

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA  
EFICIENCIA DE UN HORNO DE REVERBERO”.**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

**FRANCISCO ENRIQUE RIVAS LOPEZ**

**MEXICO, D. F.**

**2006.**



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: Prof. José Alejandro García Hinojosa.

Vocal: Prof. Ignacio Beltrán Piña.

Secretario: Prof. Adrián Manuel Amaro Villeda.

1er sup.: Prof. Gerardo Arámburo Perez.

2do sup.: Prof. Balbina Ojeda Ramírez.

Sitio donde se desarrolló el tema: Departamento de Metalurgia.  
Edificio 'D'. Facultad de Química.

Asesor del tema:

I.Q.M. Adrian Manuel Amaro Villeda. \_\_\_\_\_

Supervisor Técnico:

I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco. \_\_\_\_\_

Sustentante:

Francisco Enrique Rivas López. \_\_\_\_\_

*A mis padres y hermanos...*

*A Diani...*

*Gracias por hacer posible la realización de esta Tesis:*

*Al Prof. Adrián Manuel Amaro Villeda.*

*A los miembros del jurado.*

*A mis compañeros del laboratorio de fundición: Jesús, Arturo, Mauro.*

*A la Facultad de Química de la UNAM.*

# INDICE

<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I. ANTECEDENTES</b>	
1.1 TIPOS DE HORNO PARA ALUMINIO.	3
1.2 EL HORNO DE REVERBERO.	4
<b>CAPITULO II. FUNDAMENTOS TEORICOS.</b>	
2.1 PROPIEDADES DEL ALUMINIO	8
2.2 QUEMADORES	8
2.3 REFRACTARIOS	10
<b>CAPITULO III. DISEÑO DEL HORNO DE REVERBERO</b>	
3.1 DISEÑO DE LA TINA PARA EL METAL LÍQUIDO	13
3.2 DISEÑO DE LAS CÁMARAS DE FUSIÓN Y DE CONTENCIÓN	22
3.3 DISEÑO DE LA TAPA Y CHIMENEAS	24
3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE VACIADO	25
3.5 DISEÑO DE LOS QUEMADORES	27
3.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE FLUJO DE AIRE Y GAS	29
3.7 DISEÑO DE LA PUERTA DEL HORNO	30
3.8 DISEÑO DE LA BASE DEL HORNO	31
3.9 INSTRUMENTACION DEL HORNO DE REVERBERO CON TERMOPARES	32
3.10 DISEÑO DE HERRAMIENTAS	33
<b>CAPITULO IV. CONSTRUCCION DEL HORNO DE REVERBERO Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.</b>	
4.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CARCAZA METÁLICA.	35
4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA PUERTA.	37
4.3 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE VACIADO	38
4.4 APLICACIÓN DEL REFRACTARIO	41
4.5 CONSTRUCCIÓN DE LOS QUEMADORES Y DEL SISTEMA DE FLUJO	41
4.6 CONSTRUCCIÓN DE LA TAPA Y CHIMENEAS	43
4.7 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DEL HORNO	44
4.8 CONSTRUCCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS	44
4.9 ORIFICIOS PARA LOS TERMOPARES	44
4.10 CALIBRACIÓN DEL FLUJÓMETRO	45
4.11 PRUEBAS CON LOS QUEMADORES.	49

4.12 PRUEBAS PRELIMINARES DEL HORNO DE REVERBERO	50
4.13 HOJA DE CONTROL	54
<b>CAPITULO V. DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	
5.1 EVALUACIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO	55
5.2 PREPARACIÓN DE LA CARGA DE BOTE DE ALUMINIO	56
5.3 PRUEBAS DE FUSIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO EN EL HORNO DE REVERBERO	56
5.4 PRUEBAS DE FUSIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO EN EL HORNO DE CRISOL	56
5.5 ANÁLISIS QUÍMICOS.	57
<b>CAPÍTULO VI. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	
6.1 EVALUACIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO	58
6.2 PREPARACIÓN DE LA CARGA DE BOTE DE ALUMINIO	59
6.3 PRUEBAS DE FUSIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO EN EL HORNO DE REVERBERO	59
6.4 PRUEBAS DE FUSIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO EN EL HORNO DE CRISOL	60
6.5 ANÁLISIS QUÍMICOS.	60
<b>CAPÍTULO VII. RESULTADOS.</b>	61
<b>CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b>	75
<b>CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES</b>	78
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	80

## INTRODUCCIÓN:

Debido a la cantidad de residuos de aluminio (chatarra) que se producen hoy en día, es necesario contar con equipos para procesarlos y reciclarlos de forma eficiente, es decir con bajo consumo de energía y el menor tiempo posible.

En la industria, uno de los equipos para fusión de aluminio que se utilizan es el *horno de reverbero*.

Los objetivos de este trabajo son:

- El diseño y construcción de un *horno de reverbero* funcional de doble cámara con capacidad para 20Kg de aluminio fundido.
- Realizar una evaluación de recuperación de aluminio a partir del proceso de fusión de bote de aluminio, para verificar la funcionalidad del equipo.
- Determinar la eficiencia de recuperación de material que el horno alcanza en operación en el proceso de fusión de bote de aluminio como parámetro de funcionalidad. La calidad metalúrgica del material no es tema de esta Tesis.
- Comparar la eficiencia de recuperación de aluminio en el *horno de reverbero* con la de un horno de crisol para el mismo proceso; evaluando los tiempos de fusión, los consumos de combustible y la contaminación del aluminio realizando análisis químicos del metal.

En el Capítulo I se comentan como antecedentes algunos tipos de hornos utilizados para la fusión de aluminio, así como aspectos importantes del *horno de reverbero*.

En el Capítulo II se presentan bases teóricas que se utilizaron como fundamento para la realización del trabajo, describiendo únicamente los tópicos considerados para el desarrollo del mismo.

En el Capítulo III se muestra el proceso de diseño del *horno de reverbero*, comentando los criterios tomados en cuenta en cada punto. En este capítulo se presentan los planos, cálculos de dimensiones y la ubicación de las partes importantes del horno. Se asientan las bases para el diseño del equipo, y los aspectos principales que deben ser tomados en cuenta para su construcción.

En el Capítulo IV se explica de manera detallada los pasos que se llevaron a cabo para construir el equipo, el montaje de las partes principales y los materiales que se utilizaron.



También se explican las pruebas que se realizaron para verificar el funcionamiento del equipo.

En el Capítulo V se presenta el diseño experimental que se consideró para realizar las pruebas de fusión del bote de aluminio y el orden en que se llevarían a cabo.

En el Capítulo VI se detalla paso a paso como se realizaron las pruebas propuestas.

En el Capítulo VII se presentan los resultados obtenidos a partir de las pruebas realizadas.

En el Capítulo VIII se hace el análisis de los resultados obtenidos y se discuten los aspectos relevantes encontrados durante el desarrollo del trabajo.

En el Capítulo IX se presentan las conclusiones a las que se llegaron al finalizar el trabajo.

La bibliografía consultada para el desarrollo de la tesis se presenta al final.

## CAPITULO I. ANTECEDENTES.

### **1.1 TIPOS DE HORNO PARA FUSION DE ALUMINIO <sup>[1]</sup>.**

Según el tipo de fusión que se requiere y la cantidad de material a procesar, es el tipo de horno que se utiliza. Para una buena elección del horno a utilizar, deben considerarse aspectos técnicos como los tiempos de fusión, lectura precisa de la temperatura del horno, calentamiento uniforme del equipo, y que no se presente contaminación considerable del metal; así como aspectos económicos como el precio del equipo, gastos de operación, bajo consumo de energía, y gastos de mantenimiento y supervisión.

Los hornos se clasifican de acuerdo al sistema de calentamiento empleado.

Esta clasificación puede dividirse en:

- Hornos con sistema de fusión que utilizan combustibles sólidos.
- Hornos con sistema de fusión que utilizan combustibles líquidos.
- Hornos con sistema de fusión que utilizan combustibles gaseosos.
- Hornos con sistema de fusión que utilizan la energía eléctrica.

Esta clasificación hace que se diseñen y fabriquen diferentes tipos de hornos. Aunque son cuatro los más comunes en la industria de la fundición de aluminio:

- **HORNOS DE CRISOL.** En este tipo de hornos se cuenta con un crisol, móvil o fijo (los hornos de crisol fijo generalmente se conocen como basculantes), el cual contiene el aluminio. En estos hornos el crisol es calentado hasta alcanzar la temperatura de fusión del metal, el metal es fundido por conducción del calor a través del crisol, por lo que se puede considerar como un sistema de calentamiento indirecto, es decir que el producto de la combustión que genera el calor no entra en contacto directo con el metal, lo cual reduce la contaminación del baño metálico. En este tipo de hornos pueden usarse combustibles sólidos como el coque, o líquidos como aceite, quemadores de gas con aire a presión, y hay diseños que utilizan resistencias eléctricas para que el crisol se caliente.
- **HORNOS DE REVERBERO.** En estos hornos se tiene una cámara que contiene el metal, el interior del horno se calienta por el calor que reverbera hasta alcanzar la temperatura de fusión del material. El metal está en contacto directo con la fuente de calor, lo que provoca contaminación en el baño.

- HORNOS ELÉCTRICOS DE RESISTENCIAS. Esta clasificación se debe a que el sistema de calentamiento son resistencias eléctricas.
- HORNOS DE INDUCCIÓN. Estos hornos aprovechan el efecto producido por campos electromagnéticos que inducen calor al material.

## 1.2 EL HORNO DE REVERBERO.

La palabra *reverberar* significa reflejar o proyectar la luz o calor sobre un objeto. También el término *horno de reverbero* significa horno en que la carga se calienta por medio de una bóveda o techo a alta temperatura. [2]

El término de *horno de reverbero*, (*hearth furnace* o *reverberatory furnace*) para aluminio se remonta a la época de la Segunda Guerra Mundial, donde los combustibles más comunes para fundir aluminio en reverbero era el carbón o el coque. En estos primeros diseños, el calor generado pasaba de un lado del horno al otro sobre el metal. El techo era inclinado para que el calor se reflejara o ‘reverberara’ hacia el metal a fundir y luego saliera por la chimenea que estaba al otro lado. Un objetivo principal era calentar las paredes y el techo para así irradiar calor hacia el metal que se quería fundir. La Figura 1 muestra los primeros hornos de este tipo.

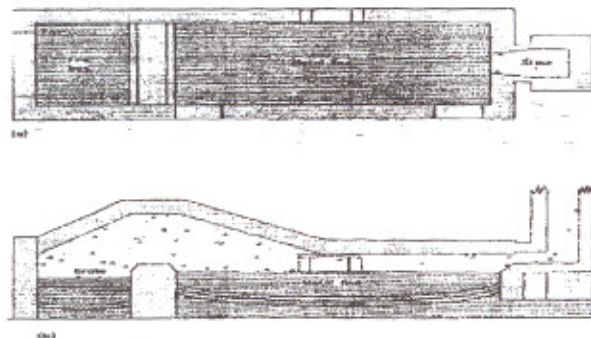
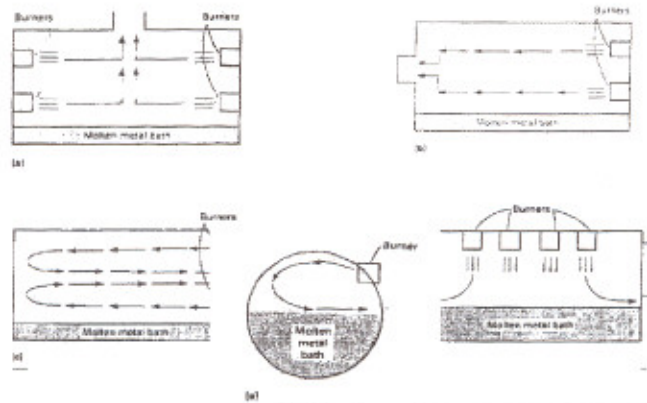


FIGURA 1. VERSIÓN TEMPRANA DE UN HORNO DE REVERBERO CALENTADO POR COQUE O CARBÓN PARA FUNDICIONES DE ALUMINIO. [3]

Este principio se siguió utilizando cuando se cambió el uso del coque o del carbón por combustibles líquidos o gas. Esto introdujo el uso de quemadores los cuales seguían teniendo la función de calentar el interior del horno, y que eran colocados en el techo o en las paredes del horno. En la Figura 2 se muestran las principales formas en que los quemadores son colocados en los *hornos de reverbero*:

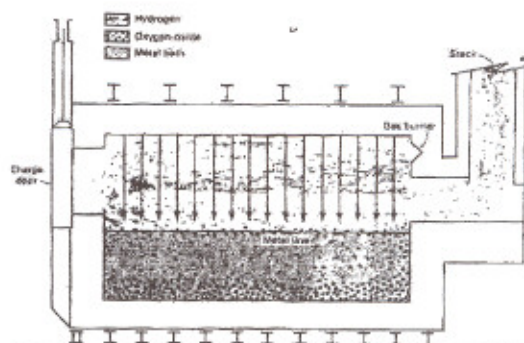


**FIGURA 2. TIPOS DE DISTRIBUCIÓN DE LOS QUEMADORES EN HORNO DE REVERBERO. (a) FLUJO CENTRAL, (b) A TRAVÉS DE LA CÁMARA, (c) EN 'W', (d) MONTADOS EN EL TECHO, (e) TIPO BARRIL. [3]**

Los *hornos de reverbero* pueden ser diseñados de dos formas. En los conocidos como de una cámara o solera húmeda (*wet hearth furnaces*), y en los que se conocen como de doble cámara o solera ceca (*dry hearth furnaces*).

En los de solera húmeda (*wet hearth*), el metal es colocado en una sola cámara de contención donde se encuentran los quemadores, los productos de combustión están en contacto directo con la superficie del metal fundido, y la transferencia de calor se alcanza por una combinación de convección y radiación.

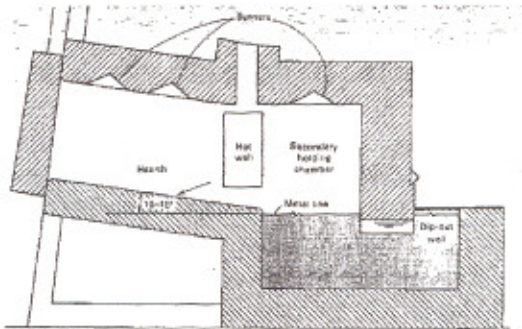
La Figura 3 muestra este tipo de *horno de reverbero*:



**FIGURA 3. DISEÑO GENERAL DE UN HORNO DE REVERBERO DE SOLERA HÚMEDA (WET HEARTH). [3]**

En los hornos de solera seca (*dry hearth*), la carga de metal sólido se coloca en una cámara con inclinación sobre el nivel del metal fundido de modo que los gases envuelven la carga. Cuando el calor funde el metal, este se desliza hacia la cámara de contención, que cuenta con un quemador o más para mantener la temperatura del metal fundido.

La Figura 4 muestra un tipo de estos hornos:



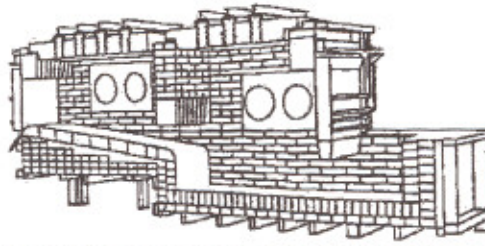
**FIGURA 4. CORTE TRANSVERSAL DE UN HORNO DE REVERBERO DE SOLERA SECA. SE VE LA RAMPA DE DESLIZAMIENTO PARA EL METAL FUNDIDO. [3]**

También se cuenta con hornos que su sistema de calentamiento son resistencias eléctricas. En la actualidad se cuenta con numerosos diseños de hornos de reverbero, aunque todos siguen los mismos principios de calentamiento.

Las partes principales de un *horno de reverbero* son:

- Una estructura metálica que da forma al horno.
- Un recubrimiento refractario interno que permite que la energía se aproveche por radiación calentando y fundiendo al aluminio.
- Quemadores para calentar el interior del horno y que son la fuente principal de calor, la transferencia de calor es principalmente por radiación y por convección. Pueden ser quemadores de combustible líquido o de combustible en forma de gas.
- Una chimenea que permita la liberación de los gases de combustión que se acumulan en el interior del horno.
- Cámaras donde se lleva a cabo la fusión del metal y donde éste se mantiene en estado líquido.
- Puertas para colocar la carga dentro del horno.
- Un sistema de salida del metal líquido para vaciar el horno cuando se necesite.

La Figura 5 muestra un diagrama general de las partes principales de un *horno de reverbero*:



**FIGURA 5. ESQUEMA GENERAL DE UN HORNO DE REVERBERO DE SOLERA SECA. SE PUEDE VER QUE LAS PARTES IMPORTANTES SON LA TINA DEL METAL LÍQUIDO, LAS CAMARAS DE CONTENCIÓN Y FUSIÓN (HEARTH), LOS QUEMADORES, LA CHIMENEA PARA EL ESCAPE DE GASES, Y LA PUERTA PARA LA CARGA. [3]**

Algunos aspectos importantes a considerar de los hornos de reverbero son: que se suelen formar depósitos en la base del horno debido al metal caliente por lo que debe revisarse continuamente. También es necesario considerar el calentamiento del horno antes de introducir la carga, si el horno no está a una temperatura óptima y el metal se funde, éste puede solidificar rápidamente y depositarse en grietas que generalmente se forman en el refractario y causar problemas posteriores, ya que se reduce la vida útil del refractario. Es necesario tener instrumentos que permitan controlar la temperatura del horno en todo momento, generalmente el aluminio se oxida fácilmente si se encuentra a temperaturas elevadas, esto provoca un decremento en la calidad del metal. La carga a introducir debe estar seca, muchos accidentes ocurren por explosiones del metal líquido debido a que la carga contiene humedad; un precalentamiento de la carga debe ser realizado antes de ser introducida al horno. Se debe tener especial atención en lo que a mantenimiento del equipo del horno se refiere. Los sistemas de alimentación del combustible deben ser revisados en forma constante para evitar que se formen depósitos sólidos que no permitan el buen desempeño de los quemadores, de las chimeneas, y los sistemas de salida para el metal líquido. Utilizar equipo adecuado para evitar accidentes. Y por último, el sitio donde operará el horno debe estar libre de obstáculos que impidan un buen desplazamiento del personal a cargo. [4]

## **CAPITULO II. FUNDAMENTOS TEORICOS.**

### **2.1 PROPIEDADES DEL ALUMINIO<sup>[5]</sup>.**

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre.

En la actualidad, una de las industrias con más desarrollo es la del aluminio.

Debido a que es un metal muy versátil, existe una gran cantidad de aleaciones de aluminio en el mercado con una variedad de aplicaciones.

Algunas propiedades importantes de las aleaciones de aluminio son:

- El punto de fusión del aluminio es de 660 °C, que es considerado bajo y por lo tanto la mayoría de las aleaciones de aluminio presentan un punto de fusión alrededor de los 660 °C (550 °C - 750°C ).
- Tiene baja densidad, aproximadamente 2.7 g/cm<sup>3</sup>.
- Tiene un coeficiente de expansión, cuando pasa de sólido a líquido, de 6% en volumen.
- Tiende a formar una capa protectora de óxido de aluminio, que evita que el metal se oxide fácilmente.

### **2.2 QUEMADORES<sup>[6]</sup>.**

Los quemadores son dispositivos utilizados para llevar a cabo la reacción de combustión entre un combustible (generador de calor) y un comburente (promotor de la reacción) de una manera controlada y que se puede regular, asegurando así la aportación de ambos para proporcionar el calor requerido, distribuyendo las llamas y la circulación del producto de combustión de modo que se transfiera todo el calor producido lo mejor posible a la carga.

Dependiendo del tipo de combustible que utilicen es el tipo de quemador.

Para efectos de este trabajo, y al ser el tipo de quemadores más común que utilizan los *hornos de reverbero*, se comentarán específicamente los quemadores de combustible gaseoso y sus principales características.

QUEMADORES DE GAS: Generalmente utilizan gas L.P. y aire para la combustión.

Consideraciones importantes son tomadas en cuenta para elegir el quemador indicado para un equipo. Se consideran los aspectos que tienen que ver directamente con el quemador,

los que tienen que ver con las características del material que se quiere utilizar, y los aspectos concernientes a las características del horno.

En cuanto a los aspectos que se consideran del quemador están:

- La temperatura que se quiere alcanzar.
- La naturaleza de los productos de combustión y cómo interactuarán con el equipo.
- La necesidad de regular el funcionamiento para obtener una potencia máxima y mínima.
- La utilización de quemadores en serie o series de quemadores.

En cuanto a los aspectos a considerar del material están:

- Las propiedades térmicas.
- La superficie específica.
- La reactividad química.

En cuanto a las características del equipo:

- Aislamiento térmico
- Inercia térmica
- Paredes térmicas
- Cámaras de precalentamiento de la carga.

Considerando el modo de alimentación del gas y del aire, una clasificación de los quemadores de gas puede ser la siguiente:

→ Quemadores de premezcla: Dentro de este grupo:

- Quemadores de premezcla a presión: Suelen ser de premezcla total; el aire y el gas llegan por separado y se mezclan dentro del cuerpo del quemador. Se pueden presentar fenómenos de desprendimiento de llama, el cual se puede controlar al colocar alrededor de la salida principal del quemador, pequeños orificios para llamas auxiliares (llamas piloto).
- Quemadores atmosféricos: El gas induce aire atmosférico en el tubo de mezcla, en cuyo extremo se forma la llama. Este tipo de quemadores son los de las estufas.
- Quemadores oxi-gas: Se utilizan cuando se requieren temperaturas elevadas o flujos puntuales de calor elevado (en los sopletes).

→ Quemadores de mezcla en boca de salida con aire a baja presión.



El combustible aporta la energía de la mezcla. Cuando el aire tiene una presión del orden de 0.1 mbar y velocidades de 10 a 15 m/s, son designados.

→ Quemadores de mezcla en la boca de salida y aire a presión.

La presión del aire es del orden de 50 a 70 mbar. Las velocidades son del orden de los 100 m/s.

→ Quemadores especiales:

- Quemadores radiantes: se denominan así cuando una parte importante de la transferencia de calor se lleva a cabo por radiación por medio de una superficie de refractario.
- Quemadores Jet: lanzan a gran velocidad los productos de una combustión completa.
- Quemadores de vena de aire: utilizados para calentar aire de secado o calefacción.

→ Quemadores para altas temperaturas: Se utilizan cuando se quieren alcanzar temperaturas por encima de los 3000°C hasta la región de las temperaturas de las reacciones nucleares (aprox. 10<sup>8</sup>°C). Aunque la combustión de combustibles convencionales proporcionan temperaturas del orden de los 2000°C, se pueden elevar:

- a) Por enriquecimiento del comburente con oxígeno.
- b) Pre calentando el aire de combustión
- c) Mediante el uso de la electricidad (electro-quemadores) para producir ionización o generar un plasma, alcanzando y hasta superando los 3000°C.

Aunque no existen procesos comerciales en los que se superen los 3000°C.

### 2.3 REFRACTARIOS.

Los refractarios son materiales que resisten temperaturas elevadas y la acción de líquidos corrosivos –metales, escorias- y de los gases calientes en movimiento. Son materiales que conservan el calor y tienen propiedades térmicas que permiten la transferencia del mismo.

Al ser más caros que la arcilla y el ladrillo ordinario, se emplean solamente en las partes del horno sometidas a un intenso calentamiento.

Las propiedades de los refractarios están determinadas por la composición química, la estructura y la constitución de las fases que denominan el conjunto.

Dependiendo del carácter ácido o básico del metal fundido y de la escoria producida es el tipo de refractario a utilizar.

Los refractarios se clasifican en los siguientes tres grupos<sup>[7]</sup>:

---

- I. Refractarios ácidos.
  - a) Silicatos de aluminio, que pueden ser rocas minerales, barros refractarios o ladrillos de arcilla refractaria.
  - b) Sílice,  $\text{SiO}_2$ , con pocas impurezas; se usa en forma de roca natural, barro preparado, ladrillo, cuarzo fundido eléctricamente, arena de cuarzo y cuarcita.
- II. Refractarios básicos.
  - a) Óxidos de aluminio, tales como bauxita y alundo (bauxita fundida en el horno eléctrico).
  - b) Óxidos de calcio y de magnesio. Éstos se obtienen por calcinación de la piedra caliza, dolomita o magnesita.
  - c) Óxidos de hierro, tales como los que se usan en la producción de hierro forjado.
- III. Refractarios neutros. No son atacados por las escorias básicas o ácidas y se usan en vez de los refractarios básicos en los casos en que la acción corrosiva es intensa.
  - a) Varias formas de carbón, grafito, carbón de madera y coque.
  - b) Cromita mineral o artificial
  - c) Refractarios tales como el carburo de circonio (punto de fusión  $3530\text{ }^\circ\text{C}$ ), carburo de niobio ( $3800\text{ }^\circ\text{C}$ ) y carburo de tántalo ( $3800\text{ }^\circ\text{C}$ ). Estos se preparan en el horno eléctrico y sólo se utilizan para casos especiales.
  - d) Metales que exigen enfriamiento con corriente de agua o aire para evitar que se fundan. Los metales que corrientemente se emplean, son el hierro y cobre. Para usos especiales también se usan el molibdeno, níquel, platino, osmio, torio, tántalo, volframio, vanadio y circonio. Debido a su elevado precio, algunos de estos metales sólo se utilizan en el laboratorio.

e) Otros materiales que se emplean ocasionalmente como refractarios son el hormigón, el talco y la serpentina.

IV. Además, existe un grupo de refractarios raros, que son óxidos de punto de fusión muy elevado y que se usan en pequeñas cantidades en crisoles para fines experimentales: óxido de berilio (2450 °C), dióxido de cerio (1950 °C), dióxido de circonio (2700 °C), dióxido de torio (2800 °C), sexquióxido de titanio (2130 °C) y otros.

---

### CAPÍTULO III. DISEÑO DEL HORNO DE REVERBERO.

Debido a que en la industria de la fundición del aluminio es de los más utilizados, se propone el diseño de un *horno de reverbero* de doble cámara o solera seca (*dry hearth*) con capacidad para 20Kg de aluminio fundido, con cuatro quemadores, dos por cámara, y una compuerta lateral para introducir la carga. Se toma como modelo, el mostrado en la Figura 5 del Capítulo I.

Los principios de diseño que se utilizan aplican a cualquier modelo y capacidad de horno, de este tipo, que se quiera construir.

La base principal para diseñar el horno, es la capacidad de material fundido que se quiere manejar. El volumen que ocupará este material será el que determine las dimensiones del horno. Por lo tanto, el diseño se inicia calculando las dimensiones de la tina para el metal líquido, y a partir de estas dimensiones obtenidas se diseña el resto del horno.

#### **3.1 DISEÑO DE LA TINA PARA EL METAL LÍQUIDO.**

La capacidad propuesta para el *horno de reverbero* fue 20Kg de aluminio fundido.

La consideración principal es cuánto volumen ocupan esos 20Kg.

Recordando, la densidad del aluminio puro es  $2.7 \text{ g/cm}^3$ , por lo general ésta es la mayor densidad para aleaciones de aluminio, por lo que se utilizó este valor.

Otro aspecto que se consideró es que el aluminio cuando pasa de sólido a líquido tiene un coeficiente de expansión del 6%, es decir que su volumen aumenta.

De la definición de densidad ( $\rho$ ) se tiene:  $\rho = \frac{m}{V}$

Siendo,  $m$  la masa del material y  $V$  el volumen que ocupa.

La masa del aluminio es 20Kg o 20,000gr.

La densidad del aluminio es  $2.7 \text{ g/cm}^3$ .

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

Por lo tanto:  $V = \frac{20000 \text{ gr}}{2.7 \text{ gr/cm}^3} = 7407.407 \text{ cm}^3$  de aluminio.

Considerando el 6% de expansión de este volumen:

$$V = \frac{20000 \text{ gr}}{2.7 \text{ gr/cm}^3} = 7407.407 \text{ cm}^3 + 6\% = 7851.85142 \text{ cm}^3 \text{ de aluminio fundido.}$$

Este es el volumen que ocupará el aluminio fundido.

El siguiente paso determinar las dimensiones de la tina del metal líquido.

Se considera un cubo que tiene un volumen de  $V=7851.85142 \text{ cm}^3$ . Como se muestra en la Figura 6:

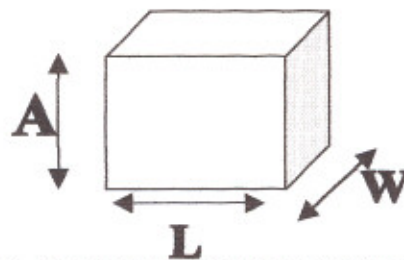


FIGURA 6. CUBO OBTENIDO CON VOLUMEN DE  $7851.85142 \text{ cm}^3$

Entonces :  $V=7851.85142 \text{ cm}^3$

Al tratarse de un cubo:  $V=A \times L \times W = X^3$

Donde A=altura, L=longitud y W=ancho.

Dada esta relación, se pueden conocer las dimensiones del cubo.

$$V = X^3 \therefore X = \sqrt[3]{V} = (V)^{\frac{1}{3}}$$

$$X = \sqrt[3]{7851.85142} = 19.8758 \text{ cm}$$

Cada lado del cubo mide **19.8758cm**.

Son estas dimensiones con las que se comienza a trabajar. Es necesario hacer algunas consideraciones importantes para definir las dimensiones finales de la tina del metal líquido:

- Se requiere que la transferencia de calor en el metal líquido sea óptima para mantenerlo en ese estado el mayor tiempo posible. Y poder manejarlo mejor para no tener problemas cuando se vacíe el horno.
- Se debe considerar que habrá una sección de la tina por la cual se tomarán muestras del metal líquido, y que al estar fuera de la cámara de contención, el área de transferencia de calor a considerar será aquella que está dentro de esta cámara.
- En cuanto al comportamiento térmico del metal líquido en la tina se considera que: si ésta tiene poca altura, es muy larga y muy ancha, el metal se comportará como una placa metálica y se corre el riesgo de que se enfríe muy rápido, puede haber más

riesgo de oxidación y gasificación, dificultad para tomar muestras de metal y sea difícil mantenerlo fundido; de lo contrario, si la tina es lo más parecido a un cubo puede ser que el área de transferencia de calor sea reducida, esto puede ocasionar que el fondo de la tina se enfríe y empiece a solidificar el metal y se formen capas de metal sólido que después sea difícil remover sobre todo cuando se quiera vaciar el horno.

Esto lleva a tomar una decisión importante en cuanto a dar dimensiones a la tina del metal líquido, ya que se tiene que variar tanto la altura, la longitud y el ancho para saber cuáles serán las dimensiones apropiadas. El problema se simplifica manteniendo uno de los tres lados constante y variando los otros dos. Lo más recomendable es fijar el ancho de la tina de metal líquido al tamaño del cubo obtenido, y a partir de ahí variar el largo y la altura para obtener las dimensiones apropiadas. Conociendo por dónde ocurren las pérdidas de calor de la tina o las áreas de transferencia de calor hacia el exterior, podemos ayudarnos del Módulo de Solidificación (MS) de la tina para conocer el comportamiento térmico de las diferentes dimensiones que se vayan encontrando. El MS da una idea de qué tan rápido podría enfriarse un cuerpo de determinado volumen y con un área de transferencia de calor (pérdida) específica. Propiamente el MS es una relación entre el volumen y el área de transferencia del calor que sale del cuerpo:

$$MS = \frac{V}{A} \quad \text{donde } A \text{ es el área de pérdida o transferencia de calor.}$$

Se consideran todas las áreas de pérdida o transferencia de calor posibles. El valor de  $A$  puede resultar de la suma de solo algunas áreas de pérdida o transferencia de calor.

En este caso la siguiente consideración se hace: el calor se pierde solo por las áreas en que no hay flujo de calor hacia el metal; considerando que aun con el aislamiento en las paredes hay transferencia de calor por todos los lados de la tina. Recordando que se tendrá una sección fuera de la cámara de contención para la toma de muestras de metal líquido. Esta sección se denominará 'S'.

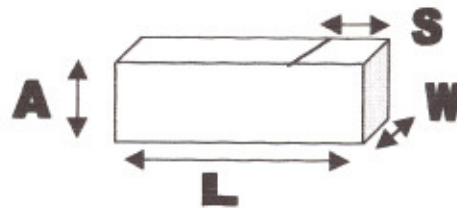


FIGURA 7. Sección S para la toma de muestra.

En la Figura 7 se muestran las características que tiene la tina del metal líquido, siendo A el alto de la tina, L el largo, W el ancho y S la porción que saldrá para la toma de muestras.

En este caso, se propone que  $S=10\text{cm}$  para poder tomar muestras y  $W=19.8758\text{ cm}$  que son los obtenidos del cubo. De igual manera, para iniciar los cálculos se consideran los lados del cubo iguales y posteriormente al mantener el ancho constante, se va disminuyendo de 0.5 en 0.5 la altura para saber qué longitud da. Es decir:

$$\text{Si Volumen} = A \times L \times W \text{ entonces } L = V / (A \times W)$$

$V$  es conocido y constante,  $W$  es valor fijo, y  $A$  disminuye de 0.5 en 0.5.

Con estos valores se calculó el MS, suponiendo que la pérdida de calor hacia el exterior ocurre únicamente por las caras de la tina por donde no hay entrada de calor. Es decir:

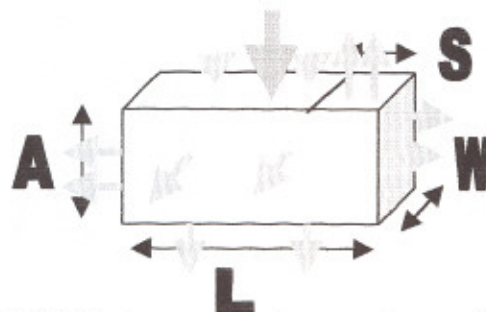


FIGURA 8. Áreas por donde ocurre la transferencia de calor.

En la Figura 8, la flecha grande indica entrada de calor sobre esa cara, las flechas chicas son las áreas de transferencia de calor hacia el exterior. Con estas consideraciones, el MS entonces se calcula como sigue:

$$MS = \frac{V}{A} = \frac{V}{[2(A * W) + 2(L * A) + (W * S) + (L * W)]}$$

Lo último es hacer una tabla en la que se muestre cómo van variando las dimensiones de la tina y el respectivo MS que se obtiene.

Un criterio que se utilizó para elegir las dimensiones fue escoger aquellas en que el MS fuera mayor, ya que como se mencionó antes, el MS da una idea cuantitativa de las dimensiones con las que la tina se mantiene más tiempo caliente.

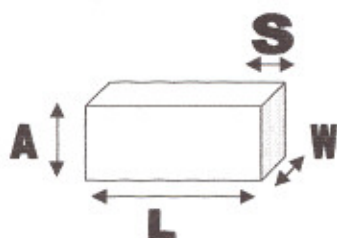
En la **Tabla 1** se muestran los valores obtenidos para el MS; en la **Gráfica 1** y en la **Gráfica 2** se muestra el cambio del MS vs el largo obtenido. La **Gráfica 3** muestra una relación de la variación del MS respecto a la variación de las dimensiones de la tina del metal líquido. Tanto la tabla como las gráficas proporcionaron información suficiente que satisfacen los criterios de selección de las dimensiones finales de la tina.

Lo primero fue identificar el MS de mayor valor, que indica las dimensiones en que tardará más tiempo en solidificar el volumen requerido. Las dimensiones del MS mayor (3.7278) son: altura 13.9cm, largo 28.4701cm y ancho 19.8758 cm. Recordando que la tina del metal líquido tendrá un área para la toma de muestras de 10 cm, si lo restamos al largo obtenido se tiene un área de superficie del metal de menos de 20cm aproximadamente. Estas dimensiones se consideraron pequeñas por lo que se procedió a aplicar más criterios. Se consideró también la forma que tendría la tina del metal líquido, por lo que se eligió la que tuviera la mayor superficie de transferencia con un MS aceptable. Para este fin fue que se realizó el cálculo del cambio del valor del MS con respecto a las dimensiones obtenidas. Como puede verse tanto en la **Tabla 1** y la **Gráfica 3**, en los valores cercanos al MS mayor la diferencia en la proporción en que varía no es tan notable, pero conforme la altura va disminuyendo y el largo aumentando, la proporción de cambio crece notablemente. Tanto así que cuando se llega a una altura de 9cm y el largo de 44.5cm, el MS tiene una variación casi del 5% que ya se puede considerar alta.

En la Figura 9 se presentan las dimensiones elegidas a partir de la aplicación de los criterios anteriores. Por comodidad, las dimensiones obtenidas se redondearon al valor más cercano.



**TABLA 1. CÁLCULO DE LA TINA DE METAL LÍQUIDO.**



$$V=7851.851 \text{ cm}^3$$

$$W=19.8758 \text{ cm}$$

$$MS=V/(W*L)+2(L*A)+2(A*W)+(W*10)$$

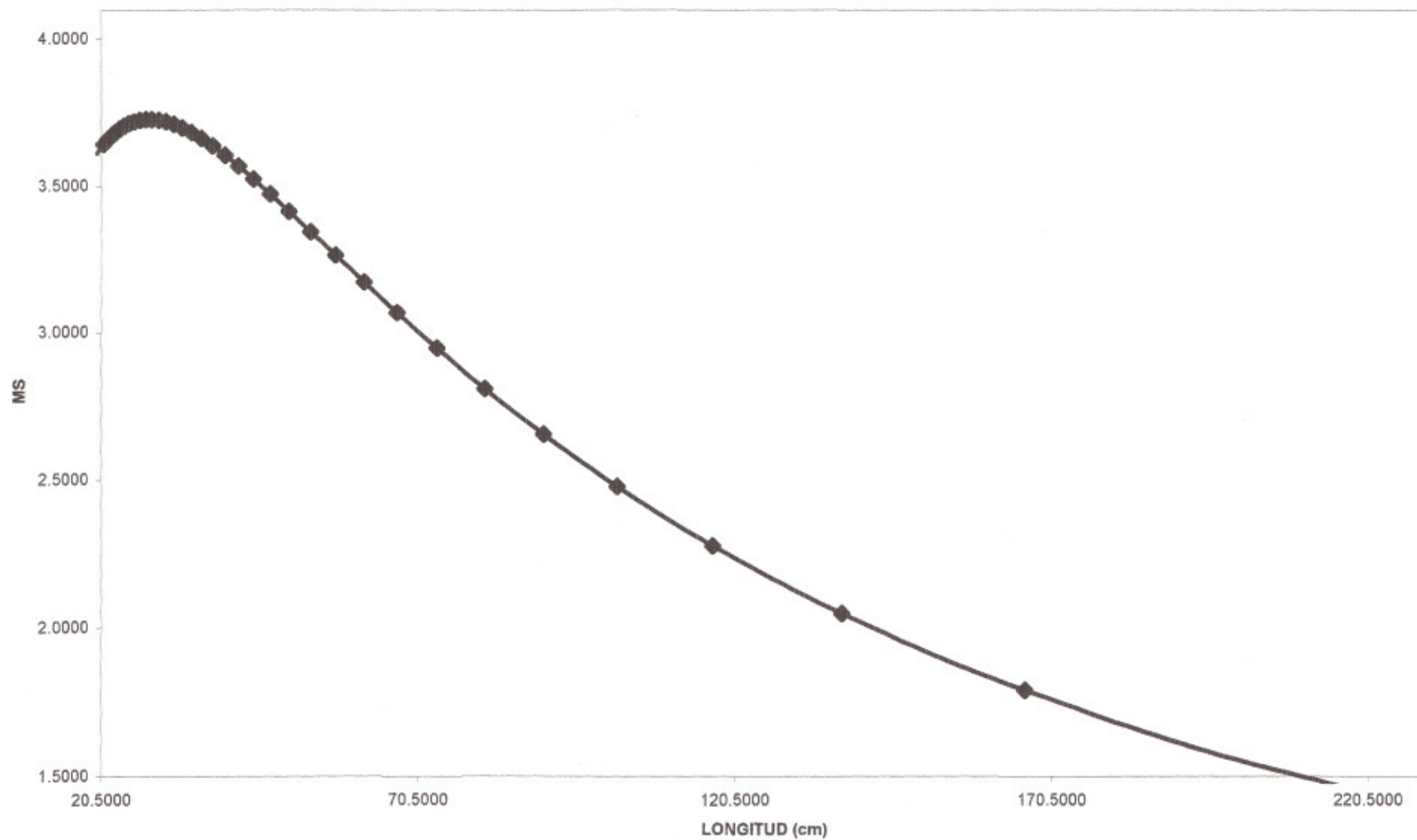
**MANTENIENDO EL ANCHO CONSTANTE**

	ALTO (cm)	LARGO (cm)	ANCHO (cm)	VOL. REQ (cm <sup>3</sup> )	MS = V/A =	%	DIF
1	19.9	19.8758	19.8758	7851.8510	3.6117		
2	19.4	20.3886	19.8758	7851.8510	3.6279		
3	18.9	20.9287	19.8758	7851.8510	3.6433		
4	18.4	21.4982	19.8758	7851.8510	3.6578		
5	17.9	22.0995	19.8758	7851.8510	3.6713		
6	17.4	22.7354	19.8758	7851.8510	3.6838		
7	16.9	23.4090	19.8758	7851.8510	3.6951		
8	16.4	24.1238	19.8758	7851.8510	3.7049		
9	15.9	24.8835	19.8758	7851.8510	3.7133		
10	15.4	25.6927	19.8758	7851.8510	3.7200		
11	14.9	26.5563	19.8758	7851.8510	3.7248		
12	14.4	27.4799	19.8758	7851.8510	3.7274		
13	<b>13.9</b>	<b>28.4701</b>	<b>19.8758</b>	<b>7851.8510</b>	<b>3.7278</b>	<b>100</b>	<b>0</b>
14	13.4	29.5344	19.8758	7851.8510	3.7255	99.9394	0.0606
15	12.9	30.6813	19.8758	7851.8510	3.7204	99.8012	0.1988
16	12.4	31.9208	19.8758	7851.8510	3.7120	99.5765	0.4235
17	11.9	33.2648	19.8758	7851.8510	3.7000	99.2557	0.7443
18	11.4	34.7269	19.8758	7851.8510	3.6841	98.8280	1.1720
19	10.9	36.3234	19.8758	7851.8510	3.6637	98.2813	1.7187
20	<b>10.4</b>	<b>38.0738</b>	<b>19.8758</b>	<b>7851.8510</b>	<b>3.6384</b>	<b>97.6020</b>	<b>2.3980</b>
21	9.9	40.0014	19.8758	7851.8510	3.6076	96.7752	3.2248
22	9.4	42.1346	19.8758	7851.8510	3.5706	95.7840	4.2160
23	8.9	44.5082	19.8758	7851.8510	3.5268	94.6094	5.3906
24	8.4	47.1651	19.8758	7851.8510	3.4754	93.2303	6.7697
25	7.9	50.1594	19.8758	7851.8510	3.4155	91.6228	8.3772
26	7.4	53.5597	19.8758	7851.8510	3.3461	89.7600	10.2400
27	6.9	57.4545	19.8758	7851.8510	3.2660	87.6119	12.3881
28	6.4	61.9602	19.8758	7851.8510	3.1740	85.1442	14.8558
29	5.9	67.2327	19.8758	7851.8510	3.0687	82.3184	17.6816
30	5.4	73.4860	19.8758	7851.8510	2.9483	79.0909	20.9091
31	4.9	81.0217	19.8758	7851.8510	2.8112	75.4124	24.5876
32	4.4	90.2797	19.8758	7851.8510	2.6552	71.2268	28.7732
33	3.9	101.9263	19.8758	7851.8510	2.4779	66.4703	33.5297
34	3.4	117.0229	19.8758	7851.8510	2.2766	61.0705	38.9295
35	2.9	137.3690	19.8758	7851.8510	2.0482	54.9448	45.0552
36	2.4	166.2791	19.8758	7851.8510	1.7893	47.9990	52.0010
37	1.9	210.6012	19.8758	7851.8510	1.4958	40.1255	59.8745
38	1.4	287.1390	19.8758	7851.8510	1.1631	31.2014	68.7986
39	0.9	451.0685	19.8758	7851.8510	0.7860	21.0862	78.9138
40	0.4	1051.2128	19.8758	7851.8510	0.3586	9.6189	90.3811

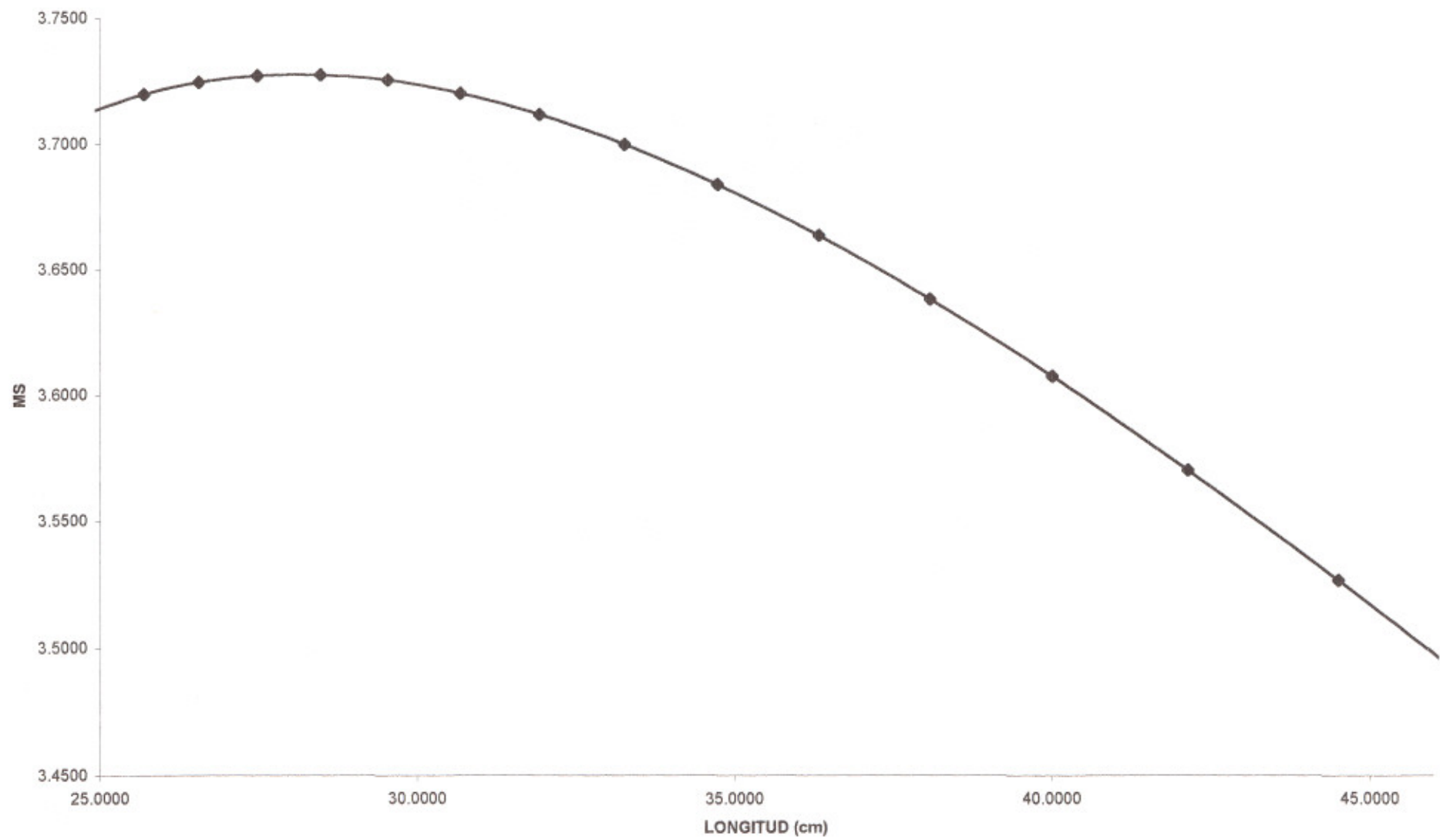
En esta tabla, '%' indica cómo varía el MS con respecto al MS mayor, no se consideran los anteriores por las dimensiones que se obtienen.

La columna 'DIF.', indica la diferencia del cambio de porcentaje con respecto al MS mayor obtenido.

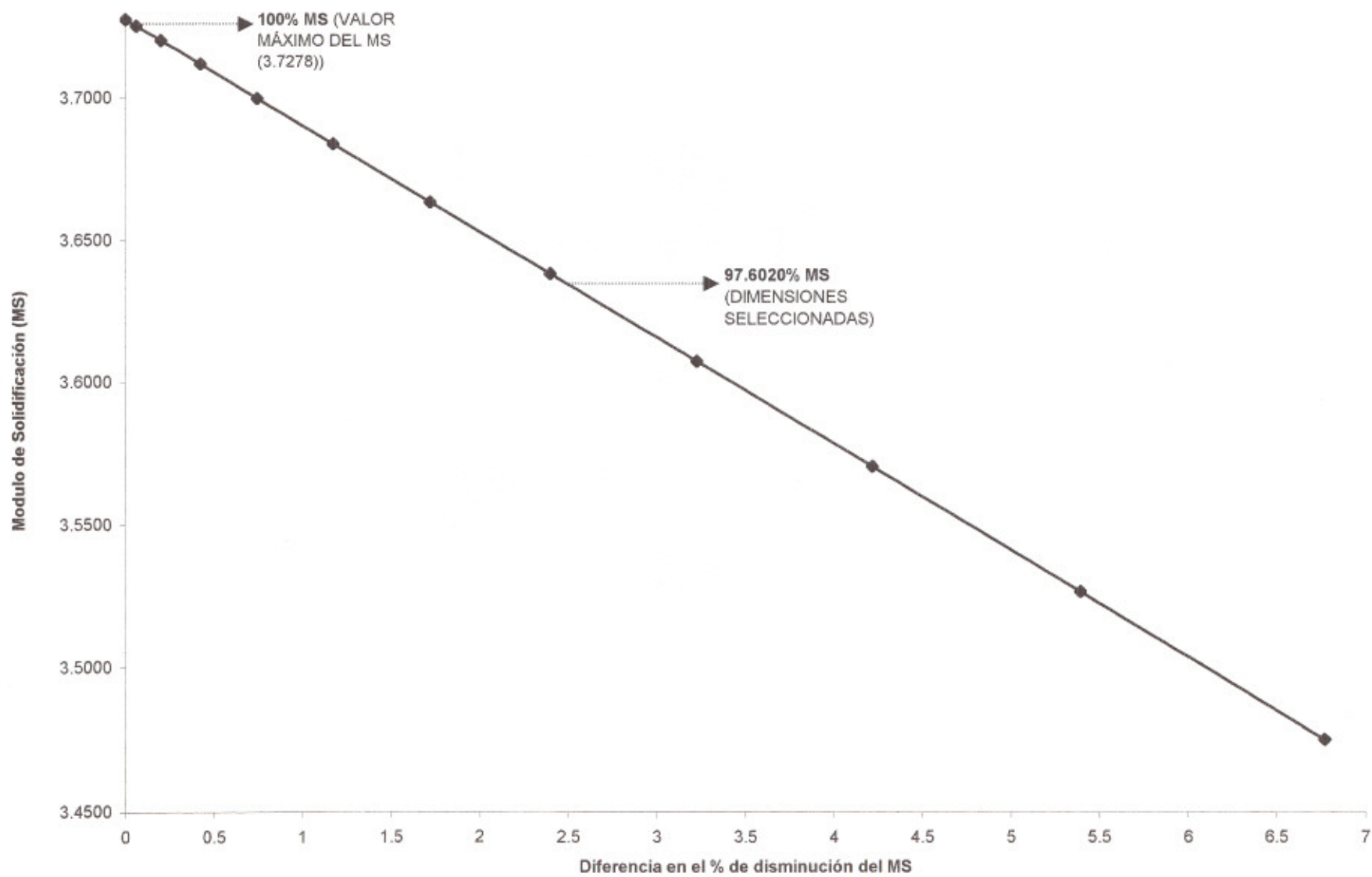
GRAFICA 1: MS vs LARGO



**GRAFICA 2: Zoom MS vs LARGO**



**GRAFICA 3:** Porcentaje de variación del MS respecto a las diferentes dimensiones de la tina para el metal líquido.



ALTURA : 10.5 cm  
LONGITUD: 38.0 cm  
ANCHO: 20 cm  
S: 10 cm.

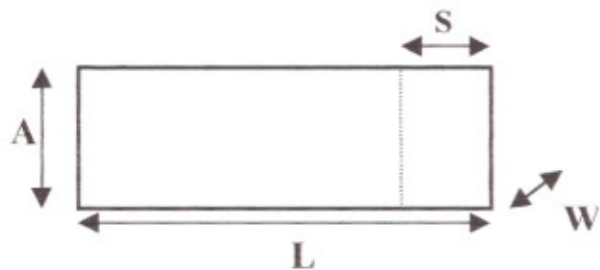


FIGURA 9. DIMENSIONES FINALES DE LA TINA DEL METAL LÍQUIDO

A partir de estos valores se diseña el resto del *horno de reverbero*.

### 3.2 DISEÑO DE LAS CÁMARAS DE FUSIÓN Y DE CONTENCIÓN.

Una vez obtenidas las dimensiones de la tina del metal líquido, se procedió a dimensionar tanto de la cámara de contención como de la cámara de fusión. En esta parte, hubo algunos puntos importantes que se tomaron en cuenta:

- La cámara de fusión tendría el piso inclinado para que el metal fundido se deslizara hacia la cámara de contención, por lo que dicha rampa debía estar al límite con la tina de metal líquido para que se llenara completamente. La inclinación del piso, debía estar entre los  $10^\circ$  y los  $15^\circ$  para asegurar la fluidez del metal fundido hacia la cámara de contención, pero que no pasara escoria hacia la tina del metal líquido; de la inclinación que tenga la rampa dependería el tamaño de la cámara de fusión.
- Era importante definir dónde irían colocados los quemadores, por lo que se consideró lo siguiente:
  - Si la cámara de contención era alta, y se colocaban los quemadores muy alto en la cámara, quizá sería necesario consumir mucha energía para calentar la cámara y al metal líquido.
  - Si la cámara de contención era baja, la flama de los quemadores estaría muy cerca del metal líquido y la contaminación de éste podría ser mayor. Y se calentaría demasiado la cámara de contención.
  - Si los quemadores se colocaban muy juntos o muy alejados, no se aprovecharía al máximo la potencia de estos y se requeriría de un consumo mayor de energía.

Basándose en estas consideraciones, se determinaron las características del *horno de reverbero*.

Primero se consideró el ángulo de la cámara de fusión, utilizando el valor medio, es decir  $13^\circ$ .

Tomando en cuenta que entre el área de transferencia de calor y el área para toma de muestra de metal líquido se encontraría la pared de la cámara de contención.

El tamaño de la cámara de contención tendría el doble de altura de la tina de metal líquido, ya que prácticamente se obtienen las dimensiones de un cubo lo que permite un mejor calentamiento de las paredes y de la irradiación de calor en la cámara.

Los quemadores se colocarían sobre la línea media de la altura de la cámara de contención. Debido a que en la cámara de fusión se colocaría la carga, los quemadores estarían colocados lo más arriba posible para que la flama no esté en contacto directo con la carga. La cámara de fusión seguiría un patrón recto respecto a la cámara de contención en la parte superior. Por lo que las dimensiones de la cámara de fusión son menores que las de la cámara de contención.

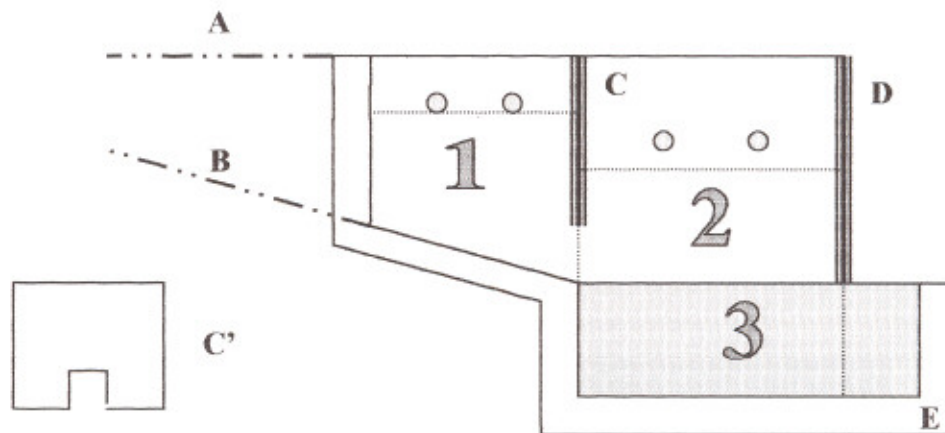
Para asegurar un calentamiento homogéneo, se escogieron aquellas dimensiones en que la cámara de fusión fuese lo más 'cuadrada'. Porque siempre se calienta primero la cámara de fusión a la temperatura óptima antes de introducir la carga.

Se requería de una pared que separe la cámara de fusión de la cámara de contención, así como un paso para el metal.

El horno tendría un recubrimiento refractario que debía ser considerado en las dimensiones finales.

La pared que estaría entre la parte de la toma de muestra y la cámara de contención podía disminuir un poco las dimensiones de ésta última; para reducir este efecto, se decidió que la mitad el grosor de esa pared se colocara sobre la línea imaginaria que divide al área de transferencia de calor y la de toma de muestra 'S'.

En la Figura 10 se muestra como quedó el diseño con las anteriores consideraciones:



**FIGURA 10. DISEÑO DE LAS CÁMARAS DE FUSIÓN Y DE CONTENCIÓN DEL HORNO DE REVERBERO.**

En la Figura 10, 1 es la cámara de fusión, 2 la cámara de contención y 3 la tina del metal líquido. Las líneas **A** y **B** sirven como referencia para el cálculo de la cámara de fusión, la línea superior y lateral izquierda de la cámara miden lo mismo. Las líneas 'gruesas' **C** y **D** indican, respectivamente, la separación de la cámara de fusión con la cámara de contención y la separación de la cámara de contención con el exterior. El dibujo **C'** muestra la vista frontal que se propuso para **C**, el paso del metal líquido hacia la cámara de contención, que debía tener el tamaño necesario para que pase el metal líquido.

### **3.3 DISEÑO DE LA TAPA Y CHIMENEAS.**

Se hicieron las siguientes consideraciones:

- Diseñar una tapa para la parte superior del horno con chimeneas para el escape de gases en cada cámara.
- Las chimeneas debía contar con un sistema que permitiera abrirlas o cerrarlas para dejar escapar los gases de combustión e impedir pérdidas de calor significantes.
- En la parte de la toma de muestra de metal también se colocaría una tapa.
- Por las características de tamaño del horno, se propuso que la tapa se pudiera remover fácilmente para tener acceso al interior del horno para limpieza y mantenimiento.

En la Figura 11 se ilustran las consideraciones anteriores.

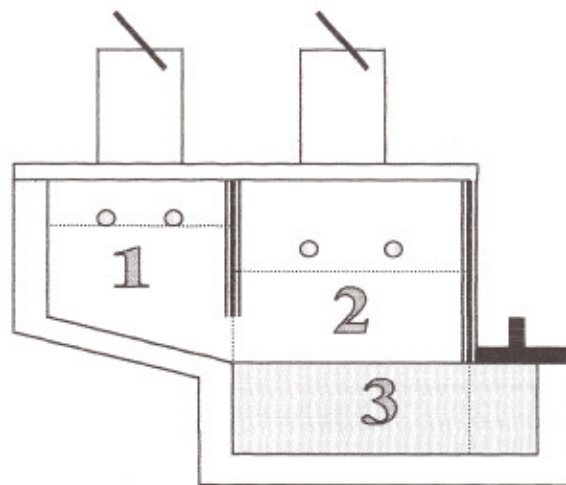


FIGURA 11. PROPUESTA PARA LAS TAPAS Y LAS CHIMENEAS DEL HORNO.

### 3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE VACIADO.

El *horno de reverbero* debía contar con un sistema que permitiera vaciar el metal líquido, ya sea para llenar recipientes grandes con parte del metal y dejar metal en la tina del horno, que la operación del equipo pare algún tiempo, o por motivos de mantenimiento, por lo que no podrá tener metal. En cualquiera de los casos, fue necesario considerar que el equipo contara con un buen sistema de vaciado, este consistiría en un tapón y una salida para el metal líquido.

Este punto es de gran importancia, si el sistema de vaciado no es bueno puede haber fuga de metal líquido y esto puede causar diversos problemas.

Por lo que se tomaron en cuenta algunos puntos importantes para diseñar un buen sistema de vaciado:

- Que selle perfectamente, que abra y cierre fácilmente aun cuando el *horno de reverbero* todavía contenga metal. Es decir, sin que haya fuga de metal líquido.
- Estar colocado de tal forma que no dificulte la operación del equipo ni el acceso al metal líquido. Además de que el operador tenga un fácil acceso al sistema de vaciado.
- Permitir libre fluidez del metal líquido, ya que si éste llega a solidificar y tapa el sistema de vaciado, puede haber problemas para destaparlo.



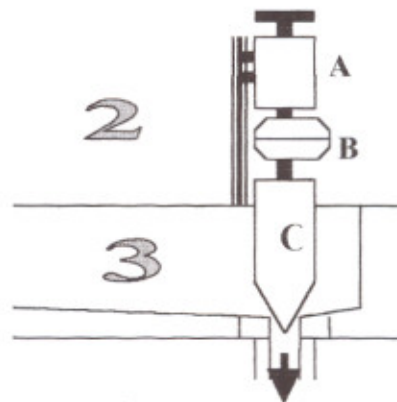
- Fabricado de materiales resistentes y que no se desgaste al contacto con el metal fundido.
- Y ser de fácil mantenimiento.

La ubicación del sistema de vaciado podía ser lateral o por debajo de la tina del metal líquido. Se ubicó en la zona de toma de muestra de metal.

Había dos opciones para el tapón y el sistema de vaciado: que el tapón estuviera dentro de la tina del metal líquido, o no.

Para el *horno de reverbero* se optó por un tapón colocado dentro de la tina del metal líquido. Y con un sistema para levantarlo y bajarlo fácilmente y sellarlo a presión. La salida del metal se ubicó por debajo de la tina del metal. Aquí es bueno mencionar que fue necesario darle a la tina del metal una ligera inclinación para que éste fluyera con facilidad hacia la salida.

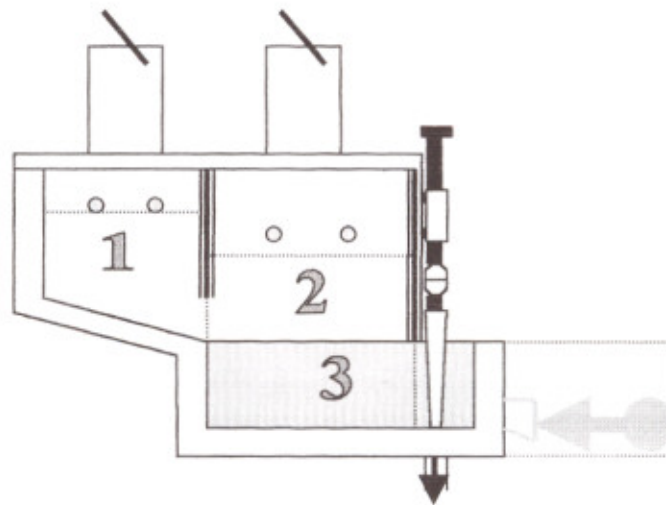
El diseño del sistema de vaciado se muestra en la siguiente figura:



**FIGURA 12. DISEÑO DEL SISTEMA DE VACIADO.**

En la Figura 12 se presentan las partes que conforman el sistema de vaciado, donde 2 y 3 son la cámara de contención y la cámara de fusión, respectivamente. La flecha indica la salida del metal. A es el soporte para el sistema del tapón y está apoyado en la pared exterior del horno. B es un sistema de deslizamiento para que el tapón C no se gire al momento de apretarlo, para evitar desgaste del recubrimiento refractario o incluso que pueda agrietarse o romperse la boquilla de salida del metal.

En la Figura 13 se muestra la ubicación del sistema de vaciado en el *horno de reverbero*.



**FIGURA 13. POSICIÓN DEL SISTEMA DE VACIADO EN EL HORNO DE REVERBERO.**

En algunos equipos, el tapón del sistema de vaciado se encuentra fuera del horno por un lado y el tapón es un tipo de lanza que se introduce a presión e impide la salida del metal, y cuando se retira el metal fluye hacia el exterior; en la Figura 13, el rectángulo punteado representa este tipo de sistema de vaciado. Esto ahorra espacio y no es necesario meterlo al metal.

### 3.5 DISEÑO DE LOS QUEMADORES

El tipo más común de quemador que se utiliza es en el que gas (propano, butano, o mezclas) y aire se mezclan antes de producir la reacción de combustión y son conocidos como quemadores de *premezcla*. Estos quemadores utilizan aire a presión proporcionado por un ventilador o una compresora. También pueden utilizarse tanques de oxígeno para enriquecer el aire, aunque estos equipos son caros.

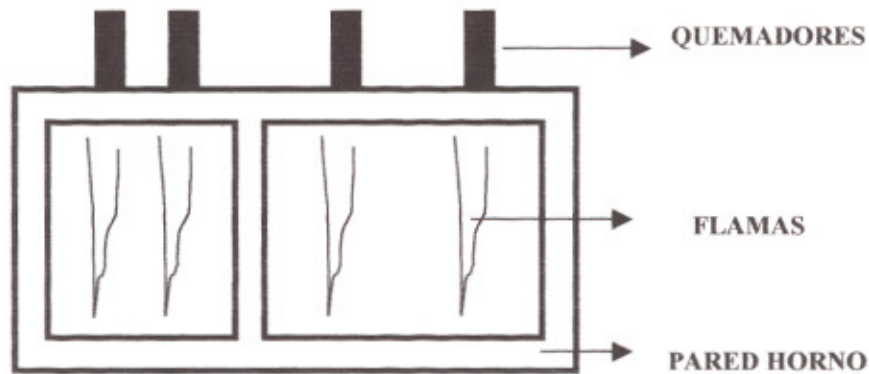
La presión de gas utilizado es la que sale directamente del tanque.

Los siguientes criterios se tomaron en cuenta para definir el tamaño de los quemadores que se utilizaron en el horno:

- Las cámaras de horno se calientan principalmente por radiación, por lo que para asegurar que las cámaras se calienten homogéneamente se propuso poner dos quemadores por cámara.

- La flama no debe incidir directamente sobre las paredes del horno, porque provoca el sobrecalentamiento del refractario y generación de grietas o fracturas, por lo que el diámetro del quemador y el largo de éste debe ser tal que produzca una flama lo suficientemente grande para abarcar toda el área posible pero sin producir daños en las paredes del horno.

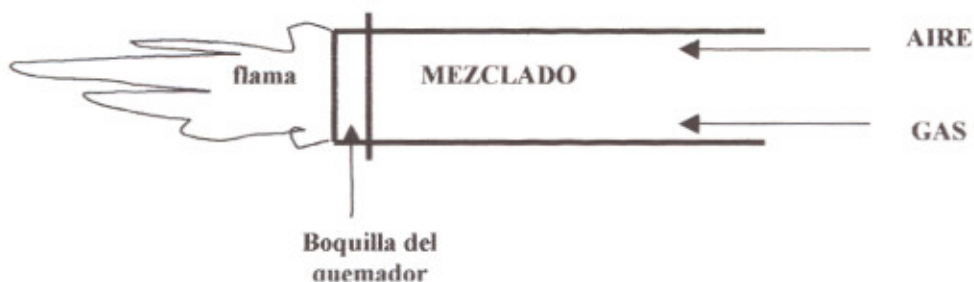
En la Figura 14 se ilustran a manera de ejemplo los criterios anteriormente mencionados.



**FIGURA 14. PROPUESTA DE LAVISTA SUPERIOR DE LAS FLAMAS DENTRO DEL HORNO DE REVERBERO. LAS FLAMAS NO TOCAN LA PARED E IRRADIAN EL CALOR DENTRO DE LAS CÁMARAS.**

Para definir el largo del quemador la idea principal es que el aire se mezcle de buena forma con el gas y la mezcla aire-gas salga a presión. Por lo que el quemador debe contar con un largo adecuado para que la mezcla se realice y no haya pérdida de presión.

La Figura 15 muestra la vista lateral del quemador:



**FIGURA 15. VISTA LATERAL DEL QUEMADOR. LA BOQUILLA SIRVE PARA DAR ESTABILIDAD A LA FLAMA.**

El aire y el gas entran por separado y se mezclan en el cuerpo del quemador, el largo debe permitir un buen mezclado, y evitar pérdidas de presión. La reacción de combustión se lleva a cabo en la boquilla.

En este tipo de quemadores la inestabilidad o desprendimiento de la flama es un factor importante. Este problema se soluciona colocando flamas auxiliares alrededor de la flama principal. Una vista frontal de la boquilla del quemador sería así:

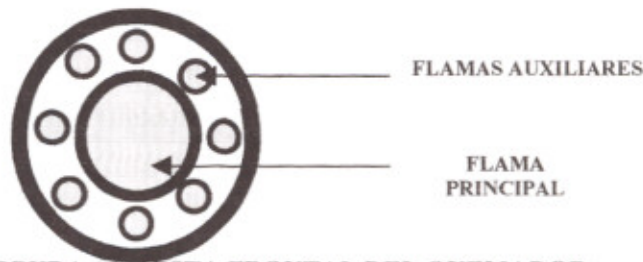


FIGURA 16. VISTA FRONTAL DEL QUEMADOR.

El diámetro del quemador depende directamente de la distancia que debe cubrir la flama, ya que un diámetro mayor provoca que la flama golpee en la pared del horno.

### 3.6 DISEÑO DEL SISTEMA DE FLUJO DE AIRE Y GAS

El *horno de reverbero* se diseñó con 4 quemadores, cada uno contara con su respectiva entrada de aire y gas. Se diseñó un sistema en el que a partir de una toma de aire y una toma de gas, éstos se distribuyeran a los cuatro quemadores. Regulando la entrada de gas o aire a cada quemador utilizando válvulas reguladoras para el paso de aire y de gas a cada quemador.

Para conocer el flujo de gas que introducido al sistema se colocó un flujómetro, y un manómetro para conocer la presión de entrada.

El sistema de flujo de gas y aire quedó así:

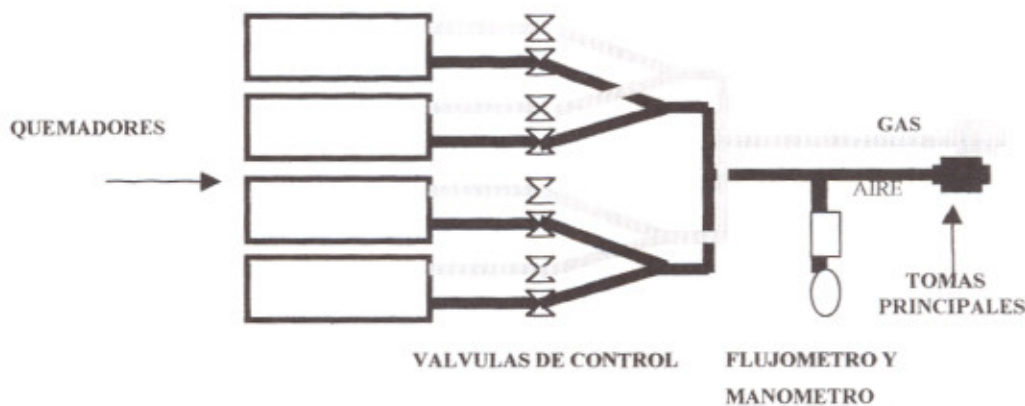
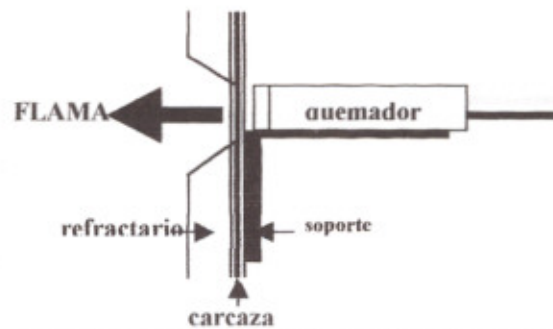


FIGURA 16. PROPUESTA DEL SISTEMA DE FLUJO DE LOS QUEMADORES.

Dada esta configuración del sistema fue necesario colocar unos soportes en la pared del *horno de reverbero* para sostener los quemadores. También es importante mencionar que la boquilla de los quemadores no debía quedar en contacto con la carcaza del horno, se colocarían de 0.5 – 1.0 cm de distancia, y con un orificio bastante amplio para que la flama entre al horno y no dañe la carcaza metálica.

La Figura 17 ilustra la colocación de los quemadores por fuera del horno:

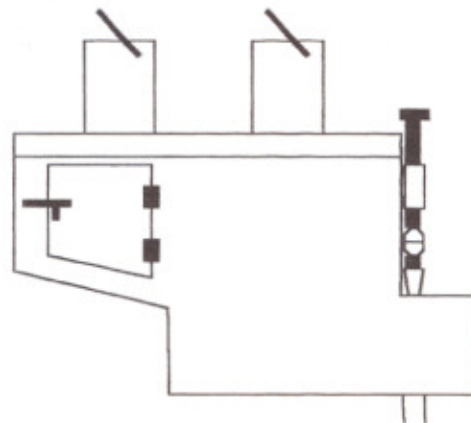


**FIGURA 17. COLOCACIÓN DEL QUEMADOR PARA LA ENTRADA DE LA FLAMA. SE MUESTRA EL SOPORTE PARA SOSTENER LOS QUEMADORES.**

### 3.7 DISEÑO DE LA PUERTA.

Para introducir la carga, el *horno de reverbero* tendría una puerta lateral en la cámara de fusión. La puerta al igual que todo el horno debía contener aislamiento térmico, así como cerrar a presión para evitar fugas de calor hacia el exterior.

La Figura 18 ilustra la propuesta para la puerta del horno:



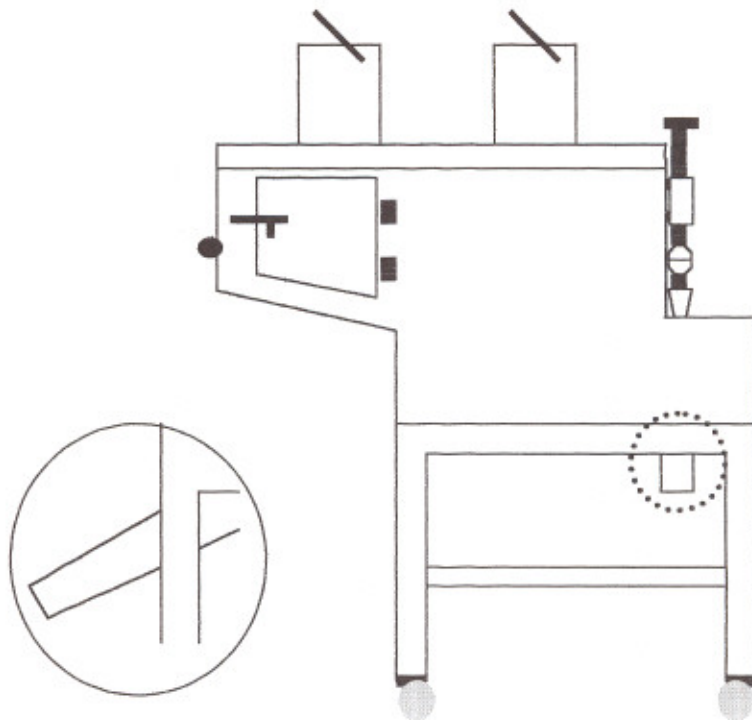
**FIGURA 18. POSICIÓN DE LA PUERTA EN EL HORNO DE REVERBERO.**

### 3.8 DISEÑO DE LA BASE DEL HORNO.

Por las dimensiones obtenidas del *horno de reverbero*, se diseñó una base para colocarlo. Se propuso también un sistema de rodamiento para facilitar su traslado, para mantenimiento o cambiarlo de lugar.

La altura de la base permite el fácil acceso tanto a la tina del metal líquido, a la puerta y al mantenimiento cuando sea necesario.

La Figura 19 muestra estas consideraciones:



**FIGURA 19. BASE PARA EL HORNO DE REVERBERO CON SISTEMA DE RODAMIENTO.**

Como lo muestra la Figura 19, ya que la salida para el metal líquido queda por debajo del horno, fue necesario colocar una canaleta para que el metal escurra hacia un lado y pueda manipularse fácilmente.

### 3.9 INSTRUMENTACIÓN DEL HORNO DE REVERBERO CON TERMOPARES.

Se decidió que en la pared exterior del horno se harían unas perforaciones para colocar termopares y conocer la temperatura del horno. Se colocarían termopares en la cámara de fusión, en la cámara de contención, y en la tina del metal líquido (estos se colocarían lo más cerca del metal sin perforar la pared del refractario, para evitar fugas de metal y asegurar una buena medición)

La Figura 20 ilustra esta propuesta:

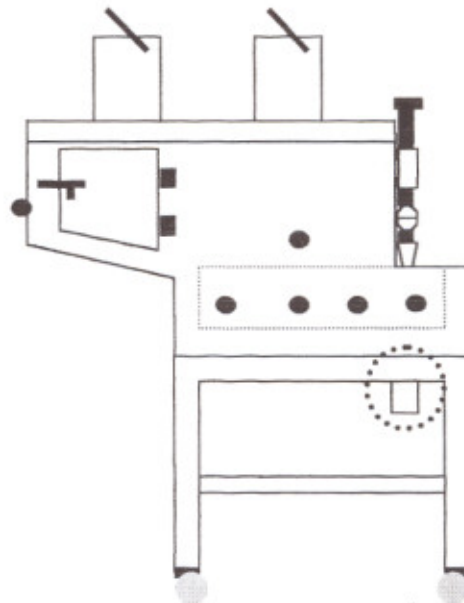


FIGURA 20. ORIFICIOS PARA LA COLOCACIÓN DE LOS TERMOPARES.

En la Figura 20, la línea punteada indica la colocación de la tina del metal líquido. Los puntos negros indican la ubicación que tendrían las perforaciones para los termopares.

La ubicación de los termopares se decidió basándose en lo siguiente: los de la cámara de fusión en la parte más alejada de la flama para asegurar que hay buen calentamiento; el de la cámara de contención a 1 o 2 cm sobre la superficie de la tina del metal líquido, para conocer a qué temperatura se encuentra; los de la tina del metal líquido a lo largo de esta, para conocer las variaciones de temperatura en distintos puntos y a la mitad de la altura de la tina y que el espesor de la pared en el punto de cada termopar fuera lo más cercano al metal (0.4 – 0.6cm) para conocer si hay calentamiento homogéneo.

### 3.10 DISEÑO DE HERRAMIENTAS.

Se diseñaron herramientas que serían utilizadas durante la operación del *horno de reverbero*:

- a) Cucharilla para tomar las muestras de metal líquido.
- b) Rastrillo para sacar la escoria que flota sobre el metal líquido.
- c) Palas para comprimir y remover la carga para que el metal fundido pase más rápido a la cámara de contención y evitar que se tape el paso entre ambas cámaras.



## CAPÍTULO IV. CONSTRUCCION DEL HORNO DE REVERBERO Y FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO.

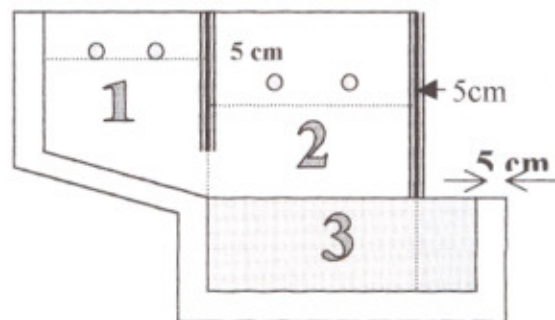
La construcción del *horno de reverbero* y las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del equipo se explican en este capítulo.

Lo primero fue hacer las consideraciones necesarias para determinar el espesor de la pared refractaria y el tipo de refractario que se iba a utilizar. Para el *horno de reverbero* se utilizó un refractario base 80% sílice y 20% alúmina, mezclado con arcilla. Así como barro refractario de alta alúmina para tapar las pequeñas grietas que aparecieron cuando se secó el refractario. Y finalmente se recubrió la pared interna del horno con pintura de circonio para evitar que el material se quedara adherido a la pared.

El espesor de la pared refractaria es de 5cm.

Tanto al techo del *horno de reverbero* como a la puerta no se le colocó refractario. Se utilizó fibra aislante resistente a altas temperaturas.

La Figura 22 muestra el espesor de las paredes del *horno de reverbero*.



**FIGURA 22. ESPESOR DE LAS PAREDES DEL HORNO.**

El espesor de la pared de la cámara de contención es 5cm, pero como se mencionó anteriormente, se distribuye sobre la línea de 'S' mitad y mitad. Esta reducción no afecta de manera significativa la transferencia de calor hacia la tina..

También la pared que separa a la cámara de contención de la cámara de fusión mide 5cm, y es importante que cuando se monte la carcaza metálica se considere que toda la pared estará rodeada de refractario incluyendo el paso para el metal fundido.

Con el espesor del refractario ya establecido, se construyó la carcaza metálica que será el soporte para todo el horno.

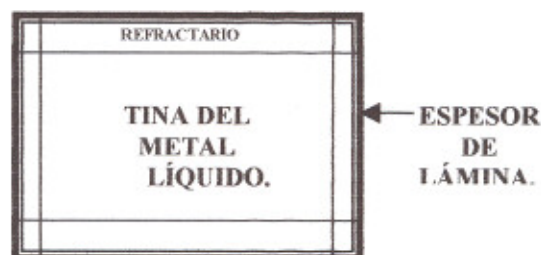
#### 4.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CARCAZA METÁLICA

La carcaza metálica le da forma al horno, soporta al refractario y sirve de aislante para disminuir el calor emitido por el *horno de reverbero* hacia el exterior.

Se utilizó lámina gruesa de acero (calibre 16) para construir la carcaza metálica..

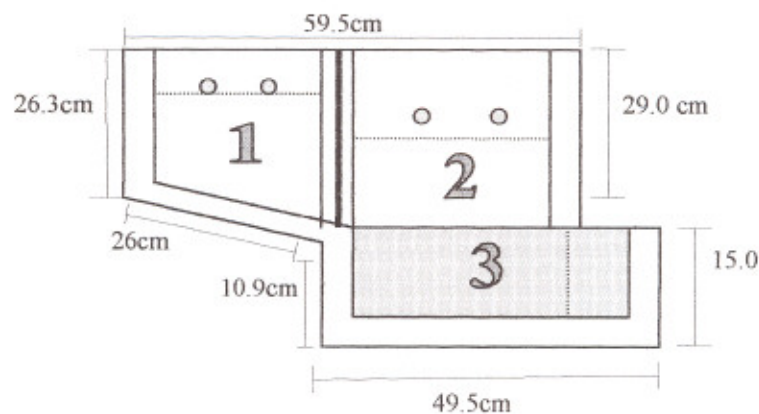
Primero se cortó la base para el cuerpo del horno, para esto se consideraron las dimensiones obtenidas de la tina del metal líquido más los 5cm de espesor de refractario de cada lado de la tina y el espesor de la lámina de las paredes del horno ya que éstas se montarán sobre esta base.

Es decir:



**FIGURA 23. BASE PARA EL CUERPO DEL HORNO. SE MARCAN LAS ZONAS CORRESPONDIENTES A CADA PARTE.**

Después se recortaron los lados del horno, las paredes frontales, la base de la cámara de fusión y la pared que separa la cámara de fusión y la de contención. Para esto se tomó en cuenta que el refractario va desde la base de la tina del metal líquido. Así:



**FIGURA 24. CONSIDERANDO EL GROSOR DEL REFRACTARIO, SE CORTAN LOS PEDAZOS DE LÁMINA AL TAMAÑO NECESARIO.**

Se recortaron los círculos para el paso de las flamas de los quemadores.

En la Figura 24 la línea oscura indica la posición en la que se colocó la base metálica para la pared.

Una vista frontal de la pared que separa la cámara de fusión de la cámara de contención es la siguiente:

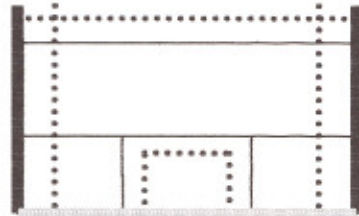


FIGURA 25

En la Figura 25, las líneas gruesas indican las paredes laterales del horno, las líneas delgadas son las secciones de lámina que forman la base de la pared y las líneas punteadas indican el espesor del refractario. La línea clara en la base indica el refractario de la tina del metal líquido.

El tamaño del paso para el metal fue aproximadamente  $\frac{1}{4}$  del ancho, considerando que el metal fundido debía pasar con facilidad y el paso no se tapara fácilmente.

La ubicación de la puerta con respecto a la cámara de fusión se colocó de la siguiente manera:

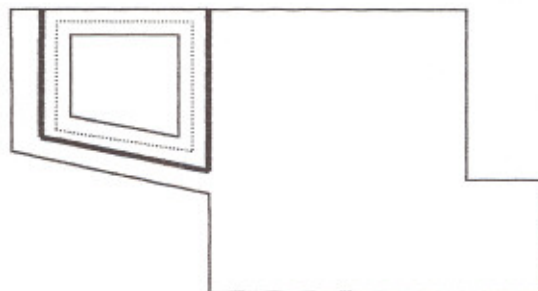


FIGURA 26. UBICACIÓN DE LA PUERTA.

En la Figura 26, la línea gruesa indica el tamaño de la cámara de fusión, la línea del centro es un corte que se hace en la lámina para que quede como la abertura por donde se introducirá la carga y la línea punteada indica la posición de la puerta sobre esta abertura, que es de 2cm. Se puede ver que la puerta es de tamaño tal que cubre completamente la abertura para introducir la carga.

Las placas recortadas se unieron con soldadura para que quedaran fijas. Y queda terminada la carcasa metálica del horno.

#### 4.2 CONSTRUCCIÓN DE LA PUERTA

La puerta se construyó con placa de acero del mismo espesor que la carcasa metálica. Para protegerla del calor de la cámara de fusión se le colocó una capa de fibra aislante y para evitar que se desprendiera se le colocó en toda la orilla tramos de perfil en forma de 'n' para sujetarla. Se colocaron dos bisagras a la puerta para que abriera lateralmente y se soldaron a la puerta y a la carcasa metálica. Se le colocó un seguro a la puerta para poder cerrarla a presión y evitar fugas de calor.

El eje de las bisagras se puede desmontar para separar la puerta cuando necesite mantenimiento

La puerta quedó como lo muestra a continuación la Figura 27:

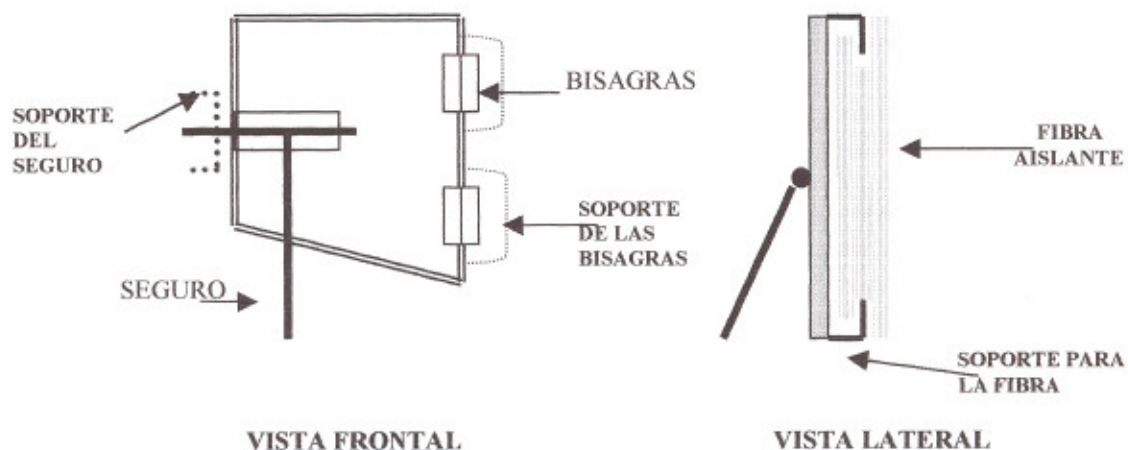


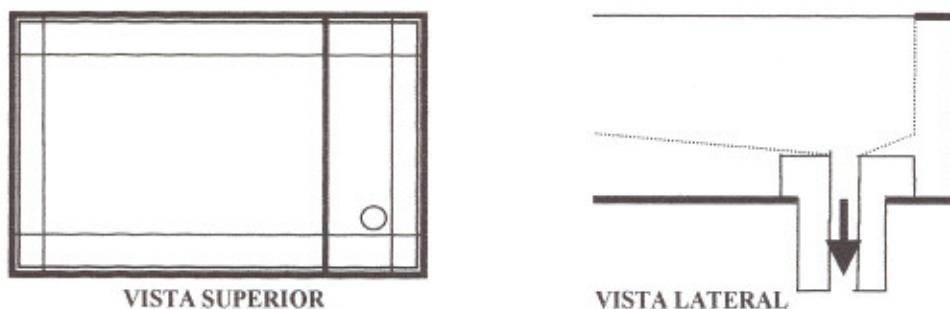
FIGURA 27. FORMA FINAL DE LA PUERTA. SE INDICAN TODAS LAS PARTES.

La fibra aislante se adherió al metal y a los tramos de perfil con silicato de sodio.

#### 4.3 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE VACIADO

El sistema de vaciado incluye la salida del metal y el tapón de ésta. Primero se colocó la salida del metal. Se utilizó una boquilla cerámica y se hizo un orificio en la base del horno donde se colocó. Al piso de la tina de metal líquido se le dio una inclinación de  $3^\circ$  hacia la boquilla. Esta inclinación se dio cuando se aplicó el refractario, pero se marcó sobre la carcasa metálica. El orificio para la boquilla se hizo en la esquina de la tina del metal líquido.

Se construyó la salida para el metal así:



**FIGURA 28. COLOCACIÓN DE LA SALIDA PARA EL METAL LÍQUIDO.**

En las Figura 28 se pueden notar dos cosas: el orificio donde se colocó la boquilla para la salida del metal no quedó completamente pegado a la pared de la tina del metal líquido, quedó aproximadamente a 1.5 cm de separación; en la figura de al lado, las líneas punteadas representan el refractario y la inclinación que se le dio para que deslice el metal.

En cuanto a la construcción del tapón:

El tapón sella la salida a presión y además no gira al apretarlo, esto para evitar que la boquilla se rompa. El sistema del tapón está dividido en dos partes: una parte móvil que girar para hacer la presión y una parte fija que evita que el tapón gire.

Por lo que se construyó un sistema de campana.

En la construcción de la parte móvil se utilizó varilla con cuerda (sinfín) a la cual en la parte superior se le soldó una perilla para girar con más facilidad el sistema.

Se necesitaba un soporte que detuviera la varilla al horno además de que sirviera de guía a la parte móvil. El soporte se hizo con un tramo de tubo un poco mayor al grosor del sinfín al cual se le soldó en cada uno de los extremos dos tuercas para que sirvieran de guía al tornillo. Al tubo se le soldó un pedazo de placa a la cual se le hicieron perforaciones para colocar tornillos y sujetarla a una base soldada al horno.

La campana se construyó utilizando una unión para tubería con cuerda, que tenía la forma requerida. Se colocó una tuerca y una rondana en la parte superior de la campana; esto es para que la campana no se subiera y quedara solo girando. Luego se introdujo el sinfín en la campana y en la punta se le soldó una tuerca la cual se redondeó. Finalmente se le untó grasa para que deslizara este sistema de campana.

La parte fija se hizo con un pedazo de tubería con cuerda que ajustaba con el pedazo de tubería de la campana. Se le soldó una base cuadrada y por debajo una tuerca para atornillar otro pedazo de sinfín.

El tapón se hizo con una barra metálica maquinada en forma de punta. Se le hizo una cuerda en el centro para atornillar bien el pedazo de sinfín.

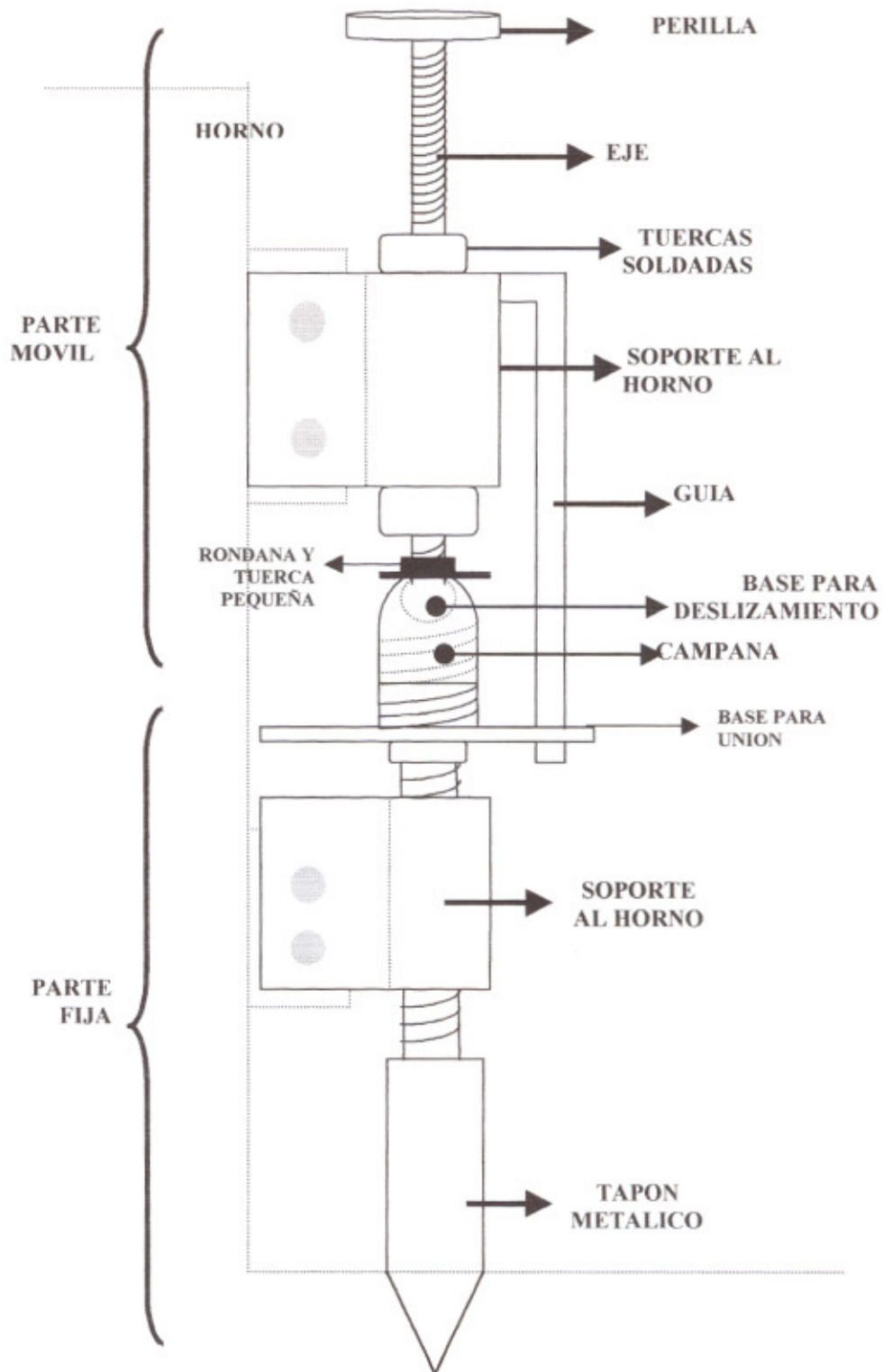
Se hizo una guía que une a la base cuadrada de la parte fija con la parte móvil para evitar deslizamiento del tapón y que pueda dañar la boquilla.

Al igual que a la parte móvil, a la parte fija se le hizo un soporte para sujetarla al horno.

De esta manera tanto la parte móvil como la parte fija se pueden unir, pero a la vez se pueden separar y desmontar para darles mantenimiento.

En el **Diagrama 1**, se ilustra cómo quedó terminado el tapón y se indican cada una de sus partes.

DIAGRAMA 1. Forma final del tapón para el sistema de vaciado.



#### 4.4 APLICACIÓN DEL REFRACTARIO

Para aplicar el refractario fue necesario preparar la carcasa metálica para que se tuviera un buen soporte para el refractario y no correr el riesgo de un desprendimiento.

Se soldaron pequeños pedazos de varilla en forma de grapa por toda la pared interna de la carcasa metálica y en gran cantidad, el tamaño de las grapas fue de 2.5 – 3cm puesto que el espesor del refractario es de 5cm.

Otra opción que no se utilizó fue la de colocar una malla metálica a unos 2.5cm de la cara interna de la carcasa metálica, para servir de soporte para el refractario.

Una vez preparada la carcasa metálica del *horno de reverbero*, se procedió a preparar el refractario para colocarlo.

Se utilizó refractario de sílice, combinado con arcilla.

Para preparar el refractario se agregó una pequeña cantidad de agua y se mezcló hasta alcanzar una masa de consistencia moldeable. El refractario se colocó en la carcasa metálica, compactándolo con un mazo de goma.

La compactación es importante ya que al contener agua la mezcla, ésta se evapora cuando el refractario se seca y si no queda bien compactado se agrieta y desprende. Se esperó a que el refractario seicara completamente y después sobre el refractario se aplicó el barro refractario de alta alúmina, finalmente se pintó el interior del *horno de reverbero* con pintura de circonio.

#### 4.5 CONSTRUCCIÓN DE LOS QUEMADORES Y DEL SISTEMA DE FLUJO

Para la construcción de los quemadores se utilizó tubo de acero de  $\frac{3}{4}$  de pulgada.

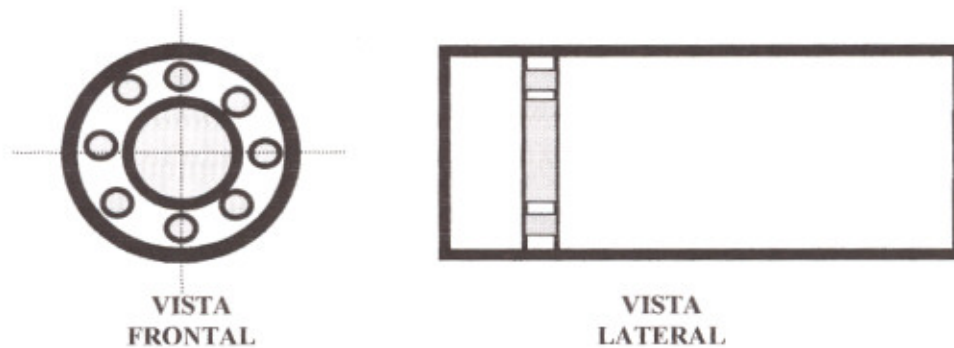
Los tubos se cortaron de 30cm de largo.

Se utilizó una placa de acero a la que se le hizo un agujero para la salida principal de la flama, alrededor del círculo grande se hicieron pequeñas perforaciones para las flamas estabilizadoras.

Sobre la placa se soldó otro pedazo de tubo de unos 2cm que sirvió como boquilla para darle más estabilidad al conjunto de flamas.



La Figura 29 muestra esta parte del quemador:



**FIGURA 29. PARTE DEL QUEMADOR CORRESPONDIENTE A LA BOQUILLA PARA LAS FLAMAS.**

En el otro extremo del tubo se colocaron los alimentadores de gas y aire. Se utilizó tubería de cobre para el gas y aire. Se colocaron como lo ilustra la Figura 30, y se selló perfectamente esa parte para evitar fugas. Los tubos de cobre se introdujeron 2 cm.



**FIGURA 30. COLOCACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE COBRE EN EL QUEMADOR.**

Para el sistema de flujo se utilizó manguera y válvulas de paso.

Se colocó un flujómetro de aire para controlar el flujo de gas por lo que fue necesario calibrarlo para gas, más adelante se explica cómo se realizó la calibración.

El manómetro que se utilizó es del tipo que se usan en tanques comunes.

Se construyó un sistema de soporte para los quemadores que permitiera removerlos para mantenimiento. Se construyó un sistema para los quemadores de la cámara de contención y uno para los quemadores de la cámara de fusión.

La base para los quemadores se hizo con perfil y se soldó a la carcasa metálica del horno. Para sujetar los quemadores se utilizaron dos tramos de solera que se sostienen con tornillos con tuerca para que sujeten a presión.

Los soportes para los quemadores se ilustran en la Figura 31 quedaron así:



FIGURA 31. VISTA SUPERIOR Y FRONTAL DEL SISTEMA DE SOPORTE DE LOS QUEMADORES.

#### 4.6 CONSTRUCCIÓN DE LA TAPA Y LAS CHIMENEAS

La tapa se construyó con lámina del mismo tipo que la carcasa metálica.

Sobre la lámina se marcó la posición en la que irían las chimeneas.

Para construir las chimeneas se utilizó tubo grueso de 10cm de diámetro y se soldó a la tapa.

Para controlar la salida de los gases de combustión se recortaron pedazos circulares de lámina de un diámetro poco menor que el tubo usado para las chimeneas y se les adaptaron con soldadura unas bisagras para abrirlas y cerrarlas. Las chimeneas se recubrieron por el interior con fibra aislante.

Se colocaron algunos broches para que la tapa cerrara a presión. Por lo que la tapa debía embonar bien con la carcasa metálica.

La Figura 32 ilustra lo antes mencionado:

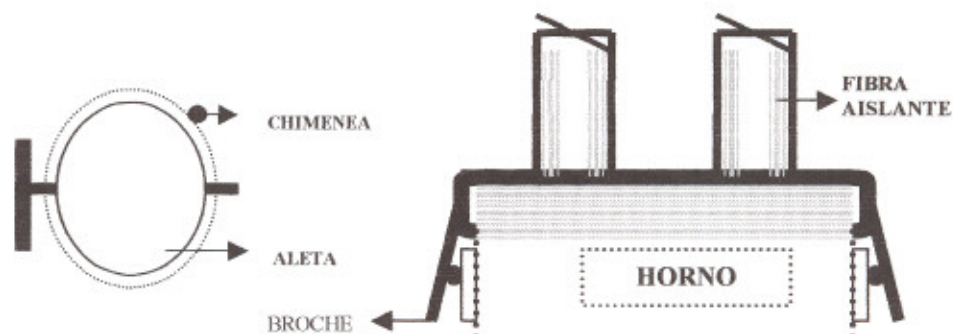


FIGURA 32. FORMA FINAL DE LA TAPA Y LAS CHIMENEAS.

#### **4.7 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DEL HORNO**

La base se construyó con perfil grueso de acero.

Se utilizaron ruedas de acero para evitar que con el tiempo se deformen por el peso del *horno de reverbero*.

La canaleta para el vaciado de metal se hizo también con perfil grueso, se soldó a la base del horno y se recubrió con fibra cerámica aislante.

#### **4.8 CONSTRUCCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS**

Las herramientas a utilizar se construyeron con material de reciclaje (chatarra) como varillas de acero y placa o solera. Se utilizó soldadura para unirlos.

Para evitar contaminación del metal se utilizó pintura refractaria para recubrir las herramientas.

Las cucharillas para tomar muestra se pueden construyeron con cucharillas comerciales de acero inoxidable, pero hubo que quemarlas para quitarles los posibles recubrimientos que pudieran tener. Una vez quemadas, se recubrieron con pintura refractaria.

#### **4.9 ORIFICIOS PARA LOS TEMOPARES.**

En la parte exterior del horno se hicieron unas perforaciones para introducir los termopares y conocer la temperatura del *horno de reverbero*.

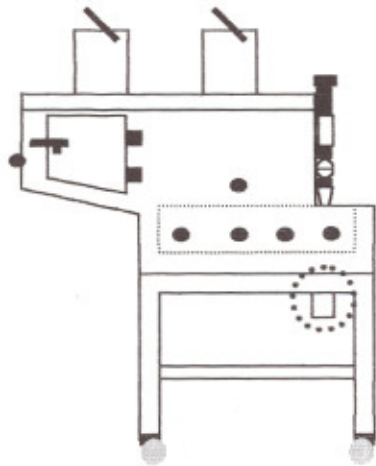
Se colocaron orificios para los termopares en la cámara de fusión, en la cámara de contención, y a la altura de la tina del metal líquido (estos se colocaron lo más cerca del metal sin perforar la pared del refractario, para evitar fugas de metal y asegurar una buena medición)

La ubicación de los termopares fue la siguiente: el de la cámara de fusión se colocó cerca de la puerta sobre la pared lateral más pequeña de la cámara, en la parte más alejada de la flama para asegurar buen calentamiento; el de la cámara de contención se colocó aproximadamente 2 cm sobre la superficie de la tina del metal líquido; los termopares de la tina del metal líquido, a lo largo de esta, para conocer las variaciones de temperatura en distintos puntos y se colocaron a la mitad de la altura de la tina, el espesor de la pared en el

punto de cada termopar fue de 0.4 cm para que se registrara la temperatura de la pared interior de la tina del metal líquido.

En la Figura 33 se ilustra la colocación de las perforaciones para los termopares.

En esta Figura, la línea punteada indica la colocación de la tina del metal líquido. Los puntos negros indican las perforaciones de los termopares, el tamaño de las perforaciones debe ser sólo lo suficiente para que entre el termopar.



**FIGURA 33. COLOCACIÓN DE LAS PERFORACIONES PARA LOS TERMOPARES EN LA PARED DEL HORNO DE REVERBERO.**

Con esto último, el *horno de reverbero* quedó listo para funcionar, por lo que se procedió a comprobar su funcionamiento.

#### **4.10 CALIBRACIÓN DEL FLUJÓMETRO.**

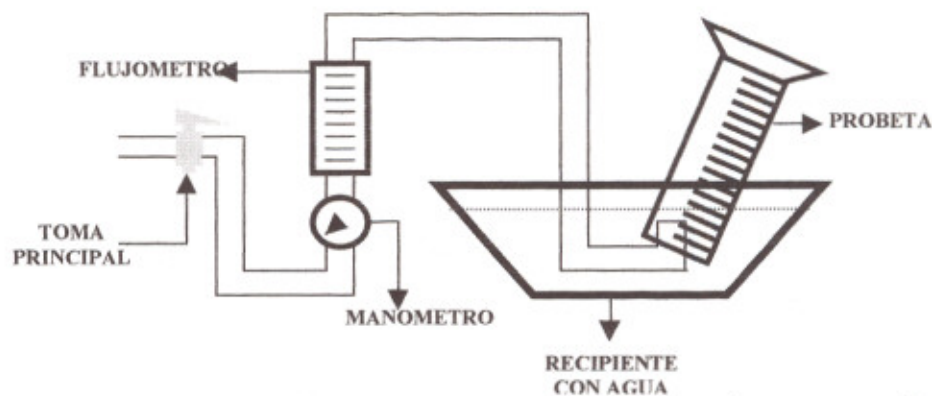
Para el sistema de flujo del *horno de reverbero* se utilizó un flujómetro para aire, ya que no se consiguió uno específico para el gas utilizado; por lo que tuvo que calibrarse para poder tomar la lectura correspondiente para el flujo de gas.

El experimento se realizó para la toma principal de gas.

El flujómetro cuenta con una escala para aire de 0 – 30 L/min, con divisiones de 100 en 100 mL.

Se utilizó un recipiente grande con agua, una probeta de 1000 o 2000 mL, y un cronómetro.

En la Figura 34 se muestra como se montó el experimento:



**FIGURA 34. MONTAJE PARA EL EXPERIMENTO DE CALIBRACIÓN DEL FLUJÓMETRO.**

Se propuso calibrar toda la escala del flujómetro o hasta que se percibiera una tendencia. Para validez de la prueba la presión del gas debía mantenerse constante durante toda la experimentación, por lo que se utilizó manómetro.

Al estar trabajando con gas se tomaron las medidas de seguridad necesarias.

El experimento se desarrolló de la siguiente manera:

- La probeta se llenó completamente con agua y se introdujo de cabeza en el recipiente, asegurando que no quedaran burbujas de aire en el interior.
- Se abrió la llave de la toma de gas hasta que el flujómetro indicó el valor más bajo. El experimento se hizo recorriendo la escala de aire cada 100mL/min hasta que se notó una tendencia. Para cada valor, el experimento se hizo al menos por triplicado.
- Cabe mencionar que cuando se abría la llave y empezaba a salir el gas por la manguera, ésta estaba fuera de la probeta pero dentro del recipiente.
- Cuando el flujo se establecía, se colocaba la manguera dentro de la probeta y se empezaba a contar el tiempo. Se utilizaron dos opciones:
  - Se midió el volumen de gas que se desplazó en un minuto, y
  - Se contó el tiempo en que se tardó en desplazarse cierta cantidad de gas.

Como se contaba con una probeta de 2L, la prueba solo se pudo realizar hasta que se desplazó el volumen máximo posible. Pero como se notó una tendencia muy marcada, lo que se hizo fue extrapolar los datos para los demás valores de la escala del flujómetro. También se hizo una prueba en la que el flujómetro de aire marcaba 5L/min, se contaron 10 segundos y se vio el volumen ocupado por el gas y se hizo el cálculo de cuánto gas se habría desplazado en 60 segundos.

La tabla obtenida fue la siguiente:

**TABLA 2. CALIBRACIÓN DEL FLUJÓMETRO.**

ESCALA FLUJOMETRO AIRE (L/min)	VOLUMEN DE GAS DESPLAZADO (L/min)			PROMEDIO
0.100	0.170	0.180	0.170	0.170
0.200	0.270	0.270	0.270	0.270
0.300	0.370	0.370	0.380	0.370
0.400	0.480	0.480	0.470	0.480
0.500	0.570	0.560	0.570	0.570
0.600	0.680	0.680	0.680	0.680
0.700	0.770	0.770	0.780	0.770
0.800	0.870	0.890	0.890	0.890
0.900	0.970	0.970	0.980	0.970
1.000	1.090	1.080	1.080	1.080
1.100	1.160	1.160	1.170	1.160
1.200	1.270	1.270	1.270	1.270
1.300	1.380	1.390	1.370	1.380
1.400	1.470	1.470	1.470	1.470
1.500	1.570	1.580	1.570	1.570
5*	5.1	5.1	5.1	5.1

En (\*), en 10 segundos se desplazaron .850 mL de gas en promedio. Por regla de tres:

$$\left( \frac{0.850\text{mL}}{10\text{seg}} \right) \times 60\text{seg} = 5100\text{mL}$$

Este valor no está muy lejano a lo que habíamos obtenido.

Como se puede ver en la **Tabla 2**, a cada valor de la escala de flujo de aire le corresponde un valor de flujo de gas.

Con los datos obtenidos se construyó la **Gráfica 4** que muestra el comportamiento lineal y tanto en la tabla como en la gráfica se puede ver que la diferencia entre la escala de aire y el valor correspondiente al flujo de gas no es muy distinta, por lo que se determinó que el flujo era muy parecido.

Flujómetro.

Escala G

15

10

5

5



#### 4.11 PRUEBAS CON LOS QUEMADORES

Las pruebas con los quemadores se realizaron con los quemadores montados en el *horno de reverbero*, pero con la tapa del horno removida.

La prueba se realizó verificando la temperatura de flama que se alcanzaba en los cuatro quemadores a diferentes flujos de gas: flujo bajo, flujo mediano y flujo alto según la escala del flujómetro. Se consideró de 0 – 10 flujo bajo, de 11 – 20 flujo medio y de 21 - 30 flujo alto. Se utilizaron termopares tipo K para verificar las temperaturas.

Las temperaturas se verificaron en tres diferentes posiciones de la flama, con la ayuda de termopares:

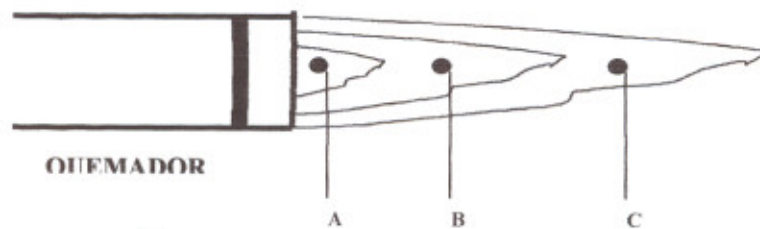


FIGURA 35. COLOCACIÓN DE LOS TERMOPARES EN LA FLAMA DEL QUEMADOR PARA REGISTRAR LAS TEMPERATURAS

Para cada punto y cada flujo las pruebas se realizaron por triplicado.

Los datos se registraron en una tabla con las siguientes características:

NO. QUEMADOR	PUNTO	FLUJO		
		BAJO	MEDIO	ALTO
		TEMPS	TEMPS	TEMPS
#	A			
	B			
	C			

Los valores obtenidos de las temperaturas permitieron seleccionar un flujo de trabajo.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de la prueba de flama:



**TABLA 3. RESULTADO DE LA PRUEBA DE FLAMAS.**

NO. QUEMADOR	PUNTO	FLUJO BAJO (3L/min)*			FLUJO MEDIO (13L/min)			FLUJO ALTO (21L/min)		
		TEMPS			TEMPS			TEMPS		
1	A	934	962	990	1227	1192	1215	1268	1283	1276
	B	894	834	840	1208	1196	1205	1232	1245	1238
	C	712	722	712	980	1089	1035	993	1109	1112
2	A	1144	1169	1148	1269	1253	1248	1288	1293	1296
	B	1118	1126	1025	1041	1132	1119	1258	1260	1267
	C	741	779	788	830	883	860	1006	1118	1120
3	A	1048	1016	1094	1242	1287	1256	1270	1282	1279
	B	1009	997	940	1201	1200	1196	1228	1232	1231
	C	730	752	760	1052	1071	1068	1082	1091	1089
4	A	1074	1094	1103	1208	1252	1292	1273	1286	1291
	B	1000	1028	1040	1018	1118	1126	1086	1098	1102
	C	780	789	760	963	973	988	999	1001	1006

El (\*) indica que ese flujo fue el mínimo que se pudo utilizar con una flama estable.

Como se puede ver en la tabla, a un flujo medio (13Lmin) se alcanzó una buena temperatura de flama, y ya no fue tan necesario considerar los flujos altos ya que estos solo representan consumo innecesario de gas, promoverían una mayor oxidabilidad de la atmósfera del horno, aunque se podría disminuir el tiempo de calentamiento del horno.

#### 4.12 PRUEBAS PRELIMINARES DEL HORNO DE REVERBERO

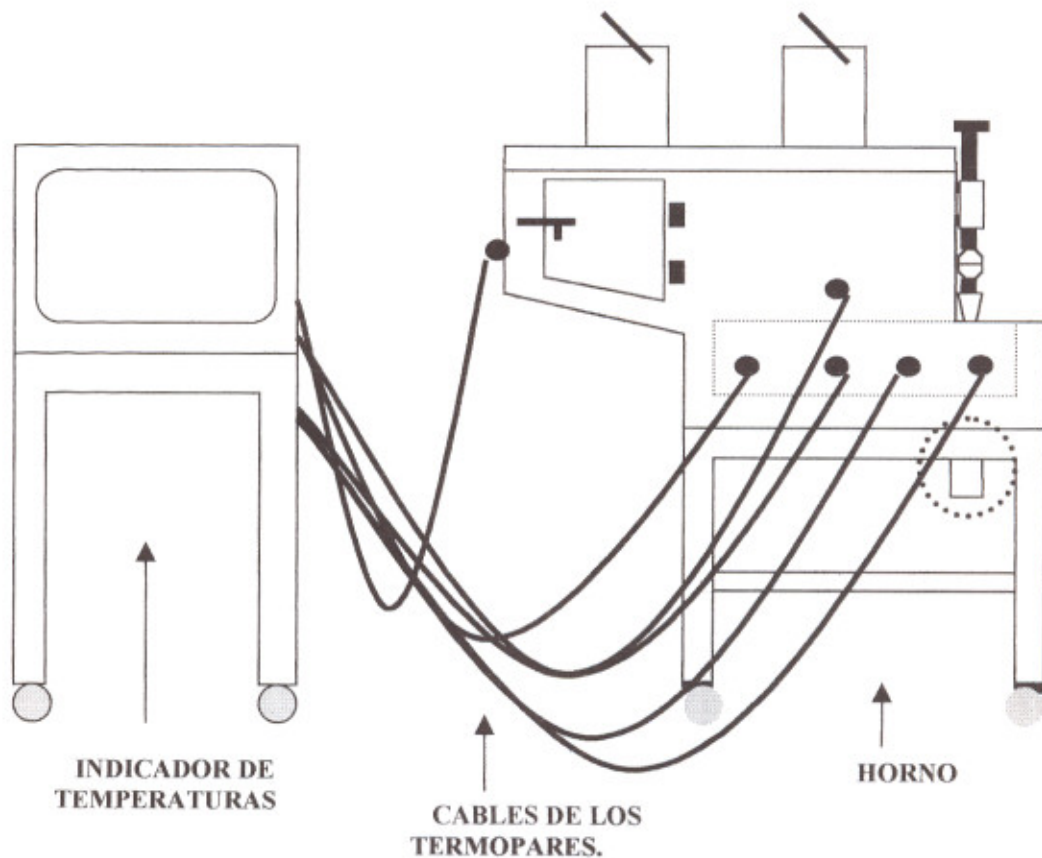
Estas pruebas se realizaron con lingotes de aluminio sin clasificar.

El objetivo de esta prueba fue conocer el tiempo en que el *horno de reverbero* alcanzaba una temperatura óptima de trabajo, el tiempo aproximado en que fundía una carga, y finalmente conocer los parámetros importantes a controlar.

Se prepararon cargas de 20Kg de lingotes para calcular el tiempo que se requería para que se fundieran.

Para esta prueba se colocaron termopares en los orificios de las paredes del horno de reverbero y, con la ayuda de un equipo electrónico para conocer las temperaturas, se iba registrando el calentamiento del horno.

La Figura 36 ilustra el montaje que se hizo para realizar la prueba:



**FIGURA 36. MONTAJE PARA LA PRUEBA DE FUSIÓN PRELIMINAR DEL HORNO DE REVERBERO.**

Como ya se mencionó, las pruebas se realizaron con lingotes pequeños de aluminio sin clasificar.

Las cargas de 20Kg se fueron introduciendo de 5 en 5Kg porque la carga no cupo completa en la cámara de fusión del horno.

La prueba se fue registrando según fue transcurriendo, ya que también se hizo por conocer los principales aspectos a tomar en cuenta.

Se hicieron tres pruebas de fusión preliminares y en las tres pruebas el desarrollo fue muy parecido, por lo que sólo se expondrá a continuación una.

Las pruebas se realizaron de la siguiente forma:

PRUEBAS PRELIMINARES DEL HORNO DE REVERBERO:

FECHA: 23 de Noviembre del 2005.      PRESIÓN GAS: 1.2 Kg/cm<sup>2</sup>  
TEMPERATURA INICIAL: 12.9 °C      ARRANQUE HORNO: 9:02 Hrs.  
QUEMADORES: 1 y 2 funcionando.      FLUJO DE GAS: 11 L/min aprox.

----- 9:32 Hrs. -----

QUEMADORES: 1 y 2 funcionando (cámara de contención).

FLUJO DE GAS: 18 L/min aprox

----- 9:46 Hrs. -----

CARGA: Primeros 5Kg se introducen.      FLUJO DE GAS: 13 L/min aprox

TEMPERATURA CÁMARA DE FUSIÓN: 750°C

TEMPERATURA CÁMARA DE CONTENCIÓN: 860°C

QUEMADORES: 1 y 2 funcionando. (cámara de contención)

3 y 4 funcionando. (cámara de fusión)

----- 10:09 Hrs -----

CARGA: 5Kg más.      FLUJO DE GAS 11 L/min aprox.

TEMPERATURA CÁMARA DE FUSIÓN: 710°C

TEMPERATURA METAL LÍQUIDO: 640°C

TEMPERATURA CÁMARA CONTENCIÓN 855°C

TEMPERATURA PARED HORNO 345°C

----- 10:34 Hrs. -----

CARGA: 5Kg más.      FLUJO DE GAS 11 L/min aprox.

**TEMPERATURA CÁMARA DE FUSIÓN: 806°C**

TEMPERATURA CÁMARA DE CONTENCIÓN: 880°C

TEMPERATURA METAL LÍQUIDO: 632°C

TEMPERATURA PARED HORNO: 390°C

----- 10: 55 Hrs. -----

CARGA: ULTIMOS 5Kg      FLUJO DE GAS 11 L/min aprox.

TEMPERATURA CAMARA FUSIÓN: 832°C

TEMPERATURA METAL LÍQUIDO: 630°C

TEMPERATURA CAMARA DE CONTENCIÓN: 889°C

TEMPERATURA PARED HORNO: 400°C

----- 11:20 Hrs -----

CARGA: FIN DE LA FUSIÓN      FLUJO 3 L/min aprox.

QUEMADORES: 3 y 4 OFF. 1 y 2 a ¼ vuelta.

TEMPERATURA METAL LÍQUIDO: 652°C

TEMPERATURA CÁMARA DE CONTENCIÓN: 900°C

---

Como lo muestra la prueba, el horno tardó en cerca de 40 minutos en precalentarse para poder introducir la carga. Debido a la diferencia de tamaños, fue necesario primero precalentar la cámara de contención a una temperatura homogénea en toda la cámara. El flujo de gas se mantuvo alrededor de los 13L/min aunque como lo muestra la prueba, la temperatura del metal líquido no superó los 700°C. Para elevar la temperatura es necesario aumentar el flujo de gas para incrementar la potencia en los quemadores.

Con los datos que se obtuvieron se pudo conocer las variables principales a registrar y controlar, estas son: las temperaturas del horno, la carga que se va introduciendo, el registro de la hora en que se van haciendo modificaciones, el flujo de gas que se está pasando al horno y la presión del gas a la que se está trabajando.

Así como registrar los datos de la prueba, quién la realiza, la fecha en que se lleva a cabo y los datos del (los) operadores del *horno de reverbero*.

Teniendo todo esto en cuenta, y para presentar los datos de la operación del horno de una manera más ordenada, se construyó la siguiente una hoja de control en la que se registrarán todos los datos mencionados.

La hoja de control que se propuso se muestra a continuación:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.  
FACULTAD DE QUÍMICA. EDIFICIO 'D'

HOJA CONTROL DE HORNO DE REVERBERO PARA ALUMINIO.

USUARIO \_\_\_\_\_

FECHA \_\_\_\_\_

SUPERVISOR \_\_\_\_\_

PRUEBA:

---



---

PRESIÓN GAS \_\_\_\_\_

HORA	QUEMADORES				FLUJO	CARGA	T CAMARA CONT.	T. CAMARA FUSION	T. BAÑO (METAL)	TEMPERATURAS PARED HORNO			
	1	2	3	4									

## CAPÍTULO V. DISEÑO EXPERIMENTAL

Se determinó utilizar bote de aluminio previamente compactado para determinar la eficiencia del horno de reverbero

### **5.1 EVALUACIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO.**

Se requería evaluar el bote de aluminio y conocer las proporciones de peso que tiene de pintura y aleación de aluminio, evaluando las tres partes que componen el bote de aluminio: cuerpo, tapa y broche.

Separando las tres partes perfectamente, se lavarían, se secarían y se pesarían.

Calentando una mufla a 600°C, se introducirían las partes del bote en ella para, por efecto de la temperatura, retirar las pinturas y recubrimientos del bote.

Se limpiarían perfectamente las partes del bote y se volverían a pesar, ahora sin recubrimientos y sin pinturas.

Esta prueba permitiría saber qué cantidades de aluminio y pintura se introducirían al horno.

Los datos serían registrados en una tabla con las siguientes características:

	<b>PESO CON PINTURA</b>	<b>PESO SIN PINTURA</b>	<b>% ALUMINIO</b>	<b>% PINTURA</b>
<b>TAPA</b>				
<b>CUERPO</b>				
<b>BROCHE</b>				
<b>TOTAL BOTE</b>				

Realizando análisis químicos a las partes del bote se conocería su composición para compararlos con datos de composición reportados en literatura.

	<b>% Si</b>	<b>% Fe</b>	<b>% Mg</b>	<b>% Mn</b>	<b>.....</b>
<b>TAPA</b>					
<b>CUERPO</b>					
<b>BROCHE</b>					

Pruebas realizadas con cuatro botes de aluminio escogidos al azar.

## 5.2 PREPARACIÓN DE LA CARGA DE BOTE DE ALUMINIO.

El bote de aluminio se compactaría mediante una prensa hidráulica para obtener pacas, disminuyendo de esta forma el volumen del bote, para introducirlo con mayor facilidad en el horno de reverbero.

## 5.3 PRUEBAS DE FUSIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO EN EL HORNO DE REVERBERO

La secuencia de pasos y las condiciones de operación que se estableció para realizar las pruebas son:

- Pre calentamiento del *horno de reverbero* durante 30min, a una temperatura homogénea en la cámara de contención de 850°C y en las paredes de la tina de 350°C, con flujo de gas de 13 L/min) A presión de gas constante (1.2 kg/cm<sup>2</sup>).
- Preparación de cargas de pacas de 15Kg. Introduciéndolas al horno de 5 en 5Kg.
- Fusión de la carga completamente.
- Cuantificación de los kilogramos de aluminio recuperado por carga, así como la cantidad de escoria producida durante la fusión.
- Con los datos obtenidos, determinación de la eficiencia en la recuperación de aluminio con el horno de reverbero.

Utilización de una hoja de control para el registro de cada prueba y la siguiente tabla para el registro de los datos obtenidos de recuperación de metal:

NUMERO DE PRUEBA	CARGA INTRODUCIDA	ESCORIA PRODUCIDA	ALUMINIO RECUPERADO	EFICIENCIA

Pruebas realizadas por triplicado.

## 5.4 PRUEBAS DE FUSIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO EN EL HORNO DE CRISOL

La secuencia de pasos y las condiciones de operación que se establecieron para realizar las pruebas son:

- Pre calentamiento del horno de crisol a un flujo constante de 30 L/min. A presión de gas constante (1.2 kg/cm<sup>2</sup>).

- Preparación de cargas de pacas de 7Kg . Introduciendo los 7Kg por prueba.
- Fusión de la carga completamente.
- Cuantificación de los kilogramos de aluminio recuperado por carga, así como la cantidad de escoria producida durante la fusión.
- Con los datos obtenidos, determinación de la eficiencia en la recuperación de aluminio con el horno de crisol.

Utilización de una hoja de control para el registro de las pruebas y la siguiente tabla para el registro de los datos obtenidos de recuperación de metal.

Por lo que se requerirán los mismos datos:

NUMERO DE PRUEBA	CARGA INTRODUCIDA	ESCORIA PRODUCIDA	ALUMINIO RECUPERADO	EFICIENCIA

Las pruebas se realizarán por triplicado.

### 5.5 ANÁLISIS QUÍMICOS.

Durante el desarrollo de las pruebas tomar muestras del metal líquido.

La primer muestra al fundirse 5 Kg de bote de aluminio compactado, la después de fundir 10 Kg de bote y la tercer muestra al termino de fundirse los 15 Kg de bote compactado.

Los análisis químicos obtenidos se compararán con los reportados en la literatura y con los realizados a los botes sin fundir para determinar la eficiencia por elemento.

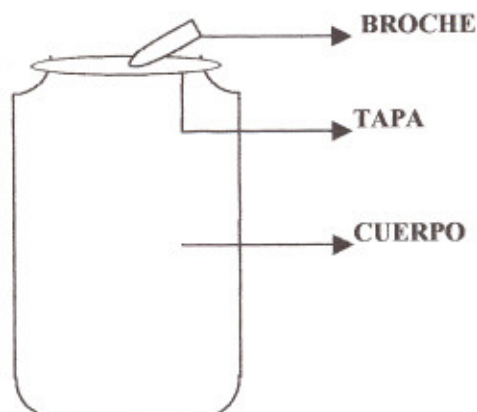
# PRUEBA	% Si	% Fe	% Mg	% Mn	-----
MUESTRA					



## CAPÍTULO VI. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 6.1 EVALUACIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO

El bote de aluminio se dividió en tres secciones:



El bote de aluminio lleva recubrimientos y pinturas.

Se utilizaron cuatro botes de aluminio para realizar las pruebas de evaluación.

La prueba se realizó en tres etapas.

En la primera etapa se separaron con cuidado las tres secciones del bote y se lavaron perfectamente para no dejar residuos de bebida o basura. Luego se secaron perfectamente y se pesaron por separado las tres secciones. En esta prueba se verificó el porcentaje en peso correspondiente a cada sección del bote, con pintura y recubrimiento incluidos.

En la segunda etapa se introdujeron a la mufla, a 600°C, las secciones del bote para retirar por quemado los posibles recubrimientos y pinturas. Luego se limpiaron hasta retirar completamente los residuos de pintura y se pesó nuevamente cada sección. Esta prueba permitió conocer el cambio en el peso de cada sección del bote y qué porcentaje de recubrimientos y pintura tiene cada sección.

En la tercera etapa se realizaron los análisis químicos de las secciones del bote con un espectrómetro de emisión. Se buscó información publicada de la composición para compararla con la obtenida.

Una vez evaluado el bote de aluminio, se procedió a preparar las cargas para realizar las pruebas de fusión y determinar la eficiencia del *horno de reverbero*.

## 6.2 PREPARACIÓN DE LA CARGA DE BOTE DE ALUMINIO.

El bote de aluminio se compactó para introducir al horno la mayor cantidad de bote posible, así como para evitar que por el aire atrapado se pueda oxidar más fácilmente el material, y asegurar un calentamiento homogéneo del material.

Se utilizó una prensa hidráulica que ejerce una presión de 60tons.

Los botes se aplastaron previamente para ahorrar espacio y que cupieran los más posibles.

Los botes de aluminio se colocaron dentro de un cilindro de acero y se ejerció presión hasta alcanzar las 60tons, utilizando un dado que los empujaba hasta terminar las pacas de bote compacto.

La Figura 37 muestra cómo se aplicó presión sobre el bote de aluminio para compactarlo.

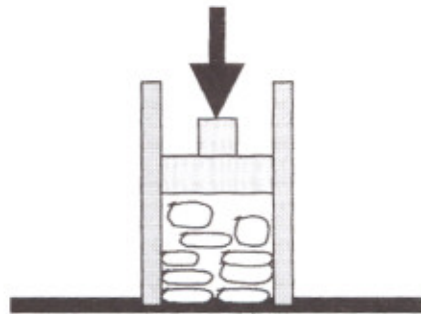


FIGURA 37. COMPACTACIÓN DEL BOTE DE ALUMINIO

Estas pacas se utilizaron para las pruebas de fusión en el *horno de reverbero* y en el horno de crisol.

## 6.3 PRUEBAS DE FUSION DEL BOTE DE ALUMINIO EN EL HORNO DE REVERBERO.

La prueba de fusión se realizó en el siguiente orden:

- El horno se calentó hasta alcanzar la temperatura de trabajo (~850°C).
- Se pesaron aproximadamente 15Kg de pacas de bote de aluminio para introducir las al *horno de reverbero* para que se realizara la fusión del aluminio. Los 15Kg se dividieron en cargas de 5Kg y se introdujeron por separado.
- Cuando empezó la fusión parcial de la primera carga de pacas de aluminio, se tomó una muestra para análisis químico identificándola como la composición química inicial del metal.

- Cuando se terminó de fundir la primera carga, se retiró la escoria producida y se introdujo la segunda carga de 5Kg. Cuando ésta terminó de fundir se tomó la segunda muestra de metal para análisis químico. Se retiró la escoria producida y se introdujo la última carga de 5Kg.
- Con toda la carga ya fundida, se tomó otra muestra para análisis químico que se identificó como la composición química final.
- Se preparó una olla para colocar el metal fundido. La olla se pesó vacía y se procedió a llenarla con el metal fundido. Procurando que la mayor cantidad posible de metal pasara a la olla. La olla se volvió a pesar con metal para conocer cuánto aluminio se recuperó.
- El metal fundido se colocó en lingoteras para que se enfríe. Y se apagó el equipo.
- Cuando el *horno de reverbero* se hubo enfriado, si quedó aluminio pegado a las paredes éste se quitó y se pesó para cuantificar la cantidad que se queda pegada a las paredes.

#### **6.4 PRUEBA DE FUSION DE DEL BOTE DE ALUMINIO EN EL HORNO DE CRISOL.**

Las pruebas con el horno de crisol fueron parecidas a las del *horno de reverbero* y se siguió el siguiente orden:

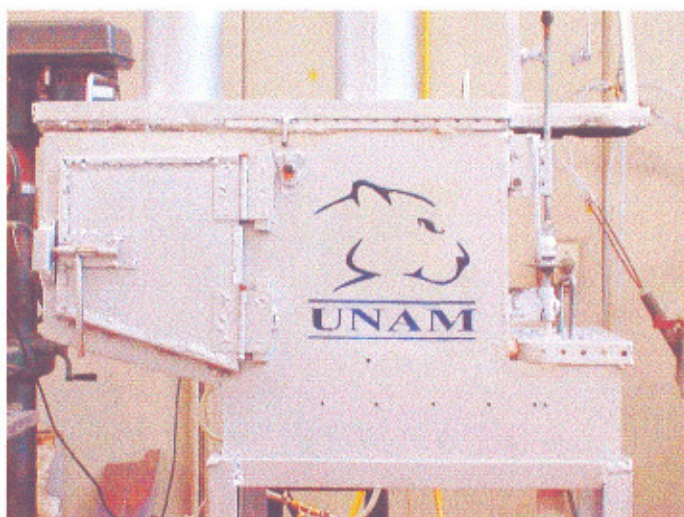
- Se conectó el manómetro y el flujómetro a la toma de gas del horno de crisol.
- Se calentó el horno hasta la temperatura de trabajo y se tomó el tiempo que tardó en calentarse.
- Como el horno de crisol tiene una capacidad menor que la del *horno de reverbero* (8Kg), la carga a que se preparó fue 7Kg de pacas. Se introdujo la carga para fundirla. Se tomó muestra para análisis químico de composición inicial.
- Cuando terminó de fundir la carga completa, se separó la escoria y se pesó, y se tomó muestra para análisis químico de composición final.

#### **6.5 ANÁLISIS QUÍMICOS**

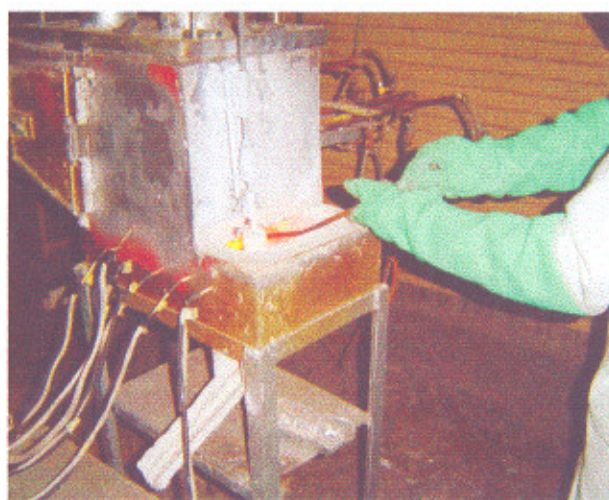
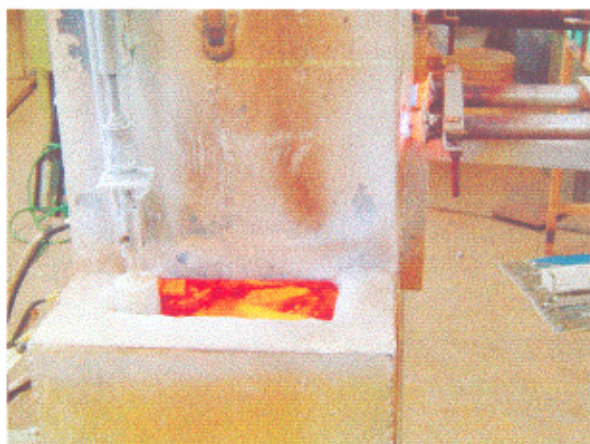
Las muestras tomadas en cada prueba, se prepararon desbastando la superficie con lija grano 80 para realizar análisis químicos con el espectrómetro de emisión.

CAPÍTULO VII.  
RESULTADOS

**EL HORNO DE REVERBERO TERMINADO.**



**EL HORNO DE REVERBERO FUNCIONANDO.**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.  
FACULTAD DE QUÍMICA. EDIFICIO 'D'

HOJA CONTROL DE HORNO DE REVERBERO PARA ALUMINIO.

USUARIO FRANCISCO ENRIQUE RIVAS LOPEZ

FECHA 2-DIC-05

PRUEBA: # 1. RECUPERACIÓN DE METAL A PARTIR DE PACA DE BOTE DE ALUMINIO. GENERACIÓN DE ESCORIA.

PRESIÓN GAS 1.2 Kg/cm<sup>2</sup>

HORA	QUEMADORES				FLUJO (Lt/min)	CARGA (Kg)	TEMP. CAMARA CONT (°C).	TEMP. CAMARA FUSION (°C)	TEMP. BAÑO (METAL) (°C)	TEMPERATURAS PARED HORNO (°C)			
	1	2	3	4						T13	T11	T9	T8
10:09	OFF	OFF	OFF	OFF	-----	-----	14.4	14.3	-----	15.3	14.8	14.5	14.4
10:25	ON	ON	OFF	OFF	11	-----	497.2	218	-----	27.1	16.6	38.2	32.8
10:50	ON	ON	ON	ON	19	-----	796.6	598	-----	258.4	231.2	359.2	318.9
11:02	ON	ON	ON	ON	16	-----	850	765	-----	324.5	302.7	416	378
11:12	ON	ON	ON	ON	13	5.2Kg	815	786	-----	390	363	478	437
11:46	ON	ON	ON	ON	11	5.3Kg	840	867	690	493	461	553	519
12:10	ON	ON	ON	ON	11	-----	860	967	746	548	505	605	573
12:42	ON	ON	ON	ON	8	-----	864	1050	751				
12:46	ON	ON	ON	ON	8	5.3Kg	852	929	715	560	527	616	594
13:42	ON	ON	ON	ON	8	FIN FUSION	872	1061	715.8	570	527	603	589
13:55	ON	ON	OFF	OFF	3	-----	867	-----	715				
					<b>2289 Lt.</b>	<b>TOTAL</b>							

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.  
FACULTAD DE QUÍMICA. EDIFICIO 'D'

HOJA CONTROL DE HORNO DE REVERBERO PARA ALUMINIO.

USUARIO FRANCISCO ENRIQUE RIVAS LOPEZ

FECHA 6-DIC-05

PRUEBA: # 2 RECUPERACION DE METAL A PARTIR DE PACA DE BOTE DE ALUMINIO. GENERACIÓN DE ESCORIA.

PRESIÓN GAS 1.2 Kg/cm<sup>2</sup>

HORA	QUEMADORES				FLUJO (Lt/min)	CARGA Kg	TEMP. CAMARA CONT. (°C)	TEMP. CAMARA FUSION (°C)	TEMP. BAÑO (METAL) (°C)	TEMPERATURAS PARED HORNO (°C)			
	1	2	3	4						T8	T9	T11	T12
8:30	OFF	OFF	OFF	OFF	-----	-----	12.5	13.2	-----	13.8	13.9	14.4	14
8:38	ON	ON	OFF	OFF	7	-----	303	116.8	-----	25.2	29.3	16.1	28.9
8:58	ON	ON	OFF	OFF	11	-----	749	419	-----	233.9	254	130	210
9:14	ON	ON	OFF	OFF	7	-----	867	548	-----	424	445	282	400
9:28	ON	ON	ON	ON	15	-----	880	922	-----	495	514	389	475
9:33	ON	ON	ON	ON	11	-----	882	892	-----	521	541	421	514
9:41	ON	ON	ON	ON	13	5.200	872	830	-----	539	558	443	537
10:29	ON	ON	ON	ON	8	5.000	900	858	780	638	652	545	626
11:07	ON	ON	ON	ON	6	-----	885	958	-----	651	658	559	636
11:14	ON	ON	ON	ON	6	-----	860	864	770	645	652	557	628
11:23	ON	ON	ON	ON	8	5.100	846	845	-----	641	647	556	627
12:05	ON	ON	OFF	OFF	4	FIN FUSION	919	-----	795	645	651	560	644
					<b>1910 L TOTAL</b>								



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.  
FACULTAD DE QUÍMICA. EDIFICIO 'D'

HOJA CONTROL DE HORNO DE REVERBERO PARA ALUMINIO.

USUARIO FRANCISCO ENRIQUE RIVAS LOPEZ

FECHA 13-DIC-05

PRUEBA: # 3. RECUPERACIÓN DE METAL A PARTIR DE PACA DE BOTE DE ALUMINIO. GENERACIÓN DE ESCORIA.

PRESIÓN GAS 1.2 Kg/cm<sup>2</sup>

HORA	QUEMADORES				FLUJO (Lt/min)	CARGA Kg	T CAMARA CONT. (°C)	T. CAMARA FUSION (°C)	T. BAÑO (METAL) (°C)	TEMPERATURAS PARED HORNO (°C)			
	1	2	3	4						T8	T9	T10	T11
9:17	OFF	OFF	OFF	OFF	0	-----	12.4	12.9	-----	13.7	13.8	14.0	13.9
9:34	ON	ON	OFF	OFF	9	-----	660	327	-----	95.4	92.5	42.1	82.4
9:55	ON	ON	ON	ON	15	-----	830	696	-----	382	375	250	337
10:07	ON	ON	ON	ON	15	5.100	910	840	-----	445	444	329	419
10:24	ON	ON	ON	ON	10	-----	919	910	-----	526	532	431	515
11:06	ON	ON	ON	ON	11	5.300	947	748	756	618		532	534
12:13	ON	ON	ON	ON	5	5.100	885	828	821	687		588	585
12:37	ON	ON	ON	ON	6	-----	830	885	747	645		564	558
12:53	ON	ON	ON	ON	6	FIN FUSION	840	880	770	632		553	550
					1997 L APROX.								

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.  
FACULTAD DE QUÍMICA. EDIFICIO 'D'

HOJA CONTROL DE HORNO DE REVERBERO PARA ALUMINIO.

USUARIO FRANCISCO ENRIQUE RIVAS LOPEZ

FECHA 17-ENE-06

PRUEBA: # 4. RECUPERACION DE METAL A PARTIR DE PACA DE BOTE DE ALUMINIO. GENERACIÓN DE ESCORIA.

PRESIÓN GAS 1.2 Kg/cm<sup>2</sup>

HORA	QUEMADORES				FLUJO (Lt/min)	CARGA Kg	TEMP. CAMARA CONT.(°C)	TEMP. CAMARA FUSION(°C)	TEMP. BAÑO (METAL) (°C)	TEMPERATURAS PARED HORNO ( °C)			
	1	2	3	4						T8	T10	T11	T12
9:39	OFF	OFF	OFF	OFF	0	0	9.2	11.6	----	12.6	12.9	13.1	13.0
9:54	ON	ON	OFF	OFF	6	----	237	66.4	----	13.0	13.6	13.8	22.0
10:07	ON	ON	OFF	OFF	9	----	720	341	----	48.7	143	61.5	100
10:40	ON	ON	ON	ON	12	----	924	781	----	468	470	360	410
10:50	ON	ON	ON	ON	12	5.2	910	755	----	495	500	396	453
11:45	ON	ON	ON	ON	12	-----	975	998	759	617	628	569	606
11:47	ON	ON	ON	ON	12	5.3	956	901		621	632	567	611
12:28	ON	ON	ON	ON	7	-----	907	898	749	626	632	575	616
12:35	ON	ON	ON	ON	8	5.1	902	863		625	633	577	617
13:15	ON	ON	OFF	OFF	3	FIN FUSION	949	784	769	622	627	571	611
					2040 L APROX.								

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.  
FACULTAD DE QUÍMICA. EDIFICIO 'D'

HOJA CONTROL DE HORNO DE CRISOL PARA ALUMINIO.

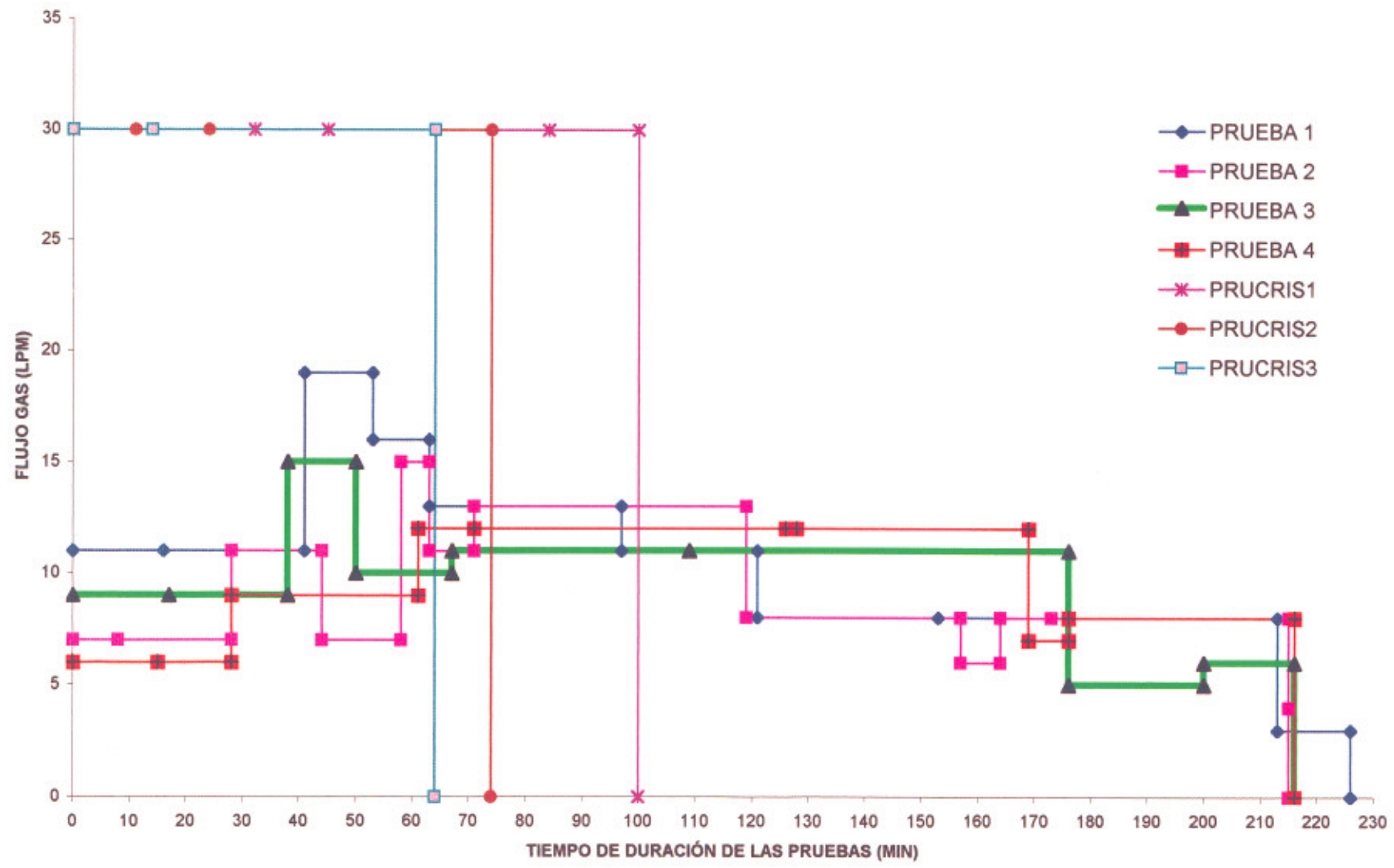
USUARIO FRANCISCO ENRIQUE RIVAS LOPEZ

FECHA 31-ENE-06

PRUEBA : HORNO DE CRISOL. RECUPERACION DE METAL A PARTIR DE PACA DE BOTE DE ALUMINIO. GENERACIÓN DE ESCORIA.

HORA	FLUJO (Lt/min)	PRESIÓN GAS 1.2 Kg/cm <sup>2</sup>		T. CAMARA FUSION (°C)	T. BAÑO (METAL) (°C)
		CARGA Kg			
9:45	30				
10:17	30	7.300		810	
10:30	30	-----			
11:09	30	-----			900
11:25	<b>3000 L APROX</b>	FIN prueba			880
<hr/>					
11:29	30	Inicio			
11:40	30	7.400		>1000	890
11:53	30	-----			
12:43	30	Fin fusion			>1000
<hr/>					
	<b>2220 L APROX</b>				
12:53	30	Inicio		>1000	
13:07	30	7.300			>1000
13:54	30	Fin fusion			
	<b>1830 L APROX</b>				

**GRAFICA 5. CONSUMO DE GAS (FLUJO) POR PRUEBA**



**TABLA 4. EVALUACION DEL DEL BOTE DE ALUMINIO.**

**PESOS (gr) DE LAS PARTES DEL BOTE CON PINTURA**

	1	2	3	4	PROMEDIC	% PESO
TAPA	2.434	2.407	2.465	2.444	<b>2.4375</b>	17.8128
CUERPO	10.78	11.038	10.966	11.043	<b>10.95675</b>	80.0698
BROCHE	0.286	0.293	0.286	0.294	<b>0.28975</b>	2.1174
TOTAL	13.5	13.738	13.717	13.781	<b>13.684</b>	100.0000

Para obtener el porcentaje en peso:

El peso total de la lata es el 100%, y a cada parte de la tapa le corresponde un %; así:

$$\begin{array}{r} \text{Si Total lata ----- } 100\% \\ \quad \times \text{ ----- } ?\% \\ \hline \quad \quad \quad ? = \% \text{ correspondiente.} \\ \quad \quad \quad x \Rightarrow \text{Peso de la parte de la lata de interés.} \end{array}$$

**PESOS (gr) DE LAS PARTES DEL BOTE SIN PINTURA (DESPUES DE QUEMAR)**

	1	2	3	4	PROMEDIC	% PESO
TAPA	2.369	2.347	2.389	2.395	<b>2.375</b>	17.7173
CUERPO	10.565	10.838	10.738	10.828	<b>10.74225</b>	80.1361
BROCHE	0.285	0.291	0.283	0.292	<b>0.28775</b>	2.1466
TOTAL	13.219	13.476	13.41	13.515	<b>13.405</b>	100.0000

CON ESTA INFORMACIÓN SE PUEDE SABER QUÉ CANTIDAD DE ALUMINIO HAY EN EL BOTE. POR REGLA DE TRES:

$$\begin{array}{r} \text{Si Peso lata con pintura ----- } 100\% \\ \quad \text{Peso lata sin pintura ----- } x \\ \hline \quad \quad \quad x = \% \text{ de aluminio en la lata} \\ \quad \quad \quad 100 - x = \% \text{ de pintura en la lata.} \end{array}$$

**COMPARACIÓN BOTE CON PINTURA vs BOTE SIN PINTURA**

	PROM C/PIN	PROM S/PIN	% Alum	% Pintura
TAPA	2.4375	2.375	97.4359	2.5641
CUERPO	10.95675	10.74225	98.0423	1.9577
BROCHE	0.28975	0.28775	99.3097	0.6903
TOTAL	13.684	13.405	<b>97.9611</b>	2.0389

El valor sombreado representa el porcentaje de aleación de aluminio que contiene el bote.

**TABLA 5. EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO EN EL HORNO DE REVERBERO.**

	CARGA 1	CARGA 2	CARGA 3	CARGA TOT	PESO ESC	% ESCORIA	P.O.INI.	P.O.FIN	AL REC.HOR	EFICIENCIA
PRUEBA 1	5.2	5.3	5.3	15.8	3.6	22.78481	31.8	42.9	11.1	70.25316
PRUEBA 2	5.2	5	5.1	15.3	3.5	22.87582	29.1	40	10.9	71.24183
PRUEBA 3	5.1	5.3	5.1	15.5	3.4	21.93548	28.9	40.1	11.2	72.25806
PRUEBA 4	5.2	5.3	5.1	15.6	2.9	18.58974	33.5	45.5	12	76.92308

donde	P.O.INI es el peso inicial de la olla en que se vació el metal, en Kg	<b>EFICIENCIA*</b>	<b>ALUM PERD</b>
	P.O.FIN es el peso final de la olla con el metal dentro, en Kg.	77.21518987	1.1
	AL. REC. HOR es el metal total recuperado del horno en la olla. (Kg)	77.12418301	0.9
	PESO ESC es el peso de la escoria.(Kg)	78.06451613	0.9
	ALUM PERD es el aluminio que no se recupera (queda pegado en la olla, en las paredes del horno o se escurre o gotea, etc). (Kg)	81.41025641	0.7
	EFICIENCIA* es considerando el ALUM PERD.		

Si  $\frac{\text{CARGA TOT} - \text{PESO ESC}}{\text{CARGA TOT}} = \frac{x\%}{100\%}$   
 $x = \%$  de escoria

Si  $\frac{\text{AL. REC. HOR}}{\text{CARGA TOT}} = \frac{x\%}{100\%}$   
 $x =$  aluminio recuperado en el proceso (EFICIENCIA)

AHORA CONSIDERANDO EL VALOR OBTENIDO DE LA CANTIDAD DE ALUMINIO EN EL BOTE SIN PINTURA, SE PUEDE TOMAR LA EFICIENCIA COMO SIGUE.

% ALUM EN EL BOTE =  $\frac{97.9611}{15.8} = x$  ----- 97.9611 %  
 $x =$  cantidad de aluminio en la carga.

Si  $\frac{\text{ALUM REAL}}{\text{AL. REC. HOR}} = \frac{x\%}{100\%}$   
 $x =$  aluminio recuperado en el proceso (EFICIENCIA)

	CARGA TOT	ALUM REAL	AL REC.HOR	ALUM PERD	EFICIENCIA	EFICIENCIA*
PRUEBA 1	15.8	15.47785	11.1	12.1	71.71537	78.17621
PRUEBA 2	15.3	14.98805	10.9	11.8	72.72461	78.72940
PRUEBA 3	15.5	15.18397	11.2	12.1	73.76200	79.68930
PRUEBA 4	15.6	15.28193	12	12.7	78.52410	83.10468

**TABLA 6. EVALUACION DE LA EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN EN EL HORNO DE CRISOL**

	CARGA (Kg)	ALUM. REC.	ESCORIA	TOTAL	PESO PERD	% ESCORIA	EFICIENCIA	EFICIENCIA *
PRUEBA 1	7.3	4.3	2.5	6.8	0.5	34.2466	58.9041	65.7534
PRUEBA 2	7.4	4.1	3.1	7.2	0.2	41.8919	55.4054	58.1081
PRUEBA 3	7.3	4.5	2.5	7	0.3	34.2466	61.6438	65.7534

Donde. ALUM. REC.= Aluminio 'limpio' recuperado en la fusión  
 ESCORIA= Se considera toda la que se remueve aunque lleve aluminio  
 PESO PERD= El peso de la carga perdido (escurrimientos, pegado al crisol, etc.)  
 EFICIENCIA\*= Considerando el peso perdido y suponiendo que sea aluminio limpio.

$$\text{Si } \frac{\text{CARGA TOT} \dots\dots\dots 100\%}{\text{PESO ESC} \dots\dots\dots x\%} = \dots\dots\dots$$

x= % de escoria

$$\text{Si } \frac{\text{CARGA TOT} \dots\dots\dots 100\%}{\text{AL. REC. HOR} \dots\dots\dots x\%} = \dots\dots\dots$$

x= aluminio recuperado en el proceso (EFICIENCIA)

AHORA CONSIDERANDO EL VALOR OBTENIDO DE LA CANTIDAD DE ALUMINIO EN EL BOTE, SIN PINTURA SE PUEDE TOMAR LA EFICIENCIA COMO SIGUE.

$$\% \text{ ALUM EN EL BOTE} = \frac{\text{Si } \text{CARGA TOTAL} \dots\dots\dots 100\%}{\text{97.9611} \dots\dots\dots x \dots\dots\dots 97.9611\%} = \dots\dots\dots$$

x = cantidad de aluminio en la carga.

$$\text{Si } \frac{\text{ALUM REAL} \dots\dots\dots 100\%}{\text{AL. REC. HOR} \dots\dots\dots x\%} = \dots\dots\dots$$

x= aluminio recuperado en el proceso (EFICIENCIA)

	CARGA (Kg)	ALUM REAL	ALUM. REC.	PESO PERD	EFICIENCIA	EFICIENCIA *
PRUEBA 1	7.3	7.15116	4.3	0.5	60.13010	67.1220
PRUEBA 2	7.4	7.24912	4.1	0.2	56.55858	59.3175
PRUEBA 3	7.3	7.15116	4.5	0.3	62.92685	67.1220

**TABLA 7. ANALISIS QUÍMICOS.**

**COMPOSICIÓN QUÍMICA TEÓRICA DEL BOTE.[7]**

	%Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al
Teórico Tapa	<b>0.20 max.</b>	<b>0.35 max</b>		<b>0.20 - 0.50</b>	<b>4.0 - 5.0</b>									
Teórico Cuerpo	<b>0.30 max</b>	<b>0.70 max</b>		<b>1.0 - 1.5</b>	<b>0.8 - 1.3</b>									
Teórico Fundido	<b>0.15 - 0.5</b>	<b>0.35 - 0.7</b>		<b>1.03 max</b>	<b>1.3 - 1.91</b>									

En la literatura la composición química del broche de la lata se considera igual que la composición química de la tapa.

**COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BOTE (ESPECTRÓMETRO)**

	%Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al
Medido Cuerpo	0.1968	0.3489	0.1502	0.835	1.208	0.0313	0.0045	0.013	0.0027	0.0124	0.0108	<0.0020	0.0002	97.2
	0.1563	0.4276	0.1587	0.834	1.196	0.0193	0.0045	0.0071	0.0027	0.0086	0.0119	<0.0020	0.0001	97.2
	0.159	0.427	0.1571	0.838	1.155	0.0209	0.0053	0.009	0.0035	0.0091	0.0118	<0.0020	0.0001	97.2
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.1707</b>	<b>0.4012</b>	<b>0.1553</b>	<b>0.8357</b>	<b>1.1863</b>	<b>0.0238</b>	<b>0.0048</b>	<b>0.0097</b>	<b>0.0030</b>	<b>0.0100</b>	<b>0.0115</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.0001</b>	<b>97.2000</b>
Medido Tapa	0.0752	0.1601	0.0265	0.3072	5.28	<0.0050	0.0023	0.0045	<0.0020	0.008	0.009	<0.0020	0.0001	94.1
	0.0909	0.1988	0.0336	0.4072	5.01	<0.0050	0.0039	0.0054	<0.0020	0.0171	0.0119	<0.0020	0.0001	94.2
	0.0862	0.2056	0.0297	0.2835	5.3	<0.0050	0.0028	0.0107	<0.0020	0.0096	0.0104	<0.0020	0.0001	94.1
<b>PROMEDIO</b>	<b>0.0841</b>	<b>0.1882</b>	<b>0.0299</b>	<b>0.3326</b>	<b>5.1967</b>	<b>&lt;0.0050</b>	<b>0.0030</b>	<b>0.0069</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.0116</b>	<b>0.0104</b>	<b>&lt;0.0020</b>	<b>0.0001</b>	<b>94.1333</b>

**COMPOSICIONES QUÍMICAS DE LAS PRUEBAS DE FUSIÓN CON EL HORNO DE REVERBERO**

PRUEBA 1	%Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al
CARGA 1	0.1745	0.3932	0.1354	0.748	1.853	0.0213	0.0048	0.01	0.0033	0.0122	0.0103	<0.0020	0.0001	96.6
CARGA 2	0.1674	0.4064	0.1368	0.778	1.537	0.0201	0.0043	0.0098	0.003	0.0134	0.014	<0.0020	0.0001	96.9
CARGA 3	<b>0.1827</b>	<b>0.4156</b>	0.1398	<b>0.786</b>	<b>1.529</b>	0.0212	0.0045	0.0099	0.0032	0.0139	0.0102	<0.0020	0.0001	96.9
PRUEBA 2	%Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al
CARGA 1	0.1753	0.414	0.1433	0.797	1.509	0.0209	0.0048	0.0092	0.0033	0.0133	0.0105	<0.0020	0.0001	96.9
CARGA 2	0.1811	0.4212	0.1422	0.793	1.501	0.0206	0.0049	0.0095	0.0032	0.0133	0.0104	<0.0020	0.0001	96.9
CARGA 3	<b>0.1805</b>	<b>0.4184</b>	0.1415	<b>0.796</b>	<b>1.473</b>	0.0202	0.0047	0.0094	0.0032	0.0131	0.0104	<0.0020	0.0001	96.9
PRUEBA 3	%Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al
CARGA 1	0.1682	0.3956	0.14	0.819	1.538	0.0208	0.005	0.009	0.0035	0.0126	0.0109	<0.0020	0.0001	96.9
CARGA 2	0.1696	0.3923	0.1409	0.809	1.518	0.0214	0.0049	0.0101	0.0033	0.0126	0.0106	<0.0020	0.0001	96.9
CARGA 3	<b>0.1744</b>	<b>0.396</b>	0.1406	<b>0.805</b>	<b>1.504</b>	0.0221	0.0048	0.0097	0.0033	0.0125	0.0105	<0.0020	0.0001	96.9
PRUEBA 4	%Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al
CARGA 1	0.1658	0.3956	0.1405	0.798	1.535	0.023	0.005	0.0096	0.0037	0.0116	0.0099	<0.0020	0.0001	96.9
CARGA 2	0.1763	0.4246	0.1436	0.796	1.562	0.0227	0.0051	0.0096	0.0038	0.0126	0.0103	<0.0020	0.0001	96.8
CARGA 3	<b>0.1717</b>	<b>0.4233</b>	0.1445	<b>0.796</b>	<b>1.551</b>	0.0228	0.0052	0.0097	0.0038	0.0129	0.0105	<0.0020	0.0001	96.8
PRUE. CRISOL	%Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al
PRUEBA 1	0.2614	0.668	0.1445	0.779	1.544	0.0346	0.0049	0.0099	0.0039	0.0401	0.0108	<0.0020	0.0002	96.5
PRUEBA 2	0.2603	0.4314	0.1567	0.799	1.461	0.0241	0.005	0.0095	0.0038	0.0266	0.0104	<0.0020	0.0002	96.8
PRUEBA 3	0.2754	0.4286	0.1526	0.798	1.542	0.023	0.0055	0.0097	0.0044	0.035	0.0112	<0.0020	0.0002	96.7



**TABLA 8. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL HORNO DE REVERBERO Y DEL HORNO DE CRISOL PARA EL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE BOTE.**

	PRUEBAS	CARGA INTRODUCIDA (Kg)	TIEMPO DE FUSIÓN CARGA	CONSUMO DE GAS (Litros por prueba))	ALUMINIO RECUPERADO (Kg)	ESCORIA PRODUCIDA (Kg)	LT GAS/Kg Bote	EFICIENCIA DEL PROCESO (%)
HORNO DE REVERBERO	PRUEBA 1	15.8	2hr30 min	2289	12.2	3.6	144.8734	78.1762
	PRUEBA 2	15.3	2hr24 min	1910	11.8	3.5	124.8366	78.7294
	PRUEBA 3	15.5	2hr46 min	1997	12.1	3.4	128.8387	79.6893
	PRUEBA 4	15.6	2hr25 min	2040	12.7	2.9	130.7692	83.1047
	<b><u>PROMEDIO</u></b>	<b><u>15.55</u></b>	<b><u>2hr31 min</u></b>	<b><u>2059</u></b>	<b><u>12.2</u></b>	<b><u>3.35</u></b>	<b><u>132.3295</u></b>	<b><u>79.9279</u></b>
HORNO DE CRISOL	PRUEBA 1	7.3	1hr08 min	3000	4.3	2.5	410.9589	67.1220
	PRUEBA 2	7.4	1hr03 min	2220	4.1	3.1	300	59.3175
	PRUEBA 3	7.3	47 min	1830	4.5	2.5	250.6849	67.1220
	<b><u>PROMEDIO</u></b>	<b><u>7.33</u></b>	<b><u>60 min</u></b>	<b><u>2350</u></b>	<b><u>4.3</u></b>	<b><u>2.7</u></b>	<b><u>320.548</u></b>	<b><u>64.5205</u></b>

## CAPÍTULO VIII. ANALISIS DE RESULTADOS

Los datos más relevantes obtenidos como resultado de las pruebas de fusión, para la comparación del proceso de recuperación de aluminio a partir de bote en ambos hornos, se muestran en la **Tabla 8**.

Un primer punto importante a mencionar es que en las pruebas de evaluación del bote de aluminio (**Tabla 4**) no fue posible retirar completamente los recubrimientos de los botes cuando se quemaron para realizar las pruebas. Esto es importante puesto que el valor que se utiliza para realizar los cálculos de eficiencia es **97.9611%** de aluminio en el bote y **2.0389%** de pintura. Si el porcentaje de pintura es mayor, al realizar los cálculos correspondientes, la eficiencia del proceso aumenta debido a que la cantidad de aluminio real que se introduce al proceso es menor con respecto al aluminio recuperado al finalizar el proceso.

La **Gráfica 5** muestra los tiempos de duración de las pruebas desde que se arranca hasta que se retira el material del horno, y se compara con la variación de flujo de gas utilizado en cada prueba. El área bajo las líneas de cada prueba representa el consumo total de gas de cada prueba. El tiempo de duración total de las pruebas es parecido. Para las pruebas del *horno de reverbero* se puede ver que el rango de operación fue parecido en las cuatro pruebas (alrededor de **5 – 20 L/min**). Las variaciones se debieron a los requerimientos de gas del equipo. Relacionando los datos de esta gráfica con las hojas de control de las pruebas, se puede ver que los flujos más altos corresponden al momento en que están funcionando los cuatro quemadores juntos y en que se requiere calentar el horno para alcanzar la temperatura de trabajo (**13 – 19 L/min**). Cuando el horno se encuentra a la temperatura de trabajo y listo para introducir la carga los flujos disminuyen (**8 – 12 L/min**). Finalmente cuando solo se requiere mantener caliente la carga lo suficiente, el flujo es mínimo (**3 – 7 L/min**). En cuanto a las pruebas en el horno de crisol, el flujo se mantuvo constante (**30 L/min**), se puede ver que con respecto al *horno de reverbero* las pruebas de fusión en el horno de crisol tienen tiempos de duración más cortos, aunque el consumo de gas parece mayor. Podría decirse entonces que, a un mayor flujo de gas, el tiempo de calentamiento del equipo es menor.

Ahora bien, volviendo a la **Tabla 8**. Los datos correspondientes a la carga introducida y al tiempo que ésta requirió para fundirse indican que en el *horno de reverbero* una carga promedio de **15.55Kg** de pacas requirió de **2hr 31min** para fundir totalmente, mientras que en el horno de crisol una carga promedio de **7.33Kg** requirió de **60min** para fundir.

Es decir que en el *horno de reverbero* se están procesando en promedio **0.103 Kg bote de Al/min**, mientras en el horno de crisol se procesan en promedio **0.1226 Kg bote de Al/min**; es decir **0.0196 Kg bote de Al/min** más se procesa en el horno de crisol. Esta diferencia no es grande.

Aunque se tienen que tomar en cuenta más consideraciones.

Tomando en cuenta el tiempo de duración de cada prueba en ambos hornos, y el flujo de gas utilizado, en la **Tabla 8** se presenta el consumo de gas total en cada horno. El consumo total de gas promedio en el *horno de reverbero* fue de **2059 L/prueba**, mientras en el horno de crisol se consumieron **2350 L/prueba**; esto es **291 L** más de gas se gasta. Este valor puede no ser tan significativo, porque como se demostrará a continuación los valores determinantes son la cantidad de material recuperado, la escoria producida, el gas utilizado para recuperar un kilogramo de material y las eficiencias de cada proceso.

En la **Tabla 8**, se muestra la cantidad de aluminio recuperado en cada prueba en ambos hornos. En el *horno de reverbero*, de los **15.55Kg** de pacas de bote introducidos se recuperan **12.2Kg** de aluminio y se producen **3.35Kg** de escoria, esto representa el **79.9279%** de eficiencia en la recuperación del material. En el horno de crisol se procesan **7.33Kg** de paca y se recuperan **4.3Kg** de aluminio y se producen **2.7Kg** de escoria, que representa el **64.5205%** de eficiencia del proceso. Cabe mencionar que la cantidad de escoria incluye la basura que no se separó de los botes (envolturas, colillas, etc.). Además las cantidades exactas pueden variar debido a las características de la báscula utilizada en las mediciones. En las **Tablas 5 y 6** se presenta de manera detallada como se realizaron los cálculos de eficiencias.

Una ventaja del *horno de reverbero* sobre el horno de crisol fue que el aluminio cuando se fundía en la cámara de fusión del horno se separaba de la escoria, mientras en el horno de crisol la escoria flotaba dentro del metal líquido y al separarla una gran cantidad de metal se quedaba en la escoria. Esto produce una merma en el proceso de recuperación de aluminio a partir de bote en el horno de crisol, y no hace conveniente el empleo de este tipo de horno

para este proceso. También un aspecto importante es la capacidad de los hornos, ya que el *horno de reverbero* puede diseñarse para cualquier volumen mientras el horno de crisol queda en desventaja en ese aspecto porque sería complicado trabajar con un crisol para 1ton de aluminio.

En la **Tabla 7** se presentan los análisis químicos realizados durante las pruebas. En esta tabla se presentan también los valores teóricos tomados de la literatura y los valores obtenidos con el espectrómetro de chispa en la etapa de la evaluación del bote. Como puede verse en la tabla, los valores de composición del aluminio obtenido por las pruebas de fusión en ambos hornos, se mantienen dentro de los rangos permitidos y sin variaciones significativas. Por lo que puede decirse que en ambos procesos no hay riesgo de contaminación del metal, ni de pérdidas importantes de elementos.

En la **Tabla 8** se presenta una columna referente a la cantidad de gas utilizado por kilogramo de bote de aluminio procesado. Este es uno de los resultados más importantes obtenidos en este trabajo. Como se puede ver en la tabla, en el horno de crisol se requieren **320.548 L gas/Kg de bote** a procesar, mientras en el *horno de reverbero* se requieren **132.3295 L gas/Kg de bote** es decir, apenas el **41%** de la cantidad utilizada en el horno de crisol.

Finalmente en términos de eficiencia de recuperación de metal en ambos procesos, la eficiencia del horno de crisol es **64.5205%** y la del *horno de reverbero* **79.9279%**; es decir, la diferencia de **15.4074** puntos en el porcentaje hace que el *horno de reverbero* sea más eficiente para la recuperación de aluminio a partir de bote que el horno de crisol.

## CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES

El *horno de reverbero* que se diseñó y construyó funcionó adecuadamente. Obteniéndose tiempos de calentamiento y fusión cortos, y un buen funcionamiento y desempeño del equipo.

El *horno de reverbero* puede ser diseñado y construido para cualquier capacidad que se requiera, mientras el horno de crisol tiene la desventaja que para capacidades grandes (**1ton**) se requerirán crisoles muy grandes y será más difícil manipularlos.

Para un proceso como la recuperación de aluminio a partir de bote de aluminio:

- El rango de operación del flujo de gas durante los experimentos (fusiones) en el horno de reverbero fue **5L/min** como mínimo y **20L/min** como máximo para procesar a una velocidad de **0.103 Kg bote de Al/min** promedio; mientras que en el horno de crisol a un flujo máximo controlado de **30L/min** se procesan **0.1226Kg bote de Al/min**, apenas **0.0196Kg bote de Al** más que en el horno de reverbero.
- La cantidad de escoria promedio producida en el *horno de reverbero* (**21.618962%**), es menor respecto a la cantidad promedio producida en el horno de crisol (**36.7950%**), la diferencia es aproximadamente **15.1760%**. Además la escoria en el *horno de reverbero* se separa mejor del metal que en el horno de crisol.
- El consumo de gas por kilogramo de bote procesado en el *horno de reverbero* (**132.3295**) es apenas el **41%** del utilizado en el horno de crisol (**320.548**), considerando que el quemador del horno de crisol operó con el flujo máximo que se podía registrar en el flujómetro.
- La eficiencia de recuperación de aluminio a partir de bote en el *horno de reverbero* es **15.4074%** mayor que la eficiencia del horno de crisol. En términos de cantidades, se recuperará más aluminio en un *horno de reverbero*.

En el proceso de recuperación de aluminio a partir de bote, la composición química del material se mantiene dentro de los rangos reportados en la literatura tanto para el *horno de reverbero* como en el horno de crisol.

Se recomienda el uso del *horno de reverbero*, para la recuperación de aluminio a partir de bote, sobre el horno de crisol.

Es necesario un estudio de la calidad metalúrgica del material en ambos tipos de hornos para poder emitir un veredicto más amplio en la comparación de ambos equipos para un mismo proceso.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] **INGENIEROS DEL GRUPO PECHINEY. ENCICLOPEDIA DEL ALUMINIO. PROCESOS DE CONFORMADO DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES VOL. 4.. ED. URMO, S.A. ESPAÑA, 1968.**
  
- [2] **LAROUSSE. DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA. ED. DE PERIÓDICOS S.C.L. MÉXICO 1991.**
  
- [3] **ASM. METALS HANDBOOK. NINTH EDITION. VOL. 15 pp. 374 1988**
  
- [4] **R. NEALON, A. KEARNEY. FURNACES AND THEIR MAINTENANCE. ALUMINUM PERMANENT MOLD HANDBOOK. Pp 2-1. 1989**
  
- [5] **HANDBOOK OF ALUMINUM ALLOYS. ALUMINUM COMPANY OF CANADA. LTD. ALCAN TECHNICAL BOOKS.**
  
- [6] **MARQUEZ MARTINEZ, MANUEL. COMBUSTIÓN Y QUEMADORES. ED. MARCOMBO BOIXAREU EDITORES. ESPAÑA. 1989.**
  
- [7] **MORRAL, F. METALURGIA GENERAL. ED. REVERTÉ, S. A. VOL. 1. 1982. Pp. 104.**
  
- [8] **BOWMAN. ALCOA'S USED BEVERAGE CAN (UBC) ALLOY SEPARATION PROCESS. SMELTING PROCES DEVELOPMENT DIVISION. ALUMINUM COMPANY OF AMERICA. ALCOA LABORATORIES. NEW KENSINGTON, PA 15068.**