

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**“Diseño y construcción de un horno de crisol para  
fundición utilizando gas natural”**

Sebastián Andrés Trujillo Roldán

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del  
título de Ingeniero Mecánico

Quito

Enero de 2005

© Derechos de Autor  
Sebastián Andrés Trujillo Roldán  
2005

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres por el amor y su ejemplo de vida, a mi hermano y amigo Fernando Patricio por abrirme siempre el camino de la experiencia y enseñarme de sus vivencias, a mis amigos y compañeros por todos los momentos compartidos que nunca se olvidarán, a Juan Fernando Idrobo que nos mira desde el infinito y especialmente a María Gabriela por todo su amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad San Francisco de Quito por enseñarme el camino a la excelencia, al Departamento de Ingeniería Mecánica, especialmente a mis profesores Édison Bonifaz, Julio Vallejo y Santiago Navarro por brindarme la oportunidad de crecer profesionalmente junto a ellos, a Alicia Rivera por toda su colaboración y apoyo incondicional en mis años de estudiante y a todas las personas que de alguna u otra forma ayudaron para que este proyecto se haga realidad.

## RESUMEN

La presente tesis de grado “Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición utilizando gas natural” tiene como objetivo general el diseño y construcción de un prototipo de horno para la fundición de metales no ferrosos, utilizando un hogar y crisol calentados mediante un sistema de combustión con gas natural impulsado por flujo de aire. Para el desarrollo de esta tesis de grado se ha utilizado los conocimientos adquiridos en la formación de la carrera de Ingeniería Mecánica en campos de diseño y transferencia de calor. Los parámetros de construcción han sido orientados a obtener un prototipo que brinde las facilidades de fundición conjuntamente con las seguridades operativas. Se incluye los diseños, cálculos y verificaciones prácticas de la operación del prototipo, así como también las proyecciones de mejoramiento para futuras aplicaciones.

## **ABSTRACT**

The overall objective of this final-year thesis, entitled “Design and Construction of a crucible oven for melting using natural gas”, is the design and construction of a prototype oven for melting non-ferrous metals, using a melting-pot heated by a combustion system of natural gas driven by an air-flow.

The development of this thesis relied on knowledge gained during the ‘Mechanical Engineering’ Bachelor of Science degree, in the fields of design and heat transference. The parameters of construction sought to obtain a prototype that is capable of melting, whilst at the same time offering operational safety. The thesis includes the designs, calculations and practical checks of the prototype’s operation, as well as forecasts regarding its improvement for future applications.

**TABLA DE CONTENIDOS**

ANTECEDENTES .....	1
JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	1
OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO .....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
METAS DEL PROYECTO .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	4
DISEÑO TÉRMICO Y MECÁNICO DEL HORNO .....	11
CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO .....	29
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO .....	36
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL HORNO .....	42
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	46
BIBLIOGRAFÍA .....	49
ANEXO 1 PLANOS .....	50
ANEXO 2 ÍNDICE .....	54

## LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1</u>	Componentes básicos de un horno a combustión.....	5
<u>Figura 2</u>	Horno de crisol y componentes, diseñado por D. Gingery.....	11
<u>Figura 3</u>	Esquema del horno de crisol .....	12
<u>Figura 4</u>	Diagrama de Transferencia de calor del horno y analogía eléctrica ...	15
<u>Figura 5</u>	Esquema del mecanismo “Tornillo – Manivela” .....	24
<u>Figura 6</u>	Diagrama de cuerpo libre de la tapa del horno.....	25
<u>Figura 7</u>	Conjunto del esqueleto metálico del horno .....	29
<u>Figura 8</u>	Tapa del horno .....	29
<u>Figura 9</u>	Conjunto tapa del horno .....	30
<u>Figura 10</u>	Construcción del eje tornillo .....	30
<u>Figura 11</u>	Construcción de camisa, buje para el alojamiento del tornillo.....	31
<u>Figura 12</u>	Pared de ladrillos refractarios.....	31
<u>Figura 13</u>	Bóveda del horno .....	32
<u>Figura 14</u>	Piso del horno .....	32
<u>Figura 15</u>	Construcción de bóveda del horno .....	32
<u>Figura 16</u>	Construcción del aislamiento térmico de la tapa del Horno.....	33
<u>Figura 17</u>	Recubrimiento de la fibra cerámica con pasta protectora .....	33
<u>Figura 18</u>	Entrada para tobera de combustión .....	33
<u>Figura 19</u>	Pruebas del quemador aire combustible.....	34
<u>Figura 20</u>	Pruebas del quemador en el horno con tapa abierta .....	35
<u>Figura 21</u>	Ventilador eléctrico .....	35
<u>Figura 22</u>	Prototipo armado .....	36
<u>Figura 23</u>	Implementos para realizar las pruebas del horno .....	37



<u>Figura 24</u> Termómetro análogo para altas temperaturas.....	37
<u>Figura 25</u> Horno encendido con flujo semi laminar y llama de color azul.....	38
<u>Figura 26</u> Pletina de cobre y crisol .....	40
<u>Figura 27</u> Cobre al rojo vivo .....	40
<u>Figura 28</u> Cobre parcialmente fundido .....	40
<u>Figura 29</u> Colado del cobre fundido en molde.....	41
<u>Figura 30</u> Crisol con aluminio en estado semi sólido .....	41
<u>Figura 31</u> Fundición de Aluminio.....	41
<u>Figura 32</u> Diagrama del comportamiento térmico en el interior del horno .....	42
<u>Figura 33</u> Diagrama del comportamiento térmico en las paredes del horno .....	44
<u>Tabla 1</u> Pruebas encendido del quemador .....	38
<u>Tabla 2</u> Pruebas del comportamiento térmico del horno .....	39
<u>Tabla 3</u> Temperaturas en las paredes del horno.....	43

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL PARA FUNDICIÓN UTILIZANDO GAS NATURAL**

## **ANTECEDENTES**

En vista que la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad San Francisco de Quito está en pleno crecimiento, sus metas inmediatas son brindar una enseñanza de calidad a los estudiantes, integrando los conocimientos teóricos con experiencias prácticas en laboratorios, para tener un contacto más cercano con el procesamiento de los materiales, procesos energéticos, tecnológicos y de intercambio térmico.

Es así como la propuesta de diseñar el prototipo de un horno industrial para la fundición de metales no ferrosos por medio de gas natural, apoyará al crecimiento de los laboratorios de la Universidad San Francisco de Quito.

## **JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

Considerando que, una de las principales funciones de la Universidad San Francisco de Quito es la investigación dentro de los diferentes ámbitos de formación profesional, el diseño y construcción de un prototipo de horno para fundición contribuirá a la implementación de un laboratorio de materiales y manufactura, que permitirá la incursión en la investigación del desarrollo de aleaciones de metales.

## **OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO**

El objetivo general del proyecto es el diseño y construcción de un prototipo de horno para la fundición de metales no ferrosos, utilizando un hogar y crisol calentados mediante un sistema de combustión con gas natural impulsado por flujo de aire. El horno se encuentra provisto de un mecanismo de protección para la fundición mediante una tapa removible.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Aplicar los conocimientos de diseño, transferencia de calor, mecanismos y proyectos en la construcción de un prototipo integrado.
- Equipar al laboratorio de procesamiento de materiales y manufactura de la Universidad San Francisco de Quito
- Permitir la investigación y desarrollo de los metales y aleaciones no ferrosas.

## **METAS DEL PROYECTO**

- Poner práctica los conocimientos teóricos de las materias relacionadas a este proyecto.

- Brindar la oportunidad al estudiante de poder interactuar en proyectos industriales de desarrollo nacional.

## INTRODUCCIÓN

Los hornos industriales han contribuido de gran forma para el desarrollo de la humanidad, su utilización dentro de áreas como son la ciencia y tecnología, investigaciones científicas e industria en general precisan de ellos para realizar tratamientos térmicos, fundición y aleaciones de diversos materiales. Estos procesos marcan el camino para el desarrollo de los pueblos, así mismo presenta una fuente de trabajo en diversas áreas como son la metalmecánica, automotriz, la construcción artesanal entre otras.

Los hornos son utilizados como fuente de obtención de temperaturas elevadas en la mayoría de los metales para operaciones de forja, estampación, extrusión, laminación y tratamientos térmicos. Y con temperaturas aún más elevadas se logra fundir los metales y eliminar la acritud<sup>1</sup> de los mismos.

---

<sup>1</sup> Acritud.- Modificación de las propiedades metálicas que numerosos metales sufren cuando son sometidos a deformaciones permanentes en el que el retículo cristalino no tenga tendencia a regenerarse.



## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **PRINCIPIOS BÁSICOS DE HORNOS INDUSTRIALES DE COMBUSTIÓN.**

La operación de los hornos industriales deriva su utilización por medio factores como son: el objetivo del proceso de calentamiento, la naturaleza de transmisión de energía, la forma de calentamiento y el método de manipulación del material a través del horno.

La fusión de los metales se logra mediante el uso de hornos industriales de combustión de combustible o mediante el uso de otro tipo de hornos que utilizan la conversión de energía eléctrica en calor.

### **FUNCIONAMIENTO DE HORNOS INDUSTRIALES DE COMBUSTIÓN.**

El principio de funcionamiento de un horno de combustión tiene factores determinantes para su diseño, basados en poseer un recipiente rectangular o cilíndrico construido de piezas refractarias unidas con piezas de acero estructural, por otro lado, el aire de combustión y combustible debe penetrar a través de aberturas de la pared mediante aspiración ejercida en el horno, el calor de los productos de combustión es transmitido al material calentado con el que están en contacto directo por convección y radiación directa desde los gases calientes y por reflexión desde las paredes calientes del horno, los gases de escape se liberan mediante una chimenea adyacente. El diseño debe enfocarse a tener un costo global mínimo en construcción, mantenimiento y combustible para un tiempo de servicio proyectado. El diseño térmico del horno de combustión pueden ser mejoradas por medio aislantes térmicos externos o reconstituyendo las paredes con materiales de mejor conductividad térmica (Kutz 1517).

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS HORNOS DE COMBUSTIÓN.

La parte principal de cada horno es el lugar de trabajo, donde se efectúa el proceso deseado. Entre los principales componentes que presenta un horno de combustión (ver figura 1), se halla la bóveda o cámara de combustión, las paredes y la solera o crisol, construidas de materiales refractarios y termo-aislantes, una chimenea para la eliminación de los productos de combustión y una cañería para suministrar el combustible líquido o gaseoso, el cual está provisto de accesorios de control de regulación y paso (Waganoff 24).

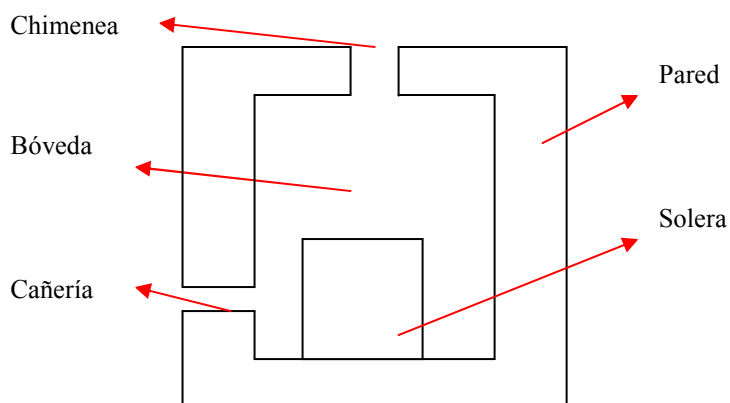


Fig. 1 - Componentes básicos de un horno a combustión

### **Solera.**

Solera es la parte del horno sobre la cual se dispone el metal fundido o los artículos a caldearse. Como soporta la carga del material, debe ser suficientemente sólida, impermeable para el metal líquido, material vítreo y escorias, y químicamente estable respecto a estas últimas.(25).

### **Paredes.**

Las paredes rodean la zona de trabajo del horno. Generalmente ellas mantienen la bóveda. Deben proteger la zona de la pérdida de calor, no permitir el



escape de los gases de hogar ni succión del aire de la atmósfera hacia el interior del horno. La cara más importante de las paredes es la interior. Debe ser pareja, limpia, tener juntas delgadas. Se hacen con ladrillos enteros y sanos (26).

### **Bóveda.**

La bóveda es una de las partes más críticas del horno. Generalmente soporta temperaturas muy altas y se calienta mucho. Para la construcción de la bóveda se necesita un encofrado. Para disminuir las pérdidas de calor en los hornos de bajas temperaturas, sobre la bóveda se vierte una capa de material aislante (27), es aconsejable utilizar cemento refractario o alguna mezcla con baja conductividad térmica.

### **Mampostería de ladrillos.**

La mampostería debe asegurar la estabilidad constructiva y la hermeticidad de la zona de trabajo. Debe ser prevista la dilatación de sus partes determinadas, dado que no se calientan en forma uniforme y su integridad después de caldeos y enfriamientos repetidos alternadamente (29).

### **Esqueleto metálico.**

Se llama esqueleto la estructura metálica que sujeta todas las partes del horno y absorbe los esfuerzos que se originan en la mampostería tanto durante su ejercicio, como posteriormente en los procesos de su trabajo. El esqueleto transmite estos esfuerzos a los cimientos. Las partes del esqueleto se aprovechan también para montar sobre ellas los accesorios del horno, como: marcos, tapas, mecheros, toberas, etc. (31)

## **MATERIALES REFRACTARIOS Y TERMOAISLANTES.**

Los materiales refractarios tienen la capacidad de resistir la acción y el contacto de altas temperaturas, así como los procesos físicos y químicos que suelen tener lugar en los hornos o alguna estructura que se encuentra a altas temperaturas.

### **Propiedades de los refractarios**

Las propiedades de los refractarios se dividen por sus propiedades físicas y químicas, entre las propiedades más relevantes se encuentran las siguientes: porosidad, permeabilidad respecto a los gases, estabilidad térmica, solidez, termoconductividad, conductividad eléctrica, calor específico.

#### **Porosidad.**

La porosidad representa la relación entre el volumen de los poros y el volumen total del material y se expresa, generalmente, en tantos por ciento (Waganoff 12).

#### **Permeabilidad respecto a los gases.**

Esta propiedad se caracteriza por el coeficiente expresado en litros de aire que pasa a través del material refractario de área de  $1 \text{ m}^2$  y de espesor de 1 m en una hora, siendo la diferencia de presiones 1 mm de la columna de agua. Esta permeabilidad depende de la temperatura, de la magnitud y carácter de los poros, de la homogeneidad de estructura del material. Al incrementarse la temperatura, la permeabilidad de los refractarios respecto a los gases disminuye porque aumenta la viscosidad del gas (12).

**Resistencia al fuego.**

Esta propiedad indica la capacidad del material de resistir al fuego directo, sin derretirse, sin quebrarse, soportando temperaturas muy altas (12).

**Estabilidad térmica.**

Es la capacidad del material de resistir repetidamente varios embates de temperaturas altas, sin resquebrajarse (13).

**Solidez.**

Es la capacidad del objeto de resistir sin modificarse las cargas mecánicas que tiene que soportar en las condiciones de trabajo. La solidez mecánica de los refractarios a la temperatura interior es mucho mayor que las cargas originadas en la mampostería del horno. La solidez mecánica del refractario depende no solamente de la naturaleza del material que está fabricado, sino también de su estructura (densidad, estructura de sus granos, etc.) (14).

**Resistencia a escorias.**

Comprende la propiedad de los refractarios de resistir la acción de escorias recalentadas hasta el estado líquido. Ella depende de la composición mineralógica y de la estructura (porosidad, agrietamiento, etc.) del refractario. Cuando las escorias son ácidas, los refractarios deben ser ácidos también; cuando aquéllas son alcalinas, también lo deben ser los refractarios. Ello se debe a que los óxidos y las bases forman siempre combinaciones fácilmente fusionables.

**Clasificación de refractarios.**

La clasificación de los refractarios se hace en base en sus cualidades como es el grado de resistencia al fuego, composición químico-mineral, tecnología y el método

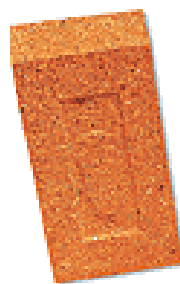
de fabricación empleado y tratamiento térmico recibido. Para el diseño térmico y construcción del prototipo se utilizó ladrillo de chamota.<sup>2</sup>

### **Refractarios de chamota**

Se fabrican de arcillas refractarias o caolinas con un agregado de arcilla tostada. El contenido de  $Al_2O_3$  oscila entre 30 y 45 %. Los refractarios de chamota resisten bien la acción química de las escorias ácidas y algo peor la de las básicas (ferrosas). En el caldeo bajo carga, paulatinamente pierden su solidez.

Los refractarios de chamota, tienen la estabilidad térmica más alta que otros refractarios y que llega a 25 y más termocambios, acompañada de gran resistencia al fuego y de una buena estabilidad escorial. Por eso son empleados para el revestimiento de las cubas, los altos hornos, los gasogeneradores, los hornos de fundición de cristales y las cucharas para distribuir el acero (16).

Comúnmente llamado ladrillo aislante U26, en nuestro mercado nacional se lo encuentra en diferentes formas según la geometría de diseño para el cual es utilizado. Los proveedores encontrados para la suministración de los ladrillos fueron “SU FERRETERIA S.A. y centro industrial “LA LLAVE S.A”



---

<sup>2</sup> Chamota.- Arcilla que cocida a elevada temperatura es empleada en cerámica y como revestimiento refractario

## Materiales termoaislantes

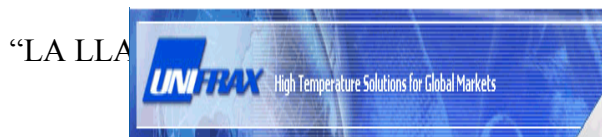
Para el aislamiento térmico se emplean en los hornos diferentes tipos de materiales con baja conductividad térmica: polvos de relleno, algodón de escorias o vidrolana, fibrocerámica y otros materiales.

El aislamiento térmico del prototipo está constituido por una manta de fibra cerámica resistente, de poco peso y flexible a la forma del horno ideal para la aplicación del prototipo.

En nuestro mercado nacional se lo encuentra con el nombre de *Manta Durablanket*, su fabricante la empresa UNIFRAX Brasil Ltda., suministrado por el centro industrial “LA LLAVE S.A”.

Como hace referencia el catálogo informativo de UNIFRAX, la *Manta Durablanket* es un aislante refractario con propiedades térmicas ideales para el uso requerido, entre las cuales se pondera la baja conductividad térmica, alta reflexión de calor, baja densidad, liviana, excelente resistencia al choque térmico, aplicada principalmente en revestimientos de hornos y calderas, aislamiento de tuberías de vapor y gas, sistemas removible para alivio de tensiones.

Para el recubrimiento interno y mampostería de los ladrillos refractarios se utilizó cemento con propiedades refractarias de marca CONCRAX ayudando a mantener la estructura del horno y la expansión de que experimentan las paredes por la dilatación térmica. Este material termoaislante es suministrado por el proveedor



## DISEÑO TÉRMICO Y MECÁNICO DEL HORNO

El diseño del prototipo de horno de crisol está basado en un horno casero creado por David J. Gingery<sup>3</sup>, el cual basa su diseño en un horno económico para fundir metales no ferrosos de manera artesanal, fácil y eficaz. Conformado este diseño por un horno de crisol, alimentando su combustión por medio de un quemador a gas natural, de bajo costo y fácil abastecimiento de repuestos y nuevo material, ver figura 2.

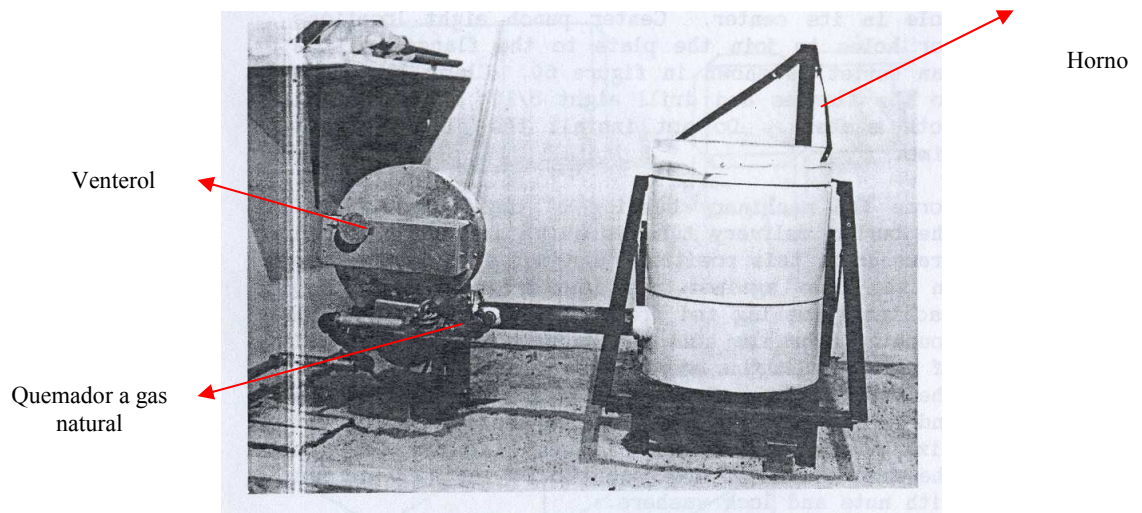


Fig. 2 – Horno de crisol y componentes, diseñado por D. Gingery

Como se puede observar en la figura 3, la bóveda o cámara de combustión está diseñada por medio de una mezcla casera de material refractario compuesto en su gran porcentaje de arena de sílice y recubierta por un armazón metálico de acero para dar la forma al horno.

---

<sup>3</sup> David Gingery.- Escritor del libro: “*Building a Gas Fired Crucible Furnace*”

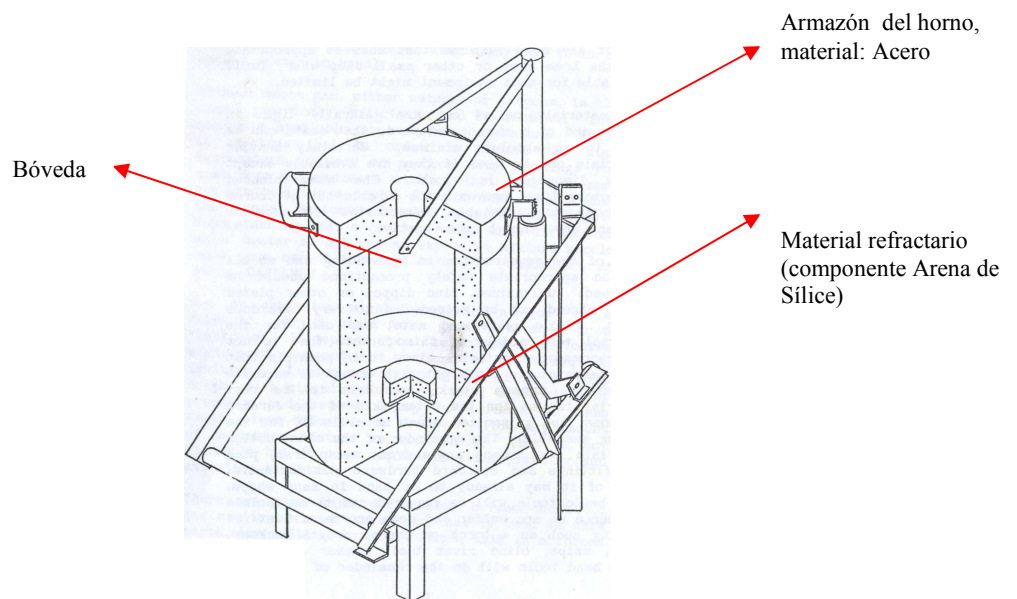


Fig. 3 – Esquema del horno de crisol

## SISTEMA TÉRMICO DEL PROTOTIPO

Los cálculos térmicos de transferencia de calor sobre sistemas cilíndricos y esféricos en los que se experimentan diferencias de temperatura en las direcciones radiales solamente, se realizan cambiando un sistema unidimensional para calcular el espesor de las paredes del horno y su temperatura teórica a lo largo del revestimiento.

Simplificando el prototipo en base a su diseño original, se puede considerar al horno como un cilindro hueco, compuesto por varios materiales en contacto (capas) y con condiciones de frontera convectivas y, justo como una resistencia eléctrica es asociada con la conducción de electricidad, una resistencia térmica puede ser asociada con la conducción del calor, es decir, existe una analogía entre la difusión del calor y la carga eléctrica. Por lo tanto, representaciones a través de circuitos térmicos proveen una útil herramienta para conceptualizar y cuantificar problemas de transferencia de calor.





## **SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS.**

E	Espesor de los revestimientos (m)
k	Conductividad térmica ( $W / m^{\circ}C$ )
$h_i$	Coeficiente de convección forzada en el interior del horno ( $W / m^2$ $^{\circ}C$ )
$h_0$	Coeficiente de convección forzada en el exterior del horno ( $W / m^2$ $^{\circ}C$ )
q	Pérdidas de calor por metro ( $W / m$ )
L	Longitud teórica del cilindro. (m)
$r_1$	Radio interior de la cámara de combustión (m)
$r_2$	Radio del espesor del cemento refractario (m)
$r_3$	Radio del espesor del Ladrillo refractario (m)
$r_4$	Radio del espesor del Aislamiento cerámico (m)
R	Resistencias Térmicas en las diferentes paredes del horno
$R_{ci}$	Resistencias térmicas por convección en el interior del horno ( $^{\circ}C/W$ )
$R_{co}$	Resistencias térmicas por convección en el exterior del horno ( $^{\circ}C/W$ )
$T_{\alpha_1}$	Temperatura promedio requerida en el interior de la cámara de combustión del horno. ( $^{\circ}C$ )
$T_{\alpha_2}$	Temperatura promedio ambiente fuera del horno. ( $^{\circ}C$ )
$T_1$	Temperatura en la pared del cemento Refractario (recubrimiento mampostería) ( $^{\circ}C$ )
$T_2$	Temperatura en la pared del Ladrillo Refractario ( $^{\circ}C$ )
$T_3$	Temperatura en la pared del Aislamiento cerámico ( $^{\circ}C$ )



## CÁLCULOS TÉRMICOS

Los cálculos térmicos se realizaron en el sistema internacional de unidades.

### Datos:

#### Temperatura en el interior del horno (bóveda)

$$T_{\alpha_1} = 900 \text{ } ^\circ \text{C}$$

#### Temperatura en el exterior del horno (temperatura ambiente promedio)

$$T_{\alpha_2} = 30 \text{ } ^\circ \text{C}$$

#### Transferencia de calor por convección en el exterior del horno<sup>4</sup>.

La temperatura ambiente promedio como referencia es 30 °C

$$H_{30^\circ\text{C}} = 9 \left( \frac{BTU}{h.ft^2.^\circ F} \right)$$

Por medio del factor de conversión a Unidades S.I.

$$h_{30^\circ\text{C}} = 1.36 H_{30^\circ\text{C}}$$

$$h_{30^\circ\text{C}} = 12.204 \left( \frac{W}{m^2.^\circ C} \right)$$

#### Transferencia de calor por convección en el exterior del horno.<sup>5</sup>

La temperatura última promedio en el interior del horno es de 900 °C

$$H_{900^\circ\text{C}} = 36 \left( \frac{BTU}{h.ft^2.^\circ F} \right)$$

Por medio del factor de conversión a Unidades S.I.

$$H_{900^\circ\text{C}} = 1.36 H_{900^\circ\text{C}}$$

$$H_{900^\circ\text{C}} = 48.82 \left( \frac{W}{m^2.^\circ C} \right)$$

### Coefficiente de conductividad térmica (k)

---

<sup>4</sup> Coeficiente promedio de convección del aire en el exterior del horno, obtenidos de la Enciclopedia de la Mecánica, ver referencia bibliográfica.

<sup>5</sup> Coeficiente promedio de convección del aire en el interior del horno, obtenidos de la Enciclopedia de la Mecánica, ver referencia bibliográfica.

Valores promedios del coeficiente de conductividad para el ladrillo refractario (1525 Kutz)

$$k_1=0.36 \left( \frac{W}{m^{\circ}C} \right)$$

Valores promedios del coeficiente del cemento refractario utilizado en la mampostería y cubierta de la bóveda del horno (1525 Kutz).

$$k_2=0.35 \left( \frac{W}{m^{\circ}C} \right)$$

El coeficiente de conductividad térmica del aislamiento para la manta de fibra cerámica con densidad de 128 Kg/m<sup>3</sup> según el catálogo del proveedor UNIFRAX:

$$k_3=0.27 \left( \frac{W}{m^{\circ}C} \right)$$

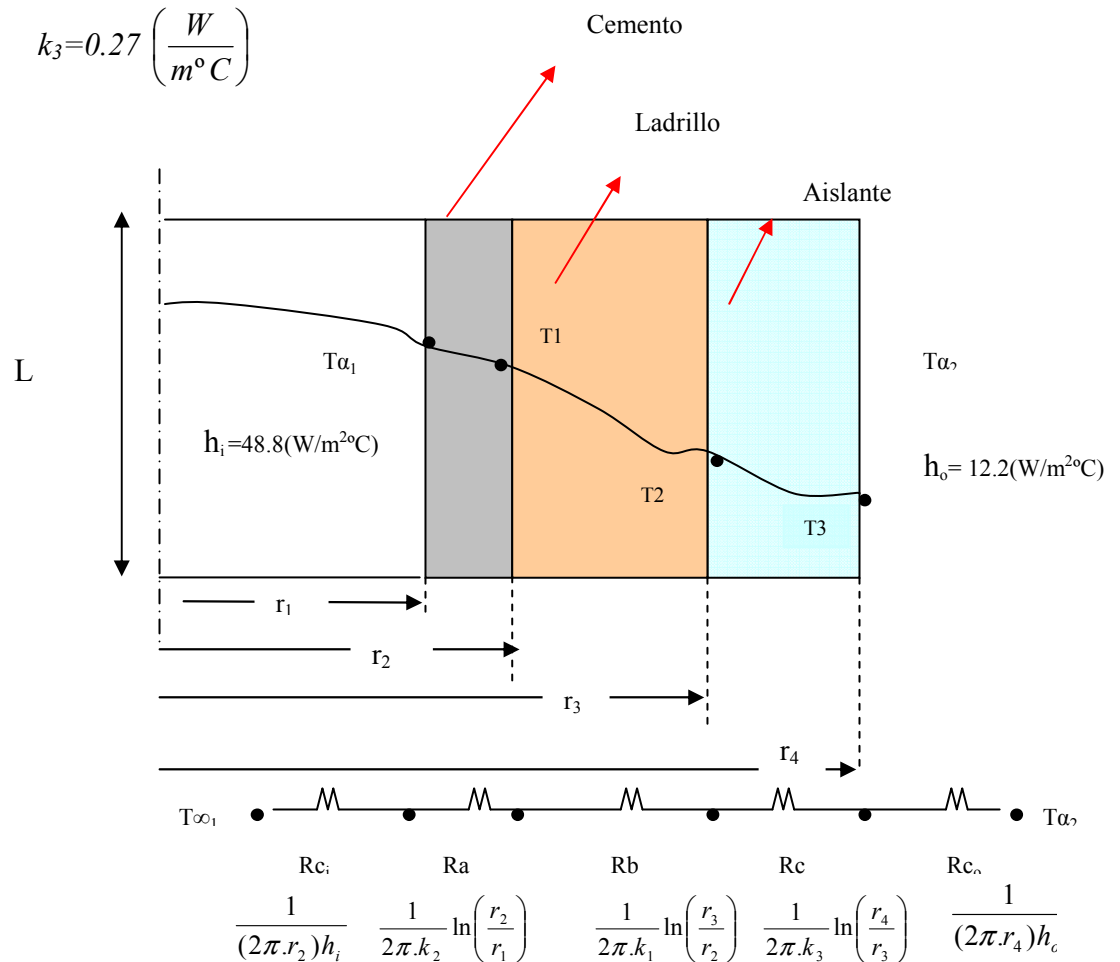


Fig. 4 - Diagrama de Transferencia de calor del horno y analogía eléctrica

## Cálculos

### Espesor de la pared del ladrillo refractario

#### Hipótesis 1:

El radio interior del cemento refractario para el recubrimiento de la bóveda será tomado desde el eje longitudinal del horno hasta el contacto con el recubrimiento, con un radio  $r_i=0.15$  m, y un radio exterior  $r_o=0.16$  m.

#### Analogía eléctrica

La analogía térmica para las condiciones de bordes en los extremos está dada por la fórmula ( 15 Monrique):

$$Rc = \frac{1}{2.\pi.r.h} \quad (1)$$

La analogía térmica para las resistencias térmicas en las paredes está dada por la fórmula

( 16 Monrique):

$$R = \frac{1}{2.\pi.k.} .Ln\left(\frac{r_{exterior}}{r_{int erior}}\right) \quad (2)$$

Utilizando la formula (1) para calcular la analogía térmica en los extremos obtenemos:

$$Rc_1 = \frac{1}{2.\pi.r_i.h_i}$$
$$Rc_2 = \frac{1}{2.\pi.r_o.h_o}$$

La resistencia térmica para la pared del cemento refractario utilizando la fórmula (2) es:

$$R_1 = \frac{1}{2.\pi.k_2.} .Ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

La resistencia equivalente está dada por la sumatoria de las resistencias en la fórmula (3):

$$R_t = \sum \text{resistencias circuito térmico} \quad (3)$$

$$R_t = 0.133 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

### **Pérdidas de calor**

Mediante la analogía térmica cuando el horno está recubierto únicamente con el cemento refractario (emporado) se utiliza la fórmula de pérdidas de calor (16 Monrique):

$$q = \frac{(T\alpha_1 - T\alpha_2)}{R_t}$$

(4)

Utilizando la fórmula (4) obtenemos la siguiente pérdida de calor:

$$q = 6.562 \times 10^3 \frac{W}{m}$$

### **Hipótesis 2**

Para el espesor de la pared del ladrillo refractario, con una reducción de la pérdida de calor del 35%

Tenemos:

$$q' = 0.65q$$

$$q' = 4.265 \times 10^3 \frac{W}{m}$$

Tomando en cuenta únicamente las resistencias térmicas del cemento refractario y de la película exterior tenemos la siguiente expresión de pérdidas de calor

$$q' = \frac{(T\alpha_1 - T\alpha_2)}{\left(\frac{1}{2\pi k_1}\right) \cdot \ln\left(\frac{rc_3}{r_o}\right) + \frac{1}{2\pi rc_3 h_o}}$$

(5)

Donde  $rc_3$  es el radio del espesor del ladrillo que se quiere encontrar

Despejando de la ecuación (5)  $rc_3$  obtenemos:

$$rc_3 = 0.22 \text{ m}$$

Encontrando el espesor del revestimiento de la cámara del horno formada por los ladrillos refractarios:

$$E_3 = rc_3 - r_o$$

$$E_3 = 0.06 \text{ m}$$

### **Espesor de la pared del aislamiento de fibra cerámica (*Manta Durablanket*)**

#### **Hipótesis 3:**

El radio interior del ladrillo refractario para el recubrimiento de la bóveda será tomado desde el eje longitudinal del horno hasta el contacto con el ladrillo, con un radio  $r_i = 0.16 \text{ m}$  y un radio exterior igual al radio encontrado en la hipótesis anterior

$$r_o = rc_3 = 0.22 \text{ m}$$

#### **Analogía eléctrica**

Utilizando la formula (1) para calcular la analogía térmica en los extremos obtenemos:

$$Rc_i = \frac{1}{2\pi r_i h_i}$$

$$Rc_o = \frac{1}{2\pi r_o h_o}$$

La resistencia térmica para la pared del ladrillo refractario utilizando la fórmula (2) es:

$$R_2 = \frac{1}{2\pi k_3} \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)$$

La resistencia equivalente esta calculada mediante la fórmula (3)

$$R_t = 0.267 \frac{m^{\circ}C}{W}$$

### Pérdidas de calor

Mediante la analogía térmica cuando el horno está recubierto únicamente con el ladrillo refractario (pared) se utiliza la fórmula de pérdidas de calor (4) obteniendo:

$$q = 2.132 \times 10^3 \frac{W}{m}$$

### Hipótesis 4

Para el espesor del la pared del aislante térmico (*Manta Durablanket*), con un reducción de la pérdida de calor del 30%

Tenemos:

$$q' = 0.7q$$

$$q' = 1.492 \times 10^3 \frac{W}{m}$$

Tomando en cuenta únicamente las resistencias térmicas del ladrillo refractario y la película exterior tenemos la siguiente expresión de pérdidas de calor

$$q' = \frac{(T\alpha_1 - T\alpha_2)}{\left(\frac{1}{2.\pi.k_3}\right).Ln\left(\frac{r_{c4}}{r_o}\right) + \frac{1}{2.\pi.r_{c4}.h_o}}$$

(6)

Donde  $r_{c4}$  es el radio del espesor del aislamiento de la fibra cerámica que se quiere encontrar y tomando la temperatura inicial referencial de las hipótesis 1 y 2 para la reducción de la pérdida en un 35% ,  $T\alpha_1 = 600^{\circ}C$

Despejando de la ecuación (6)  $rc_4$  obtenemos:

$$rc_4 = 0.39 m$$



Encontrando el espesor del revestimiento de la cámara del horno formada por el aislamiento térmico:

$$E_4 = r_{c_4} - r_o$$

$$E_3 = 0.17 \text{ m}$$

### **Cálculo de las temperaturas en las superficies de los revestimientos del horno**

#### **Datos**

De los resultados de las hipótesis anteriores con ilustración en la figura 4 tenemos:

$$r_1 = 0.15 \text{ m} \quad ; \quad r_2 = 0.16 \text{ m} \quad ; \quad r_3 = 0.22 \text{ m} \quad ; \quad r_4 = 0.39 \text{ m}$$

La longitud del cilindro es  $L = 0.45 \text{ (m)}$

#### **Analogía Eléctrica**

Tomando en cuenta la longitud del horno para el cálculo de las resistencias y modificando este factor en la ecuación (1) obtenemos:

$$R_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot L}$$

(7)

La analogía térmica para las resistencias térmicas en las paredes está dada por la inclusión del factor longitudinal en la fórmula (2):

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \cdot \ln \left( \frac{r_{\text{exterior}}}{r_{\text{interior}}} \right)$$

(8)

Utilizando la formula (6) para calcular la analogía térmica en los extremos obtenemos:

$$R_{c_i} = \frac{1}{2 \pi r_1 h_i L}$$

$$R_{c_o} = \frac{1}{2 \pi r_4 h_o L}$$

En donde  $R_{ci}$  y  $R_{co}$ , son las resistencias por convección en los extremos del horno (interno y externo)

La resistencia térmica para las diferentes paredes de las tres capas que conforman en horno está dada utilizando la fórmula (7) es:

Resistencia térmica del cemento refractario ( $R_a$ )

$$R_a = \frac{1}{2\pi k_2 L} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

Resistencia térmica del ladrillo refractario ( $R_b$ )

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_1 L} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)$$

Resistencia térmica del aislamiento térmico ( $R_c$ )

$$R_c = \frac{1}{2\pi k_3 L} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)$$

La resistencia equivalente está dada por la sumatoria de las resistencias en fórmula:

$$R_t = R_{ci} + R_a + R_b + R_c + R_{co}$$

(9)

Dando como resultado la Resistencia equivalente para todo el circuito térmico

$$R_t = 1.251 \frac{^{\circ}C}{W}$$

### **Pérdidas de calor**

Mediante la analogía térmica cuando el horno está recubierto por las tres capas se utiliza la ecuación de pérdidas de calor (4), dándonos un resultado:

$$q_t = 695.644 \frac{W}{m}$$

### **Temperaturas en las superficies de los revestimientos del horno**

La referencia sobre las diferentes temperaturas encontradas se encuentra en la figura 4.

Temperatura en la pared del cemento refractario s

$$T_1 = T_{\alpha_1} - q_t R_a$$

$$T_1 = 854.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura en la pared del ladrillo refractario

$$T_2 = T_1 - q_t R_b$$

$$T_2 = 636.99 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura en la pared del aislante fibra cerámica

$$T_3 = T_2 - q_t R_c$$

$$T_3 = 115.29 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

### **Cálculo de la conductividad térmica en la tapa del horno**

#### **Datos**

Nota: Para los cálculos de la conductividad térmica de la tapa del horno se toman las condiciones teóricas originales impuestas en los cálculos anteriores sobre coeficientes térmicos de los materiales utilizados, coeficientes de transferencia de calor convectiva del aire, temperaturas interiores y exteriores.

El revestimiento interno de la tapa del horno estará compuesto por una capa de cemento refractario *CONCRAX* y la manta aislante *DURABLANKET*

Espesor del revestimiento del aislamiento de la fibra cerámica

$$E_4 = 0.15 \text{ m}$$

Espesor del revestimiento del cemento refractario

$$E_5 = 0.02 \text{ m}$$

Área de los revestimientos expuestos a la combustión

$$A = 0.107 \text{ m}^2$$

## **Analogía eléctrica**

### **Hipótesis 5:**

La analogía térmica para las condiciones de bordes en los extremos está dado por la fórmula:

$$R_c = \frac{1}{A.h}$$

(10)

donde  $A$  es el área de conductividad y  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor del aire

La analogía térmica para las resistencias térmicas en las paredes está dada por la fórmula:

$$R = \frac{E}{A.k}$$

(11)

donde  $A$  es el área de conductividad y  $k$  es el coeficiente de conductividad térmica de los materiales.

Calculando las ecuaciones (10) y (11) respectivamente y utilizando su resultante referida en la ecuación (3) obtenemos la siguiente resistencia térmica resultante:

$$R_t = 6.683 \frac{^{\circ}C}{W}$$

## **Pérdidas de calor**

Mediante la analogía térmica cuando el horno está recubierto por las dos capas se utiliza la ecuación de pérdidas de calor (4), dándonos un resultado:

$$q_t = 130.173 \text{ W}$$

## **Temperaturas en las superficies de los revestimientos de la tapa**

Temperatura en la pared del cemento refractario

$$T_1 = T_{\infty 1} - q_t R_{c1}$$

En donde  $T_{\infty 1}$  es la temperatura en el interior de la bóveda del horno,  $q_t$  es la pérdida de calor total del circuito y  $R_{c1}$  la resistencia térmica determinada por el coeficiente de transferencia de calor del aire en el interior del horno.

$$T_1 = 875.078 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura en la pared interna del aislante térmico fibra cerámica

$$T_2 = T_1 - q_t R_2$$

En donde  $T_1$  es la temperatura en la pared del cemento refractario,  $q_t$  es la pérdida de calor total del circuito y  $R_2$  la resistencia térmica determinada por el coeficiente de conductividad térmica del aire aislante térmico, obteniendo:

$$T_2 = 199.205 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Temperatura en la pared externa del aislante térmico fibra cerámica

$$T_3 = T_{\alpha 2} + q_t R_{c0}$$

En donde  $T_{\alpha 2}$  es la temperatura en el exterior de la tapa del horno,  $q_t$  es la pérdida de calor total del circuito y  $R_{c0}$  la resistencia térmica determinada por el coeficiente de transferencia de calor del aire en el exterior del horno.

$$T_3 = 129.628 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

## **CÁLCULOS DEL DISEÑO MECÁNICO DE LA TAPA DEL HORNO**

La apertura y cierre de la tapa del horno se basa en factores determinantes como son el uso continuo en un prototipo académico y de investigación, el factor de seguridad para el o los operarios y la restricción del peso de la tapa del horno.

El mecanismo de levantamiento utilizado es el de un tornillo - manivela, como se puede observar en la figura 5.

## Cálculos

### Hipótesis 1

Para cálculos de diseño el sistema de tornillo manivela se puede simplificar a un diagrama de viga expuesta a flexión.

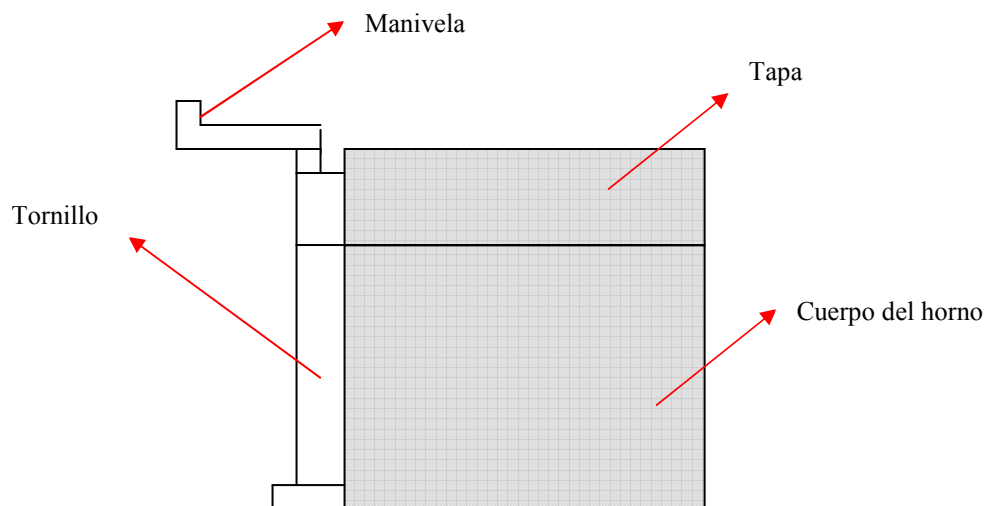
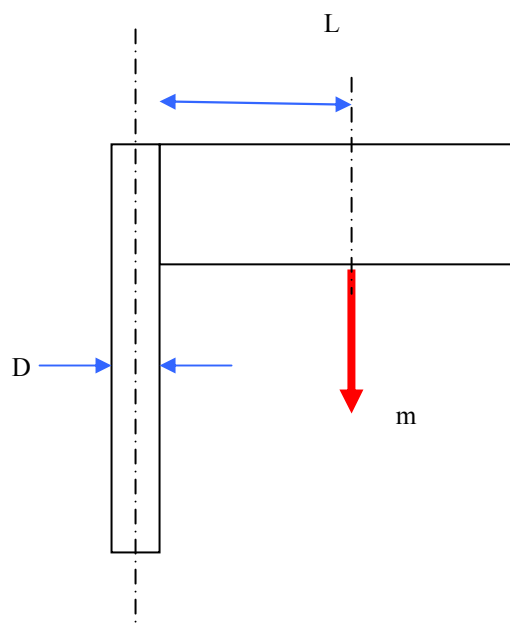


Fig 5 - Esquema del mecanismo "Tornillo – Manivela"

### Diagrama de Cuerpo Libre de la Tapa



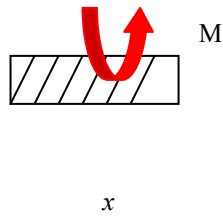


Fig. 6 - Diagrama de cuerpo libre de la tapa del horno

## DATOS

$$L = 0.3 \text{ (m)}$$

$$m = 50 \text{ (kg)}$$

$$D = 0.025 \text{ (m)}$$

Donde:

**L:** es la longitud de la tapa del horno al eje referencial del tornillo, la distancia referencial para el cálculo del momento de flexión es tomada como carga distribuida.

**m:** es la masa de la tapa, calculado con un peso promedio de ladrillos refractarios de longitud de 0.07 (m) cada /uno, con un peso aproximado de 1.8 Kg por ladrillo.

**D:** es el diámetro hipotético con el que se basa el diseño del tornillo.

**M:** es el momento ejercido por el peso de la tapa en el eje del tornillo

## Cálculo del Momento de flexión

Fuerza de carga

$$F = mg$$

Donde  $g$  es la gravedad en SI:  $9.81 \text{ m/s}^2$  y  $m$  es el peso promedio de la tapa

$$F = (50 \text{ Kg}) (9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$F = 490.5 \text{ N}$$

Momento de Flexión a carga extrema (  $M$  )

$$M = F L$$

$$M = (490.5 \text{ N}) (0.3 \text{ m})$$

$$M = 147.15 \text{ Nm}$$

**Cálculo del Esfuerzo de flexión (  $\sigma_x$  )**

$$\sigma_x = \frac{My}{I}$$

(1)

Donde:

$M$  es el momento de flexión en la sección en cuestión;

$I$  es el segundo momento del área (momento de inercia del área) de la sección transversal de la viga en relación al plano neutro

$y$  es la distancia del plano neutro al punto en el cual se calcula el esfuerzo.

Reemplazando los factores en la ecuación (1) se obtiene:

$$\sigma_x = \frac{M \left( \frac{D}{2} \right)}{\frac{\pi D^4}{64}}$$

(2)

Simplificando ecuación (2):

$$\sigma_x = \frac{32}{\pi} \left( \frac{M}{D^3} \right)$$

Para obtener el valor del esfuerzo a flexión en MPa.

$$\sigma_x = \frac{32}{\pi} \left( \frac{(490.5 \text{ Nm})(0.3 \text{ m})(1000)}{25^3} \right)$$

$$\sigma_x = 95.9 \text{ MPa}$$

**Elección del material para diseñar el tornillo:**



La elección del material para la construcción del tornillo está basado en un material con características mecánicas aptas para la realización del trabajo requerido, fácilmente maquinable y que su costo y existencia en el mercado nacional sea de acceso inmediato.

### **Acero AISI 1020 (Transmisión)**

**Características:** Acero de Cementación no aleado para piezas medianas, exigidas principalmente al desgaste y donde la dureza del núcleo no sea importante. Buena soldabilidad.

**Aplicaciones:** Levas, uniones, bujes, pines, pivotes, partes prensadas o troqueladas pernos grado 3, ejes de transmisión.

### **Características mecánicas principales:**

Límite a la fluencia: 235 MPa

Resistencia última a la tracción: 410-520 MPa

**Nota:** Selección del material basado de catálogo de proveedor<sup>6</sup>

### **Factor de Seguridad:**

$$FS = \frac{\sigma_{acero} C}{\sigma_{x\_teórico}}$$

(3)

Donde  $\sigma_{acero}$  es el esfuerzo en el límite de fluencia del acero seleccionado,  $C$  son factores de corrección aplicables al límite de resistencia a la fatiga teóricos y  $\sigma_{teórico}$  es el esfuerzo a flexión calculado.

### **Factores de corrección**

Efecto de Carga

Para flexión:  $C_{carga} = 1$

---

<sup>6</sup> Proveedor nacional Aceros Böhler, ver referencia bibliográfica.

Efecto Dimensional

Para diámetro  $\leq 8$  mm:  $C_{\text{tamaño}} = 1$

Efecto Temperatura

Para temperatura  $\leq 450$  °C:  $C_{\text{temperatura}} = 1$

$$FS = \frac{\sigma_{\text{acero}} C_{\text{carga}} C_{\text{tamaño}} C_{\text{temperatura}}}{\sigma_{x \text{ teórico}}}$$

Los factores de corrección para el diseño del tornillo a las condiciones planteadas están por debajo de los rangos máximos y no afectan en el cálculo del factor de seguridad.

$$FS = \frac{235(MPa)}{95.9(MPa)}$$
$$FS = 2.45$$

## CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

### CONSTRUCCIÓN DEL ESQUELETO METÁLICO Y TAPA

**Esqueleto Metálico.-** Para la elaboración del esqueleto tubular, se seleccionó planchas de acero estructural con un espesor de 3 mm, por medio de un proceso de barolado se le dio la forma requerida.

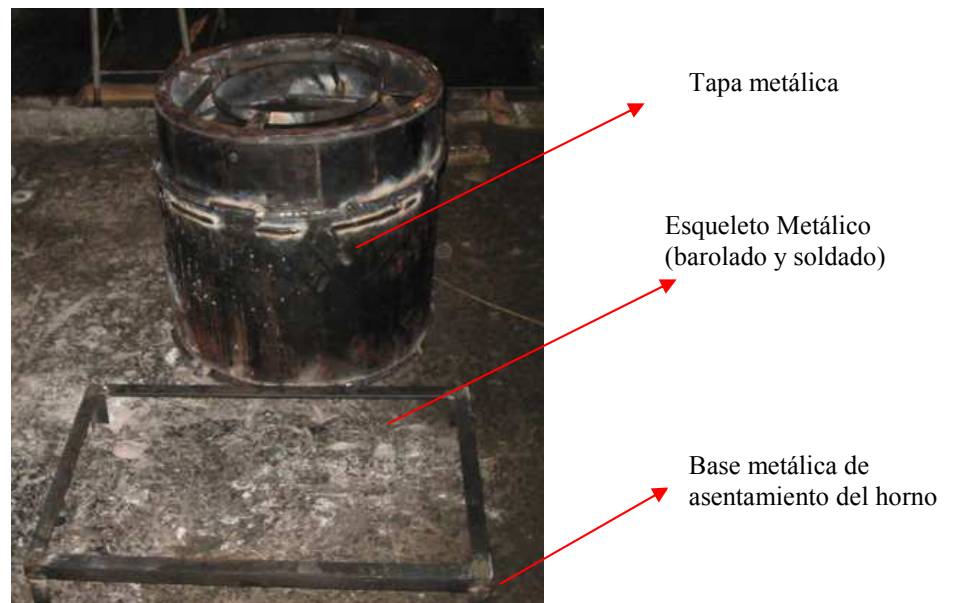


Fig. 7 – Conjunto del esqueleto metálico del horno

**Tapa del Horno.-** Se construye la tapa del horno de la misma forma que el cuerpo central, ver figura 8.

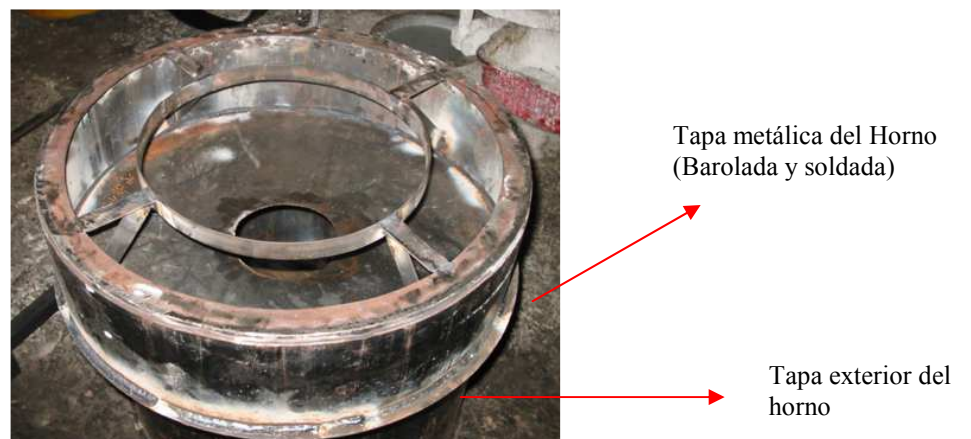


Fig. 8 - Tapa del horno

La tapa inferior del horno está soldada a la chimenea y sujeta mediante pernos para su fácil limpieza interna y mantenimiento de la fibra aislante, como podemos observar en la figura 9.



Fig. 9 – Conjunto tapa del horno

## CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ELEVACIÓN MECÁNICA DE LA TAPA

Se maquina el eje del tornillo, según especificaciones del diseño térmico y mecánico, construyendo una camisa para alojar el eje tornillo como se ilustra en la figura 10.



Fig. 10 – Construcción del eje tornillo

El ensamble de las camisas están unidas al cuerpo central y a la tapa del horno mediante suelda autógena. Por medio de rodamientos internos y chumacera de pared se logra aliviar las tensiones axiales y longitudinales que ejerce el peso de la tapa en el tornillo. De la misma manera estos rodamientos facilitan el sistema mecánico de apertura – cierre y el volteo de la tapa, ver figura 11

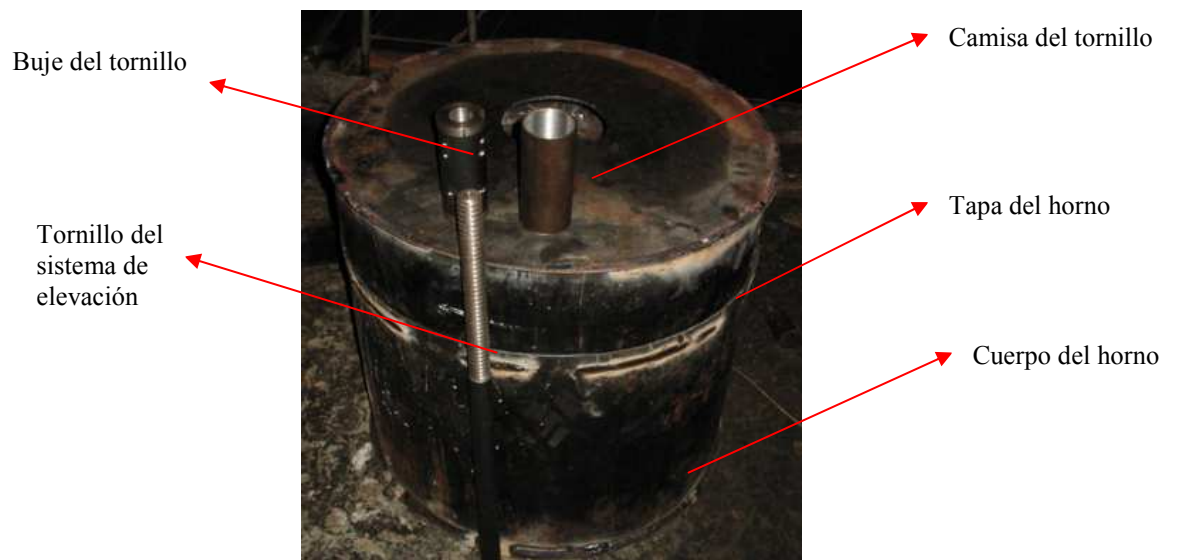


Fig.11. Construcción de camisa, buje para el alojamiento del tornillo

## CONSTRUCCIÓN DE LA BÓVEDA DEL HORNO

La bóveda del horno está construida en su parte expuesta a la combustión del gas por una pared de ladrillos refractarios cortados a medida de diseño térmico, ver figura 12, los ladrillos serán colocados y asegurados en la estructura metálica (cuerpo del horno).

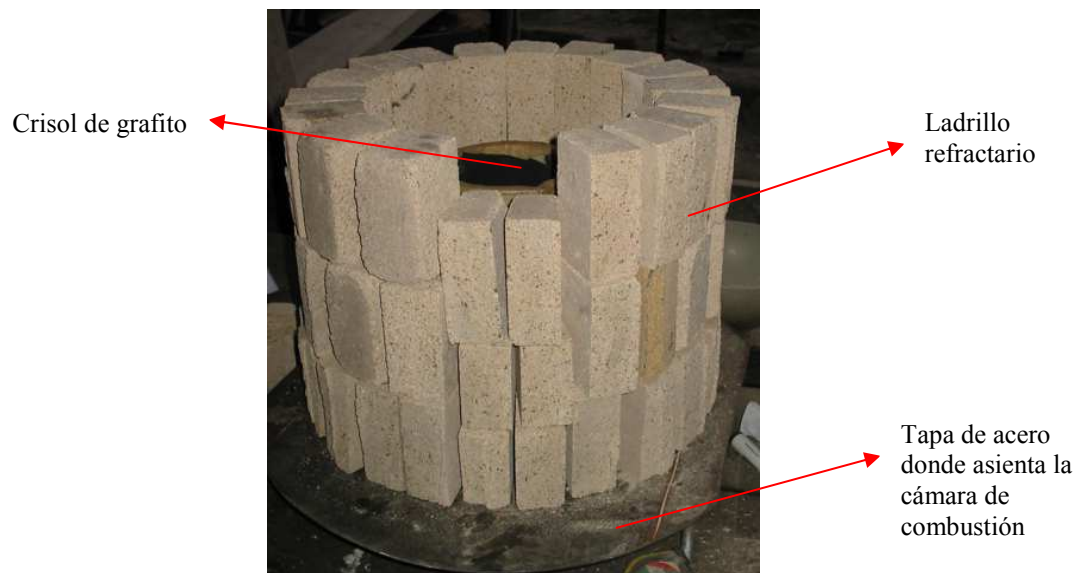


Fig. 12 - Pared de ladrillos refractarios

Para la fachada interna se enlució las paredes con una pasta de cemento refractario, el cual permite una menor pérdida de calor entre ladrillos y mantiene una

sola estructura rígida de las paredes y suelo de la cámara de combustión (ver figura 13).



Fig. 13 - Bóveda del horno

El piso del horno está recubierto por fibra cerámica (*Manta Durablanket*), una tapa de acero como se observa en la figura 12. El asentamiento del ladrillo, el cual sirve de piso de la bóveda es recubierto de cemento refractario (ver figuras 14 y 15).

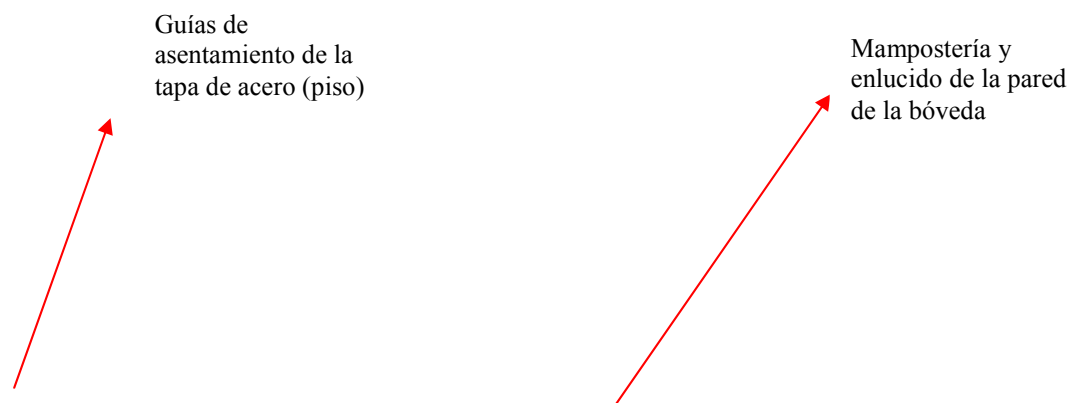




Fig. 14 - Piso del horno



Fig. 15 - Construcción de bóveda del horno

Para el aislamiento de la tapa del horno se utilizó fibra cerámica recubierta por una pasta que ayuda a fijar la fibra de contacto con el calor directo. También se adjuntó una capa de cemento refractario en la tapa inferior la cual tiene el mayor contacto con el calor de la combustión (ver figuras 16 y 17).



Fig. 16 - Construcción del aislamiento térmico de la tapa del Horno



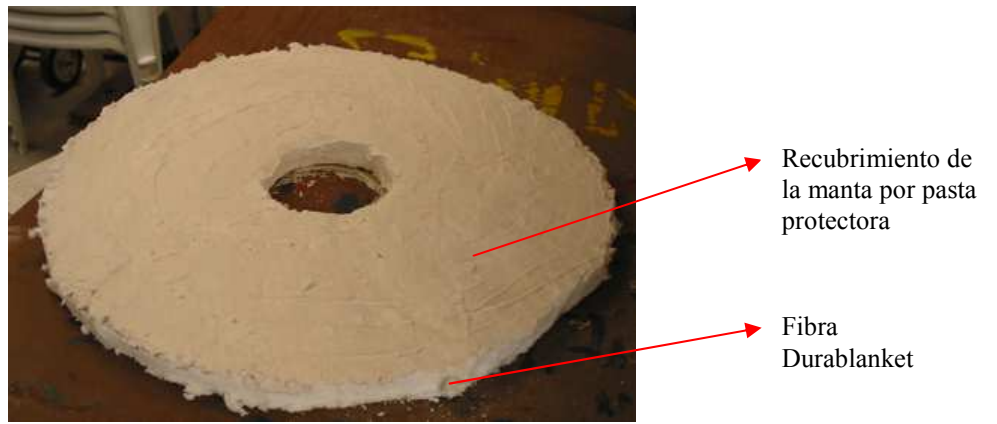


Fig. 17 - Recubrimiento de la fibra cerámica con pasta protectora

El alojamiento del quemador entra tangencialmente a la base del crisol permitiendo una difusión uniforme y en espiral de la llama en la cámara de combustión conservándola en el interior de la misma como se puede observar en la figura 18.



Fig. 18 – Entrada para tobera de combustión



## CONSTRUCCIÓN DEL QUEMADOR DE GAS NATURAL

El sistema de quemador utilizado es denominado quemador sellado mecánico, caracterizado por no poseer entradas intencionales de aire libre alrededor de la tobera. El flujo de entrada de aire es controlado por un ventilador de inyección (venterol) que impulsa el aire a través de la caja de aire. Este tipo de quemador suele tener una mayor caída de presión del aire en la tobera, de modo que la velocidad del aire es mayor y por tanto se produce una mejor mezcla y el control de la configuración de la flama. Ver figuras 19, 20 y 21.



Fig.19 - Pruebas del quemador aire combustible

El venterol es utilizado para generar una mejor combustión en la bóveda del horno, puesto que, utilizando únicamente la combustión del gas natural no se tendrían las condiciones deseadas para generar el funcionamiento del prototipo a temperaturas mayores de 900 °C, por este motivo es justificado alimentar de manera artificial por medio de un venterol la combustión de la cámara.

Por otro lado el horno funciona como una cámara cerrada y el venterol es el elemento que suministra el oxígeno para mantener la combustión.



Combustión gas natural y aire suministrado por venterol, llama en espiral con la conservación de la misma en el alojamiento del cuerpo central

Fig. 20 - Pruebas del quemador en el horno con tapa abierta



Fig. 21 - Venterol eléctrico

En la figura 22 se puede observar el prototipo armado en condiciones de funcionamiento tapa cerrada, el prototipo tiene un peso aproximado de 150 Kg.



Fig. 22 - Prototipo armado

# PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO

## IMPLEMENTOS

Para la realización de las pruebas del prototipo en condiciones controladas se contó con las siguientes implementos de seguridad y medición:

### Infraestructura

- Cuarto cubierto de 3 m de alto aproximadamente.
- Aireación no controlada.

### Implementos de seguridad

- Guantes térmicos (cuero).
- Gafas y máscara protectora.
- Mandil de tela gruesa.
- Tanque de gas propano con válvula de seguridad.
- Crisoles de grafito.
- Pinzas para crisol.

### Implementos de medición

- Termómetro análogo para temperaturas de rango de funcionamiento 0-700 °C.
- Pistola Térmica digital, rango de funcionamiento 0-1200 °C.
- Balanzas.
- Cronómetro
- Flexómetro

En las figuras 23 y 24 se aprecia los implementos utilizados para realizar las pruebas del prototipo.



Fig. 23 - Implementos para realizar las pruebas del horno



Fig. 24 - Termómetro análogo para altas temperaturas

## PRUEBAS DE COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO

Las pruebas se realizaron en condiciones controladas mediante experimentación y tabulación de datos.

### Prueba de presión de gas óptima del encendido del quemador

Para determinar la presión mínima que se requiere para la flama dentro de la bóveda del horno, se efectuó varios intentos experimentales mediante la variación de la presión de entrada al quemador.

Los resultados obtenidos se indican en la siguiente tabla:

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Presión Gas (bar)</b>	<b>Temp. Exterior horno (°C)</b>	<b>Temp. interior horno (°C)</b>	<b>Temp. Chimenea (°C)</b>	<b>Condiciones</b>
0	0,1	22	24	23	Venterol cerrado
5	0,1	22	44	23	No permite funcionar venterol
10	0,2	22	52	24	No permite funcionar venterol
13	0,3	22	52	24	No permite funcionar venterol
15	0,5	21	52	24	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
20	0,5	21	530	60	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
25	0,5	23	600	150	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
30	0,4	23	650	200	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
35	0,4	23	680	220	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
40	0,4	31	700	240	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
45	0,2	31	700	240	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
50	0,2	33	680	240	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
55	0,2	38	700	240	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
60	0,5	39	700	250	Venterol cerrado; válvula-gas menor a 25% ; tiende a apagarse
65	0,5	40	700	235	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
70	1	39	780	245	Venterol cerrado; válvula-gas 25%
75	1	55	820	260	Venterol abierto 50%; válvula-gas 25%

Tabla 1. Pruebas encendido del quemador

El comportamiento del encendido del horno a bajas presiones del gas se estabiliza a una presión mínima de 0.5 Bar, condición en la cual permite suministrar oxígeno con el aire impulsado por el venterol. Es decir que para iniciar el funcionamiento del horno se debe tener una presión mínima de la presión de gas de 0.5 Bar. Para estabilizar la llama de color azul se debe tener un flujo de gas en forma de espiral. La figura 25. La válvula de control de gas debe estar en una apertura óptima de  $\frac{1}{4}$  de vuelta.



Fig. 25 – Horno encendido con flujo semi laminar y llama de color azul

### **Pruebas de comportamiento térmico del horno**

Las pruebas del comportamiento térmico del horno se realizaron a condiciones óptimas encontradas en el análisis experimental de encendido citado anteriormente.

Teniendo una presión del gas de 1 Bar, la válvula de apertura de gas a  $\frac{1}{4}$  de vuelta y la ventana de succión de aire del venterol cerrada, se midieron las temperaturas alcanzadas en las diferentes paredes del horno para comparar el la diferencia de temperatura teórica impuesto en el diseño y la práctica obtenido en las pruebas.

Tiempo	Temp. Exterior	Temp. interior	Temp. exterior	Temp.	Temp. interior	Temp. exterior	Condiciones
	horno	horno	tapa	Chimenea	Ladrillo	Ladrillo	
(min)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	
5	18	18	18	40	360	65	1 bar; $\frac{1}{4}$ válvula; sin crisol
10	20	360	36	120	410	100	1 bar; $\frac{1}{4}$ válvula; sin crisol
15	24	420	38	150	470	120	1 bar; $\frac{1}{4}$ válvula; sin crisol
20	24	500	52	160	525	150	1 bar; $\frac{1}{4}$ válvula; sin crisol
25	25	565	70	170	590	150	1 bar; $\frac{1}{4}$ válvula; sin crisol
30	25	670	83	220	630	240	1 bar; $\frac{1}{4}$ válvula; sin crisol
35	30	750	90	235	700	220	Crisol con cobre (To 220°C); $\frac{1}{2}$ apertura venterol
40	30	840	92	255	600	205	Cobre al rojo vivo
45	32	1032	95	250	640	230	Cobre estado maleable
50	34	1100	100	270	660	240	Cobre parcialmente líquido
55	40	1150	123	270	760	290	Cobre totalmente líquido

Tabla 2 – Pruebas del comportamiento térmico del horno

Las pruebas se efectuaron en dos etapas, la primera calentando el horno y midiendo las temperaturas con intervalos de 5 minutos y apagando el horno hasta obtener la máxima temperatura experimental en condiciones controladas que es 1200 °C. La segunda etapa se realizó introduciendo material cobre en el crisol y tomando lecturas de temperaturas en los mismos intervalos anteriores, hasta lograr la fundición del metal

En la figura 26 se muestra el material que será expuesto al proceso de fundición.





Fig. 26 – Pletina de cobre y crisol

En la figura 27 se observa el material (cobre) en estado sólido a una temperatura aproximada de 900 °C, temperatura a la cual se inicia la transformación de estado sólida a líquido. En la figura 28 se puede apreciar el estado del metal a punto de fundirse, después de 20 minutos en contacto con la flama, observándose que el cobre está en estado líquido a una temperatura aproximada de 1100 °C



Fig. 27 – Cobre al rojo vivo



Fig. 28 - Cobre parcialmente

fundido

El colado de la fundición se realizó en un molde de acero para lograr una forma de pastilla, como se observa en la figura 29.





Fig. 29 – Colado del cobre fundido en molde

En las figuras 30 y 31 se puede apreciar el proceso de fundición de aluminio.

A una temperatura aproximada de 650 °C.



Fig. 30 – Crisol con aluminio en estado semi sólido



Fig. 31 - Fundición de Aluminio

## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL HORNO

Con los datos recopilados durante las pruebas se realizaron los siguientes análisis del comportamiento térmico del horno.

### TEMPERATURA DE OPERACIÓN DEL HORNO

Las temperaturas en el interior del horno siguen la configuración de la curva que se indica en la figura 32, la tendencia del incremento de temperatura varía desde un campo de subida rápida durante los primeros minutos de operación para luego experimentar una estabilidad de incremento paulatino hasta llegar a los 1200 °C.

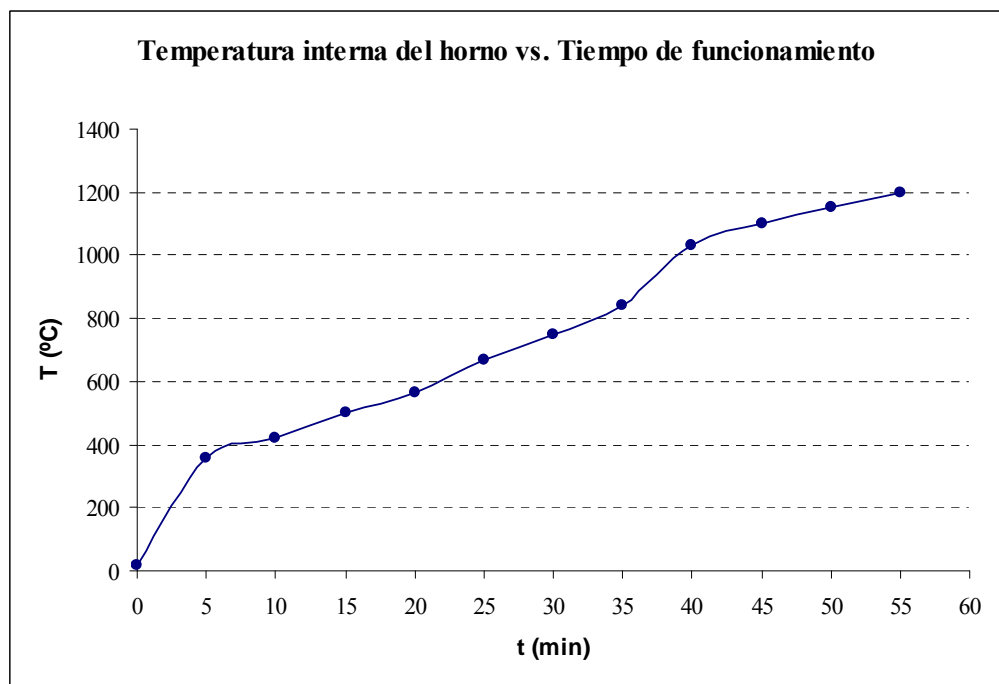


Fig. 32 – Diagrama del comportamiento térmico en el interior del horno

## ANÁLISIS DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS EN LAS PAREDES

Los datos constantes en la tabla 3 describen la variación de temperatura en las diferentes paredes constitutivas del horno, como son la pared interior del ladrillo refractario, la pared exterior de dicho ladrillo, la pared exterior del horno.

Temp. Exterior  H orno	Temp. Exterior  Ladrillo	Temp. interior  Horno	Diferencia de Temperatura en el ladrillo  refractario	Diferencia de Temperatura en la manta  aislante
(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(%)
18	18	18		
18	65	360	81,9	72,3
20	100	420	75,6	80,0
24	120	500	74,5	80,0
24	150	565	71,4	84,0
25	150	670	74,6	83,3
25	240	750	61,9	89,6
30	220	840	68,6	86,4
30	205	1032	65,8	85,4
32	230	1100	64,1	86,1
34	240	1150	63,6	85,8
40	290	1200	61,8	86,2
Gradiente promedio:			69,4	83,6

Tabla 3 – Temperaturas en las paredes del horno

Si consideramos las relaciones unitarias entre la variación de temperatura vs. el tiempo, tenemos como resultado las curvas que se indican en la figura 33, como se puede observar la tendencia de las tres curvas que corresponden a las temperaturas en los lugares antes indicados tienen un comportamiento similar con incremento cortos, la ubicación de la medición en las paredes pueden ser observadas en la figura 4.

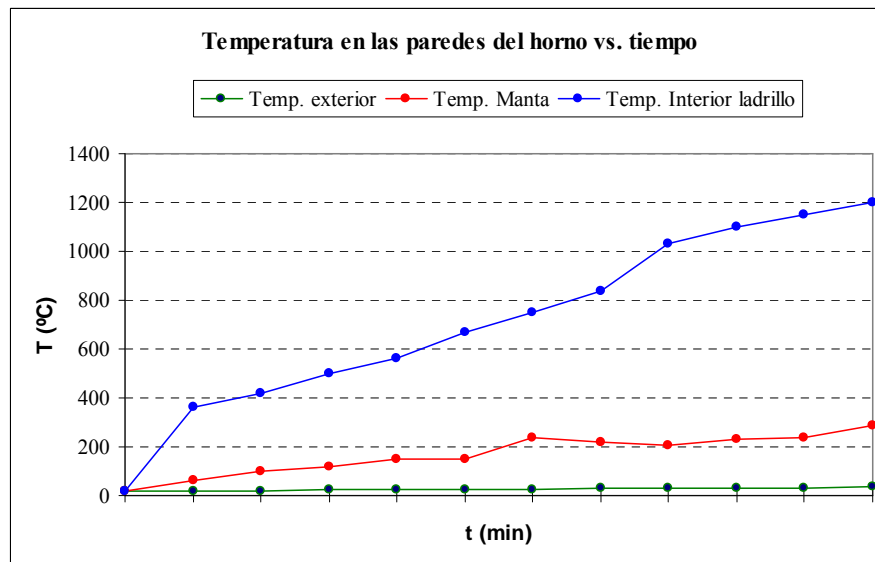


Fig. 33 – Diagrama del comportamiento térmico en las paredes del horno

## ERRORES PORCENTUALES DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS

Los errores porcentuales son referidos a los datos impuestos en las hipótesis 2 y 4 sobre la reducción de las pérdidas de calor para el ladrillo refractario y para la manta fibra cerámica, a temperaturas de referencia interna del horno de 1000°C y externa del horno

30 °C, comparados con los datos experimentales de la tabla 3 a una temperatura del horno del 1032 °C y exterior de 30 °C.

Para el ladrillo refractario:

$$e_{1000^{\circ}C} = 100 \left( \frac{\Delta T_{teórica} - \Delta T_{experimental}}{\Delta T_{teórica}} \right)$$

$$e_{1000^{\circ}C} = 100 \left( \frac{65 - 65.8}{65} \right)$$

$$e_{1000^{\circ}C} = -1.28\%$$

Para la fibra cerámica:

$$e_{1000^{\circ}C} = 100 \left( \frac{\Delta T_{teórica} - \Delta T_{experimental}}{\Delta T_{teórica}} \right)$$

$$e_{1000^{\circ}C} = 100 \left( \frac{70 - 85.4}{70} \right)$$

$$e_{1000^{\circ}C} = -21.9\%$$

Los valores de los errores porcentuales pueden deberse a las condiciones de medición teóricas de los datos de la conductividad térmica de los materiales utilizados y al diseño térmico unidimensional sobre la condición térmica real tridimensional que presenta el prototipo. En todo caso, los valores experimentales obtenidos presentan un mayor porcentaje de diferencias de temperaturas frente a los esperados según hipótesis de diseño, por ende el horno presenta una mayor eficiencia práctica que lo esperado.

## ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROTOTIPO

Los costos de materiales y equipos empleados en la construcción del prototipo corresponden al detalle indicado en la siguiente tabla. Los costos de fabricación de hornos con proyección comercial pueden mejorarse, con la optimización del uso de los materiales.

Costos de fabricación del prototipo			
Cantidad	Descripción	Precio unitario	Precio total
1	Crisol 6 Kilos	27,13	27,13
40	Ladrillo refractario	1,67	66,8
1	Venterol eléctrico 2" 110v.	29,68	29,68
1	Válvula reguladora de presión	24	24
1	Válvula flujo de gas	17	17
1	Tanque de gas	34	34
1	Quemador	20	20
1	Termocupla con indicador	300	300
1	Manta aislante DURABLANKET	78	78
4	Perfiles angulares de acero 30x30x0,3	3,5	14
1	Plancha de Acero 3 mm espesor	40	40
1	Barra de acero AISI 1020	25	25
4	Rodamientos	2,5	10
1	Chumacera de pared	4	4
4	Ruedas	2,5	10
1	Material para soldar (25 Kg)	5	5
1	Mecanizado plancha (barolado)	20	20
1	Mecanizado mecanismo elevación tapa	50	50
1	Soldadura (mano de obra)	50	50
3	Pintura para altas temperatura	4	12
		Total	836,61

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

1. El costo de producción en serie del prototipo está al alcance para aplicaciones artesanales e investigativas, en virtud de que la construcción unitaria experimental no tiene costos excesivos.
2. El prototipo debe funcionar obligatoriamente con un flujo de aire para suministrar el oxígeno para una combustión óptima.
3. Para tener temperaturas controladas menores a 700°C es necesario controlar el flujo de aire predeterminado en el venterol.
4. Para temperaturas comprendidas entre 700 y 900 °C, el flujo de aire constante es suministrado con una abertura del 25% de la ventana de succión del venterol.
5. Para temperaturas mayores a 900°C es necesario abrir la ventana de succión del venterol entre el 50 y el 75 %.

6. La presión óptima de presión del gas es de 1 Bar.
7. Con un diámetro del orificio de evacuación de 30 mm, el horno tiende a apagarse, por lo que, el diámetro del orificio de evacuación fue diseñado y construido en 50 mm.
8. La temperatura máxima en el exterior del horno asciende hasta los 40 °C cuando el horno en su interior tiene aproximadamente 1000°C, lo cual corrobora los datos de diseño teóricos.
9. Dentro del horno el gradiente de temperatura entre la cara interior del ladrillo refractario tiene una reducción de temperatura de un 69%, las diferencias de temperaturas a través de la fibra de aislamiento tiene una reducción aproximada del 80 %, lo que quiere decir que el sistema de aislamiento utilizado concuerda con las exigencias teóricas.
10. La emisión de calor a través del ducto de la chimenea se disipa a una altura de 1.5 m sobre el filo de la chimenea a una temperatura promedio de 40 °C,



lo cual indica que el horno puede funcionar en ambientes con una altura de techo hasta de 3 metros de altura. En todo caso la recomendación es ubicar al horno en un ambiente que tenga una ventilación media.

#### **RECOMENDACIONES.-**

1. Se recomienda trabajar por lo menos con dos personas adiestradas, para la utilización del prototipo.
2. Llevar ropa y zapatos adecuados para trabajos de laboratorio.
  - a. Utilizar guantes y mandil
  - b. Utilizar gafas o máscara protectora.
  - c. Tener a la mano extintor de incendios.
3. Se debe realizar un mantenimiento planificado del horno en las siguientes partes:
  - a. Válvulas de presión
  - b. Quemador
  - c. Cámara de combustión (mampostería de las paredes)
  - d. Sistema de elevación de la tapa
  - e. Recubrimiento de la tapa (aislamiento térmico).
4. Para la operación del horno es necesario seguir una secuencia descrita posteriormente, la cual puede constituir un manual preliminar de operación aplicable a una futura comercialización :

- a. conectar el tanque del gas a la manguera de alimentación y situarlo a una distancia prudencial que da la longitud de la manguera.
  - b. Fijar en la válvula reguladora de presión mínimo 0.5 Bar.
  - c. Abrir ligeramente la válvula de alimentación del gas y encender la flama.
  - d. Abrir la válvula de alimentación de gas  $\frac{1}{4}$  de vuelta y encender el venterol con la ventana de succión de aire cerrada.
  - e. Colocar el crisol con el material a fundir.
  - f. Cerrar la tapa y dejar funcionar al horno durante 15 minutos para homogenizar la temperatura interior y contar el tiempo necesario para fundir el metal que de acuerdo al proceso experimental de pruebas es de 20 minutos para fundir aluminio, y de 45 a 50 minutos para fundir cobre.
  - g. Con el horno funcionando abrir la tapa y extraer el crisol para el colado, esto con el propósito de mantener por más tiempo la temperatura en el crisol.
  - h. Para apagar el horno se debe cerrar primeramente la alimentación del gas y luego apagar el venterol.
  - i. Cerrar la tapa del horno y dejarlo enfriar naturalmente.
5. Para mejorar el sistema de funcionamiento del horno se debe proponer la automatización del sistema de encendido y del control de temperatura, así como el uso de métodos de adquisición de datos para las medidas de las temperaturas en las diferentes partes constitutivas del horno.

## BIBLIOGRAFÍA

Kutz, Meyer. Enciclopedia de la MECANICA: Ingeniería y Técnica. Pedro Basurto, 1ra. edición. Grupo Editorial Océano: Barcelona, 1990.

Waganoff, Nicolas. Hornos Industriales. 1ra. edición. Editorial Librería Mitre: Buenos Aires, 1963.

Gingery, David. Building a Gas Fired Crucible Furnace. Lindsay Publications: Bradley, 1987.

Norton, Robert. Diseño de Máquinas. Pablo Roig, 1ra. edición. Prentice Hall Hispanoamericana S.A.: Naucalpan, México, 1999.

Manrique, José. Transferencia de Calor. 1ra edición. Editorial Jharla S.A: México, 1976.

### Otros

Grupo Böhler. Manual de Aceros Especiales. 1999.

LA LLAVE S.A, Catálogo UNIFRAX. Brazil.

