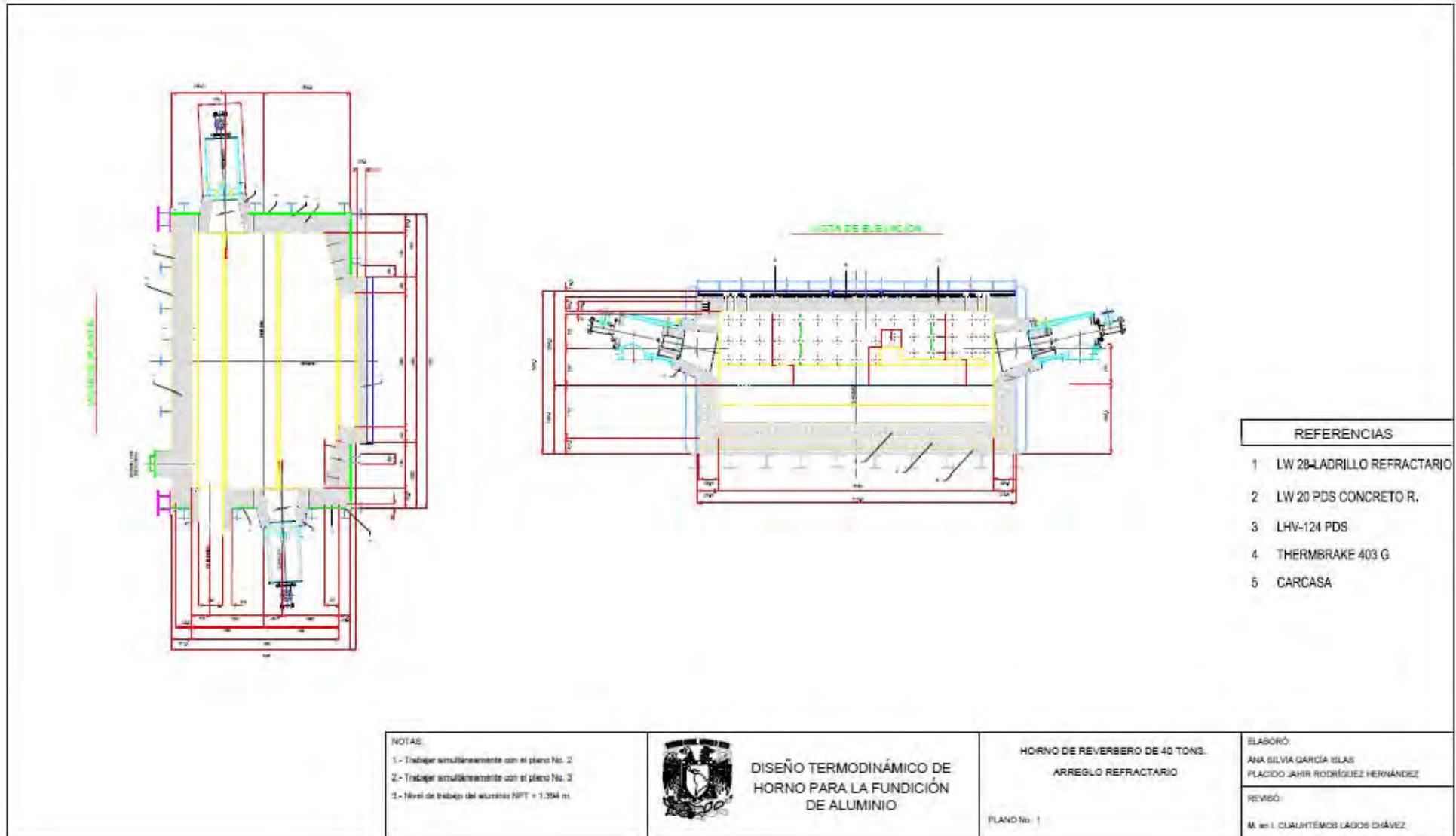
$$\eta = 35.59 \%$$

5. Cálculo total real de calor requerido

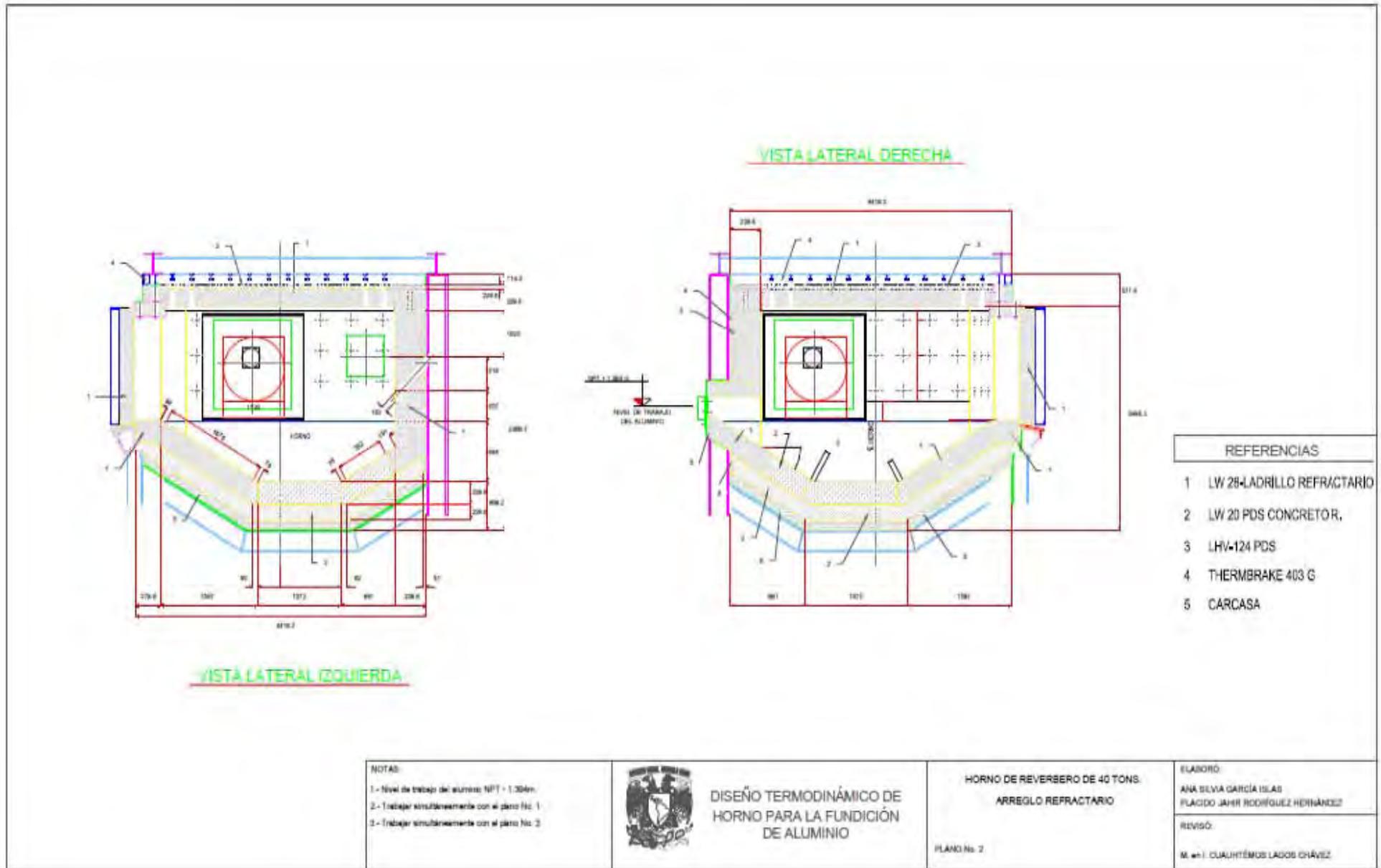
$$QT = \frac{Q_{total\ requerido}}{\eta} \quad (10)$$

$$QT = \frac{7586771.815 \frac{BTU}{hr}}{0.3559} = 21317144.75 \frac{BTU}{hr}$$

4.4 ARREGLO REFRACTARIO

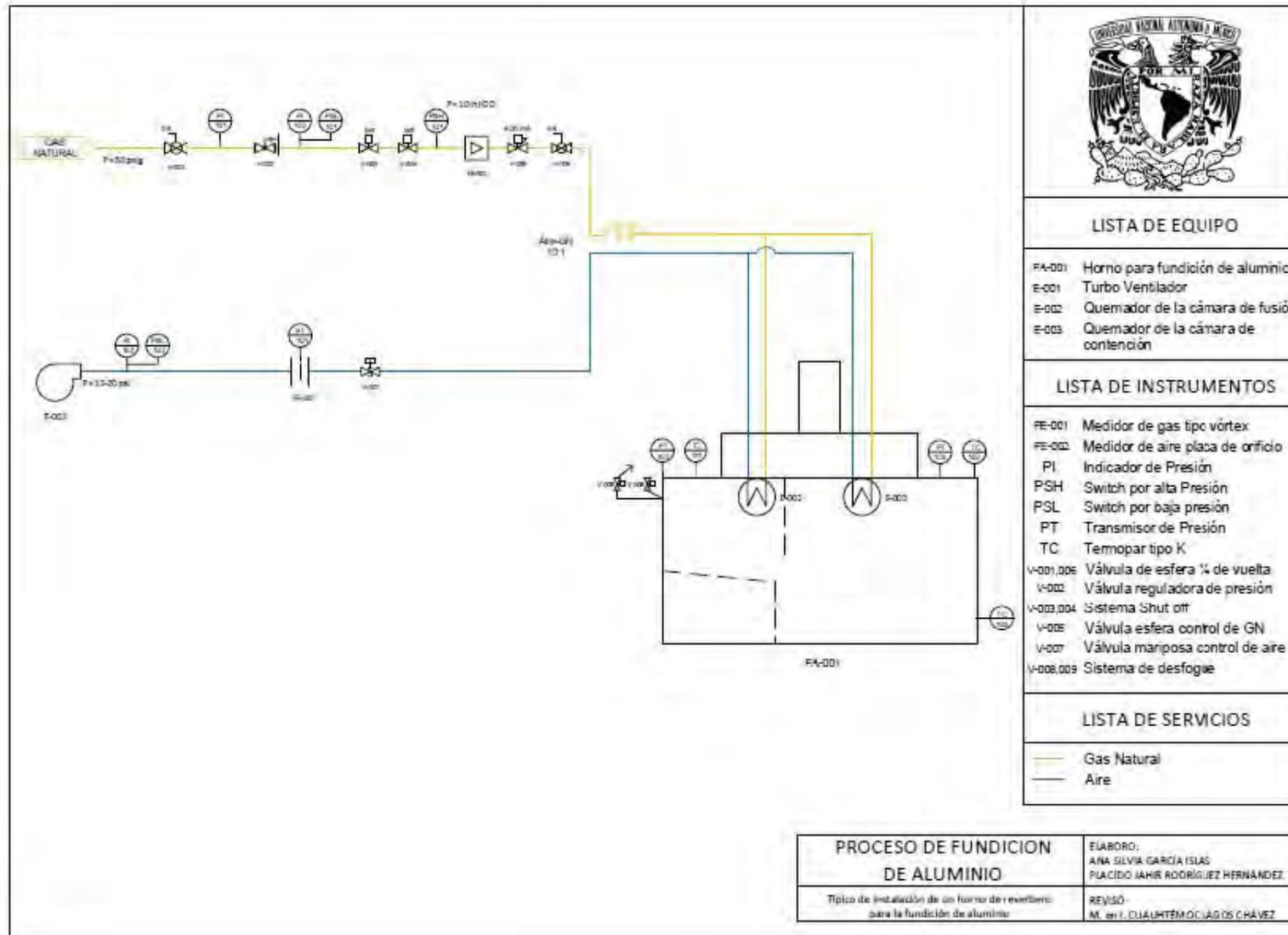


## Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero



## Capítulo 4. Diseño del horno de reverbero

### 4.5 TÍPICO DE INSTALACIÓN



## CAPITULO 5. ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA

---

### 5.1 QUEMADORES AUTORECUPERATIVOS

Los quemadores con recuperación de calor integrada constituyen el método más eficiente para recuperar el calor sensible portado por los productos de combustión en hornos industriales operando a altas temperaturas.

Los quemadores auto-regenerativos cuentan con un lecho cerámico a través del cual se hacen pasar los productos de combustión antes de enviarlos a la chimenea, con lo que la energía sensible portada por los gases se acumula en el lecho cerámico, luego de un período el sistema se conmuta haciéndose pasar por el lecho aire frío que roba la energía acumulada en el lecho y la devuelve de nuevo al sistema con efectividades de recuperación de calor entre 70 y 85%, permitiendo obtener importante ahorros de combustible dependiendo de la temperatura de operación del proceso.

Estos quemadores se aplican como sistemas de combustión en los siguientes tipos de hornos:

- Horno de crisol auto-regenerativo para la fusión de metales no ferrosos.
- Horno de reverbero auto-regenerativo para la fusión de metales no ferrosos.
- Fragua de forjado auto-regenerativa para el calentamiento de metales ferrosos.
- Quemadores regenerativos de calentamiento directo para TT de metales ferrosos.

Adicionalmente se han estado desarrollando recientemente quemadores regenerativos con nuevas características como son la operación en modo diluido en régimen de combustión sin llama, para la mejora de la uniformidad de la temperatura y la transferencia de calor además de la reducción de emisiones de NO<sub>x</sub>, que tienen mejores efectividades de recuperación de calor además de hacer los quemadores más compactos y livianos, permitiendo reducir la escala de la tecnología para ser empleados en hornos de baja potencia. También se han desarrollado los

quemadores regenerativos “de una llama” que no necesitan la operación por parejas, sino que un solo quemador es capaz de realizar las dos tareas de combustión y recuperación de calor.

Para la instalación de este quemador se debe analizar el estado actual del horno (aislamientos, fugas e infiltraciones) para poder aprovechar su ventaja comparativa de tener alta eficiencia energética. Tienen mayor efectividad en la recuperación de calor y en consecuencia superior eficiencia energética, como también son los más apropiados para procesos de muy altas temperaturas (mayores de 1000°C).

### 5.1.1 Impacto por el uso de quemadores autorecuperativos.

#### **Desarrollo social:**

- Garantizar la competitividad de las PyMES del sector metalmeccánico a través de la reducción de los costos de producción, permitiendo la generación de empleo en las principales ciudades con vocación industrial del país.
- Mejora de las condiciones de salud ocupacional en los recintos de trabajo en las Pymes, como consecuencia de la disminución de emisión de material particulado, reducción de contaminación térmica y disminución de niveles de ruido.
- Aprendizaje tecnológico como resultado de la transferencia tecnológica, con lo cual se puede disponer de proyectos instalados, para dar a otros sectores e incrementar su eficiencia energética y reducir emisiones contaminantes.

#### **Desarrollo económico:**

- Mejora de la productividad y competitividad de pequeñas y medianas empresas, como consecuencia de la reducción de costos energéticos, rapidez y uniformidad del calentamiento y mejor calidad de los productos.
- Contribución a la estrategia nacional de transformación productiva nacional, desarrollo de sectores de clase mundial y mejorar en la capacidad exportadora, al ser posible el suministro de bienes de calidad y costos competitivos a sectores estratégicos como el automotriz, construcción, petroquímico y minero.

### Desarrollo ambiental:

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero como consecuencia del aumento de la eficiencia energética.
- Reducción de la contaminación de suelos y aguas, por la disminución de vertimiento de escorias y cenizas.
- Reducción de las emisiones de óxidos nitrosos y monóxido de carbono.
- Contribución a la estrategia nacional de desarrollo bajo en carbono.

### 5.2 QUEMADORES AUTOREGENERATIVOS

Los quemadores auto-recuperativos cuentan con un intercambiador de calor gas – gas incorporado en el cuerpo del quemador que permitan entregar parte de la energía sensible de los productos de combustión al aire de combustión. Estos quemadores cuentan con un sistema eyección que permiten la extracción de los gases a través del mismo quemador.

A diferencia de los quemadores regenerativos, los quemadores recuperativos no trabajan en ciclos, por lo que el sistema de control es más simple, tampoco cuenta con lechos cerámicos, aunque los nuevos equipos cuentan con cañones cerámicos en carburo de silicio que actúan como recuperadores de calor, debido a esta mayor simplicidad los quemadores recuperativos tienen menores costos de inversión que los quemadores regenerativos, sin embargo su efectividad de recuperación de calor también es un poco menor, alrededor de 60-75%, por lo que son menos eficientes.

Para la selección de la tecnología más apropiada deberán balancearse las características del proceso y de los quemadores contra la inversión requerida y los costos de mantenimiento, de tal manera que se obtengan los mayores beneficios económicos. La aplicación de estos quemadores requiere inicialmente examinar el estado térmico de los hornos donde se implementarán, así por ejemplo si el horno en donde se instalará el quemador auto-recuperativo, se caracteriza por mal aislamiento de las paredes e infiltración de aire frío del exterior, la ventaja comparativa de esta tecnología se ve fuertemente reducida en tanto no se obtienen las eficiencias características de esta tecnología, cuando ella se aplique en hornos en condiciones óptimas de operación.

### 5.3 COMBUSTION OXIGENO-GAS NATURAL (OXY-FUEL)

En este tipo de aplicaciones, la principal ventaja de los Oxiquemadores es que permiten incrementar el nivel de producción en los procesos de fusión y que, adicionalmente, se logra un ahorro de combustible.

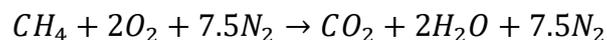
Aunque esta tecnología fue desarrollada principalmente para incrementar la productividad en los hornos eléctricos de arco (HEA), cuando éstos alcanzan su capacidad máxima de diseño, hoy en día su aplicación es muy diversa.

Para el proceso de combustión es necesario la presencia de 3 factores:

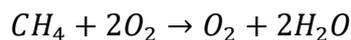
- Combustible
- Comburente (Oxígeno)
- Fuente de Ignición

La reacción genérica del proceso de combustión es:

Con aire:



Con oxígeno:



Mediante el correcto entendimiento de este proceso se pueden controlar las características reductora u oxidante de la flama y lograr la función de corte en el Oxiquemador.

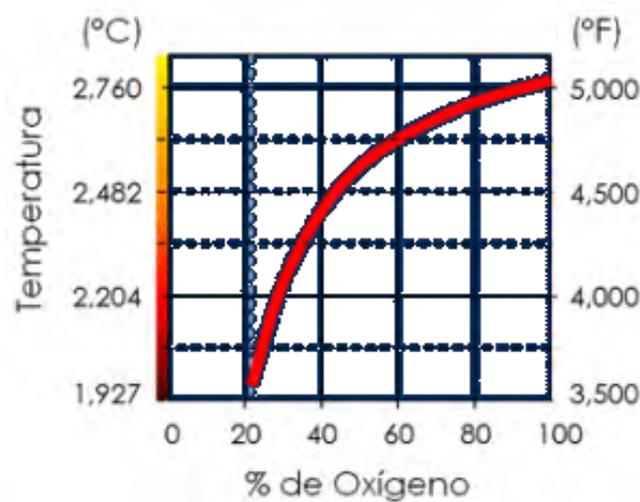
La ausencia de Nitrógeno en un sistema Oxiquemador permite alcanzar una mayor temperatura de flama y consecuentemente una mayor transferencia de calor, un máximo aprovechamiento del poder calorífico del combustible y el menor volumen de gases de combustión.

Cuando la capacidad instalada está saturada y se requiere incrementar la producción de metal líquido, acortar el ciclo de fusión o se requiere mayor temperatura de flama en el proceso (fusión, calcinación, etc.), es recomendable utilizar un Oxiquemador.

**Mejoras en el proceso:**

- Incremento de la producción.
- Ahorro de energía eléctrica.
- Bajo costo de inversión y alta rentabilidad con el Oxiquemador instalado.

Cuando la capacidad instalada está saturada y se requiere incrementar la producción, cuando se desea acortar los ciclos del proceso (de alta temperatura) y/o se requiere mayor temperatura de flama en el proceso (fusión, calcinación, etc.), es recomendable utilizar el sistema de combustión con Oxígeno.



*Figura 5.1 Incremento de la temperatura con el uso de Oxígeno*

*Fuente: [www.praxair.com](http://www.praxair.com)*

**Principales características del sistema:**

- Incremento de producción (entre 15 y 30%) debido a la reducción de la etapa de fusión
- Descenso rápido y uniforme de la carga (chatarra) debido a la característica oxidante de la flama que realiza la función de corte.
- Temperatura uniforme dentro del horno, atacando puntos fríos.
- Ahorro en el consumo de energía eléctrica entre 10 y 20%.
- Disminución del consumo de electrodos por kg de metal fundido (0.2 – 0.4 kg/ton).
- Instalación sencilla de los Oxiquemadores en las paredes del horno y su operación segura.

## Capítulo 5. Alternativas de optimización energética

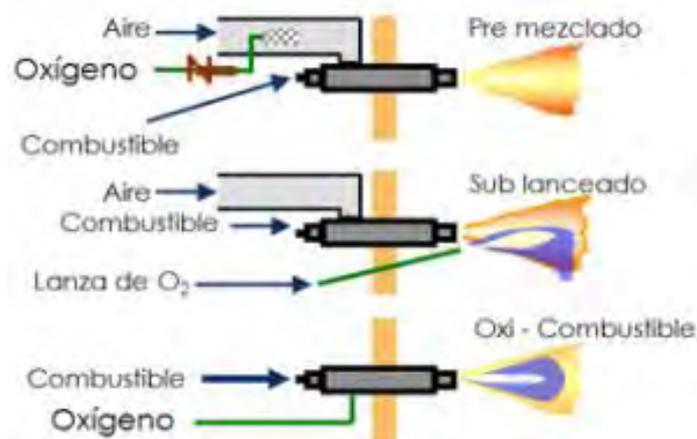


Figura 5.2 Comparativa de los quemadores

Fuente: [ww.praxair.com](http://ww.praxair.com)

### 5.4 RECUPERADOR DE CALOR

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 ordinarios con calentamiento por combustible y salida lateral de los gases. Los costes de adquisición, relativamente mayores, se amortizan en poco tiempo, en función del uso.

- Temperatura máxima de 1100 °C para aleaciones de aluminio y cinc
- Regulación de la potencia en dos fases: carga grande para servicio de fusión, carga pequeña para servicio de mantenimiento de calor con conmutación automática
- Moderno sistema de quemadores con óptima aplicación de la llama: alto grado de efectividad por servicio de sobrepresión para reducir el aire falso
- Intercambiador de calor en el canal de los gases de escape que aprovecha los gases calientes para precalentar el aire de combustión para los quemadores
- Hasta un 25 % de ahorro de energía frente a los hornos de fusión ordinarios con calentamiento por combustible y evacuación lateral de los gases de escape
- Tramo de gas consistente en regulador de presión, filtro de gas, manómetro y válvulas magnéticas
- Control seguro de llama
- Técnica de combustión con estructura que facilita el servicio, confeccionada en base a la norma DIN 746, parte 2

## Capítulo 5. Alternativas de optimización energética

- Diseñado para su uso con gas natural o gas líquido con 8,8 kWh/m<sup>3</sup> - 25,9 kWh/m<sup>3</sup>
- Presión previa requerida del gas: 70 mbar
- Posibilidad de uso con otros combustibles y/u otra presión previa del gas
- Gran potencia de fusión gracias a su potente quemador y su aislamiento de gran calidad
- Aislamiento multicapa construido con ladrillos de elevada porosidad como terminación de la cámara del horno
- Salida de emergencia para desviar la masa fundida de forma segura en caso de rotura del crisol
- Evacuación lateral de los gases de escape
  - Gran calidad de la masa fundida gracias al reborde reducido
  - Menor absorción de hidrógeno en la masa fundida
  - Baja exposición del operario a la carga térmica en la parte superior del crisol
- Selector-regulador de temperatura para la cámara del horno como protección contra la sobre temperatura. El regulador desconecta el calentamiento al alcanzarse una temperatura límite ajustada y la vuelve a conectar cuando la temperatura cae por debajo de este valor límite.

**Recuperadores estáticos a convección (500 a 1000 °C)** hornos de calentamiento galopante.

En estos recuperadores la transferencia de calor entre el fluido primario y el secundario se realiza por convección. Cuando la temperatura de los humos es muy elevada, se utiliza aire de dilución para reducirla.

**Recuperadores estáticos a radiación (900 a 1500 °C)** hornos de vidrio y de forja.

Recuperadores de radiación se utilizan cuando la temperatura de los humos es muy elevada y/o cuando contengan gran cantidad de polvo. La pérdida de carga lado humos es muy pequeña.

## CONCLUSIONES

---

Se adquirieron conocimientos sobre las bases teóricas del proceso de fundición de aluminio, las características de algunos tipos de hornos, sus usos y aplicaciones en los diferentes tipos de industrias.

De acuerdo a lo anterior, se seleccionó el tipo de horno de reverbero, por las características que ofrece es el más adecuado, ya que la reacción de Aire-Gas Natural no incide directamente sobre el aluminio, evitando oxidación excesiva sobre éste, disminuyendo su calidad.

Realizando la investigación sobre los criterios para el diseño de dicho horno, se encontró que el piso de la cámara de fusión debe tener una inclinación de  $13^\circ$ , con esto se asegura que al verter el aluminio fluya de manera fácil.

Para determinar el aislante adecuado, se consideró la temperatura de trabajo del horno, que en este caso fue de  $1150^\circ\text{C}$  y considerando que la temperatura exterior fuera segura para los operarios. Los materiales más adecuados son los concretos y ladrillos refractarios.

Se llevó a cabo un balance de energía para conocer el calor total requerido para la operación del horno de reverbero, teniendo en cuenta el calor de fusión, las pérdidas de cuerpo negro, así como las pérdidas a través de las paredes y la eficiencia.

Se cumplió con los objetivos, realizando una investigación sobre los fundamentos del proceso de fundición de aluminio, tipos de hornos y sus aplicaciones, criterios de diseño y alternativas de optimización energética y para llevar a cabo el diseño térmico del horno de fusión.

Los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Química, permitieron realizar la integración de información técnica para el diseño del horno de reverbero para la fusión de aluminio, aplicando los principios de balance de masa y energía, transferencia de calor, termodinámica y control de procesos.

## REFERENCIAS

---

### BIBLIOGRAFIA RELACIONADA

1. T. J. Brown, Bide, A. S. Walters, N. E. Idoine, R. A. Shaw, S. D. Hannis, P. A. J. Lusty, R. Kendall, "World Mineral Production 2005–09", British Geological Survey 2011.
2. Buenrostro Zagal, J. F., "Estudio del proceso de obtención de amonoalunita a partir de caolín para su transformación a alúmina" UAM, México, 2003.
3. H.E. Mingqian, B, "Analysis of the Recycling Method for Aluminum Soda Cans", University of Southern Queensland, Australia, 2006.
4. ASM Metals Handbook Volume 2, Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, 2001.
5. Carrasco Vasquez, V. H., "Tecnología Mecánica II", Universidad Mayor de San Simón, Colombia.
6. S. Bell, B. Davis, A. Javaid and E. Essadiqi, "Final Report on Scrap Management, Sorting and Classification of Aluminum", Canada.
7. Jirang Cui, Hans J. Roven, "Recycling of automotive aluminum", Transactions of Nonferrous Metals Society of China 20 (2010).
8. Mark E. Schlesinger, "Aluminum Recycling", University of Missouri-Rolla, USA, 2007.
9. Nakajima, Kenichi, "Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling" Environmental Science & Technology, Vol. 44, No. 14, 2010.
10. Kennedy, Scott, "Aluminum Melting and Metal Quality Processing Technology for Continuous High Quality Castings", American Foundry Society, 2001.
11. Snorre, Farner, "Remelting of Aluminium by Continuous Submersion of Rolled Scrap", Norwegian University of Science and Technology, Noruega, 2000.
12. W. Cahn, Robert, "Physical Metallurgy", Elsevier Science, Vol. I, 1996.
13. Y.M. Zhang, J. R.G. Evans, S. Yang, "The prediction of solid solubility of alloys: developments and applications of Hume-Rothery's rules".

14. ASM METALS HANDBOOK "Properties and selection: Nonferrous alloys and Special- Purpose materials" edition 2001, Vol. 2 Metals, Park Ohio, 2001.
15. Jonh E. Gruzleski "The tratment of liquid Aluminum-Silicon alloys", The American Foundrymen's Society. U.S.A. 1990.
16. Mark E. Schilesinger "Aluminum recycling" University of Missouri-Rolla, Mo, U.S.A 2007.
17. Friend, W. Earl Jr.; McCormick H, William, et al "Engineering Considerations For the Design of New Aluminum Recycling Facilities", 1986.
18. Roman Moguel, Guillermo J.; Alonso Villanueva, Jose Luis "Aluminio Secundario, procesamiento y expectativas", Moldeo y Fundición, No. 85, año XIV (Febrero 1993); pp. 48-56.

## **TESIS DE LICENCIANTURA RELACIONADAS**

1. Ayala Villalobos, Carlos David, sustentante., Metodología para la fabricación de aleaciones 380 base aluminio, partiendo de chatarras industriales en horno tipo reverbero /tesis que para obtener el título de Licenciado en Ingeniería Química Metalúrgica 2013 Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Química.
2. Martínez Espinosa, Omar sustentante. Evaluación del rendimiento metálico de chatarra de aluminio en un horno de reverbero basculante /tesis que para obtener el título de Ingeniero Químico Metalúrgico 2011 UNAM, Facultad de Química,
3. Ortiz Méndez, Jesús sustentante. Reciclado de latas de bebida de aluminio fraccionadas en un horno de reverbero incorporadas en la cámara de contención mediante la agitación de una propela /tesis que para obtener el título de Ingeniero Químico Metalúrgico 2006 UNAM, Facultad de Química,
4. Rivas López, Francisco Enrique sustentante. Diseño, construcción y determinación de la eficiencia de un horno de reverbero / tesis que para obtener el título de Ingeniero Químico Metalúrgico, 2006b UNAM, Facultad de Química,
5. Zorrilla Castellanos, Luisa Fernanda sustentante. Recuperación de chatarra de aluminio (latas de bebidas) en horno tipo reverbero /tesis que para obtener el título de Ingeniero Químico Metalúrgico 2000 UNAM, Facultad de Química,
6. Zepeda Ríos, Javier sustentante. Estudio técnico - economico para la optimización de la operación del horno reverbero de Compañía Minera de Cananea. S.A. /tesis

que para obtener el título de Ingeniero Químico 1987 Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia,

## ARTÍCULOS

1. "Sector de la Industria del Aluminio y sus manufacturas 2010", Dirección General de Estrategias de Comercio Exterior, Subsecretaría de Comercio Internacional.
2. "2009 Minerals Yearbook, Mexico [Advance Release]", U.S. Geological Survey.
3. "Aluminium Recycling The Road to High Quality Products", Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters.
4. Ponencia IMEDAL "Reciclado de envases y chatarra de aluminio, proceso pre tratamiento, deslacado y fusión a alta temperatura", 2do Congreso de Química 2010.
5. "La Sostenibilidad del Aluminio en la Edificación", European Aluminium Association.
6. "Modern Furnaces for Aluminum Scrap Recycling", SECO/WARWICK Corporation.
7. "End-of-waste Criteria for Aluminium and Aluminium Alloy Scrap: Technical Proposals", European Commission, Institute for Prospective Technological Studies, 2010.
8. "Aluminium in cars", European Aluminium Association.
9. "Determinación de Aluminio y Magnesio en las Tapas Abre-fácil de las Latas de Bebidas Gaseosas", Universidad Nacional de Salta, Argentina, 2011.
10. "Design for Recovery Guidelines: Aluminum Packaging", California Department of Resources Recycling and Recovery, 2011.
11. "Aluminium in Building and Construction", European Aluminium Association.

## CIBERGRAFIA

<http://www.ghtransfer.com/files/GHT%20Heat%20Recuperation%20Systems%20Esp%20anol.pdf>

<http://www.cryoinfra.com/combustion-asistida-oxiquemador-o2/>

<http://www.cryoinfra.com/combustion-asistida-quemadores-aire-%e2%80%a2-oxigeno%e2%80%a2-gas/>

<http://www.cryoinfra.com/combustion-mejorada-o2/>

<http://www.praxair.com.mx/industrias/glass/oxygen-enhanced-combustion>

[http://www.metrogas.cl/industria/asesoria\\_tecnica\\_1](http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1)

<http://www.aitesa.es/areas-de-negocio/productos/recuperadores-de-calor/>

[http://www.nabertherm.com/produkte/details/es/giesserei\\_schmelz-und-warmhalteofen](http://www.nabertherm.com/produkte/details/es/giesserei_schmelz-und-warmhalteofen)

<http://tech-action.org/>

*EAA, Facts Sheets (permanently updated). [www.aluminium.org](http://www.aluminium.org)*

*IAI, OEA and EAA, 2006. Aluminum Recycling: The road to high quality products. [www.world-aluminum.org](http://www.world-aluminum.org)*

