

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL
PARA ALEACIONES NO FERROSAS**

PRESENTADO POR:

EVELIN YESENIA FLORES GARCÍA

ROBERTO ENRIQUE ORELLANA NÚÑEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL
PARA ALEACIONES NO FERROSAS**

Presentado por :

**EVELIN YESENIA FLORES GARCÍA
ROBERTO ENRIQUE ORELLANA NÚÑEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, septiembre de 2014

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

DR. Y M.SC. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

A mi hermana **Lisette García**, porque su apoyo ha sido y será siempre el motivo más grande que me ha impulsado para lograr esta meta, por haber significado el ejemplo y mi inspiración para terminar mi formación profesional, por ser mi compañera de alegrías y tristezas, mi fiel testigo de triunfos y mi gran apoyo en días de soledad, por ser simplemente mi cómplice de sueños y éxitos sin fin, por todo el cariño, aliento y estímulo brindado en el transcurso de mi existir.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y María Auxiliadora por darme la fortaleza, la capacidad y la sabiduría durante todo este tiempo.

A mi hermana Lisette Orbelina García por su apoyo y amor incondicional.

Al Ing. Wilson Yanes por estar siempre allí en los momentos más importantes de mi vida hasta el día de hoy, por haber sido mi más fiel compañero de sueños.

A todas las personas que colaboraron en este trabajo de graduación especialmente a Don Alcides Cabezas por su asesoría y conocimientos compartidos, así como también al resto del equipo de mantenimiento rio soto por todo su apoyo en la construcción del horno y demás colaboradores en las diferentes etapas del proyecto que contribuyeron para que este proyecto llegara a buen término, infinitas gracias.

A mi mejor amiga Ada Rivera por su amistad incondicional que siempre me brindo en todo el proceso de mi carrera.

A mi compañero de tesis Roberto Orellana por compartir las experiencias vividas durante todo el proceso.

A mis compañeros y docentes de la especialidad.

A mi asesor Jonathan Ortiz por su atención y ayuda en el proceso de investigación.

Evelin Yesenia García

DEDICATORIA

Para mi Creador y Padre Jehová por darme sabiduría, capacidad mental y paciencia para terminar mi carrera. A mis padres Ruddy Orellana y Cecilia de Orellana, a mis tías Hilda de Garay y Gloria Orellana por ser un pilar fuerte en mis logros académicos, brindarme el apoyo necesario para alcanzar la titánica meta y nunca desistir en sus esfuerzos para darme apoyo cuando más lo he necesitado.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su paciencia y atención. Por su gran muestra de amor al apoyarme incondicionalmente hasta el fin de mi carrera y más allá

A mi familia por estar pendiente de mí y echarme una mano cuando más lo he necesitado.

A mi compañera de tesis Evelin García, por ser una persona confiable; por su trabajo diligente y responsable, y por ser el motor que llevó a feliz término este trabajo de graduación.

A mis amigos y hermanos espirituales que me han brindado su hombro, palabras de aliento y ánimo, y por compartir conmigo las tristezas y alegrías en esta carrera.

A todas las personas involucradas que voluntariamente hicieron posible la culminación de esta tesis, que hicieron propio este trabajo y que sin su asesoría y apoyo técnico no podría haberse realizado.

Al Dr. Jonathan Berríos Ortiz por darnos la oportunidad, las asesorías y las ideas para realizar algo que será un legado para los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Roberto Enrique Orellana Núñez

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HORNO DE CRISOL PARA ALEACIONES NO FERROSAS

Evelin Yesenia Flores García & Roberto Enrique Orellana Núñez

RESUMEN

Se ha realizado un diseño y construcción de un horno de crisol con fines didácticos y de investigación, el cual es un equipo para la fusión de aleaciones no ferrosas. En este horno el metal que se fundirá se encuentra en el interior de un crisol fabricado de grafito. Este crisol se posiciona en el interior de la cámara de combustión cilíndrica, que a su vez está formada internamente por un revestimiento refractario y externamente por una carcasa de lámina de acero. El diseño del horno condujo a un horno compacto de ~500 mm de altura y ~500 mm de diámetro. La potencia mínima requerida por el horno para fundir una carga de una aleación de aluminio, determinó mediante un análisis termodinámico, dando un valor de 12.50 kW (42.550 BTU/h). Con lo cual se obtuvo un estimado de consumo de gas propano de 1.49 lb/h; es decir, un cilindro de 100 lb de gas puede durar 67 horas de operación. Este horno opera independiente de una conexión eléctrica y es amigable con el medio ambiente; es decir, opera con un quemador atmosférico, el cual fue seleccionado y adquirido. Finalmente, se realizó el curado del material refractario del horno y se comprobó el funcionamiento mediante la fusión de una carga de aluminio en el cual se pudo corroborar la efectividad del diseño ya que el tiempo para obtener la temperaturas con el fin de fundir la carga se aproxima a la obtenida en el cálculo de eficiencia energética del horno.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	2
1.1. Antecedentes históricos.....	2
1.2. Tipos de hornos	4
1.3. Definición del horno de crisol.....	5
1.3.1. Horno de crisol estacionario.....	7
1.3.2. Hornos basculantes.....	8
1.4. Materiales no ferrosos	9
1.4.1. Clasificación de los metales no ferrosos	10
1.5. Materiales refractarios	24
1.5.1. Tipos de refractarios.....	25
1.5.2. Criterios de selección para refractarios	35
1.6. Sistema de suministro de energía: el quemador.....	36
1.6.1. Reacción de combustión	36
1.6.2. Llama	39
1.6.3. Poder calorífico	40
1.6.4. Principios de funcionamiento del quemador.....	41
1.7. Conservación del calor dentro del horno	45
1.7.1. Efecto del aislante térmico en la temperatura de los refractarios ..	48
1.8. Proceso de fundición	50
1.9. Crisol.....	51
1.9.1. Manejo de crisoles	54
1.9.2. Instalación del crisol.....	56
1.9.3. Instalación del quemador	57
1.9.4. Pre calentamiento y curado del crisol.....	58
1.9.5. Carga del crisol	59
1.9.6. Fundentes, desgasificadores y modificadores.....	60
1.9.7. Vaciado	61
1.10. Construcción y mantenimiento del horno de crisol	62
1.10.1. Curado del concreto refractario y sus cuidados	62
1.10.2. Preservación de la vida del refractario	64

1.10.3. Pintura de alta temperatura.....	66
2. DISEÑO DEL HORNO DE CRISOL.....	68
2.1. Consideraciones de diseño.....	68
2.2. Parámetros de diseño.....	69
2.3. Dimensiones del horno	70
2.4. Requerimientos energéticos	73
2.4.1. energía requerida para llevar a cabo la fusión del metal.....	73
2.4.2. Pérdidas al ambiente.....	75
2.4.3. Potencia del quemador	92
2.4.4. Tiempo de pre-calentamiento del horno.....	93
2.4.5. Sistema de transporte de gas.....	95
2.5. Sistema de sostén estructural.....	101
3. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL HORNO DE CRISOL.....	104
3.1. Elaboración de moldes	104
3.2. Vaciado y fraguado del concreto refractario	110
3.3. Ensamble de partes	116
4. EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO	122
4.1. Condiciones iniciales de operación.....	122
CONCLUSIONES	126
RECOMENDACIONES	128
REFERENCIAS	129
ANEXOS	132

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig.1.1. Espada, típica de la edad de bronce, elaborada en cobre arsenical y en molde de dos partes. Notar la luz en el filo de la espada que concordaba con la unión de las partes del molde [ASM Handbook – Vol. 15, Casting].....	3
Fig.1.2. Versión típica de un horno estacionario con crisol removible especialmente hecho para la fundición de pequeñas cantidades de bronce (<300 lb).....	6
Fig.1.3. Crisoles de grafito utilizados en hornos de crisol.	7
Fig.1.4. Horno de crisol estacionario.	8
Fig.1.5. Horno de crisol basculante: (a) Eje en el centro de gravedad, y (b) Eje a nivel de la boquilla.	10
Fig.1.6. Clasificación de los metales no ferrosos.	11
Fig.1.7. Esquema de producción de aluminio por el método Bayer.	13
Fig.1.8. Propiedades mecánicas en función de la pureza del aluminio.	17
Fig.1.9. Esquema de extracción de cobre.	21
Fig.1.10. Diferentes formas de materiales prefabricados.	25
Fig.1.11. Ladrillos refractarios de arco.	25
Fig.1.12. Mezcla monolítica (Concreto refractario Ultra-70).	29
Fig.1.13. Diferentes tipos de llama en un mechero Bunsen [Wikipedia – Flame 2014].	40
Fig.1.14. El esquema es un corte transversal del quemador: Muestra los elementos del quemador de gas atmosférico empleado: 1) Válvula de paso, 2) Boquilla, 3) Ingreso primario de aire, 4) Tubo mezclador y 5) Difusor.	42
Fig.1.15. Las pinzas deben encajar perfectamente en el crisol y agarrarlo por la parte inferior.	62
Fig. 2.1. Dimensiones de referencia del crisol.	70
Fig. 2.2. Diagrama que muestra el diámetro interior y exterior del horno (cotas en mm). Notar las diferentes capas que conforman el recubrimiento.	72
Fig. 2.3. Esquema de un corte transversal del horno que muestra las dimensiones básicas de este, cotas en mm.	74
Fig. 2. 4. Diagrama que ilustra la transferencia de calor por las paredes del horno.	77
Fig. 2.5. Área efectiva de transferencia de calor de la tapadera y la cubierta. El color gris oscuro representa el contacto tapadera-cubierta y el gris claro únicamente la cubierta.	82
Fig. 2.6. Esquema de la trayectoria supuesta de los gases de escape al salir del horno de crisol. Notar las líneas rojas, las cuales representan las superficies calientes en contacto directo con los gases.	82

Fig. 2.7. Esquema de la trayectoria supuesta de los gases de escape al salir del horno de crisol. Notar las líneas rojas, las cuales representan las superficies calientes en contacto directo con los gases.	84
Fig. 2.8. Diagrama de transferencia de calor para el fondo del horno.	89
Fig. 2.9. Temperaturas esperadas para 3 horas de funcionamiento. Notar que según la gráfica, el horno alcanza la temperatura de fusión del aluminio en 30 mins.	97
Fig. 2.10. Distribución de temperaturas a través del horno para tiempos diferentes: a) 0 s, b) 1800 s, c) 3600 s, d) 5400 s, e) 7200 s, f) 9000 s, g) 10080 s. Por simetría la otra mitad tiene la misma distribución de temperaturas.	98
Fig. 2. 11. Circuito de gas para el quemador: 1) Quemador de ½ pulg, 2) Válvula de bola, 3) Manómetro, 4) Válvula reguladora de presión y 5) Tanque de gas propano con válvula de seguridad.	101
Fig. 2. 12. Vista lateral e inferior de la cubierta. Notar que se presentan las placas de fijación que sostendrán al conjunto. Las placas estarán soldadas a la carcasa.	102
Fig. 2.13. Función de los agarraderos de cubierta es permitir levantar la cubierta de manera segura, incluso pueden utilizarse una barra cuadrada sostenida por dos personas insertada en los agarraderos para que sea más seguro levantarla cuando el horno está en operación.	103
Fig. 3.1. Desarrollo de materiales para moldes y carcasa de horno de crisol: (a) Base de carcasa, (b) Aro guía de cubierta, (c) Pieza superior de cubierta, (d) Pieza lateral de cubierta, (e) Pieza lateral de carcasa, (f) Pieza lateral exterior de molde de pared refractaria, (g) Pieza lateral interior de molde de pared refractaria, y (h) Base de molde de pared refractaria.	105
Fig. 3.2. Molde utilizado para el fraguado y vaciado del concreto refractario correspondiente a las paredes del horno: (a) Vista superior de molde, (b) Vista lateral de molde y (c) Colocación de crucetas en el cilindro interior del molde.	106
Fig. 3.3. Perforación del orificio para la colocación del quemador: (a) Corte de orificio de quemador, y (b). Orificio en pared exterior de molde (c) Molde finalizado con orificio de quemador.	107
Fig. 3. 4. Colocación de malla: (a) Colocación de malla en interior de molde. (b) Molde finalizado con malla colocada en el interior mediante pines.	108
Fig. 3. 5. Molde para la tapa del horno.	108
Fig. 3.6. Molde para base de horno.	109
Fig. 3.7. Molde para base de crisol.	109
Fig. 3.8. Carcasa de cubierta de salida de gases.	109
Fig. 3.9. Colocación de tubo para salida de gases.	109
Fig. 3.10. Materiales y herramientas utilizados en el proceso de fraguado. ...	111

Fig. 3.11. Materiales utilizados para preparación de mezcla: (a) Recipiente utilizado para mezcla de concreto refractario, (b) Recipiente utilizado para medir el agua requerida y (c) Concreto utilizado para la elaboración de piezas refractarias.	112
Fig. 3.12. Fig. 3.14. Colocación de tubo para quemador: (a) Vista lateral de molde y (b) vista superior de molde.	112
Fig. 3.13. Piezas de horno recién vaciadas. (a) Mezcla vertida en molde de paredes del horno y (b) mezcla vertida en molde de tapa de horno.....	113
Fig. 3.14. Desmoldeo de paredes de horno: (a) Mediante disco de corte se corta el molde para retirarlo, (b) molde listo para ser retirado y (c) extracción de tubo de orificio para quemador.	113
Fig. 3.15. Piezas desmoldadas listas para ser resanadas: (a) paredes del horno. (b) base de horno.....	114
Fig. 3.16. Aplicación de capa de concreto refractario para resanar imperfecciones en las piezas y mejor el acabado superficial: (a y b) aplicación de mescla y (c) piezas resanadas.....	115
Fig. 3.17. Base de horno acoplada a cilindro base de crisol.	116
Fig. 3.18. Paredes del horno.	116
Fig. 3.19. (a)Estructura principal de horno de crisol conformada por las piezas de concreto refractario de la base de horno, base de crisol y paredes de horno. (b) Vista superior de la estructura principal donde se puede observar la base del crisol y las paredes perfectamente acopladas.....	117
Fig. 3.20. Elaboración de carcasa de horno. (a) Forjado de lámina, (b) Cilindro soldado para carcasa de horno y (c) estructura refractaria principal introducida en carcasa.....	117
Fig. 3.21. Proceso de colocación de fibra entre carcasa y estructura de concreto refractario principal formando la estructura final.....	118
Fig. 3.23 Estructura final de horno antes de la colocación de la tapa.	119
Fig. 3.22. Tapa refractaria colocada sobre estructura final de horno.	119
Fig. 3.24. Colocación de pestaña en carcasa de horno para cerrar la estructura.	119
Fig. 3.25. Cubierta o tapa del horno. (a) Fabricación de cubierta para salida de gases del horno, (b) cubierta rellena con fibra cerámica y (c) colocación de agarraderas en cubierta de horno.	120
Fig. 3.26. Proceso de pintado de horno.	121

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Propiedades y costos de aleaciones no ferrosas más utilizadas.....	14
Tabla 1.2. Efectos de los maquinados de endurecimiento en el aluminio y sus aleaciones..	14
Tabla 1.3. Resumen de las características físicas del aluminio.	15
Tabla 1.4. Propiedades de tracción en función del % de trabajo en frío en un aluminio con 99.999% de pureza.	16
Tabla 1.5. Propiedades mecánicas del aluminio puro a temperatura ambiente.....	17
Tabla 1.6. Intervalo de composición química y temperatura típica de operación para las diferentes clases de ladrillos de arcilla refractaria	26
Tabla 1.7. Propiedades típicas de los refractarios.	28
Tabla 1.8. Propiedades físicas de materiales aislantes.....	32
Tabla 1.9. Operación continua recomendada para diferentes composiciones de fibras cerámicas.....	32
Tabla 1.10. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiométrica de algunos combustibles.....	38
Tabla 1.11. Algunos límites de inflamabilidad para gases comunes	43
Tabla 1.12. Formas comunes de crisoles para fundir metales.	53
Tabla 1.13. Recomendaciones de almacenamiento y transporte del crisol....	55
Tabla 1.14. Instalación correcta del crisol dentro de cámara de horno.	56
Tabla 1.15. Instalación correcta del quemador y recomendaciones de operación.....	57
Tabla 1.16. Proceso de carga de material en el crisol.....	59
Tabla 2.1. Parámetros de diseño para el horno de crisol.....	69
Tabla 2.2. Pérdida de calor para diferentes espesores de cubierta.	87
Tabla 2.3. Temperaturas esperadas en la cubierta del horno.	87
Tabla 4.1. Valores operativos registrados en la 1era. Operación del horno..	122
Tabla 4.2. Resultados del análisis de gases de escape del horno.....	123

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de graduación **Diseño y construcción de un horno de crisol para materiales no ferrosos** tiene como finalidad que éste sea didáctico, funcional y económico. Para ello se realizó una investigación bibliográfica exhaustiva en la cual se obtuvo un panorama de los requerimientos del trabajo de graduación. Se podría decir, que este trabajo ha resultado ambicioso pues ha requerido una gran cantidad de tiempo, recursos y energías. Sin embargo, con el fin de poder beneficiar a los futuros estudiantes y servir como fundamento para una posterior construcción de una planta piloto de fundición, se procedió a realizar el trabajo a pesar de las implicaciones.

En el diseño y construcción del horno se pusieron en práctica muchos de los conocimientos adquiridos a través de los años cursados en la Universidad, en especial en el área de ingeniería mecánica. Desde el análisis termodinámico del horno hasta la elaboración de la base que lo sustenta y puede desplazarlo, todo ello exitoso y resultado de la aplicación correcta de la base teórica.

Es importante destacar que hubo ciertas habilidades que tuvieron que adquirirse y aprenderse, como de igual manera, hubo personas con vasta experiencia en el área que brindaron su ayuda y asesoría. Al respecto, el éxito y la eficiencia con que se desarrolló el trabajo fueron maximizadas.

Así, con este trabajo de “diseño y construcción de un horno de crisol para materiales no ferrosos” se pone de manifiesto el deseo de los estudiantes de ingeniería mecánica, por realizar trabajos funcionales y beneficiosos para la Escuela de ingeniería mecánica y para la sociedad salvadoreña.

1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se presentan las consideraciones generales que se deben de tomar en cuenta para el proceso constructivo de un horno para fundición de metales no ferrosos; para lo cual se requiere del conocimiento previo de qué fundir y cómo fundir, es necesario poseer un panorama de los metales a ser fundidos, sus propiedades, aleaciones y usos. Así también conocer los elementos constructivos, el procedimiento adecuado para emplearlos y mantenerlos, y los distintos tipos disponibles en el mercado. Por lo tanto, en las secciones siguientes se introduce al lector en estos temas, como también se informa sobre las generalidades de los hornos, tipos de crisoles, mantenimiento de estos y todas aquellas consideraciones necesarias que la metalurgia, en este tipo de hornos, ha conllevado.

1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En Centroamérica, durante la época de la colonia, la técnica de fundición fue mayormente utilizada para la elaboración de herramientas, armas, elementos decorativos, etc., la forja y la fundición dentro de este ámbito se han mantenido muy relacionadas una con la otra, pues el maestro fundidor tenía conocimientos de herrería y forja. En el siglo XX surgieron talleres de herreros forjadores y fundidores que brindaban este servicio para una creciente demanda de herramientas y elementos realizados por medio de estas técnicas [1].

En un primer momento de la fundición los moldes empleados eran de piedra, donde se tallaba la figura del elemento a elaborar. Para aquel entonces, el nivel alcanzado en el tallado en piedra permitía trabajos muy finos. Posteriormente se avanzó a la edad de bronce donde se empezaron a emplear técnicas para mejorar la solidez del metal fundido como también el uso de moldes compuestos por dos partes para elaborar piezas que tenían simetría

bilateral, para este último se procuraba que la luz del elemento fabricado concordara con el filo, al cual se le daba forma en el acabado (ver Fig. 1.1) [2].



Fig. 1.1. Espada, típica de la edad de bronce, elaborada en cobre arsenical y en molde de dos partes. [ASM Handbook – Vol. 15, Casting].

Al referirse a los metales fundidos, mayormente se encuentra el manejo del plomo y aluminio y en algunos casos bronce por ser metales que requiere de una temperatura inferior o igual a los 1000 °C, temperatura que estos artesanos podían alcanzar sin ningún problema. Hoy en día el oficio de la fundición y los talleres dedicados a esta técnica son escasos, debido a diversos factores que han impedido que se mantenga vigente en una época donde muchos oficios se ven afectados por la industrialización, que brinda los mismos servicios con costos más bajos. En El Salvador la fundición se desarrolló en un ámbito más enfocado a la industria, empresas como SARTI. S.A. y CORINCA S.A. han desarrollado la fundición de metales a escala macro, mientras que la empresa Torogoz ocupa los métodos de fundición para reproducir placas, trofeos y figuras decorativas [1].

Con el creciente desarrollo de la industria del reciclaje en el país y el alto costo al que se cotizan los metales no ferrosos se ve un crecimiento bastante considerable en este rubro de la industria, no así en el tema de fundición de este tipo de materiales, a pesar que presentan una baja temperatura de fusión y

que con poco inversión se podría instalar una planta de fundición de este tipo de metales.

En la actualidad, la fundición se ha situado como uno de los procesos más prácticos para la elaboración de piezas de gran complejidad en cualquier metal. Virtualmente, cualquier metal que puede ser fundido puede ser vertido en un molde para tomar la forma impresa en este. En términos de valor y volumen en la industria metalúrgica, la fundición se ve superada únicamente por el acero rolado. Anualmente, solo en Estados Unidos, más de 3000 instalaciones fundidoras producen de 12 a 14 millones de toneladas de fundición en las variedades ferrosas y no ferrosas. El valor anual de los productos de fundición se estima que se acerca a los \$20 billones [2].

1.2. TIPOS DE HORNOS

Cuando se habla sobre los hornos, se puede referir a una cantidad y tipos de sistemas diferentes, en la presente investigación se presenta un acercamiento teórico a la fundición de metales, en la cual se ha de mencionar las distintas clases de hornos que existen.

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y diseño. Estos varían desde los pequeños hornos de crisol que contienen unos pocos kilogramos de metal a hornos de hogar abierto de hasta varios centenares de toneladas de capacidad. El tipo de horno usado para un proceso de fundición queda determinado por los siguientes factores:

- Necesidades de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a la temperatura de vaciado requerida (ahorro de energía y de tiempo);
- La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición (control de calidad);
- Producción requerida del horno(productividad y economía);

- El costo de operación del horno (productividad y economía); y
- Interacción entre la carga, el combustible y los productos de la combustión.

Los tipos de hornos que se usan en un proceso de fundición son:

- Hornos de crisol (estacionario y basculante),
- Horno eléctrico,
- Horno de inducción,
- Horno de arco eléctrico, y
- Horno de cubilote.

La aplicación de cada uno de estos hornos depende de factores como: cantidad de volumen a fundir, tipo de materiales a fundir, capacidad económica, tipo de industria, etc. [2].

1.3. DEFINICIÓN DEL HORNO DE CRISOL

De manera sencilla un horno de crisol no es más que una recámara a la cual se le suministra energía, almacena calor y promueve la transferencia de este a un metal contenido en un recipiente conductor del calor y resistente a la acción del metal y a las altas temperaturas denominado crisol, el cual permite fundir el metal en su interior para luego ser vertido a un molde previamente preparado [2].

Los hornos de crisol trabajan por combustión de un elemento como el gas el cual calienta el crisol que contiene el metal fundido. También, puede ser calentado usando energía eléctrica: horno de inducción; en la Fig.1.2 se puede observar un modelo de horno de crisol removible [3 y 4].

El crisol se apoya sobre la base que está hecha también en material refractario y le da la posición necesaria con respecto a la salida del gas [2, 3].

Para lograr concentrar el calor alrededor del crisol este está contenido entre unas paredes refractarias que generan una cavidad para el flujo de los gases de combustión [2 y 3].

El crisol es un recipiente que se coloca dentro de los hornos para que reciba el metal fundido. Normalmente está hecho de grafito con cierto contenido de arcilla y puede soportar materiales a altas temperaturas (ver Fig. 1.3), como el bronce fundido, o cualquier otro metal, normalmente a más de 500 °C [2].

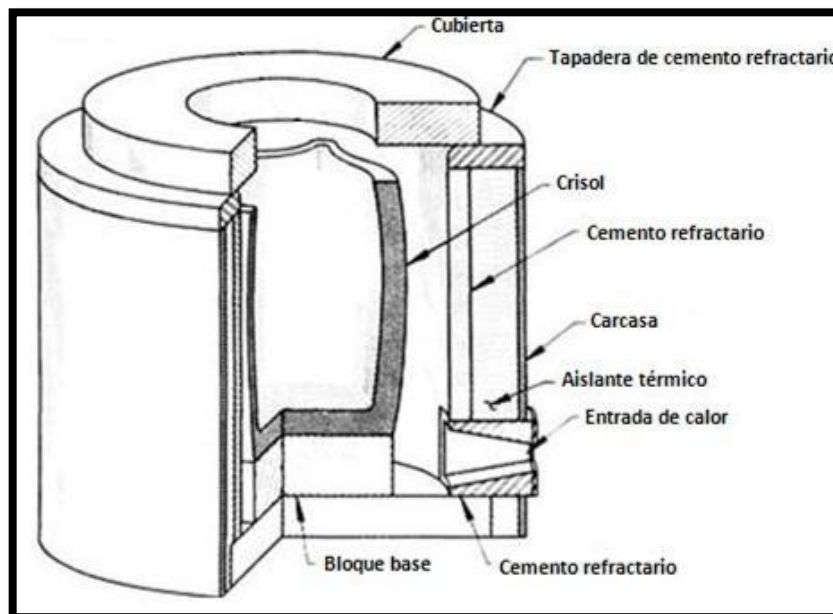


Fig. 1.2. Versión típica de un horno estacionario con crisol removible especialmente hecho para la fundición de pequeñas cantidades de bronce (<300 lb).

En la actualidad los hornos de crisol ofrecen a la industria una gran flexibilidad y una amplia variedad de opciones con respecto al tipo de metal a fundir, reducción y refinación de metales, el tamaño de la fundición, combustibles y técnicas de procesamiento. Aluminio, latón, bronce, cobre, hierro gris y dúctil, acero, magnesio, monel, níquel, aleaciones refractarias, y otras aleaciones y metales han podido ser elaborados utilizando hornos de crisol. La capacidad del crisol puede variar de apenas unas cuantas onzas para fundiciones de laboratorio hasta 1400 kg (3000 lb) para la fundición de

aleaciones de aluminio. Entre las opciones para el combustible figuran el carbón, coque, gases comerciales (natural, propano, etc.) y combustibles oleosos; y también existen hornos de crisol eléctricos [2].

El horno de crisol puede ser usado, a su vez, como un componente del conjunto de equipos para ajustar la calidad entre el horno fundidor y el de colada, para modificar la composición química y la temperatura del baño que benefician al control de defectos como el contenido de poros antes de la colada. La fundición en crisol es un proceso simple y flexible, generalmente los hornos pueden encenderse o apagarse en cualquier momento [2].



Fig. 1.3. Crisoles de grafito utilizados en hornos de crisol [5].

Existen dos tipos de hornos de crisol más utilizados los cuales se pueden definir de la siguiente manera:

1.3.1. HORNO DE CRISOL ESTACIONARIO

Es un tipo de horno cuya característica es que el crisol puede removerse del horno para verter el material fundido en los moldes o se extrae de este mediante cucharones (ver Fig.1.2). Si se trata de un crisol removible se pueden utilizar pinzas y cargadores para levantar y trasladar el crisol hasta los moldes para efectuar la colada, de esta manera se evita la necesidad de transferir el

metal fundido a otro contenedor, esto es beneficioso porque se evita el daño potencial del metal en la transferencia. Los hornos de crisol estacionarios son simples, prácticos y fáciles de construir (ver Fig. 1.4).



Fig. 1.4. Horno de crisol estacionario. [<http://pe.clasificados.com/venta-de-hornos-para-fundicion-e-insumos-104784>]

1.3.2. HORNOS BASCULANTES

Son hornos movibles apoyados sobre un sistema de sustentación. La ventaja aparente que otorga el horno de crisol basculante es la capacidad que tiene este de extraer el metal fundido con mayor facilidad sin la necesidad de exponer a los operarios al calor proveniente de la cámara del horno. Sin embargo, se requiere la fabricación de una base especial, lo suficientemente resistente para soportar el peso del crisol y un sistema que permita el control del giro del horno.

Usualmente se les utiliza cuando es necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada. El metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado, con la excepción de casos

especiales en que es vaciado directamente en los moldes. Un tipo de horno basculante, con capacidades de 70 a 750 kg de latón, bascula en torno a un eje central (ver Fig. 1.5a). Su desventaja es que el punto de descarga acompaña el movimiento basculante. Para superar este inconveniente se desarrolló un horno basculante de eje en la piquera, con capacidad de 200 a 750 kg de latón, y el modelo moderno es basculado por pistones hidráulicos, otorgando la ventaja de un mayor control en la operación de vaciado (ver Fig. 1.5b) [2].

1.4. MATERIALES NO FERROSOS

Los metales no ferrosos son aquellos en cuya composición no se encuentra el hierro. Los más importantes son siete: cobre, zinc, plomo, estaño, aluminio, níquel y magnesio. Existen otros elementos que con frecuencia se fusionan con ellos para preparar aleaciones de importancia comercial. También se tienen alrededor de 15 metales menos importantes que tienen usos específicos en la industria. Los metales no ferrosos se clasifican en tres grupos: Pesados: son aquellos cuya densidad es igual o mayor que 5 kg/dm^3 . Ligeros: su densidad está comprendida entre 2 y 5 kg/dm^3 . Ultraligeros: su densidad es menor que 2 kg/dm^3 .

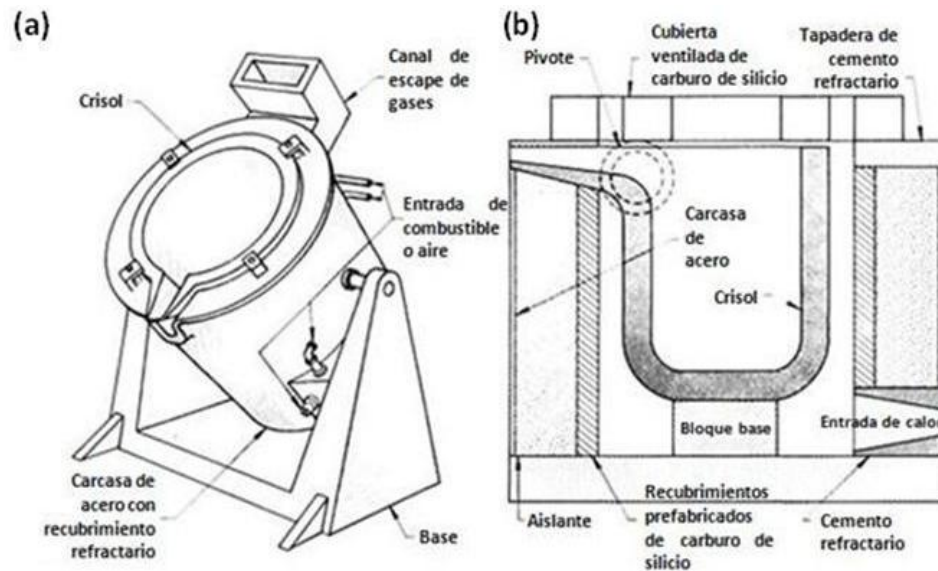


Fig. 1.5. Horno de crisol basculante: (a) Eje en el centro de gravedad, y (b) Eje a nivel de la boquilla [2].

1.4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS METALES NO FERROSOS

Dependiendo de sus características, estos materiales sustituyen con ventaja a los derivados del hierro en múltiples aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, su proceso de fabricación o fundición resultan más costosos debido a diversas razones, entre las que destacan las siguientes:

- La baja concentración de algunos de estos metales es la corteza terrestre;
- La energía consumida en los procedimientos de obtención, y afino, ya que, la mayoría de los casos, se trata de procesos electrolíticos para los que se emplea energía eléctrica; y
- La demanda reducida, que obliga a producirlos en pequeñas cantidades.
- Pueden clasificarse de acuerdo a su densidad, esta clasificación se presenta en la figura siguiente (ver Fig. 1.6):

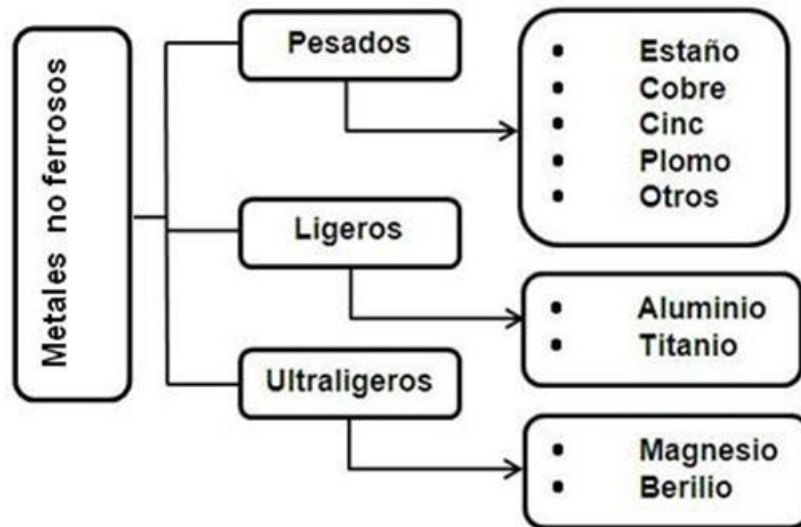


Fig. 1.6. Clasificación de los metales no ferrosos [2].

Los metales no ferrosos de mayor aplicación industrial son el cobre y sus aleaciones, el aluminio y sus aleaciones, el plomo, el estaño y el cinc. Otros como el mercurio y el tungsteno, se aplican en ámbitos industriales muy específicos.

Los demás metales casi nunca se emplean en estado puro sino formando aleaciones, como son para este caso el níquel, cromo, titanio o manganeso.

EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

El aluminio fue aislado por primera vez en 1825 por el físico danés H.C. Oersted. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo costo de reciclado y su larga vida útil [6].

Como metal se extrae del mineral conocido con el nombre de bauxita, primero se transforma en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio mediante electrólisis, el esquema del proceso se presenta en la Fig. 1.7 [6].

Un factor de diseño es el costo del metal, el cual varía de manera considerable. Así, en la Tabla 1.1 se presentan para algunos metales los

precios aproximados, en el país. Sin embargo, se debe recordar que el precio del metal es solamente una pequeña parte del costo de un componente. Además, en el costo se incluyen la fabricación, comercialización, distribución y terminado [6].

El aluminio posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en las aplicaciones industriales de la ingeniería mecánica, tales como su baja densidad de 2.7 kg/m^3 y su alta resistencia a la corrosión. Mediante la aleación adecuada se puede aumentar considerablemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad, se maquina con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello, el aluminio es el metal que más se utiliza después del acero [6].

También, el aluminio responde satisfactoriamente a algunos mecanismos de endurecimiento. En la Tabla 1.2 se presentan las propiedades mecánicas del aluminio reconocido comercialmente como puro y de las aleaciones endurecidas mediante diversas técnicas. Unas aleaciones de aluminio pueden ser 30 veces más resistentes que el aluminio puro [6].

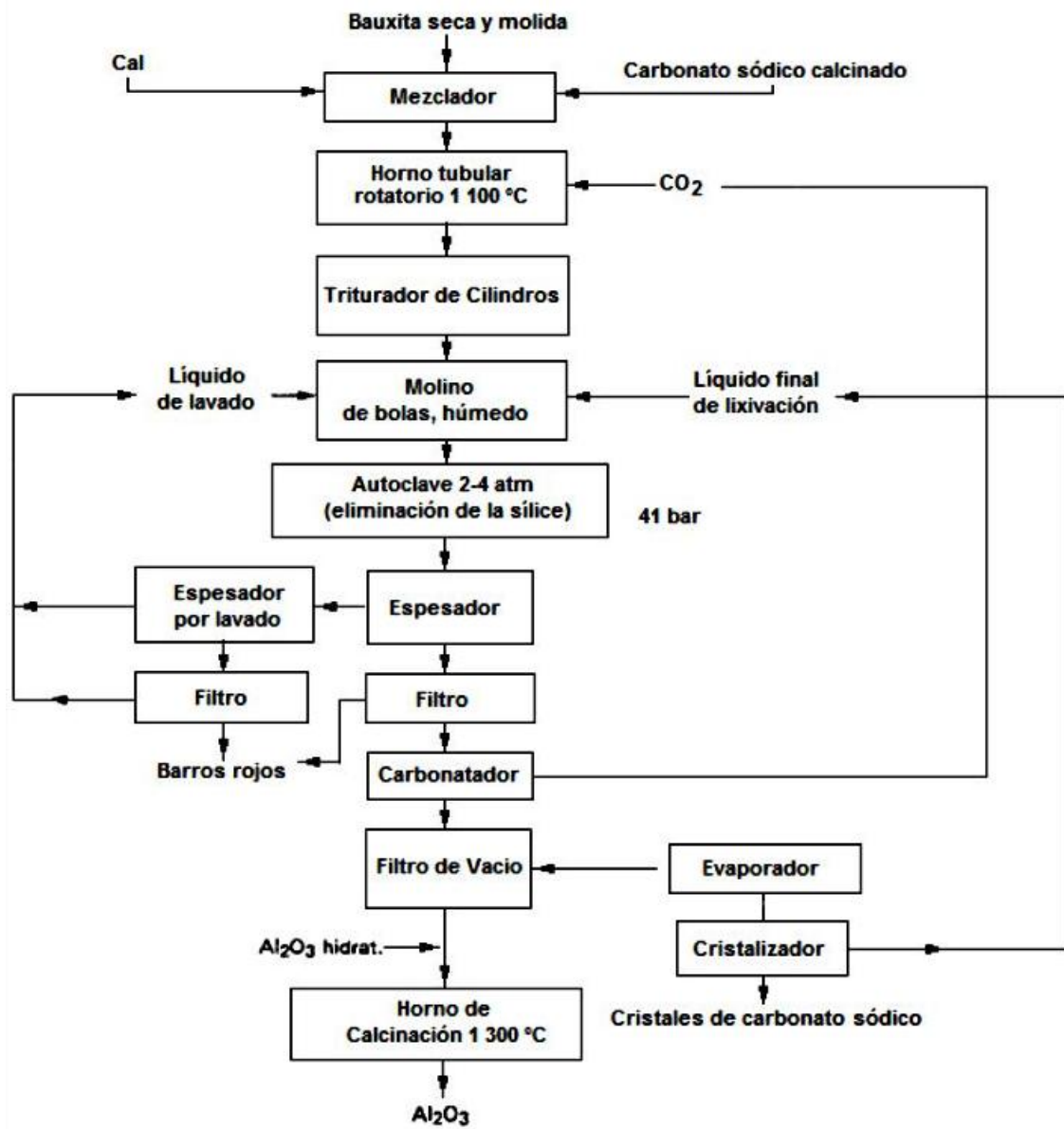


Fig. 1.7. Esquema de producción de aluminio por el método Bayer [6].

Tabla 1.1. Propiedades y costos de aleaciones no ferrosas más utilizadas [6].

Metal	Densidad		Resistencia a la tensión, psi	Resistividad, Ω /pulg	Costo por libra, \$
	g/cm ³	lb/pulg ³			
Aluminio	2.70	0.097	83,000	8.6×10^3	0.60
Berilio	1.85	0.067	55,000	8.2×10^3	300.00
Cobre	8.93	0.322	150,000	4.7×10^3	1.10
Plomo	11.36	0.410	10,000	0.2×10^3	0.35
Magnesio	1.74	0.063	55,000	8.7×10^3	1.40
Níquel	8.90	0.321	180,000	5.6×10^3	4.10
Titanio	4.51	0.163	160,000	9.8×10^3	5.50
Tungsteno	19.25	0.695	150,000	2.2×10^3	10.00
Zinc	7.13	0.257	75,000	2.9×10^3	0.55

Tabla 1.2. Efectos de los maquinados de endurecimiento en el aluminio y sus aleaciones [6].

Material	Resistencia a la tensión, psi	Esfuerzo de cedencia, psi	Elongación %	Límite elástico (aleación)
				Límite elástico (puro)
Aluminio puro	6,500	2,500	60	
Aluminio puro comercial	13,000	5,000	45	2.0
Aleación de aluminio endurecida por solución sólida	16,000	6,000	35	2.4
Aluminio trabajado en frío	24,000	22,000	15	8.8
Aleación de aluminio endurecida por dispersión	42,000	22,000	35	8.8
Aleación de aluminio endurecida por envejecimiento	83,000	73,000	11	29.2

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las propiedades físicas más importantes del aluminio son alta conductividad eléctrica y térmica, comportamiento no magnético y excelente resistencia a la corrosión. Este elemento reacciona con el oxígeno, incluso a temperatura ambiente, para poder producir una capa extremadamente delgada de óxido de aluminio que protege el metal interno de muchos entornos corrosivos [6].

Sin embargo, el aluminio no exhibe, un marcado endurecimiento, por lo que puede ocurrir falla por fatiga incluso a esfuerzos bajos. Debido a la baja temperatura de fusión, no trabaja bien a temperaturas elevadas. Finalmente, las aleaciones de aluminio tienen baja dureza, lo que conlleva a una baja resistencia al desgaste [6].

Tabla 1.3. Resumen de las características físicas del aluminio [6].

Propiedades	Valores
Color	Blanco-plata
Estructura Cristalográfica	Cúbica centrada en las caras
Parámetro reticular a 25 °C	0.40414 nm
Densidad a 20 °C	2.699 g/cm ³
Cambio volumétrico durante la solidificación	6.7%
Temperatura de fusión	660.2 °C
Temperatura de ebullición	2057 °C/ 2480 °C
Calor específico a 20 °C	930 J
Coeficiente lineal de expansión térmico x10 ⁶	23 (20-100 °C)
Conductividad térmica a 0 °C	209.3 W/m·K
Conductividad térmica a 100 °C	207 W/m·K
Resistividad eléctrica a 20 °C	2.69 μΩ·cm

En la Tabla 1.3 se presenta un resumen de las propiedades físicas más características del aluminio puro. Algunas de estas propiedades varían según el contenido de impurezas.

PROPIEDADES QUÍMICAS

Según el efecto que tienen los elementos aleantes sobre la resistencia a la corrosión del aluminio, éstos se pueden clasificar en:

- Elementos que la mejoran: cromo, magnesio y manganeso.
- Elementos que la disminuyen: cobre, hierro, níquel, estaño, plomo y cobalto.
- Elementos que tienen poca influencia: silicio, titanio, zinc, antimonio, cadmio y circonio [6].

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

Entre las características mecánicas del aluminio se tienen las siguientes:

- Fácil de maquinar.
- Muy maleable y dúctil, permite la producción de láminas muy delgadas y filamentos.
- Material blando (escala de Mohs: 2 a 3).
- Forma aleaciones con otros metales para mejorar las propiedades mecánicas.
- Permite la fabricación de piezas por fundición, forja y extrusión.
- Soldable [6].

En la Tabla 1.4 se presenta el cambio de las propiedades mecánicas del aluminio en función del porcentaje de trabajado en frío aplicado, para un aluminio con pureza del 99.999%.

Tabla 1.4. Propiedades de tracción en función del % de trabajo en frío en un aluminio con 99.999% de pureza [6].

Cantidad de trabajo en frío, %	Resistencia a la tracción, MPa	Resistencia a la fluencia, MPa	Elongación en 50 mm, %
0 (Recocido)	40-50	15-20	50-70
40	80-90	50-60	15-20
70	90-100	65-75	10-15
90	120-140	100-120	8-12

Las propiedades mecánicas del aluminio, varían de acuerdo a la pureza de éste, como se pueden observar en la Tabla 1.5 y en la Fig. 1.8.

Es importante destacar que una pequeña variación en el porcentaje de pureza del aluminio, influye en las propiedades de éste, si a esto se le agrega un tratamiento térmico o trabajado en frío, dicho esfuerzo cambiará significativamente [6].

Tabla 1.5. Propiedades mecánicas del aluminio puro a temperatura ambiente [6].

Pureza %	Esfuerzo de fluencia		Esfuerzo de tracción		Elongación en 50 mm, %	
	MPa	ksi	MPa	ksi		
99.99	10	1.4	45	6.5	50	65
99.80	20	2.9	60	8.7	45	55

CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

Las aleaciones de aluminio se pueden dividir en dos grupos de importancia para forja y para fundición, dependiendo de su método de manufactura. Las aleaciones para forja que se conforman mediante deformación plástica tienen composiciones y microestructura significativamente distintas de las creadas para fundición, lo cual refleja los distintos requerimientos del proceso de manufactura [6].

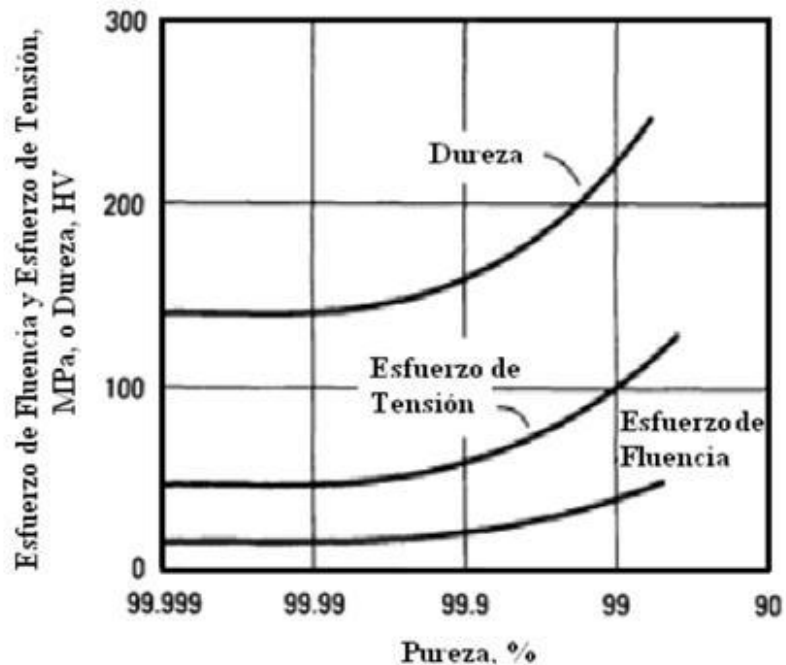


Fig. 1.8. Propiedades mecánicas en función de la pureza del aluminio.

FUNDICIÓN DE ALUMINIO

Las aleaciones de aluminio son en general las más manejables. El punto de fusión del aluminio puro es 600 °C por consiguiente, las temperaturas de vaciado para las aleaciones de aluminio son bajas comparadas con las de las fundiciones de hierro y acero. Las propiedades que hacen atractivas a estas aleaciones para la fundición son: su peso ligero, su amplio intervalo de propiedades de resistencia que se pueden obtener a través de tratamientos térmicos y su facilidad de maquinado [2].

Las piezas moldeadas de aleación de aluminio son económicas en muchas aplicaciones. Se utilizan tanto en las industrias automovilísticas, construcción de máquinas, aparatos y estructuras, como también utensilios de cocina, cubiertas y carcasas para equipos electrónicos, y en otras áreas [6].

La mayoría de los metales reaccionan con los gases oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, los tres de importancia principal en las operaciones de fusión ya que estos causan problemas de porosidad [2-4].

Seybolt y Burke (1969) reportaron que las aleaciones de aluminio presentan problemas de porosidad de gas, causada por el hidrógeno. También, estos autores, reportaron una técnica para reducir el contenido de hidrógeno, la cual consiste en permitir que el metal fundido se solidifique en el crisol antes de colarlo, expulsando luego el hidrógeno en exceso por límite de solubilidad en sólido [7].

Para la mayoría de los metales, la transformación desde el estado líquido al estado sólido se acompaña de una disminución en el volumen. En aleaciones de aluminio, la contracción volumétrica de solidificación comprende un intervalo de 3.5 al 8.5% [8].

Otro problema que presentan las aleaciones de aluminio es la fisuración en caliente la cual se origina durante la solidificación, cuando se produce la mayor cantidad de contracción y cuando la fundición es menos resistente a los esfuerzos impuestos por las limitaciones geométricas del molde. Este tipo de agrietamiento, es siempre inter granular y es una característica en cierta medida de todas las aleaciones de fundición [8].

Los problemas de fisuración en caliente pueden minimizarse mediante la selección apropiada del proceso de fundición, el diseño apropiado de moldes, control de la solidificación y el refinamiento de grano [8].

El diseño de moldes inadecuado es una causa frecuente de fisuración en caliente. Es importante evitar cambios bruscos de sección y ángulos o esquinas redondeadas a un radio inadecuado o fileteado [2].

Los moldes utilizados para fundir estas aleaciones de aluminio, son generalmente arena seca y otros materiales, tales como yeso y perfiles metálicos. La elaboración, la planificación y el control de la solidificación a través del molde diseñado son necesarios para lograr la estructura y solidez requeridas para suministrar piezas de fundición dentro de la especificación [2].

EL COBRE

El descubrimiento del cobre fue en el año 6000 a.C. La primera edad del cobre se inició en Egipto y fueron quienes lo extendieron a África y el Mediterráneo durante su colonización. Los egipcios aprendieron a utilizarlo y extraer los minerales, principalmente el oro. Posteriormente se descubrieron las aleaciones, la primera fue la del cobre con estaño, para producir bronce, hecho que tuvo gran trascendencia [1].

Los primeros trabajadores del cobre descubrieron que éste podía ser martillado y laminado con facilidad, para poder darle otras formas. Posterior al descubrimiento del bronce fue posible fundir gran variedad de piezas [1].

Durante la edad media se descubrieron las propiedades de corrosión del cobre, bronce y latón haciendo que éstos metales, además de su uso decorativo, tuvieran más usos funcionales [1].

Gran Bretaña fue el mayor productor de cobre durante un gran período del siglo XIX, lo cual alentó a otros países, como Estados Unidos y Chile, a la búsqueda de nuevos yacimientos [1].

Según la riqueza de los minerales empleados se pueden utilizar dos técnicas en el proceso de obtención de dicho cobre, las cuales son:

- La vía húmeda; se emplea cuando el contenido en cobre es bajo. Consiste en disolver el material con ácido sulfúrico y recuperar después el cobre mediante electrólisis.
- La vía seca; es la técnica más habitual de obtención de cobre bruto, pero solo se puede utilizar si la riqueza del mineral supera el 10%.

El mineral se somete a un proceso de trituración y molienda hasta reducirlo a polvo. Después, se procede a la separación por flotación del mineral de cobre: éste flota mientras la ganga se deposita en el fondo, en la Fig. 1.9 se puede observar un diagrama del proceso de extracción del cobre.

El mineral húmedo es sometido a un proceso de tostación en un horno; en este proceso se elimina el azufre y se forman óxidos de hierro y de cobre. A continuación, el óxido de cobre sufre un proceso de calcinación en un horno de reverbero. Los óxidos de hierro se combinan con la sílice y forman la escoria mientras se produce la mata blanca (sulfuro de cobre). La mata blanca se somete a un proceso de reducción en un convertidor similar a los empleados en siderurgia y se obtiene cobre bruto, mezclado con algo de óxido de cobre.

Afino: El proceso de afinado del cobre se lleva a cabo en dos fases: la fase térmica y la fase electrolítica.

- En la fase térmica, el cobre bruto se introduce en hornos especiales de afinación, en los que se reduce el óxido de cobre residual mediante gas natural. El cobre que sale del convertidor se vierte en moldes especiales para obtener las planchas que luego serán utilizadas como ánodo en la cuba electrolítica.
- En la fase electrolítica, se produce el afinado final. El ánodo procede de los moldes de la fase anterior, mientras que el cátodo está formando por finas planchas de cobre puro. Al pasar la corriente, el cobre bruto se disuelve y va colocándose sobre las planchas del cátodo. En el fondo de la cuba se depositan unos barros electrolíticos que contienen pequeñas cantidades de otros metales, como oro y plata, que pueden ser recuperados.

De este modo se consigue cobre electrolítico con una pureza superior al 99.85%.

Aplicaciones del cobre: Gracias a su elevada conductividad para el calor y la electricidad, uno de los principales campos de aplicación del cobre es la fabricación de recipientes como calderas, serpentines y alambiques (industria química).

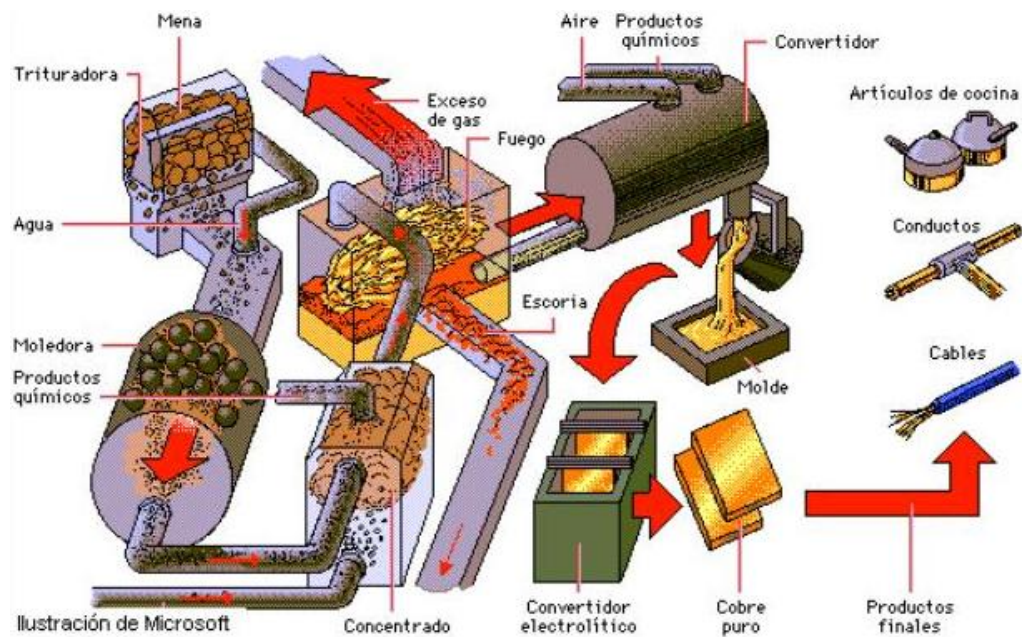


Fig. 1.9. Esquema de extracción de cobre.

ALEACIONES DE COBRE

Las aleaciones de cobre, presentan una mayor resistencia y por ello no pueden utilizarse en aplicaciones eléctricas, no obstante, su resistencia a la corrosión es casi tan buena como la del cobre puro y son de fácil manejo. Las dos aleaciones más importantes son una aleación con cinc (latón) y una aleación con estaño (bronce). A menudo, tanto el cinc como el estaño se funden en una misma aleación, haciendo difícil una diferenciación precisa entre el latón y el bronce, ambos se emplean en grandes cantidades; también se usa el cobre en aleaciones con oro, plata y níquel, y es un componente importante en aleaciones como el monel, el bronce de cañón y la plata alemana o alpaca.

Para tener buena conductividad térmica o eléctrica se debe usar cobre comercialmente puro; si se requiere mayor resistencia mecánica combinada con alta conductividad, se utilizan aleaciones que contienen zirconio u otros elementos. La aleación de cobre más barata es el latón con alto contenido de zinc y por lo común es el que se utiliza salvo cuando se requiere alta resistencia a la corrosión sometida a esfuerzo o a las propiedades mecánicas especiales de otras aleaciones. Cuando se desean buenas propiedades para trabajo en frío, tal como en operaciones de estirado profundo, o formado, se utiliza cuando debe realizarse mucho maquinado, en particular en el trabajo con máquinas automáticas para hacer tornillos.

Los bronce al estaño se utilizan para obtener una alta resistencia con buena ductilidad. Las aleaciones de cobre con aluminio silicio o níquel son buenas por su resistencia a la corrosión.

LOS COBRES DÉBILMENTE ALEADOS

Son aquellos que poseen bajo contenido de elementos de adición (menos del 1%) y se utilizan cuando alguna de las propiedades de los cobres propiamente dicha es insuficiente. Como por ejemplo cuando se requiere mejor:

- Resistencia mecánica a temperaturas relativamente elevadas,
- Resistencia a la corrosión,
- Soldabilidad,
- Resistencia al reblandecimiento, y
- Maquinabilidad.

Las composiciones de cobres débilmente aleados son:

- Cobre desoxidado con fósforo o con arsénico,
- Cobre tenaz con plata,
- Cobre exento de oxígeno con plata,
- Cobre con azufre, y
- Cobre con telurio.

FUNDICIÓN DEL COBRE

La fundición es el proceso de remover el metal de un mineral calentando para quemar el azufre y otras impurezas y crear un óxido en el proceso. Este mineral oxidado es reducido usando coque o carbón, removiendo el óxido y dejando el metal. La fundición del cobre ha sido una parte de la civilización humana por diez milenios, haciéndolo uno de los primeros metales recolectados y usados para varios propósitos, moviendo a la humanidad más allá de la época neolítica.

Recepción y Muestreo:

En esta primera fase el objetivo que tiene es que como normalmente se trabaja con concentrados de diferentes procedencias, es necesario hacer un muestreo de ellos y clasificarlos de acuerdo con la concentración de cobre, hierro, azufre, sílice y porcentaje de humedad que tengan. Este proceso consiste en que el concentrado adquirido se deberá almacenar, donde se obtienen muestras que son sometidas a análisis de laboratorio para determinar los contenidos de cobre, hierro, azufre, sílice y la humedad, información que es fundamental para iniciar el proceso de fusión. El contenido máximo de humedad es de 8%, ya que con valores superiores, el concentrado se comporta como barro difícil de manipular y exige más energía para la fusión. De acuerdo con los resultados de los contenidos de cobre, el material se clasifica y almacena.

Proceso de Fusión:

En esta segunda parte el objetivo es lograr el cambio de estado que permite que el concentrado pase de estado sólido a líquido para que el cobre se separe de los otros elementos que componen el concentrado. Y como ocurre esto, en la fusión el concentrado de cobre es sometido a altas temperaturas (1200 °C) para lograr el cambio de estado de sólido a líquido. Al pasar al estado líquido, los elementos que componen los minerales presentes en el concentrado se separan según su peso, quedando los más livianos en la parte superior del fundido, mientras que el cobre, que es más pesado se concentra en la parte

baja. De esta forma es posible separar ambas partes vaciándolas por vías distintas.

1.5. MATERIALES REFRACTARIOS

El término refractario se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse. Los refractarios son materiales inorgánicos, no metálicos, porosos y heterogéneos, compuestos por agregados minerales termoestables, un aglomerante y aditivos. Las principales materias primas empleadas en la elaboración de estos materiales son óxidos de: silicio, aluminio, magnesio, calcio y circonio; y algunos refractarios no provenientes de óxidos como los carburos, nitruros, boratos, silicatos y grafito [10].

Los materiales refractarios deben mantener su resistencia y estructura a altas temperaturas, resistir los choques térmicos, ser químicamente inertes, presentar baja conductividad térmica y bajo coeficiente de dilatación. Los óxidos de aluminio (alúmina), de silicio (sílice) y, magnesio (magnesita) son los materiales refractarios más importantes [11].

Las propiedades de mayor peso en los refractarios son: composición química, estabilidad dimensional, porosidad, densidad, resistencia a la compresión en frío, cono pirométrico equivalente (PCE, por sus siglas en Inglés), refractariedad bajo condiciones de alta temperatura, deformación por fluencia lenta a alta temperatura, estabilidad volumétrica a alta temperatura (expansión y contracción) y conductividad térmica [10].

Normalmente, los refractarios no tienen una temperatura de fusión específica. Sin embargo, llega a una temperatura en donde el material empieza a reblandecerse. El cono pirométrico equivalente se refiere a la cuantificación de la transición de fase que tiene lugar dentro de un intervalo de temperaturas en donde se lleva a cabo dicho fenómeno. Este es medido a partir de la caída de la punta de un cono elaborado de material refractario sometido a

incrementos controlados de temperatura; la caída se expresa en grados [10 y 12].

1.5.1. TIPOS DE REFRACTARIOS

PREFABRICADOS

Según este criterio los materiales refractarios prefabricados se clasifican en:

Materiales conformados Ladrillos normales (rectos), ladrillos de arco, en cuña, bloques y formas especiales (ver Fig. 1.10 y 1.11).



Fig. 1.10. Diferentes formas de materiales prefabricados [13].

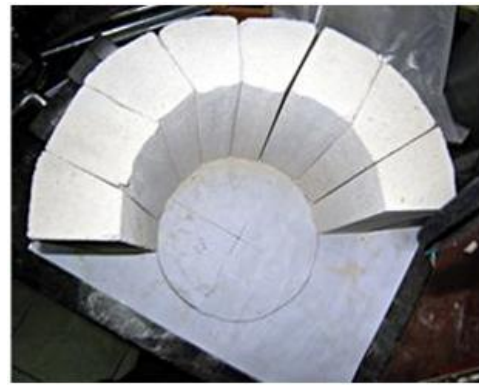


Fig. 1.11. Ladrillos refractarios de arco [14].

Estos ladrillos son piezas refractarias obtenidas por cualquiera de los métodos de conformado, principalmente por prensado, y luego sometidas a un proceso de cocción a alta temperatura, generalmente en un horno túnel, para lograr su aglomeración [14].

Los ladrillos refractarios representan la mayor parte de producción de refractarios por su versatilidad, costo y aplicación. Dentro de esta categoría se encuentran:

LADRILLOS DE ARCILLA REFRACTARIA

Estos representan hasta un 75% de la producción de refractarios. Estos ladrillos, en esencia, están compuestos de silicatos de aluminio hidratados y otros minerales en menor proporción. Las composiciones típicas varían entre $\text{SiO}_2 < 78\%$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 < 44\%$. Este tipo de refractarios son extremadamente versátiles y los más baratos de todos los ladrillos refractarios. Se utilizan con frecuencia en la industria ferrosa y no ferrosa [10].

Las categorías estándar de ladrillos de arcilla refractaria según la ASTM son: “superduty”, “high-duty”, “medium-duty”, “low-duty” y semi-silica, sus composiciones químicas se presentan en la Tabla 1.6. Estas categorías representan las temperaturas que pueden soportar sin perder sus propiedades de acuerdo a la prueba del cono pirométrico equivalente (PCE) [10].

Tabla 1.6. Intervalo de composición química y temperatura típica de operación para las diferentes clases de ladrillos de arcilla refractaria [10].

Ladrillos	% SiO_2	% Al_2O_3	Otros const.	PCE, °C
SuperDuty	49-53	40-44	5-7	1750-1760
High Duty	50-80	35-40	5-9	1690-1750
Medium Duty	60-70	26-36	5-9	1635-1690
LowDuty	60-70	23-33	6-10	1520-1595
Semi-silica	65-80	18-30	3-8	1620-1680

LADRILLOS CON ALTO CONTENIDO DE ALÚMINA

Los refractarios fabricados de óxido de aluminio y pequeñas trazas de otros materiales son los cerámicos ingenieriles mejor desarrollados. La alúmina es uno de los óxidos conocidos más estables químicamente que ofrece una excelente dureza, resistencia mecánica y resistencia al exfoliado. Son insolubles en agua, en vapor sobrecalentado y en la mayoría de ácidos inorgánicos y álcalis. Los refractarios con alto contenido de alúmina llevan las propiedades de las arcillas refractarias a mayores temperaturas, lo que permite que los hornos puedan operar a temperaturas de hasta 1850 °C sin ningún problema. También, posee gran resistencia en atmosferas oxidantes y reductoras [10].

La ASTM clasifica a estos ladrillos acorde a la cantidad de alúmina presente en ellos.

- 1) Ladrillos de Mullita: Están compuestos por ~72% de alúmina y 28% sílice. Estos poseen una excelente estabilidad volumétrica y resistencia a altas temperaturas. El uso de estos ladrillos es apropiado para techos de hornos eléctricos y altos hornos.
- 2) Ladrillos de Corindón: Son refractarios compuestos por 99% alúmina, estos materiales constan de una sola fase policristalina. Su uso se justifica cuando se requiere excelente resistencia y estabilidad a temperaturas extremas (1850 - 1900 °C).

Los costos de fabricación y, por ende, el precio final se incrementa rápidamente con el contenido de alúmina. Por ello es esencial determinar, experimentalmente o mediante instalaciones de prueba, el contenido de alúmina más económico para cada proceso [10].

LADRILLOS DE SÍLICE

Es un material refractario que posee como mínimo 93% de sílice. Desde el punto de vista de volumen de producción, estos se encuentran en segundo lugar bajo los ladrillos de arcilla refractaria. La sorprendente propiedad de la sílice es la excelente resistencia mecánica a temperaturas próximas a la temperatura de fusión. Esto contrasta con la mayoría de los refractarios que empiezan a fundirse y a fluir a temperaturas considerablemente menores a las de su temperatura de fusión [10].

Sin embargo, poseen un gran defecto y este es su tendencia a exfoliarse a temperaturas por debajo de los 650 °C luego de haber alcanzado altas temperaturas. Generalmente, para procesos en donde los hornos deben ser enfriados a casi la temperatura ambiente a intervalos frecuentes en su operación normal, los ladrillos de sílice no son prácticos [10].

LADRILLOS DE MAGNESITA

Los refractarios de magnesita son químicamente básicos, contienen al menos 85% de óxido de magnesio. Estos están fabricados de magnesita ($MgCO_3$) y sílice (SiO_2) encontrados en la naturaleza. Las propiedades físicas de este tipo de ladrillo son generalmente pobres y su valor principal radica en la capacidad de resistir escorias básicas. Estos ladrillos constituyen el grupo más importante de refractarios para la fabricación de acero en condiciones básicas [10].

LADRILLOS DE DOLOMITA

La dolomita natural de doble carbono ($CaCO_3-MgCO_3$) puede ser convertida en dolomita refractaria ($CaO-MgO$) al cocinarse a altas temperaturas. La dolomita de alta pureza puede superar el 97% de $CaO + MgO$. Se ha encontrado que los refractarios de dolomita son los materiales más compatibles con los hornos kiln de las cementeras ya que poseen gran resistencia al choque térmico y al ataque químico con álcalis [10].

La tabla 1.7 muestra valores promedio de los refractarios comerciales encontrados en la industria.

Tabla 1.7. Propiedades típicas de los refractarios [The Carbon Trust, 1993].

Propiedad	Refractarios de alta densidad	Refractarios de baja densidad (fibra cerámica)
Conductividad térmica ($W/m \cdot K$)	1.2	0.3
Calor específico ($J/kg \cdot K$)	1000	1000
Densidad (kg/m^3)	2300	130

REFRACTARIOS MONOLÍTICOS

Son mezclas refractarias que pueden ser usadas directamente en el estado que se suministran, como es el caso de las masas plásticas o bien después de la adición de un líquido apropiado, como es el caso de los hormigones o cementos refractarios (ver Fig. 1.12) [10].

La composición de un refractario moldeable depende del uso final pero están presentes los óxidos de Al_2O_3 , CaO y SiO_2 , en mayor o menor

proporción, con otros componentes como impurezas de TiO_2 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 y otros aditivos que pueden modificar las propiedades físicas del refractario en función de su uso [10].



Fig. 1.12. Mezcla monolítica (Concreto refractario Ultra-70).

Las propiedades físicas de estos materiales dependen del empaquetamiento de sus constituyentes, siendo el objetivo principal que se persigue en la fabricación de estos materiales, para una composición dada, el obtener la máxima compactación con la menor cantidad de agua. Las propiedades de los refractarios moldeables están gobernadas por el tipo de agregado y matriz, así como por la cantidad de cemento usado, ya que estas variables determinan la cantidad de agua requerida [10].

Los refractarios monolíticos están desplazando con gran rapidez al tipo prefabricado en muchas aplicaciones, incluso en los hornos industriales. Las más importantes ventajas son:

- 1) Elimina las uniones, las cuales resultan ser una inherente debilidad de los prefabricados;
- 2) La forma de aplicarlos resulta ser más rápida y fácil;
- 3) Las propiedades resultan mejores que la de los ladrillos;
- 4) El manejo y transporte es más simple;

- 5) Ofrece una efectiva reducción del espacio en bodega y elimina las formas especiales:
- 6) Poseen mejor resistencia a la fluencia lenta y mayor estabilidad volumétrica;
- 7) Pueden instalarse mientras el horno aún está caliente; y
- 8) Reducen los tiempos de mantenimiento [10].

Algunos tipos de refractarios monolíticos son:

- 1) *Arcillas refractarias*. Estos se mezclan con agua y luego se calientan para que las partículas (generalmente alúmina o sílice coloidal) se transformen o volatilicen para fomentar la unión cerámica entre ellas. Estos materiales generalmente se cuelan, y se conocen como concretos refractarios.
- 2) *Refractarios plásticos*. Son mezclas preparadas que se encuentran en una condición rígida, generalmente en bloques envueltos en polietileno. Cuando se aplican, deben ser cortados en piezas y luego son compactados neumáticamente. Pueden, fácilmente, ser compactados a cualquier forma y contorno.
- 3) *Mezclas para compactado*. Son materiales muy similares a los refractarios plásticos pero son aún más rígidos. Estos se encuentran como una mezcla seca que debe hidratarse con un poco de agua antes de ser aplicados. Otras mezclas pueden ya encontrarse en su forma húmeda para su uso inmediato. Estos deben instalarse con un compactador neumático.
- 4) *Recubrimientos refractarios*. Usualmente son empleados cuando se quiere proteger la superficie de alguna herramienta en contra del ataque químico. Su propósito es únicamente cubrir la superficie de trabajo, por ello, estas se encuentran en capas delgadas.
- 5) *Mortero refractario*. Este producto también pertenece a los refractarios monolíticos adecuado para la colocación, anclaje y pegado de ladrillos refractarios, partes pre-manufacturadas (componentes) y productos

aislantes; también para cubrir irregularidades de la superficie de las paredes de los hornos y para prevenir que la escoria ingrese a las uniones. La composición de este mortero varía dependiendo del grado específico de ladrillo o propósito de aplicación. Esos están compuestos de aditivos de grano fino y aglutinantes. Estos morteros son suministrados secos o listos para ser usados [10].

AISLANTES REFRACTARIOS

Los materiales aislantes reducen considerablemente la pérdida de calor a través de las paredes de los hornos. Una baja transferencia de calor se puede alcanzar al colocar capas de material con baja conductividad térmica entre la superficie interna caliente de un horno y la superficie externa, haciendo que esta última se mantenga a una baja temperatura [10].

La razón de su baja conductividad se debe a la alta cantidad de poros dentro del material, los cuales están llenos de aire y por lo tanto impiden una alta tasa de transferencia de calor. Estos materiales usualmente son muy ligeros. Materiales con una porosidad entre 75 y 85% se consideran muy livianos, y por arriba de ese porcentaje se vuelven materiales ultra-livianos [10].

Los materiales con alto porcentaje de poros resultan poseer una resistencia mecánica muy baja y deben manejarse con mucho cuidado. Además, gases, humos y líquidos pueden penetrar fácilmente estos materiales, por ello no deben emplearse en hornos donde puedan entrar en contacto directo con ellos.

Entre los aislantes refractarios se pueden encontrar:

- Ladrillos aislantes,
- Cementos aislantes,
- Fibra cerámica,
- Silicatos de calcio, y
- Recubrimientos cerámicos.

Debe tenerse en cuenta que el calor excesivo afecta a todo material aislante de manera adversa; sin embargo, la temperatura a la cual el material empieza a deteriorarse varía considerablemente de acuerdo al tipo de material seleccionado. Por lo tanto, al escoger un material aislante se debe tener en seria consideración la temperatura de operación. Algunas propiedades de los refractarios aislantes son mostradas en la Tabla 1.8, en ella no se incluye la fibra cerámica [10 y 15].

Tabla 1.8. Propiedades físicas de materiales aislantes [15].

Tipo	Conductividad térmica, 400 °C	Máxima temperatura de seguridad, °C	Resistencia a la compresión en frío, kg/cm	Densidad, kg/m
Diatomita de alta densidad	0.025	1000	270	1090
Diatomita porosa	0.014	800	110	540
Arcilla	0.030	1500	260	560
Alta alúmina	0.028	1500-1600	300	910
Sílice	0.040	1400	400	830

FIBRA CERÁMICA

Es una familia de productos aislantes refractarios elaborados en fibras esponjosas parecidas al algodón. Estas pueden ser utilizadas para fabricar telas, mantas, tablas, bloques, etc. Estos materiales poseen una muy baja conductividad térmica, baja capacidad calorífica, extremadamente livianos e inmunes a los choques térmicos y son químicamente estables [10 y 15].

Tabla 1.9. Operación continua recomendada para diferentes composiciones de fibras cerámicas [15].

Temperatura de operación continua recomendada, °C	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂
1150	43-47%	53-57%	-
1250	52-56%	44-48%	-
1325	33-35%	47-50%	17-20%

Usualmente se fabrican en dos calidades diferentes basadas en el contenido de Al₂O₃. En la actualidad también pueden encontrarse productos

que contienen ZrO_2 el cual ayuda a reducir la contracción del material al trabajar a altas temperaturas por un tiempo prologando. Algunas composiciones comerciales y sus temperaturas de operación se muestran en la Tabla 1.9 [10].

Las características de las fibras cerámicas son la excelente combinación de las propiedades de los materiales refractarios y del tradicional material aislante, a continuación se mencionan algunas:

- 1) Baja conductividad térmica. Debido a su baja conductividad térmica posibilita la construcción de recubrimientos más delgados con la misma eficiencia energética de los refractarios convencionales. Resulta ser 40% más efectivo que los ladrillos refractarios de mejor calidad y 2.5 veces mejor que el asbesto. La fibra cerámica es mejor aislante que el silicato de calcio.
- 2) Liviano. La densidad promedio de la fibra cerámica es 96 kg/m^3 . Es un décimo del peso del ladrillo aislante refractario y un tercio del peso del asbesto. Los soportes estructurales de los hornos pueden reducirse hasta en un 40%.
- 3) Bajo almacenamiento calorífico. Los recubrimientos de fibra cerámica absorben menos calor debido a su baja densidad. Por lo tanto, los hornos pueden ser calentados y enfriados más rápidamente.
- 4) Resistentes al choque térmico. La fibra cerámica puede resistir el choque térmico debido a su matriz resiliente. Esto permite ciclos rápidos de calentamiento y enfriamiento, mejorando la disponibilidad y productividad de un horno.
- 5) Resistencia química. La fibra cerámica resiste la mayoría de ataques químicos y no se ve afectada por los hidrocarburos, agua y vapor presente en los gases de escape.
- 6) Resiliencia mecánica. La alta resiliencia mecánica de la fibra cerámica hace posible la fabricación de hornos con estos recubrimientos fuera del sitio de instalación, para luego transportarse ya armados sin el riesgo de daño.

- 7) Bajos costos de instalación. Como la instalación de la fibra cerámica es un proceso ya estandarizado, no se requieren de habilidades especiales. Estos materiales no requieren de curado ni de secado previo y tampoco existe riesgo de fisuras o descamación al ser calentados después de instalados.
- 8) Fácil mantenimiento. En caso de daño físico, la sección dañada puede ser rápidamente removida y reemplazada con una nueva pieza. Secciones de paneles pueden ser prefabricados para una rápida instalación.
- 9) Eficiencia térmica. La eficiencia térmica de un horno con recubrimiento cerámico se ve mejorada de dos formas. Primero, la baja conductividad de la fibra cerámica permite que el recubrimiento sea más delgado y, por lo tanto, que el horno sea más pequeño. Segundo, la rápida respuesta de la fibra cerámica a los cambios de temperatura también permite un control más preciso y uniforme de la distribución de temperatura dentro del horno.
- 10) Ahorro de combustible. Los ahorros pueden llegar hasta un 60% en el caso de algunos hornos de operación intermitente [10].

Ahora bien, las fibras cerámicas se ven afectadas por ciertas limitaciones, entre las cuales se pueden mencionar:

- 1) Contracción a altas temperaturas, hasta un 5% para un ciclo de operación de 24 horas a 1300 °C.
- 2) La resistencia mecánica de la fibra cerámica es baja. Soporte apropiado debe ser provisto para todos los refractarios de fibra cerámica.
- 3) Tienden a combarse a altas temperaturas debido al ablandamiento de las fibras si estas no están apropiadamente soportadas.
- 4) No pueden ser utilizadas en ambientes hostiles y severos. Estos materiales recogen gran cantidad de polvo y humo. No pueden emplearse para procesar escorias o metales fundidos.

- 5) Tienden a ser más caros que los refractarios convencionales. Sin embargo, los ahorros en la mano de obra y energía sobrepasan la inversión inicial [10 y 15].

1.5.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA REFRACTARIOS

Al diseñar un horno de fundición generalmente se comete el error de no darle la suficiente atención a la selección del refractario, lo que hace que la vida útil de éste disminuya considerablemente y sea una fuente de costos de mantenimiento futuros que podrían evitarse [10].

Al seleccionar el mejor material debe tomarse en cuenta el metal a fundir, las temperaturas a alcanzar, el tiempo de fundición, cuánto tiempo se mantendrá el metal en el horno, que aditivos o agentes aleantes se utilizarán y la forma en que recubrirán las superficies. Por lo tanto, la selección del refractario se basa en lo que se considera ser el factor más crítico en relación al patrón de desgaste bajo los parámetros de operación normal del horno con el objetivo de poder alcanzar el mejor ahorro económico. La selección correcta no sólo otorga una mayor vida útil sino también reduce el tiempo en que el horno está fuera de servicio [10].

En este sentido, es importante que se consideren las condiciones de utilización. Por ejemplo, los materiales refractarios ácidos no se pueden utilizar en presencia de una base química y viceversa dado que se produciría corrosión. El circonio, la chamota y el dióxido de silicio son ácidos, la dolomita y la magnesita son básicas, mientras que el óxido de aluminio, la cromita, el carburo de silicio o el carbono son neutros. El fallo en la correcta selección del material puede producir una acelerada disminución de la vida útil del refractario. En el caso de aleaciones no ferrosas se recomienda el uso de materiales básicos como la magnesita, dolomita o cromita [10 y 11].

Finalmente, el factor económico es el que incide enormemente en el proceso de selección. El costo de la instalación, de mantenimiento, de

reparación y reemplazo del refractario deben mantenerse al mínimo. Sin embargo, no debe caerse en el error de seleccionar un material refractario únicamente por su bajo precio y facilidad de instalación, las consideraciones anteriores deben tomarse en cuenta para no incidir en pérdidas innecesarias [10].

1.6. SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA: EL QUEMADOR

El quemador resulta ser el elemento crítico en el horno. Sin un quemador no existirá transferencia de energía y sin energía no se producirá la fusión del material.

El quemador es un dispositivo que permite la mezcla del combustible con el aire (en el caso de los quemadores a base de hidrocarburos). El combustible es inyectado a través de una boquilla y este es mezclado con el aire proveniente del exterior o de algún ventilador mediante el tubo de mezcla [16].

El principio de funcionamiento es muy sencillo, pero para poder entenderlo se requiere de conocer qué es la combustión y qué implica.

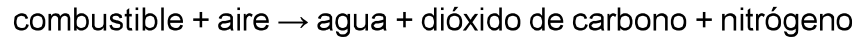
1.6.1. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

La combustión es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz, manifestándose visualmente como fuego [17].

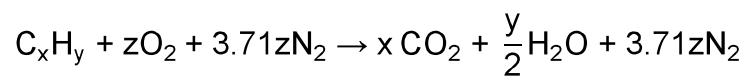
En toda combustión existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente), generalmente es oxígeno en forma de O_2 gaseoso [17].

En una reacción completa todos los elementos que forman el combustible se oxidan completamente. Los productos que se forman son el

dióxido de carbono (CO₂) y el agua; el nitrógeno no reacciona y por lo tanto se mantiene invariable en los productos [17].



La reacción química para la combustión estequiométrica (combustión completa) del hidrocarburo en aire se presenta a continuación [17]:



Dónde:

$$z = x + \frac{1}{4}y$$

Los requerimientos de aire u oxígeno para diferentes combustibles para que estos alcancen la combustión estequiométrica son descritos en la Tabla 1.10. Sin embargo, una combustión completa no puede alcanzarse en la realidad ya que los reactivos y reactantes están compuestos de otras moléculas que al reaccionar forman productos ajenos a la combustión completa, estos productos pueden ser monóxido de carbono, hidrogeno, óxidos de azufre (si el combustible posee azufre), carbón (en forma de hollín o ceniza) y, si la temperatura es alta, óxido de nitrógeno. En la combustión incompleta los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada [18].

Tabla 1.10. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiométrica de algunos combustibles [18].

Sustancia	Producto	En peso, kg de de		En volumen, m ³ de de	
		comburente/kg combustible	Aire	Oxígeno	Aire
Carbono	CO	1.33	5.75	Sólido	Sólido
Carbono	CO ₂	2.66	11.51	Sólido	Sólido
Hidrógeno	H ₂ O	7.94	34.30	0.5	2.39
Metano	CO ₂ + 2H ₂ O	3.99	17.24	2.0	9.57
Etano	2CO ₂ + 3H ₂ O	3.72	16.07	3.5	16.75
Propano	3CO ₂ + 4H ₂ O	3.63	15.68	5.0	23.95
Butano	4CO ₂ + 5H ₂ O	3.58	15.46	6.5	31.14
Acetileno	2CO ₂ + H ₂ O	3.07	13.26	2.5	11.96
Azufre	SO ₂	1.00	4.32	Sólido	Sólido
Azufre	SO ₃	1.5	6.48	Sólido	Sólido

Para la mayoría de combustibles, como el aceite diésel, carbón o madera, una reacción de pirolisis ocurre antes de la combustión. En la combustión incompleta, los productos de la pirolisis del combustible permanecen sin quemarse y contaminan el humo con partículas dañinas y gases [17].

Para iniciar la combustión de cualquier combustible, es necesario alcanzar una temperatura mínima, llamada temperatura de ignición, que se define como la temperatura, en °C y a 1 atm (101.325 kPa) de presión, a la que los vapores de un combustible arden espontáneamente [17].

La temperatura de ignición, en °C y a 1 atm, es aquella a la que, una vez encendidos los vapores del combustible, éstos continúan por sí mismos el proceso de combustión [17].

1.6.2. LLAMA

La llama es la manifestación visual de la reacción de combustión. La llama es provocada por la emisión de energía de los átomos de algunas partículas que se encuentran en los gases de la combustión, al ser excitados por el intenso calor generado en este tipo de reacciones [19].

El color y la temperatura de la llama son dependientes del tipo de combustible involucrado en la combustión. Con respecto a los hidrocarburos, el factor más importante que determina el color de la llama es el suministro de oxígeno y el alcance que tiene la pre-mezcla oxígeno-combustible, este último también determina la tasa de combustión y la temperatura de la reacción [19].

Para ilustrar este efecto se describirá los distintos cambios por los que atraviesa una llama en un mechero Bunsen (Fig. 1.13).

- 1) Bajo condiciones normales de gravedad y mientras la válvula de oxígeno está cerrada, la llama del mechero tiene un color amarillo (también llamada flama de seguridad) cuya temperatura esta alrededor de los 1000 °C. Se generan partículas de hollín que quedan suspendidas en el aire.
- 2) A medida que la válvula se abre levemente, la mezcla oxígeno-butano se lleva a cabo, se reduce el hollín producido debido a que existe una combustión más completa, y la reacción genera la suficiente energía para ionizar las moléculas de gas en la flama, lo cual deriva en un cambio notable del color de la llama de amarillo a anaranjado.
- 3) Cuando la válvula se encuentra medio abierta o un poco más, mayor cantidad de oxígeno se ve mezclado con el combustible y la llama empieza a tomar un color azul, disminuyendo aún más el hollín e incrementando la temperatura de la llama.
- 4) Finalmente, la llave está completamente abierta y la mezcla oxígeno-combustible alcanza la estequiometria, llegando a elevar la temperatura de la llama al máximo (1600 °C).

La combustión estequiométrica (combustión completa) del combustible con el aire genera la mayor temperatura de la llama. Exceso de aire/oxígeno la reduce al igual que la falta de este [19].

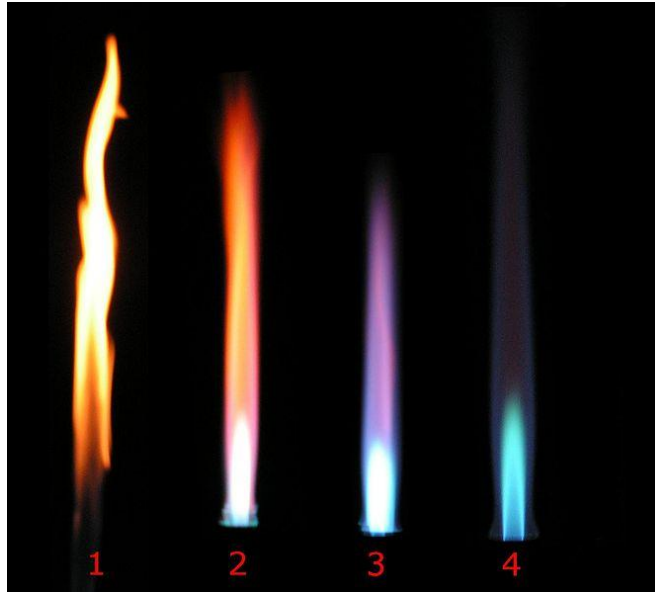


Fig. 1.13. Diferentes tipos de llama en un mechero Bunsen [19].

1.6.3. PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de un combustible queda definido por el número de unidades de calor liberadas por la unidad de masa o de volumen del combustible, quemada en un calorímetro en condiciones previamente establecidas; es decir:

- 1) Combustible sólido y líquido por unidad de masa, se expresa en kcal/kg o kJ/m^3 .
- 2) Combustibles gaseosos por unidad de volumen en condiciones normales (a 0°C de temperatura y 760 mm de Hg), se expresa en kcal/m^3 o kJ/m^3 (ver Tabla 1.11) [18].

PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Es la cantidad total de calor de un combustible, incluyendo el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en dicho combustible [18].

PODER CALORÍFICO INFERIOR

Es la cantidad de calor que resulta al restar del poder calorífico superior el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en el combustible [18].

Una vez se ha establecido los principios básicos de la combustión, se procede a profundizar en el quemador.

1.6.4. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL QUEMADOR

En la Fig. 1.14 se presenta el tipo de quemador a emplear en el horno debido a su versatilidad y bajo costo. Éste resulta ser un quemador atmosférico, es decir, carece de un ventilador que fuerce el aire para que ocurra la mezcla. En este caso el gas, al pasar por la válvula de paso, viaja a gran velocidad a través del orificio y, el ímpetu con que entra el flujo de gas, causa que el aire exterior sea succionado y forzado a ingresar al quemador. La presión de velocidad de la mezcla se convierte en presión estática suficiente para impulsar la mezcla hasta la salida y al hacer contacto con una chispa se ve incendiada la mezcla [16].

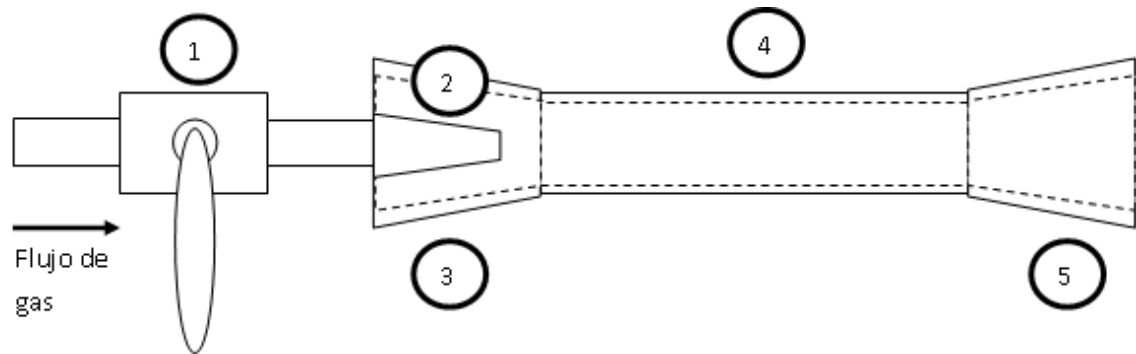


Fig. 1.14. El esquema es un corte transversal del quemador: Muestra los elementos del quemador de gas atmosférico empleado: 1) Válvula de paso, 2) Boquilla, 3) Ingreso primario de aire, 4) Tubo mezclador y 5) Difusor [20 y 21].

Como se presentó en los apartados anteriores, para que se produzca una correcta combustión es importante que ingrese suficiente aire al tubo de mezcla para que junto con el combustible, al hacer contacto con una chispa, se incendie y haya una combustión estequiométrica.

Ahora bien, debido a las fluctuaciones de presión por los cambios de temperatura, cantidad de gas presente en el contenedor de gas, el transporte del mismo, como también, dificultades en el correcto mezclado del combustible con el aire, resulta casi imposible una combustión estequiométrica, por lo tanto se recomienda que exista aire en exceso en la mezcla. El aire en exceso asegura la combustión estequiométrica del combustible, evitando los nocivos gases de una combustión pobre en oxígeno y una llama fría. Se reconoce que el aire en exceso disminuye el poder calorífico del combustible pues este aire absorbe energía de la combustión para elevar su temperatura; sin embargo, resulta beneficioso al proveer una llama limpia y de alta temperatura [16].

El aire en exceso generalmente se mide en porcentaje de volumen, lo cual se presenta en la ecuación 1.1 [22]:

$$e \% = \frac{\text{Aire real}-\text{Aire estequiométrico}}{\text{Aire estequiométrico}} \times 100\% \quad (1.1)$$

Debe evitarse a toda costa que más aire que el provisto ingrese al quemador, esto se debe a que si no existe un control del ingreso del aire, una gran cantidad puede ingresar al tubo de mezcla impidiendo la combustión del gas. Debe tenerse en cuenta que para cada combustible existen dos límites de ignición en donde éste, si la mezcla no está en la proporción correcta, no puede encenderse. Esto quiere decir que por debajo del límite inferior de mezcla aire-combustible, la mezcla no es suficientemente rica en combustible; lo inverso es cierto también, sobre el límite superior de inflamabilidad la mezcla es pobre en comburente (aire) y por lo tanto no puede encenderse. Algunos límites de inflamabilidad en el aire (expresados como porcentaje de combustible en la mezcla) se presentan en la Tabla 1.11 [22]:

Tabla 1.11. Algunos límites de inflamabilidad para gases comunes [22].

Combustible	Fórmula química	Límite inferior %	Límite superior %
Metano	CH ₄	5	14
Propano	C ₃ H ₈	1.86	8.41
Butano	C ₄ H ₁₀	2.37	9.5
Gas Natural		5	15

Por ejemplo, para un volumen dado de mezcla propano-aire, si la cantidad de combustible es inferior al 1.86%, aun cuando haya chispa, no habrá combustión; de igual manera, si la proporción propano-aire supera el 8.41% nunca habrá combustión.

Los factores que inciden en el ingreso total del volumen de aire se presentan a continuación [16]:

- 1) Cantidad de gas entrante,
- 2) Presión del gas,
- 3) Gravedad específica del gas,
- 4) Diseño de la boquilla,

- 5) Posición de la boquilla,
- 6) Área disponible de entrada de aire,
- 7) Diseño del tubo mezclador,
- 8) Dimensiones y forma del difusor,
- 9) Área total de salida, y
- 10) Temperatura de operación del difusor.

Todos los factores son posibles de controlar, sin embargo la gran cantidad de condiciones y variabilidad de aplicaciones impiden que se especifiquen los factores para aplicaciones generales; por lo tanto, un buen diseño requiere de una gran cantidad de iteraciones para poder llegar al funcionamiento óptimo de un quemador [16].

Ahora bien, dentro de los objetivos planteados, el diseño y la construcción del quemador queda fuera del alcance de este trabajo de graduación, por lo tanto no se procederá a ahondar en los principios de funcionamiento del quemador, los fenómenos físicos involucrados ni la manera de construir uno que sea óptimo para esta aplicación en particular. Más bien, se adquirirá un quemador atmosférico comercial que cumpla con los requerimientos mínimos de energía del horno; esto agilizará la construcción de éste y reducirá el tiempo de espera para la puesta en marcha.

El quemador a adquirir es muy similar al de la Fig. 1.14. Por ser un quemador atmosférico posee la ventaja de ser completamente independiente de una fuente de energía, lo cual le aporta versatilidad y mayor economía. Ahora bien, para que opere de manera adecuada, la cámara interior del horno debe diseñarse de manera tal que no exista una contrapresión dentro de él, ya que si la hay, impediría el funcionamiento adecuado del quemador atmosférico. Para ello se recomienda la elaboración de una chimenea para que los gases de escape puedan salir libremente sin incrementar la presión interior del horno [20].

1.7. CONSERVACIÓN DEL CALOR DENTRO DEL HORNO

Uno de los retos a vencer en el diseño y fabricación de hornos es la economía en el uso de combustible, la cual debe equilibrarse con los costos de fabricación y la resistencia térmica de los materiales. Se habla de economía porque a medida que el horno posee una mayor capacidad para evitar las fugas de calor a través de sus recubrimientos, el consumo de combustible disminuye y la rapidez de calentamiento aumenta, por lo tanto, el suministro de energía (que resulta ser uno de los mayores costos de operación de un horno) se ve grandemente reducido [10].

Ahora bien, para determinar las potenciales pérdidas de calor en un horno es primordial definir en qué momento ocurren esas pérdidas. Para ayudarnos a encontrarlas, se dividirá la operación del horno en etapas de calentamiento, las cuales pueden ser:

- 1) **Etapas de pre-calentamiento.** El horno empieza a calentarse hasta la temperatura de trabajo; en este momento el mayor consumo energético es empleado para calentar el recubrimiento refractario.
- 2) **Etapas de operación.** En esta etapa, el mayor consumo de energía es utilizado para fundir la carga. La cantidad de combustible empleado en esta etapa dependerá del metal a fundir y las pérdidas del horno a través de las paredes.
- 3) **Etapas de mantenimiento.** El horno ya ha fundido la carga y la energía empleada es utilizada para mantener el baño mientras empieza la operación de colado. El consumo de combustible se reduce y debe ser lo suficiente para mantener una temperatura estable.
- 4) **Etapas de enfriamiento.** Una vez el horno a finalizado su ciclo de trabajo este es apagado y el calor es disipado con una rapidez que depende del recubrimiento del horno y el ambiente circundante.

Dentro de estas etapas, las pérdidas de calor al exterior se dan por diversos factores, dentro de los cuales encontramos:

- 1) **Pérdidas en los gases de combustión.** Una parte de la energía aún permanece en los gases de combustión al salir por la chimenea. Esta pérdida también se llama pérdida por gases de escape.
- 2) **Pérdida por humedad en el combustible.** El combustible contiene, usualmente, un poco de humedad y una pequeña parte de la energía es utilizada para evaporar esa humedad como también la humedad dentro del horno.
- 3) **Pérdidas por hidrogeno en el combustible.** En la reacción de combustión parte de la energía es empleada para que el hidrogeno pueda dar paso a la formación de agua.
- 4) **Pérdidas a través de aberturas en el horno.** Las pérdidas de calor por radiación más significativas suceden cuando existen aberturas al ambiente en el horno, especialmente para hornos que trabajan a temperaturas mayores de 540°C. Otras pérdidas son debidas a la infiltración de aire debido al arrastre de los gases de escape hacia la atmosfera, lo que genera una presión negativa dentro del horno y por ende fomenta el ingreso de aire frío del exterior a través de ranuras o cuando la puerta del horno es abierta.
- 5) **Pérdidas a través de las paredes.** La transferencia de calor por las paredes resulta ser una substancial pérdida de combustible si no es considerada apropiadamente. La extensión de las pérdidas dependen de:
 - a) *Emisividad de las paredes.* El ladrillo refractario posee un alto valor de emisividad (0.9-0.95), esto quiere decir que refleja muy poco la radiación y por lo tanto tiende a absorber la energía radiante y almacenarla para posteriormente radiarla en todas direcciones al incrementarse la temperatura. Por ello es que en la etapa de pre-calentamiento la mayor parte del combustible es empleado para calentar el ladrillo hasta la temperatura de operación.

- b) *Conductividad del refractario.* La conductividad térmica de las paredes es un parámetro importante a considerar. Entre mayor sea la conductividad, mayor será la pérdida de calor al ambiente.
 - c) *Espesor de la pared.* Si la pared del refractario es delgada, el recorrido del calor a través de esta es más corto y por lo tanto hay un mayor flujo de calor al ambiente.
 - d) *Velocidad y temperatura del aire.* La transferencia de calor se ve favorecida con un flujo de aire turbulento característico de altas velocidades de flujo de aire y por los gradientes de temperatura existente entre el exterior del horno y el aire circundante.
 - e) *Si el horno es operado de manera continua o intermitente.* Un horno operado de manera continua posee ciclos de trabajo largos, en donde las mayores pérdidas de calor se dan en las etapas de operación y mantenimiento, mientras que en un horno intermitente la mayor pérdida de calor se da en la etapa de enfriamiento y por ende el mayor consumo de combustible se da por calentar el horno en frío hasta la temperatura de operación.
- 6) **Otras pérdidas.** Existen muchas otras pérdidas, aunque cuantificar estas pérdidas resulta dificultoso, entre estas se incluyen:
- a) *Pérdidas debido a la manipulación.* Al introducir herramientas, como pinzas, cucharones, etc. Estas absorben calor y las pérdidas dependerán de la frecuencia y el tiempo en que estas permanezcan en el horno.
 - b) *Pérdidas por combustión incompleta.* Calor es perdido de esta forma debido a las partículas de combustible que no se quemaron o debido a productos de la combustión incompleta que absorben energía.
 - c) *Pérdidas por la formación de escamas en el refractario* [15].

En este sentido, al diseñar el horno debe hacerse análisis de transferencia de calor para conocer la magnitud de las pérdidas estimadas que proveerán el consumo de combustible teórico del horno. Ahora bien, el

diseñador debe saber que las mayores pérdidas de calor en un horno pueden controlarse al:

- 1) Instalar aislante térmico para conservar el calor.
- 2) Incrementar el espesor del ladrillo refractario (lo cual no resulta ser muy efectivo pues incrementa considerablemente el costo de construcción del horno).

Como ejemplo de lo anterior se establece el caso de un horno recubierto con ladrillo refractario de 230 mm de espesor y una temperatura interna de 1100 °C el cual pierde 1647 kJ/m². Si se instalan 102 mm de aislante térmico, las pérdidas se reducen a 363.40 kJ/m² y si se incrementa el espesor del aislante a 203 mm las pérdidas de calor alcanzan el valor de 204.41 kJ/m² [10 y 15].

Es importante advertir que la aplicación del aislamiento térmico debe realizarse luego de una cuidadosa consideración de las consecuencias que este puede causar en las temperaturas del refractario [10].

1.7.1. EFECTO DEL AISLANTE TÉRMICO EN LA TEMPERATURA DE LOS REFRACTARIOS

Una temperatura de operación por encima de la de servicio del refractario puede debilitarlo o fundirlo. Si la cara exterior del refractario es aislada, se reducen las pérdidas de calor pero también, mayor calor es retenido en el sistema. Esto significa que, en la práctica, la temperatura promedio de las paredes del refractario se incrementa aun cuando el consumo de combustible se ve reducido. Esto puede resultar en un sobrecalentamiento del refractario o del aislante térmico y afectar de manera negativa al horno, de esto se deduce que [10]:

- 1) Si el refractario empieza a fundirse, el horno puede colapsar, y
- 2) Puede dañarse el aislante o volverlo inefectivo.

Para ilustrar este hecho se considera en un horno la temperatura en la entrecara ladrillo-aislante. Sin aislante, la cara externa del ladrillo estaría a 260°C. Con aislante de 102 mm de espesor, esta misma sección tendría una temperatura de 900 °C y con 203 mm de espesor, la temperatura alcanzaría el valor de 982 °C [10].

Es por ello que antes de aislar un horno se deben considerar los efectos que el aislante puede causar en este. Como una regla de dedo se puede mencionar que al colocar un aislante de 100 mm de espesor en la cara exterior de la pared del horno, el calor almacenado se incrementa en un 60% [10].

Aunque la reducción de las pérdidas de calor a través de las paredes puede compensar el incremento de calor almacenado. En hornos de ciclo intermitente podría ahorrarse aún más energía si se pudiera evitar que ese calor llegara a las paredes. Así, en primer lugar, se puede afirmar entonces que, entre más corto sea el ciclo de trabajo de un horno, mayor es la cantidad de calor almacenada en las paredes al comparar las pérdidas a través de ellas [10].

La solución a esta dificultad se encuentra en reducir al mínimo la cantidad de refractario que debe ser calentado y enfriado en cada ciclo. El desarrollo de ladrillos refractarios que a la vez son aislantes y el uso de fibras cerámicas de baja densidad han permitido que, en los hornos de operación intermitente, haya una reducción drástica en el consumo de energía [10].

Hasta ahora se ha considerado los elementos componentes del horno, los cuales han brindado un panorama del diseño posterior. Sin embargo, también es importante considerar los metales a fundir, los cuales brindan una idea del proceso al cual estará sometido el horno y los consecuentes pasos, una vez el metal haya sido fundido. Por ello, en la sección 1.4 se han descrito brevemente los materiales a fundir [10].

1.8. PROCESO DE FUNDICIÓN

El proceso de fundir consiste en una serie de pasos secuenciales realizados en un orden definido, cabe destacar que cada área presenta sus operaciones y estudios de importancia para la obtención de una pieza final de calidad, a continuación se presenta un breve resumen de estas etapas del proceso de fundición [23].

- Este proceso comienza con un modelo cuya forma geométrica determina la forma de la parte a fundir. La cavidad debe diseñarse de forma y tamaño ligeramente sobredimensionado, esto permitirá la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento. Cada metal sufre diferentes porcentajes de contracción; por lo tanto, la cavidad debe diseñarse para el metal particular que se va a fundir. Con el modelo se construye el molde. Los moldes se hacen de varios materiales que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Los procesos de fundición se clasifican frecuentemente de acuerdo a los diferentes tipos de moldes.
- En una operación de fundición, se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido. Después se vierte directamente en la cavidad del molde. El sistema de vaciado en un molde de fundición es el canal o red de canales por donde fluye el metal fundido hacia la cavidad desde el exterior. El sistema de vaciado, consiste típicamente en un bebedero de colada a través del cual entra el metal a un canal de alimentación que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero existe frecuentemente una copa de vaciado para minimizar las salpicaduras y la turbulencia del metal que fluye en el bebedero. Representado como un simple embudo en forma de cono.
- Tan pronto como el material fundido en el molde empieza a enfriarse, y conforme desciende la temperatura, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. Se requiere tiempo para

completar este cambio de fase, porque es necesario disipar una considerable cantidad de calor. Durante este proceso, el metal adopta la forma de la cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y características de la fundición. En cualquier fundición cuya contracción sea significativa se requiere, además del sistema de vaciado, una mazarota conectada a la cavidad principal. La mazarota es una reserva en el molde que sirve como fuente de metal líquido para compensar la contracción de la fundición durante la solidificación. A fin de que la mazarota cumpla adecuadamente con su función, se debe diseñar de tal forma que solidifique después de la fundición principal.

- Una vez que la fundición se ha enfriado lo suficiente, se remueve del molde. Se pueden necesitar procesamientos posteriores, dependiendo del método de fundición y del metal que se usa. Entre éstos se encuentran el desbaste del metal excedente de la fundición, la limpieza de la superficie, la inspección del producto y el tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, se puede requerir maquinado para lograr tolerancias estrechas en ciertas partes de la pieza y para remover la superficie fundida y microestructura metalúrgica asociada.

1.9. CRISOL

El crisol es el recipiente utilizado para albergar metales a ser fundidos en un horno y es utilizado para soportar las altas temperaturas encontradas en la fundición metálica. El material del crisol debe tener una alta temperatura de fusión, mucho mayor que la del metal a fundir, resistente al ataque químico del metal y, además, debe tener una excelente resistencia en caliente [24-26].

Los tipos de crisol que ofrece la industria vienen en tamaños muy variados, generalmente son numerados acorde a la cantidad de aluminio que puedan contener y si se multiplica el valor por 3 se obtiene la cantidad de bronce que puede contener; aunque, cabe aclarar, que cada fabricante posee

su propia denominación y no necesariamente se sigue esta norma. Como ejemplo del sistema de denominación, un crisol # 6 puede contener 6 lb de aluminio o 18 lb de bronce [24].





Para el aluminio y sus aleaciones se utilizan crisoles de arcilla grafitada, carburo de silicio y de hierro fundido. Mientras que el crisol de arcilla grafitada y carburo de silicio se usa, preferentemente, para la fusión, la conservación de calor y la colada, los crisoles de hierro fundido solo se usan para la conservación del calor y la colada. Según la aplicación se les exigen las siguientes condiciones: resistencia frente a la acción del aluminio líquido y los medios de tratamiento del fundido, buena conductividad, resistencia térmica y mecánica y a la vez resistencia a los cambios de temperatura [3].

Los crisoles de arcilla grafitada, están formados por una mezcla de grafito y arcilla aglutinante. Estos tienen una capacidad entre 50 y 300 kg de aluminio. Utilizándose últimamente crisoles con una capacidad de aproximadamente 500 y 800 kg. Estos crisoles pueden usarse para la fusión, la conservación del calor y la colada. Su comportamiento con respecto al aluminio fundido es neutro [3].

La duración de los crisoles de grafito depende tipo de horno, y por lo tanto, del tipo de calentamiento, de la aleación que se funde y de su temperatura de fusión, a la vez del tratamiento al que se someta el caldo. Por término medio se puede calcular en unas 60 a 80 fusiones y para los de conservación del calor una vida de 2 a 2 ½ meses [3].

Con respecto al crisol de arcilla grafitada el de carburo de silicio presenta la ventaja de que la conductividad calorífica y el rendimiento de fusión permanecen constantes. Por eso no tiene límite su duración respecto a la conductividad. Tiene, además, una mayor resistencia a los cambios de temperatura. Los crisoles de carburo de silicio cuando se les trata con cuidado, tienen una duración mayor que los de arcilla grafitada; también son más caros que aquellos. El comportamiento de los crisoles de carburo de silicio frente al aluminio líquido es neutro [3].

Tabla 1.12. Formas comunes de crisoles para fundir metales [24].

Denominación de forma	Aplicación	Forma
A	Horno de crisol estacionario y de crisol removible	
B (Bilge)	Horno de crisol removible	
BU (Bale Out)	Horno de crisol estacionario	
C	Horno de inducción	

Las formas de los crisoles son muy variadas y generalmente dependen de la aplicación. En la Tabla 1.12 se presentan las formas más comunes de los crisoles [24].

Es importante mencionar que no existe ningún crisol que pueda satisfacer todas las características deseables para la aplicación. El desempeño de un crisol usualmente involucra intercambios de propiedades. Por ejemplo, el crisol con la mejor conductividad térmica puede no ofrecer la mejor protección al shock térmico. Por ello, al seleccionar un crisol, es importante priorizar aquellas propiedades que resultan más importantes para la aplicación [24].

1.9.1. MANEJO DE CRISOLES




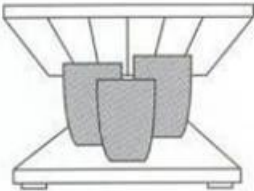

El crisol es uno de los elementos más críticos para el horno desde su almacenamiento, instalación, carga, limpieza y operación la cual se debe realizar con mucho cuidado para alargar la vida útil del mismo y para asegurar una fusión apropiada del metal.

En el presente apartado se hace una compilación de recomendaciones para lograr los máximos rendimientos, con crisoles para la fundición de metales no-ferrosos.

El correcto almacenamiento y transporte del crisol previene fallas futuras por ello se deben seguir algunas recomendaciones para la correcta manipulación del crisol (ver Tabla 1.13).

Cualquier daño en la superficie del vitrificado de protección acelera la oxidación, provoca pérdida de la resistencia mecánica y falla prematura [27].


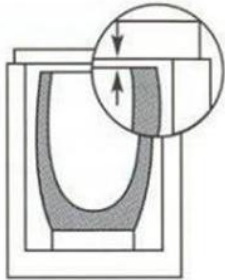
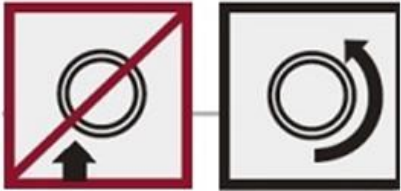
Tabla 1.13. Recomendaciones de almacenamiento y transporte del crisol [27].

MANEJO GENERAL	
<p>1) Inspeccionar el empaque y los crisoles antes de usar los para verificar que no se hayan dañado durante el transporte.</p>	 <p>Inspección de crisol</p>
<p>2) Nunca rodar los crisoles en el piso, utilizar herramientas apropiadas para evitar que se talle el crisol. Cualquier daño en la superficie del vitrificado de protección acelera la oxidación, provocando pérdida de la resistencia mecánica y falla prematura.</p>	 <p>Transporte y manejo de crisol</p>
<p>3) Los crisoles siempre deben almacenarse en un lugar seco, cálido y bien ventilado.</p>	 <p>El crisol debe almacenarse en un lugar seco</p>
<p>4) Los crisoles no deben almacenarse directamente sobre el concreto, pavimento o tierra. Siempre deben estar sobre una base plana. Los crisoles son higroscópicos y pueden absorber humedad de la atmosfera, así como de un piso húmedo.</p>	 <p>El crisol debe almacenarse sobre bases planas</p>
<p>5) Si el refractario húmedo es calentado o puesto en contacto con metal fundido, se pueden generar grietas y/o una explosión o reacción violenta como las mostradas.</p>	 <p>Fracturas en crisoles debido al mal uso.</p>

1.9.2. INSTALACIÓN DEL CRISOL

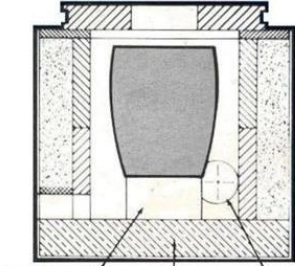

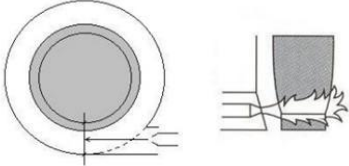
Para una correcta operación del crisol y protección del mismo se deben tomar en cuenta ciertas recomendaciones en cuanto a su instalación y condiciones de uso dentro de la cámara del horno las cuales se detallan en la Tabla 1.14 en la cual se indica la instalación correcta del crisol dentro de la cámara del horno.

Tabla 1.14. Instalación correcta del crisol dentro de cámara de horno [27].

INSTALACIÓN	
<p>1) Utilizar la base apropiada para el crisol y del tamaño adecuado. Nunca acuñar los crisoles, se tiene que permitir la expansión y contracción del crisol.</p>	 <p>El crisol debe colocarse dentro de la cámara del horno en una base plana adecuada.</p>
<p>2) Evitar esfuerzos por carga; la tapa del horno o el anillo nunca deben descansar sobre el borde del crisol.</p>	 <p>Debe existir una distancia entre la tapa del horno y el borde superior del crisol.</p>
<p>3) Mantenga el revestimiento interior del horno en buenas condiciones; con una pared uniforme y concéntrica manteniendo la disposición tangencial del eje del quemador. Esto evitara la desviación de la flama y asegurara una fusión apropiada.</p>	 <p>Se debe mantener una pared interior uniforme para que no se pierda la trayectoria de la llama.</p>

1.9.3. INSTALACIÓN DEL QUEMADOR

Tabla 1.15. Instalación correcta del quemador y recomendaciones de operación [27].

INSTALACIÓN DEL QUEMADOR	
<p>1) Revisión y limpieza del horno. Revisar el revestimiento interno del horno y reparar de ser necesario. Retirar cualquier objeto adherido a las paredes y piso. Asegurarse que el quemador esté limpio y correctamente alineado.</p>	 <p>BASE PARA CRISOL REFRACTARIO QUEMADOR</p> <p>Se debe realizar una limpieza previa a los diferentes elementos del horno.</p>
<p>2) Centrar el crisol en la base de soporte dentro del horno. El fondo de un crisol debe estar al mismo nivel o ligeramente arriba de la línea central de la entrada del quemador. Esto se realiza sentando el crisol en una base o block pedestal de altura apropiada. Los crisoles deben estar centrados para asegurar un buen espacio alrededor y una combustión uniforme.</p>	 <p>El crisol debe estar centrado sobre su base</p>
<p>3) Verificar la alineación del quemador y asegurarse que la flama quede centrada y dirigida entre el crisol y la base que lo soporta. La salida del quemador debe centrarse dentro de la cámara de combustión del horno y correr tangencialmente alrededor del crisol.</p>	 <p>Se debe verificar la salida de la flama de forma tangencial a la pared interior del horno.</p>
<p>4) Asegurarse que la flama sea ligeramente oxidante y no esté en contacto directo con el crisol.</p>	

Antes de cada operación del horno se debe realizar una limpieza previa de la cámara del horno para corregir imperfecciones en el revestimiento. Se debe revisar la correcta instalación del quemador y del crisol en la cámara del horno para conservar la trayectoria de la llama y correcta operación del horno evitando así posibles daños (ver Tabla 1.15).

1.9.4. PRECALENTAMIENTO Y CURADO DEL CRISOL

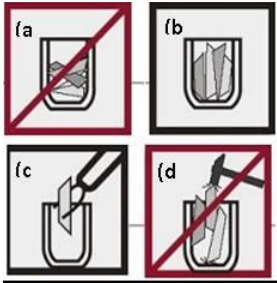

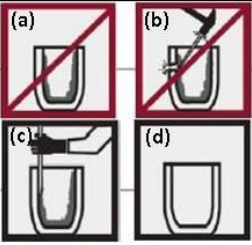
El precalentamiento y “curado” del crisol es uno de los factores más importantes para prolongar la vida del crisol. Se puede ocasionar un daño durante este proceso, el cual no se evidencia de inmediato, sino durante la operación del crisol [27]:

- 1) Nunca ponga un crisol en el horno mientras se está curando el refractario de respaldo (mortero y/o ladrillo refractario húmedo). La variación en los intervalos de temperatura oxidará la liga del crisol.
- 2) Curado del crisol nuevo: Se debe calentar el crisol vacío progresivamente hasta aproximadamente 200 °C por 30-60 minutos (tiempo en función al tamaño del crisol); esto permitirá la salida de la humedad a la que el crisol pudiera haber sido expuesto. Después de llegar a esa temperatura (~200 °C), es muy importante que inmediatamente se opere el quemador a plena potencia para llevar el crisol a 800–900 °C en el tiempo mínimo que la capacidad del quemador lo permita. Este procedimiento permitirá que el vidriado protector, exterior e interior, se fije en las paredes del crisol y que podamos evitar el rango de temperatura de máxima oxidación de la liga del crisol (430–600°C). Luego, dejar enfriar (no forzar el enfriamiento) si se va a trabajar con material frío. Por último mantener caliente (temperatura de operación) si se trabaja con una colada continua (metal fundido) o si se precalienta el material.

1.9.5. CARGA DEL CRISOL

La forma correcta de agregar el metal dentro del crisol se describe en la Tabla 1.16 en la cual se describe lo que se debe hacer y cómo evitar posibles daños al mismo y la limpieza correspondiente después de la operación del horno.

Tabla 1.16. Proceso de carga de material en el crisol [27].

CARGA	
<p>1) Carga de material:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La carga debe ser colocada de forma que esta quede suelta en el crisol. • Colocar preferentemente las piezas más pequeñas y el material a granel en el fondo del crisol para que actúen como colchón a los lingotes grandes (ver a y b) • Colocar los lingotes verticalmente dentro del crisol y asegurarse que haya espacio adecuado entre los lingotes y la pared del crisol (ver c y d). 	 <p>Formas de colocación de la carga en el crisol. (a) Incorrecta, (b) correcta, (c) forma correcta de colocación de los lingotes de manera vertical y (d) no se debe sobre sobrellenar el crisol.</p>
<p>2) Al recargar, debe dejarse un remanente de metal líquido en el crisol para permitir una fusión rápida.</p> <p>Evitar cargar lingotes grandes y en gran cantidad si el crisol tiene una pequeña cantidad de metal líquido. Esto causara la solidificación del metal, causando un agrietamiento inmediato del crisol.</p>	 <p>Evitar cargar gran cantidad de lingotes dentro del crisol.</p>
<p>3) El crisol debe vaciarse completamente al apagarse el horno. Un pequeño remanente de metal que quede se solidificará y muy posiblemente agrietará el crisol en la siguiente colada debido al diferencial de expansión entre el metal y el crisol. Los lingotes y otras piezas pesadas deben colocarse cuidadosamente dentro del crisol.</p>	 <p>Formas correctas de limpieza del crisol. (a y b) no debe dejarse residuos en el crisol, (c) retirarse residuos con herramienta especial de forma vertical y (d) el crisol debe quedar completamente limpio.</p>

Tanto los lingotes como cualquier carga de chatarra a granel se deben secar y desengrasar completamente antes de ser cargadas en el crisol.

Los lingotes y otras piezas pesadas se deben colocar cuidadosamente dentro del crisol. Nunca se deben lanzar dentro del crisol, las esquinas y bordes de los lingotes ya que estos dañaran el crisol al caer.

1.9.6. FUNDENTES, DESGASIFICADORES Y MODIFICADORES

Se adicionan básicamente para crear una cubierta de protección contra la oxidación, auxiliar en la remoción de gas e impurezas sólidas, modificar la química de la aleación para obtener ciertas propiedades en las piezas con la estructura deseada y generar una escoria suave, más fluida, en lugar de una dura y adherente.

Indicaciones [27]:

- 1) Usar los aditivos de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Agregar sólo la cantidad mínima requerida para obtener el resultado deseado.
- 2) Agregar los fundentes, modificadores de grano, al metal fundido antes de vaciar para maximizar la vida del crisol. Nunca colocarlos en el crisol vacío o como parte de la carga metálica.
- 3) Agitar el metal para distribuir el fundente y evitar su contacto con las paredes del crisol.
- 4) Los compuestos de vidrio, como el Bórax, son menos agresivos que compuestos de cloro o fluoruros (su bajo punto de fusión y gran fluidez les permite penetrar y atacar rápidamente el cuerpo del crisol).
- 5) Los aditivos pueden ser agregados como polvo, tabletas o por medio de lanzas. Estos nunca deberán estar en contacto con el crisol. Si se usa una lanza, ésta debe estar centrada en el crisol, aproximadamente a 1/3 arriba del fondo del crisol.
- 6) Los crisoles siempre deben limpiarse al final del día para remover fundentes

y escoria. Los fundentes no diluidos penetrarán la escoria y se filtrarán en la estructura del crisol, incrementando el peligro de un ataque químico.

- 7) El grado de reacción de los fundentes es proporcional a la temperatura. Un sobrecalentamiento del crisol trae consigo la reducción significativa de su vida útil.
- 8) Fundentes muy fluidos pueden penetrar la estructura del crisol atravesándola, y en la presencia de oxígeno y productos de la combustión atacar también al crisol desde la parte externa. Es típica la formación de cavernas y la pérdida del vitrificado por éste tipo de ataque. Salpicaduras de fundentes en el exterior del crisol arrojan el mismo resultado.

1.9.7. VACIADO

Una vez que el metal ha alcanzado la temperatura requerida de vaciado y ha sido tratado con fundentes o desgasificadores, se procede al proceso de vaciado como se ha establecido, este deberá vaciarse lo más rápidamente posible [27].

A continuación se hacen algunas recomendaciones sobre el proceso de vaciado del metal fundido:

- 1) No es conveniente mantener metales a temperatura de vaciado por un largo período de tiempo dentro del crisol. Esto lleva a reducir la vida útil del crisol y disminuir la calidad del metal vaciado.
- 2) Se considera una mala práctica el mantener el crisol en la posición de vaciado con el horno encendido. Esto conduce a la absorción de gas en el metal fundido, pérdida de metal y la erosión desigual de la pared del crisol, propiciando una falla prematura.
- 3) Cuando se vacíen pequeñas cantidades de metal desde un crisol basculante, asegúrese de que éste sea retornado a su posición vertical entre coladas.
- 4) El equipo para el manejo de los crisoles debe soportar el fondo del crisol

firme y adecuadamente todo el tiempo mientras contenga metal líquido (ver Fig.1.15).



Fig. 1.15. Las pinzas deben encajar perfectamente en el crisol y agarrarlo por la parte inferior [27].

1.10. CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO DEL HORNO DE CRISOL

En la presente sección se dan a conocer sugerencias para el empleo correcto de los materiales de construcción del crisol, su preservación y los pasos para mantener el horno en correcto funcionamiento. Esta sección resulta base para construir el horno y para empezar a operarlo, de igual manera, propone información para desarrollar planes de mantenimiento en el mismo.

1.10.1. CURADO DEL CONCRETO REFRACTARIO Y SUS CUIDADOS

El curado del concreto refractario previene las pérdidas de humedad del refractario recién proyectado durante los cambios químicos asociados con la hidratación del aglomerante de aluminato de calcio [28].

Cuando este es mezclado con agua una reacción exotérmica toma lugar en la cual el agua es liberada en una primera etapa. Debe notarse que las pérdidas de agua desde la superficie del concreto refractario antes de que el cemento este totalmente hidratado puede originar un revestimiento más débil y desprendimiento de polvo de la superficie cuando se pone en operación el

horno. Para evitar ese problema, varios métodos de curado húmedo pueden ser usados para prevenir esto. El refractario expuesto puede ser ligeramente rociado con agua, cubierto con un plástico o rociado con un componente de curado de concreto [28].

El curado húmedo necesita ser ejecutado por un mínimo de 24 horas. El curado es esencial para alcanzar la resistencia máxima en el concreto crudo, lo cual afectará la máxima resistencia del concreto cocido [29].

Es muy conveniente para los concretos refractarios que después de curados se les deje secar al aire el mayor tiempo posible, dando lugar a que se evapore parte del exceso de humedad [29].

Cuando se calienta por primera vez un revestimiento de concreto refractario debe procurarse que la temperatura suba lentamente y por igual. En ningún caso debe subir más de 50 °C por hora. Un programa de calentamiento rápido hace que la cara caliente seque y eleve su temperatura mientras que el resto del hormigón se mantiene frío por la evaporación del agua. La cara caliente dilata causando el cuarteo de la cara fría. Como resultado, el revestimiento de hormigón refractario no es fuerte y se pierden algunas de las ventajas de un revestimiento monolítico [29].

Los siguientes programas de secado sugeridos están basados en revestimientos de un componente para un espesor de 9" (229 mm.) o menor. El programa dependerá de la criticidad, temperatura de operación y tamaño del horno [30].

PROGRAMA "A"

No aumentar la temperatura de los gases calientes en contacto con el concreto refractario a una velocidad mayor a 50 °C por hora. Una vez se alcanza la temperatura de 120 y 260 °C, la temperatura debe mantenerse un mínimo de media hora por pulgada (25 mm) de espesor de concreto refractario.

PROGRAMA “B”

No aumentar la temperatura de los gases calientes en contacto con el hormigón refractario a una velocidad mayor de 40 °C por hora. A las temperaturas de 120, 260 y 540 °C, debe mantenerse la temperatura un mínimo de media hora por pulgada (25 mm) de espesor de concreto refractario.

PROGRAMA “C”

No aumentar la temperatura de los gases calientes en contacto con el hormigón refractario a una velocidad mayor de 28 °C por hora. A las temperaturas de 120, 260, 540 y 815 °C, debe mantenerse la temperatura un mínimo de media hora por pulgada (25 mm) de espesor de concreto refractario.

PROGRAMA “D”

No aumentar la temperatura de los gases calientes en contacto con el hormigón refractario a una velocidad mayor de 17 °C por hora. A las temperaturas de 120, 260, 540 y 815 °C, debe mantenerse la temperatura un mínimo de una hora por cada pulgada (25 mm) de espesor de cemento refractario.

Entre más grande sea el horno, un programa de secado lento es ideal para mantener la integridad del mismo e incrementar su resistencia al choque térmico [30].

1.10.2. PRESERVACIÓN DE LA VIDA DEL REFRACTARIO

Los refractarios pueden fallar debido a errores constructivos y a que no se tomó en cuenta el desempeño térmico y propiedades físicas de estos frente a las condiciones de operación del horno. Un ejemplo de esto es la colocación del quemador: insuficiente espacio en la cámara de combustión, una temperatura de llama muy elevada y que incide en el refractario, grandes gradientes de temperatura entre la superficie caliente y la superficie fría, el

patrón de escape de los gases de combustión; son solo algunos factores que podrían influir en la vida del refractario y que podrían evitarse con un diseño adecuado. Algunos importantes aspectos constructivos son [10]:

- **Correcta colocación del mortero o cemento para unir los ladrillos.** Al colocar los ladrillos sobre el mortero o cemento, este tiende a desplazarse a los lados, el exceso de mezcla debe untarse en todas las direcciones sobre las caras de los ladrillos. Esto brinda estabilidad a la construcción como también propicia un correcto sellado. Debe darse especial atención a la superficie caliente del ladrillo, la cual debe untarse completamente con la mezcla refractaria debido a que se anticipa un alto desgaste de esta superficie por la acción de la escoria metálica o las partículas de polvo que se desplazan a grandes velocidades.
- **Selección del mortero o cemento refractario.** La composición química y física del mortero o cemento refractario debe ser idéntica a la de ladrillos a unir, de otra manera podrían fallar las uniones al elevarse la temperatura o al enfriarse.
- **Espesor de la pared refractaria.** Estabilidad estructural debe tomarse en cuenta al decidir el espesor de la pared. Como buena práctica ingenieril, las paredes de los hornos que han sido elaboradas con ladrillos de 115 mm de espesor no deben ser construidas más allá de un metro de altura sin un anclado apropiado. Desde el punto de vista de la estabilidad de la estructura, el espesor mínimo debe ser de alrededor de 230 mm, el cual podría ser incrementado a medida que se requiera más altura. Al anclar o proveer estabilidad a una pared, debe tomarse en cuenta que la pared puede expandirse o contraerse al elevarse la temperatura y al enfriarse.
- **Soporte estructural.** Generalmente los refractarios se ven sujetos en su posición con una carcasa metálica o mediante un marco metálico. Estos deben asegurar el correcto alineamiento de la pared. Es importante

mencionar que la estructura de soporte no debe sobrecalentarse, para eso debe ser aislada adecuadamente siempre que sea necesario.

La instalación del refractario nunca debe dejarse en manos de albañiles que no tienen más experiencia que la adquirida en el sector construcción. Debe asegurarse que la persona a cargo de la albañilería del horno comprenda el funcionamiento y desempeño de los materiales involucrados a altas temperaturas [10].

Finalmente se mencionan algunos factores clave que inciden en el buen uso e instalación del refractario:

- Reactividad y desgaste se ven incrementados exponencialmente a medida que se incrementa la temperatura.
- Ciclos bruscos de calentamiento causaran fisuras, perdida de resistencia y deformación al material.
- Lo más resistente no siempre es lo mejor.
- La vida del recubrimiento refractario es controlada por el “eslabón más débil”.

1.10.3. PINTURA DE ALTA TEMPERATURA

Las pinturas para la protección de superficies sujetas a temperaturas elevadas, tienen un campo de aplicación definitivamente específico. Son utilizadas para el pintado de caños de escapes, chimeneas, exterior de calderas, hornos, reactores, columnas de destilación y todo equipamiento sujeto a operar a altas temperaturas.

Las resinas de silicona son polímeros considerados como un grupo químico muy particular. Poseen una estructura similar a las orgánicas pero presentan características inorgánicas por la presencia del silicio contenido en su

molécula en combinación con hidrógeno y oxígeno. Cuando son expuestas a temperaturas elevadas, polimerizan, dando como resultado películas que soportan picos de temperatura de hasta 650 °C.

Los pigmentos seleccionados para formular una pintura de estas características deben también resistir la acción de la temperatura sin sufrir alteraciones. Comúnmente son utilizados pigmentos metálicos en forma de polvo o laminillas. Los que más se adaptan a esta finalidad son el zinc para temperaturas hasta 400 °C y el aluminio para temperaturas hasta 600 °C.

Las pinturas para alta temperatura, se presentan en el mercado como pinturas a base de resinas de silicona pura o modificada. Estas pinturas sólo endurecen cuando la superficie pintada entra en operación, formando una película dura y resistente, cuando se llega a una franja de temperatura comprendida entre 180 y 200 °C.

Si no se ha logrado el curado final, el revestimiento no debe quedar expuesto por largos períodos a la intemperie, debido a su baja resistencia física.

Los inconvenientes presentados, con las pinturas de silicona pura, son superados haciendo uso de productos a base de siliconas modificadas con otras resinas tales como: hidrocarbonadas, acrílicas, alquídicas o combinaciones de éstas. Las pinturas a base de siliconas modificadas, así como las de silicona pura, logran su curado final cuando son expuestas a las altas temperaturas de polimerización. La gran diferencia de las pinturas formuladas con siliconas modificadas, es que éstas permiten el transporte de las piezas pintadas y la manipulación durante el montaje, además de poder quedar expuestas por largos períodos a la intemperie sin sufrir alteraciones de resistencia física. Su inconveniente, es que ofrecen una pobre protección anticorrosiva ante la exposición por largos períodos de la película a la humedad y una menor resistencia a las temperaturas elevadas.

2. DISEÑO DEL HORNO DE CRISOL

El diseño del horno es una parte fundamental del proyecto, pues nos brindará un panorama de los requerimientos constructivos posteriores y parámetros de funcionamiento esperados. Implica, entonces, determinar dimensiones, establecer materiales, evaluar requerimientos energéticos y simular su funcionamiento.

2.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Al diseñar el horno de crisol, ciertas consideraciones deben tomarse en cuenta para que este pueda operar de manera óptima [25]:

- Los hornos cilíndricos son más eficientes que los hornos cuadrados.
- El horno debe ser dimensionado acorde al crisol a emplear.
- El diámetro de la cámara interior debe ser entre 150 y 300 mm superior que el diámetro del crisol.
- La altura de la cámara junto con su recubrimiento, debe tener en cuenta el bloque base en el cual se colocará el crisol para evitar que la flama del quemador incida directamente sobre él, además, debe permitirse un espacio entre 25 y 50 mm entre el borde superior del crisol y la tapa.
- El orificio del quemador debe colocarse en el fondo del horno por debajo del crisol y debe ser tangente a la pared de éste.

El elemento más crítico en el diseño y construcción de un horno de crisol es su recubrimiento refractario. Este permite calentamientos uniformes y baja tasa de pérdida de calor.

2.2. PARÁMETROS DE DISEÑO

Se llaman parámetros de diseño a aquellos elementos cuya selección permite el diseño de otros elementos dependientes de ellos. Generalmente la selección de los parámetros de diseño está bajo el criterio del diseñador, su experiencia y presupuesto. Los parámetros de diseño no son fijos y solo sirven como base para el diseño, estos parámetros pueden cambiar si los resultados no son los esperados.

En el horno de crisol se identifican los siguientes parámetros de diseño:

- Metal a fundir.
- Crisol a emplear.
- Temperatura máxima de operación.
- Tiempo de operación.
- Ubicación del horno y flujo de aire.

El metal a fundir ya ha sido antes definido y resulta ser el objetivo primordial del horno. Estos son aluminio y cobre.

Tabla 2.1. Parámetros de diseño para el horno de crisol.

Parámetro	Valor	
	Volumen, cm ³ /litro	Masa, kg/lb
Carga a fundir		
Aluminio	400/0.40	1.035/2.28
Bronce	250/0.25	2.040/4.50
Crisol		
Tipo/material	A2/grafito	
Dimensiones (Fig. 2.1)	H: 110 mm x D: 102 mm x d: 65 mm	
Temperatura Máxima de operación	1100°C	
Tiempo de funcionamiento máx.	<8 h	
Ubicación prevista	Recinto cerrado	
Flujo de aire en el recinto	Aire quieto	

El crisol se selecciona tomando en cuenta la cantidad de metal a fundir y la necesidad de que este no reaccione con el metal, los fundentes y

desgasificadores. Crisoles de grafito resultan ser adecuados por ser neutros y no reaccionar con el aluminio ni el bronce.

La temperatura máxima de operación se define por el metal cuyo punto de fusión es el más elevado. En este caso el cobre determina la temperatura de operación máxima.

El tiempo de operación, al ser este un horno didáctico y de investigación, y cuyo uso será eventual se selecciona como intermitente y no más de 8 horas por día (lo que toma en cuenta el precalentamiento del horno).

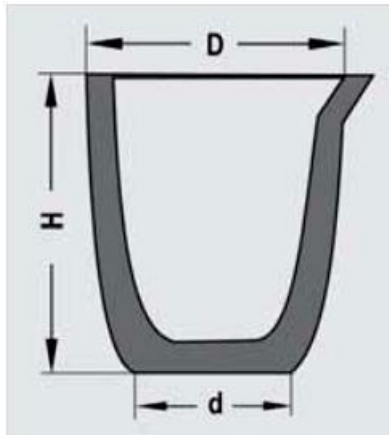


Fig. 2.1. Dimensiones de referencia del crisol.

La ubicación del horno se establece dentro de la escuela de ingeniería mecánica en el área de tratamientos térmicos. Así, dentro del recinto el aire estará quieto a temperatura ambiente.

El resumen de los parámetros de diseño se presenta en la Tabla 2.1.

2.3. DIMENSIONES DEL HORNO

Establecidos los parámetros se procede a determinar el tamaño del horno.

Diámetro interior del horno = D_{int}

D_{int} = Diámetro del crisol + Espacio libre sugerido

$$D_{int} = D + \frac{150 + 300}{2} \text{ mm}$$

$$D_{int} = 102 \text{ mm} + 225 \text{ mm} = 327 \text{ mm} \cong 330 \text{ mm}$$

Altura interior del horno = H_{int}

$$H_{int} = H + \text{pedestal}^* + \text{Espacio libre sugerido}$$

$$H_{int} = 110 \text{ mm} + 128 \text{ mm} + 50 \text{ mm} = 288 \text{ mm} \cong 300 \text{ mm}$$

*Nota: Se requiere de un pedestal o base para soportar el crisol y evitar que la flama del quemador incida directamente en este. El pedestal estará hecho de cemento refractario y la altura se establece en 128 mm. Este valor es arbitrario y estimado suficiente para proteger el crisol de la llama (ver Fig. 2.1).

Para determinar las dimensiones exteriores es necesario establecer el recubrimiento interior y el espesor de la carcasa.

Para el recubrimiento interior se utilizará cemento refractario de 2 pulgadas de espesor. El espesor del recubrimiento basta para proteger al aislante y darle rigidez a la estructura [20 y 31].

Además, del recubrimiento de cemento refractario se colocará una manta cerámica aislante que rodeará a este por la cara fría. Para la aplicación se recomiendan 2 pulgadas de espesor (espesor provisto de fábrica) siendo esta una configuración económica y apropiada para la aplicación [20].

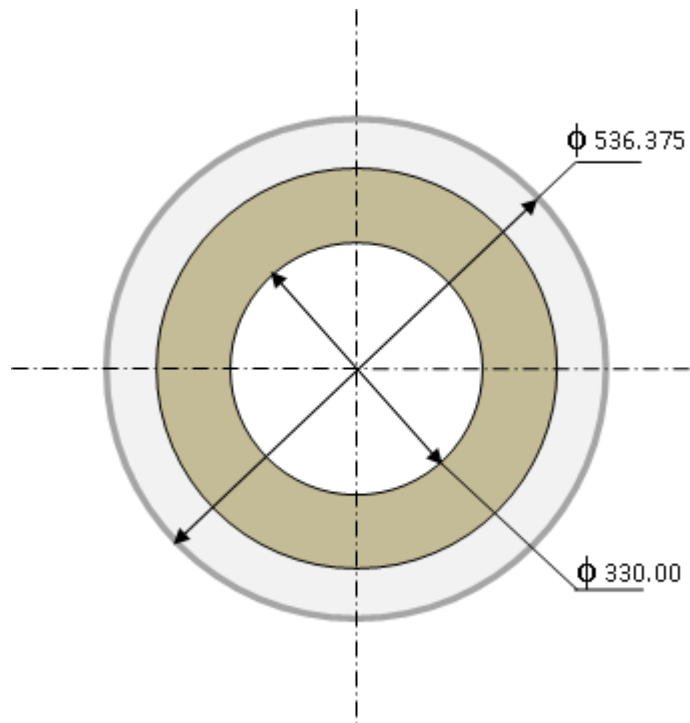


Fig. 2.2. Diagrama que muestra el diámetro interior y exterior del horno (cotas en mm). Notar las diferentes capas que conforman el recubrimiento.

Finalmente, para el espesor de la carcasa se selecciona lámina negra de 1.59 mm (1/16 pulgada) de espesor. En la Fig.2.2 se presenta la configuración.

Con respecto a la altura del horno, debe tomarse en cuenta la base hecha de cemento refractario de 90 mm de espesor. La tapadera y la cubierta del horno se fabricarán de cemento refractario y manta cerámica respectivamente, y tendrán la forma como se presenta en la Fig. 1.2. El espesor adecuado se determinará mediante un análisis de transferencia de calor, sin embargo, para un estimado se establece de 50 mm la tapadera y 75 mm la cubierta. Por lo tanto, la forma final se presenta en la Fig. 2.3.

Estas medidas básicas servirán de parámetro para realizar el análisis termodinámico: por lo tanto, se entiende que estas medidas están sujetas a cambio y dependientes de los resultados.

Una vez establecidas las dimensiones se procederá a realizar los requerimientos energéticos del horno mediante el cálculo del calor requerido para la fusión del metal y las pérdidas a través de las paredes del horno.

2.4. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS

2.4.1. ENERGÍA REQUERIDA PARA LLEVAR A CABO LA FUSIÓN DEL METAL

La energía necesaria para fundir cualquier metal puede simplificarse si se supone que su conductividad térmica no varía en cierto intervalo de temperaturas. El error introducido debido a la suposición resulta ser pequeño para esta aplicación en específico.

Para el cálculo se toma en cuenta los diferentes calores específicos de los elementos en sus diferentes estados así como el calor latente de fusión requerido para cambiar de estado el material. El procedimiento y los resultados se presentan a continuación.

PARA EL ALUMINIO

Mediante el cambio de temperatura del elemento en análisis se puede determinar el calor necesario para fundir el material, para ello se ocupa la ecuación 2.1 [32].

$$Q = m C_p \Delta T \quad (2.1)$$

Calor requerido para llevarlo al punto de fusión:

$$Q_{Al1} = m_{Al} C_{p-Als} \Delta T = 1.035 \text{ kg} \cdot 900 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 660^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C} = 589.64 \text{ kJ}$$

A esto se le agrega el calor latente de fusión

$$Q_{Al2} = m_{Al} h_{Alf} = 1.035 \text{ kg} \times 10.79 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \times \frac{\text{mol}}{0.027 \text{ kg}} = 413.62 \text{ kJ}$$

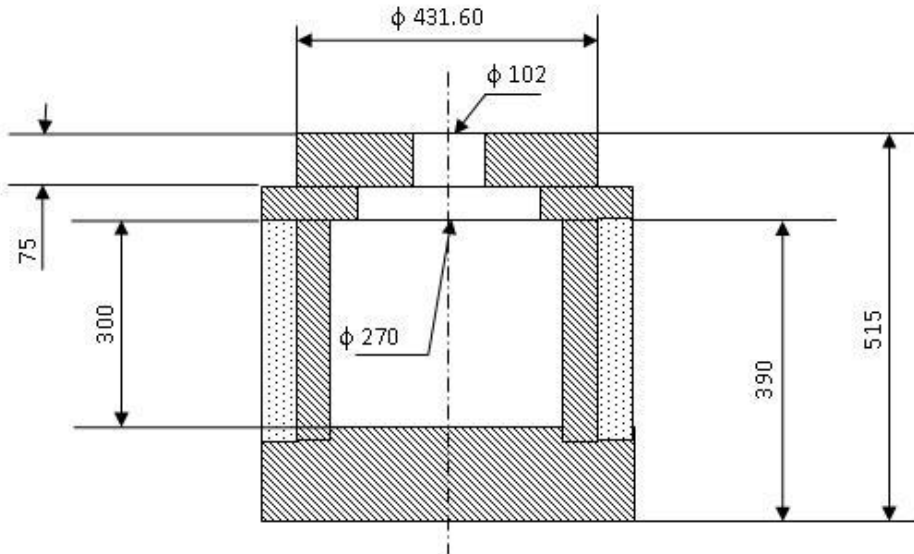


Fig. 2.3. Esquema de un corte transversal del horno que muestra las dimensiones básicas de este, cotas en mm.

Si se sobrecalienta el aluminio hasta llevarlo a la temperatura de colada de 750°C:

$$Q_{Al3} = m_{al} C_{p-Al} \Delta T = 1.035 \text{ kg} \cdot 1089 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 750^\circ\text{C} - 660^\circ\text{C} = 101.44 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, el calor total requerido para la fundición del aluminio es:

$$Q_{Al} = Q_{Al1} + Q_{Al2} + Q_{Al3} = 589.64 + 413.62 + 101.44 \text{ kJ}$$

$$Q_{Al} = 1166.08 \text{ kJ}$$

PARA EL COBRE

Calor requerido para llevarlo al punto de fusión:

$$Q_{Cu1} = m_{Cu} C_{p-CuS} \Delta T = 2.04 \text{ kg} \cdot 385 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1080^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C} = 827.03 \text{ kJ}$$

A esto se le agrega el calor latente de fusión

$$Q_{Cu2} = m_{Cu} h_{Cuf} = 2.04 \text{ kg} \times 13.10 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \times \frac{\text{mol}}{0.0635 \text{ kg}} = 420.85 \text{ kJ}$$

Si se sobrecalienta el cobre hasta llevarlo a la temperatura de colada de 1100°C:

$$Q_{Cu3} = m_{Cu} C_{p-CuL} \Delta T = 2.04 \text{ kg} \times 430 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times (1100 - 1080) = 17.54 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, el calor total requerido para la fundición del cobre es:

$$Q_{Cu} = Q_{Cu1} + Q_{Cu2} + Q_{Cu3} = 827.03 + 420.85 + 17.54 \text{ kJ}$$

$$\mathbf{Q_{Cu} = 1265.42kJ}$$

Esta es la cantidad de energía mínima necesaria para fundir el metal dentro del horno. Sin embargo, para conocer la energía a suministrar no basta con conocer estos valores ya que dentro del horno existen muchas pérdidas a través de las paredes que impiden que la energía proveniente de la reacción del combustible sea transferida totalmente al metal. Esto implica mayor consumo de combustible por el horno. A continuación se consideran estas pérdidas.

2.4.2. PÉRDIDAS AL AMBIENTE

Bajo condiciones estables de operación, con una temperatura interna de 1100°C las pérdidas del horno darán un parámetro de cuanto combustible será necesario para mantener el horno a esa temperatura.

PÉRDIDAS POR CONDUCCIÓN, CONVECCIÓN Y RADIACIÓN

Las pérdidas por conducción se producen por:

- Las paredes.
- La tapadera y cubierta.
- El fondo del horno.

Las pérdidas por convección se producen en las superficies expuestas al aire frío del ambiente circundante. Y las pérdidas por radiación se producen en toda superficie con alta emisividad, siendo considerable a altas temperaturas.

Estas pérdidas se consideran por secciones:

LAS PAREDES

Las paredes del horno forman un cilindro hueco de paredes compuestas (ver Fig. 2.4). Asumiendo transferencia de calor unidireccional en dirección al radio de la pared y una temperatura supuesta a 300 °C (obtenida mediante simulación), se realiza un diagrama para visualizar la transferencia de calor.

Si las condiciones se cumplen puede utilizarse la ecuación de transferencia de calor para estado estable, por lo tanto la pérdida de calor se obtiene a partir de la ecuación 2.2 [32]:

$$Q_{\text{cond}} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Para un cilindro de pared compuesta la ecuación 2.2 se transforma en:

$$Q_{\text{cond}} = 2\pi L \frac{\Delta T}{R} \quad (2.3)$$

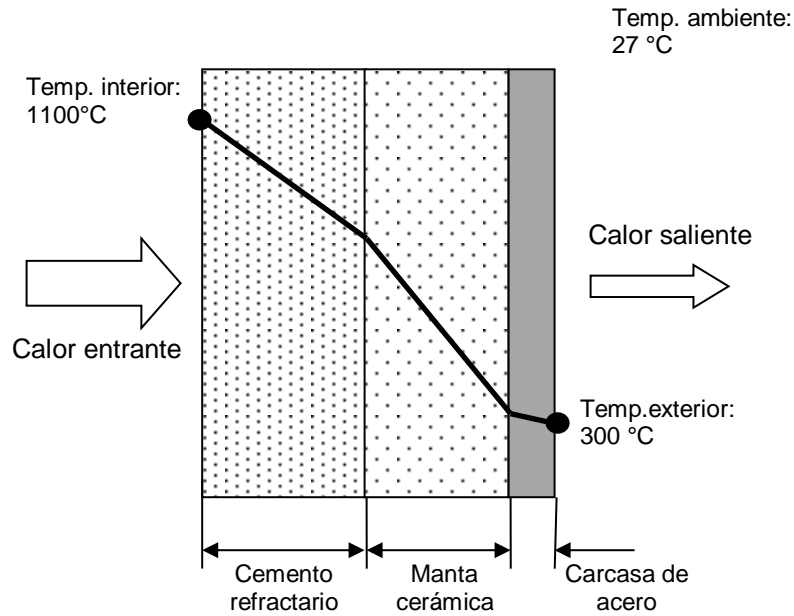


Fig. 2.4. Diagrama que ilustra la transferencia de calor por las paredes del horno.

Donde R es la resistencia térmica por capa del horno y está definida como:

$$R = \frac{\ln(R_o R_i)}{K} \quad (2.4)$$

Por lo tanto, los valores de las resistencias por capa se determinan:

Cemento Refractario: $R_1 = \frac{\ln 215.8 \ 165}{1.1 \text{ W m}^\circ\text{C}} = 0.2440 \text{ m}^\circ\text{C W}$

Manta cerámica: $R_2 = \frac{\ln 266.6 \ 215.8}{0.3 \text{ W m}^\circ\text{C}} = 0.7046 \text{ m}^\circ\text{C W}$

Carcasa metálica: $R_3 = \frac{\ln 268.19 \ 266.6}{53 \text{ W m}^\circ\text{C}} = 112.194 \times 10^{-6} \text{ m}^\circ\text{C W}$

El efecto de la convección se determina al conocer los coeficientes de transferencia de calor “h” de las superficies. Para su cálculo se hacen las

siguientes consideraciones: Se supone una temperatura interior de 1100 °C y aire exterior quieto a la temperatura ambiente de 27 °C. Se supone una presión externa igual a la atmosférica.

Al interpolar, usando las tablas de aire que aparecen en el libro Transferencia de Calor de Cengel, Y, (2004), las propiedades del aire a la temperatura de la película entre la carcasa metálica y el aire circundante a temperatura ambiente ($T_f = T_s - T_\infty = 300 - 27 = 273$ °C) son [32]:

$$k_{273\text{ °C}} = 0.04248 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{°C}}$$

$$\nu_{273\text{ °C}} = 4.401 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Pr}_{273\text{ °C}} = 0.6940$$

$$\beta = 1/T_f = 1/(546 \text{ K})$$

Se supone el horno como un cilindro de 560 mm de altura (0.56 m). Por lo tanto, puede determinarse el número de Grashof como:

$$\text{Gr}_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \quad (2.5)$$

$$\text{Gr}_L = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \frac{1}{546 \text{ K}} 573-300 \text{ K} (0.56)^3}{(4.401 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}})^2} = 794,167,899.20$$

A continuación se verifica si el cilindro puede analizarse como una placa plana vertical [6].

$$D \geq \frac{35 L}{\text{Gr}_L^{1/4}} \quad (2.6)$$

$$D \geq \frac{35 \cdot 0.56 \text{ m}}{794.168 \times 10^6} = 0.117 \text{ m}$$

Y como $D = 0.536 \text{ m}$. Por lo tanto, sí cumple, así que se analiza como una placa plana vertical. Por consiguiente, se obtiene el número de Rayleigh:

$$Ra_L = Gr_L Pr \quad (2.7)$$

$$Ra_L = 794.168 \times 10^6 \cdot 0.6940 = 551,152,522$$

Para una placa plana vertical, el número de Nusselt se determina [32]:

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{1 + (0.492 Pr)^{9/16}} \quad (2.8)$$

$$Nu = 0.825 + \frac{0.387 (551.15 \times 10^6)^{1/6}}{1 + (0.492 \cdot 0.6940)^{9/16}} = 101.979$$

El número de Nusselt también es igual a la expresión siguiente:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad (2.9)$$

Por lo tanto, se despeja y se obtiene "h":

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = \frac{101.979 \cdot 0.04248 \text{ W m} \cdot \text{°C}}{0.56 \text{ m}} = 7.736 \text{ W m}^2 \cdot \text{°C}$$

Con este valor puede determinarse la resistencia por convección como sigue:

$$R = \frac{1}{h \cdot A} \quad (2.10)$$

Dónde:

A: Área superficial de las paredes del cilindro y en esta ocasión se designa A_s para evitar confusiones:

$$R_4 = \frac{1}{h \cdot A_s} = \frac{1}{7.736 \text{ W m}^2 \cdot \text{°C} \pi \times 0.536 \text{ m} \times 0.427 \text{ m}} = 0.1798 \text{ °C W}$$

La transferencia de calor por las paredes mediante conducción y convección se determina:

$$Q_{\text{cond}} = 2\pi L \frac{\Delta T}{R} = 2\pi \cdot 0.300 \text{ m} \frac{1100 - 300 \text{ °C}}{0.2440 + 0.7046 + 112.194 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{°C W}}$$

$$Q_{\text{cond}} = 1589.48 \text{ W}$$

$$Q_{\text{conv}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{conv}}} + \frac{300 - 27 \text{ °C}}{0.1798 \text{ °C W}} = 1518.35 \text{ W}$$

Finalmente, se puede determinar la transferencia de calor por radiación mediante la ecuación [32]:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon A_s \sigma T_s^4 - T_{\text{alred}}^4 \quad (2.11)$$

La emisividad de la superficie puede determinarse si se toma en cuenta que se planea pintar la superficie de la carcasa metálica con pintura anti-

corrosiva de aluminio resistente al calor, la emisividad común para este tipo de pinturas está entre 0.35 y 0.40. Por lo tanto:

$$Q_{\text{rad}} = 0.35 \pi \times 0.536 \text{ m} \times 0.427 \text{ m} \times 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^2 \cdot \text{K}^4 (573^4 - 300^4 \text{K}^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = 1422.62 \text{ W}$$

La transferencia de calor total al ambiente por las paredes se obtiene al sumar individualmente las aportaciones provenientes de las pérdidas por conducción, convección y radiación respectivamente:

$$Q_{\text{pared}_{\text{tot}}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} = 1589.48 \text{ W} + 1518.35 \text{ W} + 1422.62 \text{ W} = \mathbf{4530.45 \text{ W}}$$

$$Q_{\text{pared}_{\text{tot}}} = \mathbf{4530.45 \text{ W}}$$

Una vez obtenidas las pérdidas por las paredes, se procede a obtener las pérdidas por la cubierta y la tapadera:

LA TAPADERA Y CUBIERTA

Para determinar la transferencia de calor por conducción en esta sección del horno es necesario conocer el área efectiva.

Mediante la Fig. 2.5 puede determinarse las siguientes dimensiones para la tapadera y la cubierta:

- Cubierta:
 - Espesor: 50 mm
 - Diámetro interno: 270 mm
 - Diámetro externo: 536.37 mm.
- Tapadera:
 - Espesor: 75 mm
 - Diámetro interno: 102 mm
 - Diámetro externo: 431.60 mm.

Por lo tanto, el área efectiva será aquella que esté directamente en contacto con los gases de combustión. El resto del área colindante con las paredes se supondrá aislada. El área efectiva se presenta en la Fig. 2.5 y el esquema de las superficies expuestas a los gases de escape se presentan en la Fig. 2.6.

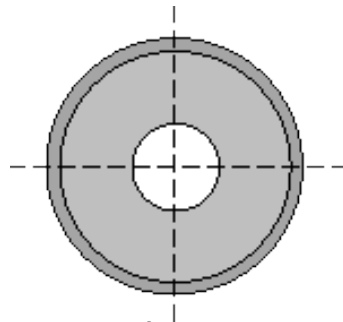


Fig. 2.5. Área efectiva de transferencia de calor de la tapadera y la cubierta. El color gris oscuro representa el contacto tapadera-cubierta y el gris claro únicamente la cubierta.

En el apartado anterior se tomó en cuenta la aportación a la transferencia de calor al exterior mediante convección y radiación de la superficie cilíndrica circundante incluidas la cubierta y la tapadera. Por otro lado, el aporte de las superficies superiores calientes expuestas al ambiente de la tapadera y la cubierta se evalúan.

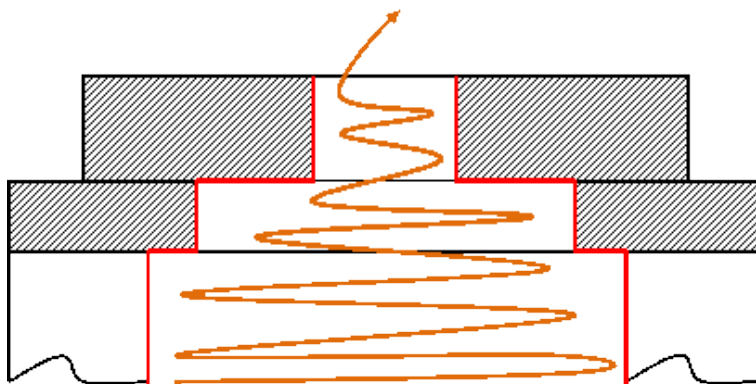


Fig. 2.6. Esquema de la trayectoria supuesta de los gases de escape al salir del horno de crisol. Notar las líneas rojas, las cuales representan las superficies calientes en contacto directo con los gases.

Como se muestra en la Fig. 2.7 el área efectiva está compuesta por un anillo formado por el traslape tapadera-cubierta y otro anillo más grueso que pertenece a la cubierta. Determinando las áreas encontramos:

$$\text{Anillo de traslape} = A_{tc1} = \frac{\pi}{4} 330^2 - 270^2 \text{ mm}^2 = 28,274.33 \text{ mm}^2 = \mathbf{0.02827 \text{ m}^2}$$

$$\text{Anillo cubierta} = A_{tc2} = \frac{\pi}{4} 270^2 - 102^2 \text{ mm}^2 = 49,084.24 \text{ mm}^2 = \mathbf{0.04910 \text{ m}^2}$$

Para el caso del área compuesta por el traslape de la tapadera y la cubierta, si se supone aislada la circunferencia exterior tanto de la cubierta como de la tapadera, podemos ver que es un caso de transferencia de calor unidireccional a través de una pared plana, por lo tanto, se determina la transferencia de calor como sigue:

A partir de la ecuación 2.2 se puede determinar que la ecuación a emplear para este caso, la cual incluirá la transferencia de calor por convección es:

$$Q = \frac{\Delta T}{\Sigma R}$$

Donde las resistencias se determinan:

$$\text{Resistencia tapadera} = R_4 = \frac{\Delta Y_{tap}}{k_{cem} A_{tc1}} = \frac{0.05 \text{ m}}{1.1 \text{ W m}^\circ\text{C} \cdot 0.02827 \text{ m}^2}$$

$$R_4 = 1.47 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$\text{Resistencia cubierta} = R_5 = \frac{\Delta Y_{cub}}{k_{man} A_{tc1}} = \frac{0.075 \text{ m}}{0.3 \text{ W m}^\circ\text{C} \cdot 0.02827 \text{ m}^2} = 8.84 \text{ }^\circ\text{C W}$$

Para calcular el efecto de la convección es imprescindible determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección “h”. Para el caso de una

placa plana circular con la superficie superior caliente expuesta al ambiente, se procede:

Se esperan temperaturas de 300°C en la superficie del anillo de traslape y la temperatura del ambiente de los alrededores se estima en 27 °C. Por lo tanto, la temperatura de la película ($T_f = T_s - T_\infty = 300 - 27 = 273 \text{ °C}$).

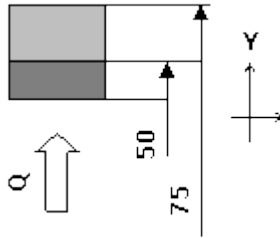


Fig. 2.7. Esquema de la trayectoria supuesta de los gases de escape al salir del horno de crisol. Notar las líneas rojas, las cuales representan las superficies calientes en contacto directo con los gases.

Las propiedades del aire a la temperatura de la película, luego de interpolar [6]:

$$k_{273 \text{ °C}} = 0.04248 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}}$$

$$\text{Pr}_{273 \text{ °C}} = 0.6940$$

$$v_{273 \text{ °C}} = 4.401 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\beta = 1/T_f = 1/(546) \text{ K}$$

Se determina la longitud característica de la superficie caliente:

$$L_c = \frac{A_{tc1}}{p} = \frac{0.02827 \text{ m}^2}{\frac{\pi}{2}(0.330 \text{ m})} = 0.0545 \text{ m}$$

Con esto puede determinarse el número de Rayleigh

$$\text{Ra}_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{v_{@173}^2} \text{Pr}_{@173}$$

$$Ra_L = \frac{9.81 \text{ m s}^{-2} \cdot 1 \cdot 546 \text{ K} \cdot 300-27 \text{ K} \cdot 0.0545^3}{4.401 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} \cdot 0.6940 = 285,083.26$$

El número de Nusselt para el cual entra ese valor de Rayleigh en placas planas con superficie superior caliente se establece como [32]:

$$Nu = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (2.12)$$

$$Nu = 0.54 \cdot 285,083.26^{1/4} = 12.477$$

$$h = \frac{Nu \cdot k_{@173}}{L_c} = \frac{12.477 \cdot 0.04248 \text{ W m} \cdot ^\circ\text{C}}{0.0545 \text{ m}} = 9.72 \text{ W m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, se determina la resistencia por convección:

$$\text{Resistencia convección} = R_6 = \frac{1}{hA_{tc1}} = \frac{1}{9.72 \text{ W m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot (0.02827 \text{ m}^2)}$$

$$\frac{1}{hA_{tc1}} = 3.64 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Finalmente se calcula la transferencia de calor en la sección:

$$Q_{\text{cond_tap}} = \frac{1100-27 \text{ } ^\circ\text{C}}{1.47+8.84+3.64 \text{ } ^\circ\text{C W}} = 76.92 \text{ W}$$

$$Q_{\text{rad_tap}} = 0.94 \cdot 0.02827 \text{ m}^2 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 573^4 - 300^4 \text{ K}^4 = 150.22 \text{ W}$$

$$Q_{tc1} = 76.92 + 150.22 \text{ W} = \mathbf{227.14 \text{ W}}$$

De manera similar se efectúa el cálculo de transferencia de calor para el área de la cubierta expuesta a los gases de combustión. Es de tomar en cuenta que en esta ocasión, no se considera la resistencia de la tapadera:

$$\text{Resistencia cubierta} = R_7 = \frac{\Delta Y_{\text{cub}}}{k_{\text{man}} A_{\text{tc}2}} = \frac{0.075 \text{ m}}{0.3 \text{ W m} \cdot \text{°C} \cdot 0.0491 \text{ m}^2}$$

$$\frac{\Delta Y_{\text{cub}}}{k_{\text{man}} A_{\text{tc}2}} = 5.09 \text{ °C W}$$

$$L_c = \frac{A_s}{p} = \frac{0.0491 \text{ m}^2}{\frac{\pi}{2} \cdot 0.27 \text{ m}} = 0.1158 \text{ m}$$

$$Ra_L = 2,729,112.40$$

$$Nu = 21.95$$

$$h = 8.05 \text{ W m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$\text{Resistencia convección} = R_8 = \frac{1}{h A_{\text{tc}1}}$$

$$\frac{1}{h A_{\text{tc}1}} = \frac{1}{8.05 \text{ W m}^2 \cdot \text{°C} (0.0491 \text{ m}^2)} = 2.53 \text{ °C/W}$$

$$Q_{\text{cond_cub}} = \frac{1100 - 27 \text{ °C}}{5.09 + 2.53 \text{ °C W}} = 140.82 \text{ W}$$

$$Q_{\text{rad_cub}} = 0.94 \cdot 0.0491 \text{ m}^2 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot (573^4 - 300^4) = 260.91 \text{ W}$$

$$Q_{\text{tc}2} = 140.82 + 260.91 \text{ W} = \mathbf{401.73 \text{ W}}$$

Una vez obtenido los datos de ambas superficies en análisis se obtiene la pérdida total por conducción de calor de la tapadera y de la cubierta:

$$Q_{\text{cond_tc}} = 227.14 + 401.73 \text{ W} = \mathbf{628.87 \text{ W}}$$

Para determinar el espesor óptimo se evalúan los mismos parámetros para diferentes espesores, los resultados se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Pérdida de calor para diferentes espesores de cubierta.

Espesor de la cubierta, mm/pulg	Calor perdido, W
25/1	514.74
51/2	442.02
75/3	401.73
102/4	374.40

En la Tabla 2.2 se presenta que a medida que el espesor aumenta, existe una mayor reducción en la pérdida de calor, sin embargo, la pérdida de calor no es proporcional al espesor de la cubierta y no existen reducciones significativas a medida que se incrementa el espesor, por otro lado, el costo del recubrimiento si aumenta en proporción al espesor y debe evitarse elevarlo innecesariamente.

Mediante el simulador Quickfield, se logró determinar el promedio de la temperatura esperada para la superficie de los espesores de 102, 75 y 51 mm y las temperaturas máximas en la superficie cerca del flujo de calor.

Tabla 2.3. Temperaturas esperadas en la cubierta del horno.

Espesor de la cubierta, mm/pulg)	Temperatura prom, °C	Temperatura máx, °C
51/2	359.02	620.00
75/3	357.55	525.00
102/4	351.22	480.00

Se concluye entonces que el espesor de 75 mm es aceptable y este es el que se escoge.

Aun cuando la tapadera y la cubierta presentan una pequeña pérdida de calor hacia el ambiente en comparación de las paredes, la abertura de la

cubierta del horno es aquella que más presenta pérdidas de calor por radiación hacia el exterior.

Si se supone que la abertura hacia el ambiente representa un cuerpo negro, el cálculo de transferencia de calor hacia los alrededores resulta [32]:

$$Q_{\text{rad_tc}} = \epsilon A_j F_{i \rightarrow j} \sigma (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4) \quad (2.13)$$

Dónde:

$F_{i \rightarrow j}$: Factor de radiación para aberturas (ver anexo 4)

A_j : Área de la abertura

Luego de obtener el valor de gráficos:

$$Q_{\text{rad_tc}} = 0.94 \cdot 8.171 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 0.59 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot (1373^4 - 300^4 \text{ K}^4)$$

$$Q_{\text{rad_tc}} = \mathbf{872.25 \text{ W}}$$

Por lo tanto, la pérdida de calor total en este elemento se determina:

$$Q_{\text{tc}} = 628.87 + 872.25 \text{ W} = \mathbf{1501.12 \text{ W}}$$

Base del horno

La base del horno se puede analizar como una placa plana circular la cual está hecha de cemento refractario (ver Fig. 2.8). El área de transferencia de calor es: $A_f = \pi \cdot 4 \cdot 0.33 \text{ m}^2 = 0.0855 \text{ m}^2$

A partir del diagrama se calcula la resistencia:

Resistencia cemento:

$$R_g = \frac{0.09 \text{ m}}{1.1 \text{ W m} \cdot \text{°C} \cdot 0.0855 \text{ m}^2}$$

$$R_g = 0.957 \text{ °C/W}$$

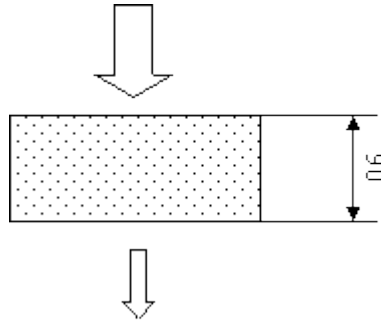


Fig. 2.8. Diagrama de transferencia de calor para el fondo del horno.

La convección en este caso no se tomará en cuenta debido a que la base del horno estará en contacto con el piso. Además, se supone una temperatura inferior promedio de 300°C. Con estos valores, la transferencia de calor puede determinarse así:

$$Q_{\text{cond_fond}} = \frac{1100-300 \text{ °C}}{0.957 \text{ °C W}} = \mathbf{835.94 \text{ W}}$$

Con respecto a la radiación, se toma en cuenta la superficie en contacto con el piso:

$$Q_{\text{rad_fond}} = 0.94 \cdot 0.0855 \text{ m}^2 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot (573^4 - 300^4 \text{ K}^4) = \mathbf{454.33 \text{ W}}$$

Así que el total de calor perdido en el fondo es:

$$Q_{\text{fond}} = 835.94 + 454.33 = \mathbf{1290.27 \text{ W}}$$

Las pérdidas totales del horno en operación una vez alcanzada la temperatura máxima son:

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{pared_tot}} + Q_{\text{tc}} + Q_{\text{fond}} = 4530.45 + 1501.12 + 1290.27\text{W} = 7321.84 \text{ W} \cong \mathbf{7322 \text{ W}}$$

PÉRDIDAS EN LOS GASES DE ESCAPE

Ante los diferentes combustibles disponibles, se selecciona el gas propano por los criterios siguientes:

- Fácil adquisición y bajo precio en comparación con el diésel.
- Ya viene en un contenedor adecuado para mantener el gas de forma segura.
- Menos contaminante que el diésel y tiende a tener una combustión completa.
- El quemador resulta ser más sencilla su construcción, ya que se ahorra la necesidad de adquirir una bomba.

Parámetros útiles del gas propano para realizar los cálculos:

Composición química: C_3H_8

Masa molar: 44 g/mol

PCI: 46,350 kJ kg \cong 86,211 kJ/m³

Densidad:

Densidad relativa 15.56°C (líquido)	Kg/m ³	500-510
Densidad relativa 15.56°C a 1 atm (gas)	Kg/m ³	1.86

Ahora bien, es importante conocer la cantidad de aire requerido para que el combustible se quemara apropiadamente:

De la Tabla 1.6 se obtiene que se necesitan 15.68 kg de aire por kg de propano para que ocurra la combustión estequiométrica. Sin embargo, se recomienda 10% de aire en exceso para asegurar la combustión completa. Es

de tener cuidado de no aumentar el exceso de aire de manera innecesaria, pues eso genera una disminución sensible del calor suministrado por el combustible. A partir de lo anterior se concluye que se requiere de **17.25 kg de aire** por kg de propano para una operación eficiente.

Las mayores pérdidas de calor en un horno se deben a los gases de escape, estos salen del horno con un contenido energético que dependerá de la eficiencia del horno; es decir, de la capacidad del horno para transferir esa energía a la carga y/o a las paredes. Usualmente los hornos de crisol tienen una eficiencia baja, entre 7 y 19% [33].

Generalmente la temperatura con que salen los gases de escape debe medirse cuando el horno está en operación. Esta temperatura da un parámetro de cuan eficiente es el horno para utilizar la energía del combustible. Ahora bien, como no se conoce dicha temperatura, debido a que el horno no se ha fabricado, se estimará una temperatura de salida promedio que nos dará un aproximado de la eficiencia por kg del combustible quemado.

$$Q_{\text{escape}} = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot 100\%}{\text{PCI}} \quad (2.14)$$

dónde:

m = masa de los gases de combustión aire + combustible = 17.25+1 kg=18.25 kg

C_p = Calor específico del aire a la temperatura esperada (700 °C) = 1,135 J kg·°C

ΔT = Diferencia de temperaturas = 700-27 °C=673 °C

PCI = Poder calorífico inferior del propano = 46,350 kJ kg

$$Q_{\text{escape}} = \frac{18.25 \text{ kg} \times 1.135 \text{ kJ kg} \cdot \text{°C} \times 673 \text{ °C} \times 100\%}{46,350 \text{ kJ kg}} = 30\%$$

Esto significa que del 100% de energía disponible, 30% es lanzado al ambiente en los gases de escape por kg de combustible. Como es un valor por kg de combustible este se añadirá en la forma de un factor y se define como: $\eta_{\text{comb}} = 1 - 0.30 = 0.70$, el cual será el rendimiento del combustible.

2.4.3. POTENCIA DEL QUEMADOR

Usualmente para poder conocer cuánto calor es suministrado por un quemador es necesario saber el flujo de combustible que se le provee a este, el cual debe ser lo suficiente para proveer calor a la carga y afrontar las pérdidas de energía a través del recubrimiento del horno y en los gases de escape. Por lo tanto, el quemador debe ser capaz de suministrar al menos:

$$E_{\text{quemador}} = \frac{Q_{\text{tot}} + Q_{\text{carga}}}{\eta_{\text{comb}}} \quad (2.15)$$

Se espera que la carga pueda fundirse en <15 minutos una vez se alcance la temperatura de fusión. Por lo tanto, el flujo de calor requerido es:

$$Q_{\text{carga}} = \frac{1265.42 \text{ kJ}}{900 \text{ s}} = 1.406 \text{ kJ/s}$$

Entonces, el flujo másico mínimo del quemador m_{min} en condiciones de operación es:

$$m_{\text{min}} = \frac{7.322 + 1.406 \text{ kJ/s}}{46,350 \text{ kJ kg} (0.7)} = 0.188 \times 10^{-3} \text{ kg s} = 0.414 \times 10^{-3} \text{ lb/s}$$

Este último valor en libras, como dato para tener una noción acorde a lo acostumbrado, la cantidad de gas a utilizar es: 1.49 lb/hr; es decir, un tanque de 25 lb se acabaría en 16 horas y 46 minutos aproximadamente.

En flujo volumétrico (Φ_{\min}) de gas es:

$$\Phi_{\min} = 0.188 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{m}^3}{1.86 \text{ kg}} = 101.075 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.101 \text{ l/s}$$

Usualmente los proveedores requieren la potencia del quemador o su flujo en horas en kW, kcal/h o BTU/h. Por lo tanto, la potencia y el flujo en horas se especifican a continuación:

$$E_{\text{quemador}} = \frac{7.322 + 1.406 \text{ kW}}{0.7} = 12.468 \text{ kW}$$

$$E_{\text{quemador}} = 12.468 \text{ kW} \times \frac{860.421 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{1 \text{ kW}} = 10,728.22 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 42,544.49 \frac{\text{BTU}}{\text{h}}$$

$$\Phi_{\min} = 101.075 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 0.364 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 12.84 \frac{\text{pie}^3}{\text{h}}$$

Con este resultado es posible determinar en cuanto tiempo se calentará el horno.

2.4.4. TIEMPO DE PRE-CALENTAMIENTO DEL HORNO

Para determinar el tiempo aproximado de pre-calentamiento del horno hasta alcanzar la temperatura de fusión de la carga, es necesario conocer el

flujo de calor hacia las paredes. Para ello se obtiene el área superficial interior del horno como sigue:

$$\text{Área superficial paredes} = \pi D_{\text{int}} L_{\text{pared}}$$

$$\text{Área superficial paredes} = \pi \frac{330 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}}{(1000 \text{ mm})^2} = 0.311 \text{ m}^2$$

$$\text{Área tapadera} = A_{\text{tc1}} + A_{\text{tc2}} = 0.0134 \text{ m}^2 + 0.0491 \text{ m}^2 = 0.0625 \text{ m}^2$$

$$\text{Área fondo} = A_f = 0.0855 \text{ m}^2$$

$$\text{Área superficial total} = A_{\text{ST}} = 0.311 + 0.0625 + 0.0855 \text{ m}^2 = \mathbf{0.459 \text{ m}^2}$$

El flujo de calor superficial se obtiene:

$$q_{\text{sup}} = \frac{12.5 \text{ kW}}{0.459 \text{ m}^2} = 27.23 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \cong \mathbf{27.20 \text{ kW/m}^2}$$

Mediante el simulador Quickfield se evalúa el calentamiento del horno para un tiempo de 3 horas de operación desde el encendido en frío.

En la Fig. 2.9. Se presentan datos interesantes. En ella se puede observar que el horno logrará alcanzar la temperatura de fusión del aluminio en poco menos de media hora. Por otro lado, para ese tiempo la pared exterior del horno aun no habrá alcanzado los 100 °C, lo cual indica claramente que para fundir aluminio el horno resulta ser relativamente seguro aun cuando las personas que lo operan se encuentre cerca del mismo.

Las curvas para la base representan una referencia e indican que tanto llegará a calentarse el fondo del horno, y por ende, la estructura de sostén. Además, es importante conocerla porque significa que esta estructura debe tener la capacidad de poder soportar las temperaturas externas de operación.

También, el gráfico presenta que el horno puede alcanzar la temperatura de fusión del cobre en aproximadamente 1 hora; sin embargo, esta temperatura puede resultar un potencial riesgo de seguridad para el operario y las personas que se encuentren alrededor si estas no usan vestimenta de seguridad.

Finalmente, el horno alcanza la temperatura crítica de operación (definida por el recubrimiento refractario) de 1520 °C en 1 hora y 40 min. También, se debe evitar operar el horno a esta temperatura por un tiempo prolongado pues existen considerables posibilidades de que el recubrimiento se dañe.

De igual manera resultan importantes las imágenes termográficas presentadas en la Fig. 2.10. La distribución de temperaturas presentadas para cada media hora de operación revela que el recubrimiento de fibra cerámica alcanza temperatura crítica luego de 2 horas de operación, resultando que ésta alcanza con mayor lentitud la temperatura crítica con respecto al recubrimiento de cemento refractario. Por lo tanto, el tiempo en que alcanza la temperatura crítica de operación es dictado por este último y se establece en 1 hora y 40 minutos. Valor que se comparará con los valores reales una vez construido el horno.

Ahora bien, estos valores resultan ser un estimado a partir de la simulación. Los valores reales se obtendrán una vez el horno haya sido construido.

2.4.5. SISTEMA DE TRANSPORTE DE GAS

Conociendo el flujo másico de propano necesario para realizar la combustión, puede determinarse el flujo másico de aire mínimo que se mezclará con este mediante la relación aire-combustible determinada con anterioridad:

$$m_{\text{aire}} = 17.25 \times m_{\text{gas}}$$

$$m_{\text{aire}} = 17.25 \cdot 0.188 \times 10^{-3} \text{ kg s} = 0.003 \text{ kg s}$$

Al conocerse los flujos máxicos pueden determinarse los diámetros de tubería para cada fluido mediante la ecuación siguiente:

$$m = \rho VA \tag{2.16}$$

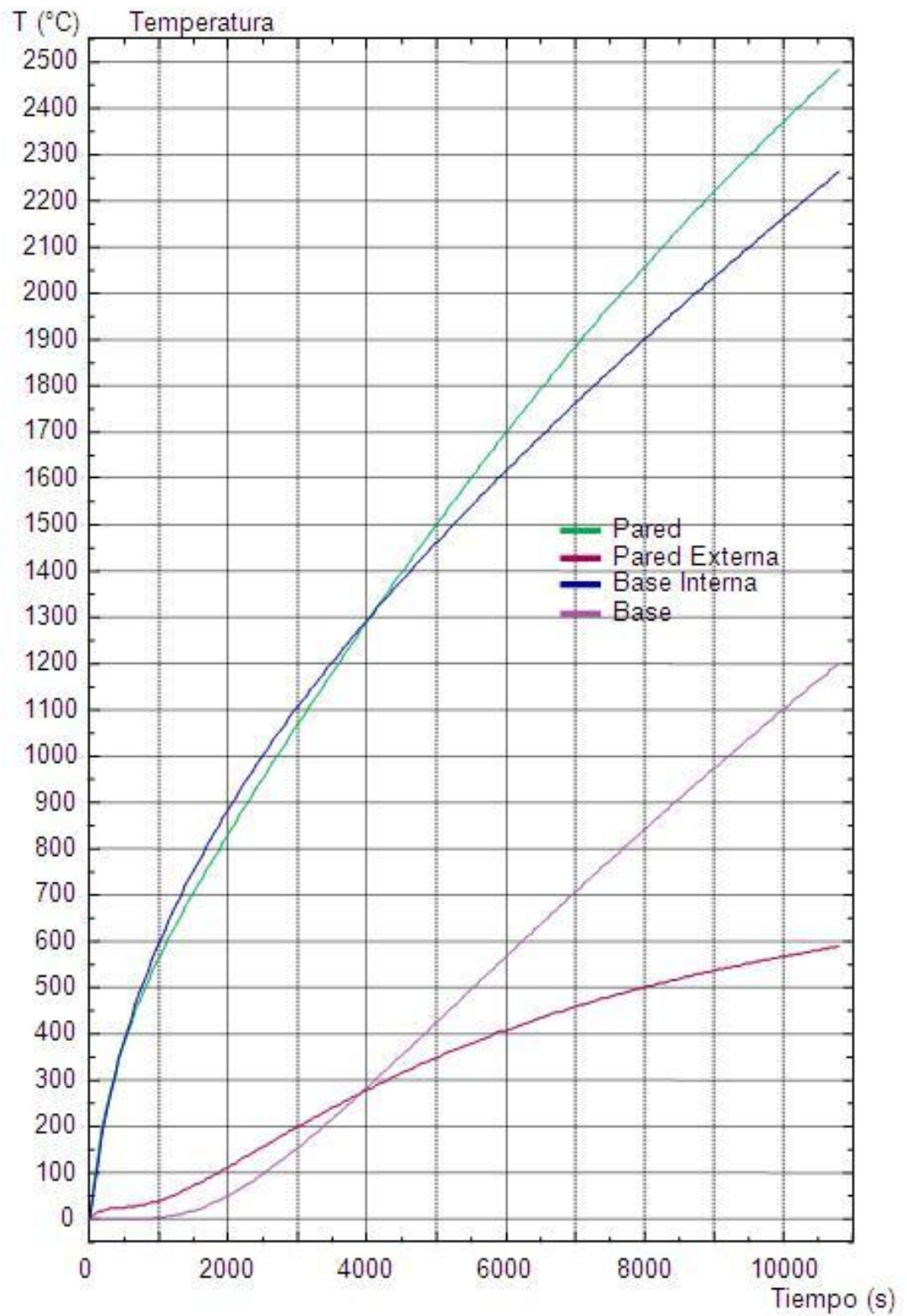
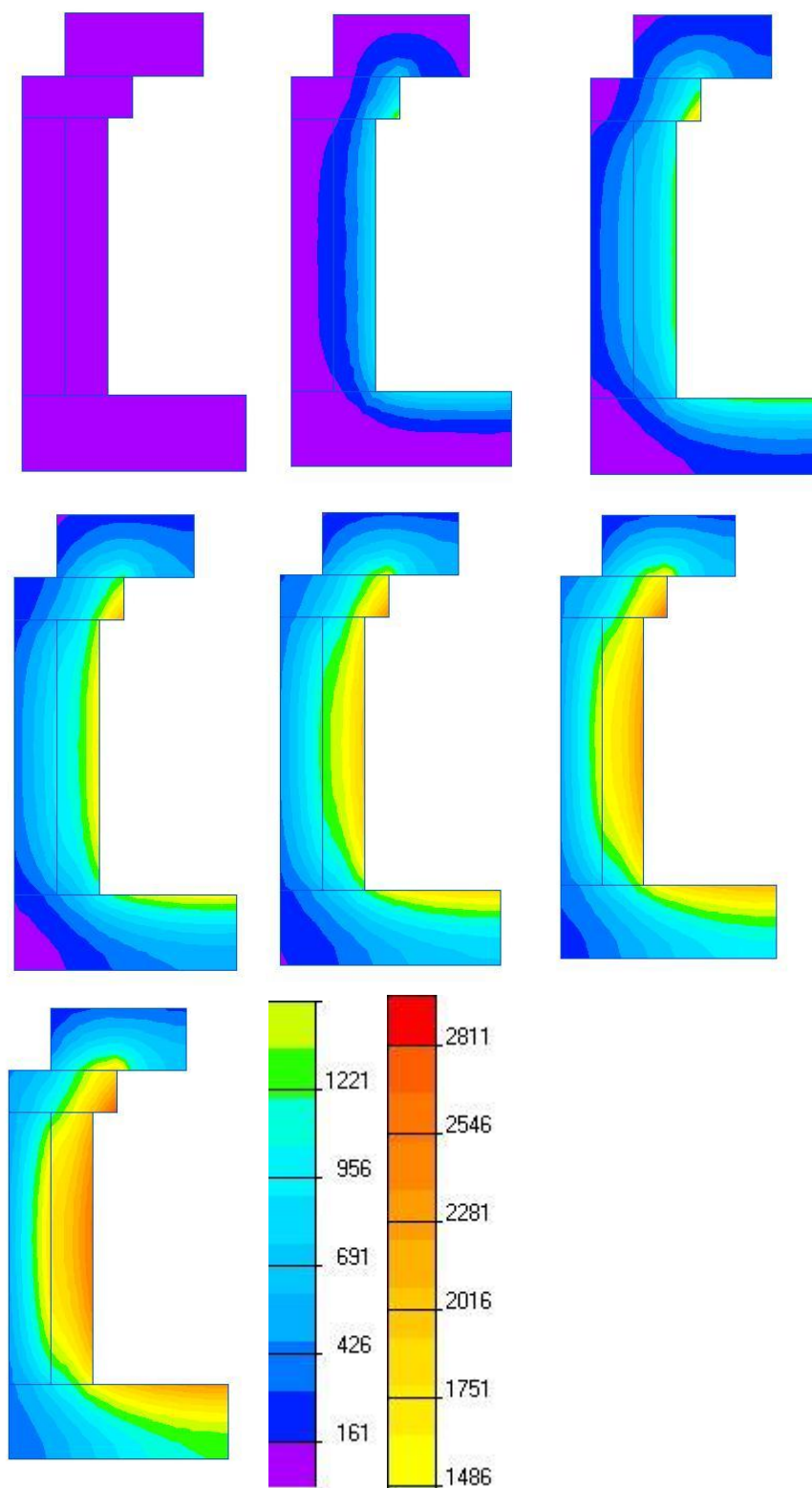


Fig. 2.9. Temperaturas esperadas para 3 horas de funcionamiento. Notar que según la gráfica, el horno alcanza la temperatura de fusión del aluminio en 30 mins.



Temperatura en °C

Fig. 2.10. Distribución de temperaturas a través del horno para tiempos diferentes: a) 0 s, b) 1800 s, c) 3600 s, d) 5400 s, e) 7200 s, f) 9000 s, g) 10080 s. Por simetría la otra mitad tiene la misma distribución de temperaturas.

Si $A = \frac{\pi}{4} D^2$ para la sección transversal de un tubo cilíndrico obtenemos:

$$m = \rho V \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.17)$$

La velocidad del flujo queda restringida por la velocidad de la llama. Si la velocidad de la combustión y la velocidad de ingreso en la tubería están fuera de balance, la llama no es estable. Si la velocidad de ingreso al quemador es muy alta, relativa a la de combustión, la llama se desprenderá del quemador, a este fenómeno se le llama “blow off” y, si la velocidad de ingreso es muy baja, la llama viaja a través de la mezcla a la tubería, a este efecto se le llama “flashback”, este último fenómeno puede resultar catastrófico si la llama llega hasta la cámara de mezcla.

Por otro lado, velocidades de flujo de entrada muy cercanas a la velocidad de la llama hacen que la combustión se realice muy cerca de la boquilla del quemador, aumentando la temperatura de éste.

Se sabe que a medida que la turbulencia y la temperatura aumentan también lo hace la velocidad de la llama. Estas condiciones se encuentran dentro del horno, por consiguiente se recomienda que la velocidad de flujo dentro de tuberías antes del quemador deba superar, al menos, 7 veces la velocidad de la llama. Por lo tanto, la velocidad mínima a la entrada del quemador debe ser de 120 pie/s; es decir, 36.58 m/s para una combustión segura [34].

Con este valor de velocidad se puede determinar el diámetro mínimo de tubería como sigue:

Flujo másico total a la entrada del quemador:

$$m_T = m_g + m_{aire} = 0.188 \times 10^{-3} + 3.00 \times 10^{-3} \text{ kg s} = 3.188 \times 10^{-3} \text{ kg s}$$

Despejando del diámetro de la ecuación 2.17, se obtiene:

$$D = \frac{4m_T}{\pi\rho V} = \frac{4(3.188 \times 10^{-3} \text{ kg s})}{\pi 1.164 \text{ kg m}^3 36.58 \text{ m/s}} = 9.76 \times 10^{-3} \text{ m} = 9.76 \text{ mm}$$

***Nota del cálculo anterior:** Al ser el aire el gas que más aporta al flujo y considerando que las densidades del gas propano a temperatura ambiente y la del aire son similares, se considera la densidad del aire para la densidad del flujo para simplificar los cálculos.

Este valor obtenido es el valor mínimo del diámetro de tubería a seleccionar. Dentro de las medidas de tubería comercial se podría decir que es aceptable seleccionar tubos de 3/8 a 1/2 pulg.

El flujo volumétrico en tuberías se obtiene al dividir el flujo másico entre la densidad. En el caso del propano, este valor ya se obtuvo con anterioridad, sin embargo, en el caso del aire es importante determinarlo pues es imprescindible para determinar si será necesario emplear un ventilador.

$$\Phi_{\text{propano}} = 0.188 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{m}^3}{1.86 \text{ kg}} = 101.075 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s} = 0.364 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\Phi_{\text{aire}} = 3.00 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \frac{\text{m}^3}{1.164 \text{ kg}} = 2.577 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s} = 9.278 \text{ m}^3 \text{ h} = 5.46 \text{ CFM}$$

De lo anterior se puede notar que los requerimientos volumétricos de aire no son muy grandes, en realidad, este valor permite prever que la mejor solución sería adquirir un quemador atmosférico, el cual, por el efecto Venturi, aspira el aire necesario para la combustión a partir de las diferencias de presiones al estrangular el fluido entrante. Las ventajas de esto son obvias, reduce el precio del quemador e independiza el horno de cualquier fuente de energía, volviéndolo más portátil.

El circuito de tubería para gas propano es como se presenta a continuación:

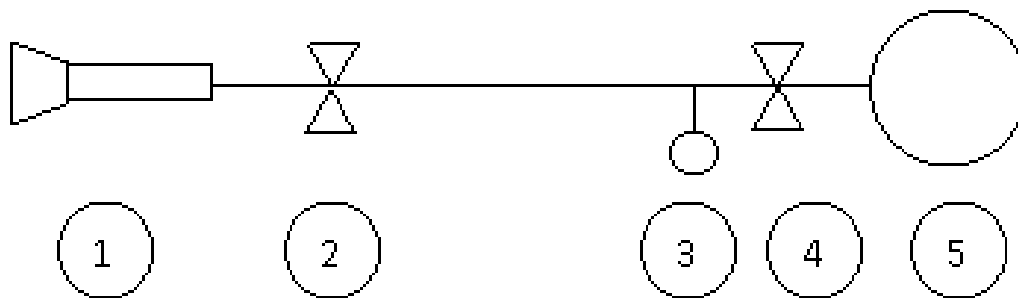


Fig. 2. 11. Circuito de gas para el quemador: 1) Quemador de ½ pulg, 2) Válvula de bola, 3) Manómetro, 4) Válvula reguladora de presión y 5) Tanque de gas propano con válvula de seguridad.

2.5. SISTEMA DE SOSTÉN ESTRUCTURAL

El sistema de sostén consiste en la estructura contenedora que permite la integración y protección de los demás elementos componentes. A este sistema se le llamará carcasa metálica pues resulta ser elaborado de lámina metálica.

El material para fabricar la carcasa metálica no es crítico, pues la operación del horno no estará sujeta a ambientes excesivamente húmedos o corrosivos. Para ahorrar costos, se establece como material lámina negra de 1.59 mm (1/16 pulg) recubierta con una pintura anticorrosiva resistente al calor que pueda soportar temperaturas medias (250 °C máx.).

Esta carcasa estará compuesta de tres partes:

- Carcasa de la cubierta: Servirá de sostén para la fibra cerámica. Para ello, a la estructura se le soldarán placas de fijación que impedirán que el conjunto se desarme (ver Fig. 2.12).
- Carcasa de las paredes: Sostiene a los ladrillos y la manta refractaria; ésta tomará la forma del contorno circular del horno; es decir, se enrollará la lámina de manera que quede como si fuera un tubo el cual se soldará en los extremos.
- Recubrimiento del fondo del horno: La lámina de esta sección debe mantener el nivel del material refractario interior. Esta se conformará

de tal manera que encaje con la carcasa de las paredes y se sujete a esta mediante puntos de soldadura. En caso de necesitar desmantelar el horno para mantenimiento, esto podrá realizarse fácilmente al romper los puntos de soldadura y desfondarlo, dando libertad a la carcasa de las paredes de retirarse y dejar el refractario desnudo

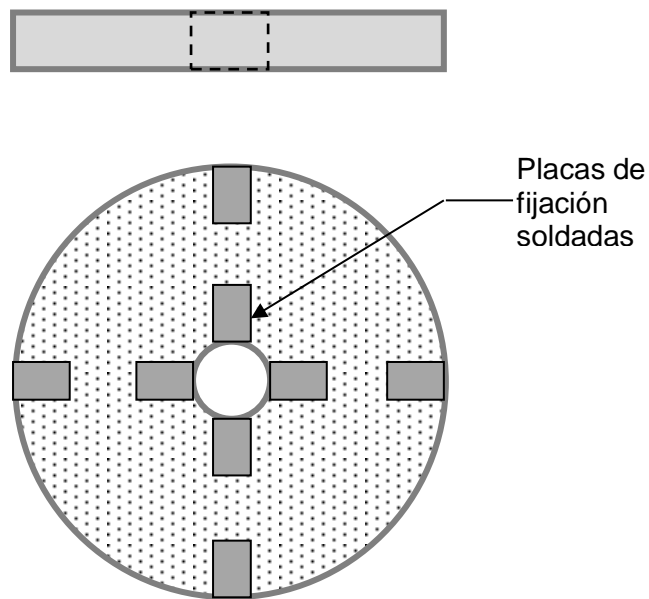


Fig. 2. 12. Vista lateral e inferior de la cubierta. Notar que se presentan las placas de fijación que sostendrán al conjunto. Las placas estarán soldadas a la carcasa.

Con respecto a cómo levantar la cubierta una vez el horno este en operación. A esta se le soldaran dos agarraderas hechas de hierro negro que tendrán una forma cuadrada, permitiendo que sea insertada una barra de hierro o madera para levantarla de manera segura. En la Fig. 2.13 se presenta la configuración.

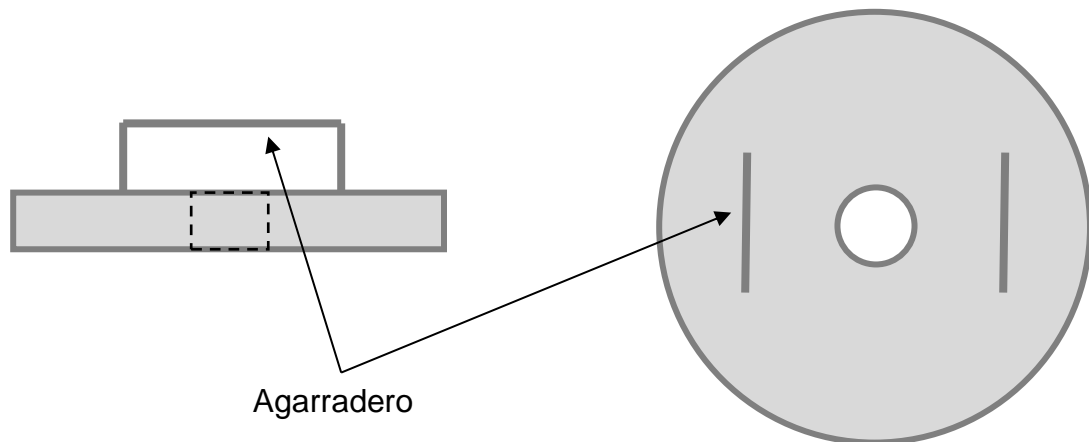


Fig. 2.13. Función de los agarraderos de cubierta es permitir levantar la cubierta de manera segura, incluso pueden utilizarse una barra cuadrada sostenida por dos personas insertada en los agarraderos para que sea más seguro levantarla cuando el horno está en operación.

Los planos del horno se encuentran en los anexos (Anexo 1). Para su consulta puede verificarse la parte final del documento.

Una vez el diseño ha sido finalizado pasa a la siguiente etapa: Construcción del horno, por lo tanto, el capítulo siguiente describe la puesta en marcha de la construcción del horno a partir del diseño.

3. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL HORNO DE CRISOL

Una vez diseñado el horno de crisol se procede a la construcción tomando en cuenta las consideraciones de diseño y requerimientos de material iniciando con la adquisición del mismo y clasificando cada etapa de construcción como es la elaboración de los moldes, el proceso de fraguado del concreto refractario y elaboración de carcasa y ensamble.

A continuación se describe detalladamente cada etapa constructiva del horno de crisol.

3.1. ELABORACIÓN DE MOLDES

El objetivo de la elaboración de los moldes es ajustarse a las dimensiones especificadas de las partes del horno de concreto refractario, obtenidas durante el diseño del mismo. También, estos moldes son usados durante la etapa de fraguado del concreto refractario seleccionado, y para obtener un mejor acabado de cada una de las partes que conformaran los subsistemas refractarios del horno.

En la figura 3.1 se muestra el desarrollo de material para la construcción de moldes y carcasa de horno.

El proceso de construcción de los moldes se describe a continuación:

- 1) Se utilizó lámina de 1/16 pulgadas de hierro negro para proporcionar mayor rigidez a los moldes (ver Fig. 3.1 (f, g, y h)) ya que el concreto una vez vaciado ejerce presión en las paredes del molde o estructura provocando deformaciones.

En la figura 3.2 se puede observar el molde utilizado para producir las dimensiones de las paredes del horno ya finalizado y listo para el fraguado. También, se colocaron cruceñas en el interior del molde elaborado para el lado interior de la pared del horno como se muestra en la fig.3.2(c) para contrarrestar la deformación que se podría producir.

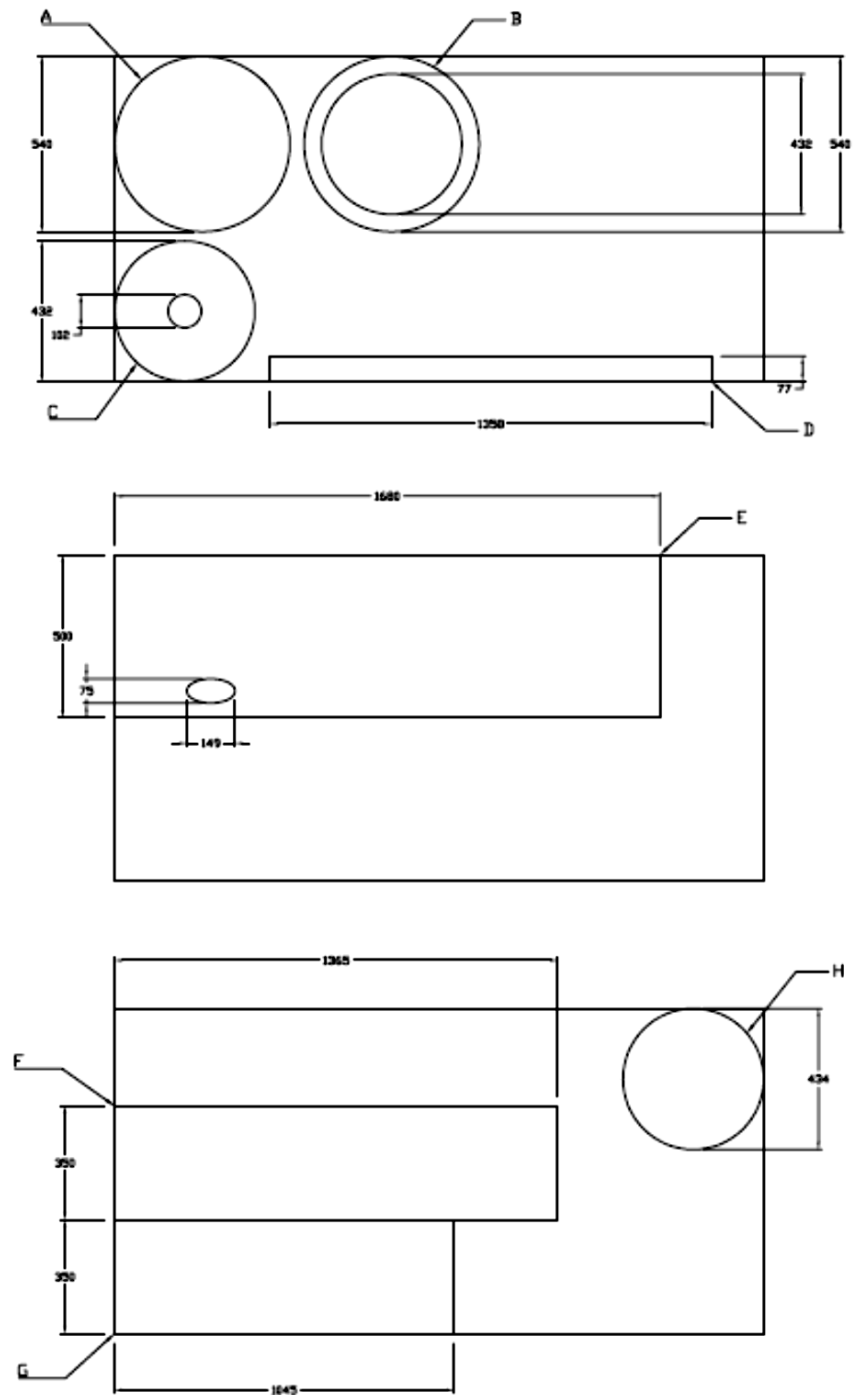


Fig. 3.1. Desarrollo de materiales para moldes y carcasa de horno de crisol: (a) Base de carcasa, (b) Aro guía de cubierta, (c) Pieza superior de cubierta, (d) Pieza lateral de cubierta, (e) Pieza lateral de carcasa, (f) Pieza lateral exterior de molde de pared refractaria, (g) Pieza lateral interior de molde de pared refractaria, y (h) Base de molde de pared refractaria.



Fig. 3.2. Molde utilizado para el fraguado y vaciado del concreto refractario correspondiente a las paredes del horno: (a) Vista superior de molde, (b) Vista lateral de molde y (c) Colocación de crucetas en el cilindro interior del molde.

- 2) Debe considerarse en el molde la perforación del orificio para colocación del quemador (ver Fig. 3.3).



Fig. 3.3. Perforación del orificio para la colocación del quemador: (a) Corte de orificio de quemador, y (b). Orificio en pared exterior de molde (c) Molde finalizado con orificio de quemador.

- 3) Debe colocarse una malla en el interior del molde, de tal forma que una vez fraguado el concreto refractario esta quede incrustada como alma de la pieza proporcionándole una mayor resistencia. (ver Fig. 3.4 (a)). La malla debe ser fina para que al dilatarse dentro del refractario por el calentamiento del mismo en operación no provoque fisuras reduciendo la vida útil del horno.

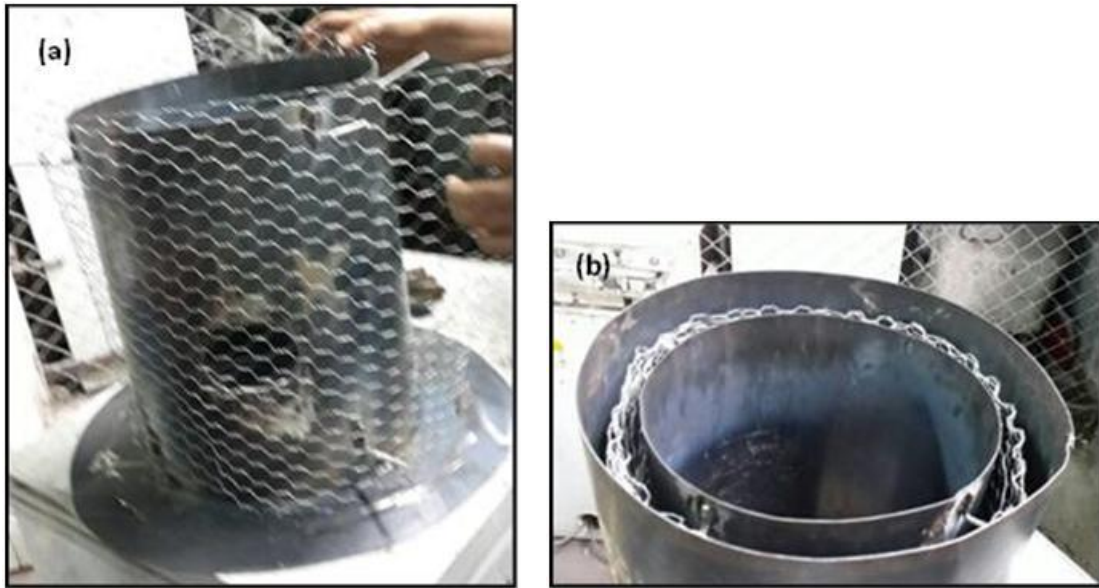


Fig. 3. 4. Colocación de malla: (a) Colocación de malla en interior de molde. (b) Molde finalizado con malla colocada en el interior mediante pines.

- 4) Elaboración de molde para tapa de horno. En la elaboración de este molde debe considerarse también la colocación de malla para proporcionarle una mayor resistencia a la pieza (ver Fig. 3.5).



Fig. 3. 5. Molde para la tapa del horno.

- 5) Elaboración de molde para la base del horno y base de crisol. En este caso se realizó un molde similar al de la tapa del horno con medidas de 530 mm de diámetro exterior, 230 mm de diámetro interior y 90 mm de

espesor (ver Fig. 3.6). Además, se elaboró un cilindro de 230 mm de diámetro y 190 mm (ver Fig. 3.7) para base o soporte del crisol, de altura de tal forma que éste acople perfectamente en el diámetro interior de la base.



Fig. 3.6. Molde para base de horno.



Fig. 3.7. Molde para base de crisol.

- 6) Elaboración de cubierta del horno. El molde corresponde al de la estructura definitiva para la carcasa de la cubierta, ya que esta solo se rellenará con fibra cerámica pues el objetivo de ésta es la salida de gases. Posteriormente, se le colocarán agarraderas para que ésta pueda ser retirada de forma manual (ver Fig. 3.8 y 3.9).



Fig. 3.8. Carcasa de cubierta de salida de gases.



Fig. 3.9. Colocación de tubo para salida de gases.

Una vez elaborados todos los moldes de las piezas del horno se procede a la etapa de vaciado y fraguado.

3.2. VACIADO Y FRAGUADO DEL CONCRETO REFRACTARIO

A continuación se detalla el proceso de fraguado y vaciado en cada uno de los moldes y las herramientas necesarias.

Materiales y herramientas necesarios:

- Un recipiente plástico lo suficientemente grande para preparación de la mezcla (ver Fig. 3.11 (a))
- Un recipiente para medir la cantidad de agua requerida. (ver Fig. 3.11 (b))
- Pala para mezclar
- Cuchara de albañil (ver Fig. 3.10 (e))
- Cucharón para verter mezcla en los moldes (ver Fig. 3.10 (c))
- Apisonador para mezcla.
- Grasa para los moldes (ver Fig. 3.10 (b))
- Cinta adhesiva para sellar cualquier imperfección en los bordes de los moldes evitando fuga de agua o mezcla. (ver Fig. 3.10(a))
- Tijeras para cortar malla (ver Fig. 3.10(d))
- Sellado y engrasado de moldes. Como primer paso se debe sellar los moldes con cinta para evitar fugas de agua o mezcla y que de esta forma queden imperfecciones en la pieza (ver Fig. 3.10(a)). Posteriormente, se debe colocar una capa de grasa (ver Fig. 3.10 (b)) para facilitar la extracción de la pieza al momento del desmoldeo.
- Preparación de mezcla de concreto refractario. Una vez engrasados los moldes se procede a la preparación de la mezcla para verterla en los moldes.

Para esta etapa se han tomado las consideraciones necesarias para el fraguado del cemento refractario ultra-70 de Thermal Ceramics adquirido en la distribuidora de materiales refractarios DIDERISA S.A DE C.V. para el cual según ficha técnica debe agregarse el 17 % del peso de una bolsa de concreto para este caso la bolsa tiene 50 lb (ver Fig. 3.11).

Tomando en cuenta la forma del molde y que el concreto debe fluir para ser apisonada en el molde sin dejar espacios sin mezcla en el molde se agregó 3.5 gal de agua para 2 bolsas de 50 lb de concreto refractario para el llenado del molde de las paredes y tapa del horno.

Se debe tomar en cuenta antes de verter la mezcla, la colocación de un tubo en el en molde de las paredes del horno en la ubicación del orificio del quemador para evitar que este sea tapado con mezcla y debe sellarse y engrasarse para ser retirado fácilmente (ver Fig. 3.12 (a)).



Fig. 3.10. Materiales y herramientas utilizados en el proceso de fraguado.

- Vertido del concreto. Después de sellar los moldes y colocar el tubo en el orificio para el quemador en el molde de las paredes del horno se procede a verter la mezcla de concreto en los moldes correspondientes a cada pieza (ver Fig. 3.12 (a y b)), se controla el secado por un mínimo de 24 horas remojando el concreto y los moldes dos veces al día para conservar la humedad.

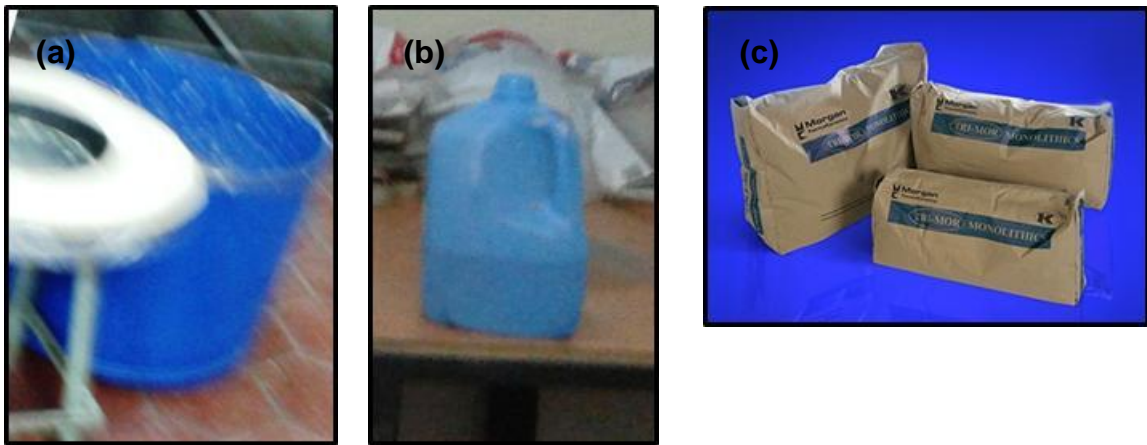


Fig. 3.11. Materiales utilizados para preparación de mezcla: (a) Recipiente utilizado para mezcla de concreto refractario, (b) Recipiente utilizado para medir el agua requerida y (c) Concreto utilizado para la elaboración de piezas refractarias.

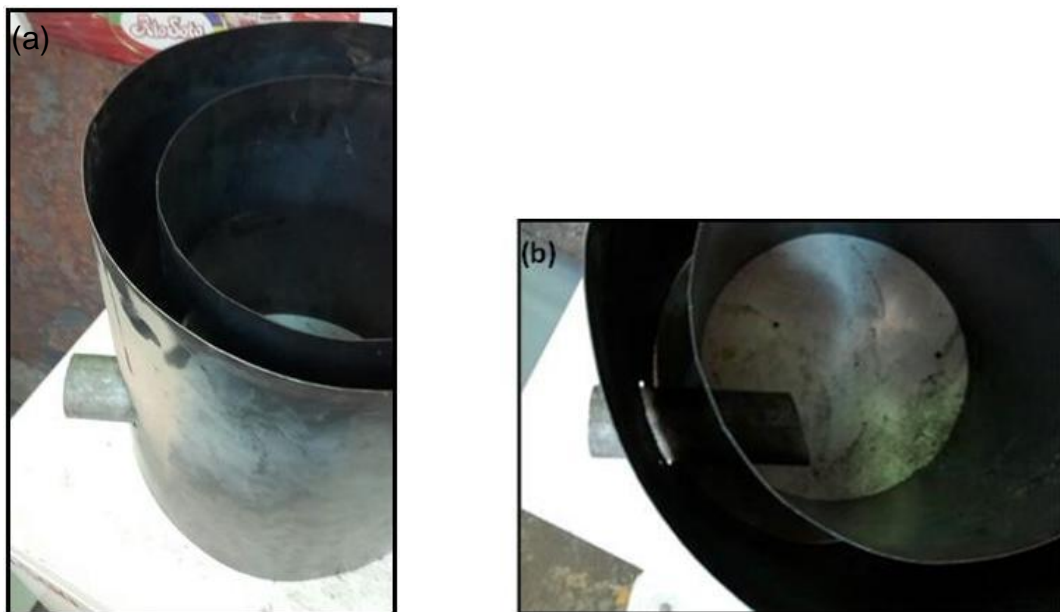


Fig. 3.12. Fig. 3.14. Colocación de tubo para quemador: (a) Vista lateral de molde y (b) vista superior de molde.

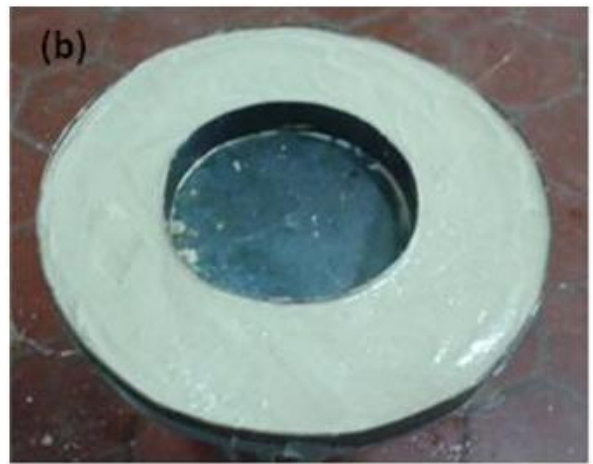
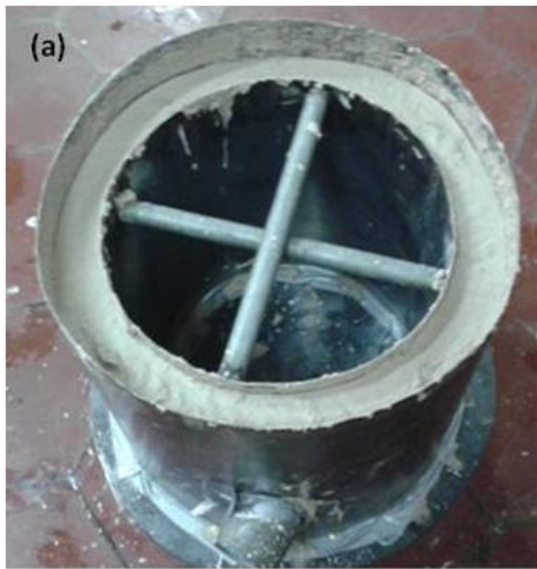


Fig. 3.13. Piezas de horno recién vaciadas. (a) Mezcla vertida en molde de paredes del horno y (b) mezcla vertida en molde de tapa de horno.

- Desmoldeo. El desmoldeo se realizó mediante disco de corte teniendo el cuidado de dañar lo menos posible la pieza (ver Fig. 3.14)



Fig. 3.14. Desmoldeo de paredes de horno: (a) Mediante disco de corte se corta el molde para retirarlo, (b) molde listo para ser retirado y (c) extracción de tubo de orificio para quemador.

- Reparación después del desmolde. Posteriormente a la etapa de desmoldeo, se procede a resanar las piezas de las posibles imperfecciones que pueden haber quedado en la superficie y las provocadas en el proceso de desmoldeo (ver Fig. 3.15).

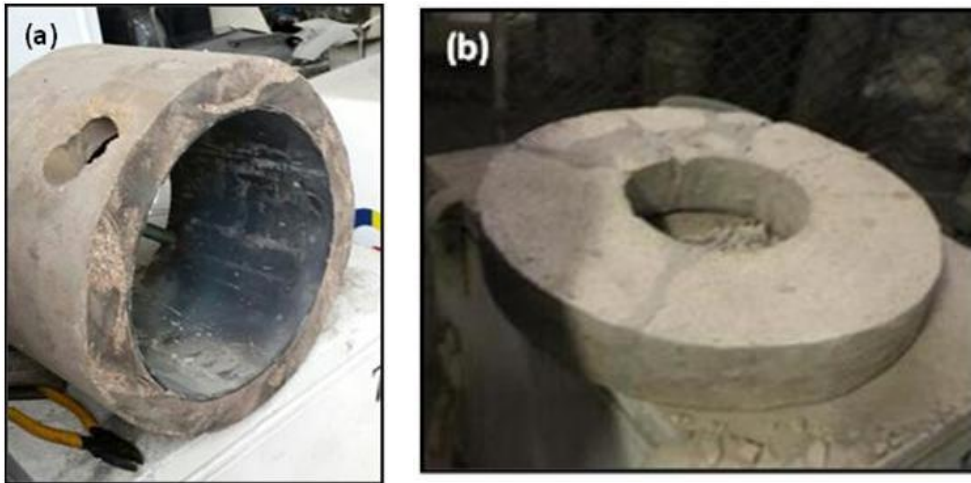


Fig. 3.15. Piezas desmoldadas listas para ser resanadas: (a) paredes del horno. (b) base de horno.

Para el proceso de resanado se prepara una mezcla de concreto refractario previamente colado para que sea más fino, se aplica a las piezas y se finaliza con una esponja obteniendo un mejor acabado superficial como el mostrado en la Fig. 3.16.



Fig. 3.16. Aplicación de capa de concreto refractario para resanar imperfecciones en las piezas y mejorar el acabado superficial: (a y b) aplicación de mezcla y (c) piezas resanadas.

3.3. ENSAMBLE DE PARTES

Con las piezas finalizadas se procede a ensamblar primero las piezas refractarias para luego ser colocadas en la carcasa del horno y por último aplicar pintura para alta temperatura.

- 1) Primero se introduce el cilindro de refractario que servirá como base del crisol en el orificio interior de la base del horno como se muestra en la figura 3.17 luego se coloca una capa de refractario en el contorno de la base del horno donde serán colocadas las paredes del horno (ver Fig. 3.18).



Fig. 3.17. Base de horno acoplada a cilindro base de crisol.



Fig. 3.18. Paredes del horno.

- 2) Una vez colocada base del horno, la base del crisol y las paredes del horno se tiene la estructura principal como puede observarse en la figura 3.19 con las tres piezas acopladas.
- 3) Luego se procede a elaboración de carcasa la cual puede ser rodada para darle forma cilíndrica, en este caso se hizo mediante forjado utilizando un anillo guía y finalmente soldada (ver Fig. 3.20) para que posteriormente la estructura principal sea introducida.

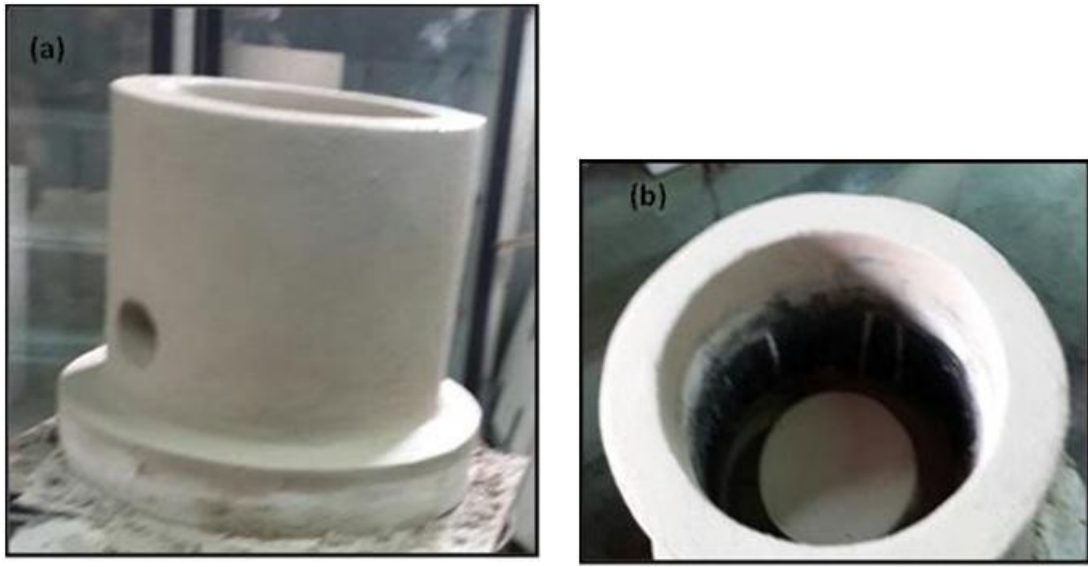


Fig. 3.19. (a)Estructura principal de horno de crisol conformada por las piezas de concreto refractario de la base de horno, base de crisol y paredes de horno. (b) Vista superior de la estructura principal donde se puede observar la base del crisol y las paredes perfectamente acopladas.



Fig. 3.20. Elaboración de carcasa de horno. (a) Forjado de lámina, (b) Cilindro soldado para carcasa de horno y (c) estructura refractaria principal introducida en carcasa.

- 4) Con la estructura principal dentro de la carcasa se procede a la colocación de la fibra cerámica (ver Fig. 3.21). Debe tomarse en cuenta que la boquilla del quemador debe estar instalada para no cerrar con fibra el orificio del quemador.



Fig. 3.21. Proceso de colocación de fibra entre carcasa y estructura de concreto refractario principal formando la estructura final.

- 5) Sobre esta estructura final (ver Fig. 3.22) se colocara la tapa refractaria mostrada en la figura 3.23. De igual forma que las paredes se coloca una capa base de concreto refractario en el borde superior de las paredes para evitar movimiento en las piezas, dar rigidez a la estructura y acople perfecto.
- 6) Para finalizar el cuerpo del horno se coloca una pestaña superior en la carcasa. Que también servirá de aro guía para la colocación de la cubierta del horno. (ver Fig. 3.24).



Fig. 3.22 Estructura final de horno antes de la colocación de la tapa.



Fig. 3.23. Tapa refractaria colocada sobre estructura final de horno.



Fig. 3.24. Colocación de pestaña en carcasa de horno para cerrar la estructura.

- 7) La cubierta o tapa del horno se rellana con fibra y se colocan unas pestañas para sujetar la misma y se sueldan agarraderas para que esta pueda ser retirada de forma manual. (ver Fig. 3.25).
- 8) Por último se procede a pintar el horno con pintura para alta temperatura y colocación de la estructura sobre la mesa base del horno. (ver Fig. 3.25)



Fig. 3.25. Cubierta o tapa del horno. (a) Fabricación de cubierta para salida de gases del horno, (b) cubierta rellena con fibra cerámica y (c) colocación de agarraderas en cubierta de horno.



Fig. 3.26. Proceso de pintado de horno.

4. EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

La evaluación del funcionamiento del horno tiene como fin otorgar información valiosa que permite comparar los valores reales con los teóricos del diseño. En términos generales, es un paso de crucial importancia, pues determina el éxito del diseño y ayuda a los diseñadores a saber que es necesario modificar para que el elemento cumpla los objetivos del trabajo. Esta evaluación consta de la recopilación y análisis de datos críticos del horno una vez se ha puesto en marcha.

4.1. CONDICIONES INICIALES DE OPERACIÓN

La primera prueba de fundición se realizó el 23 de julio de 2014 a las 4:00 pm en un recinto cerrado (laboratorio de tratamientos térmicos de la escuela de ingeniería mecánica) ventilado naturalmente mediante ventanas tipo *solaires* abiertas completamente. La temperatura ambiente se registró en 28 °C.

Tabla 4. 1. Valores operativos registrados en la 1era. Operación del horno.

Parámetro	Medida
Temperatura ambiente, °C	28
Temperatura máxima alcanzada en operación, °C	1700
Temperatura exterior una vez alcanzada la temperatura de fusión del aluminio, °C	60
Tiempo de operación, h	1
Tiempo en fundir aluminio (Mitad del volumen del crisol), min	25
Tiempo en alcanzar la temperatura máxima a plena capacidad del quemador*, min	20

*Nota: La temperatura máxima alcanzada se registró sin que hubiera crisol y carga dentro del horno.

El horno se operó con un quemador de prueba alimentado por un ventilador centrífugo y una llama iniciada mediante chispa. El horno se encontraba completamente cerrado al momento de operarlo y sin el crisol

adentro. Éste se incorporó una vez el horno alcanzó la temperatura de fusión del aluminio.

A partir de la puesta en marcha del horno se recopilaron los datos que se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.2. Resultados del análisis de gases de escape en la 1ra. Operación del horno.

Descripción	Lectura 1 (llama 1)	Lectura 2 (llama 2)	Lectura 3 (llama final)	Prom.	Límites permitidos
Oxígeno (O ₂), %	8.6	8.4	6.4	7.80	3 a 15
Monóxido de carbono (CO), ppm	282	243	195	240.00	152
Dióxido de carbono (CO ₂), %	8.1	8.3	9.6	8.67	
Temperatura de gases, °C	638.33	641.11	641.67	640.37	204.44 °C (<400 °F)
Temperatura ambiente, °C	27	26.22	27.6	27	
Exceso de aire, %	63	57	40	53.33	15 a 30
Eficiencia de combustión, %	57.9	58.2	62.2	59.43	
Presión del combustible, psi	2	2	2	2.00	
Temperatura del combustible, °C	AMB	AMB	AMB		

Mediante un analizador de gases prestado por la empresa SERCOIND y operado por ellos se obtuvieron los siguientes datos.

En la Tabla 4.1 se proporcionan valores interesantes de funcionamiento. Las temperaturas y los tiempos registrados resultaron estar dentro de los parámetros esperados e incluso fueron superados. El hecho de que el horno pueda llegar a una temperatura tan alta de hasta 1700 °C y aun mantener la temperatura exterior de este a un nivel seguro fue una sorpresa y una muestra del excelente efecto del aislante de fibra cerámica. Sin embargo, cabe recalcar, que esta temperatura fue únicamente para probar la capacidad del conjunto horno quemador, y no se mantuvo por mucho tiempo. No obstante, resulta poco

seguro, tanto para la integridad del horno como para los operarios, llevar la operación del horno a estas temperaturas.

El análisis de gases presentado en la Tabla 4.2 muestra los ajustes realizados en la inyección de aire hacia el quemador. Se puede apreciar que a medida que el exceso de aire se reduce y se acerca más al valor estequiométrico, la eficiencia de la combustión aumenta, debido a la disminución en el volumen de aire no reactivo que ingresa en la cámara del horno. Por otro lado, la generación de grandes cantidades de monóxido de carbono en la etapa inicial, se debe al choque de la llama con una superficie fría, en este caso es la pared del horno cuando no ha alcanzado su temperatura de operación, una vez se homogeniza la temperatura de la pared del horno, este valor disminuye. Es importante un control exhaustivo del ingreso del aire a la cámara de mezcla del quemador y a la cámara interna del horno, demasiado aire frío ingresando disminuye considerablemente la eficiencia del horno pues se requiere de energía extra proveniente de la combustión para elevar la temperatura de este.

Con respecto a la eficiencia del horno, éste está fuertemente relacionado con la eficiencia del quemador y del diseño de la cámara interna. El promedio de temperatura alcanzado en la eficiencia de la combustión llegó a 59.43%; es decir, que un poco más del 40% de la energía proveniente de la combustión es botada al ambiente. Sin embargo, este valor de eficiencia puede aumentar si se ajusta adecuadamente el quemador para asegurar una combustión completa, disminuyendo el incremento del aire en exceso a la cámara y fomentando que los gases calientes recorran de manera uniforme el horno. Entonces, por el momento, puede decirse que la eficiencia es aceptable, aunque puede mejorarse.

De igual manera, se pudo comprobar que el incremento brusco de la temperatura no afectó la integridad del horno así como lo aseguró el proveedor de cemento refractario. Aunque se presentaron fisuras superficiales en el refractario, las cuales son normales que aparezcan, no se presentó ningún daño

estructural y por lo tanto el horno está capacitado para fundir la carga con rapidez.

Además, estos datos también arrojan conclusiones interesantes que respaldan la investigación y el diseño anteriores, éstas se enumeran a continuación:

- 1) Las recomendaciones y sugerencias expuestas en el marco teórico fungieron como una excelente base para el diseño y la puesta en marcha.
- 2) El diseño resultó ser satisfactorio. Las ecuaciones empleadas para calcular las pérdidas de calor esperadas y el procedimiento para calcular las necesidades mínimas de combustible resultaron ser acertadas.
- 3) Los tiempos y las temperaturas recopiladas concuerdan con las simulaciones realizadas en la etapa del diseño. El programa “Quickfield” utilizado para realizar la simulación resultó ser satisfactorio, aun en su licencia estudiantil, el programa vertió con gran detalle las curvas de calentamiento esperadas.
- 4) Las medidas y la selección de los materiales constructivos fueron correctas. La investigación exhaustiva que llevó a dimensionar el horno y a seleccionar los materiales más apropiados permitió que el horno se construyera y operara exitosamente.

Por lo tanto, la evaluación del funcionamiento muestra que el diseño del horno es funcional y suficiente para cumplir con los objetivos del trabajo de graduación.

CONCLUSIONES

Al finalizar el presente trabajo de investigación, como grupo de investigación se puede concluir en base al diseño y construcción del horno.

Que toda la información recopilada mediante la investigación fue de suma importancia para comprender el funcionamiento, métodos de construcción y parámetros de diseño de los diferentes elementos que componen un horno de crisol. Esto permitió que el horno llegara a diseñarse acorde a la necesidad para el proceso de enseñanza aprendizaje del departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador.

Las pruebas realizadas en el laboratorio permiten validar los parámetros de diseño presentados al obtener temperaturas de 1700 °C, en el interior del horno sin carga de fundición, temperatura suficiente para la fundición de materiales no ferrosos; sin embargo, cabe recalcar, que esta temperatura fue únicamente para probar la capacidad del conjunto horno quemador, y no se mantuvo por mucho tiempo. No obstante, resulta poco seguro, tanto para la integridad del horno como para los operarios, llevar la operación del horno a estas temperaturas. Estas pruebas nos proporcionaron datos importantes de comprobación de la correcta selección de los materiales refractarios, aislantes y pintura; debido a que el horno aun a las temperaturas antes mencionadas mantiene en su exterior un nivel de temperatura seguro para los presentes.

El proceso de construcción mostró la necesidad imperativa de las habilidades técnicas para la elaboración de moldes para las paredes y bases del horno, estructuras de soporte y correcto ensamble de las piezas; concluyéndose entonces que de no haber tenido a disposición la consultoría técnica oportuna para realizar el trabajo, este hubiera presentado problemas en el funcionamiento a corto plazo. Bajo este concepto, el diseño brindó un parámetro para el constructor, que posteriormente incluyó nuevos elementos acorde a necesidad y experiencia. Estos nuevos elementos, como la chimenea,

el visor, el alma de alambre para las paredes del horno, base desplazable y demás; llegaron a ser los pequeños detalles que mejoraron el funcionamiento, confiabilidad y utilidad del horno.

Con respecto a la evaluación de la puesta en marcha, esta llegó a ser satisfactoria, dando a conocer datos muy valiosos que permiten comparar el funcionamiento real con respecto al simulado, estos datos mostraron que el horno cumplió los parámetros esperados de operación y, que los elementos seleccionados y dimensionados, cumplieron su propósito.

RECOMENDACIONES

Se deberá iniciar el trabajo verificando los elementos de seguridad personal según las normas vigentes de higiene y seguridad industrial para fundición.

Para la operación se deberá de cumplir con la guía siguiente:

- Mantener el espacio de trabajo ordenado y limpio, aplicando criterios de seguridad y evitando la posibilidad de accidentes,
- Limpiar el interior del horno de escoriado,
- Controlar el funcionamiento de los equipos auxiliares,
- Controlar el nivel y presión de trabajo del gas utilizado,
- Verificar que las herramientas necesarias para todo el proceso estén en buen estado antes de iniciar el proceso, y
- Registrar los parámetros de inicio de cada proceso de fundición.

MANTENER LAS CONDICIONES OPERATIVAS DEL HORNO

- Verificar, previamente el volumen de material a colocar en el interior del crisol y las cucharas, observando la presencia de marcas, fisuras, grietas y/o desprendimiento de material refractario.
- Seleccionar las cucharas en cantidad y capacidad de acuerdo al volumen de los moldes a colar y verificar que el tipo de revestimiento de las mismas se corresponda con el material a fundir.
- Realizar la reparación parcial o total del revestimiento que rodea al crisol y de las cucharas para mantener su operatividad.
- Verifica el estado del crisol.
- Controlar previo a la colada, los moldes y material para el llenado de los mismos.
- Verificar el estado del quemador, y sistema de combustible.
- Se comprueba visualmente la presencia de marcas, fisuras, grietas y/o desprendimientos del revestimiento del horno.

REFERENCIAS

[1] Hernández Beltrán, E. G. & Martínez Estrada, M. E. (2014) Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición escultórica de bronce. Tesis de grado, Universidad de El Salvador.

[2] ASM committee. (1998). *ASM Handbook - Casting* (Vol. 15). ASM International

[3] Capello, E. (1974). *Tecnología de la Fundición*. Barcelona - España: Gustavo Gili S.A.

[4] Duponchelle, J. (1932). *Manual del Fundidor*. Barcelona - España: Gustavo Gili S.A.

[5] NaTools. (2014). *Crisol de vaso de grafito*. Recuperado el julio de 2014, de http://www.natools.com.ar/index.php?route=product/product&product_id=262

[6] Ramirez, J., & Ramirez, W. (2009). *Efecto del anodizado sobre la razón de desgaste de una alreación de aluminio 6061*. San Salvador: Universidad de El Salvador.

[7] Seybolt, A. U., & Burke, J. E. (1969). *Técnicas de metalurgia experimental*. México: Limusa Wiley, S. A.

[8] Arpal. (s.f.). *Usos y propiedades del aluminio*. Recuperado el 11 de Septiembre de 2013, de <http://aluminio.org/?p=821>

[9] Hanco, J. (Marzo de 2013). *Obtención del Cobre*. Recuperado el julio de 2014, de Slide Share: <http://es.slideshare.net/arian1881/obtencin-del-cobre>

[10] A. Bhatia, B. E. (2011). Overview of Refractory Materials. Recuperado el Septiembre de 2013, de PDHonline - Course M158: http://www.mtec.or.th/images/users/78/FAQ_refractoryMetal/m158content.pdf

[11] Wikipedia. (s.f.). *Material Refractorio*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2013, de Wikipedia the free encyclopedia: http://es.wikipedia.org/wiki/Material_refractorio

[12] Schalm, S. (2005). *Refractory Engineering* (Segunda edición ed.). Essen, Alemania: Vulkan-Verlag.

[13] Allbiz. (2014). *Ladrillo Refractorio*. Recuperado el julio de 2014, de <http://lima-distr.all.biz/ladrillo-refractorio-g43466>

- [14] Refractarios Arnabri S.A.C. (2014). *Nuestros productos - Ladrillos refractarios*. Recuperado el julio de 2014, de <http://www.refractariosarnabri.com/nuestros-productos#ladrillos>
- [15] United Nations Environment Program. (2006). *Furnaces and Refractories*. Recuperado el Septiembre de 2013, de Energy Efficiency Guide for Industry in Asia: www.energyefficiencyasia.org
- [16] Berry, W. M. (1921). *Design of Atmospheric Burners*. Washington, D.C.: Washington Government Printing Office.
- [17] Wikipedia. (s.f.). *Combustion (en inglés)*. Recuperado el 22 de septiembre de 2013, de <http://en.wikipedia.org/wiki/Combustion>
- [18] Universidad de Valladolid. (s.f.). *Cálculo relativo a la combustión*: https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/375/51405/1/Documento1.pdf
- [19] Wikipedia. (s.f.). *Flame*. Recuperado el Septiembre de 2013, de Wikipedia the free encyclopedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Flame>
- [20] Reil, R. (2011). *Hybridburners.com*. Recuperado el Abril de 2014: <http://www.hybridburners.com/Ron-Reil-foundry-notes.html>
- [21] Reil, R. (Noviembre de 2007). *Forge and Burner Design*. Obtenido de <http://www.abana.org/ronreil/design1.shtml#Reil>
- [22] Metrogas. (2014). *Combustión*. Recuperado el Marzo de 2014: http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1
- [23] García, E. Y. (2013). *Propuesta de equipamiento de laboratorio para prueba de arenas*. San Salvador: Universidad de El Salvador.
- [24] Finck, D., & Heumannskaemper, D. (4 de Junio de 2013). *Matching your crucible to your application*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2013: Morgan Advanced Materials: http://www.morganmms.com/resources/technical-articles/matching-your-crucible-to-your-application/?page_index=1
Estados Unidos.
- [25] *Crucibles and their Furnaces*. (Julio de 2012). Recuperado el Septiembre de 2013: Metal Casting Theory and Design: <http://me401metalcasting.files.wordpress.com/2012/07/401-crucible-furnaces.pdf>
- [26] Heine, R. W., Loper, C. R., & Rosenthal, P. C. (1967). *Principles of Metal Casting*. Tokyo, Japón: McGraw-Hill, Inc.

[27] Metalinsumos. (2014). *Uso y cuidado de crisoles*. Recuperado el junio de 2014, de <http://www.metalinsumos.com/descarga/art3.pdf>

[28] Refractarios Nacionales S.A. (2009). *Concretos Refractarios Proyectados*. Recuperado el 12 de Julio de 2014, de <http://www.byronruizg.com/airenic/Concretos%20Refractarios%20Proyectados.pdf>

[29] J. J. Medina Cia. Ltda. (s.f.). *Recomendaciones para la instalación y secado de hormigones refractarios*. Recuperado el 12 de Julio de 2014: <http://jjmedina.com.ec/Instalacion%20de%20Hormigones%20Refractarios.pdf>

[30] Morales, A. M. (Septiembre de 1965). *Revestimientos Refractarios Monolíticos para Calderas*. Recuperado el 12 de Julio de 2014: <http://boletines.secv.es/upload/196504495.pdf>

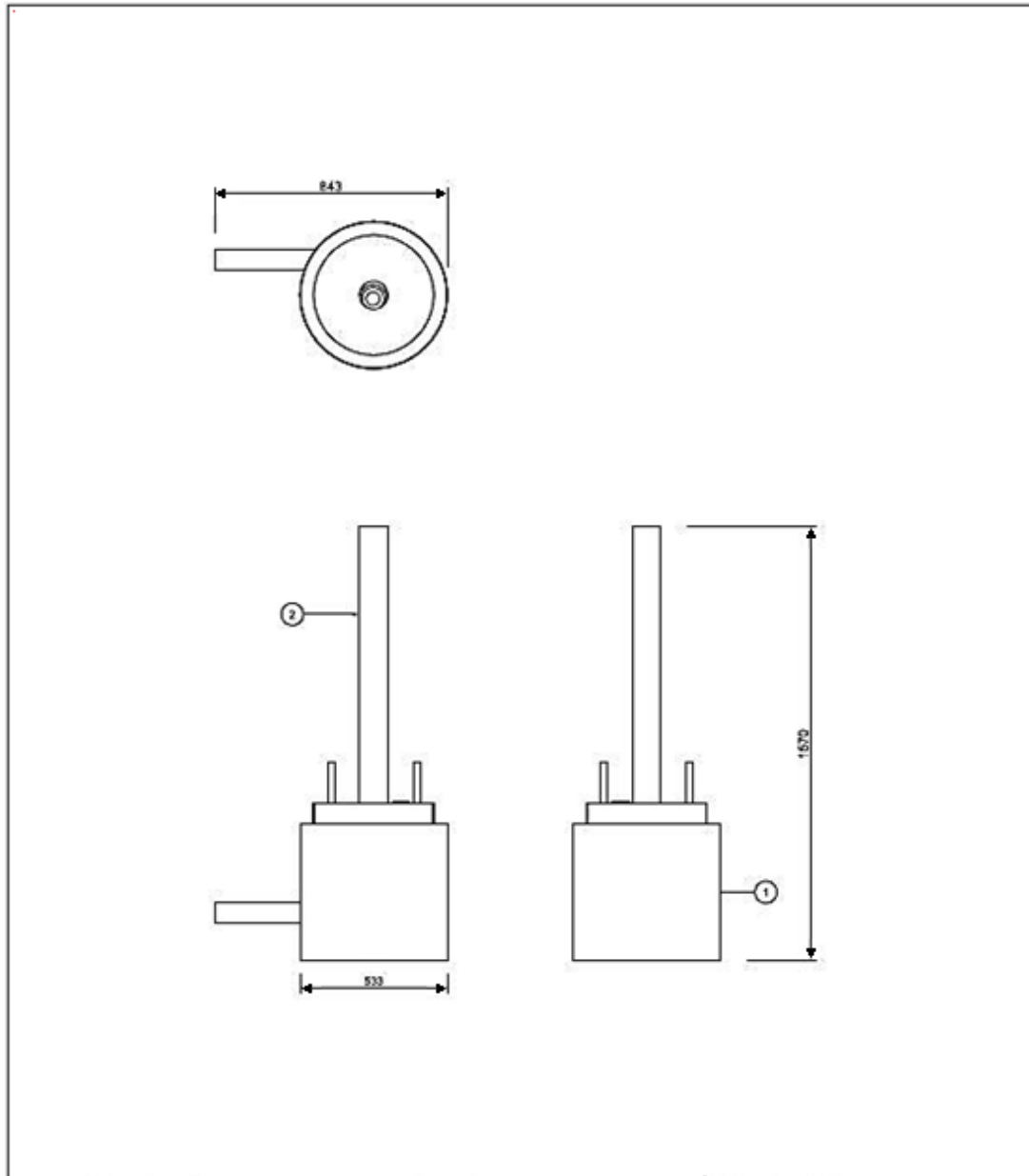
[31] Haan, E. R. (1964). Horno de Fundición. *Mecánica Popular* , 79, 80, 96.

[32] Cengel, Y. A. (2004). *Transferencia de Calor* (2da. ed.). México D.F.: McGraw-Hill.

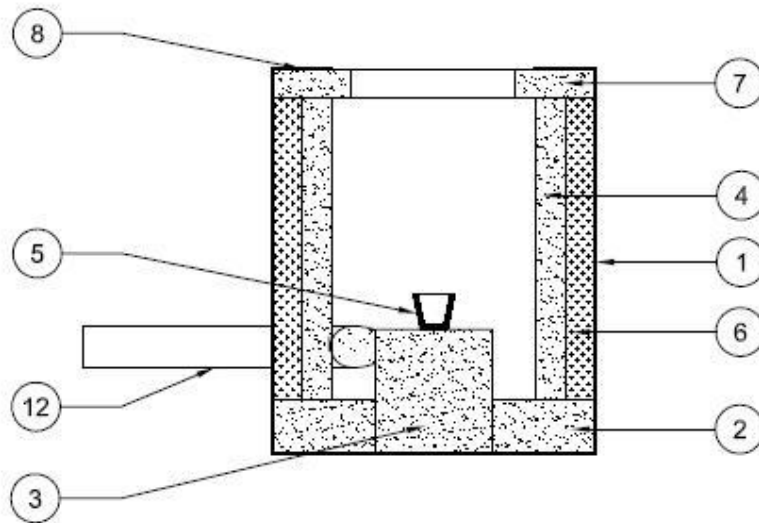
[33] Minnesota Technical Assistance Program. (2009). *Energy Efficiency Opportunities for Metal Casters*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2013: <http://www.mntap.umn.edu/metalcast/energy.htm>

ANEXOS

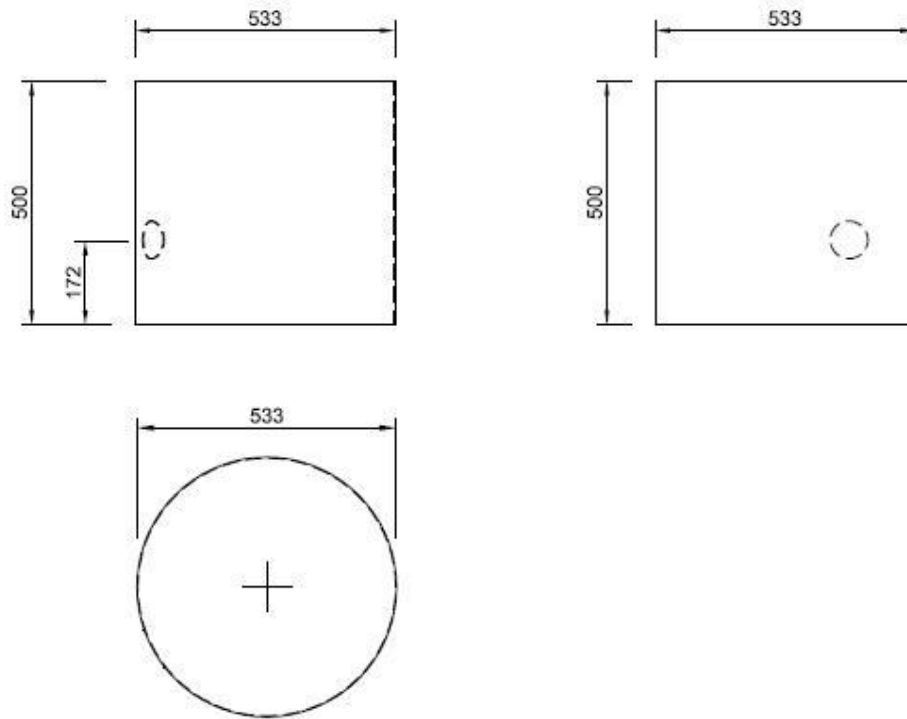
Anexo I: Planos constructivos Horno de Crisol



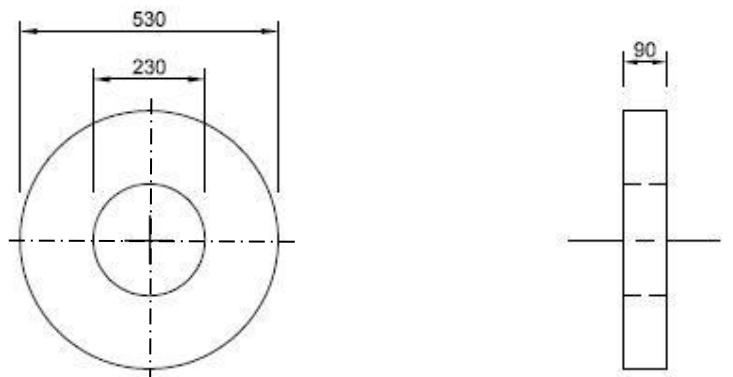
2	Tapadera de horno	1		Subconjunto 1
1	Cuerpo de horno	1		Subconjunto 2
Nº	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIÓN
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			TRABAJO DE GRADUACIÓN: Construcción de horno de crisol para aleaciones no ferrosas	ESCALA: 1:200
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Evelyn Yesenia Flores García		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: 1/8	FECHA: 7/08/14	Conjunto: Horno de crisol		



12	Quemador	1		
8	Aro guía de cubierta	1	Lámina de hierro de $\frac{1}{16}$ "	Detalle 6
7	Tapadera refractaria	1	Concreto refractario Ultra70	Detalle 5
6	Aislamiento lateral	1	Fibra cerámica ST1260°C	Lana de 2" de espesor
5	Crisol de grafito	1	Grafito	Crisol tipo A
4	Pared refractaria	1	Concreto refractario Ultra70	Detalle 4
3	Base de crisol	1	Concreto refractario Ultra70	Detalle 3
2	Base refractaria	1	Concreto refractario Ultra70	Detalle 2
1	Carcasa metálica	1	Lámina de hierro de $\frac{1}{16}$ "	Detalle 1
Nº	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIÓN
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			TRABAJO DE GRADUACIÓN: Construcción de horno de crisol para aleaciones no ferrosas	ESCALA: 1:10
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berfos Ortiz		ESTUDIANTE: Evelin Yesenia Flores Garcia		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: 2/8	FECHA: 7/08/14	Subconjunto 1		

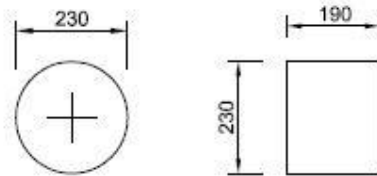


Detalle 1: Carcasa metálica

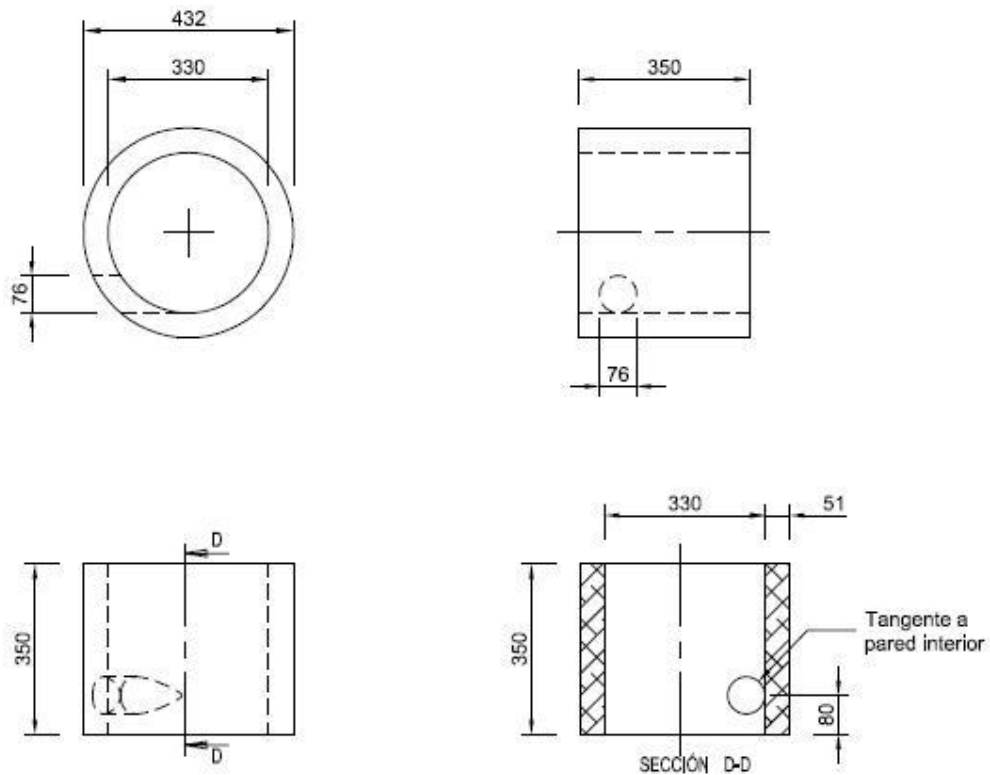


Detalle 2: Base refractaria

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Construcción de horno de crisol para aleaciones no ferrosas	ESCALA: 1:125
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berfos Ortiz		ESTUDIANTE: Evelin Yesenia Flores García	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 3/8	FECHA: 7/08/14	Detalle 1: Carcasa metálica Detalle 2: Base refractaria	

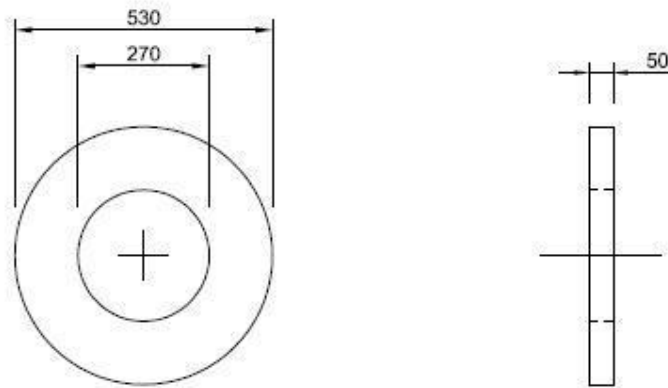


Detalle 3: Base de crisol

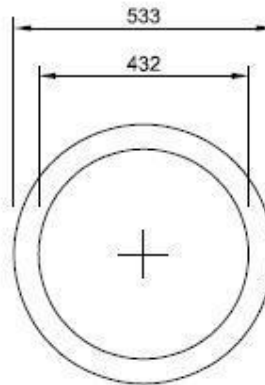


Detalle 4: Pared refractaria

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Construcción de horno de crisol para aleaciones no ferrosas	ESCALA: 1:125
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Evelin Yesenia Flores García	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 4/8	FECHA: 7/08/14	Detalle 3: Base de crisol Detalle 4: Pared refractaria	

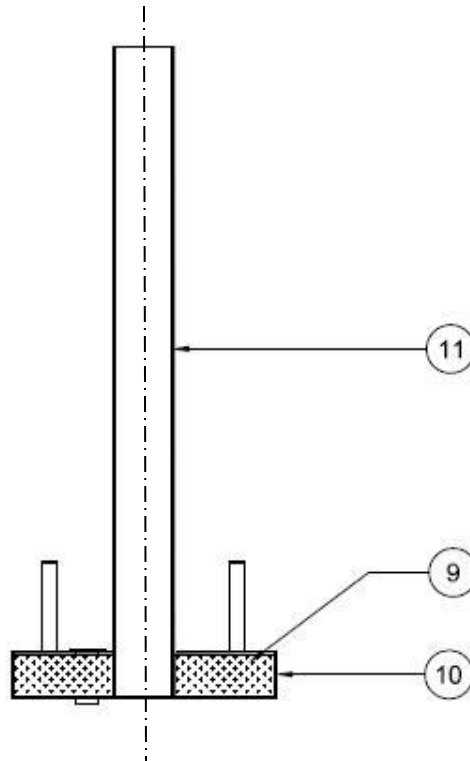


Detalle 5: Tapadera refractaria

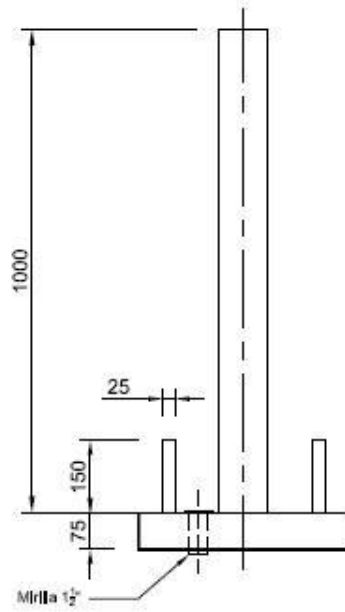
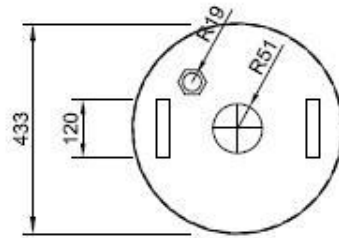


Detalle 6: Aro guía de cubierta

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Construcción de horno de crisol para aleaciones no ferrosas	ESCALA: 1:125
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berfos Ortiz		ESTUDIANTE: Evelin Yesenia Flores Garcia	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 5/8	FECHA: 7/ 08/ 14	Detalle 5: Tapadera refractaria Detalle 6: Aro guía de cubierta	

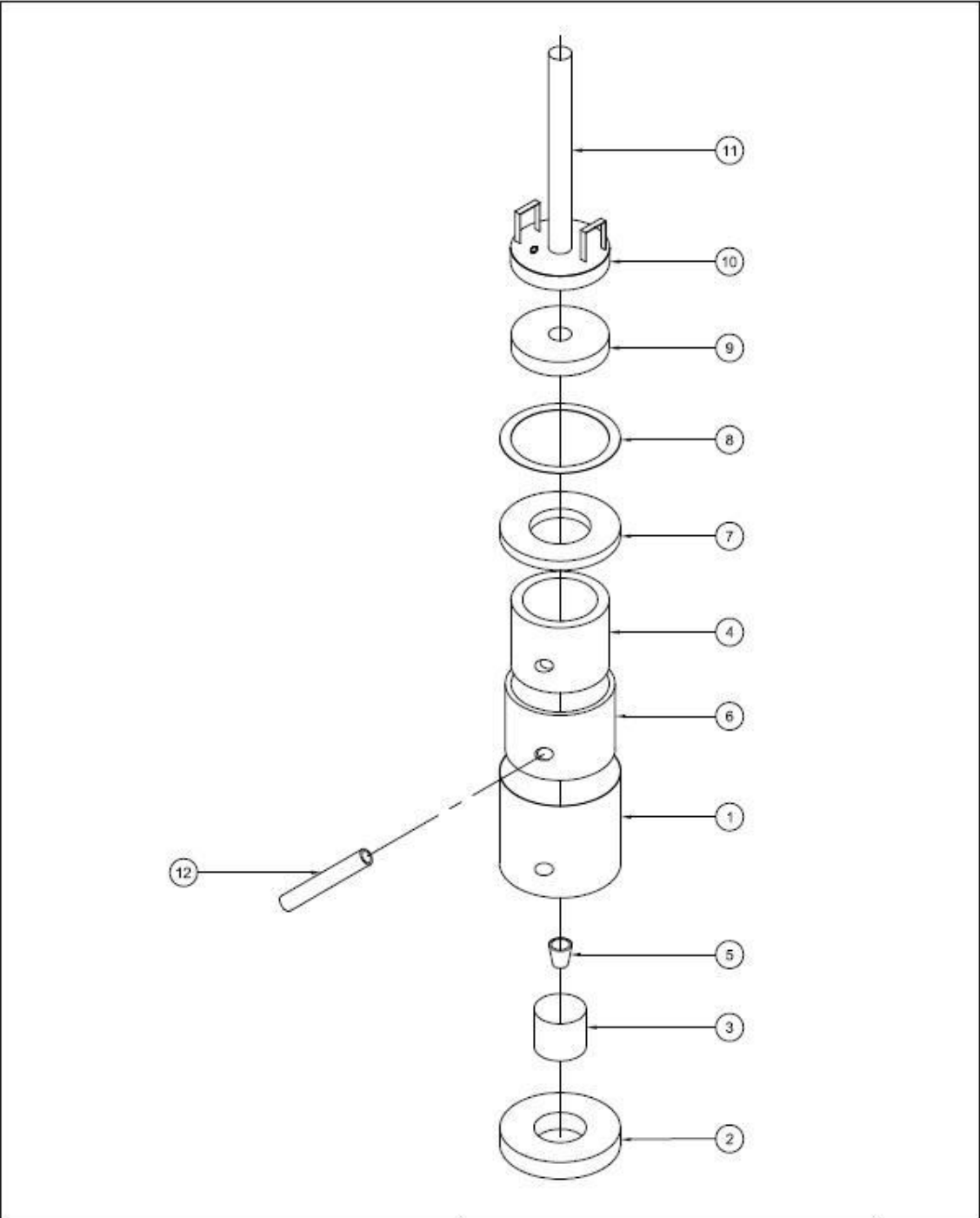


11	Chimenea	1	Tubo de 4" de acero Inoxidable	Detalle 7
10	Cubierta	1	Lámina de hierro de $\frac{1}{16}$ "	Detalle 7
9	Aislamiento térmico de cubierta	1	Fibra cerámica ST1260°C	Fibra compuesta
Nº	DESCRIPCIÓN	CANT.	MATERIAL	ESPECIFICACIÓN
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			TRABAJO DE GRADUACIÓN: Construcción de horno de crisol para aleaciones no ferrosas	ESCALA: 1:10
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Evelin Yesenia Flores García		UNIDADES: Milímetros
Nº PLANO: 6/8	FECHA: 7/ 08/ 14	Subconjunto 2		



Detalle 7: Cubierta y chimenea

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Construcción de horno de crisol para aleaciones no ferrosas	ESCALA; 1:125
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Evelin Yesenia Flores García	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO; 7/8	FECHA: 7/ 08/ 14	Detalle 7: Cubierta y chimenea	



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Construcción de horno de crisol para aleaciones no ferrosas	ESCALA: S/E
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonlo Berrfos Ortiz		ESTUDIANTE: Evelin Yesenia Flores Garcia	UNIDADES: Milímetros
N° PLANO: 8/8	FECHA: 7/ 08/ 14	Ensamble: Horno de Crisol	

No. K 13AS000U 314510

FORMULARIO UNICO

K000314510
FACTURA

NRC: 2 - 7 NIT: 0210 - 191171 - 001 - 6

CLIENTE:

N.R.C.:

DIA	MES	AÑO
02	07	2014

DIRECCION: DEPARTAMENTO:

GIRO: NIT No. Y/O D.U.I.:
00000000000000

CODIGO	CONDICION DE LA OPERACION	N/R	F.N.R.	ORDEN No.	VEND.	SUCURSAL	DESPACHO	AUTORIZA
EFFECTIVO				F14 52	07-5156			

CODIGO	DESCRIPCION	UM	CANT.	PRECIO UNITARIO	TOTAL
64132	MANOMETRO 160 PSI 2" WK 8002	PZA	1	5.2500	5.25
	Descuento 5.00%				-0.26
64128	MANOMETRO 10 PSI 2" WK 8002	PZA	1	5.2500	5.25
	Descuento 5.00%				-0.26
12633	REDUCTOR CAMPANA GALVA 1/2" A 1/4"	PZA	1	0.6000	0.60
10295	NIPLE GALVANIZADO 1/2X3"	PZA	2	0.3800	0.76
14254	TEE GALVANIZADA 1/2"	PZA	1	0.7300	0.73
2482	BUSHING GALVANIZADO 1/2 A 1/4"	PZA	1	0.5000	0.50
10306	NIPLE GALVANIZADO 3/4X2"	PZA	1	0.3500	0.35
14255	TEE GALVANIZADA 3/4"	PZA	1	1.1001	1.10
2484	BUSHING GALVANIZADO 3/4 A 1/4"	PZA	2	0.6000	1.20
14472	TERMINAL PARA MANGUERA 3/8"X1/4"NPT MAC	PZA	2	0.9000	1.80
28128	ABRAZADERA PARA MANGUERA ACERO INOX 5/8"	PZA	1	0.2500	0.50

ALMACENES VIDRI S.A. D.S.
DESCUENTO

COPIA
NO DA DERECHO A CREDITO FISCAL

- CENTRO: 1a. C. Pte. y Av. España, San Salvador, Depto. de San Salvador. Tel.: 2271-3033
- VENEZUELA: 21a. Av. Sur entre 12 y 14 Calle Pte. Centro de San Salvador. Tel.: 2271-4033
- ESCALON: Paseo General Escalón y 2da. Av. Sur, San Salvador, Depto. de S.S. Tel.: 2263-3033
- SOYAPANGO: C. a Tonacatepeque 7E. a Ciudadela Don Bosco, Soyapango, Depto. de S.S. Tel.: 2292-3877
- EJERCITO: Km. 6, Blvd. del Ejército, Soyapango, Depto. de San Salvador. Tel.: 2277-7333
- METROPOLIS: C. Zacamán, Ciro, Comercial, Esq. Milagritos, Mejicanos, Depto. de S.S. Tel.: 2272-5000
- QUEZALTEPEQUE: Av. José María Castro No. 22, Quezaltenango, Depto. de La Libertad. Tel.: 2310-0433
- SANTA ANA CENTRO: 4a. Av. Sur No. 5, Departamento de Santa Ana. Tel.: 2448-1122
- SANTA ANA BY PASS: Km. 63 Autopista By Pass, Departamento de Santa Ana. Tel.: 2440-4141
- SAN MIGUELITO: 29a. Calle Pte. y 1a. Av. Nte. # 207, Barrio San Miguelito, Depto. de S.S. Tel.: 2225-9500
- MERLIOT: Calle Libertad y Boulevard Merliot, Departamento de La Libertad. Tel.: 2278-3033
- CONSTITUCION: Blvd. Constitución No. 547 Col. Miranda, San Salvador. Tel.: 2274-3033
- SONSONATE: Km. 66 Carretera a Acajutla, Sonsonate. Tel.: 2450-4033

VALOR GRAVADO	17.52
VALOR EXCENTO	0.00
VALOR TOTAL	17.52
US\$	0.00
VENTAS NO SUJETAS	17.52

VIDRI
Donde hay de todo

ALMACENES VIDRI, S.A. DE C.V.
CASA MATRIZ
21 Av. Sur, entre 12 y 14
Calle Poniente. S.S.

FERRETERIA

SI ES COMPROBANTE DE CREDITO FISCAL
"COPIA NO DA DERECHO A CREDITO FISCAL"
SI ES NOTA DE CREDITO
"COPIA NO VALIDA PARA EFECTOS
TRIBUTARIOS"
SI ES FACTURA NINGUNA DE LAS ANTERIORES

LIQUIDO A PAGAR US\$ 17.52
Diecisiete 52/100 Dolares

NO SE ADMITEN DEVOLUCIONES DE MATERIALES CORTADOS

NOMBRE: NOMBRE: 07-5156 NO SE ACEPTAN DEVOLUCIONES SIN LA PRESENTACION DE ESTE COMPROBANTE DENTRO DE LOS PRIMEROS QUINCE DIAS.

D.U.I./N.I.T.: D.U.I./N.I.T.:

F. RECIBIDO F. ENTREGADO

FORMULARIOS STANDARD, S.A. DE C.V. 37 AV. NTE. No. 114, SAN SALVADOR. PBX: 2525-3500 FAX: 2260-6888
NRC: 4040-1 NIT: 0614-030269-102-6 AUTORIZACION DE IMPRENTA No. 0059-DGII DE FECHA 24/08/1992
TRAMJE: 1345200011 - 134520001600.000 FECHA DE IMPRESION: 01/2014
RESOLUCION No. 20108-RES-CR-49621-2013 DEL 25/11/2013

DUPLICADO - COMPROBANTE DE CREDITO FISCAL / NOTA DE CREDITO - CONTABILIDAD FACTURA - CLIENTE

**FREUND MAYOREO**

NRC : 41-8 NIT: 0614-010858-001-7
 Giro : Venta Art. Ferreteria, Materiales Construccion, Pinturas Y Arts.
 Conexos
 Prolongación Autopista Nte Y Pje Freund No.3, Col. Mompegón, San
 Salvador
 e-mail: mayoreo@freundsa.com TEL : 25008888 FAX: 22769266

Página: 1 de 1 20/03/14 11:03:49

COTIZACION

5029682 * 5029682 *

Fecha de Cotización : JUEVES, 20 DE MARZO DE 2014 VT: 13692
 Cliente : 0 **EVELYN GARCIA**
 Dirección :
 Teléfonos : 0
 Registro : FA
 Sub-Cuenta : 0
 Condiciones de Pago : Contado

Código	Unidad	Descripción	Cantidad	Precio \$	Total \$
3604060	PLG	LAMINA NEGRA E1/8PX2X1MT	1.00	51.5000	51.5000
3600060	PLG	LAMINA NEGRA C1/16PX2X1MT (1.50MM)	1.00	26.8000	26.8000

SUB-TOTAL : 78.30

IVA : 0.00

TOTAL : 78.30

Roberto Urbina

ACEPTADO CLIENTE

ROBERTO ANTONIO URBINA
EJECUTIVO DE VENTAS

PRECIOS EN DOLARES INCLUYEN IVA

PRECIOS SUJETOS A CAMBIOS SIN PREVIO AVISO



DIDERI, S.A. DE C.V.

Repuestos para el Manejo y Control de Fluidos
Calle Dr. Roberto Masferrer, No. 1329, Col. Medica
Apdo. Postal No. 2066, Tel.: 2226-2044, Fax: 2225-9938
San Salvador, El Salvador, C.A.
NIT: 0614-250188-004-5, Reg. No. 446-4

Cotizacion No.: -25011

Cliente :
Direccion : SAN SALVADOR,
Ciudad :
Reg. No. : 446-4
Telefono :
Fecha Doc. : 29/03/2014
Atencion a :
Tipo de emp. : MED

Codigo : 0
Fecha : 29/03/2014
Vendedor : 1
Valido hasta : 28/04/2014
Tiempo de entrega INMEDIATA

Estimados Senores

Por este medio les enviamos un cordial saludo y exitos en sus labores, atendiendo su solicitud de nuestros productos, les proporcionamos la siguiente cotizacion:

Cantidad	Clave	Descripcion	Unidad	Unitario	Total
1	FCX34	FIBRA CERAMICA 2" X 24" X 150"	C/U	45.00	45.00



Forma de pago: CONTADO
Stock Sujeto a Venta Previa

Sub - Total : 45.00
IVA : 5.85
Total : \$ 50.85

CESAR AUGUSTO SOSA
Gerente de ventas

OFICINA
Vendedor

Firma y Sello del Cliente
AUTORIZACION

IMPORTANTE: TODA FACTURA MENOR A \$50.00 USD DEBERA SER CANCELADA DE CONTADO

Almacenes Vidri
METROPOLIS

CALLE ZAGAMIL Ctra. COMERCIAL PLAZA METROPOLIS, SA
TELEFONO: 2272-5000 FAX:
COTIZACION No. 50768
Registro No.: 2-7
NIT No. : 0210-191171-001-6

FECHA: 31/03/2014
PARA EVELYN GARCIA
DIRECCION:
TELEFONO: 22689816 FAX :

ATENCION:
DE: OTONIEL EDENILSON GUANDIQUE

ASUNTO: COTIZACION DE MERCADERIA
TERMINOS:

PAGINA: 1

CODIGO	DESCRIPCION	UM	CANTIDAD	PRECIOS	TOTAL
5699	ELECTRODO PARA HIERRO DULCE 3/32" OK 46.00	LER	2.00	1.650	3.30
9623	MANGUERA PARA COCINA 3/8"	YAR	5.00	0.300	1.50
27664	VALVULA DE BOLA GALVANIZADA DE 3/8	PZA	1.00	3.950	3.95
15538	TUBO DE COBRE 3/8"	PIE	2.00	1.750	3.50
92482	CORRO ALUM 950-1 200[C	GAL	1.00	33.000	33.00

VALIDEZ DE LA OFERTA 7 DIAS

SUBTOTAL: 45.25

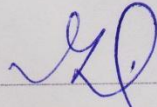
NOTA PRECIOS YA INCLUYEN IVA

0.00

ALMACENES VIDRI, S.A. DE C.V.
Sucursal Metropolis
PBX: 2272-5000

TOTAL (\$) 45.25

BMT-0909



OTONIEL EDENILSON GUANDIQUE
VENDEDOR

AUTORIZADO

ACEPTO

ALMACENES VIDRI, S.A. DE C.V.
 CONSTITUCION
 BLVD. CONSTITUCION #547, COL. MIRANDA,
 S.S.
 Telefono 227430333
 Reg.IVA: 2-7
 Giro o Actividad : Ferreteria
 I.V.A. D.L. # 296
 N.I.T.:0210-191171-001-6
 No Caja 42 No Z: 2072
 20/05/2014 11:53
 RESOLUCION No.:08SA120042T
 DEL: 1 AL 500000
TICKET # 0000234773

Nombre del Cliente: CONSUMIDOR FINAL

NIT/DUI: 00000000000000

VALVULA DE BOLA 1/4" GENEBRE 27665	1 PZA	3.950	3.95 G
TELA PARA GALLINERO 3/4X36" 19476	2 YAR	1.000	2.00 G
PIN PARA LAMINA 1/4X4" DOBLADO 28458	8 PZA	0.100	0.80 G
TERMINAL PARA MANGUERA 3/8"X1/4"NPT MAC 14472	2 PZA	0.900	1.80 G

SubTotal Exentos Dolares:	0.00
SubTotal Gravado Dolares:	8.55
Ventas no Sujetas :	
Total Venta Dolares:	8.55
POS AVAL CARD \$:	8.55
Cambio \$:	0.00

Total Colones: 74.81

Atendido por : 00

Gracias por su compra

ALMACENES VIDRI, S.A. DE C.V.
 CONSTITUCION
 BLVD. CONSTITUCION #547, COL. MIRANDA,
 S.S.
 Telefono 227430333
 Reg.IVA: 2-7
 Giro o Actividad : Ferreteria
 I.V.A. D.L. # 296
 N.I.T.:0210-191171-001-6
 No Caja 44 No Z: 1924
 27/05/2014 17:48
 RESOLUCION No.:08SA120044T
 DEL: 1 AL 500000
TICKET # 0000204390

Nombre del Cliente: CONSUMIDOR FINAL

NIT/DUI: 00000000000000

GRASA PARA CARRETA N3 130Z GR303 71664	1 PZA	3.750	3.75 G
INCIENSO AROMA ROSE PETALS 11" 206576 82110	1 J60	2.100	2.10 G

SubTotal Exentos Dolares:	0.00
SubTotal Gravado Dolares:	5.85
Ventas no Sujetas :	
Total Venta Dolares:	5.85
EFFECTIVO \$:	10.00
Cambio \$:	4.15

Total Colones: 51.19

Atendido por : 00

Gracias por su compra