DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN HORNO TIPO CRISOL CON CAPACIADAD DE 5KG, PARA ALUMINIO

ALEXANDER NARVAEZ CARDENAS

PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA, MECATRONICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, 18 Agosto de 2015

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN HORNO TIPO CRISOL CON CAPACIADAD DE 5KG, PARA ALUMINIO

ALEXANDER NARVAEZ CARDENAS
Alexc252009@hotmail.com

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Director: JUAN CARLOS DELGADO SANABRIA
Ingeniero Mecánico
jucadeca@hotmail.com

PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA, MECATRONICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, 18 Agosto de 2015

DEDICATORIA

Dedico a mis padres Néstor Segundo Narváez Tovar, Rosa Cárdenas, mis hermanas(o) y amigos porque siempre estuvieron presentes en todas mis metas, apoyándome e incentivándome incondicionalmente.

Mentalizándome que las cosas son realizables con esfuerzo y dedicación.

AGRADECIMIENTOS

A dios todo poderoso por darme cada día salud y Sabiduría, para el desarrollo de mi estudio profesional.

A mis familiares por brindarme siempre confianza, apoyo y seguridad en las tomas de mis decisiones.

A mi director, Ing. Juan Carlos Delgado Sanabria, por su apoyo formativo para la realización de este proyecto.

Al grupo de profesores de Ingeniería mecánica, por sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCION 13
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14
3. JUSTIFICACION 15
4. OBJETIVOS 16
   4.1 Objetivo general.....16
   4.2 Objetivos específicos.....16
5. ESTADO ACTUAL 17
   5.1 ALUMINIO 17
      5.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS 17
      5.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS 17
   5.2 APLICACIONES Y USOS.....18
   5.3 FUSION DEL ALUMINIO.....18
   5.4 PROCESO DE FUNDICION DE ALUMINIO DESDE EL MATERIAL RECICLADO.....20
   5.5 RECICLAJE DE ALUMINIO.....20
   5.6 VARIABLES DEL PROCESO DE FUNDICION DE ALUMINIO. 21
      5.6.1 PESO DE LA CARGA 21
      5.6.2 TEMPERATURA.....21
      5.6.3 CALOR NECESARIO PARA LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO.....22
      5.6.4 CALOR UTIL QUE HA DE ENTREGARSE A LA CARGA METALICA......22
6. LOS HORNOS 23
   6.1 GENARALIDADES 23
      PRINCIPALES PARTES QUE CONSTITUYEN UN HORNO 23
   6.2 PROCESO DE CLASIFICACIÓN 23
      6.2.1 Según la temperatura de trabajo.....24
      6.2.2 Según el uso.....24
      6.2.3 Según el funcionamiento de opresión 24
      6.2.4 Según su forma de calentar 24
      6.2.5 Según su fuente de energía 24
   6.3 MÉTODOS DE CALENTAMIENTO EN LOS HORNOS.....24

6.4 TIPOS DE HORNOS 25
6.4.1 Hornos rotatorios 25
6.4.2 Hornos de cuba 26
6.4.3 Hornos de Reverbero 27
6.4.4 Hornos de túnel 28
6.4.5 Hornos de fundición 29
6.4.6 Horno de hogar abierto o crisol 29
6.4.7 Hornos de Crisol 30
6.4.7.1 CARACTERISTICAS DE LOS CRISOLES 30
6.4.7.2 SELECCIÓN DEL CRISOL 30
6.4.7.3 Posición del crisol en el horno 30
6.4.7.4 Arranque del crisol o prendida del horno 31
6.4.7.5 Tipos de horno de crisol 31
6.4.7.6 Formas de calentamiento en los hornos de crisol 33
6.4.7.7 Medición de la temperatura 34
6.4.7.8 Medición de la temperatura por el color 35
6.5 DISEÑO TERMICO 36
REQUERIMIENTOS BÁSICOS 36
6.6 COMBUSTIBLES 36
6.6.1 CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES 37
6.6.2 COMBUSTIBLES GASEOSOS 37
Ventajas de los combustibles gaseosos 38
6.6.3 SELECCIÓN DEL COMBUSTIBLE 38
6.6.4 GAS LICUADO DE PETRÓLEO. 38
7. MOLDES 39
7.1 MOLDEO MANUAL EN ARENA 40
7.1.1 Materiales empleados para la fabricación de modelos 40
7.1.2 PROCESO 41
7.1.3 CAJAS DE MOLDEAR 42
7.2 CALIDAD DE LA FUNDICIÓN 43
7.2.1 Defectos de la fundición 43
7.2.2 Métodos de inspección 46
7.3 Consideraciones para el diseño de productos 47

8. MATERIALES REFRACTARIOS.....51
8.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.....51
8.2 CONSTITUCIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.....54
8.3 TIPOS DE MATERIALES REFRACTARIOS 56
8.4 SELECCIÓN DEL MATERIAL REFRACTARIO.....57
9. TRANSFERENCIA DE CALOR.....57
9.1 CONDUCCIÓN 57
9.2 CONVECCIÓN 59
9.3 RADIACIÓN.....60
10. DISEÑO Y CÁLCULO DEL HORNO.....61
10.1 ENERGIA PARA EL PROCESO 62
10.1.1 Energia necesaria para elevar la temperatura de 20°C hasta 900°C 63
10.1.2 Determinación de calor para promover un cambio de fase 63
10.1.3 Determinación del Calor en el Crisol 64
10.1.4 Calor Total 64
10.2 DETE RMINACION DE LA MASA A CALENTARSE. 64
10.3 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGIA POR KILOGRAMO. 65
11. CALCULOS Y RESULTADOS 65
11.1 DISEÑO DE INGENERIA 65
11.2 CALCULOS TEORICOS DEL EQUIPO.....65
11.3 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO 66
11.4 CALCULOS DEL DIMENCIONAMIENTO DEL EQUIPO.....66
11.4.1 BALANCE SIMULTÁNEO DE MASA Y ENERGIA.....66
- **BALANCE DE MASA** 66
- **BALANCE DE ENERGIA**.....67
11.4.2 CALCULO DEL CALOR UTIL.....67
11.4.3 CALCULO DEL CALOR QUE HA DE ENTREGARSE A LA CARGA METALICA.....68
11.4.4 CALOR ABSORVIDO POR EL CRISOL.....70
11.4.5 CALOR UTIL PARA LA COCCION 71
11.5 CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CALOR 72
- **PERFIL DE TEMPERATURA**.....72

11.6 CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN 74
11.6.1 COEFICIENTE EN LA TAPA INFERIOR DEL HORNO (BASE)...77
11.6.2 COEFICIENTE EN LA TAPA SUPERIOR DEL HORNO 78
11.7 PERDIDAS DE CALOR EN LAS PAREDES DEL CILINDRO 78
11.7.1 PERDIDAS DE CALOR TOTAL EN LAS PAREDES DEL CILINDRO 80
11.7.2 PERDIDAS DE CALOR EN LA BASE DEL HORNO....80
11.7.3 PÉRDIDAS DE CALOR TOTAL EN LA BASE DEL HORNO....82
11.7.4 PÉRDIDAS DE CALOR EN LA TAPA SUPERIOR DEL HORNO .82
11.7.5 PÉRDIDAS DE CALOR TOTAL EN LA BASE DEL HORNO....83
11.7.6 PÉRDIDAS DE CALOR TOTAL EN EL HORNO 84
11.7.7 CALCULO DE BALANCE DE ENERGIA....84
11.8 CALCULOS DE COMBUSTIÓN 84
11.8.1 AIRE TEÓRICO – COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE.....84
11.8.2 CONSUMO DE COMBUSTIBLE 87
11.9 DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO....88
11.9.1 DIMENSIONES INICIALES 88
11.9.2 DETERMINACIÓN DEL ANCHO O ESPESOR DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN....89
11.9.3 CONTENIDO CALÓRICO 90
11.9.4 ESPACIO DE COMBUSTIÓN 91
11.9.5 DETERMINACION DEL DIAMETRO INTERNO TOTAL DEL HORNO 92
11.9.6 DETERMI NACIÓN DEL DIAMETRO EXTERIOR DEL HORNO...92
11.9.7 ESPESOR DE LAS PAREDESCILINDRICAS DEL HORNO.....93
11.9.8 ALTURA DEL HORNO....93
12. METODOLOGIA EXPERIMENTAL....94
12.1 CONSTRUCCION DE LA BASE SOPORTE DEL CILINDRO 94
12.2 DESTIJERE DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE....95
12.3 CONSTRUCCION DE LA BOBEDA DEL HORNO 97
13. RESULTADOS....101
13.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL HORNO....101
14. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS....101

14.1 ANALISIS Y RESULTADOS 101
15. CONCLUSIONES 102
16. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS 103
17. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 104
18. ANEXOS 106
18.1 Anexo 1 106
18.2 Anexo 2 109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales tipos de combustible que pueden ser usados en la operación de los hornos de crisol. 33
Tabla 2. Variación del calor con la temperatura 35
Tabla 3. Componentes de las arenas ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 4. Tolerancias dimensionales típicas y acabados superficiales para diferentes procesos de fundición y metales. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 5. Refractarios empleados en procesos industriales a alta temperatura. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 6. Condiciones que deben soportar los materiales refractarios**¡Error! Marcador no definido.**
Tabla 7. Propiedades del aire con temperatura de película 75
Tabla 8. Dimensiones y características del crisol 88
Tabla 9. Ejemplo de tabla. (Justificado a la izquierda y dejar un espacio)**¡Error! Marcador no definido.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento molecular en la transferencia de calor por conducción 58
Figura 2. Ley de Fourier..... 58
Figura 3. Tipos de calentamiento en los hornos..... 25
Figura 4. Horno rotatorio ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 5. Horno de cuba - Alto horno..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 6. Esquema de los hornos de reverbero ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 7. Korno Tunel..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 8. Horno de crisol para metales no ferrosos ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 9. Esquema de los hornos de crisol basculante..... 32
Figura 10. Herramientas para modelado en arena..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 11. Algunos defectos comunes en las fundiciones ... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 12. Defectos comunes de fundiciones en arena..... **¡Error! Marcador no definido.**
Figura 13. Expone el problema y ofrece algunas soluciones posibles**¡Error! Marcador no definido.**
Figura 14. Cambio de diseño para eliminar la necesidad de usar un corazón .....**¡Error! Marcador no definido.**
Figura 15. Contenido de Calor de los metales a diferentes temperaturas.**¡Error! Marcador no definido.**
Figura 16. Balance de energía del equipo. 67
Figura 17. Perfil de temperaturas en el interior del horno 72
Figura 18. Esquema de resistencias analógicas para el horno 73
Figura 19. Ejemplo de figura. (Justificado a la izquierda)... **¡Error! Marcador no definido.**

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE UN HORNO TIPO CRISOL CON CAPACIADAD DE 5KG, PARA ALUMINIO

Alexander Narvaez

[a,b]*Pamplona University, Km 1 Via B/manga, Pamplona, Colombia*
[b]*Rovira i Virgili University, Av. Paissos Catalans 26, 43007, Tarragona España*

RESUMEN

La presente tesis de grado tiene como objetivo general el diseño y construcción de un prototipo de horno para la fundición de metales no ferrosos, utilizando un crisol de 5kg de capacidad. Se utiliza un sistema de combustión con gas natural impulsado por flujo de aire para realizar la fundición. Se ha utilizado los conocimientos adquiridos en la formación de la carrera de Ingeniería Mecánica en campos de diseño y transferencias de calor. Los parámetros de construcción han sido orientados a obtener un prototipo que mejore el proceso de fundición en función de la seguridad de la operación. Se incluye los diseños, cálculos y verificaciones prácticas de las operaciones del prototipo, así como también las proyecciones de mejoramiento para futuras aplicaciones.

Abstract

The general target of the current grade work is aim to design and construction a prototype furnace for melting nonferrous metals. A crucible of 5kg of capacity and a combustion system with natural gas driven airflow for do melting is used. The knowledge gained in the training career in Mechanical engineering design fields and heat transfers were applied. The construction parameters has been guided to improve of process melting according to operational assurance. Designs, calculations and checks practical prototype operations, as well as projected improvements for future applications were included.

1. INTRODUCCION

La fundición de Aluminio reciclado es un proceso bondadoso con la naturaleza, a pesar de necesitar mucha energía para llevarlo a cabo. Al ser un elemento que se puede reciclar cuantas veces se requiera y no perder sus propiedades, se evita que se siga explotando en las minas de donde se obtiene.

La fundición es considerada uno de los procesos de fabricación más importantes en la manufactura de piezas metálicas; y es precisamente, la práctica de este tipo de procesos lo que lleva a la realización de este proyecto.

Un horno de fundición, permite calentar el metal hasta un estado líquido de acuerdo al punto de fusión del material, para posteriormente, vaciarlo en un molde que contiene la forma del diseño a fabricar. Como el aluminio es uno de los materiales con punto fusión relativamente bajo, abundancia en la naturaleza y alta maquinabilidad, se ha optado por diseñar, construir y hacer el montaje de un horno crisol para la fundición de aluminio.

En el desarrollo de esta propuesta se abordarán conceptos de ingeniería metalúrgica y los procesos convencionales de manufactura aplicados a la fabricación de pequeñas piezas.

Finalmente, este trabajo es financiado por el Almacén y Taller Rangel, el cual se dedica a la mecánica automotriz y considera que un horno portátil le permite fabricar pequeñas piezas de difícil consecución.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El “Almacén y Taller de mecánica automotriz Rangel” en una entidad que brinda el servicio de reparación de vehículos y a su vez tiene un estándar de repuestos considerados críticos que ofrece en su almacén para otros talleres de la ciudad.

Este negocio se ha visto perjudicado a la hora de cumplir sus compromisos con los clientes debido a la inexistencia de algún sencillo repuesto como piezas para soporte de motor en vehículos Renault, bases de termostatos, entre otras. El retraso se presenta porque no hay existencia en la ciudad y sus alrededores de la pieza en cuestión o simplemente por el estado de las vías que no brindan la facilidad para el desplazamiento a otras ciudades con el fin adquirirlo; esto, sin contar con los costos adicionales que se acarrean por el traslado de la pieza hasta la ciudad de Pamplona.

Construir un horno tipo crisol para aluminio, brinda la posibilidad de fabricar piezas a la medida requerida; la cuales sirven de base para un posterior mecanizado, acabado y/o ajuste final. Con ello se genera una alternativa de rentabilidad para la empresa en cuanto al tiempo del servicio prestado.

3. JUSTIFICACION

El conocimiento de los procesos de manufactura moderna, se convierte cada vez más en una herramienta indispensable para la formación profesional de un ingeniero interesado en el área de la fabricación y la manufactura.

La construcción de un horno de fundición de aluminio que permita obtener pequeñas piezas metálicas ofrece al taller Rangel una solución inmediata para la fabricación de esas pequeñas piezas que continuamente requieren. Adicionalmente, el horno ofrece la posibilidad de fundir materia prima para los torneros de la región o figuras para los talleres de ornamentación.

El horno crisol es la alternativa más atractiva puesto que, al compararlo con otro de características industriales resulta ser más viable, no solo porque es menos costoso al momento de adquirirlo, sino también que es un horno donde se puede realizar prácticas de fundición, con materiales económicos, reciclables, de bajo punto de fusión, utilizar combustibles de fácil adquisición para su operación.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y realizar el montaje de un horno tipo crisol con capacidad de 5 kg, para aluminio.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Diseñar y modelar los diferentes componentes del horno.
- ✓ Construir cada uno de los componentes que no se encuentran comercialmente.
- ✓ Realizar el montaje del horno.

5. ESTADO ACTUAL

5.1 ALUMINIO

El aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Se trata de un metal no ferromagnético. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos como son feldespatos, plagioclasas y micas. Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis

Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad y su alta resistencia a la corrosión. Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX el metal que más se utiliza después del acero. (Acebes)

5.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Entre las características físicas del aluminio, destacan las siguientes:

- Es un metal ligero, cuya densidad es de 2.700 kg/m^3
- Tiene un punto de fusión bajo: 660 °C (933 °K).
- El peso atómico del aluminio es de 26,9815 g/mol.
- Es de color blanco brillante, con buenas propiedades ópticas y un alto poder de reflexión de radiaciones luminosas y térmicas.
- Tiene una elevada conductividad eléctrica comprendida entre 34 y 38 m/Ω mm^2 y una elevada conductividad térmica 80 a 230 W/m°K.
- Resistente a la corrosión, a los productos químicos, a la intemperie y al agua de mar, gracias a la capa de Al_2O_3 formada.

5.1.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

- Debido a su elevado estado de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio impermeable y adherente que

detiene el proceso de oxidación, lo que le proporciona resistencia a la corrosión y durabilidad.

- El aluminio tiene características anfóteras.
- El principal y casi único estado de oxidación del aluminio es +III como es de esperarse por sus tres electrones en la capa de valencia (Bueno Saenz)

5.2 APLICACIONES Y USOS

Ya sea considerando la cantidad o el valor del metal empleado, el uso industrial del aluminio excede al del cualquier otro metal exceptuando el hierro o acero. Es un material importante en multitud de actividades económicas y ha sido considerado un recurso estratégico en situaciones de conflicto.

El aluminio puro se utiliza rara vez 100% puro y casi siempre se usa aleado con otros metales para mejorar alguna de sus características. El aluminio puro se emplea principalmente en la fabricación de espejos, tanto para uso doméstico como para telescopios reflectores. (Barragan, 2012)

Los principales usos industriales de las aleaciones metálicas de aluminio son:

- Transporte como material estructural en aviones, automóviles, trenes de alta velocidad, metros, tanques, superestructuras de buques y bicicletas.
- Estructuras portantes de aluminio en edificios.
- Embalaje de alimentos; papel de aluminio, latas, tetrabriks, etc.
- Carpintería metálica; puertas, ventanas, cierres, armarios, etc.
- Bienes de uso doméstico; utensilios de cocina, herramientas, etc.
- Calderería.

5.3 FUSION DEL ALUMINIO

La fusión es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia del estado sólido al estado líquido por la acción del calor. Cuando se calienta un sólido, se transfiere calor a los átomos que vibran con más rapidez a medida que gana energía. (SALVIGIULIANO)

La fusión del aluminio es un proceso que se realiza mediante la adición de energía usando hornos de diferentes características, los cuales pueden ser muchos en cuanto a tipo y diseño, pero de acuerdo al tipo de suministro de energía, los

hornos de fusión se clasifican en hornos de combustión, eléctricos y mixtos. En nuestro medio la fusión se la efectúa casi exclusivamente en hornos de combustible, empleando por razones económicas diesel.

En este caso vamos a utilizar aluminio reciclado, particularmente de perfiles obteniendo aluminio de segunda fusión que se genera por la fusión de chatarras. Esta materia prima es conseguida por reciclaje y posteriormente convertida en lingotes.

Si bien es cierto que el aluminio tiene un punto de fusión de 660 °C, relativamente bajo en comparación con el bronce 900 °C o hierro 1508°C, sin embargo se precisa un 80% más de calor latente para fundir aluminio que para fundir bronce. Para obtener éxito en el proceso de fusión es necesario poder medir y/o regular la temperatura del caldo puesto que una vez que toda la carga se ha fundido, la temperatura comenzara a elevarse con suma rapidez si es que seguimos con el mismo suministro de calor ya que el requerimiento calórico será menor y mientras mayor sea el recalentamiento a que somete el caldo mayores serán los problemas y menor la calidad de la aleación.

Un proceso inadecuado produce en el metal un estado de deterioro causado por oxidación y por disolución de hidrogeno. El óxido que se produce sobre la superficie de las piezas de aluminio es alúmina anhídrida, la cual está representada por la Ec (1):

$$\mathbf{2Al + \frac{3}{2}O_2 = Al_2O_3 + 380\ Cal} \qquad \textbf{(1)}$$

En estado líquido la formación de óxidos se debe por lo general a la reacción del vapor de agua con el metal y la ecuación química de este proceso es la Ec (2):

$$\mathbf{3H_2O + 2Al = Al_2O_3 + H + Calor} \qquad \textbf{(2)}$$

Esta capa de óxido que se forma en la superficie del metal liquido toma el nombre de escoria cuando se torna demasiado gruesa, pero si el metal se encuentra en estado de reposo, esta es la mejor protección que se puede brindar al baño, si por cualquier circunstancia la capa se rompe es inmediatamente sustituida por otra.

En conclusión, mayor será la formación de óxidos mientras mayor sea la temperatura de fusión. A más de la incidencia de la temperatura la oxidación se torna mucho más crítica cuando se trabaja con aleaciones de aluminio con 4% o más de magnesio ya que éste incrementa la velocidad de formación de óxidos. Para prevenir la oxidación o convertirla en el caso que esté presente se usan los

fundentes o desoxidantes. La presencia de óxidos en las fundiciones de aluminio, disminuyen las propiedades mecánicas y por ser los óxidos extremadamente duros, dificultan el maquinado, además tienden a disminuir la fluidez y a causar por lo tanto serios problemas. (Universidad Tecnologica de Pereira)

5.4 PROCESO DE FUNDICION DE ALUMINIO DESDE EL MATERIAL RECICLADO

5.5 RECICLAJE DE ALUMINIO

El aluminio es 100% reciclable sin merma de sus cualidades físicas, y su recuperación por medio del reciclaje se ha convertido en una faceta importante de la industria del aluminio.

El proceso de reciclaje del aluminio necesita poca energía. El proceso de refundido requiere sólo un 5% de la energía necesaria para producir el metal primario inicial.

El reciclaje del aluminio fue una actividad de bajo perfil hasta finales de los años sesenta, cuando el uso creciente del aluminio para la fabricación de latas de refrescos trajo el tema al conocimiento de la opinión pública.

Al aluminio reciclado se le conoce como aluminio secundario, pero mantiene las mismas propiedades que el aluminio primario.

La fundición de aluminio secundario implica su producción a partir de productos usados de dicho metal, los que son procesados para recuperar metales por pre-tratamiento, fundición y refinado.

Se utilizan combustibles, fundentes y aleaciones, mientras que la remoción del magnesio se practica mediante la adición de cloro, cloruro de aluminio o compuestos orgánicos clorados.

Para proceder al reciclaje del aluminio primero hay que realizar una revisión y selección de la chatarra según su análisis y metal recuperable para poder conseguir la aleación deseada.

La chatarra preferiblemente se compactará, generalmente en cubos o briquetas o se fragmentará, lo cual facilita su almacenamiento y transporte. La preparación de la chatarra descartando los elementos metálicos no deseados o los inertes, llevarán a que se consiga la aleación en el horno de manera más rápida y económica.

El residuo de aluminio es fácil de manejar porque es ligero, no arde y no se oxida y también es fácil de transportar. El aluminio reciclado es un material cotizado y rentable. El reciclaje de aluminio produce beneficios ya que proporciona ocupación y una fuente de ingresos para mano de obra no cualificada. (Bueno Saenz)

5.6 VARIABLES DEL PROCESO DE FUNDICION DE ALUMINIO.

Las consideraciones de fusión dadas a continuación permiten establecer las características necesarias para obtener fundiciones de calidad minimizando recursos y tiempo:

- El control de la temperatura de fusión y colado debe ser adecuado.
- La fusión del metal debe realizarse en el menor tiempo posible.

Por lo tanto de acuerdo con las condiciones iniciales del horno, y según los requerimientos del proceso de fundición de aluminio se caracterizan algunas variables debido a que se debe tomar en cuenta algunos parámetros los que dependen de la forma del horno, los mismos que se describen en el diseño, de la cantidad de materia a fundir, de la temperatura y tiempo necesario para fundir el metal, la eficiencia del horno la misma que se basa en la cantidad de calor útil y la cantidad de pérdida de calor.

5.6.1 PESO DE LA CARGA

Se tomó como referente un peso de 5 kg del metal a ser fundido. El volumen o capacidad del trabajo mantiene relación directa con los Kg/hora de producto y el mercado al cual se dirija la industria por lo tanto se determina un volumen inferior y adecuado para realizar prácticas académicas.

5.6.2 TEMPERATURA

La fundición del metal debe realizarse a mayor temperatura la misma que debe ser uniforme y para colar a la mejor temperatura posible. Por consiguiente se toman los siguientes datos de temperatura:

- Temperatura ambiente 20 °C.
- Temperatura de fusión del Aluminio 660 °C.

- Temperatura del metal fundido para que pueda estar en condiciones óptimas de colado y ser puesto en moldes adecuados, debe tener alrededor de 800 °C.
- Temperatura de la cámara de combustión 900 °C, el tiempo del proceso de fusión es de 45 minutos que equivale a 0,75 horas; este es el tiempo necesario para que la cámara de combustión llegue a 900°C y la temperatura de colado sea la óptima.

5.6.3 CALOR NECESARIO PARA LA FUNDICIÓN DE ALUMINIO

Es importante que la cantidad de calor que pasa a la carga sea de gran magnitud; para de esta manera economizar en lo que ha combustible se refiere, y se puede conseguirlo analizando las pérdidas de calor que se producen. Por consiguiente el calor necesario será igual a la sumatoria de la cantidad útil de calor más el calor perdido por transferencia de calor.

5.6.4 CALOR UTIL QUE HA DE ENTREGARSE A LA CARGA METALICA.

El calor que ha de entregarse a la carga metálica es igual:

Al producto del peso de la carga, por el calor específico, y por la variación de la temperatura durante el tiempo de fusión lo podemos expresar como se muestra en la Ec (3).

$$\mathbf{Q} = \frac{\boldsymbol{m\,cp\,(Tf - To)}}{\boldsymbol{t}} \qquad \textbf{(3)}$$

Dónde:

Q = Cantidad de calor.

M = Peso de la carga

Cp = Calor específico.

Tf = Temperatura final.

To = Temperatura inicial.

6. LOS HORNOS

6.1 GENARALIDADES

Un horno es un dispositivo en el que se libera calor y se transmite directa o indirectamente a una masa sólida o fluida con el fin de producir en ella una transformación física o química.

PRINCIPALES PARTES QUE CONSTITUYEN UN HORNO

- Elemento generador
- Cámara de combustión recubierta con material refractario
- Sistema de alimentación de materia prima (Pistones)
- Sistema de medición y control de temperatura
- Fuente de combustible (Gas Propano)
- Boquilla de alimentación aire-combustible
- Redes de suministro de combustible o cableado de potencia (según el tipo de combustible)
- Crisol de grafito
- Pinza extractora de crisol
- Pinza bertidora de colada
- Arena sílice y aglutinante
- Mazo compactador de arena
- Cajones para moldeo

En estos tipos de procesos la energía calorífica requerida para el calentamiento de los hornos puede proceder de: Gases calientes producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos que calientan las piezas por contacto directo entre ambos o indirectamente a través de tubos radiantes o intercambiadores en general.

6.2 PROCESO DE CLASIFICACIÓN

En la industria existe una gran variedad de hornos y resulta difícil efectuar una clara clasificación que incluya todas categorías posibles. Por ello se dice que existe casi un tipo de horno específico para cada aplicación por lo tanto, Por lo tanto, normalmente se clasifican desde ciertos puntos de vista:

6.2.1 Según la temperatura de trabajo

- Hornos: Temperaturas de trabajo superiores a 550 °C.
- Estufas: Temperaturas de trabajo inferiores a 550 °C.

6.2.2 Según el uso

- Hornos de cemento
- Hornos de cal
- Hornos de coque
- Hornos cerámicos
- Hornos incineradores
- Alto Horno, etc.

6.2.3 Según el funcionamiento de opresión

- Continuos
- Discontinuos
- Periódicos

6.2.4 Según su forma de calentar

- Directos
- Indirectos

6.2.5 Según su fuente de energía

- Combustibles: sólidos, líquidos o gaseosos y mixtos.
- Energía eléctrica.
- Mixtas.

6.3 MÉTODOS DE CALENTAMIENTO EN LOS HORNOS

Dentro de los métodos de calentamiento con combustibles se encuentran los siguientes, (Ver Figura 1).

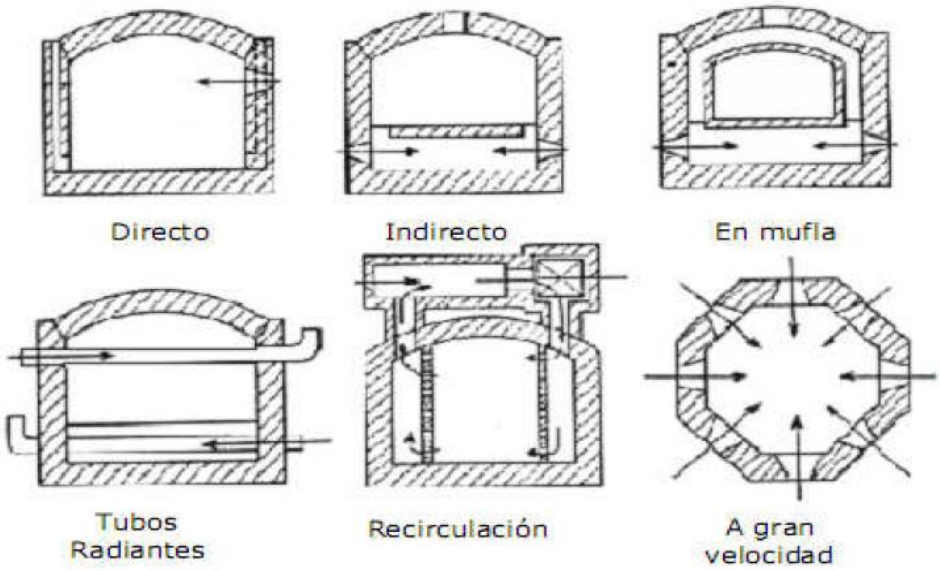
- **Directo:** La llama y los gases entran en contacto con la carga.

- **Indirecto:** Sólo los gases entran en contacto con la carga.

- **Muflas:** Se calienta una recámara que tiene en su interior la carga, por lo que los gases nunca tocan la carga. Especial para carga s que reaccionan o se contaminan con los gases de combustión.

- **Tubos de Radiantes:** este sistema gasta más combustible para obtener el mismo calentamiento. La llama se en causa por un tubo que alcanza una alta temperatura. Luego el calentamiento se realiza principalmente por radiación del tubo a la carga.

Figura 1. Tipos de calentamiento en los hornos



FUENTE: JONATHAN, ARMANDO (Armando, 2005)

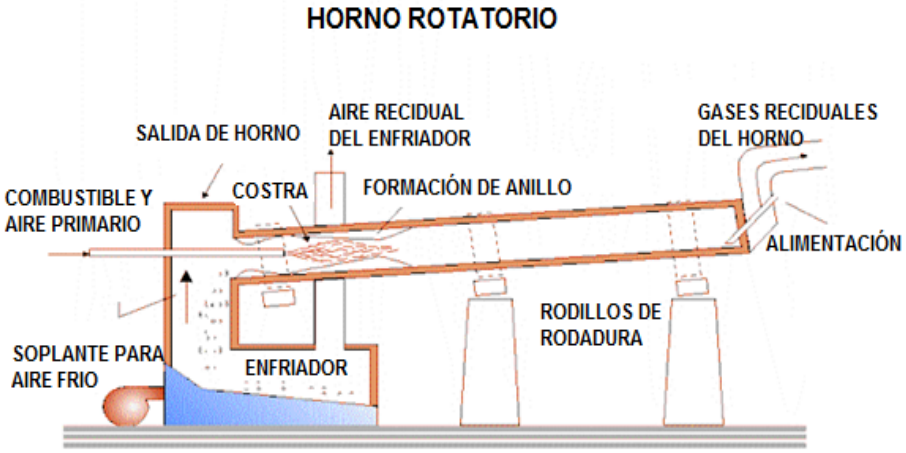
- **Recirculación:** La combustión se realiza en una cámara aparte del horno. Luego mediante un ventilador se introducen los gases el horno y se hacen Pasar varias veces por la carga hasta que pierdan la mayor cantidad de energía posible para luego ser evacuados.

6.4 TIPOS DE HORNOS

6.4.1 Hornos rotatorios

Los hornos rotatorios (Ver Figura 2), constan de un cilindro largo de acero que gira alrededor de su eje. En el caso de trabajo a altas temperaturas hay que recubrir el cilindro con ladrillo refractario en su interior. Ya sea para aislarlo del exterior o para proteger el acero.

Figura 2. Horno rotatorio



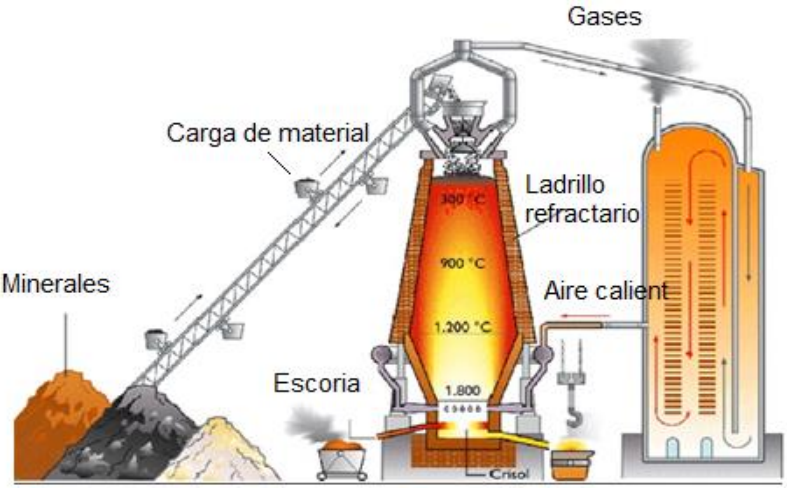
FUENTE: Tecnologiaslimpias (Tecnologiaslimpias)

6.4.2 Hornos de cuba

El horno de cuba es un horno que funciona con combustible sólido, su propósito es el aprovechamiento de las chatarras o pedacería de hierro y acero. La carga metálica, el combustible y el comburente están en contacto; lo que permite un intercambio térmico directo y activo, dando lugar a un rendimiento elevado. Posee una cámara vertical llamada cuba, la cual puede ser cilíndrica o cónica. En su interior puede estar cubierta por un refractario según la temperatura de trabajo. La carga se alimenta por la parte superior llamada tragante. El producto se evacua por la parte inferior. Los gases que calientan, la carga entra a la cuba por la parte inferior y se encuentran con la carga en contracorriente.

Dentro de los hornos de cuba se encuentran los horno para cal, alto horno para obtener arrabio (hierro de primera fundición), hornos de guijas para calentar aire, hidrógeno, metano, vapor de agua, o en algunos casos como recuperador de calor y el Thermofor que se usa para pirolizar (crakear) petróleo y producir oleofinas, gasolinas y aromáticos. (figura 3).

Figura 3. Horno de cuba - Alto horno



FUENTE: Caicedo Marlon (caicedo, 2007)

6.4.3 Hornos de Reverbero

En estos hornos, la energía necesaria para fusión se produce por uno o por varios quemadores, alimentados por combustibles líquidos o gaseosos, cuyas llamas inciden directamente sobre la carga metálica. Los gases de combustión provocan en la atmosfera del horno, movimientos intensos de convección que mejoran los cambios térmicos con el metal que se funde.

Su principal uso es para fundiciones de cobre. Su construcción está en función del volumen de fusión que se tenga que alcanzar. (SALVIGIULIANO)

Figura 4. Esquema de los hornos de reverbero

FUENTE: Fernando Mestanza (FERNANDO, www.emison., 2012)

Posee dos pares de cámaras, formadas interiormente por una serie de conductos sinuosos de ladrillo refractario. Su funcionamiento es como sigue: Los gases calientes que salen del horno, al pasar a través de los recuperadores, les comunican su calor y, cuando están suficientemente calientes, mediante un dispositivo automático de válvulas, se invierte el sentido de circulación, de forma que el gas y el aire, antes de entrar en el horno, pasan por los recuperadores calientes y alcanzan temperaturas de 1000 °C a 1200 °C llegándose a conseguir de esta forma los 1800 °C. Mientras tanto los gases de la combustión pasan a través de los otros recuperadores que ahora están en periodo de calentamiento. (FERNANDO, www.emison., 2012)

6.4.4 Hornos de túnel

Como su nombre los dice, consta de un túnel que puede ser recto o circular, y por el interior del cual se mueve la carga de un extremo a otro. Para darle movimiento a la carga se utiliza una vagoneta movida sobre rieles o una banda de tela metálica y el túnel se divide principalmente en 3 zonas (Ver Figura 5).

- Zona de precalentamiento
- Zona de combustión o de cochura
- Zona de enfriamiento

Figura 5. Korno Tunel

FUENTE: Spanish (Spanish)

6.4.5 Hornos de fundición

Cualquier proceso de producción de acero a partir del Arrabio consiste en quemar el exceso de carbono y otras impurezas presentes en el hierro.

Una dificultad para la fabricación del acero es su elevado punto de fusión, 1.400ºC aproximadamente, que impide utilizar combustibles y hornos convencionales.

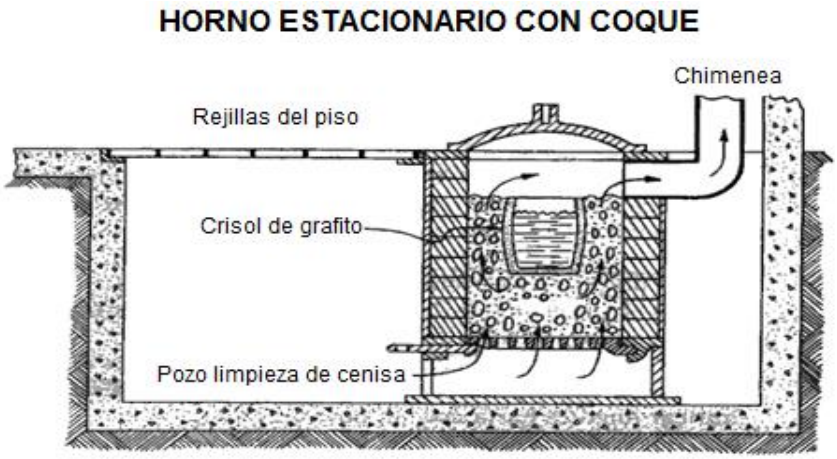
Para superar esta dificultad, se han desarrollado tres importantes tipos de hornos para el refinamiento del Acero, en cada uno de estos procesos el oxígeno se combina con las impurezas y el carbono en el metal fundido.

Cada uno de los tres tipos de hornos, crisol, oxígeno básico y eléctrico, requieren diferentes fuentes de energía y de materias primas. La clase de instalación se escoge, por tanto, por razones económicas, la disponibilidad de materias primas o fuentes energéticas.

6.4.6 Horno de hogar abierto o crisol

El horno de hogar abierto semeja un horno enorme, y se le denomina de esta manera porque contiene en el hogar (fondo) una especie de piscina larga y poco profunda (6m de ancho, por 15 m de largo, por 1 m de profundidad, aproximadamente). (Ver Figura 6).

Figura 6. Horno de crisol para metales no ferrosos



FUENTE: Botero Edgar (BOTERO)

6.4.7 Hornos de Crisol

Dentro de este tipo de hornos se distingue, el tradicional horno de fosa, horno a nivel del suelo, o levantado en relación al nivel del suelo, lo mismo que tienen como combustible el carbón de coque, el cual es cargado por la parte lateral del crisol y es sellado con la tapa del material refractario.

Todavía se encuentra este tipo de hornos, en pequeñas industrias dedicadas a la fundición, de elementos pequeños; el crisol de gafito o de carburo de silicio es el principal elemento.

6.4.7.1 CARACTERISTICAS DE LOS CRISOLES

El recipiente que contiene el metal liquido dentro del horno se denomina crisol existen diferentes tamaños, materiales y dimensiones.

Los materiales con los cuales se elaboran los crisoles, son variados pero en su mayoría son el carburo de silicio y el grafito.

6.4.7.2 SELECCIÓN DEL CRISOL

Para una adecuada selección del crisol se debe conocer qué tipo de aleación o metal se va a fundir, el combustible a emplear, además que el material con el cual es fabricado el crisol presente una excelente conductividad térmica y una buena resistencia a la acción de escorias.

El metal a fundir es el aluminio, el combustible es el gas propano, el horno es tipo crisol móvil y su capacidad a fundir es de 5 kg.

El tamaño del crisol está determinado por las condiciones de diseño

En la selección del crisol se tuvo en cuenta que el material soportara altas temperaturas, para llevar el aluminio de un estado sólido a un estado líquido. Teniendo encuentra que el Almacén y Taller Rangel ya contaba con el respectivo crisol, siendo estándar.

6.4.7.3 Posición del crisol en el horno

La posición del crisol en el horno es muy importante. La base del crisol puede estar al mismo nivel o ligeramente arriba de la línea del centro del quemador. Esto es posible si colocamos el crisol sobre el bloque pedestal a una altura apropiada, el crisol se debe colocar concéntrico a la pared interior del horno y dejar espacio uniforme de combustión alrededor.

6.4.7.4 Arranque del crisol o prendida del horno

Para los crisoles ligados con arcilla la temperatura del horno debe subir muy lentamente y particularmente para grandes tamaños del crisol; esto asegura un buen recocido y evita agrietamiento en caso de contener algo de humedad; los crisoles ligados con carbón pueden ponerse en funcionamiento más rápidamente, lo que puede favorecer el revestimiento protector que es apto para temperaturas altas, para cargar

6.4.7.5 Tipos de horno de crisol

- **Hornos pozo**

El crisol es removido del horno y llevado hasta los moldes para vaciar el metal. Este horno se puede construir sobre o bajo el nivel del suelo. En ambos casos el horno es fijo. Existen en una variedad de tamaño para acomodar crisoles desde 15 a 150 kg de capacidad de latón. Son extremadamente flexibles, tanto en relación a las aleaciones como a las cantidades. Se pueden usar crisoles distintos para diferentes aleaciones y, hasta cierto punto, crisoles de distinto tamaño en un mismo horno.

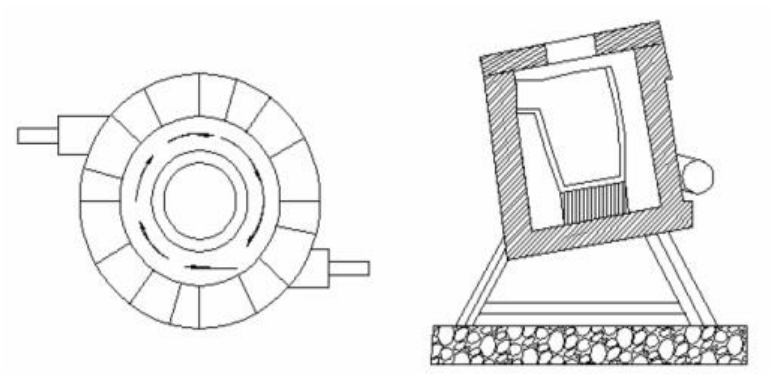
- **Hornos Bale-out (de espera)**

El metal es retirado del crisol con cucharas y transferido a los moldes. Se utilizan, principalmente, para fundición bajo presión, donde se necesitan pequeñas cantidades a intervalos frecuentes. Capacidades típicas en el rango de 50 kg a 500 kg de aluminio y 110 kg a 330 kg de latón. Rendimiento máximo: 240 kg de aluminio por hora.

- **Hornos Basculantes**

Son hornos movibles apoyados sobre un sistema de sustentación. 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. El tipo original de horno basculante, con capacidades de 70 kg a 750 kg de latón, bascula en torno a un eje central. 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 kg 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. (Armando, 2005)

Figura 7. Esquema de los hornos de crisol basculante



FUENTE: Jonathan, Armando (Armando, 2005)

- **Horno de crisol inmerso**

Es el inverso del horno normal de crisol, en el sentido de que la llama quema dentro del crisol que está inmerso en el baño de aleación de zinc o aluminio, el cual se encuentra en un recipiente refractario. Estos hornos son fabricados con capacidad de fusión de 300 kg a 1000 kg de aluminio por hora. Sus ventajas principales respecto de hornos de llama abierta son una mayor eficiencia, que alcanza a un 40%, y pérdidas de metal de tan sólo un 1 ó 2%, otorgando una considerable economía financiera.

- **Horno rotativo de crisol**

Se utilizan para la recuperación de viruta, escoria y otros tipos de chatarra menuda. El horno contiene un crisol con forma de garrafa, con capacidad de 300 kg de limadura de latón y trabaja a un ángulo aproximado de 50º con respecto a la vertical. El cuerpo del horno y el crisol giran constantemente durante la fusión, trayendo el metal para el lado caliente del crisol y tirando la limadura no fundida hacia adentro y abajo del metal ya fundido. De esta forma, la rotación proporciona una fusión más rápida y también evita la adhesión de la carga a las paredes del crisol, como ocurre frecuentemente con los hornos convencionales. El formato del crisol, y especialmente el cuello estrecho, junto con las condiciones neutras o reductoras dentro del crisol, virtualmente eliminan las pérdidas por oxidación de las cargas y aseguran una alta recuperación de metal (un porcentaje típico es la

recuperación de un 94% del metal de limadura de latón 60/40, conteniendo 3% de aceite).

La selección del tipo y tamaño de horno dependerá de la aplicación (por ej. si es para fusión o mantención), del número de aleaciones, la producción diaria de cada aleación, la mayor pieza a ser fundida, la continuidad de alimentación de metal, el tipo de combustible. (Armando, 2005)

6.4.7.6 Formas de calentamiento en los hornos de crisol

En relación a la forma de energía utilizada, los hornos de crisol pueden ser operados básicamente a través de energía eléctrica o de combustibles. En relación a la energía eléctrica, los hornos más comunes son de resistencia y de inducción. En cuanto a los combustibles, se puede utilizar una serie de formas diferentes (Tabla 1). Cada forma de energía, sea eléctrica o en forma de combustible, posee sus ventajas y desventajas que deben ser aprovechadas o evitadas de acuerdo con las condiciones de producción exigidas, o en función de la política de abastecimiento adoptada por la empresa.

Tabla 1. Principales tipos de combustible que pueden ser usados en la operación de los hornos de crisol.

COMBUSTIBLE	TIPO	PODER CALORÍFICO (Kcal/Kg)
Sólido	Leña	3800
	Carbón mineral	4000 a 6000
	Coque de fundición	6200 a 7500
	Coque de petróleo	8000
	Carbón vegetal	6500 a 7000
Líquido	Gasolina	10200
	Petróleo diesel	11000 Kcal/litro
	Alcohol etílico	7300
	Querosene	11600
	Petróleo - Fuel-Oil	9820
	- OC4	10000
Gaseoso	Gas licuado	10900
	Gas de coque	4500
	Gas natural	10000
	Metano	8500

FUENTE: José Salto, Juan Bargas (JOSE SALTO, 2009)

En la práctica, los combustibles más utilizados son petróleo y gas. El petróleo no combustiona en su estado líquido original; la manera de alcanzar una gasificación rápida consiste en proyectarlo finamente subdividido hacia el interior de la cámara de combustión. El elemento mecánico que realiza tal operación es el quemador.

Los quemadores de petróleo deben cumplir los siguientes objetivos:

- ✓ Pulverizar el petróleo en gotitas cuyos diámetros varían desde unos 30 a 150 micrones (1 micrón = 0,001 mm).
- ✓ Mezclar el petróleo, ya en estado nebuloso o de vapor, con el aire.
- ✓ Mantener la proporción entre el aire y el petróleo.

El gas combustible propicia las mejores condiciones de servicio, después de la energía eléctrica, en lo que toca a la limpieza de las instalaciones; entretanto, tiene como desventaja el peligro de explosión y el costo relativamente alto.

6.4.7.7 Medición de la temperatura

La exactitud con que midan y controlen las temperaturas determinará el éxito de la operación de algunos procesos metalúrgicos, como la fundición, la refinación y el tratamiento térmico. También tendrá un profundo efecto sobre las propiedades de resistencia de muchos metales y aleaciones.

La temperatura de proceso debería controlarse dentro de ±2,5 °C. Aunque a veces es posible este apretado rango, uno más práctico es de unos ±5 °C.

Se deben ejecutar tres pasos en todo proceso de control de temperatura. Antes de poder establecer control, primero se debe "sentir" (detectar) la variable mediante algún mecanismo que responda a cambios en la calidad o valor de la variable. Luego, esta cantidad, o su cambio, deben ser indicados o registrada, previo a ser controlada. Siguiendo la acción de control, el último paso en la secuencia es la transmisión de la salida del controlador al "elemento final", el cual es un componente del proceso en sí. Los elementos finales envían por medio de un relé la salida del controlador y causan cambios correctivos en el proceso.

Sensores de Temperatura. Como es a menudo el caso, una variable es medida y luego traducida, o convertida, a otra. Por ejemplo, las temperaturas ambientales se miden por la expansión o contracción de una columna de fluido o de un metal.

Mediante calibración, estas variables se convierten a lecturas de temperatura numérica.

Estos simples mecanismos, sin embargo, no se adecuan a temperaturas más elevadas. Los sensores utilizados para medir altas temperaturas son los termopares y los pirómetros. Como sea, ambos utilizan el mismo enfoque anterior; esto es, se mide una variable y se la convierte a otra. (Armando, 2005)

6.4.7.8 Medición de la temperatura por el color

Uno de los métodos más sencillos para exterminar la temperatura de un metal es mediante la observación del color del cuerpo caliente. Existe una correlación trivial entre la temperatura de un metal y su color (Tabla 2). Este método dará sólo estimaciones de temperatura aproximadas, excepto cuando lo aplique un observador experimentado. La principal dificultad es que la apreciación del color varíe con los diferentes materiales.

Tabla 2. Variación del calor con la temperatura

COLOR	TEMPERATURA °C
Rojo tenue	500
Rojo oscuro	620
Cereza oscuro	650
Rojo cereza	700
Cereza subido	800
Naranja oscuro	900
Naranja	950
Amarillo	980

FUENTE: José Salto, Juan Bargas (JOSE SALTO, 2009)

Si se necesita una indicación o un registro continuo de la temperatura, los instrumentos que se utilicen pueden ser de dos tipos: a) los sistemas mecánicos que funcionan esencialmente por efecto de la expansión de un metal, un líquido, un gas o vapor, y b) los sistemas eléctricos que funcionan por medio de la resistencia eléctrica medida, un termopar, la radiación o pirómetros ópticos.

6.5 DISEÑO TERMICO

En el diseño se establecen determinadas consideraciones técnicas como son: Metal a fundir, temperaturas del metal, temperatura de la cámara del horno y tiempos de fusión.

En igual forma se seleccionara el combustible a usar, el tamaño del crisol y los materiales que forman las paredes del horno, además se realizara un adecuado dimensionamiento de la cámara de combustión y se evalúan los coeficientes de transferencias de calor en el horno.

Con los datos anteriores se realiza el dimensionamiento del horno, los espesores de las capas que lo conforman, además se evalúan las pérdidas de calor del equipo para determinar el consumo de combustible y seleccionar adecuadamente el quemador del horno.

REQUERIMIENTOS BÁSICOS

Las operaciones de fundición requieren de consideraciones que determinan la calidad de las fundiciones así para este diseño se impondrán los siguientes parámetros:

a) El horno a diseñar servirá para fundir aleaciones a base de aluminio se impone una temperatura de metal líquido.
b) La temperatura de la cara en el interior del refractario del horno.
c) La capacidad del horno a fundir corresponde a 5 kg de aluminio.
d) El tiempo para obtener el metal líquido.

6.6 COMBUSTIBLES

Se entiende como combustible, toda sustancia que es capaz de desprender calor utilizable en el curso de una relación química o física. Estos pueden ser orgánicos o nucleares.
Los combustibles orgánicos son aquellos que mediante un proceso de oxidación de sus elementos combustibles, liberan energía térmica. Los nucleares, como el uranio, mediante la reacción física de fisión liberan calor en los reactores nucleares.
Los combustibles orgánicos, se pueden dividir en fósiles (carbón, petróleo, gas) y los que proceden de madera, bagazo y otros materiales lignocelulosos y subproductos de la agricultura, silvicultura y actividades urbanas, lo cual constituyen las biomasas.

Los combustibles orgánicos fósiles pueden clasificarse en naturales, derivados y residuales.

Se denominan como naturales aquellos que se encuentran en la forma que fueron extraídos: carbón, gas natural entre otros. Derivados son aquellos obtenidos como resultado de un proceso de elaboración tecnológico del combustible natural, como el caso del petróleo, pues éste después de una serie de procesos puede producir gasolina, queroseno, diesel.
Residuales son los aceites combustibles que se obtienen como residuo de la destilación del petróleo crudo. (ZABALA)

6.6.1 CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES

Se denomina combustible a toda sustancia que puede proporcionar energía calorífica apta para producir trabajo mecánico.

Según su estado se puede clasificar en tres grupos.

- Combustible Sólidos: Comprenden los de origen mineral o vegetal se tienen entonces el carbón coque y el carbón vegetal respectivamente.
- Combustible Líquidos: Son aquellos formados por el petróleo y sus derivados, como el Diésel y el Búnker.
- Combustible Gaseoso: constituyen el grupo más importante, se pueden obtener del gas natural o derivado del petróleo el caso más común el GLP (gas licuado de petróleo). (CORPORATIVO, 20011)

6.6.2 COMBUSTIBLES GASEOSOS

Se denominan combustibles gaseosos a los hidrocarburos naturales y a los fabricados exclusivamente para su empleo como combustibles, y a aquellos que se obtienen como subproducto en ciertos procesos industriales y que se pueden aprovechar como combustibles.
La composición de estos varía según la procedencia de los mismos, pero los componentes se pueden clasificar en gases combustibles (CO, H_2, HC) y otros gases (N_2, CO_2, O_2).

Los combustibles gaseosos se clasifican en:

- Combustibles gaseosos naturales
- Combustibles gaseosos manufacturados.

Nos interesa conocer el porcentaje de los componentes que integran los gases. Se usan para estos los mismos procedimientos que para el análisis de los gases de combustión.

Ventajas de los combustibles gaseosos

- Facilidad de manejo y transporte por tuberías.
- No presentan cenizas ni materias extrañas.
- El control de la combustión es mucho más fácil, lo que nos permite mantenerla temperatura de combustión.
- Posibilidad de regular la atmósfera de los hornos para conseguir atmósferas reductoras según nos convenga.
- Posibilidad de calentar el gas en regeneradores y recuperadores, elevando de esta manera la temperatura de combustión, y por lo tanto, aumentando el rendimiento térmico.
- A igualdad de calor cedido, la llama que origina un combustible gaseoso es más corta que la que origina un combustible sólido o uno líquido.

6.6.3 SELECCIÓN DEL COMBUSTIBLE

Para una adecuada selección del combustible se hace necesario tener ciertas consideraciones como el funcionamiento del horno será en forma inteligente, el aspecto económico, en que se considera la vinculación de los costos de montaje del horno por tal motivo se seleccionó el Gas Propano.

6.6.4 GAS LICUADO DE PETRÓLEO.

El gas licuado de petróleo (GLP) es un hidrocarburo, derivado del petróleo, que se obtiene durante el proceso de refinación de otro derivado denominado gasolina, este se produce en estado de vapor pero se convierte en líquido mediante compresión y enfriamiento simultáneos de estos vapores, necesitándose 273 litros de vapor para obtener un litro de gas líquido.

El gas al ser comprimido y enfriado se condensa hasta convertirse en líquido, en cuyo estado se le transporta y maneja desde las refinerías, a las plantas de almacenamiento y de estas a los usuarios, ya sea por auto-tanques o recipientes portátiles, en donde el gas sale en estado de vapor para poder ser utilizado. Los principales gases que forman el GLP son el propano 50% y butano 50%, que se distinguen entre sí por su composición química, presión, punto de ebullición y en su poder calorífico o de calentamiento. Cuando va ser consumido el gas inmediatamente se evapora, pasando del estado líquido al gaseoso, sucediendo aquí el fenómeno inverso al de la licuación, este se consume en forma de vapor en

los quemadores, el vapor se produce al abrir la válvula de cualquier quemador conectado a un cilindro, ya que en ese momento tiende a escapar la presión del recipiente, haciendo que hierva el líquido para formar más vapor. Si el consumo de gas se prolonga también continuará hirviendo el líquido, tomando calor necesario para ello del medio ambiente, a través de las paredes metálicas del cilindro, de esta manera se consume el líquido, transformándose poco a poco en vapor hasta terminarse.

Las características del gas licuado del petróleo son:

- No tiene color, es transparente como el agua en su estado líquido.
- No tiene olor cuando se produce y licua, pero se le agrega una sustancia de olor penetrante para detectarlo cuando se fugue, llamado etylmercaptano.
- No es tóxico, solo desplaza el oxígeno, por lo que no es propio para respirar lo mucho tiempo.
- Es muy inflamable, cuando se escapa y se vaporiza se enciende violentamente con la menor llama o chispa.
- Excesivamente frío, por pasar rápidamente del estado líquido a vapor, por lo cual, al contacto con la piel producirá siempre quemaduras de la misma manera que lo hace el fuego.
- Es limpio, cuando se quema debidamente combinado con el aire, no forma hollín.
- Es más pesado que el aire, por lo que al escaparse el gas, tenderá a ocuparlas partes más bajas, como el piso, fosas y pozos que haya en el área.
- Un kilo de gas licuado de petróleo equivale a 1.77 litros. Un litro de gas licuado de petróleo pesa 560 gramos. (ZABALA)

7. MOLDES

El proceso de moldeo es un procedimiento de fabricación de objetos metálicos basado en verter el metal fundido en la cavidad de un molde, para obtener tras la solidificación y enfriamiento una pieza que es reproducción de la cavidad del molde.

Características:

- Puede utilizarse tanto para formas simples como complejas
- Reduce o elimina los costes de otros procesos de fabricación, como el mecanizado, deformación plástica.
- Rentable para bajos volúmenes de producción
- Pueden utilizarse un gran número de aleaciones
- Reducido número de desperdicios generados en el proceso, que en cualquier caso se vuelven a fundir.

7.1 MOLDEO MANUAL EN ARENA

El proceso de moldeo es un procedimiento de fabricación de objetos metálicos basado en verter el metal fundido en la cavidad de un molde, para obtener tras la solidificación y enfriamiento una pieza que es reproducción de la cavidad del molde.

Características:

- Puede utilizarse tanto para formas simples como complejas
- Reduce o elimina los costes de otros procesos de fabricación, como el mecanizado, deformación plástica.
- Rentable para bajos volúmenes de producción
- Pueden utilizarse un gran número de aleaciones
- Reducido número de desperdicios generados en el proceso, que en cualquier caso se vuelven a fundir.

Los moldes se fabrican con arenas compuestas fundamentalmente de sílice (Si02), cuyos granos se aglomeran con cierta cantidad de agua y arcilla.

7.1.1 Materiales empleados para la fabricación de modelos

Los modelos se pueden realizar con una gran variedad de materiales, como madera, yeso, fundición de hierro, latón, aleaciones de aluminio y, modernamente, resinas plásticas. El material más utilizado es la madera, ya que es fácil de trabajar, relativamente barata y de poco peso. El problema que presenta es su escasa resistencia a la humedad, que se puede paliar pintando los moldes. De todas formas, es probable que la madera se utilice siempre para la construcción de piezas aisladas o de pequeñas series. (materias.fcty)(Ver Figura 8).

Figura 8. Herramientas para modelado en arena.

FUENTE: UMSS, Moldes (UMSS)

7.1.2 PROCESO

Como en la arena existe una cierta proporción de agua, puede emplearse de las siguientes maneras:

- **Húmeda:** Esta técnica se conoce como moldeo en verde.
- **Secada en la estufa:** de esta forma, aumenta su cohesión.
- **Flameada:** sometida**,** simplemente, a un secado superficial.

La arena que se debe emplear para la elaboración de moldes y machos siempre ha de poseer las siguientes propiedades: (Ver Tabla 3).

- Plasticidad en estado húmedo, para que pueda reproducir los detalles de los modelos.
- Permeabilidad, para permitir el paso a través de ella del aire y de los gases que se producen durante la colada.
- Refractariedad, manifestada en un punto de fusión lo suficientemente alto para resistir sin fundirse ni reblandecerse- las altas temperaturas de la colada.
- Cohesión, para que el molde y el macho conserven su forma al retirar el modelo.
- Conductividad calorífica adecuada, para que el metal o la aleación se enfríe en el molde a la velocidad deseada.
- Deformabilidad suficiente, que permita la contracción de la pieza al enfriarse.
- Tener un precio aceptable.

Tabla 3. Componentes de las arenas

Componente	Proporción
Silicato de sodio	20%
Arcilla	70%
Agua	10%

FUENTE: Materias. Fety (materias.fcty)

7.1.3 CAJAS DE MOLDEAR

Son marcos (de madera, aluminio, fundición o acero) de forma y dimensiones muy variadas, destinadas a contener la arena del molde. Constan de una parte superior y de otra inferior o de fondo, provistas de espigas o clavijas y de orejas, en correspondencia, para fijar su posición durante el moldeo. Si hay más de dos, a las otras se les llama intermedias o aros.

Las paredes de las cajas grandes llevan una serie de agujeros o ranuras dispuestos a tresbolillo, que facilitan la salida de los gases del molde y las aligeran de peso. (Ver Figura 9)

Figura 9. Cajones para moldeo.

FUENTE: (Armando, 2005)

7.2 CALIDAD DE LA FUNDICIÓN

Hay numerosas contingencias que causan dificultades en una operación de fundición y originan defectos de calidad en el producto. En esta sección recopilamos una lista de defectos comunes que ocurren en la fundición e indicamos los procedimientos de inspección para detectarlos.

7.2.1 Defectos de la fundición

Existen defectos comunes en todos los procesos de fundición. Estos defectos se ilustran en la Figura (10), y se describen brevemente a continuación:

a) **Llenado incompleto.** Este defecto aparece en una fundición que solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde. Las causales típicas incluyen:

- Fluidez insuficiente del metal fundido,
- Muy baja temperatura de vaciado,
- Vaciado que se realiza muy lentamente y/o
- Sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.

b) **Junta fría.** Una junta fría aparece cuando dos porciones del metal fluyen al mismo tiempo, pero hay una falta de fusión entre ellas debido a solidificación o enfriamiento prematuro. Sus causas son similares a las del llenado incompleto.

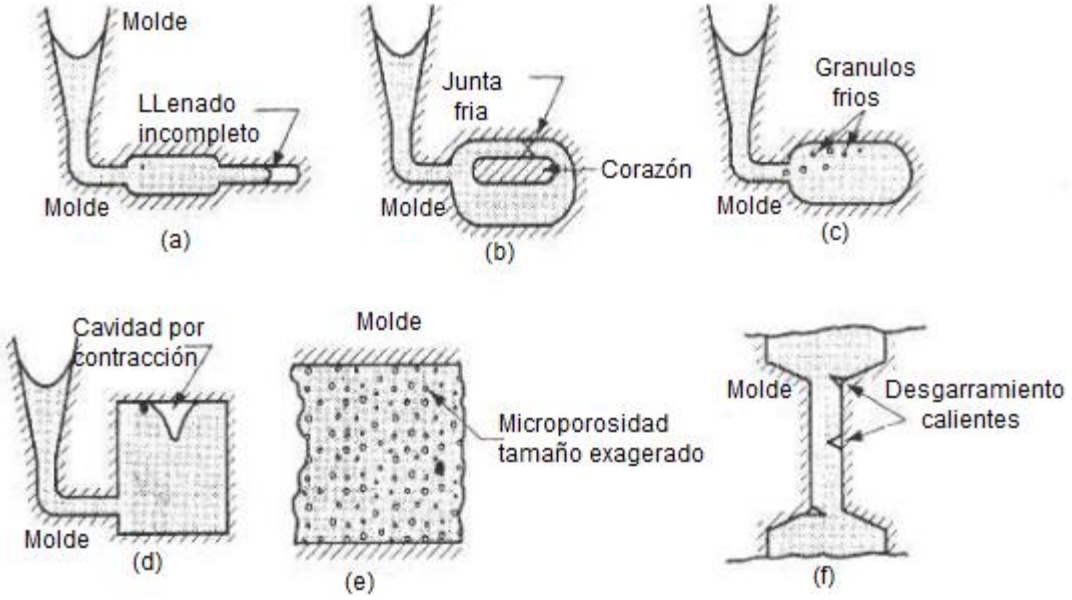
c) **Metal granoso o gránulos fríos.** Las salpicaduras durante el vaciado hacen que se formen glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición. Un buen diseño del sistema y de los procedimientos de vaciado que eviten las salpicaduras puede prevenir este defecto.

d) **Cavidad por contracción.** Este defecto es una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior dela fundición, en cuyo caso se llama rechupe. El problema se puede resolver frecuentemente por un diseño apropiado de la mazarota.

e) **Microporosidad.** Se refiere a una red de pequeños huecos distribuida a través de la fundición debida a la contracción por solidificación del último metal fundido en la estructura dendrítica El defecto se asocia generalmente con las aleaciones, debido a la forma prolongada, en que ocurre la solidificación en estos metales.

f) **Desgarramiento caliente.** Este defecto, también llamado agrietamiento caliente, ocurre cuando un molde, que no cede durante las etapas finales de la solidificación o en las etapas primeras de enfriamiento, restringe la contracción de la fundición después de la solidificación. Este defecto se manifiesta como una separación del metal (de aquí el término desgarramiento o agrietamiento) en un punto donde existe una alta concentración de esfuerzos, causado por la indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente. En la fundición en arena y otros procesos con molde desechable o consumible, esto se previene arreglando el molde para hacerlo retráctil. En los procesos de molde permanente se reduce el desgarramiento en caliente, al separar la fundición del molde inmediatamente después de la solidificación. (materias.fcty)

Figura 10. Algunos defectos comunes en las fundiciones



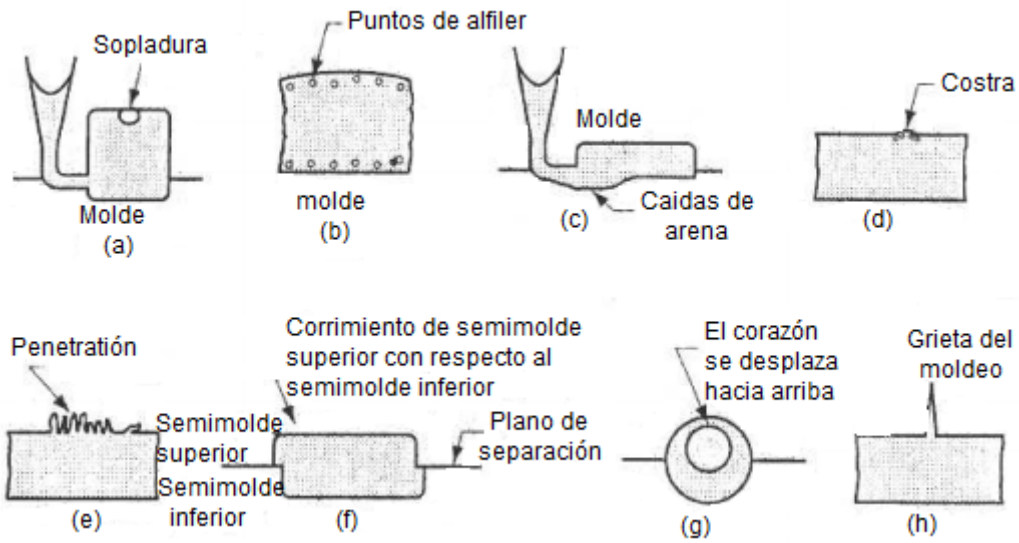
FUENTE: Materias Fety. (materias.fcty)

Algunos defectos se relacionan con el uso de moldes de arena y, por tanto, ocurren solamente en la fundición en arena. Aunque en menor grado, los otros procesos de molde desechable son también susceptibles a estos problemas. En la Figura (11), se muestran algunos de los principales defectos que ocurren en la fundición en arena:

a) Sopladuras.
b) Puntos de alfiler.
c) Caídas de arena.

d) Costras.
e) Penetración.
f) Corrimiento del molde.
g) Corrimiento del corazón.
h) Moldeo agrietado.

Figura 11. Defectos comunes de fundiciones en arena



FUENTE: Materias Fety. (materias.fcty)

Sopladuras. Este defecto es una cavidad de gas en forma de pelota causada por un escape de gases del molde durante el vaciado. Ocurre en la superficie de la parte superior de la fundición o cerca ella. La baja permeabilidad, pobre ventilación y el alto contenido de humedad en la arena del molde son las causas generales.

b) **Puntos de alfiler.** Es un defecto similar al de las sopladuras que involucra la formación de numerosas cavidades pequeñas de gas en la superficie de la fundición o ligeramente por debajo de ella.

c) **Caídas de arena.** Este defecto provoca una irregularidad en la superficie de la fundición, que resulta de la erosión del molde de arena durante el vaciado. El contorno de la erosión se imprime en la superficie de la fundición final.

d) **Costras.** Son áreas rugosas en la superficie de la fundición debido a la incrustación de arena y metal. Son causadas por desprendimientos de la

superficie del molde que se descascaran durante la solidificación y quedan adheridas a la superficie de la fundición.

e) **Penetración.** Cuando la fluidez del metal líquido es muy alta, éste puede penetrar en el molde o en el corazón de arena. Después de la solidificación, la superficie de la fundición presenta una mezcla de granos de arena y metal. Una mejor compactación del molde de arena ayuda a evitar esta condición.

f) **Corrimiento del molde.** Se manifiesta como un escalón en el plano de separación del producto fundido, causado por el desplazamiento lateral del semi molde superior con respecto al inferior.

g) **Corrimiento del corazón.** Un movimiento similar puede suceder con el corazón, pero el desplazamiento es generalmente vertical. El corrimiento del corazón y del molde es causado por la flotación del metal fundido.

h) **Molde agrietado (venas y relieves).** Si la resistencia del molde es insuficiente, se puede desarrollar una grieta en la que el metal líquido puede entrar para formar una aleta en la fundición final.

7.2.2 Métodos de inspección

Los procedimientos de inspección en la fundición incluyen:

1. Inspección visual para detectar defectos obvios como llenado incompleto, cortes fríos y grietas severas en la superficie.
2. Medida de las dimensiones para asegurarse que están dentro de las tolerancias.
3. Pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y otras relacionadas con la calidad inherente del metal fundido.

Las pruebas de la categoría 3 incluyen:

a) Pruebas de presión para localizar fugas en la fundición.
b) Métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de líquidos penetrantes fluorescentes y pruebas supersónicas para detectar defectos superficiales o internos en la fundición.
c) Ensayos mecánicos para determinar propiedades, tales como la resistencia a la tensión y dureza.

Si se descubren defectos, pero éstos no son serios, muchas veces es posible salvar la fundición por soldadura, esmerilado y otros métodos de recuperación que se hayan convenido con el cliente.

7.3 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PRODUCTOS

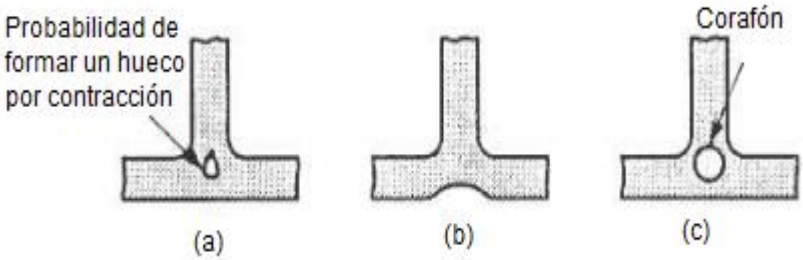
Si el diseñador de productos selecciona la fundición como el proceso principal de manufactura para un componente particular, serán necesarios ciertos lineamientos que faciliten la producción y eviten muchos defectos. A continuación se presentan algunos lineamientos y consideraciones importantes para el diseño de fundiciones. (Armando, 2005)

- **Simplicidad geométrica**. Aunque la fundición es un proceso que puede usarse para producir, formas complejas la simplificación del diseño propiciará una fundición fácil y eficiente. Al evitar complejidades innecesarias se simplifica la hechura del molde, se reduce la necesidad de utilizar corazones y se mejora la resistencia de la fundición.

- **Esquinas.** Deben evitarse esquinas y ángulos agudos, ya que son fuente de concentración de esfuerzos y pueden causar desgarramientos calientes y grietas en la fundición. Es necesario redondear los ángulos en las esquinas interiores y suavizar los bordes agudos.

- **Espesores de sección.** Los espesores de sección deben ser uniformes a fin de prevenir bolsas de contracción. Las secciones más gruesas crean puntos calientes en la fundición, debido a un mayor volumen que requiere más tiempo para solidificar y enfriar Éstos son lugares posibles donde se pueden formar bolsas de contracción. (Ver Figura 12)

Figura 12. Expone el problema y ofrece algunas soluciones posibles



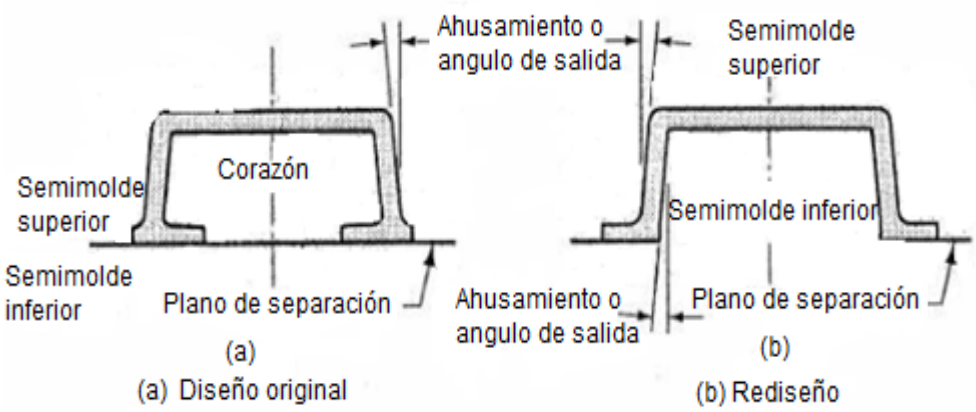
FUENTE: Jonathan, Armando (Armando, 2005)

a) En la parte gruesa de la intersección se puede formar una cavidad por contracción.
b) (b) Esto se puede remediar rediseñando la pieza para reducir el espesor.
c) Usando un corazón.

- **Ahusamiento.** Las secciones de la pieza que se proyectan dentro del molde deben tener un ahusamiento o ángulos de salida. El propósito de este ahusamiento en los moldes consumibles o desechables es facilitar la remoción del modelo del molde. En la fundición con molde permanente el objetivo es ayudar a remover la parte del molde. Si se usan corazones sólidos, éstos deben dotarse con ahusamientos similares en los procesos de fundición. El ahusamiento requerido necesita ser solamente de 1º para fundición en arena y de 2º a 3º para procesos con molde permanente.

- **Uso de corazones.** Puede reducirse la necesidad de usar corazones con cambios menores en el diseño de la pieza, como se muestra en la Figura (13)

Figura 13. Cambio de diseño para eliminar la necesidad de usar un corazón



FUENTE: Jonathan, Armando (Armando, 2005)

- **Tolerancias dimensiónales y acabado superficial.** Se pueden lograr diferencias significativas en la precisión dimensional y en los acabados de la fundición, dependiendo del proceso que se use. La Tabla 4, muestra una recopilación de valores típicos para estos parámetros.

- **Tolerancias de maquinado.** Las tolerancias que se especifican en muchos procesos de fundición son insuficientes para cumplir las necesidades funcionales de muchas aplicaciones. La fundición en arena es el ejemplo más característico de esta necesidad. En este caso, deben maquinarse porciones de la fundición a las dimensiones requeridas. Casi todas las fundiciones en arena deben maquinarse total o parcialmente a fin de darles funcionalidad. Por consiguiente, debe dejarse en la fundición material adicional, llamado tolerancia de maquinado para facilitar dicha operación. Las tolerancias típicas de maquinado para fundiciones de arena fluctúan entre 2 y 6 mm.

Tabla 4. Tolerancias dimensionales típicas y acabados superficiales para diferentes procesos de fundición y metales.

Proceso de fundición	Tamaño de la parte	Tolerancia		Rugosidad superficial	
		Pulg	mm	µpulg	µm
Fundición en arena [a]				250-1000	(6-25)
Aluminio [b]	Pequeño	±0.020	(±0.5)		
Hierro fundido	Pequeño	±0.040	(±1.0)		
	Grande	±0.016	(±1.5)		
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.015	(±0.4)		
Acero	Pequeño	±0.050	(±1.3)		
	Grande	±0.080	(±2.0)		
Molde de yeso	Pequeño	±0.005	(±0.12)	30	(0.75)
	Grande	±0.015	(±0.4)		
Molde permanente				125	(3.2)
Aluminio [b]	Pequeño	±0.010	(±0.25)		
Hierro fundido	Pequeño	±0.030	(±0.8)		
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.015	(±0.4)		
Acero	Pequeño	±0.020	(±0.5)		
Fundición en dados				40-100	(1-25)
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.005	(±0.12)		
Aluminio [b]	Pequeño	±0.005	(±0.12)		
Revestimiento				30-100	(0.75-2.5)
Aluminio [b]	Pequeño	±0.005	(±0.12)		
Hierro fundido	Pequeño	±0.010	(±0.25)		
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.005	(±0.12)		
Acero	Pequeño	±0.010	(±0.25)		

FUENTE: Groover, Mikeel p. (GROOVER)

- Los valores de rugosidad son para moldes de arena verde; para otros procesos con molde de arena, el acabado superficial es mejor.
- Los valores para el aluminio se aplican también al magnesio.

8. MATERIALES REFRACTARIOS

En las operaciones de fundición, los materiales refractarios cumplen un papel fundamental dentro del proceso, ya que tienen la función de mantener la temperatura y otorgar estabilidad estructural al horno o convertidor. Una de las dificultades que tiene la construcción del horno tipo basculante es el cálculo del revestimiento refractario. Por esta razón la determinación del espesor de ladrillo, manto cerámico y chapa de acero es relevante para determinar el estado del equipo, que se requiere para planificar los trabajos de mantención pertinentes y optimizar el proceso de fusión. El presente trabajo tiene por finalidad presentar un método confiable que permita estimar el espesor de los revestimientos refractarios en base a la temperatura de la superficie externa de los hornos. La metodología se basa en balances de energía que describen la transferencia de calor ocurrida en el horno que considera los perfiles de temperatura y los espesores de los ladrillos, manto y carcaza.

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

8.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS

- **Refractarios ácidos**

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

- **Refractarios básicos**

Varios refractarios se basan en el MgO (magnesia o periclasa) El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractariedad buena resistencia al ataque por los entornos que a menudo se encuentran en los procesos de fabricación de acero. Típicamente, los refractarios básicos son más costosos que los refractarios ácidos.

- **Refractarios neutros**

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

- **Refractarios especiales**

El carbono, el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando no hay oxígeno fácilmente disponible. Estos materiales refractarios incluyen la circonia (ZrO_2), el circón ($ZrO_2.SiO_2$) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros. Así mismo y cada vez más frecuentemente, ciertos procesos de producción específicos no pueden ser puestos en marcha si no se ha desarrollado previamente el revestimiento refractario adecuado. De todo ello se deduce el carácter estratégico de este tipo de materiales, más allá del valor en si del material o de su participación en la estructura de costes de un determinado proceso.

Los principales sectores de aplicación de los materiales refractarios, así como el tipo de instalación en la que se usan pueden verse en la Tabla 5. En ella también se da la temperatura del proceso y el tipo o tipos de refractarios utilizados. Se observa que se corresponden con sectores industriales básicos de la economía de un país. Se han detallado, no de una manera exhaustiva, las aplicaciones dentro de la industria siderúrgica, ya que a ella le corresponde el mayor consumo de materiales refractarios con un 60 %, aproximadamente. Si al sector siderúrgico añadimos el de tos metalesno férreos, el del vidrio, el del cemento y la cal y el cerámico tradicional el tantopor ciento de consumo anterior se eleva al 80 %.

La industria de los materiales refractarios ha experimentado una extraordinaria evolución en los últimos anos, como consecuencia delas nuevas y cada vez más exigentes especificaciones impuestas por las industrias consumidoras. Esto se ha traducido, no solo en un más estricto control de las materias primas y en una mejora de los procesos de fabricación, sino en el aporte científico de técnicas que, procediendo tanto de la metalografía como de la fisicoquímica de materiales, han permitido el establecimiento de los diagramas de equilibrio de fases de los óxidos potencialmente utilizables como refractarios por su elevado punto de fusión ($A_{12}O_3$, CaO, SiC_2, MgO, ZrO_2, Cr_2O_3, etc), lo que ha supuesto un mejor conocimiento de la influencia de las impurezas presentes, a la temperatura y condiciones reales de trabajo de cada tipo de material.

Tabla 5. Refractarios empleados en procesos industriales a alta temperatura.

SECTOR	INSTALACIÓN	TEMPERATURA PROCESO (°C)	REFRACTARIOS
INDUSTRIA PETROQUIMICA	CRACKIN	900-1200	Monoliticos, aislantes
	HORNOS	1650	Ladrillos: silimanita mullita
QUIMICA	HORNOS NEGROS DE HUMO	1600	Ladrillos: corindón aislantes
	CARBON ACTIVO	1400	Monoliticos sin hierros
	REACTORES OBTENCION FOSFORO	1550	Ladrillos monoliticos de carbono, sin hierro a base de AL2o3 con sic
ACERIAS	HORNOS DE COQUE		Ladrillo: silicioso
	PREPARACION MATERIAS PRIMAS	900-1200	Silicoaluminoso monoliticos
	HORNO ALTO	1700	Ladrillos carbono, semigrafito, SIC, mulliticos silicoaluminosos alta calidad.
	ESTUFAS	1800	Ladrillos: silicoaluminosos, silice, magnesitas
	CUCHARAS TORPEDO	1500	Ladrillos: silimanita, silicoaluminosos alta calidas.
	CONVERTIDORES	1600-1700	Ladrillos basicos (magnecita, dolomia MgO-C
	CUCHARAS TRANSPORTE ACERO	1600	Monoliticos y ladrillos siliceos, dolomia, bauxit
	HORNO TRATAMIENTO TERMICO	900-1100	Monoliticos: ladrillos, mullita, corindón
FUNDICIÓN	CUPULA	1100-1400	Monoliticos: siliosos, silicoaluminosos
	HORNO INDUCCION	1400	Monoliticos: siliceos

			silicoaluminosos
METALES NO FERROSO	HORNOS DE FUSIÓN	700-900	carbono, aislante monolitico
ALUMINO	HORNOS DE FUSIÓN	900	ladrillos: bauxitos, silicoaluminosos alta calidad monoliticos
PLOMO	HORNOS CUBILOTE ROTATORIO	1100	ladrillos: magnesisticos cromo-magnesita
	HORNOS DE REFUSIÓN	330	monoliticos
COBRE	HORNO CUBILOTE, CONVERTIDORES	1250	refractarios silicoaluminosos
	HORNO DE ARCO, HORNO DE REFUSIÓN	1100	monoliticos
ZINC	HORNOS ROTATORIOS	1100	ladrillos magnésicos
	CELDAS DE GALVANIZADO	420	monoliticos
CEMENTO	HORNOS ROTATORIOS	800-1600	ladrillos: silicoaluminosos,mullitico s,magnesita,monoliticos,s in hierro, resistentes a la abrasión.
	PRECALENTADORES	800-1100	monoliticos: resistente a la abrasión.
CERAMICA	HORNO TUNEL	900-1800	ladrillos: silicoaluminosos, mullitico, corindón, siliceos.
	HORNOS ARRASTRE	900-1800	ladrillos: sicoaluminosos, mullitico corindón.
	HORNOS MULTICANAL	800-1100	ladrillos: silicoaluminosos, mulliticos, monoliticos.
	PREPARACIÓN FRITAS ESMALTE: HORNOS ROTATORIOS CUBILOTE	800-1800	ladrillos: silicoaluminosos, corindón, magnesita.
VIDRIO Y FIBRAS	HORNOS RODILLOS	1400-1700	piezas alta alúmina
	HORNO FUSIÓN	1650	ladrillos siliceos: alúmina, circona electrofundida, sillicioaluminosos.
ESMALTES Y FRITAS	HORNO FUSIÓN	1550	ladrillos: mulliticos, silimanita, monoliticos.

FUENTE: ERECOS (Erecos)

8.2 CONSTITUCIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS

Pueden existir diversas maneras de definir lo que se entiende por un material refractario. Así, según la Real Academia de la Lengua se define material refractario como aquel cuerpo que resiste la acción del fuego sin cambiar de

estado ni descomponerse. Por tanto, se considera como material refractario a todo aquel compuesto o elemento que es capaz de conservar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas a elevada temperatura.

La norma española UNE (150 R836-68) define a los materiales refractarios como a aquellos productos naturales o artificiales cuya Refractariedad (Resistencia piroscópica o cono pirometrico equivalente) es igual o superior a 1500 ºC. Es decir, resisten esas temperaturas sin fundir o reblandecer. La resistencia piroscópica se determina según la norma UNE 61042 o la ISO/R 528 ola DIN EN 993-12. A su vez, son materiales cerámicos no metálicos.

Es importante precisar que la resistencia piroscopica es una condición necesaria, pero no es suficiente para que una material sea considerado como refractario, ya que además debe conservar a dichas temperaturas elevadas una resistencia mecánica y/o una resistencia a la corrosión suficientes para el empleo a que se destine. En la Tabla 6, se enumeran las condiciones que usualmente deben soportar los materiales refractarios. Se encuentran clasificadas en tres grupos y hay que tener presente que en la mayoría de los casos dichas solicitaciones pueden actuar de forma simultánea.

Tabla 6. Condiciones que deben soportar los materiales refractarios

	SOLICITACIONES	
TÉRMICAS	**MECÁNICAS**	**QUÍMICAS**
TEMPERATURAS ELEVADAS	COMPRESIÓN. FLEXIÓN Y TRACCIÓN	ESCORIAS
CAMBIOS BRUSCOS TEMPERATURA (CHOQUE TERMICO)	VIBRACIÓN	PRODUCTOS FUNDIDOS
	ABRASIÓN Y EROSIÓN, IMPACTO	GASES Y VAORES
	PRESIÓN	ACIDOS

FUENTE: ERECOS (Erecos)

Tenemos pues, que los refractarios son fundamentalmente materiales capaces de resistir altas temperaturas sin fundirse. Pero no solo eso, además deben poseer una resistencia mecánica elevada a dichas temperaturas para poder resistir sin deformarse su propio peso y el de los materiales que están en contacto sobre ellos.

Dependiendo de las aplicaciones se les exigirán otras propiedades en mayor o menor grado, por ejemplo, la estabilidad química frente a los metales fundidos, las escorias, el vidrio fundido, los gases y vapores, etc. Y resistencia a los cambios bruscos de temperatura (Choque térmico). En su mayor parte los materiales refractarios están constituidos por silicatos, óxidos, carburos, nitruros, boruros, siliciuros, carbono, grafito, etc.

8.3 TIPOS DE MATERIALES REFRACTARIOS

- **Refractario de arcilla calcinada.**

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

- **Refractario de Sílice.**

Están constituidos fundamentalmente por Óxido de Silicio (SiO_2). Se distinguen dos clases de ladrillos calcinados.

- **Refractarios Aislantes.**

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

- **Refractarios de Tipos especiales.**

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

- **Especialidades refractarias.**

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

- **Concretos refractarios.**

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

- **Morteros refractarios.**

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

8.4 SELECCIÓN DEL MATERIAL REFRACTARIO

Esta selección del material refractario, se hace con el fin de contrarrestar las pérdidas de calor máximas que se pueden presentar, si no se cuenta con los refractarios. Basándonos en no permitir este problema, seleccionamos los siguientes materiales:

- Ladrillo refractario Arco 2, Recto, Ref. U-33.
- Fibra Cerámica HPS, NUTEC-FIBRATEC
- Mortero, de Silicato de sodio, bentonita y caolín

Las especificaciones técnicas de estos materiales está dada por el proveedor. (Ver Anexos A, B, C) (materias.fcty)

9. TRANSFERENCIA DE CALOR

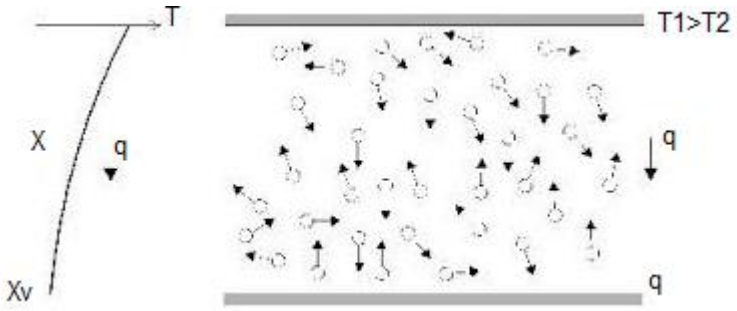
Con frecuencia en el área de ingeniería se encuentra las llamadas ciencias térmicas que incluyen la termodinámica y la transferencia de calor, siendo esta última la complementaria de la termodinámica. La termodinámica considera fundamentalmente el sistema en equilibrio, basadas en leyes adicionales que permiten la predicción en relación al tiempo de la transferencia de energía, estas leyes complementarias están relacionadas con tres modos fundamentales de transferencia de calor como son: conducción, convección y radiación.

9.1 CONDUCCIÓN

Con la palabra conducción se vincula de inmediato los conceptos de actividad atómica y molecular, que en estado sólido sostienen este modo de transferencia de calor.

La conducción es considerada como la transferencia de energía, de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia, debido a las interacciones entre las mismas como se ilustra en la figura.

Figura 14. Comportamiento molecular en la transferencia de calor por conducción



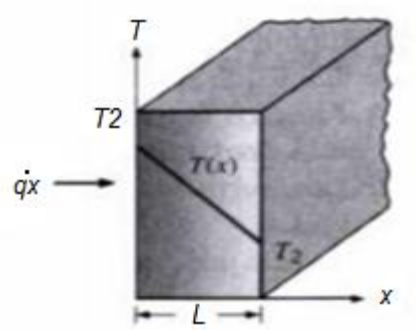
FUENTE: INCROPERA, FRANK (INCROPERA)

La situación es muy similar en los líquidos, aunque la distancia molecular se encuentra afectada por el efecto de las interacciones moleculares.

En un material no conductor la transferencia de calor se da exclusivamente por la vía de las ondas reticulares. En un sólido, la conducción se atribuye a la actividad atómica en forma de vibraciones reticulares, la transferencia de calor se da debido al movimiento de translación de los electrones.

En la transferencia de calor por conducción, la ecuación o modelo que posibilita cuantificar este proceso de transferencia de calor se le conoce como LEY DE FOURIER, y se representa como se muestra en la siguiente figura.

Figura 15. Ley de Fourier



FUENTE: INCROPERA FRANK (INCROPERA)

Para una pared unidimensional, la cual tiene una distribución de temperatura la ecuación (4) se expresa:

$$\boldsymbol{q''x = -K\frac{dt}{dx}} \qquad \textbf{(4)}$$

Dónde:

$q''x$ = Flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área. (W/m^2)

K = Conductividad térmica propia del material. (W/mk)

$\frac{dt}{dx}$ = Gradiente de temperatura en la dirección x. (K/m)

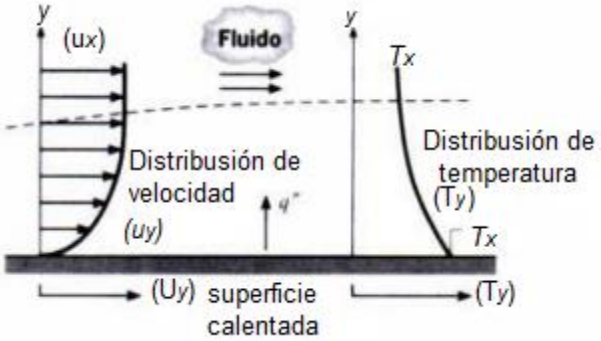
9.2 CONVECCIÓN

Este tipo de transferencia de calor está compuesto de dos formas, además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio, la energía se transfiere de acuerdo a un movimiento global o macroscópico del fluido.

El hecho radica en que el movimiento del fluido en cualquier instante, en grandes números de moléculas se mueve en forma colectiva, tal movimiento con la presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor.

Las moléculas en el fluido mantiene su movimiento aleatorio, la transferencia de calor se da entonces por la superposición de transporte de energía debido al movimiento global del fluido y al movimiento aleatorio de las moléculas.

Figura 16. Transferencia de calor por convección



FUENTE: INCROPERA FRANK (INCROPERA)

La transferencia de calor entre la superficie de una placa calentada y un fluido adyacente tal como se muestra en la figura 16. Presenta una interacción entre el fluido y la superficie en la presencia de una región, indicando la velocidad del fluido varía desde cero en la superficie a un valor finito.

Esta región se la conoce como capa limite hidrodinámica o de velocidad si la temperatura del fluido y la superficie son diferentes habrá una región en donde la temperatura $Ts\ en\ y\ = 0\ a\ T_{\infty}$ en a en el flujo exterior, esta región conocida como capa limite térmica puede ser más pequeña, más grande o del mismo tamaño que aquella que varía la velocidad, en la cual si la temperatura superficial es mayor que la temperatura al ambiente ocurrirá la transferencia de calor por convección entre la superficie y el flujo exterior.

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo, se entiende por convección forzada cuando el flujo es causado por medio externo, la convección libre o natural, el flujo es inducido por fuerzas de empuje que se origina por la diferencia de densidades ocasionadas y por la variación de temperaturas en el fluido.

El modelo matemático descrito en la ecuación (5) que ayuda a cuantificar la transferencia de calor por convección es:

$$\boldsymbol{Q}^{''} = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{Ts} - \boldsymbol{Ta}) \qquad \textbf{(5)}$$

Esta expresión se le conoce como la ley de enfriamiento de Newton, la constante proporcional *h* se le conoce como coeficiente de transferencia de calor por convección.

Esta constante está íntimamente vinculada con las condiciones de la capa limite, en las que la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento influyen en su valor.

Cualquier estudio de convección se reduce finalmente a un estudio de los medios por lo que es posible determinar la constante h.

9.3 RADIACIÓN

La energía emitida por la materia a una temperatura finita se denomina como radiación.

Sin importar la forma y estado de la materia se puede decir que, la radiación se debe a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constituidas.

La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas, mientras la transferencia de calor por conducción o convección requiere de la presencia de un medio material, la radiación no requiere la presencia de un medio por esta condición la transferencia de calor por radiación tiene mayor eficiencia en el vacío.

En muchas aplicaciones es conveniente expresar el intercambio de calor por medio de radiación como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{q_{rad} = h_r A(T_s - T_{air})} \qquad (6)$$

Donde el valor de h_r corresponde al coeficiente de transferencia de calor por radiación, expresado en la Ec (7) de la siguiente manera.

$$\boldsymbol{h_r = \varepsilon\sigma(T_s - T_{air})(T^2 s - T^2 air)} \qquad (7)$$

Dónde:

ε = corresponde a la emisividad que es característica propia de las superficies con un valor que se halla entre los limites 0 y 1.

Esta propiedad da una característica de la medida de la eficiencia con la que una superficie emite energía con relación a un cuerpo negro.

σ = Constante de Stefan Boltzman con un valor de $5.67*10^{-8} W/m^2K^4$. (INCROPERA)

10. DISEÑO Y CÁLCULO DEL HORNO

Una parte importante en el diseño es la construcción, donde todas las ideas en papel se cumplen y se dan a conocer tanto los éxitos como los errores en el diseño. Una buena manufactura de la pieza traerá como consecuencia: Uniformidad de propiedades mecánicas, reducción de esfuerzos en ciertas zonas

y buen acabado superficial. (INCROPERA) (CENGEL) (Cengel, 2007) (Shigley) (YUNUS A. CENGEL)

Es importante notar que los parámetros calculados sirven de referencia, pues en su maquinado real tienen que ser modificados debido a situaciones externas por ejemplo: No contar con la herramienta adecuada, impurezas en los materiales que hace que sus propiedades no sean uniformes, el tipo de sujeción de la pieza entre otras.

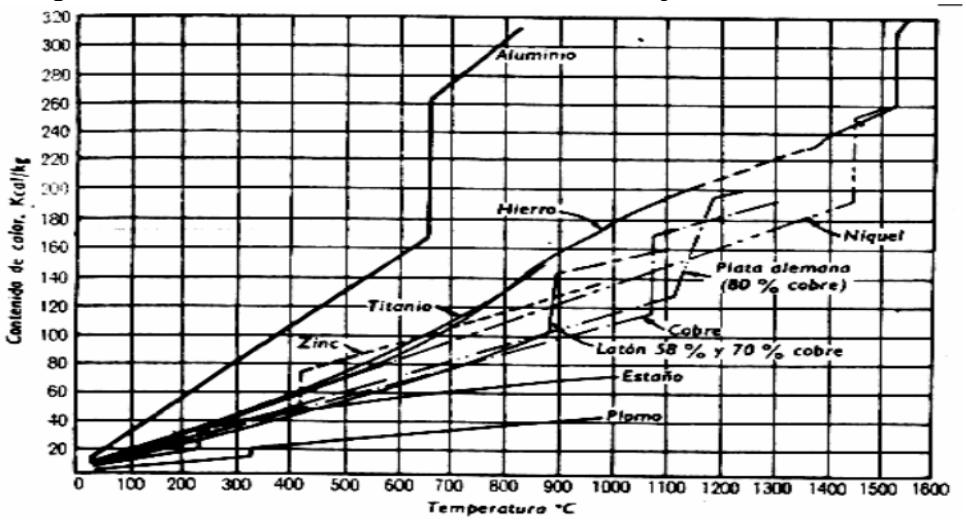
El tiempo y costo de construcción depende en gran manera del adecuado plan de proceso para cada pieza, apropiados parámetros de corte y uso correcto de las herramientas y máquinas herramientas.

10.1 ENERGIA PARA EL PROCESO

Corresponde la energia total que se suministra para entregar el metal fundido, para el presente estudio se plantea calcular estenergia considerando calores especificos medidos para tres etapas.

- Calentamiento de la temperatura ambiente considerada 20°C (293 °K) hasta los 900°C (1293°K).
- Calentamiento de 900°C (1293°K) hasta 1100°C (1 393°K).
- Ademas se considera el calor latentente de fusión, para determinar los calores especificos se emplea la siguiente Figura (17):

Figura 17. Contenido de Calor de los metales a diferentes temperaturas.



FUENTE: M TRINKS (M.)

10.1.1 Energia necesaria para elevar la temperatura de 20°C hasta 900°C

Para llevar a cabo este cambio de temperaturas, mediante la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Q_1 = m * C_P * \Delta T_{(20-900)}} \quad \textbf{(8)}$$

Datos:

T_O = 20 °C Tf = 900 °C

C_P = 0.3786 KJ / Kg K de 20 °C

C_P = 0.51 KJ / Kg K a 900 °C

C_P = (Prom) = 0.443 KJ / Kg K

M = 5 Kg.

Q_1 = 221.5 KJ

10.1.2 Determinación de calor para promover un cambio de fase

Corresponde al calor ocasionado, por cambio de estado de una fase solida a una fase liquido, para este caso se determina el calor de difusión.

Datos:

T = 900 °C

h_{Fs} = 212 KJ / Kg a 900 °C

m = 5 Kg

$Q_2 = m * h_{Fs}$

Q_2 = 1060 KJ

10.1.3 Determinación del Calor en el Crisol

Es el calor que resulta de elevar el crisol de una temperatura ambiente hasta temperatura de colado utilzando la ecuación (9).

Datos:

To = 20 °C

Tf = 1100 °C

M_{Crisol} = 6 kg

$$\boldsymbol{Q_{Crisol} = m_{Crisol} * Cp_{Crisol} * \Delta T_{(20-1100)}} \quad \textbf{(9)}$$

Q_{Crisol} = 66161.7 Kg

10.1.4 Calor Total

Con la ecuación (10) obtenemos el calor total neto que es el resultado de la suma de los calores parciales calculados.

$$\boldsymbol{Q_{Total} = Q_1 + Q_2 + Q_{Crisol}} \quad \textbf{(10)}$$

Q_{Total} = 163272.1 KJ

10.2 DETE RMINACION DE LA MASA A CALENTARSE.

La masa a calentarse corresponde la suma de la masa de metal correspondiente a la carga, mas la masa del crisol.

Remplazando en en la siguiente ecuación tenemos:

$$\boldsymbol{m_{Total} = m_{Carga} + m_{Crisol}} \quad \textbf{(11)}$$

m_{Carga} = 5 kg

m_{Crisol} = 6 kg

se tiene que:

m_{Total} = 11 kg

10.3 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE ENERGIA POR KILOGRAMO.

Es el resultado de dividir la cantidad total de energia en todo el proceso para masa la masa total, se tiene en la siguiente ecuación:

$$E = \frac{Q_{Total}}{m_{Total}} \qquad (12)$$

E = 14842.9 KJ/Kg

11. CALCULOS Y RESULTADOS

11.1 DISEÑO DE INGENERIA

El diseño de consiste en especificar tamaño, temperatura, tiempo de carga metálica, calor necesario, materiales y todo cuanto sea necesario para realizar la fusión del aluminio cumpliendo estable mente con determinadas condiciones de producción, calidad y seguridad. (Shigley)

En la práctica tenemos que cuantificar una serie de variables del proceso como son:

- Temperatura
- Tiempo

Con esta información se podrá entonces decir:

- Las dimensiones del equipo
- Materiales de construcción
- Requerimientos de calor

11.2 CALCULOS TEORICOS DEL EQUIPO

Para fundir metales no ferrosos es necesario un equipo que soporte elevadas temperaturas, en el caso del aluminio se requiere mantener al metal protegido de la contaminación, de la combustión, motivo por el cual la teoría e investigaciones realizadas manifiestan que para pequeñas cantidades el equipo recomendado es

el horno de crisol, el mismo que debe estar diseñado y construido para soportar y sobrepasar las condiciones del proceso.

En los requerimientos del diseño, se detallan las variables a ser consideradas para el diseño del equipo.

11.3 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Para diseñar el horno, se parte de las variables reales de trabajo, las mismas que se adquieren durante la simulación en equipos similares, a continuación se indican estas variables:

- Cantidad de material a fundir
- Temperatura de operación
- Tiempo de operación
- Cantidad de calor requerido

11.4 CALCULOS DEL DIMENCIONAMIENTO DEL EQUIPO

11.4.1 BALANCE SIMULTÁNEO DE MASA Y ENERGIA

- **BALANCE DE MASA**

Se basa en la ley de conservación de la materia que establece que la masa de un sistema permanece siempre constante, por lo tanto lo demostraremos en la ecuación (13):

Entrada = Salida + Acumulación **(13)**

Dónde:

Entrada = masa del metal a ser fundido 5 kg.

Salida = Masa del metal fundido 4 kg.

Acumulación = Masa de la escoria 1kg.

Remplazando en la Ec. 11 se tiene

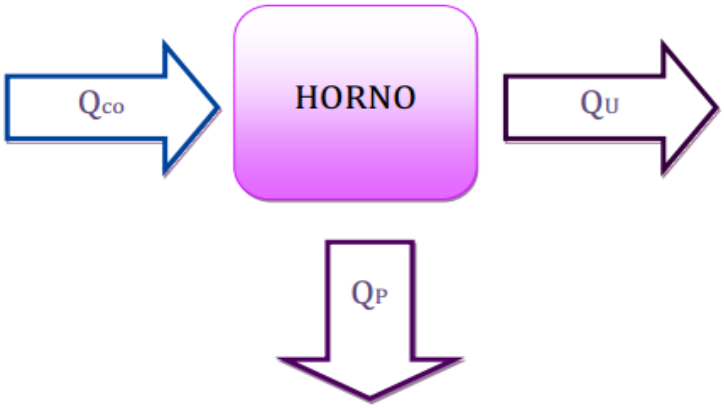
$$5\ kg = 4\ kg + 1\ kg$$

5 kg = 5 kg

- **BALANCE DE ENERGIA**

De la ley de la conservación de la energía, se afirma que el calor liberado por el combustible en un horno es igual a la suma del calor necesario para el proceso de calentamiento, más las pérdidas de calor que tengan lugar en el horno como lo podemos observar en la siguiente ecuación (14). (YUNUS A. CENGEL)

Figura 18. Balance de energía del equipo.



FUENTE: Fernando, Mestanza (FERNANDO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE COMBUSTIÓN INDUSTRIAL PARA FUNDIR ALUMINIO", 2012)

$$Q_{CO} = Q_U + Q_P \quad \textbf{(14)}$$

Dónde:

Q_{CO} = calor liberado por el combustible ($K_{Cal/h}$)

Q_P = calor total perdido en el horno ($K_{Cal/h}$)

Q_U = calor útil para la cocción ($K_{Cal/h}$)

11.4.2 CALCULO DEL CALOR UTIL

Para obtener el calor útil se va a tomar en cuenta los siguientes parámetros que tenemos en la ecuación (15):

$$Q_U = Q_{Carga\ metalica} + Q_{Absorve\ Crisol} \quad (15)$$

Dónde:

Q_U = calor útil para la fusión ($k_{cal/h}$)

$Q_{Carga\ metálica}$ = calor que se entrega a la carga metálica ($K_{cal/h}$)

$Q_{Absorve\ crisol}$ = calor que absorbido por el crisol ($K_{cal/h}$)

11.4.3 CALCULO DEL CALOR QUE HA DE ENTREGARSE A LA CARGA METALICA

Para conocer el calor necesario que se ha de entregar a la carga metálica utilizamos la siguiente ecuación:

$$Q_{Carga\ metalica} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (16)$$

Dónde:

Q_1 = calor necesario para elevar la temperatura de 20 °C a 660 °C.

Q_2 = cantidad de calor necesario para producir un cambio de fase.

Q_3 = calor necesario para llegar a la temperatura de colado.

En este caso se debe hacer las consideraciones siguientes:

- Conocer el calor Q_1 que se necesita para elevar de los 20 °c temperatura ambiente, hasta los 660 °C temperatura de fusión del Aluminio.
- Se incluye también el calor Q_2 producto del calor latente de fusión por el peso de la carga.
- Se recomienda que la temperatura del metal fundido para que pueda estar en condiciones óptimas de colado y ser puesto en moldes adecuados, debe tener alrededor de 800 °C este será otro dato que se incluye para encontrar la cantidad de calor que se necesita para fundir la carga metálica.

Entonces se tiene remplazando en la ecuación (17).

$$Q_1 = \frac{mC_P(T_F - T_O)}{t} \quad (17)$$

Dónde:

Q_1 = calor necesario para elevar la temperatura de 20 °C a 660 °C.

m = peso de la carga 5 kg

C_P = calor especifico 0.25 kCal/kg °C

T_F = temperatura de fusión 660 °C

T_O = temperatura ambiente 20 °C

t = tiempo de fusión 0.75 h

$$Q_1 = \frac{5 * 0.25 * (660 - 20)}{0.75}$$

$$Q_1 = 1066.66\ Kcal/h$$

Y posteriormente tanto en la ecuación (18) como en la ecuación (19) para hallar el calor necesario en cada parte.

$$\boldsymbol{Q_2 = \frac{m\lambda}{t}} \qquad \textbf{(18)}$$

Dónde:

Q_2 = cantidad de calor necesario para producir un cambio de fase.

m = peso de la carga 5 kg

λ = calor latente del aluminio 95,29 kcal/kg.

t = tiempo de fusión 0.75 h

$$Q_2 = \frac{5 * 95.29}{0.75}$$

$$Q_2 = 635.26\ Kcal/h$$

$$\boldsymbol{Q_3 = \frac{mC_P(T_F - T_O)}{t}} \quad \textbf{(19)}$$

Dónde:

Q_3 = calor necesario para llegar a la temperatura de colado.

m = peso de la carga 5 kg

C_P = calor especifico del Al 0.25 kCal/kg °C

T_F = temperatura de colado 800 °C

T_O = temperatura fusión 660 °C

t = tiempo de fusión 0.75 h

$$Q_3 = \frac{5 * 0.25 * (800 - 660)}{0.75}$$

$$Q_3 = 233.33\ Kal/h$$

Por lo tanto la cantidad de calor total requerida que se ha de entregar a la carga metálica será la sumatoria de los calores individuales obtenidos anteriormente.

$$Q_{Carga\ metalica} = 1066.66 + 635.26 + 233.33$$

$$Q_{Carga\ metalica} = 1935.25\ Kcal/h$$

11.4.4 CALOR ABSORVIDO POR EL CRISOL

Es importante calcular el calor absorbido por el crisol durante el funcionamiento. Para lo cual el Almacén y taller Rangel decidió seleccionar un crisol de grafito, dado que este tiene capacidad de fusión suficiente para 5 kg, el cual por medio de la referencia del mismo conocemos el valor del C_P calor especifico del crisol. (CENGEL)

Por consiguiente el calor absorbido por el crisol se calculara remplazando en la ecuación (20) de la siguiente manera

$$\boldsymbol{Q_{Absorve\ Crisol}} = \frac{\boldsymbol{mC_P(T_F - T_O)}}{\boldsymbol{t}} \quad \textbf{(20)}$$

Dónde:

$Q_{Absorve\ crisol}$ = calor absorbido por el crisol

m = peso de la carga 6 kg

C_P = calor especifico del crisol 0.31 kcal/kg°C

T_F = temperatura fusión 900 °C

Temperatura aproximada a la que puede estar el crisol cuando el metal fundido esté a punto de colado, es decir a 800 °C.

T_O = temperatura ambiente 20 °C

t = tiempo de fusión 0.75 h

$$Q_{Absorve\ crisol} = \frac{6 * 0.31(900 - 20)}{0.75}$$

$$Q_{Absorve\ crisol} = 2182.4\ Kcal/h$$

11.4.5 CALOR UTIL PARA LA COCCION

Mediante la siguiente ecuación obtenemos el calor útil para la cocción.

$$\boldsymbol{Q_U = Q_{Carga\ metalica} + Q_{Absorve\ crisol}} \quad \textbf{(21)}$$

Dónde:

Q_U = calor útil para la cocción Kcal/h

$Q_{carga\ metálica}$ = calor que se entrega a la carga metálica 1935.25 Kcal/h

$Q_{Absorve\ crisol}$ = calor que absorbido por el crisol 2182.4 Kcal/h

$Q_U = 1935.25 + 2182.4$

$Q_U = 4117.65\ Kcal/h$

11.5 CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CALOR

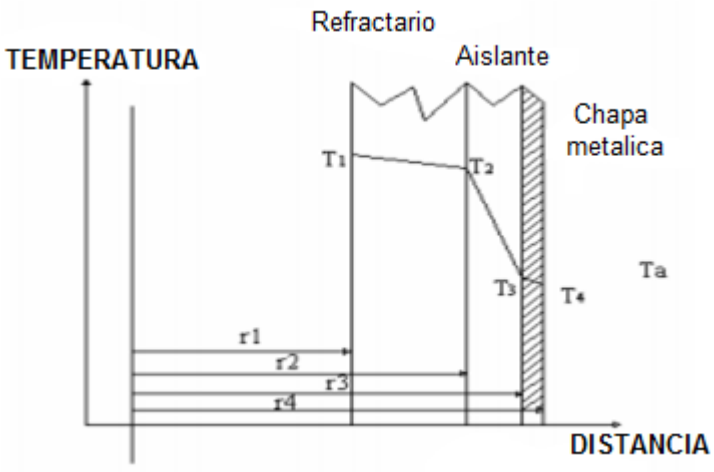
Es importante que la cantidad de calor que pasa a la carga sea de gran magnitud; para de esta manera economizar en lo que ha combustible se refiere, y se puede conseguir analizando las perdidas da calor que se producen, en las paredes cilíndricas y planas del horno tanto por conducción como por convección. (Cengel, 2007)

Se debe tomar en cuenta que para realizar el cálculo de las pérdidas de calor en las paredes del horno estas ya deben estar dimensionadas.

- **PERFIL DE TEMPERATURA**

Se considera un perfil de temperaturas, correspondientes a la transferencia de calor por conducción en estado estacionario del cual se obtendrán las medidas fundamentales del horno.

Figura 19. Perfil de temperaturas en el interior del horno



FUENTE: Barragán Diego (Barragan, 2012)

La simbología correspondiente al grafico anterior es:

T_1 = Temperatura de la pared interior del horno °C.

T_2 = Temperatura de la intercara del refractario con la capa aislante °C.

T_3 = Temperatura de la pared aislante y la chapa metálica del horno °C.

T_4 = Temperatura exterior del horno °C.

Ta = Temperatura del medio ambiente °C.

r_1 = Radio interior del horno m.

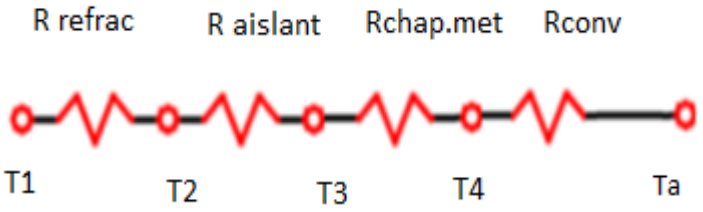
r_2 = Radio de la intercara del refractario y la capa aislante del horno m.

r_3 = Radio de la intercara aislante y chapa metálica del horno m.

r_4 = Radio exterior del horno m.

Aplicando el método de analogías eléctricas mediante resistencias equivalentes para la determinación de la transferencia de calor por unidad de longitud en las paredes cilíndricas y por unidad de área en las paredes del horno se tiene:

Figura 20. Esquema de resistencias analógicas para el horno



FUENTE: Fernando, Mestanza (FERNANDO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE COMBUSTIÓN INDUSTRIAL PARA FUNDIR ALUMINIO", 2012)

La simbología correspondiente a la figura anterior es:

$R_{refract}$ = Resistencia en el ladrillo refractario.

$R_{aislant}$ = Resistencia en la capa aislante.

$R_{chap\ meta}$ = Resistencia en la chapa metálica.

R_{conv} = resistencia en el aire debido al proceso de trasferencia de calor por convección.

Por lo tanto las siguientes ecuaciones (22),(23),(24),(25) son las que rigen este proceso.

CONDUCCIÓN

- Paredes planas:

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{k*A}} \quad (22)$$

- Paredes cilíndricas:

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{2\pi L}\left[\frac{ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k}\right]} \quad (23)$$

CONVECCIÓN

- Paredes planas:

$$Q = \frac{(T_4 - T_A)}{Ah} \quad (24)$$

- Paredes cilíndricas:

$$Q = \frac{(T_4 - T_A)}{\frac{1}{2\pi r_4 lh}} \quad (25)$$

11.6 CALCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

Tomando en cuenta las dimensiones del horno se debe determinar los coeficientes de transferencia de calor, para lo cual se considera:

- Paredes planas
- Paredes cilíndricas

Se desarrolla en primer lugar la temperatura de película que en su fórmula corresponde a la ecuación (26):

$$T_P = \frac{T_A + T_4}{2} \quad (26)$$

Dónde:

T_P = temperatura ambiente = 20 °C = 293 °K

T_4 = temperatura de la chapa metálica = 60 °C = 323 °k

Entonces la temperatura de película es:

$$T_P = \frac{293 + 333}{2}$$

$$T_P = 313\ °K$$

Con esta temperatura se evalúan propiedades del aire, en estas condiciones así se tiene:

Tabla 7. Propiedades del aire con temperatura de película

Temperatura °K	Viscosidad Cinemática *v* (m^2/s)	Conductividad Térmica *k* (W/m°K)	α (m^2/s)	Constante de Prank
313	$1{,}72x10^{-5}$	$27.26x10^{-3}$	$24{,}42x10^{-6}$	0.70
379	1.95x10-5	28.0x10-3	2.76x10-5	0.72

FUENTE: INCROPERA, FRANK (INCROPERA)

Se considera que la convección es libre con capa turbulenta para confirmar las condiciones de capa turbulenta obtenemos el número de rayleigh describiendo su ecuación de la siguiente manera.

$$R_a = \frac{g\beta(T_S - T_A)L^3}{V\alpha} \quad (27)$$

Dónde:

R_a = Número de Rayleigh

g = gravedad 9.8 m/s^2

T_S = temperatura de salida 333 °k

T_a = temperatura ambiente 293 °k

A = altura 0.25 m

V = viscosidad cinemática

α = $24.42x10^{-6}\left(\frac{m^2}{s}\right)$

$$R_a = \frac{9.8 * 0.0319489 * (333 - 293) * 0.25^3}{1.72x10^{-5} * 24.42x10^{-6}}$$

$$R_a = 465894835.8$$

Se tiene que si Rayleigh es mayor a 10^9 el flujo es turbulento y con respecto a la ecuación (28) el número de Nusselt corresponde a:

$$\boldsymbol{N_U = \left[0.825 + \frac{0.387 R_a^{\frac{1}{6}}}{\left(1+\left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right]} \qquad \textbf{(28)}$$

Dónde:

R_a = número de Rayleigh 465894835.8

P_r = número de Prank 0.7

$$N_U = \left[0.825 + \frac{0.387 * 465894835.8^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{0.7}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right]$$

N_U = 65.97

Se tiene en la siguiente ecuación que:

$$\boldsymbol{h_C = \frac{N_U * k}{l}} \quad \textbf{(29)}$$

Dónde:

h_c = coeficiente de transferencia de calor por convección

N_u = número de Nusselt 65.97

L = altura 0.25 m

$$h_C = \frac{65.97 * 27.26x10^{-3}}{0.25}$$

$$h_C = 15.74\left(\frac{w}{m^2k}\right)$$

11.6.1 COEFICIENTE EN LA TAPA INFERIOR DEL HORNO (BASE)

Para la tapa inferior del horno se considera iguales condiciones de temperatura que en las paredes cilíndricas, en consecuencia las propiedades del aire bajo estas condiciones son iguales.

Evaluando el número de Rayleigh con la ecuación (22) se tiene el siguiente valor con la siguiente consideración del valor de L el cual hallaremos con la siguiente ecuación.

$$\boldsymbol{L = \frac{A_S}{P}} \quad \textbf{(30)}$$

Dónde:

L = longitud de la placa

A_S = área superficial de la placa 0.33 m^3

P = perímetro de la placa 2.04 m

$$L = \frac{0.33}{2.04}$$

$L = 0.16\ m$

El número de Rayleigh tiene como valor:

$R_a = 1.28X10^7$

De acuerdo a consideraciones de placas horizontales con superficie de placa caliente o superficie inferior de placa fría se tiene que el Nusselt corresponde a:

$N_U = 0.15 R_a^{\frac{1}{3}}$

$N_U = 27.77$

Evaluando en la ecuación (30) del coeficiente de conversión se tiene:

$h_C = 4.65 \left(\frac{w}{m^2 k}\right)$

11.6.2 COEFICIENTE EN LA TAPA SUPERIOR DEL HORNO

Siguiendo el mismo procedimiento anterior se considera una temperatura de película 336 °k, T_4 = 106°C = 379°C

Evaluando en la ecuación anterior del coeficiente de convección se tiene el siguiente valor con las siguientes consideraciones:

L = 0.12 m

R_a = 882277.5

N_u = 25.2

h_c = 5.7 w/m^2k

11.7 PERDIDAS DE CALOR EN LAS PAREDES DEL CILINDRO

- **POR CONDUCCIÓN**

Para calcular las pérdidas de calor generadas en las paredes del cilindro por conducción tenemos la siguiente ecuación:

$$q_{Conduccuion} = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{1}{2\pi L}\left[\frac{ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_{refractario}} + \frac{ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{m\ ceramica}} + \frac{ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_{Chapa}}\right]} \quad \textbf{(31)}$$

Dónde:

T_1 = temperatura en la cámara de combustión 1173 °K

T_4 = temperatura en la chapa metálica 333 °k

L = altura del horno 0.25 m

$k_{refractario}$ = conductividad térmica del ladrillo refractario 0.3 (w/m°k)

$k_{m\ cerámica}$ = conductividad térmica de la manta cerámica 0.068 (w/m°k)

k_{chapa} = conductividad térmica de la chapa metálica 63.9 (w/m°k)

r_2 = radio r_1 + el espesor del ladrillo refractario 0.297 m

r_3 = radio r_2 + el espesor de la manta cerámica 0.3224 m

r_4 = radio r_3 + espesor de la chapa metálica 0.3254 m

$$Q_{Conducción} = \frac{(1173 - 333)}{\frac{1}{2\pi * 0.25}\left[\frac{ln\left(\frac{0.297}{0.183}\right)}{0.3} + \frac{ln\left(\frac{0.3224}{0.297}\right)}{0.068} + \frac{ln\left(\frac{0.3254}{0.3224}\right)}{63.9}\right]}$$

$$Q_{Conducción} = 475.24\ w$$

- **POR CONVECCIÓN**

Para calcular las pérdidas de calor generadas en las paredes del cilindro por convección tenemos la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Q_{Convección}} = \frac{(\boldsymbol{T_4} - \boldsymbol{T_A})}{\frac{1}{2\pi r_4 L h}} \quad \textbf{(32)}$$

Dónde:

T_A = temperatura ambiente 293 °k

T_4 = temperatura en la chapa metálica 333 °k

L = altura del horno 0.25 m

h_C = coeficiente de calor por convección 3.93 (w/m^2°k)

$$Q_{Convección} = \frac{(333 - 293)}{\frac{1}{2\pi * 0.3254 * 0.25 * 3.93}}$$

$$Q_{Convección} = 80.3w$$

11.7.1 PERDIDAS DE CALOR TOTAL EN LAS PAREDES DEL CILINDRO

Con la ecuación (33) hallaremos el calor total perdido en las paredes cilíndricas del horno.

$$\boldsymbol{Q_{T\ Cilindro}} = \boldsymbol{Q_{Conducción}} + \boldsymbol{Q_{Convección}} \quad \textbf{(33)}$$

$$Q_{T\ Cilindro} = 475.24 + 80.3$$

$$Q_{T\ Cilindro} = 555.54\ w$$

11.7.2 PERDIDAS DE CALOR EN LA BASE DEL HORNO

- **POR CONDUCCIÓN**

Para calcular las pérdidas de calor generadas en la base del horno por conducción tenemos la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Q_{Conducción}} = \frac{(\boldsymbol{T_1} - \boldsymbol{T_4})}{\left(+\frac{\boldsymbol{e_{refract}} \quad \boldsymbol{e_{chapa}}}{\boldsymbol{k_{refract}} * \boldsymbol{Ak_{chapa}} * \boldsymbol{A}}\right)} \qquad \textbf{(34)}$$

Dónde:

T_1 = temperatura en la cámara de combustión 1173 °k

T_4 = temperatura en la chapa metálica 333 °k

A = área de la tapa0.33 m

K_{refra} = conductividad térmica del ladrillo refractario 0.3 (w/m°k)

K_{chapa} = conductividad térmica de la chapa metálica 63.9 (w/m°k)

E_{refrac} = espesor del material refractario 0.12 m

E_{chapa} = espesor de la chapa metalica 0.003 m

$$Q_{Conducción} = \frac{(1173 - 333)}{\left(\frac{0.12}{0.3 * 0.33} + \frac{0.003}{63.9 * 0.33}\right)}$$

$$Q_{Conducción} = 692.91\ w$$

- **POR CONVECCIÓN**

Para hallar el calor por convección remplazamos en la ecuación (35).

$$\boldsymbol{Q_{Convección}} = \frac{(\boldsymbol{T_4} - \boldsymbol{T_A})}{\boldsymbol{Ah}} \qquad \textbf{(35)}$$

Dónde:

T_4 = temperatura en la chapa metálica 333 °k

T_A = temperatura ambiente °k

A = área de la tapa 0.33 m

h_c = coeficiente de calor por convección 4.65 (w/m°k)

$$Q_{Convección} = \frac{(333 - 293)}{0.295 * 4.65}$$

$$Q_{Convección} = 26.06\ w$$

11.7.3 PÉRDIDAS DE CALOR TOTAL EN LA BASE DEL HORNO

Para determinar las pérdidas del calor que se pierde en la base del horno reemplazamos los valores obtenidos anteriormente en la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{Q_{TotBase} = Q_{Conducción} + Q_{Convección}} \quad \textbf{(36)}$$

$$Q_{TotBase} = 692.91 + 26.06$$

$$Q_{TotBase} = 718.97\ w$$

11.7.4 PÉRDIDAS DE CALOR EN LA TAPA SUPERIOR DEL HORNO

- **POR CONDUCCIÓN**

Para hallar el calor por conducción remplazamos en la ecuación (37).

$$\boldsymbol{Q_{Conducción} = \frac{(T_1 - T_4)}{\left(\frac{e_{refra}}{k_{refra} * A} + \frac{e_{Chapa}}{k_{Chapa} * A}\right)}} \quad \textbf{(37)}$$

Dónde:

T_1 = temperatura en la cámara de combustión 1173 °k

T_4 = temperatura en la chapa metálica 379 °k

A = área de la tapa0.19 m

K_{refra} = conductividad térmica del ladrillo refractario 0.3 (w/m°k)

K_{chapa} = conductividad térmica de la chapa metálica 63.9 (w/m°k)

e_{refrac} = espesor del material refractario 0.06 m

e_{chapa} = espesor de la chapa metálica 0.003 m

$$Q_{Conducción} = \frac{(1173-379)}{\left(\frac{0.06}{0.3*0.19}+\frac{0.03}{63.9*0.33}\right)}$$

$$Q_{Conducción} = 754.12w$$

- **POR CONVECCIÓN**

Remplazamos en la ecuación (38). Obtenemos el calor por convección.

$$\boldsymbol{Q_{Convección} = \frac{(T_4-TA)}{Ah}} \quad \textbf{(38)}$$

Dónde:

T_4 = temperatura en la chapa metálica 379 °k

T_A = temperatura ambiente 293 °k

A = área de la tapa 0.19 m

h_c = coeficiente de calor por convección 5.7 (w/m°k)

$$Q_{Convección} = \frac{(379-293)}{0.19*5.7}$$

$$Q_{Convección} = 79.40\ w$$

11.7.5 PÉRDIDAS DE CALOR TOTAL EN LA BASE DEL HORNO

Remplazando los valores en la ecuación (39) obtenidos en las ecuaciones 37 y 38 sabemos la pérdida de calor total en la tapa del horno.

$$\boldsymbol{Q_{TotTapa} = Q_{Conducción} + Q_{Convección}} \quad \textbf{(39)}$$

$$Q_{TotTapa} = 754.12 + 79.40$$

$$Q_{TotTapa} = 833.52\ w$$

11.7.6 PÉRDIDAS DE CALOR TOTAL EN EL HORNO

Empleando la ecuación (40) determinamos la perdida de calor total en el horno.

$$\boldsymbol{Q_{PERDIDO\ TOTAL}} = \boldsymbol{Q_{TOTAL\ CILINDRO}} + \boldsymbol{Q_{TOTAL\ BASE}} + \boldsymbol{Q_{TOTAL\ TAPA}} \qquad \textbf{(40)}$$

$Q_{PERDIDO\ TOTAL} = 555.54 + 718.97 + 833.52$

$Q_{PERDIDO\ TOTAL} = 2108.03\ W$ 1 kcal/h = 1.6277778 W (calc, 2013).

$Q_{PERDIDO\ TOTAL} = 1812.925\ Kcal/h$

11.7.7 CALCULO DE BALANCE DE ENERGIA

Remplazando los resultado obtenidos en la ecuación (41) calor liberado por el combustible.

$$\boldsymbol{Q_{CO}} = \boldsymbol{Q_U} + \boldsymbol{Q_P} \qquad \textbf{(41)}$$

$Q_{CO} = 4117.65 + 1812.925$

$Q_{CO} = 5930.575\ Kcal/h$

11.8 CALCULOS DE COMBUSTIÓN

11.8.1 AIRE TEÓRICO – COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE.

La cantidad mínima de aire necesario para oxidar los reactivos se conoce con el nombre de aire teórico. Cuando la combustión se lleva a cabo con el aire teórico esta debe ocurrir íntegramente. En la práctica esto resulta imposible. Se necesita más oxigeno del teóricamente necesario para lograr la combustión u oxidación total de los reactivos, se requiere entonces un exceso de aire, pues cada porción de combustible por ejemplo una gota debe hallarse estrictamente rodeada por un numero de moléculas de oxigeno mayor que el necesario para asegurar la oxidación de todas las moléculas del hidrocarburo. Este exceso de aire generalmente se expresa como un porcentaje del aire teórico y se denomina coeficiente de exceso de aire. (ZABALA)

En este caso se va a tomar un valor medio del exceso de aire de 25%, por que las condiciones ambientales de donde se va instalar el equipo así lo requieren, la

combustión del GLP (según información del ministerio de energía y minas contiene 60% de butano y 40% de propano) en presencia del 100% de aire se tiene:

$C_4H_{10} = Butano$

$C_3H_8 = Propano$

$$\mathbf{0.6C_4H_{10} + 0.4C_3H_8 + 5.9[O_2 + (3.76N_2)] \rightarrow 3.6C_2 + 4.6H_2O + 5.9 * 3.76N_2}$$

Con un exceso de aire del 25 % es decir 125 % de aire obtendremos:

$$\mathbf{0.6C_4H_{10} + 0.4C_3H_8 + 1.25 * 5.9O_2 + (1.25 * 5.9 * 3.76N_2)}$$
$$\mathbf{\rightarrow 3.6CO_2 + 4.6H_2O + 27.73N_2 + (1.475O_2)}$$

Análisis volumétrico de los productos de la combustión

Siendo el número total de moles de los productos de la combustión entonces tenemos en la ecuación (42):

$$\boldsymbol{n_T = n_{CO_2} + N_{H2O} + n_{N_2} + n_{O_2}} \qquad \textbf{(42)}$$

$$\boldsymbol{n_T = 3.6 + 4.6 + 27.73 + 1.475}$$

$$\boldsymbol{n_T = 37.41\ moles}$$

El analisis volumetrico de los productos de la combustion es los determinamos mediante la ecuación (43):

$$\boldsymbol{Y_I = \frac{n_I}{n_T} = \frac{P_I}{P_T}} \qquad \textbf{(43)}$$

$$Y_{CO_2} = \frac{3.6}{37.41} = 0.096$$

$$Y_{H2O} = \frac{4.6}{37.405} = 0.123$$

$$Y_{N_2} = \frac{27.73}{37.41} = 0.741$$

$$Y_{CO_2} = \frac{1.475}{37.41} = 0.039$$

Por determinación de las ecuaciones 44 y 45 hallaremos la relación aire-combustible.

$$\boldsymbol{ra_{/c}} = \frac{\boldsymbol{n_{aire}}}{\boldsymbol{n_{comb}}} \quad \textbf{(44)}$$

$$\boldsymbol{ra_{/c}} = \frac{\boldsymbol{n_{aire} * M_{aire}}}{\boldsymbol{n_{comb} * M_{com}}} \quad \textbf{(45)}$$

Dónde:

n = número de molles

M = masa molar en Kg / Kg.mol

De la ecuación 3.5.23 para 125 % de aire teórico se tiene.

EN BASE MOLAR

$$\boldsymbol{0.6C_4H_{10} + 0.4C_3H_8 + 1.25 * 5.9O_2 + (1.25 * 5.9 * 3.76N_2)} \\ \boldsymbol{\rightarrow 3.6CO_2 + 4.6H_2O + 27.73N_2 + (1.4755O_2)}$$

$$ra_{/c} = \frac{1.475 + 27.73}{0.6 + 0.4} = 29.205 \ \frac{moles_{aire}}{moles_{comb}}$$

$$rc_{/a} = \frac{1}{29.205} = 0.0342 \ \frac{moles_{comb}}{moles_{aire}}$$

EN BASE DE MASA

Butano $C_4H_{10}\, M = 58.124\, Kg. \,/\, Kg.mol$

Propano $C_3H_8 M = 44.097\, Kg./\, Kg.mol$

Aire M = $28.97\, Kg./\, Kg.mol$

$$r_{a/c} = \frac{29.205 + 28.97}{0.6 * 58.124 + 0.4 * 44.097} = 16.37\, \frac{k_{g_{aire}}}{k_{g_{comb}}}$$

$$r_{c/a} = \frac{1 * 102.22}{29.205 * 28.97} = 0.121\, \frac{moles_{comb}}{moles_{aire}}$$

11.8.2 CONSUMO DE COMBUSTIBLE

El consumo de combustible, o el gasto de combustible se calculan en base al consumo calórico del horno, y el poder calorífico inferior del combustible, para esto se utiliza la siguiente ecuación.

$$\boldsymbol{\dot{m}_C = \frac{Q}{H_d}} \qquad \textbf{(46)}$$

Dónde:

m_C = gasto de combustible en K g/h

Q = consumo calorífico del horno K cal/h

H_d = poder calorífico inferior del gas GLP 9785.6 K cal/Kg

$$\dot{m}_C = \frac{5930.575\, Kcal/h}{9785.6\, {}^{Kcal}/_{Kg_c}}$$

$$\dot{m}_C = 0.606\, {}^{Kg}/_{h}$$

El flujo del gas será determinado por la ecuación (47):

$$\dot{V}_C = \dot{m}_C * V \quad \textbf{(47)}$$

Dónde:

$\dot{V}_C$ = Flujo de combustible en m^3/ Kg

V = volumen especifico del combustible en m^3/ Kg

Sustituyendo en la ecuación anterior tenemos:

$$\dot{V}_C = 0.606 * 0.461$$

$$\dot{V}_C = 0.27 \ {}^{m^3}/_{h}$$

11.9 DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO

11.9.1 DIMENSIONES INICIALES

Se decide seleccionar el crisol, para conocer sus características y a partir de estas iniciar el diseño.

Tabla 8. Dimensiones y características del crisol

CARACTERISTICAS DIMENSIONALES DEL CRISOL					
CARACTERISTICAS	Material del crisol	h (cm)	D ext sup (cm)	D int inf (cm)	p (Kg)
	Grafito	25	19	15	6

FUENTE: Alexander Narváez

Dónde:

h = Altura

Dext.sup = diámetro superior

Dint.inf = diámetro inferior

P = peso del crisol

11.9.2 DETERMINACIÓN DEL ANCHO O ESPESOR DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

Literatura especializada en hornos, contiene la información para la determinación del ancho o espesor de la cámara de combustión, para lo cual se requiere 3 parámetros importantes:

- Capacidad de calentamiento Kg / hm^2
- Contenido calorífico del metal K cal / Kg
- Espacio de combustión Kg /$segm^3$

CAPACIDAD DE CALENTAMIENTO

Para los hornos de crisol viene dado por la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{C_C = \frac{m}{t * superficie\ calentada}} \qquad \textbf{(48)}$$

Dónde:

m = peso calentado 5 Kg

t = tiempo de fusión 0.75 h

Para encontrar la superficie calentada tenemos la ecuación (49), aplicamos las características del crisol, así tenemos:

$$\boldsymbol{Superficie\ calentada = \acute{A}rea\ lateral * \acute{a}rea\ de\ la\ base} \qquad \textbf{(49)}$$

Y luego determinamos la siguiente ecuación que corresponde al área lateral

$$\boldsymbol{\acute{A}rea\ lateral = \pi * h * D_{ext.sup}} \qquad \textbf{(50)}$$

Dónde:

π = 3.141592

h = Altura 25 cm

$D_{ext.sup}$ = diámetro exterior superior 19 cm

$\acute{A}rea\ Lateral = 3.141592 * 25 * 19$

$Área\ Lateral = 1492.256\ cm^2$

$Área\ Lateral = 0.15\ m^2$

Para hallar el área de la base remplazamos en la ecuación (51).

$$\boldsymbol{Área\ de\ la\ base = \pi * R^2} \qquad \textbf{(51)}$$

Dónde

π = 3.141592

R = radio de la base

$Área\ de\ la\ base = 3.141592 * 5.5^2\ cm^2$

$Área\ de\ la\ base = 95.033\ cm^2$

$Área\ de\ la\ base = 0.095\ m^2$

$Superficie\ calentada = 0.15\ m^2 + 0.095\ m^2$

$Superficie\ calentada = 0.245\ m^2$

Sustituyendo en la ecuación (48) tenemos:

$$C_C = \frac{5}{0.75 * 0.245}$$

$$C_C = 27.210\ {}^{Kg}/_{hm^2}$$

11.9.3 CONTENIDO CALÓRICO

El contenido calórico de los metales viene dado en curva y está dado en función de su máxima temperatura a la que está sometida durante el proceso de fundición, teniendo en cuenta la figura 17, contenido de calor de los metales a diferentes temperaturas observamos que el contenido calórico del Aluminio a 800 °C corresponde a un valor de 320 Kcal / Kg.

11.9.4 ESPACIO DE COMBUSTIÓN

Se relaciona con el volumen necesario para que se complete la combustión a lo que nos limitamos a encontrar un valor aproximado, debido a un gran número de variables que afectan a la velocidad del mismo.

En bibliografía relacionada con la combustión, informan algunas alternativas, que pueden producirse durante el funcionamiento y por consiguiente su espacio de combustión así por ejemplo:

- Mezcla incompleta 13.34 Kcal / segm^3
- Mezcla parcialmente de combustible y aire, combustible grueso y aire frio. 53.59 Kcal / segm^3
- Buena mezcla de combustible y aire, buena utilización de la cámara de combustión, atomización muy fina y pulverización del combustible, aire frio. 88.97 Kcal / segm^3
- Mezcla completa o pre mezcla de aire combustible, utilización perfecta del espacio de combustión. 141.11 Kcal / segm^3
- Mezcla completa o pre mezcla de aire combustible, utilización perfecta del espacio de combustión , atomización muy fina de combustible, aire a 350 °C 239.66 Kcal / segm^3

Para nuestro trabajo, consideremos que se debe tener una mezcla completa de aire combustible, lo que implica luego de los antecedentes escritos, es decir un espacio de combustible de 141.11 Kcal / segm^3.

Conocidos estos parámetros se puede determinar el ancho o espesor de la cámara de combustión por la ecuación (52):

$$\boldsymbol{e = \frac{C_C * Contenido\ Calorico}{Espacio\ de\ Combustión}} \qquad \textbf{(52)}$$

Dónde:

C_C = capacidad de calentamiento 27.210 $\boldsymbol{Kg/_{hm^2}}$

Contenido calórico = 320 Kcal / Kg

Espacio de combustión = 141.11 Kcal / segm^3

$$e = \frac{27.210 * 320}{141.11}$$

$$e = 1.71\ cm$$

11.9.5 DETERMINACION DEL DIAMETRO INTERNO TOTAL DEL HORNO

Se determina el diámetro interno total del horno con la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{D_{Int_{Tot}} = 2e + D_{Sup_{Cris}}} \qquad \textbf{(53)}$$

Dónde:

E = espesor de la cámara de combustión 1.71 cm

$D_{Sup.Cris}$ = diámetro superior del crisol 19 cm

$$D_{Int_{Tot}} = (2 * 1.71) + 19$$

$$D_{Int_{Tot}} = 22.42\ cm$$

$$r_{Int_{Tot}} = 11.21\ cm$$

11.9.6 DETERMI NACIÓN DEL DIAMETRO EXTERIOR DEL HORNO.

Para establecer el diámetro exterior se necesita conocer el espesor de la pared refractaria, espesor de la manta cerámica y chapa metálica que dispondrá el horno para lo cual se hará una selección ladrillo refractario, manta cerámica (aislante) y chapa metálica; conjuntamente un análisis de transferencia de calor de tal forma que se obtenga una temperatura adecuada en la coraza metálica. La selección depende de muchos factores tales como: funcionamiento, diseño del horno, vida o duración y costo.

11.9.7 ESPESOR DE LAS PAREDESCILINDRICAS DEL HORNO.

Para la selección de espesores se debe mantener criterios de construcción, montaje operatividad.

- Espesor capa refractaria: 0.114 m.
- Espesor manta cerámica: 0.0254 m.
- Espesor Chapa metálica: 0.003 m.

Remplazando los valores de espesores en la siguiente ecuación tenemos:

$$\boldsymbol{r_4 = r_{Int_{Tot}} + e_{Refr} + e_{m\ ceramica} + e_{chapa}} \quad \textbf{(54)}$$

$r_4 = 0.1121 + 0.114 + 0.025 + 0.003$

$r_4 = 0.2541\ m$

$$\boldsymbol{D_{Ext} = r_4 * 2} \quad \textbf{(55)}$$

Dónde:

r_4 = radio total del horno 0.2541 m

$D_{Ext} = 0.2541 * 2$

$D_{Ext} = 0.5082\ m$

$D_{Ext} = 50.82\ cm$

11.9.8 ALTURA DEL HORNO

Tiene relación con la ubicación del quemador, que según la industria de la construcción de hornos Morgan sugiere una altura de 9 a 12 cm desde la base del horno.

Según este criterio se construirá la base que soporta el crisol a 10 cm por lo tanto en la siguiente ecuación tenemos que:

$$\boldsymbol{Altura\ del\ horno = L_{Base\ Horno} + L_{Cilindro\ Horno} + L_{Tapa\ Horno}} \quad \textbf{(56)}$$

Dónde:

$L_{Base\ Horno}$ = longitud de la base 17cm

$L_{Cilindro\ Horno}$ = longitud del cilindro 40 cm

$L_{Tapa\ Horno}$ = longitud tapa del horno 5 cm

$Altura\ del\ horno = 62\ cm$

$Altura\ del\ horno = 0.6\ m$

12. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

El procedimiento que se llevó a cabo para la construcción de este proyecto fue la elaboración de un cilindro metálico de acero estructural con un espesor de 3 mm realizando un proceso de rolado dándole así la forma cilíndrica y uniéndola con un cordón de soldadura luego cortando dos laminas circular con un diámetro de 56 cm, uniendo así el fondo y la parte superior con soldadura tomando una medida de arriba hacia debajo de 5 cm y cortando circularmente para obtener la tapa de nuestro tanque cilíndrico.

12.1 CONSTRUCCION DE LA BASE SOPORTE DEL CILINDRO

En este proceso se cortar una lámina de acero estructural con un espesor de 1.5 cm**,** la cual se le realiza un proceso de rolado dándole así la misma forma del cilindro y luego cortándola a las siguiente medidas de 17 x 16 cm, creando las roscas con un machuelo y soldándola a una altura de la base del cilindro de 17 cm para así poder atornillar a la estructura que soportara el cilindro.

12.2 DESTIJERE DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

Para la selección de estos perfiles se contó con la ayuda de tablas y personal experto gracias al codirector profesor Fredy Sánchez por su aporte, los perfiles seleccionado son de 4x4 para la base de soporte calibre 10 y de 3x2 para soporte calibre 10 teniendo en cuenta los ángulos calculados y la ubicación de la placa de acero se cortan los perfiles de base a una longitud de 1 m y los de la parte de la estructura a 23 cm formando un ángulo de 37C procediendo a unir por medio de soldadura

Soldado de la lámina estructural de 4 mm con sus respectivas perforaciones a la estructura para así obtener el montaje y atornillado del cilindro en la estructura.

12.3 CONSTRUCCION DE LA BOBEDA DEL HORNO

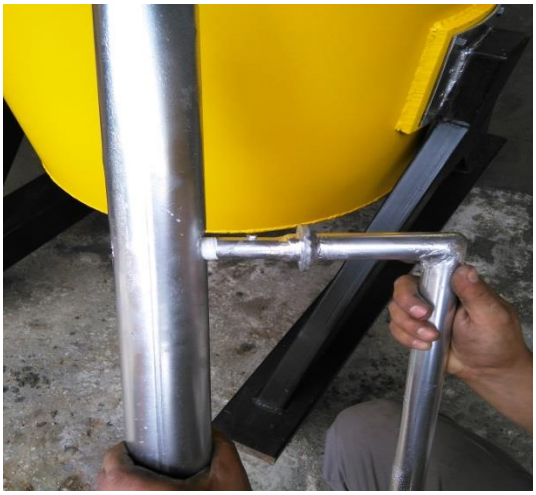
La base del horno está cubierta por una capa de fibra aislante recubierta por una capa de mortero elaborado con arcillas como (bentonita, caolín, arena de moldear y silicato de sodio), que ayuda a fijar la fibra de contacto con el calor directo, como se muestra en la figura, esta mezcla nos proporciona una plasticidad y el buen manejo de cubrimiento para estos procesos de fundición.

Para luego obtener una capa en la cual se ubicaran los ladrillos refractarios teniendo en cuenta la ubicación del crisol el espacio entre ellos para la cámara de combustión y fijar el quemador ya que entra tangencial a la base del crisol permitiendo una difusión uniforme y en espiral de la llama en la cámara de combustión.

De igual forma se realiza el proceso en la tapa como se observa la siguiente figura

CONSTRUCCIÓN DEL QUEMADOR DE GAS NATURAL

El quemador empleado en este sistema es de fácil aplicación tanto para el funcionamiento como también el mantenimiento, debido a su fabricación el cual se puede desarmar en varios componentes como se muestra en las siguientes figuras.



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

De tal forma todo este proceso funciona por medio de una presión de gas la cual es controlada por unas válvulas y unos manómetros los cuales nos ayudan a tener

en cuenta la presión de salida y la presión de la bombona de gas como se muestra en la figura.

13. RESULTADOS

13.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL HORNO

Para la realización de la prueba del prototipo es de gran importancia contar con los materiales necesarios como se muestran en la figura.

14. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

14.1 ANALISIS Y RESULTADOS

Una vez construido el equipo se realizó las pruebas para calibrar, verificar y validar su funcionamiento. Se realizó pruebas de calentamiento del horno, además de fundir los perfiles de aluminio reciclado. Se decide fundir 5 Kg que es la carga para la cual se diseñó el horno y de esta manera obtener las curvas características del horno, con los parámetros de tiempo, temperatura y consumo de combustible y se graficó curvas de tiempo.

15. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un horno tipo crisol para fundir aluminio de 5 kg de capacidad, por la facilidad para realizar una práctica a nivel de laboratorio, se utilizaron los criterios de diseño como: diámetro del crisol (19cm), diámetro de la cámara de combustión (1.71cm),diámetro del horno (56.cm) determinando el requerimiento del espesor del material aislante, la altura del Horno incluyendo base y tapa, además de la cantidad de calor requerida para fundir la carga (593.575 Kcal/h) y la cantidad de calor que se pierde por las paredes (1812.925 kcal/h).

Mediante las pruebas realizadas en el Taller Rangel, llevadas a cabo en el horno tipo crisol se determinó que entre 400°C y 700°C las muestras de aluminio sufren ciertos cambios sin llegar a fundirse, luego de alcanzar temperaturas entre 800°C y 900°C se determinó que la carga de aluminio se fundió y presenta características de colado. Las condiciones de fundición del aluminio como la cantidad de aluminio que se funde, el tiempo de calentamiento (20 min) hasta llegar a 400oC, el tiempo de fundición (50min) la temperatura a la cual se requiere llegar (900oC), las características de colado (coloración rosada del aluminio fundido), la segunda carga permite despreciar el calentamiento ya que el horno aún permanece caliente en este caso el proceso tarda 45 minutos.

Con el diseño de ingeniería realizado se adquirió los materiales necesarios y se construyó y ensamblo el equipo con las características requeridas y condiciones de operación.

Se realizó la validación del equipo, además de registrar los datos de su operación en tiempo real, evidenciando un perfecto funcionamiento el cual permitió finalizar esta investigación.

Se logró el objetivo planteado al inicio, esto es diseño, construcción y montaje de un horno tipo crisol con capacidad de 5 kg, para aluminio que funcionara en el almacén y taller Rangel con un espacio para realizar pequeñas prácticas de fundición con los estudiantes de la universidad de pamplona.

16. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se debe buscar que los laboratorios dedicados a la enseñanza de los procesos de fabricación, tengan los mejores equipamientos de forma que los estudiantes puedan observar en detalle los avances tecnológicos aplicados en nuestro medio.

Se recomienda construir un lugar apropiado para el horno, ya que la emisión de gases de combustión, así como el calor y la llama que sale por la chimenea requieren un lugar amplio.

Tener cuidado al momento de encender el quemador, realizar el arranque seguro del equipo para evitar accidentes.

Para la utilización didáctica se requiere conseguir arena y moldes para que se pueda obtener productos terminados los mismos que crearan el interés del estudiante para realizar la práctica.

Se debe continuar con este tipo de trabajos, donde se observa que el estudiante tiene que aplicar todos los conocimientos adquiridos en el desarrollo de su carrera profesional.

Mediante este proyecto se busca que los estudiantes, tengan los mejores conocimientos y puedan observar en detalles los avances tecnológicos aplicados en nuestros medios.

Se debe emprender el proceso de construcción por parte de los laboratorios a fin de implementar un horno de fundición con características mejoradas al existente actualmente.

Para que la vida útil del ladrillo refractario, pueda tener un mayor rango de tiempo se hace necesario realizar después de cierto tiempo un masillado con un mortero apropiado, cuyo tipo es para ladrillos silico-aluminosos, de marca ERECOS.

Se recomienda utilizar equipo de protección y seguridad industrial básicos para trabajar en ambientes de temperatura elevada y sobre todo para fundición de metales como son gafas de protección y guantes de amianto.

17. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acebes, C. (s.f.). *EL ALUMINO.*

Armando, J. (2005). *Universidad de pamplona – Tesis diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes.*

Barragan, D. (2012). “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE COMBUSTIÓN INDUSTRIAL PARA FUNDIR ALUMINIO”.

BOTERO, E. A. (s.f.). *CURSO DE HORNOS UNIVERSIDAD PONTIFICIANA DE VOLIBAR.*

Bueno Saenz, D. (s.f.). *slideshare*. Obtenido de http:www.slideshare.net/DavidbuenoSaenz/aluminio-davidbueno

caicedo, m. (2007). *Los Hornos.*

calc, a. (2013). Obtenido de www.aqua-calc.com/what-is/power/kilocalorie-per-hour

CALLISTER, W. D. (s.f.). *Intiroducción a la ciencia e Ingenieria de los materiales.* Reverté.

Cengel, A. (2007). *TRASNFERENCIA DE CALOR.* MCGRAW HILL.

CENGEL, Y. A. (s.f.). *Fundamentos de transferencia de calor.* McGrawHill.

CORPORATIVO. (05 de 08 de 20011). *www.textoscientificos.com*. Obtenido de http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/teoria-COMBUSTIÓN

Erecos. (s.f.). *Erecos, empresa lider en materiales refractarios.* Obtenido de http://http Erecos, empresa lider en materiales refractarios.

FERNANDO, M. B. (2012). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE COMBUSTIÓN INDUSTRIAL PARA FUNDIR ALUMINIO”.*

FERNANDO, M. B. (2012). *www.emison.* Obtenido de http://www.emison.es/hornos/pdf/fundicio/horno%20de%20reverbero.pdf

GROOVER, M. P. (s.f.). *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNO, materiales, procesos y sistemas.* Pearson.

INCROPERA, F. P. (s.f.). *Fundamentos de la trnsferencia de Calor., 4 ed.* Pearson.

JOSE SALTO, J. V. (2009). *Escuela politécnica del ejército –Tesis diseño y construcción de un horno de crisol basculante, calentado por combustible para la fundición de aluminio.* ECUADOR.

M., T. (s.f.). *Hornos Industriales 2 ed.*

materias.fcty. (s.f.). *www.materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-228.pdf.* . Obtenido de http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-228.pdf.

SALVIGIULIANO. (s.f.).

Shigley. (s.f.). *Diseño en Ingenieria mecánica,sexta edición.* McGrawHill.

Spanish. (s.f.). *spanish.alibaba.com*. Obtenido de http://www.emison.es

Tecnologiaslimpias. (s.f.). *www.tecnologiaslimpias.org* . Obtenido de www.tecnologiaslimpias.org

UMSS, M. (s.f.). *Moldes UMSS, Facultad de Ciencias y Tecnología, Ing. Mecánica.* . Obtenido de Moldes UMSS, Facultad de Ciencias y Tecnología, Ing. Mecánica.

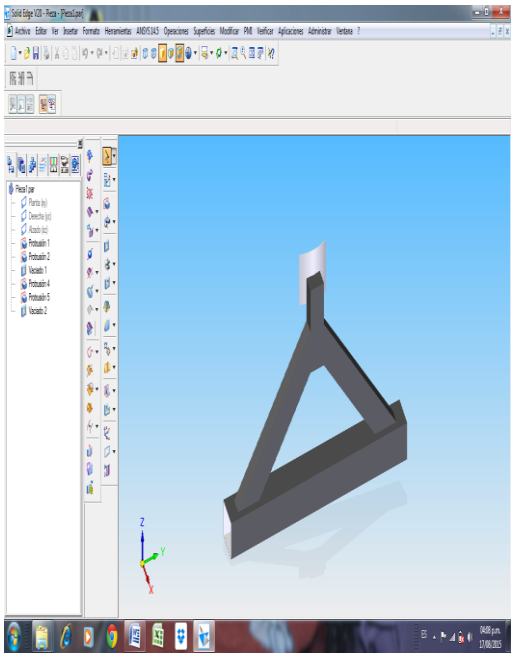
Universidad Tecnologica de Pereira. (s.f.). *Universidad Tecnologica de Pereira*. Obtenido de http://www.utp.edu.co/~publio17/laboratorio/fusion_al.htm

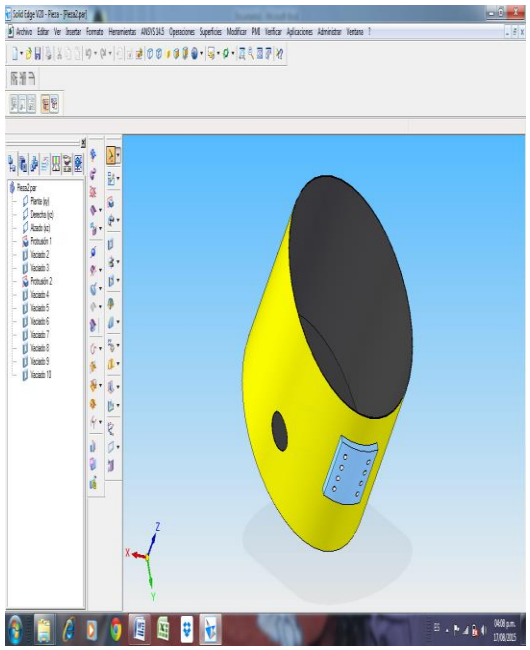
YUNUS A. CENGEL, J. M. (s.f.). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones, capitulo 5, conservacion de masa y energia.* McGrawHill.

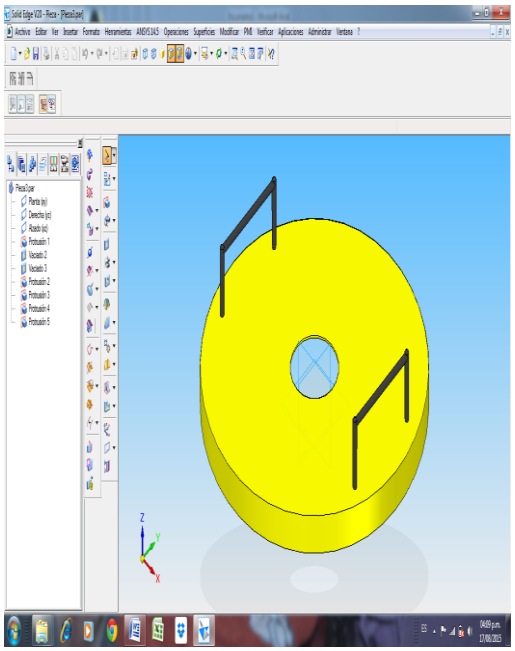
ZABALA, G. (s.f.). *Apuntes de combustión. Riobamba.*

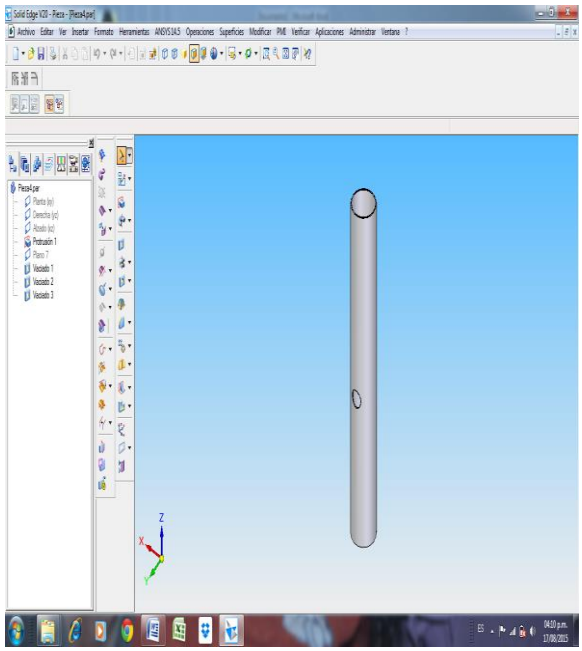
18. ANEXOS

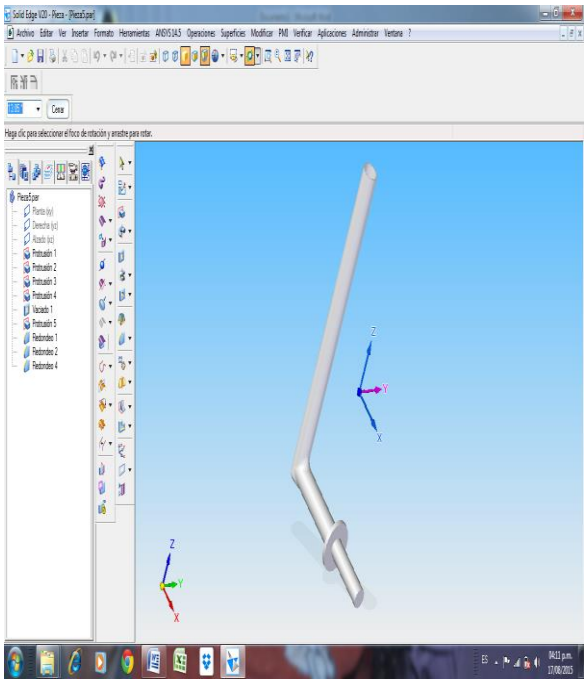
18.1 ANEXO 1

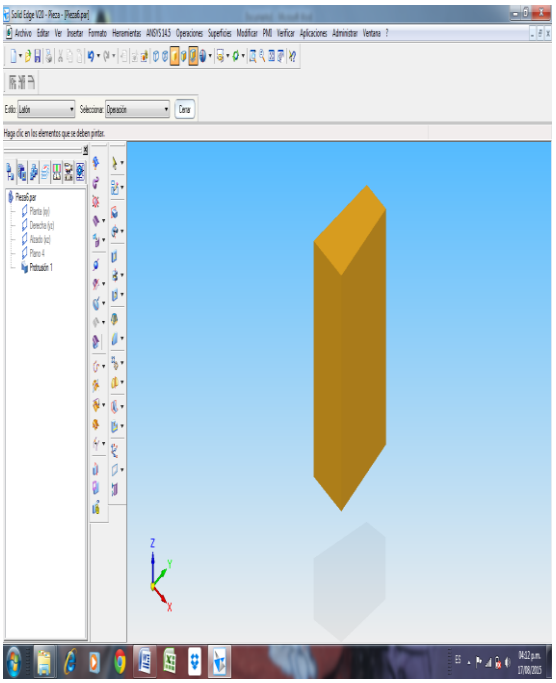


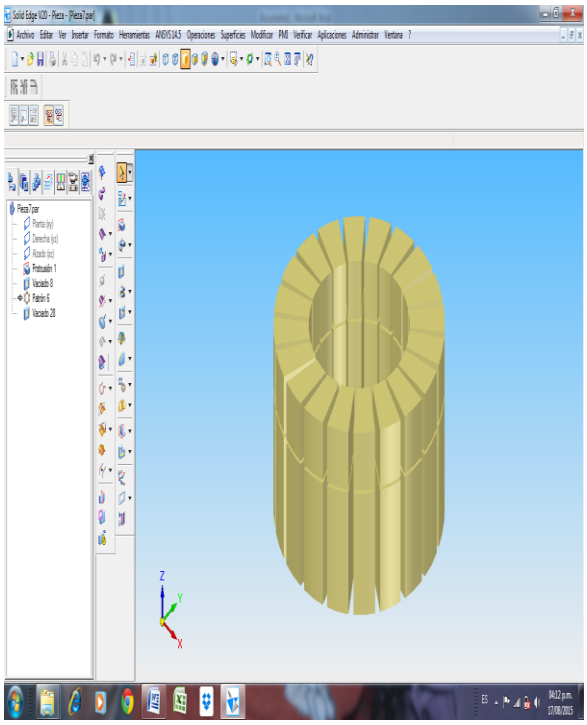


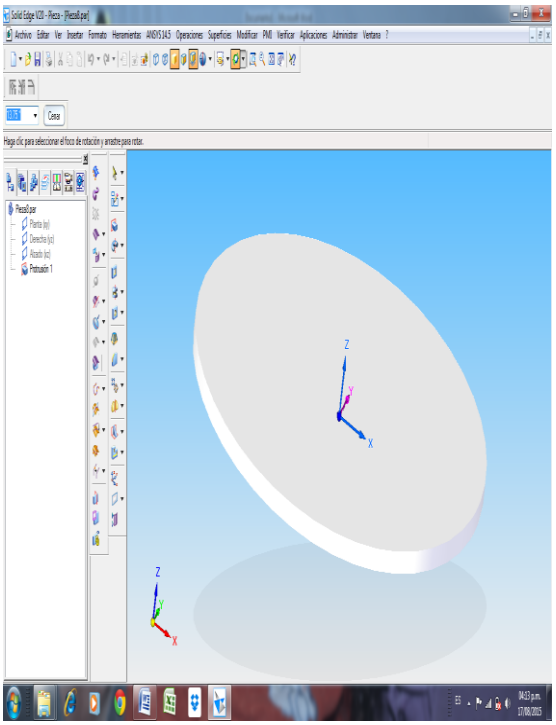


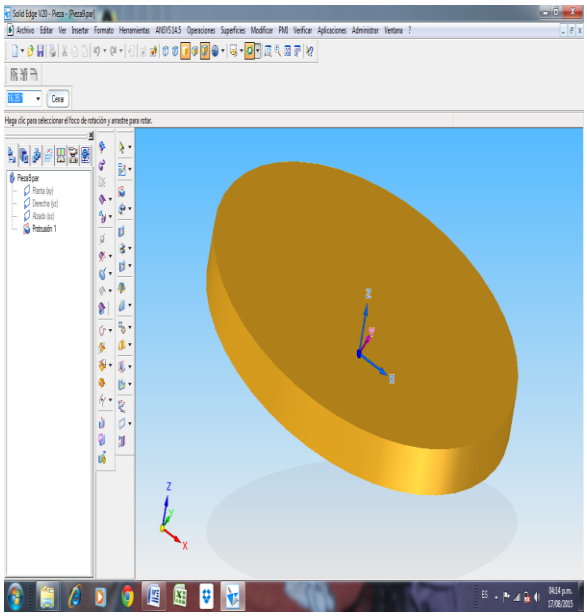


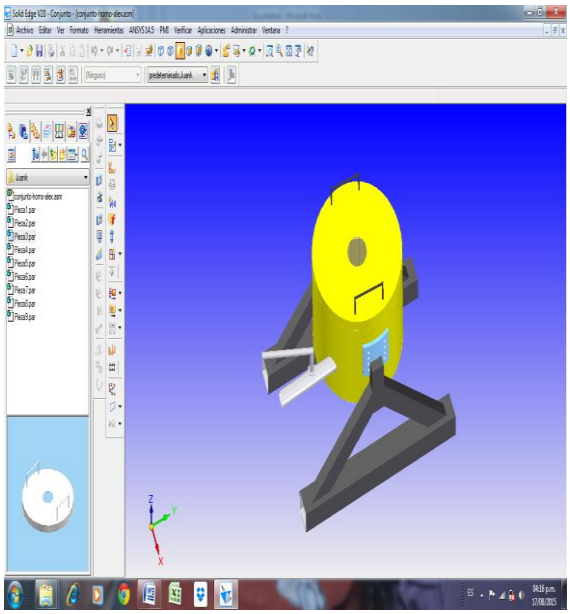


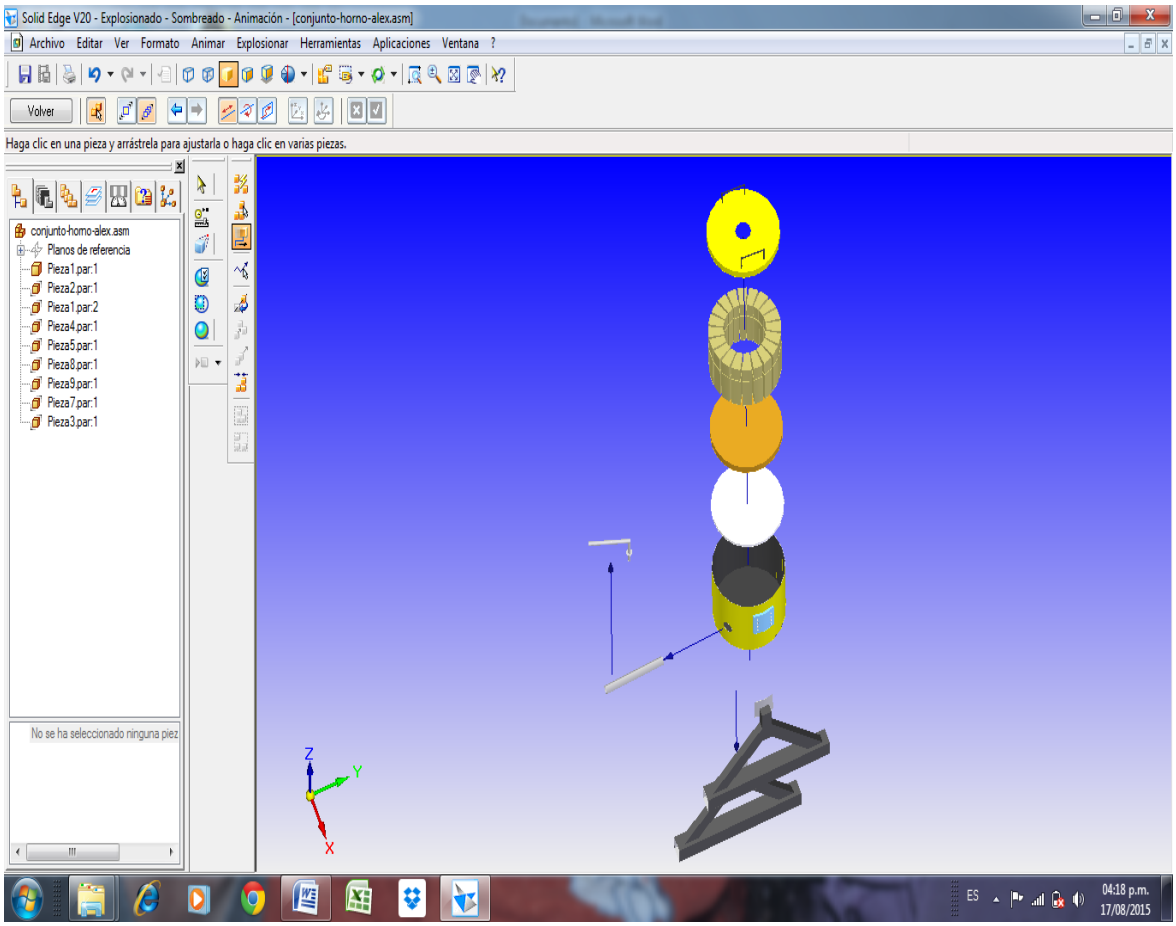











Solid Edge V20 - Explosionado - Sombreado - Animación - [conjunto-horno-alex.asm]
Archivo Editar Ver Formato Animar Explosionar Herramientas Aplicaciones Ventana ?
Volver
Haga clic en una pieza y arrástrela para ajustarla o haga clic en varias piezas.
conjunto-horno-alex.asm
Planos de referencia
Pieza1.par:1
Pieza2.par:1
Pieza1.par:2
Pieza4.par:1
Pieza5.par:1
Pieza8.par:1
Pieza9.par:1
Pieza7.par:1
Pieza3.par:1
No se ha seleccionado ninguna piez
Z
Y
X
ES
04:18 p.m.
17/08/2015

18.2 ANEXO 2

Anexo A, Propiedades del Ladrillo Refractario U-33.
Anexo B, Propiedades del mortero.
Anexo C, Propiedades del concrax 1500.

ANEXO A

Propiedades del ladrillo refractario U-30

Ladrillo Refractario U-33	
Clasificación NTC-773, ASTM C-27	Supetr Refractarios Super Duty
Análisis Químico (%)	
Al_2O_3	42.5
SiO_2	52.5
Fe_2O_3	1.5
TiO_2	2.0
CaO	0.3
MgO	0.3
Alcalis	0.5
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	34
Temperatura equivalente (°C) NTC - 706, ASTM C-24	1763
Porosidad aparente (%) NTC-674, ASTM C-20	20.0 - 24.0
Densidad aparente (g/cm^3) NTC-674, ASTM C-20	2.13 - 2.23
Resistencia a la comprensión en frio MPa (kg/cm^2) NTC-682, ASTM C-133	25.0 - 37.0 (250 - 370)
Módulo de ruptura en frio. MPa (kg/cm) NTC-688, ASTM C-133	7.5 - 13.5 (75 - 135)
Cambio lineal permanente a 1600 °C (%) NTC- 688 , ASTM C-113	0.5C - 2.0C
Deformación baja carga en caliente a 1450 °C (%) NTC-1107, ASTM C-16	2.0 - 3.5

ANEXO B

Propiedades del mortero

SUPERAEROFRAX	
Clasificación NTC -765, NTC – 851	Super refractario
Tipo de Mortero	Húmedo de fraguado al aire
Análisis Químico (%)	
Al_2O_3	43.0
SiO_2	50.3
Fe_2O_3	1.8
TiO_2	2.1
CaO	0.2
MgO	0.3
Alcalis	2.0
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	32 ½
Temperatura equivalente (℃) NTC - 706, ASTM C-24	1724
Refractariedad, el mortero no fluye de la junta a ℃ NTC -861, ASTM C -199	1600
Máximo tamaño de grano mm	0.6
Agua de preparación ml/kg mortero	
para aplicar con palustre	como se entrega
para aplicar por inmersión	60
kg de mortero requerido para pegar 1000 ladrillos de 9 * 4 1/2 * 2 1/2"	
con palustre	180
por inmersión	160
Presentación	Tambores de 35 kg

ANEXO C

Propiedades del concrax 1500

CONCRAX 1500			
Clasificación NTC -814, ASTM C -401	Clase D		
Análisis Químico (%)			
Al_2O_3	49.5		
SiO_2	39.0		
Fe_2O_3	1.3		
TiO_2	2.0		
CaO	7.5		
MgO	0.3		
Alcalis	0.4		
Cono Pirométrico Equivalente (PCE)	32		
Temperatura equivalente (℃) NTC - 706, ASTM C-24	1717		
Máxima temperatura de servicio recomendada ℃	1540		
Máximo tamaño de grano mm	5		
Material seco requerido por metro cúbico kg	2000 - 2100		
Agua de preparación cm3 de agua/kg de material seco NTC -988, ASTM C -860	120 - 135		
Densidad volumétrica ℃ - g/cm^3 ASTM C -134	110	2.00 - 2.10	
	1000	1.80 - 1.85	
	1260	1.85 - 1.90	
	1370	1.85 - 1.90	
	1480	1.95 - 2.00	
Módulo de ruptura en frio ℃ - MPa (kg/cm^2) NTC -988, ASTM C -133	110	5.0 - 8.0	(50 - 80)
	1000	1.5 - 2.5	(15 - 25)
	1260	4.0 - 6.0	(40 - 60)
	1370	12.0 - 14.0	(120 - 140)
	1480	14.0 - 15.0	(140 - 150)