



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HORNO
BASCULANTE MANUAL PARA LA FUNDICION DE
MATERIALES NO FERROSOS DE CAPACIDAD DE HASTA
150 KG. PARA EL LABORATORIO DE CIENCIAS DE
MATERIALES DE LA ESCUELA POLITECNICA DEL
EJÉRCITO.**

**AUTORES: BONE MALDONADO JORGE ANDRES
CRESPO ALVEAR DAVID RAMIRO**

**DIRECTOR: ING. GABRIEL OROZCO
CODIRECTOR: ING. PATRICIO QUEZADA**

SANGOLQUI

2015

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HORNO BASCULANTE MANUAL PARA LA FUNDICION DE MATERIALES NO FERROSOS DE CAPACIDAD DE HASTA 150 KG. PARA EL LABORATORIO DE CIENCIAS DE MATERIALES DE LA ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO." fue realizado en su totalidad por Jorge Andrés Bone Maldonado y David Ramiro Crespo Alvear, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.



Ing. Gabriel Orozco

DIRECTOR



Ing. Patricio Quezada

CODIRECTOR

Sangolquí, 2015-05-05

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Jorge Andrés Bone Maldonado con cédula de ciudadanía N° 1716399793 y David Ramiro Crespo Alvear con cédula de ciudadanía N° 1715925507, certifico que el tema de tesis "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HORNO BASCULANTE MANUAL PARA LA FUNDICION DE MATERIALES NO FERROSOS DE CAPACIDAD DE HASTA 150 KG. PARA EL LABORATORIO DE CIENCIAS DE MATERIALES DE LA ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO." Es de nuestra autoría.



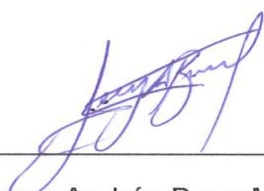
Sr. Jorge Andrés Bone Maldonado



Sr. David Ramiro Crespo Alvear

AUTORIZACIÓN

Nosotros, Jorge Andrés Bone Maldonado con cédula de ciudadanía N° 1716399793 y David Ramiro Crespo Alvear con cédula de ciudadanía N° 1715925507, autorizamos a la biblioteca virtual de la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS para que publique nuestro tema de tesis "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HORNO BASCULANTE MANUAL PARA LA FUNDICION DE MATERIALES NO FERROSOS DE CAPACIDAD DE HASTA 150 KG. PARA EL LABORATORIO DE CIENCIAS DE MATERIALES DE LA ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO."



Sr. Jorge Andrés Bone Maldonado



Sr. David Ramiro Crespo Alvear

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis en primer lugar a nuestros padres quienes han sido un apoyo fundamental en nuestras vidas, inculcándonos valores y principios que me nos han convertido en los hombres que somos.

A nuestros familiares que no están en vida que han servido de inspiración este proyecto es para ellos este logro es una muestra más que viven en nosotros

A nuestros hermanos por sus consejos y por siempre estar presente cuando los necesitamos.

A nuestras parejas que nos brindaron apoyo y comprensión durante todo este proceso.

A nuestros amigos por su apoyo durante el tiempo que he realizado esta tesis.

A nuestros profesores quienes nunca desistieron en enseñarnos y nos guiaron por la vía correcta.

A todos los que nos apoyaron para culminar con nuestra tesis.

Para todos ellos está dedicada esta tesis.

David y Jorge

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por siempre brindarme su apoyo incondicional. Por todo su tiempo y consejos que nos ayudaron a lograr esta meta que nos planteamos hace varios años.

A nuestras parejas que motivaron este proyecto para previo a obtener el título de Ingeniero Mecánico

A nuestros profesores por tener la paciencia y guiarnos para la realización de este tema, a nuestros amigos por ser siempre un soporte y una fuente de consejos.

A todos ellos les debemos nuestros agradecimientos.

Gracias.

David y Jorge

INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	xviii
ABSTRAC.....	xix
INDICE DE FIGURAS.....	xiv
INDICE DE TABLAS	xvi
CAPITULO I.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	3
CAPITULO 2.....	4
MARCO TEORICO	4
2.1. Hornos de Fundición.....	4
2.1.1. Hornos usados para la fundición	4
2.1.2. Tipos de hornos de fundición.....	5
2.1.2.1. Convertidores.....	5
2.1.2.2. Cubilotes	6
2.1.2.3. Hornos de reverbero.....	6
2.1.2.4. Hornos rotativos	7
2.1.2.5. Hornos eléctricos.....	8
2.1.2.6. Hornos de crisol	14
2.2. Elementos básicos de un horno de fundición.....	15
2.2.1. Crisol	16
2.2.2. Paredes	16

2.2.3.	Cámara de combustión.....	17
2.2.4.	Mampostería de ladrillos.....	17
2.2.5.	Estructura	17
2.3.	Hornos basculantes	17
2.4.	Características	18
2.5.	Selección de materiales	19
2.5.1.	Crisol	20
2.5.2.	Ladrillo refractario	22
2.5.3.	Cemento refractario	23
2.5.4.	Mortero refractario	24
2.5.5.	Chapa metálica.....	24
2.5.6.	Fibra de Vidrio	24
2.5.7.	Ladrillo aislante.....	25
2.6.	Sistema de calentamiento.....	25
2.6.1.	Cantidad de Calor.....	25
2.6.2.	Tipos de calentamiento.....	26
2.6.3.	Calentamiento por Combustible.....	27
2.6.4.	Calentamiento eléctrico	28
2.6.5.	Tabla del poder calórico de algunos elementos	28
2.7.	Determinación de combustible.....	29
2.7.1.	Combustión	29
2.7.2.	Comburente	29
2.7.3.	Combustible.....	29
2.7.4.	Clasificación de los combustibles	30
2.7.4.1.	Sólidos.....	30
2.7.4.2.	Líquidos.....	30
2.7.4.3.	Gaseosos	30
2.7.5.	Tipo de Combustión.....	30
2.7.5.1.	Completa o perfecta	30
2.7.5.2.	Estequiometría o Teórica.....	31
2.7.5.3.	Incompleta.....	31
2.7.6.	Llama.....	31

2.7.6.1.	Clasificación de Llama.....	32
2.7.6.2.	Condiciones para que se produzca llama.....	32
2.7.6.3.	La temperatura de ignición	33
2.7.6.4.	La inflamabilidad	33
2.8.	Selección del combustible.....	34
2.8.1.	Diesel (gasóleo).....	35
2.9.	Demanda y consumo de energía	36
2.10.	Influencia del medio ambiente y condiciones idóneas de funcionamiento	37
3.	CAPÍTULO 3.	38
	DISEÑO.....	38
3.1.	Diseño térmico	38
3.1.1.	Análisis de variables	38
3.1.2.	Determinación de medidas	40
3.1.2.1.	Dimensionamiento de la cámara de combustión.....	40
3.1.2.2.	Dimensionamiento del diámetro interior del horno	46
3.1.2.3.	Dimensionamiento del diámetro exterior del horno	47
3.1.2.4.	Dimensionamiento de la altura del horno	48
3.1.3.	Cálculo de consumo de energía	49
3.1.3.1.	Balance de masa.....	50
3.1.3.2.	Balance de energía	50
3.1.3.3.	Cálculo del calor útil	51
3.1.4.	Cálculo de pérdidas de energía	55
3.1.4.1.	Conceptos básicos	55
3.1.4.2.	Cálculo de temperatura de película paredes del crisol.....	64
3.1.4.3.	Cálculo de temperatura de película paredes interiores del horno	65
3.1.4.4.	Cálculo de temperatura de película paredes exteriores del horno	66
3.1.5.	Cálculo de coeficientes de transferencia de calor.....	67
3.1.5.1.	Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de las paredes del crisol	67

3.1.5.2.	Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de las paredes interiores del horno.....	69
3.1.5.3.	Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared exterior del horno.....	70
3.1.5.4.	Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de la tapa inferior del horno base.	73
3.1.5.5.	Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de la tapa superior del horno.	75
3.1.6.	Cálculo de pérdidas de calor	77
3.1.6.1.	Pérdidas de calor en las paredes del crisol	77
3.1.6.2.	Pérdidas de calor en las paredes internas del horno	78
3.1.6.3.	Pérdidas de calor en las paredes externas del horno	80
3.1.6.4.	Pérdidas de calor en la base del horno	81
3.1.6.5.	Pérdidas de calor en la tapa del horno	84
3.1.6.6.	Pérdida total de energía del horno	86
3.1.6.7.	Balance de energía	86
3.1.7.	Cálculo de la eficiencia del horno	86
3.1.8.	Cálculo de cantidad de combustible	87
3.1.9.	Cálculo de diámetro de la boquilla del quemador	88
3.1.10.	Cálculo de la cantidad de aire para la combustión	89
3.2.	Diseño mecánico	91
3.2.1.	Tabla de Pesos.....	92
3.2.2.	Diagramas de cuerpo libre.....	93
3.2.3.	Diseño de eje 1	95
3.2.3.1.	Diseño de tensión por esfuerzo de corte:	95
3.2.3.2.	Diseño bajo cizallamiento:.....	96
3.2.3.3.	Diseño por aplastamiento:.....	98
3.2.3.4.	Diseño por flexión:.....	99
3.2.3.5.	Selección de rodamientos	101
3.2.3.6.	Dimensionamiento de la soldadura que une al eje con el cuerpo del horno	102
3.2.4.	Diseño de eje 2.....	103
3.2.4.1.	Diseño de tensión por esfuerzo de corte:	107

3.2.4.2.	Diseño bajo cizallamiento:.....	108
3.2.4.3.	Diseño por aplastamiento:.....	109
3.2.4.4.	Diseño por flexión:.....	111
3.2.4.5.	Selección de rodamientos	112
3.2.4.6.	Dimensionamiento de la soldadura que une el eje al cuerpo del horno	113
3.2.5.	Diseño de eje 3.....	115
3.2.5.1.	Diseño de tensión por esfuerzo de corte:	116
3.2.5.2.	Diseño bajo cizallamiento:.....	117
3.2.5.3.	Diseño por aplastamiento:.....	118
3.2.5.4.	Diseño por flexión:.....	120
3.2.5.5.	Selección de rodamientos	122
3.2.6.	Diseño de engranes.....	122
3.2.7.	TENSIONES EN LOS DIENTES DE LOS ENGRANES	126
3.2.8.	Diseño por contacto (corrosión).....	129
3.2.9.	Calculo de altura de ejes en el horno	131
3.2.10.	Diseño del bastidor	134
3.2.11.	Simulación del bastidor.....	135
	Resultados	135
4.	CAPITULO IV	140
	IMPLEMENTACIÓN MONTAJE Y PRUEBAS	140
4.1.	Implementación.....	140
4.1.1.	Diseño del proceso constructivo	140
4.1.2.	Diagramas de procesos.....	140
4.1.2.1.	Diagrama de procesos del horno	140
4.1.2.2.	Diagrama de procesos del sistema basculante	140
4.1.3.	Hoja de procesos.....	141
4.1.3.1.	Hoja de procesos del horno.....	141
4.1.3.2.	Hoja de procesos del sistema basculante	141
4.1.4.	Recursos de fabricación	141
4.1.5.	Materiales	141
4.1.6.	Materiales del Horno.....	141

4.1.7.	Materiales del sistema basculante.....	142
4.1.8.	Mano de obra.....	142
4.1.9.	Equipos y herramientas utilizados en la construcción y pruebas...143	
4.1.9.1.	Horno.....	143
4.1.9.2.	Sistema basculante	143
4.2.	Montaje	144
4.2.1.	Componentes	144
4.2.1.1.	Componentes de Horno	145
4.2.1.2.	Componentes de sistema basculante.....	148
4.3.	Pruebas y resultados	150
4.3.1.	Tablas de datos	150
4.3.2.	Curvas y diagramas de resultados	154
4.3.3.	Análisis de resultados de pruebas térmicas	155
4.3.4.	Manual de usuario y mantenimiento	157
4.3.5.	Guía de práctica de laboratorio.....	157
4.3.6.	Planos constructivos.....	157
5.	CAPITULO IV	158
	ANALISIS ECONOMICO-FINANCIERO	158
5.1.	Estudio de alternativas para diseño del equipo.....	158
5.2.	Análisis económico	159
5.2.1.	Costos directos.....	159
5.2.1.1.	Diseño e ingeniería.....	160
5.2.1.2.	Materiales y elementos de construcción.....	160
5.2.2.	Construcción, montaje y validación	161
5.2.2.1.	Mano de obra	161
5.2.2.2.	Puesta a punto y operación.....	161
5.2.2.3.	Pruebas de validación	161
5.2.2.4.	Materiales de operación	161
5.2.3.	Gastos generales.....	162
5.2.3.1.	Opción A.....	162
5.2.3.2.	Opción B.....	163
5.2.3.3.	Opción C	163

5.2.4. Numero de servicios prestados al año estimados	164
5.2.5. Determinación de costos	164
5.2.5.1. Costos de operación.....	164
5.2.5.2. Costos generales.....	165
5.2.5.3. Valor del equipo anual.....	165
6. CAPITULO VI.....	166
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	166
6.1. Conclusiones	166
6.2. Recomendaciones	168
7. CAPITULO VII.....	169
BIBLIOGRAFIA Y ANEXOS.....	169
7.1. Bibliografía.....	169

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Horno Convertidor	5
Figura 2. Horno de Cubilote.....	6
Figura 3. Horno de Reverbero	7
Figura 4. Horno Rotativo.....	8
Figura 5. Horno Eléctrico de Arco.....	10
Figura 6. Horno Eléctrico de Inducción.....	11
Figura 7. Esquema de Horno Basculante y sus partes.....	16
Figura 8. Horno Basculante	19
Figura 9. Catálogo de Crisoles	21
Figura 10. Contenido calórico de los metales a diferentes temperaturas	43
Figura 11. Diagrama de cuerpo libre	93
Figura 12. Esfuerzos en el Eje 1	94
Figura 13. Diseño de esfuerzos de corte	95
Figura 14. Diseño por aplastamiento en el eje.....	98
Figura 15. Flexión del eje.....	99
Figura 16. Selección de rodamientos	101
Figura 17. Dimensionamiento de soldadura en Eje	102
Figura 18. Triangulo de Pitágoras.....	103
Figura 19. Fuerzas en Engranés	104
Figura 20. DCL de fuerzas en el Eje 2.....	106
Figura 21. Calculo del momento flector máximo.....	111
Figura 22. Diagrama de cuerpo libre	115
Figura 23. Calculo del momento flector máximo.....	120
Figura 24. Tren de engranes	123
Figura 25. Perfiles Estructurales.....	133
Figura 26. Esquema Bastidor	134
Figura 27. Tensión de Von Mises	137
Figura 28. Primera Tensión principal	137
Figura 29. Tercera tensión principal	138
Figura 30. Desplazamiento	138

Figura 31. Coeficiente de seguridad	139
Figura 32. Presión de contacto Y.....	139
Figura 33. Tanque de Acero	145
Figura 34. Colocación de fibra de vidrio al interior del tanque	145
Figura 35. Colocación de ladrillo refractario y aislante en base y paredes del horno	145
Figura 36. Colocación de base de crisol	146
Figura 37. Colocación de tubo de 5" ingreso de quemador	146
Figura 38. Colocación y nivelación de crisol.....	146
Figura 39. Colocación y cierre de horno con ladrillos refractario	147
Figura 40. Colocación de chimenea	147
Figura 41. Colocación de chimenea	147
Figura 42. Estructura tubo cuadrado	148
Figura 43. Chumaceras	148
Figura 44. Engranés	149
Figura 45. Parante de sujeción a cuerpo de horno perfil C.....	149
Figura 46. Esquema de horno vista frontal	150
Figura 47. Esquema de horno vista superior	152
Figura 48. Curvas de temperaturas en paredes del horno vs. Tiempo	154
Figura 49. Curvas de temperaturas en la tapa del horno vs. Tiempo	155

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Tabla de propiedades de los metales	26
Tabla 2	Tabla de poder calórico de algunos elementos	28
Tabla 3	Tabla de Temperaturas de ignición de combustibles	33
Tabla 4	Tabla de comparación de alternativas de combustibles	35
Tabla 5	Parámetros de Diseño	39
Tabla 6	Tabla de contenido calórico del cobre y aluminio	44
Tabla 7	Tabla condición de combustión de los hornos	45
Tabla 8	Tabla de conductividad térmica de los materiales	56
Tabla 9	Resumen pesos de materiales utilizados.....	92
Tabla 10	Fuerzas y Pares de Reacción en Restricciones.....	135
Tabla 11	Resumen de Resultados.....	135
Tabla 12	Temperaturas de las paredes del horno vs. Tiempo	151
Tabla 13	Temperatura de diferentes puntos en la tapa del horno	153
Tabla 14	Listado de alternativas de Materiales del Horno	158
Tabla 15	Criterios de selección vs. Escala de valoración - Materiales del Horno	158
Tabla 16	Matriz de selección de Materiales del Horno	159
Tabla 17	Costos de diseño e ingeniería.....	160
Tabla 18	Costo de materiales y elementos de construcción.....	160
Tabla 19	Costos de mano de obra.....	161
Tabla 20	Costos de puesta a punto y operación.....	161
Tabla 21	Costos de pruebas de validación	161
Tabla 22	Costos de materiales de operación.....	162
Tabla 23	Gastos Generales	162
Tabla 24	Opción A	162
Tabla 25	Opción B	163
Tabla 26	Opción C	163
Tabla 27	Número de servicios prestados al año estimado	164
Tabla 28	Costos de operación	164

Tabla 29 Costos Generales	165
Tabla 30 Valor del equipo anual	165

RESUMEN

Diseñar y Construir un horno basculante manual de 150 Kg. De materiales no ferrosos, el cual será utilizado de manera didáctica por los estudiantes de la universidad de las fuerzas armadas en especial por los estudiantes del departamento de la energía y mecánica que estará ubicado en el laboratorio de ciencias de los materiales. Esta investigación se realizó utilizando el método inductivo y el método deductivo para obtener un equipo que por su estructura y diseño permite realizar un proceso de fundición óptimo y eficaz. Además fue necesario utilizar el método experimental que proporcionó datos en tiempo real, para modificar variables y corregir errores. La investigación no está basada en un solo método y busca que la parte teórica no pierda su sentido. En la construcción del horno se emplearon materiales como: crisol de grafito, ladrillo refractario, acero A36. En el Horno se puede notar que la temperatura de la chapa metálica es de 29.66 C. Se concluye esta investigación diseñando y construyendo un horno basculante manual de 150 Kg para materiales no ferrosos, utilizando los materiales adecuados y con las medidas y condiciones establecidas en los cálculos, el cual funciona perfectamente. Se recomienda ubicar el horno en un lugar apropiado para garantizar una adecuada evacuación de los gases generados por el proceso de combustión del horno, que el equipo sea utilizado y explotado al máximo por los estudiantes de la universidad de las fuerzas armadas, la manipulación debe realizarse utilizando equipo de protección y con mucho cuidado para evitar accidentes.

PALABRAS CLAVE:

- **HORNO DE FUNDICION.**
- **DISEÑO.**
- **CONSTRUCCION.**
- **MATERIALES NO FERROSOS.**
- **BASCULANTE.**

ABSTRAC

Design and Build a manual tilting furnace 150 Kg. In nonferrous materials, which will be used didactically by students of the University of the armed forces in particular by students of the department of energy and mechanics that will be located in the science lab materials. This research was conducted using the inductive method and deductive method for a computer by its structure and design allows an optimal and efficient process foundry. It was also necessary to use the experimental method to provide data in real time to change variables and correct errors. The research is not based on a single method and the theoretical part seeks to not lose its meaning and then experimentally verify the process of casting non-ferrous materials, the heating time, the amount of fuel and heat transfer. Graphite crucible, refractory brick, A36: in building materials such as oven were employed. In the oven it can be noted that the temperature of the metal sheet is 29.66 C. This investigation is concluded designing and building a manual tilting furnace of 150 kg for non-ferrous materials, using appropriate materials and measures and conditions of calculations, which works perfectly. It is recommended to place the oven in an appropriate location to ensure proper evacuation of the gases generated by the combustion process of the oven, that the equipment is used and exploited to the full by the students of the University of the armed forces, the work must be performed using protective equipment and carefully to avoid accidents

KEY WORDS:

- **FURNACE**
- **DESIGN.**
- **CONSTRUCTION.**
- **NONFERROUS MATERIALS.**
- **TILTING.**

CAPITULO I

1.1 ANTECEDENTES

El tema del proyecto responde a la necesidad de dar soluciones a los problemas en el momento de la obtención de piezas metálicas para la construcción de máquinas. Estas constituyen en la mayoría de los casos la parte preponderante de ellas, ya que el procedimiento de la fundición permite obtener fácil y económicamente piezas de diversas formas y tamaños. Utilizar de modo conveniente algunos metales y aleaciones cuyas características particulares no los hacen aptos para otros procesos.

Debido al crecimiento del cuerpo estudiantil de las carreras de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Mecatrónica que utilizan el laboratorio de ciencia de los materiales, basándonos en un estudio con un estimado de 200 estudiantes por semestre que cursan las materias de Tecnología de los materiales ciencia de los materiales I y II que se pueden beneficiar con la implementación de un horno basculante manual para la fundición de materiales no ferrosos de una capacidad de hasta 150 kg.

En la actualidad, los laboratorios de Ciencias de materiales del departamento de Energía y Mecánica no tiene a su disposición hornos de fundición de materiales no ferrosos, por lo cual se ve la necesidad de implementar un horno basculante manual de capacidad de hasta 150 kg para desarrollar prácticas de fundición de materiales no ferrosos como son las aleaciones de aluminio y las aleaciones de cobre, entre otras.

Es por eso que los estudiantes que han culminado su pensum académico ven la necesidad de contribuir en el avance tecnológico de sus laboratorios implementando equipos experimentales que permitan una formación integral, de esta manera se procura brindar a la sociedad profesionales altamente capacitados en lo científico y tecnológico en el área de fundición.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

"DISEÑAR Y CONSTRUIR UN HORNO BASCULANTE MANUAL PARA LA FUNDICION DE MATERIALES NO FERROSOS DE CAPACIDAD DE HASTA 150 KG QUE FORTALEZCA EL PROCESO DE APRENDIZAJE DE LOS ESTUDIANTES Y LA COMUNIDAD QUE HACE USO DEL LABORATORIO DE CIENCIAS DE MATERIALES DE LA ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO."

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las variables de proceso que involucran la fundición de materiales no ferrosos.
- Determinar la fuente de energía que alimentara al horno
- Construir y ensamblar el horno de fundición de materiales no ferrosos de acuerdo al dimensionamiento determinado por los cálculos de ingeniería, en base a las variables de proceso identificadas.
- Implementar el horno de fundición de materiales no ferrosos en el laboratorio de ciencias de los materiales
- Realizar pruebas de eficiencia y de potencia del horno basculante para lograr una fundición homogénea
- Elaborar guías de prácticas de laboratorio, un manual de funcionamiento, mantenimiento y seguridad del horno de fundición de materiales no ferrosos para el adecuado uso por parte de los estudiantes que utilizan el laboratorio de ciencia de los materiales.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Como estudiantes de la Universidad de las fuerzas armadas de la Carrera de Energía Mecánica con el conocimiento sobre la importancia que implica la aplicación de un equipo de fundición de materiales no ferrosos que facilite la comprobación de manera práctica la tecnología de fundición, se ve la necesidad de realizar este proyecto de un horno basculante manual para la fundición de materiales no ferrosos de capacidad de hasta 150 kg debido que el laboratorio de ciencia de los materiales no cuenta con horno de estas características para ser utilizado como referencia para procesos a nivel industrial.

Mediante el presente proyecto a desarrollarse lo que se pretende es satisfacer la necesidad de un horno de mayor capacidad para realizar prácticas de laboratorio, y de esta manera afianzar los conocimientos adquiridos teóricamente y a su vez, servirá también para el desarrollo de proyectos de investigación de los alumnos del departamento y de la Universidad de las fuerzas armadas en general.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

La trascendencia de este proyecto radica en permitir a los alumnos de la Universidad de las fuerzas armadas utilizar un horno basculante manual para materiales no ferrosos y con los parámetros determinados. El diseño del horno basculante manual tendrá como capacidad hasta 150 kg para materiales no ferrosos con una temperatura máxima de 1200 °C.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1. Hornos de Fundición

Un horno de fundición es una maquina usada para obtener metales a partir de minerales y/o reprocessar metales de piezas de desechos conocidos como chatarras. Un horno de fundición rudimentario también puede usarse para procesar hierro, bronce, aluminio o acero. Aunque el horno de fundición lleve más recursos y tiempo para construir que su contraparte primitiva, procesa los recursos de forma más eficiente, siendo necesarios menos recursos para procesar la misma cantidad de metal.

2.1.1. Hornos usados para la fundición

Los hornos que se usan para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y tamaño, varían desde los pequeños hornos de crisol de unos cuantos kilogramos de metal a hornos de hogar abierto hasta 200 toneladas de capacidad. El tipo de horno usado para un proceso de fundición queda determinado por los siguientes factores:

- La necesidad de fundir el tipo de material base o su aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a la temperatura de vaciado requerida.
- La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición.
- La cantidad de metal que se necesita que el horno funda.
- El costo de operación del horno

2.1.2. Tipos de hornos de fundición

Los hornos industriales son equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente con el objeto de fundir metales.

Los hay de diferentes tipos; convertidores de cubilote, de reverbero, rotativos, de crisol, eléctricos de inducción, eléctricos de resistencia, eléctricos de arco, basculantes, entre otros.

2.1.2.1. Convertidores.

Todos los convertidores son variantes del primer invento de Bessemer, basado en la idea de soplar oxígeno a través del arrabio líquido para oxidar las impurezas tales como el carbono, silicio y manganeso, cuya combustión suministra el calor suficiente para la conversión del arrabio líquido en acero.

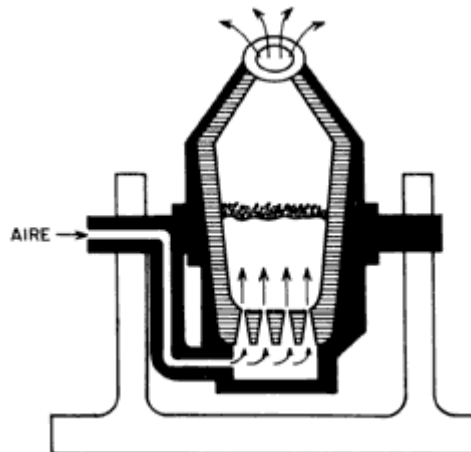


Figura 1. Horno Convertidor

Fuente: (Canek, 2007)

2.1.2.2. Cubilotes

Los cubilotes son hornos cilíndricos verticales compuestos de una envoltura de chapa de acero dulce de 5 a 12 mm. de espesor, con un revestimiento interior de mampostería refractaria de unos 300mm. de espesor. El horno descansa sobre cuatro columnas metálicas denominadas pies de sostén del cubilote.

El cubilote consiste en una cubierta cilíndrica de acero que reposa verticalmente sobre una placa base sostenida usualmente por 4 columnas de acero y se pueden abrir por el fondo, llevan compuertas centradas en la placa base que pueden abrirse hacia abajo después de un ciclo de funcionamiento para vaciar todos los residuos acumulados

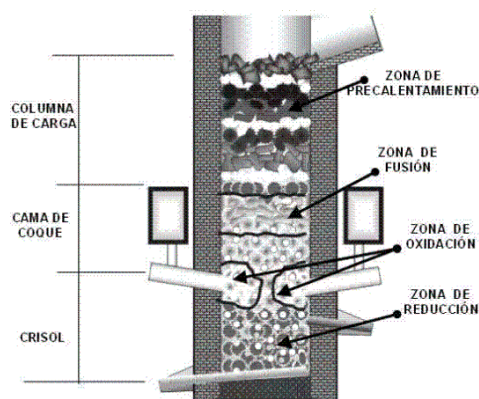


Figura 2. Horno de Cubilote

Fuente: (Ricardo Ariztizabal Sierra, Hector Daniel Mejia, Claudia Silva, Diego Alfonso Pinedaa, Marcelo Rojas, 2005)

2.1.2.3. Hornos de reverbero

Los hornos de reverbero se utilizan para la fundición de piezas desde pequeñas hasta de grandes dimensiones, de preferencia metales no ferrosos, como cobre, latón, bronce y aluminio.

Los hornos de reverbero son de poca altura y gran longitud. En uno de los extremos se encuentra el hogar donde se quema el combustible, y en el extremo opuesto la chimenea. Las llamas y productos de la combustión atraviesan el horno y son dirigidos, por la bóveda de forma adecuada hacia la solera del horno, donde está situada la carga del metal que se desea fundir. Esta carga se calienta, no solo por su contacto con las llamas y gases calientes sino también por el calor de radiación de la bóveda del horno de reverbero.

Aproximadamente, la superficie de la solera es unas tres veces mayor que la de la parrilla y sus dimensiones oscilan entre un ancho de 150 a 300cm. y una longitud de 450 a 1500cm. La capacidad de los hornos de reverbero es muy variable y oscila entre los 45 Kg. a los 10000 Kg. Que se emplean para la fusión de metales no ferrosos y hasta las 80 Tm. que se emplean para la fusión de hierro.

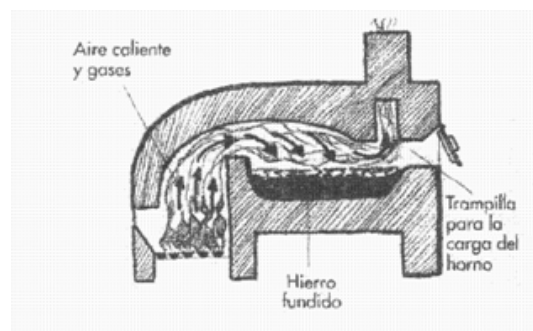


Figura 3. Horno de Reverbero

Fuente: (Gauto)

2.1.2.4. Hornos rotativos

Se emplean para fundir toda clase de metales y aleaciones no ferrosas, como cobre, bronce, latón, aluminio.

Los hornos rotativos están formados por una envoltura cilíndrica de acero, de eje sensiblemente horizontal, que termina con dos troncos de cono, uno en cada extremo. En uno de los extremos está situado el quemador y en el otro la salida de los gases quemados, que generalmente pasan por un sistema de recuperación de calor para precalentar el aire de soplado antes de ser evacuados por la chimenea. Todo el interior del horno está revestido con un material refractario. El combustible puede ser diesel o carbón pulverizado.

Los hornos rotativos se han considerado como hornos de reverbero perfeccionados, ya que además de calentarse la carga por el contacto de las llamas y gases de combustión; por la radiación de la bóveda caliente, se calienta también por el contacto directo con la parte superior del horno, que al girar queda bajo la carga. Con esto se consigue un notable acortamiento del tiempo de fusión, pues se logra evitar el efecto aislante de la capa de escorias, que flota sobre el baño, que en los hornos de reverbero ordinarios dificulta el calentamiento de la masa del metal.

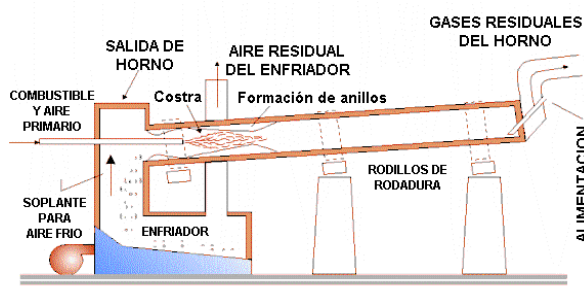


Figura 4. Horno Rotativo

Fuente: (Castillo)

2.1.2.5. Hornos eléctricos

Los hornos eléctricos tienen grandes ventajas para la fusión de los metales, siendo las más destacadas las siguientes:

- Pueden obtenerse temperaturas muy elevadas hasta de 1900°C en algunos tipos de hornos eléctricos.
- Puede controlarse la velocidad de elevación de temperatura, y mantener esta entre límites muy precisos, con regulaciones completamente automáticas.
- La carga queda por completo libre de contaminación por el gas combustible, ya que no se los emplean combustibles.
- Puede controlarse perfectamente la atmósfera en contacto con la masa fundida, haciéndola oxidante o reductora a voluntad.
- Tienen mayor duración los revestimientos que en los demás tipos de hornos.
- Se instalan en espacio relativamente reducido.
- Su operación se realiza con mayor limpieza que la de otros tipos de hornos.

Hornos eléctricos de arco

Se emplean para la fusión de acero, aleaciones de acero níquel, etc. Formados por una cuba de chapa de acero revestida de material refractario, provista de electrodos de grafito o de carbón amorfo.

Los electrodos de carbón amorfo se forman en un horno, llenando las camisas que llevan los porta electrodos de una mezcla formada por antracita, cok metalúrgico, cok de petróleo y grafito amasados con alquitrán.

El cierre de estos hornos se trata que sea hermético, logrando la estanqueidad de los orificios de paso, por medio de cilindros refrigerados por camisas de agua, que prolongan además la vida de los electrodos. Los hornos modernos trabajan a tensiones comprendidas entre los 440 y 1760 voltios, obteniéndose dentro de cada tensión la regulación de la intensidad y, por tanto, de la potencia del horno, por el alejamiento o acercamiento de los electrodos al baño, lo que se realiza automáticamente. Casi todos los hornos de este tipo son basculantes para facilitar la colada. Los más modernos

llevan un sistema de agitación electromagnética del baño por medio de una bobina montada bajo la solera del horno.

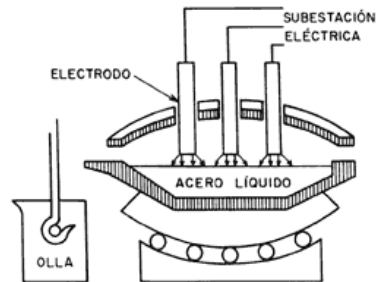


Figura 5. Horno Eléctrico de Arco

Fuente: (Gomez, 1997)

Hornos eléctricos de inducción

En los hornos eléctricos de inducción, el calor se genera por corrientes inducidas por una corriente alterna.

Características del horno de inducción

Los hornos eléctricos de inducción se emplean cada día más para la fusión de metales, pues tienen las siguientes cualidades:

- Su rendimiento es muy elevado, por generarse calor únicamente en la masa metálica a fundir.
- Las corrientes electromagnéticas que circulan por el metal producen movimientos en la masa fundida, que uniformizan su composición.
- La temperatura puede regularse con gran precisión.
- Las pérdidas por volatilización y oxidación son muy reducidas.

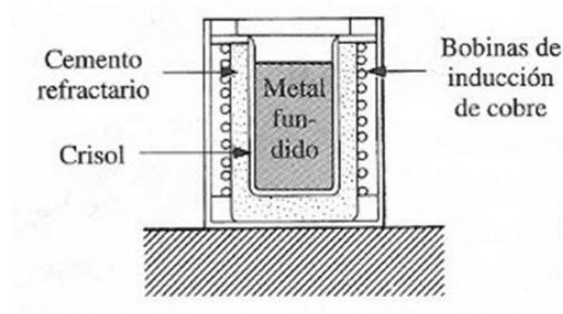


Figura 6. Horno Eléctrico de Inducción

Fuente: (Mecatronica)

Se distinguen tres clases de hornos de inducción:

Hornos de baja frecuencia.

En estos hornos el calor se produce por el efecto joule de la corriente inducida en el metal que se trata de fundir, que actúa como arrollamiento secundario de un transformador. Los primeros modelos estaban formados por un crisol en forma de anillo que constituía la espira del secundario de un transformador, cuyo primario estaba conectado a la red.

Otro tipo de horno de inducción está formado por un crisol cuyo fondo está en comunicación con un conducto circular, que forma la espira secundaria del transformador de inducción. El metal contenido en el conducto es el que se funde, desplazándose su masa y comunicando el calor al resto del material.

Hornos de alta frecuencia.

En los hornos de alta frecuencia el calor lo producen las corrientes de Foucault, ordinariamente consideradas como parásitas, inducidas en el metal, que actúa como núcleo de un solenoide o arrollamiento primario. Estos hornos están formados por un crisol refractario que contiene el metal, rodeado de un enrollamiento de tubo de cobre por el que circula una corriente de alta frecuencia, que crea un campo magnético variable, calentándose la masa de metal contenida en el crisol por las corrientes de Foucault inducidas por el campo magnético. El tubo de cobre del arrollamiento que rodea el crisol está refrigerado por agua que circula en su interior. En general las frecuencias de las corrientes eléctricas para la alimentación de este tipo de hornos, varía de 300 a 30000 ciclos por segundo, producidas por osciladores de tubos catódicos. La potencia del horno y por tanto, la temperatura, se regula variando la frecuencia. Los hornos eléctricos de alta frecuencia tienen la ventaja de que en ellos puede fundirse cualquier metal o aleación en las condiciones más rigurosas, en atmósferas especiales o al vacío, ya que los hornos pueden trabajar herméticamente cerrados. Tienen el inconveniente de su elevado coste de instalación, que todavía encarece más la necesidad de instalar condensadores para mejorar el factor de potencia que es muy bajo.

Hornos eléctricos por resistencias

En los hornos eléctricos de resistencia, el calor está producido por el efecto Joule al circular una corriente eléctrica por una resistencia. Se fabrican dos clases de hornos de este tipo para fusión de metales, que son los siguientes:

Hornos eléctricos de crisol

Estos hornos están formados por un crisol rodeado por cintas o varillas de aleaciones de níquel-cromo de alta resistividad que se calienta fuertemente al circular por ellas la corriente eléctrica. Estos hornos sólo se emplean para fundir metales y aleaciones de bajo punto de fusión, como las de soldadura, tipos de imprenta, aleaciones antifricción para cojinetes y aleaciones de aluminio.

Hornos eléctricos de reverbero

Son hornos de bajísima capacidad máximos de 5 a 10 Kg, estos se usan para fundir metales preciosos y se los usa más en laboratorios metalúrgicos.

Se construyen actualmente dos clases de hornos, de resistencia metálica y de resistencia de grafito. En los hornos eléctricos de resistencia metálica, se produce el calor al circular la corriente eléctrica por resistencias de aleación níquel-cromo de gran sección, alojadas en la bóveda del horno. Estos hornos se utilizan exclusivamente para aleaciones cuya temperatura de fusión sea inferior a 1000°C.

Los hornos eléctricos de resistencia de grafito, están formados por una envuelta cilíndrica, por cuyo eje horizontal, pasa una barra de grafito, que se calienta al circular por ella la corriente eléctrica. Estos hornos son oscilantes, lo que permite bañar con el metal líquido todo el revestimiento refractario y aprovechar así, directamente, el calor acumulado por este. Los hornos de resistencia de grafito se emplean para la fusión de fundiciones especiales y aleaciones de cobre a temperaturas que pueden llegar hasta los 1250°C.

2.1.2.6. Hornos de crisol

Pueden ser hornos de foso, hornos a nivel del suelo o bien hornos levantados respecto al suelo. El tipo de foso, suele calentarse por coque que se carga alrededor y por encima de los crisoles (que se cierran con una tapa de refractario) para producir la fusión y el sobrecalentamiento con necesidad de cargar más coque. El combustible descansa sobre una parrilla bajo la cual hay un cenicero y foso de cenizas. Estos hornos se emplean también para fabricar hierro al crisol. El tiro puede ser natural o forzado, es decir, producido por una chimenea o mediante un pequeño ventilador que trabaja a presiones de 50 a 75 mmH₂O. El último método es preferible para controlar mejor el calor y la atmósfera del horno. El espacio destinado al coque entre los crisoles y el revestimiento del foso debe ser de por lo menos 150mm, y entre el fondo de los crisoles y las caras de la parrilla suelen haber aproximadamente 180mm. El borde de los crisoles debe quedar debajo de la salida de humos. Las parrillas y todas las entradas de aire deben mantenerse libres de productos sintetizados para que el aire pueda circular libremente a fin de conseguir una combustión completa y una atmósfera ligeramente oxidante.

Los hornos calentados por gas o aceite son más fáciles de controlar y funden más rápidamente que los otros, pero imponen condiciones más duras a los crisoles y los refractarios. Los crisoles son de capacidad variable, pueden contener hasta aproximadamente 500 Kg. de bronce, aunque son más corrientes las capacidades de 45 a 150 Kg.: para latones. Los crisoles grandes exigen algún mecanismo de elevación que permita sacarlos del horno, mientras los más pequeños pueden ser manejados con tenazas por uno o dos hombres. En algunos casos se han usado en estos hornos crisoles de hasta 700 Kg. de capacidad; la ventaja que se les admite es que hay menos perturbaciones y menos salpicaduras del caldo cuando se le transfiere desde la unidad de fusión hasta los moldes.

Hornos de crisol fijo no basculantes

Ya se ha señalado que en estos el crisol está fijo al horno, sus bordes salen fuera de la cámara de caldeo y no hay posibilidad de contacto con los gases de combustión

Como no pueden bascularse para verter el contenido del crisol, es necesario extraer el caldo con una cuchara; son adecuados cuando se necesita tomar pequeñas cantidades de metal a intervalos frecuentes. Pueden emplearse como hornos de espera con la sola misión de mantener el metal en estado líquido, pero también se efectúa en ellos la fusión. Su rendimiento térmico es más bajo para la fusión, sobre todo cuando se trabaja a temperaturas altas, pero representan una verdadera unidad de fusión, de no mucha capacidad, que sirve para una gran variedad de trabajos.

2.2. Elementos básicos de un horno de fundición

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

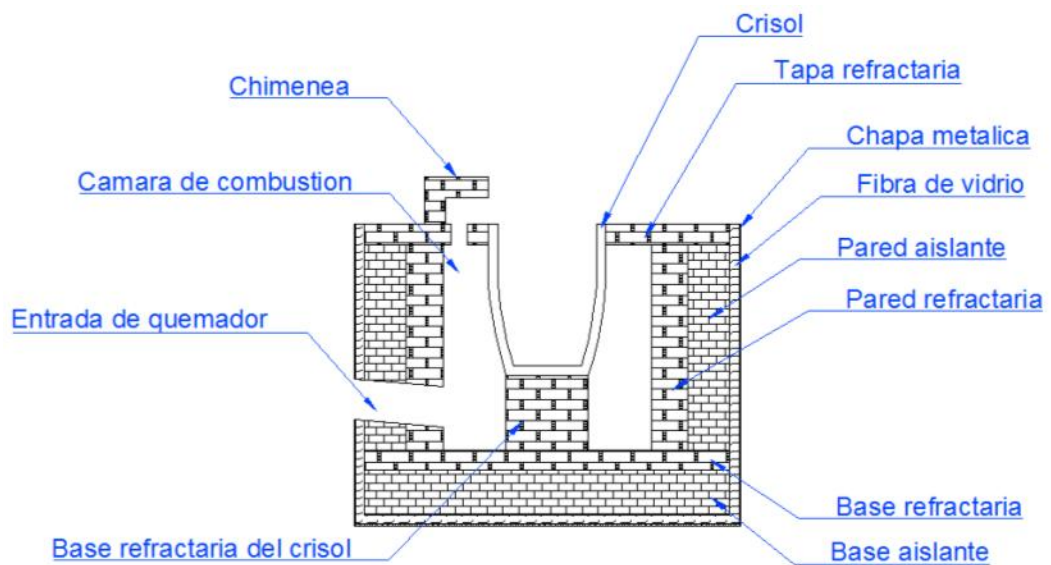


Figura 7. Esquema de Horno Basculante y sus partes

2.2.1. Crisol

Es la parte del horno sobre la cual se dispone el metal a fundirse o los artículos a caldearse. Como soporta la carga del material, debe ser suficientemente sólido, impermeable para el metal líquido, material vítreo y escorias y químicamente estable respecto a estas últimas.

2.2.2. Paredes

Las paredes rodean la zona de trabajo del horno. Generalmente ellas mantienen la bóveda. Deben proteger la zona de la pérdida de calor, no permitir el escape de los gases de hogar ni succión del aire de la atmósfera hacia el interior del horno. La cara más importante de las paredes es la interior. Deben ser pareja, limpia, tener juntas delgadas. Se hacen con ladrillos enteros y sanos.

2.2.3. Cámara de combustión

La cámara de combustión es una de las partes más críticas del horno. Generalmente soporta temperaturas muy altas y se calienta mucho. Para la construcción de la bóveda se necesita cuidado para hermetizarla. Para disminuir las pérdidas de calor en los hornos de bajas temperaturas, alrededor de la bóveda se coloca una capa de material aislante, y se utiliza cemento refractario o mortero refractario de baja conductividad térmica para unirlos.

2.2.4. Mampostería de ladrillos

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

2.2.5. Estructura

Es la que sujeta todas las partes del horno y absorbe los esfuerzos que se originan en la mampostería tanto durante su ejercicio, como posteriormente en los procesos de trabajo. La estructura absorbe estos esfuerzos. Las partes de la estructura se aprovechan también para montar sobre ellas los accesorios del horno.

2.3. Hornos basculantes

Son hornos móviles 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 100 a 700 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 piqueta, con capacidad de 200 a 750 kg de latón, y el modelo moderno es basculado por pistones hidráulicos, otorgando la ventaja de un mayor control en la operación de vaciado.

2.4. Características

Cuando se encienden los hornos de crisol basculantes se calienta el crisol vacío, al principio suavemente, con la menor llama posible que puedan dar los quemadores durante los primeros 10 min. Después se aumenta por etapas la velocidad de calentamiento hasta, que el crisol se ponga al rojo, en cuyo momento se le carga y se pone el quemador al máximo. El tiempo necesario para llevar los crisoles al rojo debe ser de, aproximadamente 30 min. para capacidades de hasta 300 Kg. de latón, 45 min. para 450 a 700 Kg. de latón o 225 Kg. de aluminio y de 75 min para 450 Kg. de aluminio.

Los crisoles deben cargarse con el horno vertical, empleando tenazas suficientemente largas para que puedan llegar al fondo del crisol.

Los hornos de crisol basculante con calentamiento por combustible líquido o gaseoso se caracterizan por un alto rendimiento de fundición. Son extraordinariamente idóneos para la fundición de aluminio y otras aleaciones no ferrosas. El empleo de materiales aislantes de alta calidad repercute en un consumo energético muy bajo. El quemador de dos etapas puede adaptarse tanto para el servicio con gas, como para el servicio con diesel.

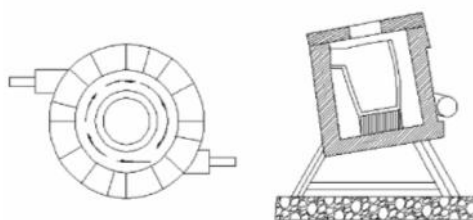


Figura 8. Horno Basculante

Fuente: (Krown)

2.5. Selección de materiales

Para dimensionar el horno se necesita conocer su capacidad volumétrica del material que se va a fundir, por lo tanto se elige entre los materiales que se van a fundir en el horno el menos denso ya que generará mayor volumen líquido:

- Densidad del Aluminio: 2700 Kg/m³
- Densidad del cobre: 8960 Kg/m³
- Densidad del bronce: 8900 Kg/m³

Con los datos anteriores se calcula el volumen que debe tener el crisol para fundir 45 Kg. de material no ferroso, en este caso el aluminio.

$$\text{Volumen} = \frac{\text{masa}}{\text{densidad}}$$

$$V \text{ aluminio} = \frac{45 \text{ Kg.}}{2700 \text{ Kg/m}^3}$$

$$= 0.01666 \text{ m}^3 \longrightarrow 17 \text{ lts.}$$

$$V \text{ cobre} = \frac{45 \text{ Kg.}}{8960 \text{ Kg/m}^3}$$

$$= 0.005 \text{ m}^3 \longrightarrow 5 \text{ lts.}$$

$$V_{\text{bronce}} = \frac{45 \text{ Kg.}}{8900 \text{ Kg/m}^3}$$
$$= 0.005 \text{ m}^3 \longrightarrow 5 \text{ lts.}$$

2.5.1. Crisol

Así se tiene que el crisol debe tener una capacidad máxima de 17 litros o 150 kg de cobre con este dato se puede tener las dimensiones del mismo según el catálogo de Salamander grafinox por disponibilidad en el mercado:

Según el catalogo anterior se puede tomar el crisol número 150.

Así se tiene que el crisol tiene las siguientes dimensiones:

Altura: 476 mm

Diámetro superior: 371 mm

Diámetro inferior: 260 mm

Volumen: 24.6 litros

SALAMANDER GRAFINOX

FORMATO A

Capacidad: aprox.

Referencia	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Fundo (mm)	Vol. (L)
A 1/2	79	70	50	0.2
A 1	90	91	63	0.2
A 2	110	105	70	0.4
A 3	130	112	75	0.4
A 4	145	115	72	0.6
A 5	155	123	83	0.6
A 6	165	129	85	1
A 8	179	160	101	1.2
A 10	200	161	110	1.6
A 12	217	170	117	2
A 14	220	184	128	2.2
A 16	232	193	132	2.6
A 20	260	204	145	3.4
A 25	259	216	155	4
A 30	286	234	166	5
A 40	313	265	191	7
A 50	330	282	203	8
A 60	347	291	205	10
A 70	367	292	205	10.6
A 80	374	311	222	13
A 100	402	335	245	16
A 120	423	344	260	20
A 150	476	371	260	24.6
A 200	507	397	292	31
A 250	558	415	290	36.5
A 300	571	435	313	41.5
A 400	647	495	340	65
A 500	663	520	350	68.5
A 600	723	528	390	83
A 800	804	542	380	94
A 1000	826	632	430	134

Figura 9. Catálogo de Crisoles

Fuente: (Grafinox)

2.5.2. Ladrillo refractario

El ladrillo refractario es un material de tipo cerámico que posee una serie de características especiales, lo que permite hacer un gran uso de éste dentro de instalaciones industriales o en trabajos de hornos y estufas domésticas.

Las caras de estos ladrillos son lisas. Esta peculiar característica disminuye la adherencia con el mortero, logrando la resistencia a altas temperaturas y la abrasión. Por sus buenas propiedades térmicas este material de construcción es considerablemente caro.

Los ladrillos refractarios actualmente son empleados para revestir calderas, ollas de aceración, parrillas, hornos rotatorios de cementeras, por mencionar algunas, en donde éstos deben estar adheridos uno con uno con mortero refractario y para lograr mejorar la firmeza del pegado también se puede agregar cemento refractario; obteniendo como resultado una mezcla que tendrá una apariencia barrosa; esta mezcla permite que el pegado sea suficientemente resistente para los procesos.

Al igual que el mortero y el cemento refractario, los ladrillos refractarios además de cumplir con su función de refractar, son excelente contenedores de calor, es decir, mantienen el calor al que son expuestos durante sus diferentes usos.

De las peculiaridades de este tipo de material es que son fabricados en calidades variadas, dependiendo de la concentración de alúmina y en base a esta concentración el ladrillo resiste mayores temperaturas o puede ser usado para distintos medios. Las concentraciones van desde el 36% hasta el 99% de Alúmina aunque también se emplea sílice.

Principalmente cuando se quiere recubrir hornos destinados para la fundición de metales, el tipo de ladrillo empleado es el de dióxido de silicio,

en algunos casos cuando los ladrillos comienzan a licuarse estos trabajan con temperaturas superiores a 1850 °C.

Para poder crear estos ladrillos es necesario que sus componentes estén expuestos a bajas presiones y que sean a su vez, quemados a temperaturas muy altas. Las excepciones a este proceso son aquellos ladrillos que son químicamente ligados, o los que utilizan el alquitrán, resina o gomo para permanecer aglutinados.

Propiedades

Los ladrillos refractarios utilizados son de varios tipos dependiendo del contenido de arcilla con sílices, alúminas y magnesitas. Las propiedades de estos compuestos permiten que el ladrillo soporte estar a grandes temperaturas. Aunque el comportamiento de cada uno es muy propio del material.

Los ladrillos refractarios poseen temperaturas de trabajo de hasta 1800°C. Utilizado en paredes de hornos reverberos básicos, convertidores de Cu, Al. Y en general para hornos industriales.

Las dimensiones del ladrillo son variables pero los más utilizados son:

Largo: 23 cm

Ancho: 11.5cm

Espesor: 6.4 cm

2.5.3. Cemento refractario

El concreto refractario es un tipo material que retiene su dureza al someterse a altas temperaturas.

Para fabricar este tipo de concreto se suele utilizar óxido de aluminio (alumina), sílice y óxido de calcio, entre otros elementos, comunes en materiales refractarios. El tipo de material refractario a utilizar va a depender

de la aplicación en particular y de la temperatura necesaria de acuerdo al material a fundir. .

Por ejemplo se tiene al cemento aluminoso para el que se utiliza caliza (esta roca tiene calcita, carbonato de calcio) y bauxita (contiene alúmina, sílice y óxido de hierro). La mezcla antes de fraguar contiene finalmente cal y alúmina a un 40% (más en detalle aproximadamente un 40% de óxido de calcio, un 40% de alúmina, entre un 5 y 10% de óxido de hierro, 5% de óxido de silicio y aprox. un 1% de óxido de titanio, todo dependiendo de la clase de cemento aluminoso en cuestión), lo que se combina con agua para lograr un concreto refractario que se utiliza para el recubrimiento de hornos. Recordemos que concreto es el nombre que recibe el cemento cuando se endurece después de fraguar reaccionando con el fuego. .

2.5.4. Mortero refractario

Se utiliza como material para pegar los ladrillos refractarios y formar las juntas entre hiladas de ladrillo refractario.

2.5.5. Chapa metálica

La chapa metálica es el cascaron exterior del horno que sirve para soportar los esfuerzos producidos por la dilatación así como de protección de golpes. Para este caso se utilizó una chapa metálica de acero negro de 4 mm.

2.5.6. Fibra de Vidrio

La fibra de vidrio es un material que consta de numerosos filamentos extremadamente finos de vidrio. Las fibras de vidrio son buenos aislantes

térmicos debido a su alto índice de área superficial en relación al peso. Los bloques de fibra de vidrio atrapan aire entre ellos, haciendo que la fibra de vidrio incremente su poder de aislante térmico, con conductividad térmica del orden de $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, por ello se lo utiliza en la construcción de hornos.

2.5.7. Ladrillo aislante

Su forma es la de un prisma rectangular, en el que sus diferentes dimensiones reciben el nombre de sogá, tizón y grueso, siendo la sogá su dimensión mayor. Así mismo, las diferentes caras del ladrillo reciben el nombre de tabla, canto y testa (la tabla es la mayor). Por lo general, la sogá es del doble de longitud que el tizón o, más exactamente, dos tizones más una junta, lo que permite combinarlos libremente. El grueso, por el contrario, puede no estar modulado.

Existen diferentes formatos de ladrillo, por lo general son de un tamaño que permita manejarlo con una mano. En particular, destacan el formato métrico, en el que las dimensiones son $24 \times 11,5 \times 5,25 / 7 / 3,5 \text{ cm}$ (cada dimensión es dos veces la inmediatamente menor, más 1 cm de junta) y el formato catalán de dimensiones $29 \times 14 \times 5,2 / 7,5 / 6 \text{ cm}$, y los más normalizados que miden $25 \times 12 \times 5 \text{ cm}$.

2.6. Sistema de calentamiento

2.6.1. Cantidad de Calor

Se necesita producir el calor suficiente para llegar a la temperatura de colado del metal no ferroso, además se requiere producir el calor suficiente para fundirlo y luego sobrecalentarlo a la temperatura de colado.

Tabla 1

Tabla de propiedades de los metales

Metal o aleación	Temperatura de fusión °C	Calor específico del sólido (kCal/Kg. °C)	Calor específico del líquido (kCal/Kg. °C)	Calor latente de fusión (kCal/Kg)
Estaño	232	0.056	0.061	14
Plomo	327	0.031	0.04	6
Zinc	420	0.094	0.121	28
Magnesio	650	0.25	-----	72
Aluminio	660	0.23	0.39	85
Latón	900 - 950	0.092	-----	----
Bronce	900 a 960	0.09	-----	----
Cobre	1083	0.094	0.156	43
Fundición gris	1400	0.16	0.20	70
Fundición blanca	1100	0.16	----	----
Acero	1400	0.12	----	50
Níquel	1455	0.11	----	58

Fuente: (Pierre Louis Dulong y Alexis Therese Petit)

El cálculo del calor requerido por el horno será presentado en el capítulo 3.

2.6.2. Tipos de calentamiento

En relación a la forma de energía utilizada, los hornos pueden ser operados básicamente a través de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. En cuanto a los combustibles, se puede utilizar una serie de

formas diferentes. Cada forma de energía 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.

Dependiendo de la calidad que se exija a la masa fundida, la productividad y la eficiencia energética, se pueden usar distintos tipos de calentamiento. En principio, pueden usarse hornos con calentamiento eléctrico o por combustible. En este contexto y desde el punto de vista de los costes, los niveles locales de precios son determinantes para el tipo de energía elegido.

2.6.3. Calentamiento por Combustible

Los hornos con calentamiento por combustible son idóneos para el servicio de fundición previa, especialmente cuando cuentan con evacuación de gases de combustión a través del borde del crisol. Cuando se persigue una alta calidad de la masa fundida, es aconsejable usar una evacuación lateral de los gases de combustión. No obstante, la calidad de la masa fundida aumenta en proporción inversa a la eficiencia energética, porque el horno de fusión con calentamiento por combustible y evacuación lateral de los gases de combustión consume un 20-25 % más de energía que un horno con canalización por gases a través del borde del crisol.

Los hornos de fusión con calentamiento por combustible, con sistemas de quemadores que incluyen recuperación del calor mediante recuperadores permiten un óptimo aprovechamiento de la energía además de la máxima calidad de la masa fundida. Con los gases de escape calientes del horno se precalienta el aire de combustión para los quemadores a través de un intercambiador de calor. El sistema genera un ahorro de hasta el 25 % en comparación con los hornos de fusión ordinario con calentamiento por combustible y salida lateral de los gases.

2.6.4. Calentamiento eléctrico

Si lo principal es la calidad de la masa fundida y la eficiencia energética, es recomendable usar hornos de fusión con calentamiento eléctrico. La regulación del calentamiento es pausada y precisa. La masa fundida no se contamina con las emisiones del calentamiento por combustible. Los hornos de fusión con calentamiento eléctrico pueden alcanzar hasta el 85 % más de la potencia de fusión de los hornos de fusión con calentamiento por combustible con salida lateral de gases.

2.6.5. Tabla del poder calórico de algunos elementos

Tabla 2

Tabla de poder calórico de algunos elementos

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

Fuente: (Hinojosa, 2010)

2.7. Determinación de combustible

Para la determinación del combustible primero se debe saber las características de las opciones de calentamiento que se tiene.

De acuerdo a lo mencionado en los literales anteriores se ha optado por un calentamiento a base de llama y para ello se ha optado por dos alternativas de combustible; el GLP o el diesel para lo cual se debe saber las características de cada uno la cual se hace a continuación pero primero se revisaran conocimientos básicos.

2.7.1. Combustión

Es una reacción química en la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía

2.7.2. Comburente

La presencia de esta sustancia es la que permite al combustible arder de forma general se considera al oxígeno como el comburente universal y típico.

2.7.3. Combustible

Se llama combustible a toda sustancia natural o artificial, en estado sólido, líquido o gaseoso que combinada con el oxígeno produzca una reacción con desprendimiento de calor

Para que una sustancia sea considerada como combustible a nivel industrial deberíamos exigirle algunos requisitos más, por ejemplo:

- Disponibilidad en grandes cantidades
- Bajo costo de operación (obtención, transporte y almacenaje)
- Aplicabilidad (que se pueda quemar con la tecnología actual)

- Poder Calórico que justifique su uso.

2.7.4. Clasificación de los combustibles

2.7.4.1. Sólidos

- Naturales: madera, carbón mineral, materiales bituminosos.
- Elaborados: coque, carbón vegetal, subproductos (aserrín y recortes de madera, pallets, cáscara de arroz, bagazo de caña de azúcar, etc.)

2.7.4.2. Líquidos

- Naturales: petróleo
- Elaborados: gasolinas, fuel-oil, alcohol, biodiesel, diesel, kerosene, bunker, etc.

2.7.4.3. Gaseosos

- Naturales: gas natural
- Elaborados: GLP, biogás, gas de gasógeno, acetileno, metano, etc.

2.7.5. Tipo de Combustión

2.7.5.1. Completa o perfecta

Es cuando todo el carbono del combustible se vuelve CO₂, el hidrogeno en H₂O y el azufre en SO₂

2.7.5.2. Estequiometria o Teórica

Es la combustión ideal todo el combustible se quema con el aire teórico que es la cantidad mínima necesaria

2.7.5.3. Incompleta

Es cuando los componente de combustión se oxidan parcialmente esto se produce por un aumento o disminución de aire, así como la variación de la presión atmosférica.

2.7.6. Llama

Es la reacción química de oxidación del combustible este es un proceso exotérmico, La llama es la parte del fuego que emite luz visible.

El frente de llama marca la separación entre el gas sin quemar y el gas quemado, y es la zona en donde tienen lugar las reacciones principales. El espesor del frente de llama varía desde 1 [mm] hasta la anchura total de la cámara de combustión.

La velocidad de propagación depende de la transferencia de calor de los gases quemados y a quemarse, cuando alcanzan la temperatura de ignición

Las características de las llamas son las siguientes:

- Distribución específica de transferencia de calor radiante y convectiva.
- Combustión Completa.
- Mínimo ruido.
- Ausencia de oscilaciones.

2.7.6.1. Clasificación de Llama

Se clasifica de acuerdo al punto donde se mezcla el combustible con el comburente

- **Llamas de difusión**

Es el instante cuando la mezcla combustible-comburente combustionan

- **Llama de pre-mezcla**

Es cuando la combustión se efectúa antes de alcanzar la cámara de combustión

- **Llama laminar**

Es cuando los fenómenos de la mezcla y transporte ocurren a bajas velocidades

- **Llama turbulenta**

Es cuando es elevada la velocidad de mezcla aire-combustible. En estas condiciones el gas sale como un silbido y la llama es corta.

- **Llama estacionaria**

Es cuando el combustible se quema gradualmente a medida que pasa a través de una zona establecida del sistema, dando lugar a una llama fija, es la llama más importante desde el punto de vista práctico.

2.7.6.2. Condiciones para que se produzca llama

La condición para que se produzca la llama es que el combustible alcance la temperatura de ignición.

Tabla 3**Tabla de Temperaturas de ignición de combustibles**

Combustibles	Temperatura de Ignición °C
Coque	700
Carbono	700
Hidrogeno	550
Gasolina	450
Gas Oil	400
Metano	650
GLP	493-549
Diesel	250-270

Fuente: (Botta)

En combustibles líquidos se usa el punto de inflamación que es de 20 a 60 °C.

2.7.6.3. La temperatura de ignición

Se utiliza para determinar la temperatura máxima a alcanzar en su almacenamiento y transporte y la temperatura mínima a la que se debe mantener en la cámara de combustión.

2.7.6.4. La inflamabilidad

Es la velocidad de propagación de la llama ya que la misma a su vez está relacionada con las condiciones de propagación del calor a través de la mezcla, que es mayor cuando aumenta la temperatura de la llama.

La mezcla estequiométrica combustible- comburente es de temperatura bastante alta para calentar las zonas contiguas hasta la ignición. Esto depende de condiciones externas como son la presión y la geometría de la cámara de combustión.

Los límites de presión para que exista una llama es como límite inferior por debajo 133.3 [Pa] absolutos y el límite superior es complicado determinar por lo peligroso de la mezcla a altas presiones, pero se puede decir que está por encima de los 9.8 [GPa].

2.8. Selección del combustible

Para decidir que combustible usar se toma en cuenta que el horno se utilizara para prácticas de laboratorio y trabajos puntuales, ya que el laboratorio de ciencia de los materiales cuenta con instalaciones idóneas para que la utilización del horno, se plantean 2 alternativas viables para este proyecto:

- Alternativa N 1 Diesel
- Alternativa N2 Gas licuado de petróleo GLP.

Para determinar la mejor alternativa se, debe considerar la temperatura de fusión de los metales a fundirse en este proyecto (aluminio, bronce y cobre) oscila ente 660°C y 1080°C se tiene:

- Almacenamiento: Optimización de espacio para almacenamiento
- Transporte: facilidad de transporte de combustible
- Instalaciones: instalaciones óptimas(cómodas y baratas) para suministro de combustible
- Consumo: Cantidad de combustible usado en una fundición
- Poder calórico: optimización de energía
- Adquisición: facilidad de obtención del combustible.

Tabla 4**Tabla de comparación de alternativas de combustibles**

Alternativa	Almacenamiento	Transporte	Instalaciones	Consumo	Poder Calórico	Adquisición	TOTAL
N 1	9	10	10	9	8	9	55
N 2	6	7	7	8	9	6	43

Tomando como 10 a lo más factible y 0 a lo menos factible el total refleja la alternativa más viable para el proyecto

Con esta tabla se puede concluir que la alternativa N1 es la mejor para este proyecto por lo tanto el combustible a usar es el diesel

2.8.1. Diesel (gasóleo)

El gasóleo, también denominado diesel, es un hidrocarburo líquido de densidad sobre 832 kg/m³ (0,832 g/dm³),¹ compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y en motores diésel. Su poder calorífico inferior es de 35,86 MJ/l (43,1 MJ/kg)¹ que depende de su composición comercial.

En 2010 la densidad del gasóleo obtenido de petróleo era aproximadamente de 0,832 kg/l (varía según la región), un 12% más que la gasolina que tiene una densidad de 0,745 kg/l. Aproximadamente el 86,1% del diésel es carbono, y cuando se quema se obtiene un poder calorífico de 43,10 MJ/kg¹ contra 43,20 MJ/kg de la gasolina. Sin embargo, debido a la mayor densidad, el gasóleo ofrece una densidad volumétrica energética de 35,86 MJ/L contra los 32,18 MJ/L de la gasolina, lo que supone un 11% más, que podría considerarse notable cuando se compara la eficiencia del motor diésel frente al de ciclo Otto. Las emisiones de CO₂ del diésel son de 73,25 g/MJ, solo ligeramente más bajas que la gasolina, con 73,38 g/MJ.

El gasóleo derivado del petróleo está compuesto aproximadamente de un 75% de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas incluyendo

isoparafinas y cicloparafinas) y un 25% de hidrocarburos aromáticos (incluyendo naftalenos y alcalobencenos). La fórmula química general del gasóleo común es $C_{12}H_{23}$, incluyendo cantidades pequeñas de otros hidrocarburos cuyas fórmulas van desde $C_{10}H_{20}$ a $C_{15}H_{28}$.

Para el presente estudio se ha optado por un sistema de calentamiento a base de quemadores que funcionan a diesel cuyo dimensionamiento y cálculos de demanda serán presentados en el capítulo tres.

2.9. Demanda y consumo de energía

En el proceso de la fusión debemos pasar los metales y sus aleaciones del estado sólido al estado líquido, generando determinada cantidad de calor, bien definida y característica para cada metal o aleación. Como se comprende fácilmente, después de que ha alcanzado la temperatura o punto de fusión es necesario aplicar más calor para poder transformar el metal o la aleación de sólido a líquido. Durante este período la temperatura no aumenta y la cantidad de calor generada destinada solamente a disgregar el estado sólido, se llama calor latente de fusión. Si cuando toda la masa es líquida, se continúa generando calor, la temperatura vuelve a aumentar y el metal se recalienta. La energía necesaria para llevar al metal a la temperatura de vertido es la suma de tres cantidades:

- Q1: Calor para elevar la temperatura ambiente a temperatura de fusión del metal a fundir.
- Q2: Calor necesario para llegar al cambio de fase del metal de sólido a líquido es decir para fundir el metal.
- Q3: Calor necesario para llegar a temperatura de colado del metal fundido.

Teniendo en cuenta lo expuesto se tiene que el calor necesario para fundir la carga Q es igual a la suma de los calores:

$$Q = Q1 + Q2 + Q3$$

El cálculo respectivo se lo presentará en el capítulo tres.

2.10. Influencia del medio ambiente y condiciones idóneas de funcionamiento

Ya que el horno generara gases por la combustión y fundición del material se debe garantizar una evacuación adecuada de estos gases.

Ya que el horno estará ubicado en el laboratorio de ciencias de materiales la temperatura ambiente no afectará al desempeño óptimo del horno ya que el cálculo contemplara la temperatura ambiente para un buen funcionamiento.

3. CAPÍTULO 3.

DISEÑO

En este capítulo se definen los parámetros para construir el horno basculante manual para materiales no ferrosos de acuerdo a consideraciones y parámetros técnicos, como son el volumen máximo que tendrá el crisol, la máxima temperatura que alcanzara para tener una fundición homogénea que garantice una apropiada colada de fundición, tiempo de fusión, materiales a usar, el combustible para fundir, el consumo energético y coeficientes de transferencia de calor y otros.

3.1. Diseño térmico

En el diseño térmico se analiza varias alternativas como son que combustible usar, los espesores de pared refractaria, los materiales a usar, el consumo energético, se realiza una simulación del sistema que ayuda en la toma de decisiones, se definen los coeficientes de transferencia de calor para obtener las pérdidas energéticas con todo esto se determina el quemador que forma parte del horno de fundición basculante manual.

3.1.1. Análisis de variables

Las variables esenciales a tomarse en cuenta y son las que permitirán establecer las dimensiones del horno de fundición basculante manual son:

Tabla 5

Parámetros de Diseño

PARAMETROS DE DISEÑO			
N°	VARIABLE	PARAMETRO	OBSERVACION
1	CRISOL DEL HORNO	150 KG	TOMANDO COBRE COMO MATERIAL DE REFERENCIA DEBIDO QUE ES EL DE MAYOR PESO ESPECIFICO (8960kg/m ³) DE LOS MATERIALES NO FERROSOS QUE SE PRETENDE FUNDIR EN ESTE HORNO
2	TEMPERATURA DE LA COLADA	1200 °C	TOMANDO EL COBRE COMO MATERIAL DE REFERENCIA DEBIDO QUE ES EL DE MAYOR TEMPERATURA DE FUSION (1083 °C) DE LOS MATERIALES QUE SE PRETENDE FUNDIR EN EL HORNO
3	TIEMPO DE FUNDICION	180 MINUTOS	TOMANDO EN CUENTA QUE EL HORNO SERA UTILIZADO PARA PRACTICAS POR LO CUAL SERA ARRANCADO DESDE CERO EN SU PRIMERA FUNDICION
4	DIMENSIONES DEL HORNO	VER FIGURA 7	MEDIDAS TENTATIVAS
5	UBICACIÓN DEL HORNO	Laboratorios de la Espe	UBICACION TENTATIVA, TENIENDO EN CUENTA APROVECHAR LA CAMPANA DE VENTILACION QUE YA CUENTA EL LABORATORIO DE CIENCIA DE MATERIALES

3.1.2. Determinación de medidas

3.1.2.1. Dimensionamiento de la cámara de combustión

Para el dimensionamiento de la cámara de combustión se necesita conocer tres parámetros fundamentales:

- (Masa térmica) Capacidad de calentamiento del horno (Kg/hm^2)
- (Necesidad Calórica) Contenido calórico del metal (Kcal/Kg)
- (Cámara de combustión) Espacio de combustión (Kg/segm^3)

Así con estos parámetros se calcula la cámara de combustión con la siguiente expresión:

$$e = \frac{C_c \cdot \text{contenido calórico}}{\text{espacio de combustión}} \quad [1]$$

Dónde:

e = espacio de la cámara de combustión

C_c = capacidad de calentamiento necesaria

Capacidad de calentamiento del horno (C_c)

Para el cálculo de la capacidad de calentamiento del horno se emplea la siguiente fórmula:

$$C_c = \frac{m}{t \cdot \text{superficie calentada}} \quad [2]$$

Dónde:

m = masa de crisol (54.86Kg) + masa de material a fundir (COBRE + ESCORIA 182.93Kg) = 237.79 Kg (para cobre).

Se considera 16% de la masa total para escoria y quema de material para el cobre (Industrias FUNSA, 2014)

$m = \text{masa de crisol (54.86Kg)} + \text{masa de material a fundir (ALUMINIO + ESCORIA 55 Kg)} = 109.86 \text{ Kg}$ (para aluminio).

Se considera 12% de la masa total para escoria y quema de material para el aluminio. (Industrias FUNSA, 2014)

$t = \text{tiempo de fusión } 1.75 \text{ h}$ Para calcular la superficie calentada del crisol debido a su geometría ya que tiene una parte cilíndrica y una parte cónica truncada.

Así se aplica la siguiente fórmula:

Superficie calentada = área lateral cilindro + área lateral cono [3]

Área lateral cilindro

$$AL = 2 * \pi * h * R_{sup} \quad [4]$$

Dónde:

$$\Pi = 3.14159$$

$h = \text{altura del crisol (17.6 cm)}$

$R_{sup} = \text{radio superior del crisol (18.55 cm)}$

$$AL = 2 * \pi * 17.6 * 18.55$$

$$AL = 2051.33 \text{ cm}^2$$

$$AL = 0.21 \text{ m}^2$$

Área lateral cono

Para esta área se aplica la fórmula:

$$Al = \pi * (r1 + r2) * s \quad [5]$$

Dónde:

$$\Pi = 3.14159$$

r 1 = radio superior del crisol (18.55 cm)

r 2 = radio inferior del crisol (13 cm)

s = generatriz

Donde s se calcula con la expresión:

$$S = \sqrt{(r1 - r2)^2 + h^2} \quad [6]$$

Dónde:

r 1 = radio superior del crisol (18.55 cm)

r 2 = radio inferior del crisol (13 cm)

h = altura del cono (30 cm)

$$S = \sqrt{(0.1855 - 0.13)^2 + 0.3^2}$$

$$S = 0.31$$

Así se reemplaza en [5] y se obtiene:

$$Al = \pi * (0.1855 + 0.13) * 0.31$$

$$Al = 0.31 \text{ m}^2$$

Por lo tanto reemplazando en la ecuación [3] se tiene:

$$\text{Superficie calentada} = 0.21 \text{ m}^2 + 0.31 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie calentada} = 0.52 \text{ m}^2$$

Teniendo estos datos se puede calcular la capacidad de calentamiento necesaria tanto para aluminio como cobre aplicando la ecuación [2] se tiene:

- **Cobre**

$$C_c = \frac{237.79}{1.75 \cdot 0.52}$$

$$C_c = 261.31 \text{ Kg / h} \cdot \text{m}^2$$

- **Aluminio**

$$C_c = \frac{109.86}{1.75 \cdot 0.52}$$

$$C_c = 120.73 \text{ Kg / h} \cdot \text{m}^2$$

Contenido calórico del metal (Kcal/Kg)

Este dato viene dado por la curva de contenido calórico de cada metal a diferentes temperaturas, la temperatura que se empleara será la temperatura de fusión de cada metal que se utilizara en este estudio:

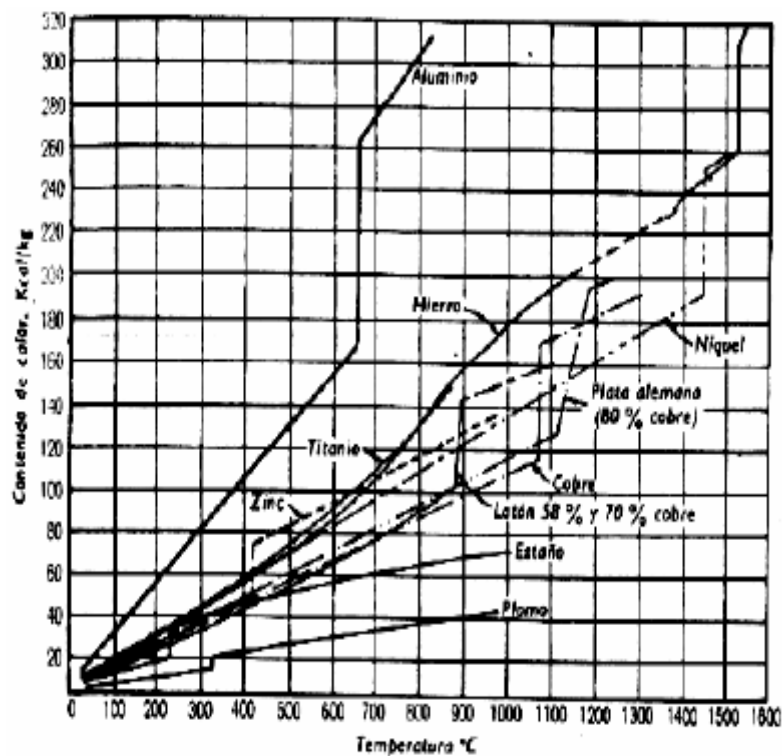


Figura 10. Contenido calórico de los metales a diferentes temperaturas

Fuente: (Trinks)

De acuerdo a la curva anterior y teniendo en cuenta temperaturas de colado del cobre y aluminio se puede obtener los siguientes datos:

Temperatura de colado Aluminio: Temperatura de fusión del aluminio (660°C) + 50°C (Industrias FUNSA, 2014)

Temperatura de colado Cobre: Temperatura de fusión del cobre (1080°C) + 70°C (Industrias FUNSA, 2014)

Tabla 6

Tabla de contenido calórico del cobre y aluminio

MATERIAL	TEMPERATURA DE COLADO (°C)	CONTENIDO CALORICO (Kcal/Kg)
Aluminio	710	280
Cobre	1150	177

Fuente: (Industrias FUNSA, 2014)

Espacio de combustión (Kg/seg*m³)

Se relaciona con el volumen necesario para que se complete la combustión, para ello se han considerado las siguientes condiciones de operación del horno y así se obtendrá el espacio de combustión de acuerdo a las necesidades que requiere este estudio:

Tabla 7

Tabla condición de combustión de los hornos

CONDICION	ESPACIO DE COMBUSTION (Kg/seg*m ³)
Mezcla incompleta de aire combustible	13.34
Mezcla parcialmente de combustible y aire, combustible grueso y aire frío	53.59
Buena mezcla de combustible y aire, buena utilización de la cámara de combustión atomización muy fina y pulverización del combustible, aire frío.	88.97
Mezcla completa o pre mezcla de aire combustible, utilización perfecta del espacio de combustión.	160.11
Mezcla completa o pre mezcla de aire combustible, utilizando perfecta del espacio de combustión, atomización muy fina del combustible, aire a 538 °C	239.66

Fuente: (Trinks)

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se la condición 3 ya que las condiciones ambientales de la ESPE varia por lo tanto el valor tomado será 88.97.

Una vez conocidos todos los datos se puede calcular el espacio de la cámara de combustión tanto para aluminio como para cobre de la ecuación [1] se obtiene:

- **Cobre**

$$e = \frac{261.31 \text{ Kg / h} \cdot \text{m}^2 \cdot 177 \text{ Kcal/ Kg}}{88.97 \text{ Kcal/segm}^3}$$

$$e = 519.86 \text{ seg}^* \text{ m /h}$$

$$e = 14.44 \text{ cm}$$

- **Aluminio**

$$e = \frac{120.83 \text{ Kg} / \text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot 280 \text{ Kcal} / \text{Kg}}{88.97 \text{ Kcal} / \text{segm}^3}$$

$$e = 380.27 \text{ seg}^* \text{ m} / \text{h}$$

$$e = 10.56 \text{ cm}$$

Teniendo en cuenta los datos obtenidos, se puede evidenciar que el cobre genera una cámara de combustión más amplia, por lo tanto se tiene una cámara de combustión de 14.44 cm. La misma que satisface tanto a la fundición de cobre como a la de aluminio.

3.1.2.2. Dimensionamiento del diámetro interior del horno

La estructura cilíndrica del horno permite que haya una mejor distribución del calor alrededor del crisol al momento de la combustión, ubicando el quemador de combustible en la parte inferior del crisol se aprovecha de mejor manera el calentamiento hacia la parte superior del crisol.

De esta manera el diámetro interno queda determinada por:

$$D_i = D_c + 2 (E_c) \quad [7]$$

Dónde:

D_i = diámetro interno del refractario

D_c = Diámetro del crisol 37.1 cm

E_c = Espacio de combustión 14.44 cm

Reemplazando en [7] se tiene:

$$D_i = 65.98 \text{ cm}$$

3.1.2.3. Dimensionamiento del diámetro exterior del horno

Para dimensionar el diámetro exterior del horno se debe tomar en cuenta que se colocara una capa de fibra de vidrio entre el ladrillo aislante y la chapa metálica con un espesor de 38 mm, junto con el ladrillo refractario y el ladrillo aislante y la chapa metálica.

Por lo tanto se tiene:

$$De = Di + 2*(eFV) + 2*(eCM) + 2(eLR) + 2(eLA) + 2(eCR) + 2(eMR) \quad [8]$$

Dónde:

De: diámetro exterior

Di: diámetro interior 65.98 cm

eFV: espesor de fibra de vidrio 3 cm

eCM: espesor chapa metálica 0.4cm

eLR: espesor del ladrillo refractario 11.5 cm

eLA = espesor ladrillo aislante 13.11 cm

eCR = espesor cemento refractario 0.5 cm

eMR = espesor mortero refractario que sirve para unir los ladrillos 1.0 cm

Reemplazando en [8] se tiene:

$$De = 122\text{cm}$$

3.1.2.4. Dimensionamiento de la altura del horno

Para la altura del horno, se tiene una relación con la ubicación del quemador que según la industria de construcción de hornos sugiere una altura de 8 a 15 cm. desde la base del horno. Según este criterio se construirá la base que soporta el crisol de 12 cm. de alto.

Por lo tanto se tiene:

$$H_{total} = E_{chm} + E_{fv} + A_{ba} + A_{br} + A_{bc} + A_c + A_{lc} + A_{mr} + A_{pp} \quad [9]$$

Conociendo:

Espesor de la plancha metálica (E_{chm}): 0.4 cm

Espesor de la fibra de vidrio (E_{fv}): 3 cm

Altura de base de ladrillo aislante (A_{ba}): 11.5 cm

Altura de base de ladrillo refractario (A_{br}): 6.5 cm

Altura de base de crisol (A_{bc}): 15 cm

Altura del crisol (A_c): 47.6 cm

Altura de ladrillo de cierre de crisol (A_{lc}): 6.5 cm

Altura de mortero refractario (A_{mr}): 2 cm

Altura previsible de protección (A_{pp}): 2.5 cm

Reemplazando en [9] se tiene:

Altura total del horno (H_{total}): 95 cm

3.1.3. Cálculo de consumo de energía

Para el cálculo del consumo de combustible y balance de energía del horno se necesitara conocer algunos conceptos de trabajo.

Calor necesario para la fundición

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

Calor útil que el horno ha de entregarse a la carga metálica

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. Este cálculo se lo hará tanto para el aluminio como para el cobre para ver el caso más desfavorable que se tendrá en la puesta en marcha del horno

$$Q = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_f - T_o)}{t} \quad [10]$$

Dónde:

Q = Cantidad de calor.

m = Peso de la carga

C_p = Calor específico.

T_f = Temperatura final.

T_o = Temperatura inicial.

t = tiempo de proceso

Para empezar el cálculo se toman dos datos fundamentales:

Temperatura inicial en el exterior del horno $T_o = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura final dentro de la cámara de combustión $T_f = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$

3.1.3.1. 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:

$$\text{Masa total} = \text{masa fundida} + \text{residuos}$$

Masa total = masa total a fundir 150Kg de cobre y 45.5 Kg de aluminio

Masa fundida = masa que se fundirá en la práctica 180Kg de cobre y 50 Kg de aluminio

Residuos = escoria y quema de material por el procedimiento de fundición¹

27 a 30Kg de cobre y 2,37 a 5 Kg de escoria en aluminio

$$\text{Masa Cu} = 150\text{Kg. Cu} + 30\text{Kg. Cu}$$

$$180\text{Kg. Cu} = 180\text{Kg. Cu}$$

$$\text{Masa Al} = 45.5\text{Kg. Al} + 4.5\text{Kg. Al}$$

$$50\text{Kg. Al} = 50\text{Kg. Al}$$

3.1.3.2. Balance de energía

Debido a los cálculos anteriores se puede observar que la fundición de cobre da condiciones de trabajo más extremas por lo tanto será el caso más desfavorable de este estudio. De la ley de la conservación de la energía, se

¹ Merma del material por oxidación en caliente y quema de impurezas de la chatarra.

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.

$$Q_{co} = Q_u + Q_p \quad [11]$$

Dónde:

Q_{co} = calor liberado por el combustible (Kcal/h)

Q_p = calor perdido en el horno (Kcal/h)

Q_u = Calor útil para la fusión (Kcal/h)

3.1.3.3. Cálculo del calor útil

Se debe considerar dos parámetros para realizar este cálculo:

$$Q_u = Q \text{ carga metálica} + Q \text{ absorbe crisol} \quad [12]$$

Dónde:

Q_u = calor útil para la fusión (Kcal/h)

Q carga metálica = calor que se entrega a la carga metálica (Kcal/h)

Q absorbe crisol = calor absorbido por el crisol (Kcal/h)

Cálculo de calor que se entrega a la carga metálica

$$Q \text{ carga metálica} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad [13]$$

Dónde:

Q_1 = Calor necesario para elevar la temperatura de 10 °C (temperatura ambiente) a 1083 °C (temperatura de fusión del cobre).

Q_2 = Calor necesario para producir el cambio de fase del material.

Q3 = Calor necesario para elevar la temperatura de 1083 °C (temperatura de fusión del cobre) a 1150 °C (temperatura de colado del cobre).

Tanto Q1, Q2 y Q3 se calcula mediante la fórmula [10]

Q1 = Calor necesario para elevar la temperatura de 10 °C(temperatura ambiente) a 1083 °C (temperatura de fusión del cobre).

Dónde:

m = masa a fundir = 180Kg.

Cp = calor específico del cobre solido= 0.094 Kcal / Kg * °C

Tf = temperatura de fusión del cobre = 1083°C

To = Temperatura ambiente = 10°C

t = tiempo de fundición = 150 minutos (2.5h)

Reemplazando en la ecuación [10] se obtiene:

$$Q1 = \frac{180 * 0.094 * (1083 - 10)}{2.5}$$

$$Q1 = 7262.06 \text{ Kcal / h}$$

Q2 = Calor necesario para producir el cambio de fase del material.

$$Q2 = \frac{m*\lambda}{t} \quad [14]$$

Dónde:

m = masa a fundir = 150Kg.

λ = calor latente del cobre de fusión 43 Kcal / Kg.

t = tiempo de fundición = 15 minutos (0.25h)

Reemplazando en la ecuación [14] se obtiene:

$$Q2 = \frac{150 * 43}{0.25}$$

$$Q2 = 25800 \text{ Kcal / h}$$

Q3 = Calor necesario para elevar la temperatura de 1083 °C (temperatura de fusión del cobre) a 1400 °C (temperatura de colado del cobre).

Dónde:

m = masa a fundir = 180Kg.

Cp = calor específico del cobre líquido = 0.156 Kcal / Kg * °C

Tf = temperatura de colado del cobre = 1150°C

To = Temperatura de fusión del cobre = 1083°C

t = tiempo de fundición = 15 minutos (0.25h)

Reemplazando en la ecuación [10] se obtiene:

$$Q3 = \frac{180 * 0.156 * (1150 - 1083)}{0.25}$$

$$Q3 = 7525.44 \text{ Kcal / h}$$

Una vez calculados Q1, Q2 y Q3 se puede calcular Qcarga metálica reemplazando en la ecuación [13.] y se obtiene:

$$Q_{\text{carga metálica}} = 7262.06 \text{ Kcal / h} + 25800 \text{ Kcal / h} + 7525.44 \text{ Kcal / h}$$

$$Q_{\text{carga metálica}} = 40587.5 \text{ Kcal / h}$$

Cálculo de calor absorbido por el crisol

Dado que el crisol es de grafito se obtiene los siguientes datos:

$$m = \text{masa a calentar} = 54.86 \text{ Kg.}$$

$$C_p = \text{calor específico del grafito} = 0.17 \text{ Kcal / Kg } ^\circ\text{K}$$

$$T_f = \text{temperatura de colado del cobre (máxima temperatura alcanzada)} = 1623.15^\circ\text{K}$$

$$T_o = \text{Temperatura ambiente} = 283.15^\circ\text{K}$$

$$t = \text{tiempo de fundición} = 180 \text{ minutos (3h)}$$

Reemplazando en la ecuación [10] se obtiene:

$$Q_{\text{crisol}} = \frac{54.86 * 0.17 * (1623.15 - 283.15)}{3}$$

$$Q_{\text{crisol}} = 4165.70 \text{ Kcal / h}$$

Teniendo estos datos se puede calcular el calor útil de fusión reemplazando en la ecuación [12]:

$$Q_u = 40587.5 \text{ Kcal / h} + 4165.7 \text{ Kcal / h}$$

$$Q_u = 44753.2 \text{ Kcal / h}$$

3.1.4. Cálculo de pérdidas de energía

3.1.4.1. Conceptos básicos

Para esta parte se debe conocer conceptos básicos de la transferencia de calor como la convección tanto libre como forzada, la conducción y la radiación.

Conducción

“La conducción es la transferencia de calor, por medio de la excitación molecular en el interior del material, sin ningún tipo de movimiento entre los objetos. Si un extremo de una barra de metal está a una temperatura más alta, entonces se transferirá energía hacia el extremo más frío, debido a las colisiones de partículas de alta velocidad con las más lentas, produciéndose una transferencia neta de energía hacia estas últimas.

En una transferencia entre dos superficies planas, como la pérdida de calor a través de las paredes de una casa, la tasa de transferencia de calor por conducción es:

$$\frac{Q}{t} = \frac{kA(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})}{d} \quad [15]$$

Q = calor transferido

t = tiempo

K = conductividad térmica de la barrera

T = temperatura

e = espesor de la pared

A= área de transferencia de calor”

(F. Incropera, D. Dewitt, 1999)

Tabla 8

Tabla de conductividad térmica de los materiales

PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y AISLANTES				
Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))	Conductividad térmica(W/(m·K))	Difusividad térmica (m ² /s) (x10 ⁻⁶)
Acero	7850	460	47-58	13,01-16,06
Agua	1000	4186	0,58	0,139
Aire	1,2	1000	0,026	21,67
Alpaca	8,72	398	29,1	8384,8
Aluminio	2700	909	209-232	85,16-94,53
Amianto	383-400	816	0,078-0,113	0,250-0,346
Arcilla refractaria	2000	879	0,46	0,261
Arena húmeda	1640	-	1,13	-
Arena seca	1400	795	0,33-0,58	0,296-0,521
Asfalto	2120	1700	0,74-0,76	0,205-0,211
Baldosas cerámicas	1750	-	0,81	-
Baquelita	1270	900	0,233	0,201
Bitumen asfáltico	1000	-	0,198	-
Bloques cerámicos	730	-	0,37	-
Bronce	8000	360	116-186	40,28-64,58
Carbón (antracita)	1370	1260	0,238	0,139
Cartón	-	-	0,14-0,35	-
Cemento (duro)	-	-	1,047	-
Cinc	7140	389	106-140	38,16-50,41
Cobre	8900	389	372-385	107,45-111,20

Continua



Corcho (expandido)	120	-	0,036	-
Corcho (tableros)	120	1880	0,042	0,186
Espuma de poliuretano	40	1674	0,029	0,433
Espuma de vidrio	100	-	0,047	-
Estaño	7400	251	64	34,46
Fibra de vidrio	220	795	0,035	0,200
Fundición	7500	-	55,8	-
Glicerina	1270	2430	0,29	0,094
Goma dura	1150	2009	0,163	0,070
Goma esponjosa	224	-	0,055	-
Granito	2750	837	3	1,303
Hierro	7870	473	72	19,34
Hormigón	2200	837	1,4	0,761
Hormigón de casco	1600-1800	-	0,75-0,93	-
Láminas de fibra de madera	200	-	0,047	-
Ladrillo al cromo	3000	840	2,32	0,921
Ladrillo común	1800	840	0,8	0,529
Ladrillo de circonio	3600	-	2,44	-
Ladrillo de magnesita	2000	1130	2,68	1,186
Ladrillo de mampostería	1700	837	0,658	0,462
Ladrillo de	1900	-	1,070	-

Continua



sílice				
Lana de vidrio	100-200	670	0,036-0,040	0,537-0,299
Latón	8550	394	81-116	24,04-34,43
Linóleo	535	-	0,081	-
Litio	530	360	301,2	1578,61
Madera	840	1381	0,13	0,112
Madera de abedul	650	1884	0,142	0,116
Madera de alerce	650	1298	0,116	0,137
Madera de arce	750	1591	0,349	0,292
Madera de chopo	650	1340	0,152	0,175
Madera de fresno	750	1591	0,349	0,292
Madera de haya	800	1340	0,143	0,133
Madera de haya blanca	700	1340	0,143	0,152
Madera de pino	650	1298	0,163	0,193
Madera de pino blanco	550	1465	0,116	0,144
Madera de roble	850	2386	0,209	0,103
Mármol	2400	879	2,09	0,991
Mica	2900	-	0,523	-
Mortero de cal y cemento	1900	-	0,7	-
Mortero de cemento	2100	-	1,4	-
Mortero de	300-650	-	0,14-0,26	-

Continúa



vermiculite				
Mortero de yeso	1000	-	0,76	-
Mortero para revoques	1800-2000	-	1,16	-
Níquel	8800	460	52,3	12,92
Oro	19330	130	308,2	122,65
Pizarra	2650	758	0,42	0,209
Placas de yeso	600-1200	-	0,29-0,58	-
Plata	10500	234	418	170,13
Plexiglás	1180	-	0,195	-
Plomo	11340	130	35	23,74
Poliestireno	1050	1200	0,157	0,125
Porcelana	2350	921	0,81	0,374
Serrín	215	-	0,071	-
Tierra de diatomeas	466	879	0,126	0,308
Tejas cerámicas	1650	-	0,76	-
Vermiculita expandida	100	837	0,07	0,836
Vermiculita suelta	150	837	0,08	0,637
Vidrio	2700	833	0,81	0,360
Yeso	1800	837	0,81	0,538

Fuente: (Miliarium, 2008)

Para el cálculo de las pérdidas de calor se han tomado las fórmulas para paredes planas y paredes cilíndricas así se tiene que:

Paredes planas

$$Q = \frac{T_f - T_o}{\frac{e}{K \cdot a}} \quad [16]$$

Paredes cilíndricas

$$Q = \frac{T_f - T_o}{\frac{1}{2 * \pi * L} * \left[\frac{r_2}{K} \right]} \quad [17]$$

Convección

“La convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido, por ejemplo: al trasegar el fluido por medio de bombas o al calentar agua en una cacerola, la que está en contacto con la parte de abajo de la cacerola se mueve hacia arriba, mientras que el agua que está en la superficie, desciende, ocupando el lugar que dejó la caliente.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica, forzada o asistida).

En la transferencia de calor libre o natural un fluido es más caliente o más frío y en contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido.

La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf}) \quad [18]$$

Dónde:

h es el coeficiente de película.

A_s es el área del cuerpo en contacto con el fluido.

T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo.

T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

(F. Incropera, D. Dewitt, 1999)

Tipos de Convección

“En el estudio de la convección se suele diferenciar entre convección forzada y convección libre. La convección libre consiste en la transferencia de calor cuando el fluido suficientemente lejos del sólido está parado y la convección forzada se produce cuando el fluido se mueve cerca del sólido. Por ejemplo, el radiador de un coche tiene un ventilador que mueve el aire y favorece el enfriamiento del agua que contiene (convección forzada); en cambio, una estufa, un brasero o un radiador de calefacción calienta el aire que le rodea pero el aire “no se mueve” (convección libre). El problema de la convección tanto libre como forzada está muy relacionado con la mecánica de fluidos, el coeficiente de película depende directamente del gradiente de temperaturas normal al sólido en las proximidades del sólido, y este a su vez del gradiente de velocidades. La convección siempre implica un movimiento del fluido, pero en convección libre éste se produce solo en las proximidades del sólido y en convección forzada en todo el fluido. En fluidos compresibles, es decir, cualquier gas la convección puede producir eso en una habitación el aire caliente siempre está cerca del techo.

El coeficiente de película o coeficiente de convección, representado habitualmente como h , cuantifica la influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se modela con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf}) \quad [18]$$

Dónde:

h es el coeficiente de película.

A_s es el área del cuerpo en contacto con el fluido.

T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo.

T_{Inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

El coeficiente de convección depende de múltiples parámetros relacionados con el flujo del fluido a través del cual se da la convección:

- del tipo de convección (forzada o natural)
- del régimen del fluido (laminar o turbulento)
- de la velocidad del flujo
- de la viscosidad del fluido,
- de la densidad del fluido,
- de la conductividad térmica del fluido,
- del calor específico del fluido.
- del coeficiente de dilatación del fluido,
- de la forma de la superficie de intercambio
- de la rugosidad de la superficie de intercambio
- de su temperatura,
- de si el derrame es interior o exterior.

Las formas clásicas de estimarlo se basan en el empleo de correlaciones de números adimensionales (número de Nusselt), de manera que en general se dispone de una igualdad entre el número de Nusselt, que es proporcional al coeficiente de convección, y una expresión que involucra al número de Reynolds y al número de Prandtl en convección forzada, y al de Prandtl y al número de Grashof en convección natural.

Otras formas de calcularlo se basarían en emplear modernos programas de diferencias finitas o en resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, cosa en la práctica realizable para estudios más puntuales a fines del comportamiento del metal líquido con la variación de la temperatura.

Al igual que la conducción tendremos en cuenta para nuestro cálculo la convección para paredes planas y paredes cilíndricas y para nuestro estudio se tomara en cuenta que se trata de convección libre y los coeficientes se tomaran como constantes ya que no es tema del presente estudio el metal líquido, sino la transferencia de calor en el horno donde las paredes son fijas durante el proceso y solo interesa la convección entre las paredes del horno y los gases de combustión.” (F. Incropera, D. Dewitt, 1999)

Paredes planas

$$Q = \frac{T_f - T_o}{A \cdot h} \quad [19]$$

Paredes cilíndricas

$$Q = \frac{T_f - T_o}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot h}} \quad [20]$$

Radiación

“La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. La radiación puede provenir de líquidos, sólidos y gases. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones). Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. De hecho, la transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío.

La radiación que una superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área (W/m^2) se denomina la potencia emisiva superficial E . Hay un límite superior para la potencia emisiva, que es establecida por la ley de Stefan-Boltzmann:” (F. Incropera, D. Dewitt, 1999)

$$q_{\text{rad}}'' = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_x) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{alr}}^4) [21]$$

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon * \sigma * A_s * (T_f^4 - T_o^4) [22]$$

3.1.4.2. Cálculo de temperatura de película paredes del crisol

Para empezar el cálculo de pérdidas de calor se empieza por el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección.

Para ello se calcula la temperatura de película con la siguiente formula:

(Trinks)

$$T_p = \frac{T_f + T_o}{2} [23]$$

Dónde:

T_p = temperatura de película

T_o = temperatura de la parte interna del crisol = 1200°C = 1523.15 °K

T_f = temperatura parte externa del crisol = 1400°C = 1673.15°K

Reemplazando estos valores en la ecuación [23] se obtiene:

$$T_p = 1595.15^\circ\text{K} = 1325^\circ\text{C}$$

Para esta temperatura de película se tiene las siguientes propiedades del aire:

Densidad (d) = 0.2264 Kg/m³

Calor específico (C_p) = 1.2165 KJ/ Kg*K

Conductividad térmica (K) = 8.99X10⁻² W/m*K

Difusividad térmica (α) = 3.3795X10⁻⁴ m²/s²

Viscosidad dinámica (μ) = 5.47X10⁻⁵ Kg/m*s

Viscosidad cinemática (V)= 2.51×10^{-4} m²/s

Numero de Prandtl (Pr) = 0.7402

(Yunus A.Cengel y Michael A. Boles, 2009)

3.1.4.3. Cálculo de temperatura de película paredes interiores del horno

Para empezar el cálculo de pérdidas de calor se empieza por el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección.

Para ello se calcula la temperatura de película con la formula [23]:

Dónde:

T_p = temperatura de película

T_o = temperatura de la chapa metálica = 60°C = 333.15 °K

T_f = temperatura máxima en el interior del horno = 1400°C = 1673.15°K

$$T_p = \frac{1673.15 + 333.15}{2}$$

$$T_p = 1003.15^\circ\text{K} = 730^\circ\text{C}$$

Para esta temperatura de película se tiene las siguientes propiedades del aire:

Densidad (d) = 0.3526 Kg/m³

Calor específico (C_p) = 1.1404 kJ/ Kg*K

Conductividad térmica (K) = 6.7178×10^{-2} W/m*K

Difusividad térmica (α) = 1.6751×10^{-4} m²/s²

Viscosidad dinámica (μ) = 4.189×10^{-5} Kg/m*s

Viscosidad cinemática (V) = 1.191×10^{-4} m²/s

Numero de Prandtl (Pr) = 0.7109

(Yunus A.Cengel y Michael A. Boles, 2009)

3.1.4.4. Cálculo de temperatura de película paredes exteriores del horno

Para empezar el cálculo de pérdidas de calor se empieza por el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección.

Para ello se calcula la temperatura de película con la fórmula [23]:

Dónde:

T_p = temperatura de película

T_f = temperatura de la chapa metálica = $60^\circ\text{C} = 333.15 \text{ }^\circ\text{K}$

T_o = temperatura ambiente = $10^\circ\text{C} = 288.15^\circ\text{K}$

$$T_p = \frac{283.15 + 333.15}{2}$$

$$T_p = 308.15^\circ\text{K} = 35^\circ\text{C}$$

Para esta temperatura de película se tiene las siguientes propiedades del aire:

Densidad (d) = 1.1455 Kg/m³

Calor específico (C_p) = 1.007 KJ/ Kg*K

Conductividad térmica (K) = $2.625 \times 10^{-2} \text{ W/m}^\circ\text{K}$

Difusividad térmica (α) = $2.277 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$

Viscosidad dinámica (μ) = $1.895 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}^\circ\text{s}$

Viscosidad cinemática (V) = $1.655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Numero de Prandtl (Pr) = 0.7269

(Yunus A.Cengel y Michael A. Boles, 2009)

3.1.5. Cálculo de coeficientes de transferencia de calor

3.1.5.1. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de las paredes del crisol

Para empezar se determina que en las paredes del crisol se tiene una convección forzada por lo que se inicia calculando el número de Reynolds para determinar si se trata de un flujo laminar o turbulento y se procede de la siguiente manera:

$$Re = \frac{V_s * D_c}{\nu} \quad [24]$$

Dónde:

V_s = velocidad característica del fluido 5.5 m/s obtenido del catálogo del quemador

D_c = Diámetro de crisol

ν = viscosidad cinemática del fluido

Así reemplazando en la ecuación [24] se obtiene:

$$Re = \frac{5.5 * 0.371}{2.51 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 8129.48$$

Así se identifica el tipo de flujo que se tiene con la relación entre diámetro y largo de la sección afectada y se tiene:

$$\frac{L}{D_c} \quad [25]$$

$$\frac{0.371}{0.476}$$

$$0.78$$

Por lo tanto se determina que es un flujo laminar y se calcula el número de nusselt mediante la siguiente expresión:

$$Nu = 0.664 * Re^{0.5} * Pr^{0.333} \quad [26]$$

Reemplazando en la ecuación [26] se obtiene:

$$Nu = 0.664 * 8129.48^{0.5} * 0.7402^{0.333}$$

$$Nu = 54.16$$

Con este valor se puede calcular el coeficiente de calor por convección para un cilindro con la siguiente expresión:

$$hc = \frac{Nu * K}{L} \quad [27]$$

Dónde:

hc = coeficiente de transferencia de calor

Nu = número de nusselt

K = conductividad térmica del aire

L = longitud de la pared del crisol

Reemplazando en la ecuación [27] se obtiene

$$hc = \frac{54.16 * 8.99E - 2}{0.476}$$

$$hc = 10.23 \text{ W/m}^2 * \text{K}$$

3.1.5.2. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de las paredes interiores del horno

Para empezar el cálculo se determina que se trata de una convección forzada ya que el aire circula por la interacción del quemador, por lo que se procede al cálculo del número Reynolds con la ecuación [24]:

Así reemplazando en la ecuación [24] se obtiene:

$$Re = \frac{5.5 * 0.6598}{1.191 \times 10^{-4}}$$

$$Re = 30469.35$$

Así se identifica el tipo de flujo que se tiene con la relación entre diámetro y largo de la sección afectada con la ecuación [25] y se obtiene:

$$\frac{0.6460}{0.6598}$$

$$0.98$$

Por lo tanto se determina que es un flujo turbulento y se calcula el número de nusselt mediante la siguiente expresión:

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3} \quad [28]$$

Reemplazando en la ecuación [26] se obtiene:

$$Nu = 0.023 * 30469.35^{0.8} * 0.7109^{0.3}$$

$$Nu = 80.23$$

Con este valor se puede calcular el coeficiente de calor por convección para un cilindro con la expresión [27]:

$$h_c = \frac{80.23 * 6.72 \times 10^{-2}}{0.6460}$$

$$h_c = 8.35 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3.1.5.3. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de la pared exterior del horno.

Para empezar el cálculo se determina que se trata de una convección libre ya que el aire circula por el cambio de densidades debido a la variación de temperatura, por lo que se procede al cálculo del número Rayleing con la ecuación:

$$Ra = Gr * Pr$$

$$Ra = \frac{g * \beta * (T_f - T_o) * L^3}{\nu * \alpha} \quad [29]$$

Dónde:

g = gravedad

β = coeficiente de expansión térmica del aire

T_f = temperatura del fluido fuera del crisol 1400°C

T_o = temperatura de fluido dentro del crisol 1200 °C

L = longitud de pared del crisol 0.476 m

ν = viscosidad cinemática del aire

α = difusividad térmica del aire

Todos los datos anteriores son obtenidos de la tabla de propiedades del aire a diferentes temperaturas excepto el coeficiente de dilatación térmica β .

Este coeficiente si se considera que el aire asemeja a un gas ideal se obtiene de la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad [30]$$

Dónde:

β = coeficiente de expansión térmica del aire

T = temperatura de fluido fuera del crisol 1400°C (temperatura de cámara de combustión)

El coeficiente β si se considera que el aire asemeja a un gas ideal se obtiene de la ecuación [30]:

Así reemplazando se obtiene que:

$$\beta = \frac{1}{333.15}$$

$$\beta = 0.003 \text{ K}^{-1}$$

Por lo tanto se calcula Rayleing reemplazando en la ecuación [29] y se obtiene:

$$Ra = \frac{9.8 * 0.003 * (333.15 - 283.15) * 0.95^3}{1.66E - 5 * 2.28E - 5}$$

$$Ra = 3346309062 < 10E9$$

Por lo tanto se trata de un flujo laminar.

Se procede al cálculo del número de nusselt para lo cual se debe conocer la expresión para superficies cilíndricas verticales.

Los números de Nusselt y Grashof en paredes verticales, se forman con la altura de la superficie L como longitud característica. La transferencia de calor en cilindros verticales puede calcularse con las mismas relaciones de las placas verticales si el espesor de la capa límite no es grande comparado con el diámetro del cilindro.

El criterio general es que un cilindro vertical puede tratarse como una placa plana vertical aplicando la ecuación:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr^{1/4}} \quad [31]$$

Dónde:

D: diámetro menor del crisol

L: longitud de la superficie del crisol

Gr: número de grashof

El número de grashof se obtiene de la expresión:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_f - T_o) \cdot L^3}{\nu^2} \quad [32]$$

El número de grashof se obtiene de la ecuación [32]:

Así se tiene que:

$$Gr = \frac{9.8 \cdot 0.003 \cdot (60 - 10) \cdot 0.95^3}{(1.66 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr = 4603955127$$

Con esto se procede a calcular la relación entre diámetro y largo del cilindro con la ecuación [31] y se obtiene:

$$\frac{1.07}{0.95} \geq \frac{35}{4603955127^{1/4}}$$

$$1.13 \geq 0.13$$

Por lo tanto el criterio general es que un cilindro vertical puede tratarse como una placa plana vertical

Por lo tanto se calcula nusselt con la ecuación [28] y se obtiene:

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67 * 3346309062^{1/4}}{[1 + (\frac{0.492}{0.7255})^{9/16}]^{4/9}}$$

$$Nu = 132.39$$

Con este valor se puede calcular el coeficiente de calor por convección para un cilindro con la ecuación [27] y se obtiene:

$$hc = \frac{132.39 * 2.63E - 2}{0.95}$$

$$hc = 3.45 \text{ W/m}^2\text{*K}$$

3.1.5.4. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de la tapa inferior del horno base.

Para este cálculo se empieza por la longitud de la placa que se calentara por convección con la siguiente expresión:

$$L = \frac{As}{P} \quad [33]$$

Dónde:

L = longitud de la placa

As = área superficial de la placa

P = perímetro de la placa

Así se tiene que:

$$As = \pi * r^2 \quad [34]$$

$$As = 3.14 * 0.535^2$$

$$As = 0.9 \text{ m}^2$$

$$P = 2 \pi * r \quad [35]$$

$$P = 2 * 3.14 * 0.535$$

$$P = 3.36 \text{ m}$$

Así se reemplaza en la ecuación [33] y se obtiene:

$$L = \frac{0.9}{3.36}$$

$$L = 0.2675 \text{ m}$$

Con estos datos se procede de la misma forma que para las paredes del horno por lo que se vuelve a calcular el número de Rayleing reemplazando en la ecuación [29]:

$$Ra = \frac{9.8 * 0.003 * (333.15 - 283.15) * 0.2675^3}{1.66E - 5 * 2.28E - 5}$$

$$Ra = 74707911 < 10E7$$

Por lo tanto para calcular el número de nusselt se utiliza la siguiente expresión:

$$Nu = 0.54Ra^{1/4} \quad [36]$$

Así reemplazando en la ecuación [36] se obtiene:

$$Nu = 0.54 * 74707911^{1/4}$$

$$Nu = 50.20$$

Con esto se calcula el coeficiente de transferencia de calor con la ecuación [27] y se obtiene:

$$h_c = \frac{50.20 * 2.625E - 2}{0.2675}$$

$$h_c = 4.93 \text{ W/m}^2 * \text{K}$$

3.1.5.5. Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por convección de la tapa superior del horno.

Ya que en la parte superior solo se tendrá una tapa en forma de disco del grueso de la cámara de combustión (14.44 cm), se procede de la siguiente forma para el cálculo del área de la tapa del horno:

$$A_s = A_{\text{crisol}} - A_{\text{cc}} \quad [37]$$

Dónde:

A_s : área de la sección

A_{crisol} : área del crisol

A_{cc} : área de la cámara de combustión

Reemplazando en la ecuación [34] se obtiene:

$$A_s = 3.14 * (0.3299^2 - 0.1855^2)$$

$$A_s = 0.23 \text{ m}^2$$

Se procede a calcular el perímetro del disco con la siguiente ecuación:

$$P = 2 \pi * r_{\text{crisol}} + r_{\text{cc}} \quad [38]$$

Dónde:

r_{crisol} : radio de crisol

Rcc: radio de la cámara de combustión

Reemplazando en la ecuación [38] se obtiene:

$$P = 2 * 3.14 * (0.3299 + 0.1855)$$

$$P = 3.24 \text{ m}$$

Con estos datos se calcula la longitud de la placa aplicando la ecuación [33] y se obtiene:

$$L = \frac{0.23}{3.24}$$

$$L = 0.071 \text{ m}$$

Con estos datos se procede de la misma forma que para las paredes del horno por lo que se vuelve a calcular el número de Rayleing con la ecuación [29] y se obtiene:

$$Ra = \frac{9.8 * 0.003 * (333.15 - 283.15) * 0.071^3}{1.66E - 5 * 2.28E - 5}$$

$$Ra = 1468949.37 > 3 \times 10^5$$

Por lo tanto para calcular el número de nusselt se utiliza la siguiente expresión:

$$Nu = 0.27 Ra^{1/4} \quad [39]$$

Así se tiene:

$$Nu = 0.27 * 1468949.37^{1/4}$$

$$Nu = 9.4$$

Con esto se calcula el coeficiente de transferencia de calor con la ecuación [27] y se obtiene:

$$h_c = \frac{9.40 * 2.625E - 2}{0.071}$$

$$h_c = 3.42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

3.1.6. Cálculo de pérdidas de calor

3.1.6.1. Pérdidas de calor en las paredes del crisol

Por conducción

Aplicando la ecuación [17] y aplicando los siguientes datos se obtiene:

T_f = temperatura de la pared exterior del crisol 1400 °C = 1673.15 °K

T_o = temperatura de la pared interior del crisol 1200 °C = 1473.15°K

L = altura del crisol 0.476 m

K₁ = conductividad térmica del grafito 1.59 W/m°K

R₂ = radio del centro a la pared exterior del crisol 18.55 cm

R₁ = radio del centro a la pared interior del crisol 15.55 cm

$$Q_{\text{cond}} = \frac{1673.15 - 1473.15}{\frac{1}{2 * \pi * 0.476} * \left[\frac{\ln \frac{0.1855}{0.1555}}{1.59} \right]}$$

$$Q_{\text{cond}} = 5391.29 \text{ W}$$

Por convección

Aplicando la ecuación [20] y aplicando los siguientes datos se obtiene:

Tf = temperatura de la pared exterior del crisol 1400 °C = 1673.2 °K

To = temperatura de la pared interior del crisol 1200 °C = 1473.15°K

L = altura del crisol 0.476 m

R = radio del centro a la pared exterior del crisol 18.55 cm

hc = coeficiente de transferencia de calor de la paredes del crisol 3.50 W/m²*K

$$Q_{\text{conv}} = \frac{1673.15 - 1473.15}{\frac{1}{2 * \pi * 0.1855 * 0.476 * 10.23}}$$

$$Q_{\text{conv}} = 1135.11 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total crisol}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}}$$

$$Q_{\text{total crisol}} = 5391.29 + 1135.11$$

$$Q_{\text{total crisol}} = 6526.4 \text{ W}$$

3.1.6.2. Pérdidas de calor en las paredes internas del horno

Por conducción

$$Q_{\text{cond}} = \frac{T_f - T_o}{\frac{1}{2\pi L} * \left[\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{K_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{K_2} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{K_3} + \frac{r_5}{K_4} \right]} \quad [40]$$

Dónde:

Tf = temperatura de cámara de combustión 1350 °C = 1623.15 °K

To = temperatura de la chapa metálica 60 °C = 333.15°K

L = altura del horno 0.95 m

K1= conductividad térmica del ladrillo refractario 1.05 W/m°K

K2= conductividad térmica del ladrillo aislante 0.8 W/m°K

K3= conductividad térmica de la fibra de vidrio 0.035 W/m°K

K4= conductividad térmica de la chapa metálica 58 W/m°K

r1 = radio del centro a la pared exterior del crisol 18.55 cm

r2 = radio del centro del horno hasta la parte exterior de los ladrillos refractarios 44.49 cm

r3 = radio del centro del horno hasta la parte exterior de los ladrillos aislantes 57.6 cm

r4 = radio del centro del horno hasta la fibra de vidrio 60.6 cm

r5 = radio del centro del horno hasta la chapa metálica 61 cm

Reemplazando en la ecuación [40] se obtiene:

$$Q_{\text{cond}} = \frac{1673.15 - 333.15}{\frac{1}{2 * \pi * 0.95} * \left[\frac{\ln \frac{0.4449}{0.1855}}{1.05} + \frac{\ln \frac{0.5706}{0.4449}}{0.8} + \frac{\ln \frac{0.606}{0.5706}}{0.035} + \frac{\ln \frac{0.61}{0.606}}{58} \right]}$$

$$Q_{\text{cond}} = 2953.93 \text{ W}$$

Por convección

Mediante la ecuación [20] teniendo los siguientes datos, se obtiene:

Tf = temperatura de cámara de combustión 1400 °C = 1673.15 °K

To = temperatura chapa metálica 60 °C = 333.15°K

L = altura del horno 0.95 m

r1 = radio del horno 0.61 m

hc = coeficiente de transferencia de calor de la paredes internas del cilindro 4.98 W/m²*K

$$Q_{\text{conv}} = \frac{1673.15 - 333.15}{\frac{1}{2 * \pi * 0.61 * 0.95 * 8.35}}$$

$$Q_{\text{conv}} = 40740.33 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total pared interna}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}}$$

$$Q_{\text{total pared interna}} = 2953.93 + 40740.33$$

$$Q_{\text{total pared interna}} = 43694.26 \text{ W}$$

3.1.6.3. Pérdidas de calor en las paredes externas del horno

Por convección

Mediante la ecuación [20] teniendo los siguientes datos, se obtiene:

To = temperatura ambiente 10 °C = 283.15 °K

Tf = temperatura chapa metálica 60 °C = 333.15°K

L = altura del horno 0.95 m

r1 = radio del horno 0.61 m

hc = coeficiente de transferencia de calor de la paredes internas del cilindro 3.45 W/m²*K

$$Q_{\text{conv}} = \frac{333.15 - 283.15}{\frac{1}{2 * \pi * 0.61 * 0.95 * 3.45}}$$

$$Q_{\text{conv}} = 627.24 \text{ W}$$

Por radiación

Debido a que el horno esta al aire libre y aunque este en un lugar cerrado no quita que existan perdidas por radiación de las paredes del horno por lo que se calcula dichas perdidas con la ecuación [22] y los siguientes datos se obtiene:

ε = emisividad térmica del acero 0.8

σ = constante de Stefan-Boltzmann $5.67E-8 \text{ W/ m}^2\cdot\text{K}^4$

A_s = área calentada

T_f = temperatura de superficie $60 \text{ }^\circ\text{C}$

T_o = temperatura ambiente $10 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{rad}} = 0.8 * 5.67E-8 * (2*3.14*0.61* 0.95) * (333.15^4 - 283.15^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = 972.91 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total pared externa}} = Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}}$$

$$Q_{\text{total pared externa}} = 627.24 + 972.91$$

$$Q_{\text{total pared externa}} = 1600.15 \text{ W}$$

3.1.6.4. Pérdidas de calor en la base del horno

Por conducción

$$Q_{\text{cond}} = \frac{T_f - T_o}{\frac{e_{\text{refrac}}}{K_{\text{refrac}}*A} + \frac{e_{\text{chapa}}}{K_{\text{chapa}}*A} + \frac{e_{\text{fibra}}}{K_{\text{fibra}}*A} + \frac{e_{\text{Aislante}}}{K_{\text{Aislante}}*A}} \quad [41]$$

Dónde:

T_f = temperatura de la cámara de combustión $1400 \text{ }^\circ\text{C} = 1673.15 \text{ }^\circ\text{K}$

T_o = temperatura chama metálica $60 \text{ }^\circ\text{C} = 333.15 \text{ }^\circ\text{K}$

A = área de la base del horno 1.17 m^2

K refrac = conductividad térmica del ladrillo refractario 1.05 W/m°K

K chapa = conductividad térmica de la chapa metálica (acero negro) 58 W/m°K

K fibra = conductividad térmica de la fibra de vidrio 0.035 W/m°K

K aislante = conductividad térmica del ladrillo aislante 0.8 W/ m°K

e refrac = espesor del ladrillo refractario 0.065 m

e chapa = espesor chapa metálica 0.004 m

e fibra = espesor fibra de vidrio 0.03m

e aislante = espesor ladrillo aislante 0.1311m

Reemplazando valores en la ecuación [41] se obtiene:

$$Q_{\text{cond}} = \frac{1673.15 - 333.15}{\frac{0.065}{1.05 * 1.17} + \frac{0.004}{58 * 1.17} + \frac{0.03}{0.04 * 1.17} + \frac{0.1311}{0.8 * 1.17}}$$

$$Q_{\text{cond}} = 1446.40 \text{ W}$$

Por convección

$$Q_{\text{conv}} = \frac{T_f - T_o}{A * h_c} \quad [42]$$

Dónde:

T_f = temperatura de chapa metálica 60 °C = 333.15°K

T_o = temperatura ambiente 10 °C = 283.15°K

A = área de la base del horno 1.17 m²

h_c = coeficiente de transferencia de calor de la base del horno 4.93 W/m²* K

Reemplazando en la ecuación [42] se obtiene:

$$Q_{\text{conv}} = \frac{333.15 - 283.15}{1.17 * 4.93}$$

$$Q_{\text{conv}} = 8.68 \text{ W}$$

Por radiación

Debido a que el horno esta al aire libre y aunque este en un lugar cerrado no quita que existan perdidas por radiación de las paredes del horno por lo que se calcula dichas pérdidas con la ecuación [22] y los siguientes datos y se obtiene:

ϵ = emisividad térmica del acero 0.8

σ = constante de Stefan-Boltzmann $5.67\text{E-}8 \text{ W/ m}^2\text{*K}^4$

A_s = área calentada

T_f = temperatura de superficie $60 \text{ }^\circ\text{C}$

T_o = temperatura ambiente $10 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{\text{rad}} = 0.8 * 5.67\text{E-}8 * 0.53 * (333.15^4 - 283.15^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = 140.30 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total base}} = Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}}$$

$$Q_{\text{total base}} = 1446.40 + 8.68 + 140.30$$

$$Q_{\text{total base}} = 1595.39 \text{ W}$$

3.1.6.5. Pérdidas de calor en la tapa del horno

Por conducción

$$Q_{\text{cond}} = \frac{T_f - T_o}{\frac{e_{\text{refrac}}}{K_{\text{refrac}} * A}} \quad [43]$$

Dónde:

T_f = temperatura de cámara de combustión $1400 \text{ }^\circ\text{C} = 1673.15 \text{ }^\circ\text{K}$

T_o = temperatura ambiente $10 \text{ }^\circ\text{C} = 283.15 \text{ }^\circ\text{K}$

A = área de la tapa del horno 0.234 m^2

K_{refrac} = conductividad térmica del ladrillo refractario $1.05 \text{ W/m}^\circ\text{K}$

e_{refrac} = espesor del ladrillo refractario 0.065 m

Reemplazando en la ecuación [43] se obtiene:

$$Q_{\text{cond}} = \frac{1673.15 - 283.15}{\frac{0.065}{1.05 * 0.234}}$$

$$Q_{\text{cond}} = 5249.91 \text{ W}$$

Por convección

Reemplazando los siguientes datos en la ecuación [39] se obtiene:

T_f = temperatura de cámara de combustión $1400 \text{ }^\circ\text{C} = 1673.15 \text{ }^\circ\text{K}$

T_o = temperatura de la chapa metálica $60 \text{ }^\circ\text{C} = 333.15 \text{ }^\circ\text{K}$

A = área de la tapa del horno 0.234 m^2

h_c = coeficiente de transferencia de calor de la tapa del horno $h_c = 3.42$
 $W/m^2 \cdot K$

Reemplazando en la ecuación [42] se obtiene:

$$Q_{conv} = \frac{1673.15 - 333.15}{0.234 * 3.42}$$

$$Q_{conv} = 1677.01 \text{ W}$$

Por radiación

Debido a que el horno esta al aire libre y aunque este en un lugar cerrado no quita que existan perdidas por radiación de las paredes del horno por lo que se calcula dichas pérdidas con la ecuación [22] y los siguientes datos y se obtiene:

ϵ = emisividad térmica del acero 0.8

σ = constante de Stefan-Boltzmann $5.67E-8 \text{ W/ m}^2 \cdot K^4$

A_s = área calentada

T_f = temperatura de superficie $60 \text{ }^\circ C$

T_o = temperatura ambiente $10 \text{ }^\circ C$

$$Q_{rad} = 0.8 * 5.67E-8 * 0.059 * (333.15^4 - 283.15^4)$$

$$Q_{rad} = 15.76 \text{ W}$$

$$Q_{total \text{ tapa}} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad}$$

$$Q_{total \text{ tapa}} = 5249.91 + 1677.01 + 15.76$$

$$Q_{total \text{ tapa}} = 6942.68 \text{ W}$$

3.1.6.6. Pérdida total de energía del horno

$$Q_{\text{perd total}} = Q_{\text{crisol}} + Q_{\text{pared ex}} + Q_{\text{pared int}} + Q_{\text{base}} + Q_{\text{tapa}}$$

$$Q_{\text{perd total}} = 6526.40 \text{ W} + 43694.26 \text{ W} + 1600.15 \text{ W} + 1595.39 \text{ W} + 6942.68 \text{ W}$$

$$Q_{\text{perd total}} = 60358.87 \text{ W}$$

$$Q_{\text{perd total}} = 51848.27 \text{ Kcal/h}$$

3.1.6.7. Balance de energía

Usando la ecuación [11] y con los datos obtenidos se obtiene:

Q_{co} = calor liberado por el combustible (Kcal/h)

Q_{p} = calor perdido en el horno 51848.27 Kcal/h

Q_{u} = Calor útil para la fusión 44753.21 Kcal / h

$$Q_{\text{co}} = 51848.27 + 44753.21$$

$$Q_{\text{co}} = 96601.48 \text{ Kcal/h}$$

3.1.7. Cálculo de la eficiencia del horno

Se calcula mediante la ecuación:

$$N\% = \frac{Q_{\text{u}}}{Q_{\text{co}}} * 100\% \quad [44]$$

Dónde:

N% = eficiencia del horno

Qco = calor liberado por el combustible 96601.48 Kcal/h

Qu = Calor útil para la fusión 44753.21 Kcal / h

Reemplazando en la ecuación [44] se tiene:

$$N\% = \frac{44753.21}{96601.48} * 100\%$$

$$N\% = 46.33\%$$

Esta eficiencia se da al arranque es decir con el horno frio, la cual aumentara para las siguientes fundiciones.

3.1.8. Cálculo de cantidad de combustible

Para este cálculo vale recalcar que el combustible elegido es el diesel como se menciona en el capítulo 2 la sección 2.6.3 por lo tanto se obtendrá la cantidad de Kg / h de diesel que se necesitara para el tiempo de fundición que se ha estimado con la siguiente expresión:

(Trinks)

$$m_c = \frac{Q_{total}}{H_d} \quad [45]$$

Dónde:

mc = consumo másico total de combustible (Kg/h)

Qtotal = calor liberado por el combustible 96601.48 Kcal/h

Hd = poder calórico del diesel (10221 Kcal/Kg)

Así reemplazando en la ecuación [45] se obtiene:

$$\dot{m}_c = \frac{96601.48}{10221}$$

$$\dot{m}_c = 9.45 \text{ Kg/h}$$

Con esto se obtiene el flujo de combustible a través de la siguiente expresión:

(Trinks)

$$\dot{V}_c = \dot{m}_c * V \quad [46]$$

Dónde:

\dot{V}_c = flujo de combustible en m³ / h

\dot{m}_c = flujo másico Kg/h

V = volumen específico del combustible Diesel (0.0012m³/Kg)

Reemplazando en la ecuación [46] y se obtiene:

$$\dot{V}_c = 9.45 * 0.0012$$

$$\dot{V}_c = 0.011 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_c = 2.9 \text{ gal/h}$$

3.1.9. Cálculo de diámetro de la boquilla del quemador

Como se conoce que el aire, el agua y el diesel en condiciones normales se comportan como fluidos newtonianos se puede obtener la siguiente expresión:

$$A = \frac{Q}{V} \quad [47]$$

Dónde:

A: área de salida de la boquilla

Q: caudal de combustible (0.011 m³/h = 3.057E-6 m³/s)

V: velocidad del aire

Teniendo en cuenta que se encuentra una habitación cerrada no se espera velocidad de viento mayor 12 m/s del ventilador y para este estudio se estima la velocidad del aire de 10 m/s.

Reemplazando en la ecuación [47] se obtiene:

$$A = \frac{3.056E - 6}{10}$$

$$A = 3.056E-7 \text{ m}^2$$

Con el área calculada podemos determinar el diámetro de boquilla:

$$A = \pi r^2 \quad [48]$$

Así reemplazando en la ecuación [48] y despejando R se obtiene:

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$R = \sqrt{\frac{3.056E-7}{\pi}}$$

$$R = 3.12E-4 \text{ m}$$

$$D = 6.24E-4 \text{ m} = 0.62 \text{ mm}$$

3.1.10. Cálculo de la cantidad de aire para la combustión

Para determinar el volumen másico del aire necesario para la combustión empleamos la siguiente expresión:

$$\dot{V}_a = 10.25 \cdot \dot{V}_c + 0.2924 \cdot (10.25 \cdot \dot{V}_c) \quad [49]$$

(Oviedo, 1970)

Reemplazando en la ecuación [49] se obtiene:

$$\dot{V}_a = 10.25 \cdot 0.011 + 0.2924 \cdot (10.25 \cdot 0.011)$$

$$\dot{V}_a = 0.146 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Multiplicado por la densidad del diesel (865.25 Kg/m³) se obtiene el flujo másico del aire:

$$\dot{m}_a = 0.146 \text{ m}^3 / \text{h} \cdot 865.25 \text{ Kg/m}^3$$

$$\dot{m}_a = 126.33 \text{ kg/h}$$

3.2. Diseño mecánico

Chapa metálica

Peso de la cilindro sin tapa

$$W_{cst} = \pi * d * h * e * \rho \quad [50]$$

$$W_{cst} = 3,1416 * 1,22 * 0,95 * 0,004 * 7850$$

$$W_{cst} = 114,33 \text{ kg}$$

Peso de la cilindro sin tapa=114,33 kg

Peso tapa

$$W_t = \pi * d^2 * e * \rho \quad [51]$$

$$W_t = 3,1416 * 0,61^2 * 0,004 * 7850$$

$$W_t = 36,71 \text{ kg}$$

Peso tapa= 36,71 kg

Peso chapa metálica = 114,33 + 36,71= 152 kg

Ladrillos aislantes

$$W_{la} = n * W_{ula} \quad [52]$$

$$W_{cst} = 150 * 4$$

$$W_{cst} = 600 \text{ kg}$$

Peso de ladrillos aislantes= 600 kg

Ladrillos Refractarios

$$W_{lr} = n * W_{ulr} \quad [53]$$

$$W_{cst} = 160 * 4,05$$

$$W_{cst} = 648 \text{ kg}$$

Peso de ladrillos= 648kg

3.2.1. Tabla de Pesos

Tabla 9

Resumen pesos de materiales utilizados

Material	Peso[kg]
Acero	152
Ladrillos Refractarios	600
Ladrillos Aislantes	648
Concreto Refractario	120
Mortero Refractario	113
Amalgama	176
Crisol cargado	200
Fibra de vidrio	20
Quemador	4
Total	2033

Se considera una sobre carga del 15 %

$$WT = W_t + W_t * 15\% \quad [54]$$

$$WT = 2033 + 2033 * 15\%$$

$$WT = 2338,95$$

Por lo tanto el peso quedaría en 2337,95 para trabajar con cantidades completas dejamos el peso en 2338 kg.

3.2.2. Diagramas de cuerpo libre

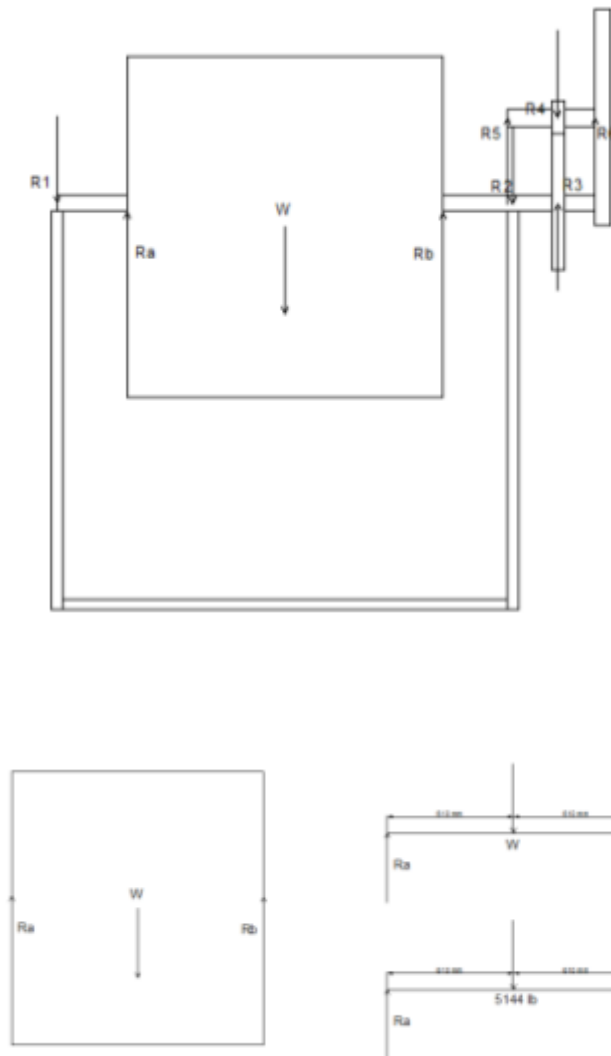


Figura 11. Diagrama de cuerpo libre

DCL

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_a + R_b - 5144 \text{ lb} = 0$$

$$R_a + R_b = 5144 \text{ lb}$$

$$5144 \text{ lb} = 22881,65 \text{ N}$$

$$\Sigma M_a \odot = 0$$

$$-22881,65 \text{ N}(0,61\text{m}) + R_b(1,22\text{m}) = 0$$

$$R_b = \frac{22881,65 \text{ N}(0,61\text{m})}{1,22 \text{ m}}$$

$$R_b = \frac{13957,81 \text{ Nm}}{1,22 \text{ m}}$$

$$R_b = 11440,83 \text{ N}$$

$$R_a = 11440,82 \text{ N}$$

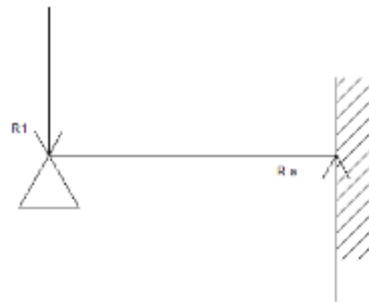


Figura 12. Esfuerzos en el Eje 1

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_a - R_1 = 0$$

$$R_a = R_1$$

$$R_1 = 11440,82 \text{ N}$$

Distancia de R_a a R_1 es 30mm

$$P = 11440,82 \text{ N.}$$

3.2.3. Diseño de eje 1

3.2.3.1. Diseño de tensión por esfuerzo de corte:

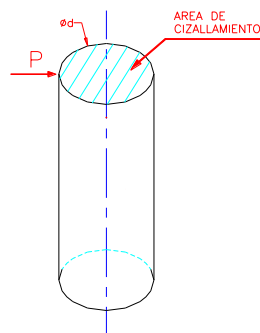


Figura 13. Diseño de esfuerzos de corte

$$S_{sy} = 0,57 * S_y \quad [55]$$

$$S_{sy} = 0,57 * 250 \text{MPa}$$

$$S_{sy} = 142,5 \text{ MPa}$$

$$\tau_{dis} = \frac{S_{sy}}{N} \quad [56]$$

Donde N, es el factor de seguridad

$$N = 1,75$$

$$\tau_{dis} = \frac{142,5}{1,75}$$

$$\tau_{dis} = 81,43 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de corte:

$$\tau_{dis} = \frac{4 * V}{3 * A} \quad [57]$$

Dónde:

V es la fuerza aplicada P, y Ac es el área del eje sometida a corte definida por:

$$A_c = \frac{\pi * d^2}{4} \quad [58]$$

Reemplazando la ec. [58] en la ec. [57] se obtiene:

$$\tau_{dis} = \frac{16 * P}{3 * \pi * d^2}$$

Despejando el diámetro “d”, se obtiene:

$$d = \sqrt{\frac{16 * P}{3 * \pi * \tau_{dis}}}$$

Resolviendo para P = 12966.57 N

$$d = \sqrt{\frac{16 * 11440,82 \text{ N}}{3 * \pi * 81,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

Se determina que $d \geq 15,44 \text{ mm}$

3.2.3.2. Diseño bajo cizallamiento:

Reemplazando en [55]

$$S_{sy} = 0,57 * 250 \text{ MPa}$$

$$S_{sy} = 142,5 \text{ MPa}$$

Reemplazando en [56]

Donde N, es el factor de seguridad

$$N = 1,75$$

$$\tau_{\text{dis}} = \frac{142,5}{1,75}$$

$$\tau_{\text{dis}} = 81.43 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de corte:

(Joseph E. Shigley, Charles R. Mishke, 2002)

$$\tau_{\text{dis}} = \frac{F}{A_c} \quad [59]$$

Dónde:

F es la fuerza aplicada P

A_c es el área del eje sometida a cizallamiento definida por:

La fórmula [58]

Remplazando la ec. [59] en la ec. [58] se obtiene:

$$\tau_{\text{dis}} = \frac{4 * P}{\pi * d^2}$$

Despejando el diámetro “d”, se obtiene:

$$d = \sqrt{\frac{4 * P}{\pi * \tau_{\text{dis}}}}$$

Resolviendo para P = 11440,82 N

$$d = \sqrt{\frac{4 * 11440,82 \text{ N}}{\pi * 81,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

Se determina que $d \geq 13,37 \text{ mm}$

3.2.3.3. Diseño por aplastamiento:

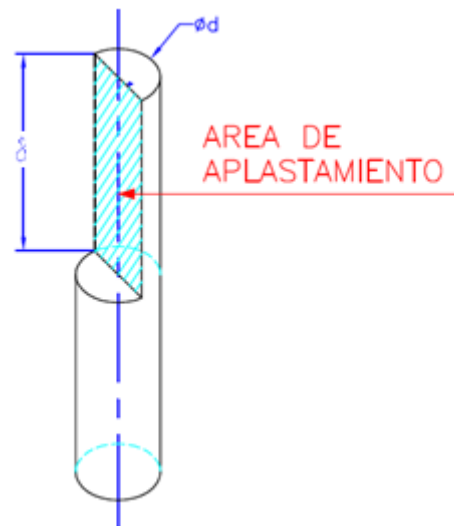


Figura 14. Diseño por aplastamiento en el eje

$$S_{sy} = 0,9 * S_y \quad [i \text{ Error! Marcador no definido.}]$$

$$S_{sy} = 0,9 * 250 \text{MPa}$$

$$S_{sy} = 225 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{apl} = \frac{S_{sy}}{N} \quad [61]$$

Donde N, es el factor de seguridad

$$N = 1,75$$

$$\sigma_{apl} = \frac{225}{1,75}$$

$$\sigma_{apl} = 128,57 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de corte:

$$\sigma_{apl} = \frac{F}{A_{apl}} \quad [62]$$

Dónde:

F es la fuerza aplicada P

A_{apl} es el área de aplastamiento definida por

$$A_{apl} = d * \delta \quad [63]$$

Reemplazando la ec. [63] en la ec. [62]; se obtiene:

$$\sigma_{apl} = \frac{P}{d * \delta}$$

Despejando el diámetro “d”, se obtiene:

$$d \geq \frac{P}{\sigma_{apl} * \delta}$$

Resolviendo para $P = 11440,82 \text{ N}$

$$d \geq \frac{11440,82 \text{ N}}{128,57 * 34,1 \text{ mm}}$$

Se determina que $d \geq 2,61 \text{ mm}$

3.2.3.4. Diseño por flexión:

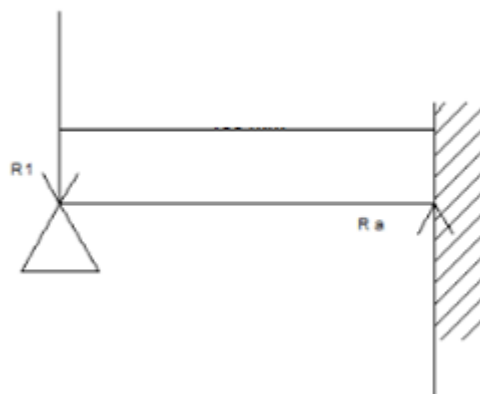


Figura 15. Flexión del eje.

Cálculo del momento flector máximo:

(Joseph E. Shigley, Charles R. Mishke, 2002)

$$M_c = 11440,82 \text{ N} * 30\text{mm}$$

$$M_c = 343224,60 \text{ N} * \text{mm}$$

$$\sigma_{\text{dis}} = \frac{S_y}{N} \quad [50]$$

Donde N, es el factor de seguridad

$$N=1,75$$

$$\sigma_{\text{dis}} = \frac{250 \text{ MPa}}{1,75} = 142,83 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{dis}} = 142,53 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de flexión:

$$\sigma_{\text{dis}} = \frac{M_{\text{max}}}{Z} \quad [65]$$

Dónde:

Z es el módulo de la sección

$$Z = \frac{\pi * d^3}{32} \quad [66]$$

Reemplazando la ec. [66] en la ec. [65]; se obtiene:

$$\sigma_{\text{dis}} = \frac{32 * M_{\text{max}}}{\pi * d^3}$$

Despejando el diámetro "d", se obtiene:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 * M_{\text{max}}}{\pi * \sigma_{\text{dis}}}}$$

Resolviendo para P = 11440,82 N.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 * 343224,60 \text{ N} * \text{mm}}{\pi * 142,53 \text{ MPa}}}$$

Se determina que $d \geq 29,05 \text{ mm}$

De esta manera se escoge por seguridad el mayor de todos los diámetros calculados anteriormente; como resultado se obtiene que el diámetro del eje debe ser de 30 mm, el material a utilizar para éste eje será el acero ASTM A-36.

Por lo que se colocara un eje de 30 mm en acero ASTM-36

3.2.3.5. Selección de rodamientos

Del catálogo de SKF se selecciona el rodamiento y chumacera con el diámetro interno del eje seleccionado

Dimensiones principales		Capacidades de carga básica		Carga de soporte admisible	Masa	Unidad de rodamientos	Designaciones del pedido				
d	A	H	L				C	estática	radial	Unidad de rodamientos	Soporte
mm					kN		kg				
30	38	66	119	19,5	11,2	2,6	0,45	P 30 FH	P 62	YET 206	-

Prisionero	M8x1
Par de apriete recomendado [Nm]	-
Tamaño de la llave hexagonal [mm]	4

Figura 16. Selección de rodamientos

Fuente: (SKF, 2015)

3.2.3.6. Dimensionamiento de la soldadura que une al eje con el cuerpo del horno

La soldadura a utilizarse será un filete de penetración parcial entre el eje y la chapa metálica que recubre al horno

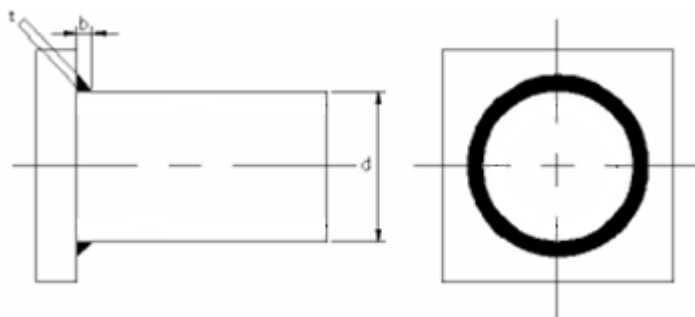


Figura 17. Dimensionamiento de soldadura en Eje

La soldadura soporta dos clases de esfuerzos, los esfuerzos normales y los cortantes y se los determina de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{5.66 \times M}{\pi \times b \times d^2} \quad [67]$$

$$b = \frac{5.66 \times M}{\sigma \times \pi \times d^2}$$

$$b = \frac{5.66 \times 343224,60}{142.53 \times 3.1416 \times 30^2}$$

$$b = \frac{19426561,24}{402994,081}$$

$$b = 4,82 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{F}{\pi \times b \times d \times \cos 45^\circ} \quad [68]$$

$$b = \frac{F}{\pi \times \tau \times d \times \cos 45^\circ}$$

$$b = \frac{11440,82}{3.1416 \times 81,43 \times 30 \times \cos 45^\circ}$$

$$b = \frac{11440,82}{5426,71}$$

$$b = 2,11 \text{ mm}$$

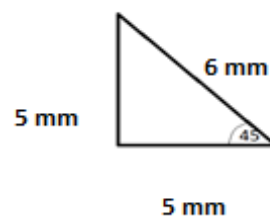


Figura 18. Triangulo de Pitágoras

De esta manera se escoge por seguridad el mayor de todos los valores obtenidos de cálculos 6 mm

Con esto determinamos que se debe tener una soldadura de filete de pierna de mínimo 5 mm

3.2.4. Diseño de eje 2

Conjunto del Volante y Engranés

$$T = F.R.2 [51]$$

(Para el cálculo de torque máximo se multiplica por 2 ya que se utiliza la fuerza de los 2 brazos)

F= 23 kg según normativa niosh de ergonomía y levantamiento de cargas

$$T = (23 \text{ Kg} \cdot 0,25 \text{ m})^2$$

$$T = 11,5 \text{ Kg.m (Torque máximo requerido para girar el tanque)}$$

$$T = 112,70 \text{ N.m}$$

Fuerzas que actúan en los engranes rectos:

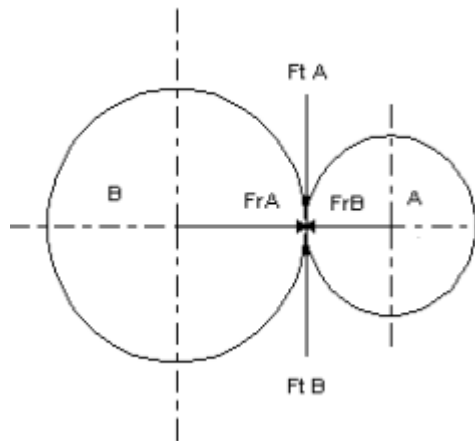


Figura 19. Fuerzas en Engranes

Diagrama de las Fuerzas que Actúan en los Engranes Rectos

Se utilizara un ángulo de presión Θ 20°

Fuerzas tangenciales:

$$F_t = \frac{T}{\left(\frac{D}{2}\right)} \quad [70]$$

Piñón:

$$F_t = \frac{112.7 \text{ Nm}}{\left(\frac{0.092}{2}\right)}$$

$$F_t = \frac{112.7 \text{ Nm}}{0,046}$$

$$F_t = 2450 \text{ N}$$

Engrane:

$$F_t = \frac{112,7 \text{ Nm}}{\left(\frac{0,47\text{m}}{2}\right)}$$

$$F_t = \frac{112,7 \text{ Nm}}{0,235}$$

$$F_t = 479,57 \text{ N}$$

Fuerzas Radiales:

$$F_r = F_t * \tan\theta \quad [71]$$

Piñón:

$$F_r = 2450 \text{ N} * \tan 20^\circ$$

$$F_r = 891,55 \text{ N}$$

Engrane:

$$F_r = 479,57 \text{ N} * \tan 20^\circ$$

$$F_r = 174,52 \text{ N}$$

Fuerzas Resultantes:

$$F_{re} = \sqrt{F_t^2 + F_r^2} \quad [72]$$

Piñón:

$$F_{re} = \sqrt{6002500 \text{ N}^2 + 794870,32 \text{ N}^2}$$

$$F_{re} = 2607,18 \text{ N}$$

Engrane:

$$F_{re} = \sqrt{229991,67 \text{ N}^2 + 30456,24 \text{ N}^2}$$

$$F_{re} = 510,34 \text{ N}$$

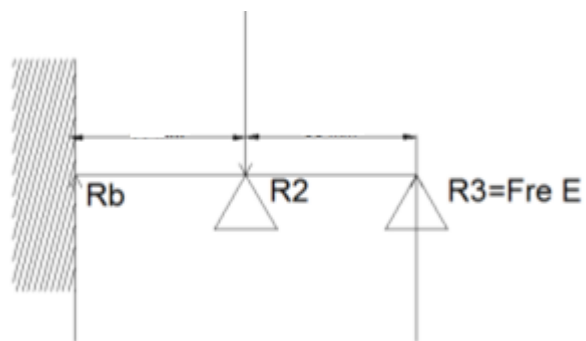


Figura 20. DCL de fuerzas en el Eje 2

DCL

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_b - R_2 + F_{reE} = 0$$

$$11440,83 \text{ N} - R_2 + 510,34 \text{ N} = 0$$

$$R_2 = 11951,17 \text{ N}$$

$$R_b = 11440,83 \text{ N}$$

$$R_2 = 11951,17 \text{ N}$$

$$F_{reE} = 510,34 \text{ N}$$

$P = 11951,17 \text{ N}$ Por ser el mayor valor que interviene en el eje 2

3.2.4.1. Diseño de tensión por esfuerzo de corte:

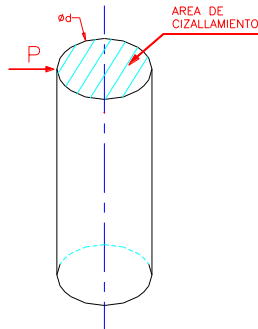


Figura 13. Diseño de esfuerzos de corte

Reemplazando en la ec. [55] se obtiene:

$$S_{sy} = 0,57 * 250 \text{MPa}$$

$$S_{sy} = 142,5 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la ec. [56] y donde N, es el factor de seguridad, se obtiene:

$$N = 1,75$$

$$\tau_{dis} = \frac{142,5}{1,75}$$

$$\tau_{dis} = 81,43 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de corte [57]:

Reemplazando en la ecuación [58] en la ec. [57] y despejando "d", se obtiene:

$$d = \sqrt{\frac{16 * P}{3 * \pi * \tau_{dis}}}$$

Resolviendo para $P = 13449,32 \text{ N}$

$$d = \sqrt{\frac{16 * 11951,17 \text{ N}}{3 * \pi * 81,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

Se determina que $d \geq 15,78 \text{ mm}$

3.2.4.2. Diseño bajo cizallamiento:

Reemplazando en la ec. [55], se obtiene:

$$S_{sy} = 0,57 * 250 \text{ MPa}$$

$$S_{sy} = 142,5 \text{ MPa}$$

Reemplazando en [56], donde N es el factor de seguridad, se obtiene:

$$N = 1,75$$

$$\tau_{dis} = \frac{142,5}{1,75}$$

$$\tau_{dis} = 81.43 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de corte formula [59]

Dónde:

F es la fuerza aplicada P

Ac es el área del Eje sometida a cizallamiento definida por:

Remplazando en la ecuación [59] en la ec.[58] y despejando "d", se obtiene:

$$d = \sqrt{\frac{4 * P}{\pi * \tau_{dis}}}$$

Resolviendo para $P = 11951,17 \text{ N}$

$$d = \sqrt{\frac{4 * 11951,17 \text{ N}}{\pi * 81,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

Se determina que $d \geq 13,67 \text{ mm}$

3.2.4.3. Diseño por aplastamiento:

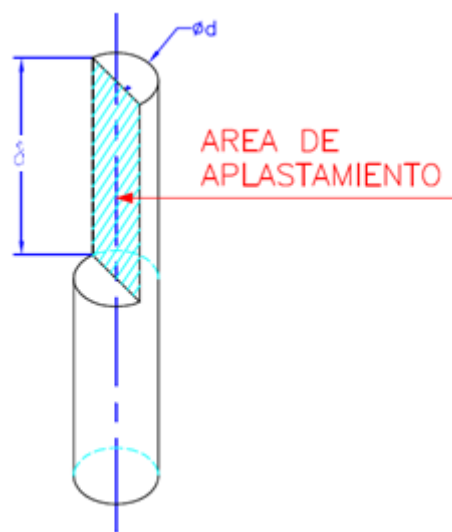


Figura 14. Diseño por aplastamiento en el eje

Reemplazando en la ec. [60]

$$S_{sy} = 0,9 * 250 \text{ MPa}$$

$$S_{sy} = 225 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la ecuación [61], donde N es el factor de seguridad; se obtiene:

$$N = 1,75$$

$$\sigma_{\text{apl}} = \frac{225}{1,75}$$

$$\sigma_{\text{apl}} = 128,57 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de corte:

Usando la ecuación [62]

Dónde:

F es la fuerza aplicada P

A_{apl} es el área de aplastamiento definida por la ecuación [63]

Reemplazando la ecuación. [63] en la ecuación. [62]; se obtiene:

$$\sigma_{apl} = \frac{P}{d * \delta}$$

Despejando el diámetro “d”, se obtiene:

$$d \geq \frac{P}{\sigma_{apl} * \delta}$$

Resolviendo para P = 11951,17 N

$$d \geq \frac{11951,17 \text{ N}}{128,57 * 34,1 \text{ mm}}$$

Se determina que $d \geq 2,72 \text{ mm}$

3.2.4.4. Diseño por flexión:

$$P_1 = R_b = 11440,83 \text{ N}$$

$$P_2 = R_2 = 11951,17 \text{ N}$$

$$P_3 = F_{reE} = 510,34 \text{ N}$$

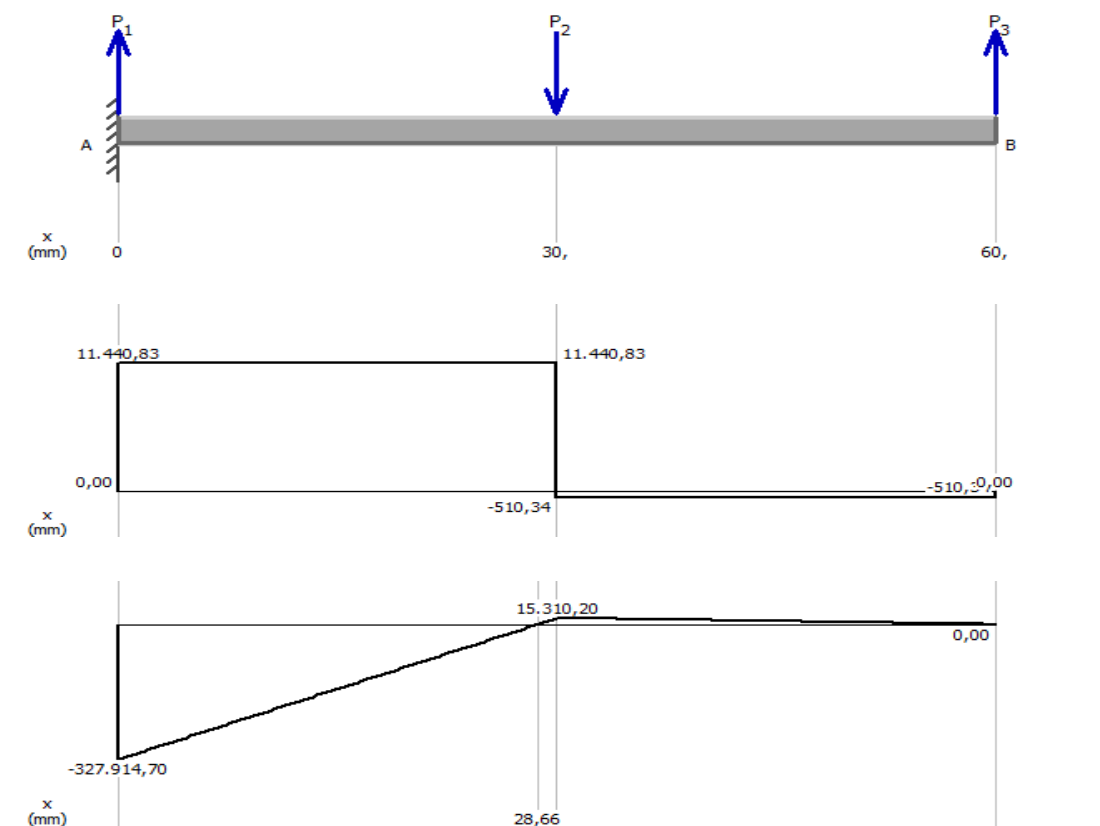


Figura 21. Cálculo del momento flector máximo

$$M_c = 372914,70 \text{ Nmm}$$

Reemplazando en la ec.[64] y donde N , es el factor de seguridad

$$N = 1,75$$

$$\sigma_{dis} = \frac{250 \text{ MPa}}{1,75} = 142,85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{dis} = 142,85 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de flexión:

Usando la ecuación [65]

Dónde:

Z es el módulo de la sección, dado por la ecuación [66]

Reemplazando la ecuación. [66] en la ecuación. [65]; se obtiene:

$$\sigma_{dis} = \frac{32 * M_{max}}{\pi * d^3}$$

Despejando el diámetro “d”, se obtiene:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 * M_{max}}{\pi * \sigma_{dis}}}$$

Resolviendo para $M_{max} = 327914,70 \text{ Nmm}$.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 * 327914,70 \text{ Nmm}}{\pi * 142,85 \text{ MPa}}}$$

Se determina que $d \geq 28,59 \text{ mm}$

De esta manera se escoge por seguridad el mayor de todos los diámetros calculados anteriormente; como resultado se obtiene que el diámetro del eje debe ser de 30 mm, el material a utilizar para éste eje será el acero ASTM A-36.

3.2.4.5. Selección de rodamientos

Del catálogo de SKF se selecciona el rodamiento y chumacera con el diámetro interno del eje seleccionado

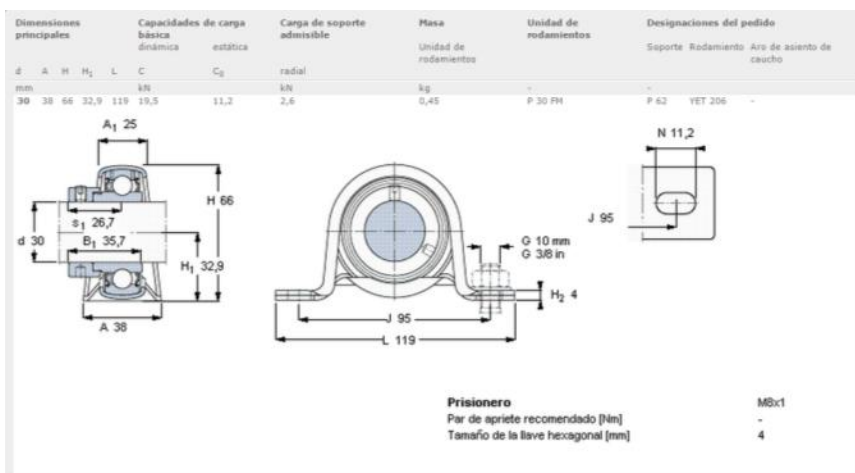


Figura 16. Selección de rodamientos

Fuente: (SKF, 2015)

3.2.4.6. Dimensionamiento de la soldadura que une el eje al cuerpo del horno

La soldadura a utilizarse será un filete de penetración parcial entre el eje y la chapa metálica que recubre al horno

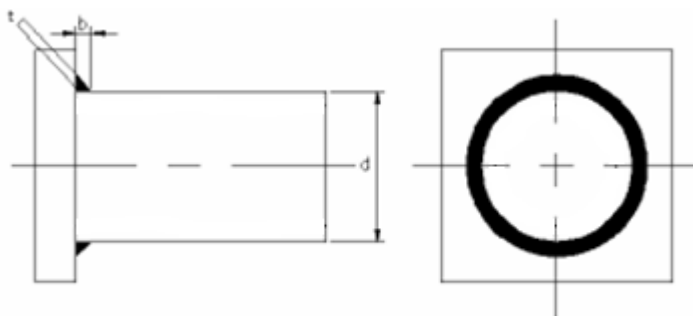


Figura 17. Dimensionamiento de soldadura en Eje

La soldadura soporta dos clases de esfuerzos, los esfuerzos normales y los cortantes y se los determina de la siguiente manera:

Utilizando la ecuación [67] se despeja b

$$b = \frac{5.66 \times M}{\sigma \times \pi \times d^2}$$

$$b = \frac{5.66 \times 327914,70}{142.85 \times 3.1416 \times 30^2}$$

$$b = \frac{1855997,20}{400371,98}$$

$$b = 4,63 \text{ mm}$$

Utilizando la ecuación [68] se despeja b

$$b = \frac{F}{\pi \times \tau \times d \times \cos 45^\circ}$$

$$b = \frac{11951,17}{3.1416 \times 81,43 \times 30 \times \cos 45^\circ}$$

$$b = \frac{14975,06}{5426,72}$$

$$b = 2,11 \text{ mm}$$

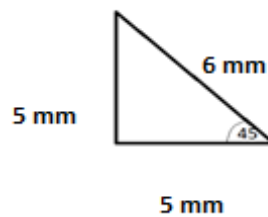


Figura 18. Triángulo de

De esta manera se escoge por seguridad el mayor de todos los valores obtenidos de cálculos 6 mm

Con esto determinamos que se debe tener una soldadura de filete de pierna de mínimo 5 mm

3.2.5. Diseño de eje 3

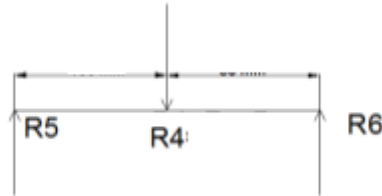


Figura 22. Diagrama de cuerpo libre

DCL

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R5 - R4 + R6 = 0$$

$$2607,17 \text{ N} - R4 + R6 = 0$$

$$R4 - R6 = 2607,17 \text{ N}$$

$$\Sigma M_{R4} \odot = 0$$

$$-2607,17 \text{ N}(0,03 \text{ m}) + R6(0,01 \text{ m}) = 0$$

$$R6 = \frac{2607,17 \text{ N}(0,03 \text{ m})}{0,04 \text{ m}}$$

$$R6 = 1955,38 \text{ N}$$

$$R4 - R6 = 2607,17 \text{ N}$$

$$R4 = 2607,17 \text{ N} + R6$$

$$R4 = 2607,17 \text{ N} + 1955,38 \text{ N}$$

$$R4 = 4562,55 \text{ N}$$

$$R4 = 4562,55 \text{ N}$$

$$R5 = F_{rep} = 2607,17 \text{ N}$$

$$R6 = 1955,38 \text{ N}$$

$P = 4561,55 \text{ N}$ Por ser el mayor valor que interviene en el eje 3

3.2.5.1. Diseño de tensión por esfuerzo de corte:

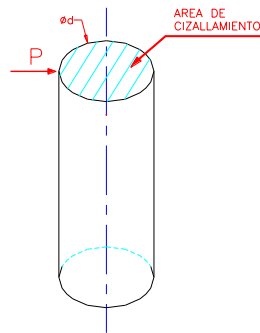


Figura 13. Diseño de esfuerzos de corte

Reemplazando en la ec. [55] se obtiene:

$$S_{sy} = 0,57 * 250 \text{ MPa}$$

$$S_{sy} = 142,5 \text{ MPa}$$

Reemplazando en la ec. [56] y donde N , es el factor de seguridad, se obtiene:

$$N = 1,75$$

$$\tau_{dis} = \frac{142,5}{1,75}$$

$$\tau_{dis} = 81,43 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de corte formula [57]

Reemplazando en la ecuación [58] en la ec. [57] y despejando "d", se obtiene:

$$d = \sqrt{\frac{16 * P}{3 * \pi * \tau_{dis}}}$$

Resolviendo para $P = 4562,55 \text{ N}$

$$d = \sqrt{\frac{16 * 4562,55 \text{ N}}{3 * \pi * 81,43 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

Se determina que $d \geq 9,75 \text{ mm}$

3.2.5.2. Diseño bajo cizallamiento:

Reemplazando en la ec. [55], se obtiene:

$$S_{sy} = 0,57 * 250 \text{ MPa}$$

$$S_{sy} = 142,5 \text{ MPa}$$

Reemplazando en [56], donde N es el factor de seguridad, se obtiene:

$$N = 1,75$$

$$\tau_{dis} = \frac{142,5}{1,75}$$

$$\tau_{dis} = 81.43 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de corte formula [59]

Dónde:

F es la fuerza aplicada P

Ac es el área del Eje sometida a cizallamiento definida por:

Reemplazando en la ecuación [59] en la ec.[58] y despejando "d", se obtiene:

$$d = \sqrt{\frac{4 * P}{\pi * \tau_{dis}}}$$

Resolviendo para P = 4562,55N

F es la fuerza aplicada P

A_{apl} es el área de aplastamiento definida por la ecuación [63]

Reemplazando la ecuación. [63] en la ecuación. [62]; se obtiene:

$$\sigma_{apl} = \frac{P}{d * \delta}$$

Despejando el diámetro “d”, se obtiene:

$$d \geq \frac{P}{\sigma_{apl} * \delta}$$

Resolviendo para P = 4562,55N

$$d \geq \frac{4562,55 \text{ N}}{128,57 * 34,1 \text{ mm}}$$

Se determina que $d \geq 1,04 \text{ mm}$

3.2.5.4. Diseño por flexión:

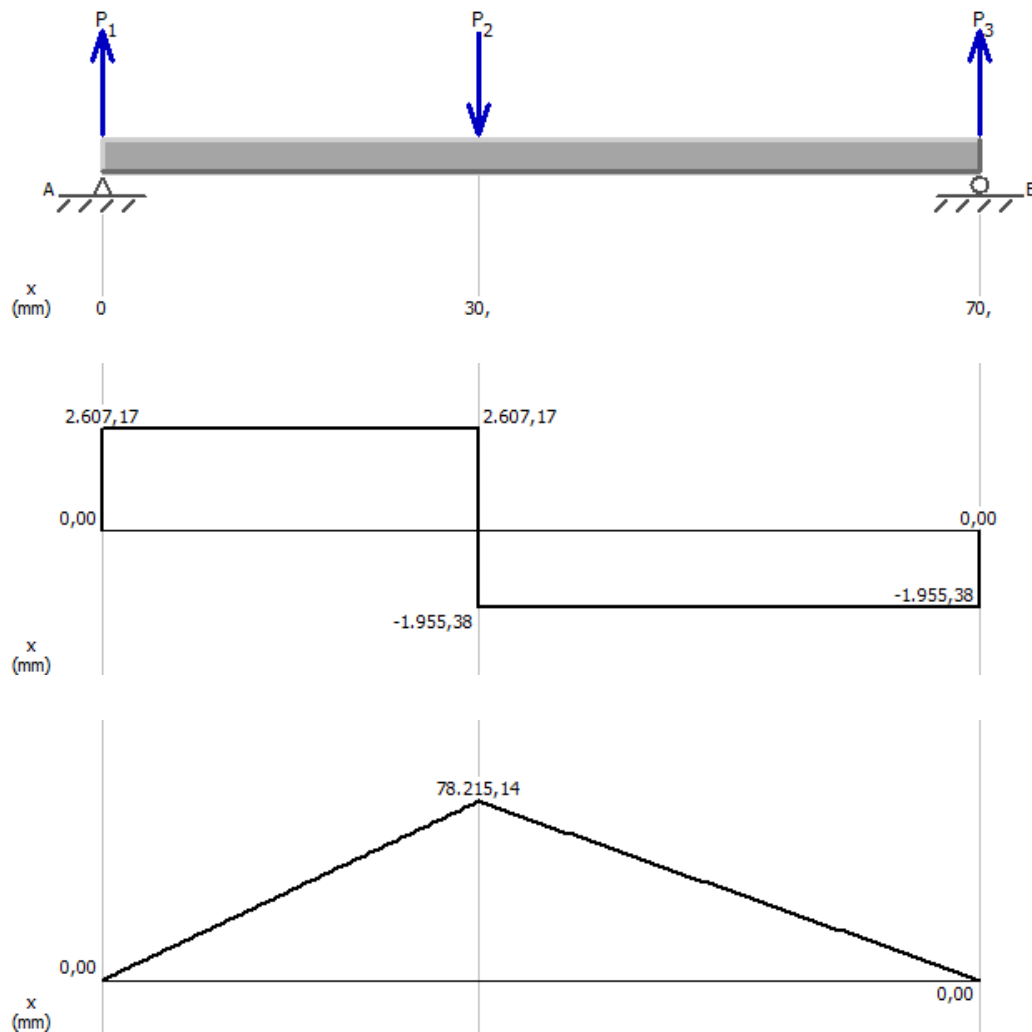


Figura 23. Cálculo del momento flector máximo

Cálculo del momento flector máximo:

$$M_c = 78215,14 \text{ Nmm}$$

Reemplazando en la ec.[64] y donde N, es el factor de seguridad

$$N = 1,75$$

$$\sigma_{\text{dis}} = \frac{250 \text{ MPa}}{1,75} = 142,85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{dis}} = 142,85 \text{ MPa}$$

Fórmula de tensión por esfuerzo de flexión:

Usando la ecuación [65]

Dónde:

Z es el módulo de la sección, dado por la ecuación [65]

Reemplazando la ecuación. [66] en la ecuación. [65]; se obtiene:

$$\sigma_{dis} = \frac{32 * M_{max}}{\pi * d^3}$$

Despejando el diámetro “d”, se obtiene:

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 * M_{max}}{\pi * \sigma_{dis}}}$$

Resolviendo para $M_{max} = 78215,14 \text{ Nmm}$.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 * 78215,14 \text{ Nmm}}{\pi * 142,85 \text{ MPa}}}$$

Se determina que $d \geq 17,73 \text{ mm}$

De esta manera se escoge por seguridad el mayor de todos los diámetros calculados anteriormente; como resultado se obtiene que el diámetro del eje debe ser de 20 mm, por proceso constructivo y porqué el cálculo lo permite se selección eje e 30 mm el material a utilizar para éste eje será el acero ASTM A-36.

3.2.5.5. Selección de rodamientos

Del catálogo de SKF se selecciona el rodamiento y chumacera con el diámetro interno del eje seleccionado

Dimensiones principales		Capacidades de carga básica		Carga de soporte admisible	Masa	Unidad de rodamientos	Designaciones del pedido				
d	A	H	H ₂	L	C	C _d	radial		Soporte	Rodamiento	Ais de asiento de caucho
mm							kN	kg			
30	38	66	32,9	119	19,5	11,2	2,6	0,45	P 30 FH	P 62	YET 206

Prisionero	MBx1
Par de apriete recomendado [Nm]	-
Tamaño de la llave hexagonal [mm]	4

Figura 16. Selección de rodamientos

Fuente: (catálogo SKF,2015)

3.2.6. Diseño de engranes

Tren de engranajes:

$$TV = \frac{N_B}{N_A} \quad [73]$$

$$TV = \frac{186}{35}$$

$$TV = 5,31 \text{ rpm}$$

$$n_A = 1 \text{ rpm}$$

$$n_B = \frac{n_A}{TV}$$

$$n_B = \frac{1}{5,31}$$

$$n_B = 0,19 \text{ rpm}$$













Tamaño de diente	Pitch	Tamaño de diente	Pitch
	40		8
	32		6
	24		5
	20		4
	16		3
	12		
	10		

Figura 24. Tren de engranes

Fuente (Robert L. Mott, P. E., 2006)

Díámetro de paso:

Piñón:

Engrane:

$$D_A = \frac{N_A}{P_d} \text{ [¡ Error! Marcador no definido.]}$$

$$D_B = \frac{N_B}{P_d} \text{ [74]}$$

$$D_A = \frac{35}{10}$$

$$D_B = \frac{186}{10}$$

$$D_A = 3,5 \text{ inch}$$

$$D_B = 18,6 \text{ inch}$$

PASO CIRCULAR:

$$p = \frac{\pi}{P_d} \quad [75]$$

$$p = \frac{\pi}{10}$$

$$p = 0,31416 \text{ inch}$$

CABEZA:

$$a = \frac{1}{P_d} \quad [76]$$

$$a = \frac{1}{10}$$

$$a = 0,10 \text{ inch}$$

RAÍZ:

$$b = \frac{1,25}{P_d} \quad [77]$$

$$b = \frac{1,25}{10}$$

$$b = 0,125 \text{ inch}$$

ESPACIAMIENTO:

$$C = \frac{0,25}{P_d} \quad [78]$$

$$C = \frac{0,25}{10}$$

$$C = 0,025$$

PROFUNDIDAD TOTAL:

$$ht = a + b \quad [79]$$

$$ht = 0,10 \text{ inch} + 0,125 \text{ inch}$$

$$ht = 0,225 \text{ inch}$$

PROFUNDIDAD DE TRABAJO:

$$hk = 2a \quad [80]$$

$$hk = 2(0,10) \text{ inch}$$

$$hk = 0,20 \text{ inch}$$

ESPESOR DE LOS DIENTES:

$$t = \frac{p}{2} \quad [81]$$

$$t = \frac{0,31416 \text{ inch}}{2}$$

$$t = 0,16 \text{ inch}$$

DIÁMETRO EXTERIOR:**Piñón:****Engrane:**

$$D_o = D_p + 2a \quad [i \text{ Error! Marcador no definido.}]$$

$$D_o = D_G + 2a \quad [82]$$

$$D_o = 3,5 \text{ inch} + 2(0,10) \text{ inch}$$

$$D_o = 18,6 \text{ inch} + 2(0,10) \text{ inch}$$

$$D_o = 3,70 \text{ inch}$$

$$D_o = 18,80 \text{ inch}$$

DISTANCIA CENTRAL:

$$C = \frac{N_p + N_G}{2 * P_d} \quad [83]$$

$$C = \frac{35 + 186}{2 * 10}$$

$$C = \frac{221}{20}$$

$$C = 11,05 \text{ inch}$$

3.2.7. TENSIONES EN LOS DIENTES DE LOS ENGRANES

ESFUERZOS POR FLEXIÓN:

(Norton, 2011)

$$\sigma_{at} = \frac{wt * P_d}{F * J} * \frac{K_a' * K_s' * K_m' * K_B}{K_v} \quad [84]$$

$$\sigma_{at} < S_{at} \left[\frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \right]$$

ANCHO DE CORONA:

$$\frac{8}{P_d} < F < \frac{16}{P_d} \quad [85]$$

$$\frac{8}{10} < F < \frac{16}{108}$$

$$F = 1 \text{ in.}$$

FACTOR DE FORMA:

Piñón: $J_p = 0,38$

Engrane: $J_o = 0,52$

(Anexo A1)

FACTOR DE APLICACIÓN:

$$K_a = 1.40$$

(Anexo A2)

FACTOR DE TAMAÑO:

$K_s = 1$ (Para $P_d > 5$) (Anexo A3)

FACTOR DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA:

$$\frac{F}{D_p} = \frac{1 \text{ inch}}{3,5 \text{ inch}} \quad [86]$$

$$\frac{F}{D_p} = 0.29$$

$K_m = 1.30$

(Anexo A4)

FACTOR DE CORONA:

$$m_B = \frac{t_r}{h_t} > 1,2 \quad [52]$$

m_b = Relación de respaldo.

t_r = Espesor de corona.

h_t = Profundidad de trabajo.

Entonces

$K_b = 1$

(Anexo A5)

FACTOR DE DINÁMICA:

$$v = \frac{\pi * D_p * n}{12} \quad [88]$$

V = Velocidad tangencial.

D_p = Diámetro de paso del piñón.

n = Número de revoluciones.

Q_v = 6 para engranes comunes.

$$v = \frac{\pi * 3,5 * 1}{12}$$

$$v = \frac{28.27}{12}$$

$$v = 0,92$$

$$K_v = 0.99$$

(Anexo 6)

VELOCIDAD TANGENCIAL ANGULAR (W_t) :

Datos:

$$R_A = 9,30 \text{ inch}$$

$$T_A = F * R_A$$

$$T_A = 46 \text{ lb} * (9,30 \text{ inch})$$

$$T_A = 427,80 \text{ lb} * \text{inch}$$

$$W_t = \frac{T_A}{R_A} \quad [89]$$

$$W_t = \frac{427,80 \text{ lb} * \text{inch}}{9,30 \text{ inch}}$$

$$W_t = 46 \text{ lb}$$

Reemplazo todos los datos obtenidos en la fórmula de esfuerzos por flexión ec. [81].

Piñón:

$$\sigma_{at} = \frac{46 \text{ lb} * 10}{1 \text{ inch} * 0,38} * \frac{1,40 * 1 * 1,30 * 1}{0,99}$$

$$\sigma_{at} = \frac{837,20 \text{ lb}}{0,38 \text{ inch}^2}$$

$$\sigma_{at} = 2225,41 \frac{\text{lb}}{\text{inch}^2}$$

Engrane:

$$\sigma_{at} = \frac{46 \text{ lb} * 10}{1 \text{ inch} * 0,52} * \frac{1,40 * 1 * 1,30 * 1}{0,99}$$

$$\sigma_{at} = \frac{837,2 \text{ lb}}{0,51 \text{ inch}^2}$$

$$\sigma_{at} = 1626,26 \frac{\text{lb}}{\text{inch}^2}$$

Estos valores son utilizados para la selección del material a usarse en los engranes el acero ASTM A36

3.2.8. Diseño por contacto (corrosión)

$$\sigma_{ac} = C_p * \sqrt{\frac{W_t * C_a * C_s * C_m}{F * D_p * I * C_v}} \quad [90]$$

$$\sigma_{ac} < S_{ac} \left[\frac{\text{lb}}{\text{inch}^2} \right]$$

C_p = Coeficiente Elástico

I = Factor de geometría.

D_p = Diámetro de paso del piñón.

$$C_a = K_a$$

$$C_s = K_s$$

$$C_m = K_m$$

$$C_v = K_v$$

COEFICIENTE ELÁSTICO:

$$C_p = 2300$$

(Anexo A7; Para Acero).

RELACIÓN DE ENGRANE (m_G) :

Reemplazando en la ecuación [73]

$$m_G = \frac{186}{72}$$

$$m_G = 5,31$$

Para ingresar a la tabla del anexo se necesitan los siguientes datos:

$$m_G = 5,31$$

$$N_p = 186$$

$$\Theta = 20^\circ$$

$$l = 1,36$$

(Anexo A8)

Reemplazando en la ec. [90]

$$\sigma_{ac} = 2300 * \sqrt{\frac{46 * 1.40 * 1 * 1,30}{1 * 3,5 * 1,36 * 0,99}}$$

$$\sigma_{ac} = 2300 * \sqrt{\frac{83,72}{4,71}}$$

$$\sigma_{ac} = 2300 * \sqrt{17,77}$$

$$\sigma_{ac} = 2300 * 4,21$$

$$\sigma_{ac} = 9694,41 \frac{\text{lb}}{\text{inch}^2}$$

3.2.9. Calculo de altura de ejes en el horno

Chapa metálica

Peso de la cilindro sin tapa=114,33 kg

Distancia de la Base= 453 mm

Peso tapa= 36,71 kg

Distancia de la Base= 2 mm

Base de fibra de vidrio

Peso Fibra de vidrio de la base= 4,5 kg

Distancia a la base= 23 mm

Base de ladrillos aislantes

Peso de la base de ladrillos=150,5 kg

Distancia a la base= 97,5 mm

Base de ladrillos Refractarios

Peso de la base de ladrillos=188,5kg

Distancia a la base= 131,5 mm

Contorno de protección aislante y refractaria

Peso de protección aislante y refractaria = 1327,5 kg

Distancia de la Base= 427,5 mm

Crisol Cargado

Peso del crisol cargado = 200 kg

Distancia a la base= 153,44 mm

Distancia de la base para colocar los ejes = $(51791,49 \text{ kgmm} + 73,42 \text{ kgmm} + 103,5 \text{ kgmm} + 14673,75 \text{ kgmm} + 24787,75 \text{ kgmm} + 567506,25 \text{ kgmm} + 30688 \text{ kgmm}) / (2033 \text{ kg})$

Distancia = 475,07mm

Distancia = 47,51 cm

Selección de perfil para Estructura para bastidor

(Joseph E. Shigley, Charles R. Mishke, 2002)

$$P_c = 4 \frac{\pi^2 * E * I_{\min}}{L^2} \quad [91]$$

P_c= 11440,83 N

E= 2100000kg/cm²

L= 110 cm

$$I_{\min} = \frac{P_c * L^2}{4 * \pi^2 * E}$$

$$I_{\min} = \frac{11440,83 * 110^2}{4 * \pi^2 * 2100000}$$

$$I_{\min} = \frac{138434043}{82305064,7}$$

$$I_{\min} = 1,67$$

TUBO ESTRUCTURAL CUADRADO

Especificaciones Generales

Norma	ASTM A-500
Recubrimiento	Negro o galvanizado
Largo normal	6.00m
Otros largos	Previa Consulta
Dimensiones	Desde 20.00mm a 100.00mm
Espesor	Desde 2.00mm a 3.00mm



DIMENSIONES			AREA	EJES X-Xe Y-Y		
A mm	ESPESOR mm	PESO Kg/m	AREA cm2	I cm4	W cm3	i cm
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,46	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94
50	3,0	4,48	5,61	21,20	8,48	1,91
60	2,0	3,66	3,74	21,26	7,09	2,39
60	3,0	5,42	6,61	35,06	11,69	2,34
75	2,0	4,52	5,74	50,47	13,46	2,97
75	3,0	6,71	8,41	71,54	19,08	2,92
75	4,0	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
100	2,0	6,17	7,74	122,99	24,60	3,99
100	3,0	9,17	11,41	176,95	35,39	3,94
100	4,0	12,13	14,95	226,09	45,22	3,89
100	5,0	14,40	18,36	270,57	54,11	3,84

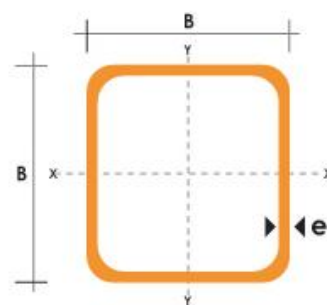


Figura 25. Perfiles Estructurales

Fuente: (Dipac manta, 2015)

Se selecciona el tubo de 50X50X3 mm que tiene una inercia de 1,91 superiores al 1,67.

3.2.10. Diseño del bastidor

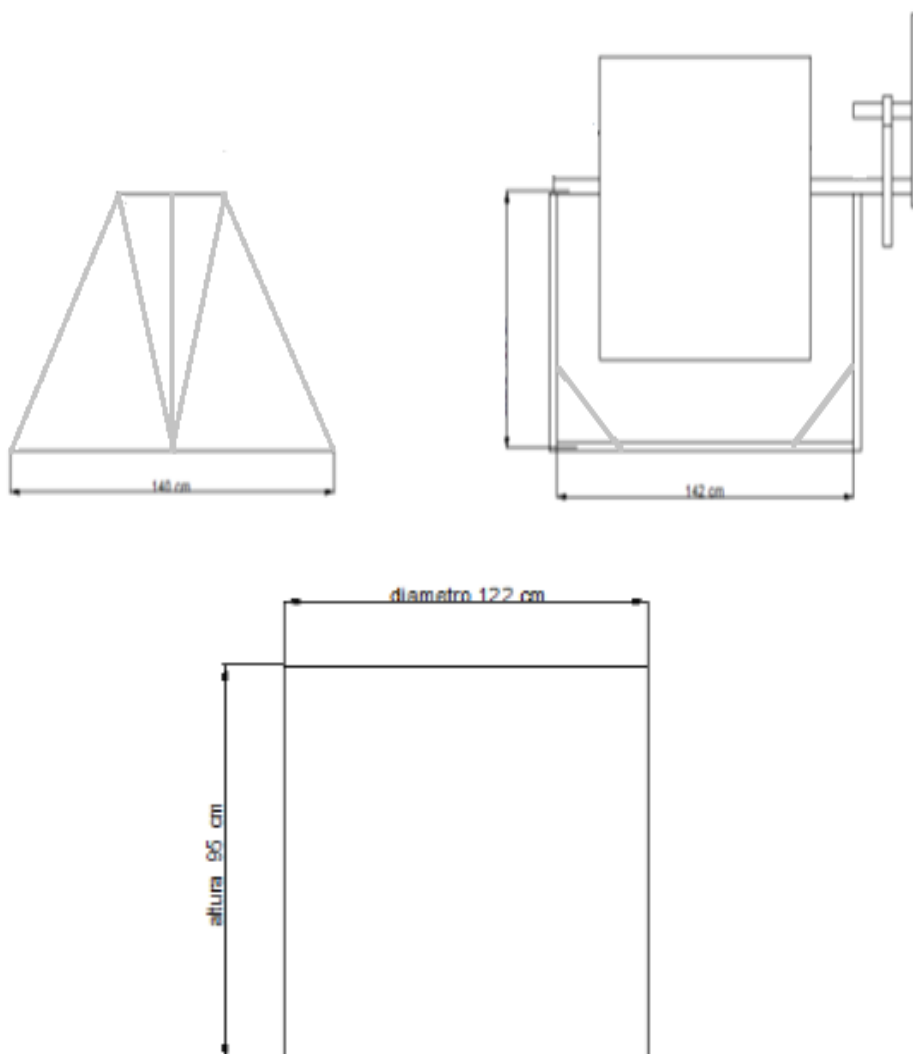


Figura 26. Esquema Bastidor

3.2.11. Simulación del bastidor

Resultados

Tabla 10

Fuerzas y Pares de Reacción en Restricciones

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X,Y,Z)	Magnitud	Componente (X,Y,Z)
Restricción fija:1	11441 N	0 N	0 N m	0 N m
		11441 N		0 N m
		0 N		0 N m

Fuente: (Solid Works , 2012)

Tabla 11

Resumen de Resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	9313110 mm ³	
Masa	73.1079 kg	
Tensión de Von Mises	0.00000317936 MPa	99.0069 MPa
Primera tensión principal	-23.4139 MPa	80.0689 MPa
Tercera tensión principal	-101.588 MPa	16.7572 MPa

Desplazamiento	0 mm	1.39472 mm
Coeficiente de seguridad	2.09076 su	15 su
Tensión XX	-43.4751 MPa	Continua 
Tensión XY	-36.0655 MPa	37.8904 MPa
Tensión XZ	-38.7399 MPa	36.493 MPa
Tensión YY	-56.4174 MPa	42.25 MPa
Tensión YZ	-25.6421 MPa	27.5427 MPa
Tensión ZZ	-61.7821 MPa	43.9667 MPa
Desplazamiento X	-0.292016 mm	0.18274 mm
Desplazamiento Y	-1.00088 mm	0.0636025 mm
Desplazamiento Z	-1.02937 mm	1.20324 mm
Deformación equivalente	0.000000000137702 su	0.000420048 su
Primera deformación principal	-0.0000000023236 su	0.000366612 su
Tercera deformación principal	-0.000473918 su	0.00000712138 su
Deformación XX	-0.000227208 su	0.000365549 su
Deformación XY	-0.000223263 su	0.00023456 su
Deformación XZ	-0.000239818 su	0.000225909 su
Deformación YY	-0.000259924 su	0.000160244 su

Deformación YZ	-0.000158737 su	0.000170503 su
Deformación ZZ	-0.000227499 su	0.000183478 su
Presión de contacto	0 MPa	980.256 MPa
Presión de contacto X	-842.158 MPa	Continua 
Presión de contacto Y	-520.174 MPa	228.378 MPa
Presión de contacto Z	-537.642 MPa	400.507 MPa

Fuente: (Solid Works , 2012)

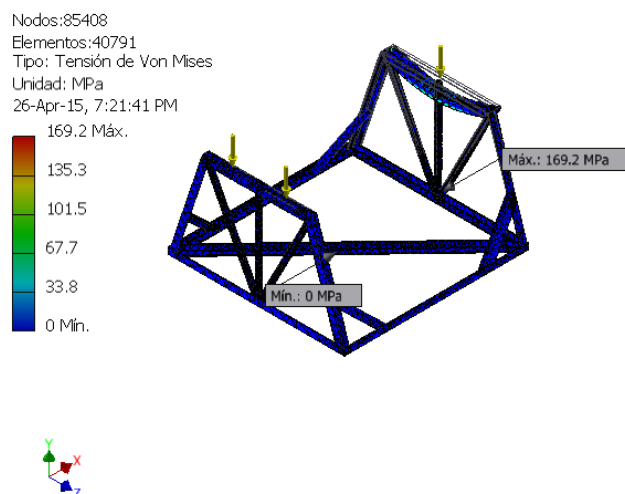


Figura 27. Tensión de Von Mises

Fuente: (Solid Works , 2012)

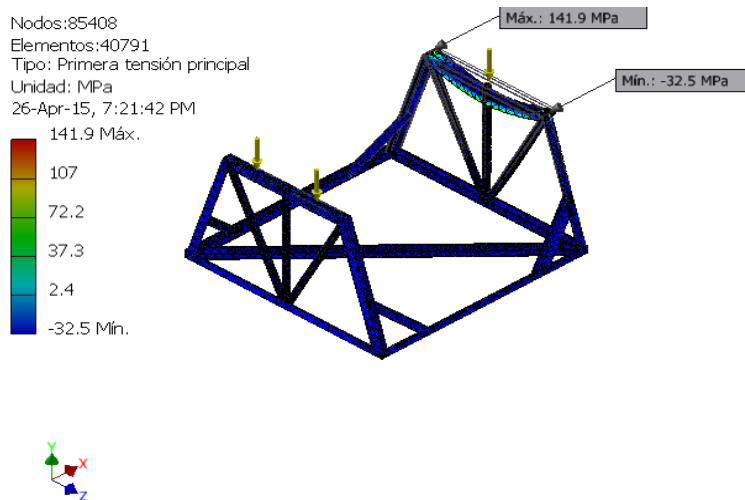


Figura 28. Primera Tensión principal

Fuente: (Solid Works , 2012)

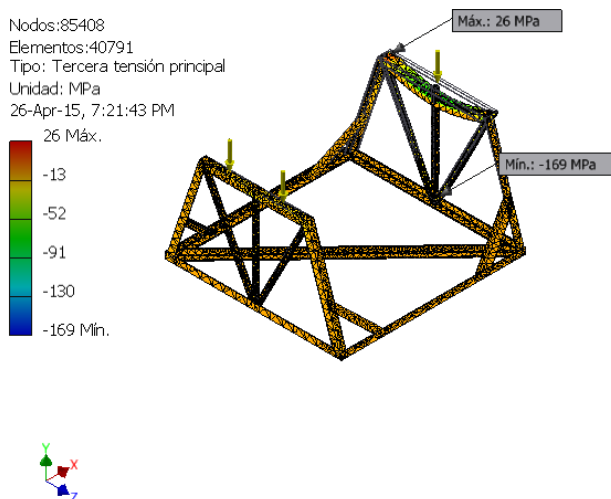


Figura 29. Tercera tensión principal

Fuente: (Solid Works , 2012)

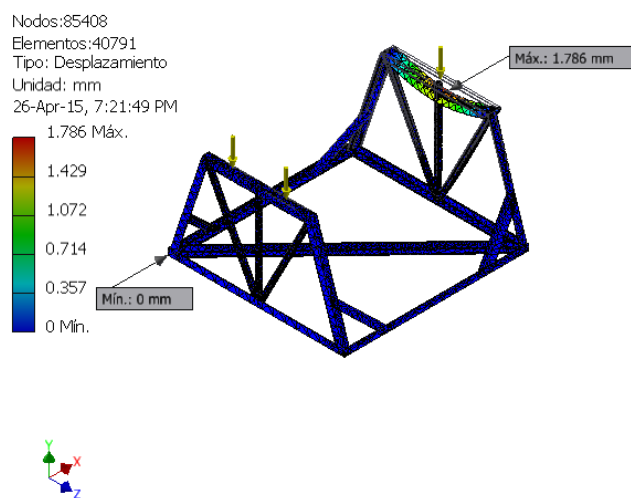


Figura 30. Desplazamiento

Fuente: (Solid Works , 2012)

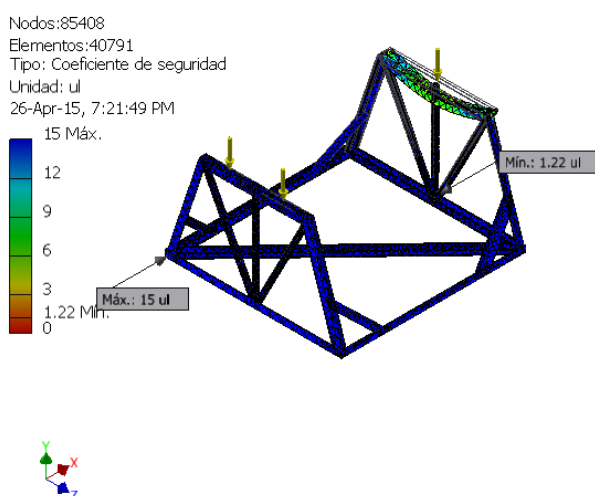


Figura 31. Coeficiente de seguridad

Fuente: (Solid Works , 2012)

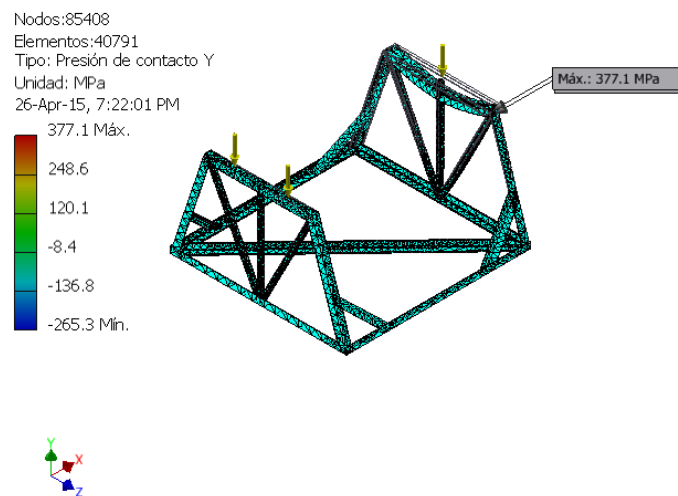


Figura 32. Presión de contacto Y

Fuente: (Solid Works , 2012)

4. CAPITULO IV

IMPLEMENTACIÓN MONTAJE Y PRUEBAS

4.1. Implementación

Una vez terminado el diseño tanto térmico como mecánico del horno se procede a la implementación y fabricación del mismo para ello se describe en diagramas de procesos, mano de obra, materiales de fabricación, herramientas, recursos económicos, mano de obra de fabricación y hojas de proceso de fabricación de las partes del horno; el proceso de fabricación e implementación.

4.1.1. Diseño del proceso constructivo

Más que un diseño se trata de documentar los pasos que se siguieron para la construcción del horno después de haber obtenido un diseño satisfactorio así como planos que reflejan los cálculos y resultados obtenidos del diseño.

Para ello se describirán los procesos de fabricación en dos partes; la fabricación del horno y la fabricación del sistema basculante.

4.1.2. Diagramas de procesos

4.1.2.1. Diagrama de procesos del horno

Ver Anexo 9

4.1.2.2. Diagrama de procesos del sistema basculante

Ver Anexo 10

4.1.3. Hoja de procesos

4.1.3.1. Hoja de procesos del horno

Ver Anexo 11

4.1.3.2. Hoja de procesos del sistema basculante

Ver Anexo 12

4.1.4. Recursos de fabricación

Por tratarse de un proyecto autofinanciado, los recursos tanto económicos como humanos correrán por cuenta de los señores Jorge Bone y David Crespo, con la colaboración y asesoramiento del ingeniero Gabriel Orozco director de tesis y el ingeniero Patricio Quezada subdirector de tesis.

4.1.5. Materiales

Al haberse fabricado por separado las dos partes esenciales del horno basculante, se detalla de la siguiente manera los materiales utilizados.

4.1.6. Materiales del Horno

A continuación se detalla la lista de materiales usados en la construcción del horno cuyas características se dieron a conocer en el capítulo 2:

- Tol acero ASTM A36 e= 4mm
- Fibra de vidrio e= 30 mm
- Ladrillo aislante Maxial
- Ladrillo refractario Erecos 1800
- Cemento refractario Vesuvius Cer Cast 2900
- Mortero refractario Erecos Universal en seco
- Crisol de grafito #150 Grafinox Salander 150
- Tubo 4" en acero ASTM A36

4.1.7. Materiales del sistema basculante

A continuación se detalla la lista de materiales usados en la construcción del horno cuyas características se dan a conocer en el capítulo 2:

- Bastidores
- Engranajes
- Volante
- Angulo en acero
- Chavetas
- Chumaceras

4.1.8. Mano de obra

La mano de obra estuvo a cargo del Sr. Jorge Bone y el Sr. David Crespo con la colaboración de las instalaciones de taller del ingeniero Gabriel Orozco donde se realizó el ensamble del horno, las piezas mecánicas fueron realizadas en por el Sr. Jorge Bone y el Sr. David Crespo en un taller particular.

4.1.9. Equipos y herramientas utilizados en la construcción y pruebas

4.1.9.1. Horno

- Tanque de almacenamiento de diésel
- Quemador
- Martillo
- Conexiones de diésel (mangueras, válvulas, etc)
- Soldadora eléctrica
- Instalaciones eléctricas
- Baroladora
- Cortadora oxiacetilénica
- Electrodo 6011

- Nivel
- Bailejo
- Espátula
- Balde de mezclas
- Pintura
- Compresor
- Pirómetro digital(medición de temperaturas en pruebas)

4.1.9.2. Sistema basculante

- Martillo
- Soldadora eléctrica
- Fresadora
- Torno
- Electrodo 6011
- Nivel
- Entenalla
- Limas
- Sierra de mano
- Flexómetro
- Taladro
- Compresor
- Pintura
- Grasa
- Otros

4.2. Montaje

4.2.1. Componentes

Al haberse fabricado por separado las dos partes esenciales del horno basculante, se detalla de la siguiente manera los componentes tanto del horno como del sistema basculante.

4.2.1.1. Componentes de Horno



Figura 33. Tanque de Acero



Figura 34. Colocación de fibra de vidrio al interior del tanque



Figura 35. Colocación de ladrillo refractario y aislante en base y paredes del horno



Figura 36. Colocación de base de crisol



Figura 37. Colocación de tubo de 5" ingreso de quemador



Figura 38. Colocación y nivelación de crisol



Figura 39. Colocación y cierre de horno con ladrillos refractario



Figura 40. Colocación de chimenea



Figura 41. Colocación de chimenea

4.2.1.2. Componentes de sistema basculante



Figura 42. Estructura tubo cuadrado



Figura 43. Chumaceras



Figura 44. Engranés



Figura 45. Parante de sujeción a cuerpo de horno perfil C

4.3. Pruebas y resultados

4.3.1. Tablas de datos

Para poder establecer parámetros de medida se determinó varios puntos de control en el proceso de fundición desde el encendido del horno hasta la colada del producto para poder observar el aumento de temperatura en dicho proceso.

De tal manera se presenta las siguientes figuras indicando dichos puntos de control y sus tablas de datos respectivos.

A continuación se presenta un esquema de los puntos de control del horno:

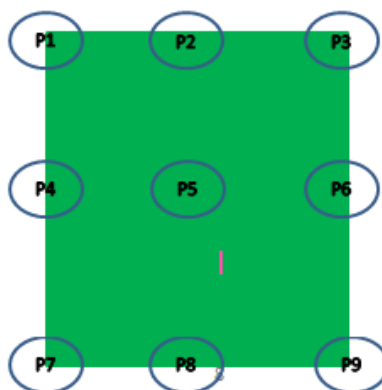


Figura 46. Esquema de horno vista frontal

Teniendo en cuenta lo anterior se genera la siguiente tabla de datos:

Tabla 12

Temperaturas de las paredes del horno vs. Tiempo

TEMPERATURA DE LAS PAREDES DEL HORNO vs. TIEMPO									
TIEMPO(min)	TEMPERATURA								
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
0	22	22	22	19	19	19	17	18	17
15	23.5	24.3	22.1	20.7	21.5	20	17.8	18.2	17.9
30	24	26	22.7	21.7	22.1	21.5	18.4	18.9	18.3
45	24.8	36.2	25.9	21.7	22.6	21.1	18.6	19.5	18.8
60	28.2	43.2	24.2	21.8	21.6	21.3	19.1	19.3	19.2
75	29.7	72.3	27.2	22.3	25.7	21.7	20	23.7	19.7
90	30.9	90.9	49.4	22.1	27.2	21.6	20.5	24.3	19.2
105	31.3	102.3	62.5	22.4	29.3	21.8	20.9	25	19.6
120	32	115.2	85.1	22.7	30.1	21.9	21.6	25.9	19.9
135	32.9	125.7	105.4	22.9	32.4	21.8	22.1	26.4	20.4
ΔT	27.93	65.81	44.65	21.73	25.15	21.17	19.6	21.92	19

Esta tabla de valores se obtuvieron después de 2.25 horas desde que se encendió el horno

Pero no solo se tomó datos del contorno del horno; sino también de la parte superior ya que esta tenía un contacto directo con la llama generada por el quemador.

El promedio de temperatura en las paredes exteriores del horno es de 29.66 °C

A continuación se presenta un esquema de los puntos de control de la tapa superior del horno:

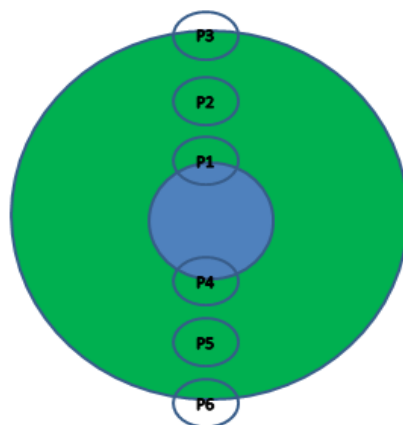


Figura 47. Esquema de horno vista superior

Según las pruebas realizadas se genera la siguiente tabla de datos:

Tabla 13

Temperatura de diferentes puntos en la tapa del horno

	TEMPERATURA					
	P1 (Punto en ruta de escape de gases)	P2	P3 (Punto fuera de La línea de salida de gases)	P4 (Punto Salida de llama y gases)	P5	P6 (Punto fuera de La línea de salida de gases)
TIEMPO(min)						
0	22	22	22	22	22	22
15	70	29	23	69	28.7	22.3
30	100	32	23.5	101.5	31.5	23.2
45	213	101.6	33.5	410.5	166.5	41.6
60	452.5	108.6	37.5	635.7	170.6	42.2
75	467.2	125.3	44.1	691	205.5	55.1
90	483.8	147.5	54.6	710	251	67.3
105	501.3	164.2	62.3	745.6	269.3	70.3
120	518.6	179.2	69.7	764.3	275.6	73.5
135	541.5	201.6	73.4	784.2	294.3	75.9
ΔT	336.99	111.1	44.36	493.38	171.5	49.34

El promedio de temperatura en la tapa del horno es de 201.11 °C

4.3.2. Curvas y diagramas de resultados

La tabla 12 genera curvas de variación de temperatura representadas en la siguiente gráfica:

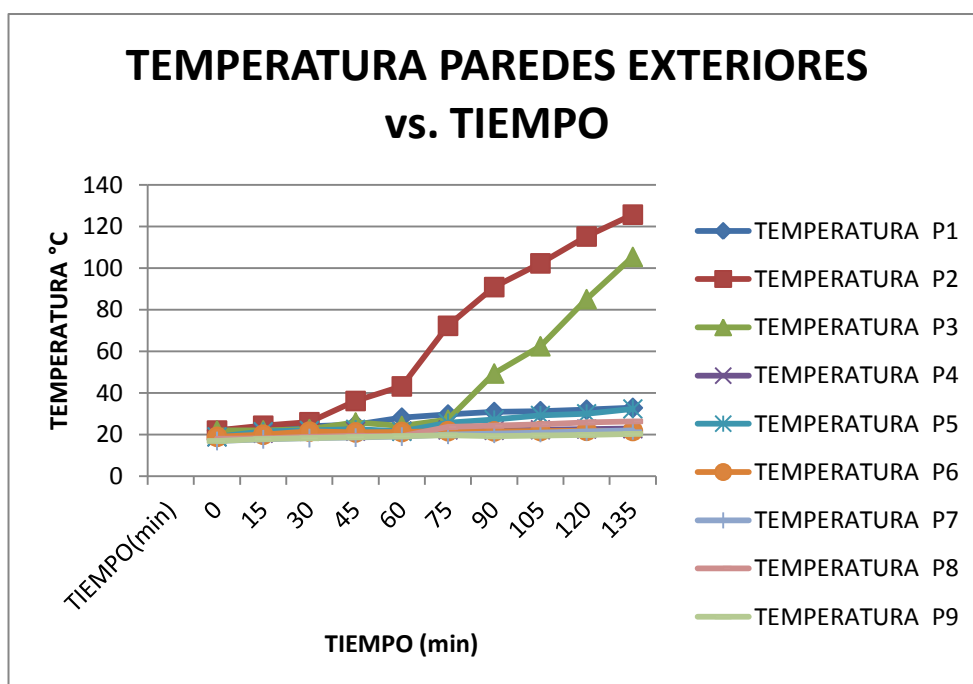


Figura 48. Curvas de temperaturas en paredes del horno vs. Tiempo

Se puede observar que la temperatura casi permanente constante con excepción de la temperatura en los puntos 2 y 3 que suben a temperaturas muy altas por estar en contacto con la llama que sale de la chimenea.

La tabla 13 nos arroja curvas de variación de temperatura representadas en la siguiente gráfica:

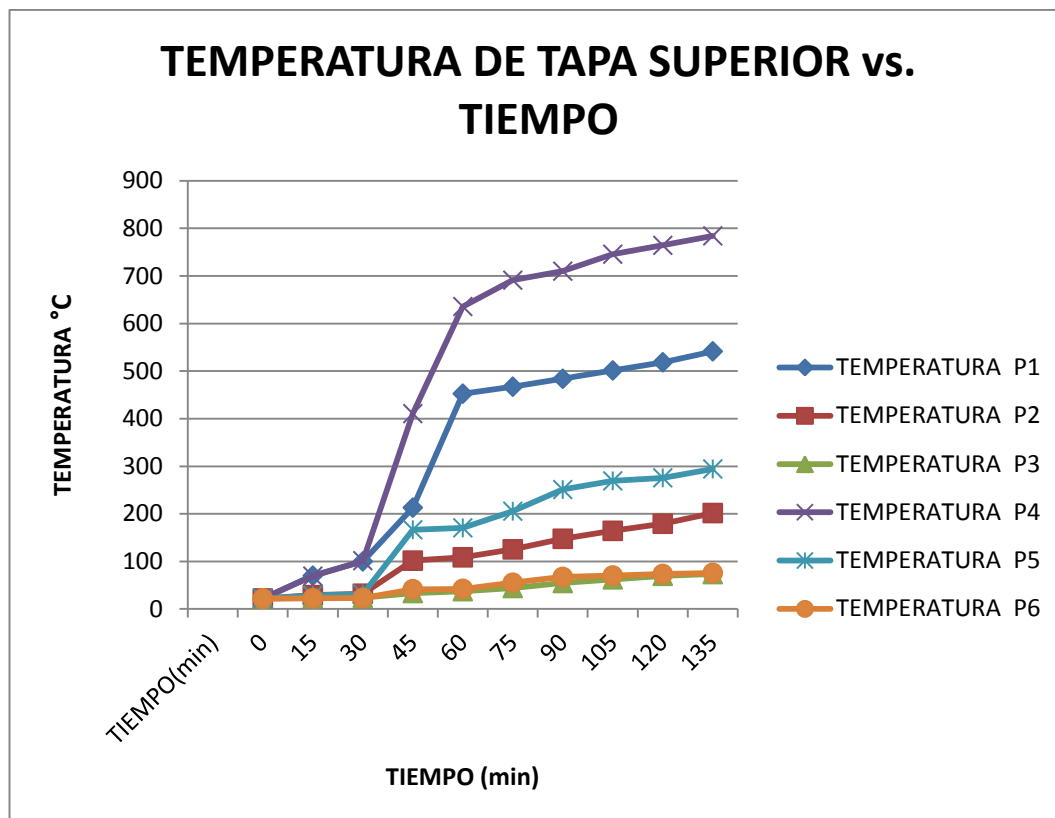


Figura 49. Curvas de temperaturas en la tapa del horno vs. Tiempo

Se puede observar que la temperatura casi permanente constante con excepción de la temperatura en los puntos 1 y 4 que suben a temperaturas muy altas por estar en contacto con el crisol el cual su temperatura interna fue de 850°C.

4.3.3. Análisis de resultados de pruebas térmicas

De acuerdo como se observa en las gráficas anteriores se puede ver que el horno no demora en calentar y llegar a temperaturas de fusión, esto depende del material y de la capacidad del quemador.

A su vez se puede ver que en las paredes exteriores del horno no hay un incremento significativo en la temperatura de las mismas, por lo que no genera riesgo alguno de daño físico para los operarios del horno.

Una vez que el horno llega a temperaturas de fusión se puede observar que tiende a estabilizarse y después de esto su temperatura se eleva lentamente.

De acuerdo a los datos del capítulo tres se estimó un valor de 60 °C en las paredes externas del horno, como se puede ver el promedio de temperatura en las paredes exteriores del horno obtenidas en las pruebas es de 29.66 °C y de 201.11 °C por lo que genera los siguientes errores porcentuales:

- **Error porcentual en paredes laterales**

$$e = 100 * \left(\frac{\Delta T_{\text{teorica}} - \Delta T_{\text{experimental}}}{\Delta T_{\text{teorica}}} \right)$$

$$e = 100 * \left(\frac{60 - 29.66}{60} \right)$$

$$e = 50.56\%$$

- **Error porcentual en la tapa del horno**

$$e = 100 * \left(\frac{\Delta T_{\text{teorica}} - \Delta T_{\text{experimental}}}{\Delta T_{\text{teorica}}} \right)$$

$$e = 100 * \left(\frac{60 - 201.11}{60} \right)$$

$$e = -235.18\%$$

Estos porcentajes altos se deben a que el horno tiene una eficiencia mayor a la que se calculó y su pérdida de calor es mucho menor a lo esperado en lo que se refiere a las paredes laterales.

En tanto que en la tapa el error es muy grande ya que el quemador genera una llama que sale por la chimenea y esta calienta la tapa del horno lo cual en la teoría no se tenía considerado.

4.3.4. Manual de usuario y mantenimiento

Ver Anexo 13

4.3.5. Guía de práctica de laboratorio

Ver Anexo 14

4.3.6. Planos constructivos

Ver Anexo 15

5. CAPITULO IV

ANALISIS ECONOMICO-FINANCIERO

5.1. Estudio de alternativas para diseño del equipo

El diseño del presente proyecto presenta tres alternativas de solución proveedores del material de construcción del horno de fundición. Es por ello que se realizará un estudio para seleccionar cual es la alternativa más idónea, técnica, operativa y económicamente.

Se ha presentado las tres opciones ideales para ser empleado en la construcción del horno de fundición, a continuación se hará el análisis y la solución de proveedores del material de construcción del horno de fundición. Se enlistan las opciones para proveedores del material de construcción del horno de fundición.

Tabla 14

Listado de alternativas de Materiales del Horno

A	Maquinarias Henriques C.A.
B	Su ferretería, Aceroscenter y Megafrio
C	La Llave y Proviaceros

Tabla 15

Criterios de selección vs. Escala de valoración - Materiales del Horno

#	CRITERIOS DE VALORACIÓN	1 – 2	3 – 4	5 - 6	7 - 8	9 - 10
		No tan importante	Poco importante	Importante	Muy importante	De gran importancia
I	Costo de los elementos	Muy costoso	Costoso	Aceptable	Económico	Barato
II	Facilidad de adquisición de materiales	Muy difícil	Difícil	Normal	Fácil	Muy fácil
III	Calidad de los materiales	Pésimo	Malo	Regular	Bueno	Excelente
IV	Vida útil	Corta	Baja	Moderada	Media	Larga

Tabla 16**Matriz de selección de Materiales del Horno**

Criterios de Selección	Ponderación (%)	Alternativa A		Alternativa B		Alternativa C	
		Prioridad	Prior. x %	Prioridad	Prior. x %	Prioridad	Prior. x %
Costo de los elementos	30	7	2,1	5	1,5	6	1,8
Facilidad de adquisición de materiales	20	8	1,6	6	1,2	6	1,2
Calidad de los materiales	30	7	2,1	7	2,1	6	1,8
Vida útil	20	7	1,4	7	1,4	7	1,4
TOTAL	100		7,2		6,2		6,2

Según el resultado de la tabla, se determina que la alternativa A, es la más idónea para la construcción del proyecto.

Debido que tiene casi todos los materiales en un mismo sitio, esto ayudara en el tema de pagos y transporte de material

5.2. Análisis económico

A continuación se expondrán las tablas del análisis económico y solo se realizara este debió que el proyecto es orientado para material pedagógico y no tiene ingresos por lo tanto no se puede analizar financieramente.

5.2.1. Costos directos

5.2.1.1. Diseño e ingeniería

Tabla 17

Costos de diseño e ingeniería

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Subtotal
1	Autores	Horas	600	3,2	1920,00
2	Profesionales Asesores	Horas	20	25	500,00
3	Asesoría especial	Horas	10	30	300,00
TOTAL					\$ 2.720,00

5.2.1.2. Materiales y elementos de construcción

Tabla 18

Costo de materiales y elementos de construcción

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario proveedor A	Costo total proveedor A	Costo Unitario proveedor B	Costo total proveedor B	Costo Unitario proveedor C	Costo total proveedor C
1	Ladrillo aislante 0,23x0,114, 0,0064	m	120	0,28	33,60	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Crisol N°150 45 Kg Al	u	1	339,00	339,00	425,04	425,04	443,27	443,27
3	Ladrillo refractario 0,23x0,114x0,064	m	130	5,99	778,70	5,09	661,70	6,38	829,40
4	Cemento refractario	saquillo	2	60,05	120,10	66,10	132,20	65,49	130,98
5	Fibra de vidrio e=3mm, 1,20x0,6	plancha	1	80,24	80,24	15,34	15,34	0,00	0,00
6	Mortero refractario	saquillo	1	74,59	74,59	0,00	0,00	0,00	0,00
7	Platina 0,05x0,003	retazo	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	Quemador a diesel 2,5 g/h	unidad	1	971,81	971,81	0,00	0,00	0,00	0,00
9	Acero negro e=4mm 1,22x2,44	metros	2	99,76	199,52	78,24	156,48	96,38	192,76
TOTAL					2597,56		1390,76		1596,41

5.2.2. Construcción, montaje y validación

5.2.2.1. Mano de obra

Tabla 19

Costos de mano de obra

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Subtotal
1	Servicio de torno	horas	3	25	75,00
2	Servicio de rolado o barolado	horas	1	15	15,00
3	Servicio de soldadura	horas	8	10	80,00
4	Servicio de conformación de horno	horas	20	5	100,00
TOTAL					\$ 270,00

5.2.2.2. Puesta a punto y operación

Tabla 20

Costos de puesta a punto y operación

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Subtotal
1	Servicio de secado de horno	horas	48	2	96,00
2	Servicio de fundición de aluminio	horas	4	25	100,00
TOTAL					\$ 196,00

5.2.2.3. Pruebas de validación

Tabla 21

Costos de pruebas de validación

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo	Total
1	Experimentales	horas	20	4	80

5.2.2.4. Materiales de operación

Tabla 22

Costos de materiales de operación

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
1	Chatarra de aluminio	kg	50,00	2,10	105,00
2	Chatarra de cobre	kg	150,00	5,50	825,00
3	Chatarra de bronce	kg	130,00	4,50	585,00
				TOTAL	\$1515,00

5.2.3. Gastos generales

Tabla 23

Gastos Generales

Descripción	Subtotal (USD)
Gastos Administrativos	90,00
Materiales de Oficina	60,00
Transporte	150,00
Tecnología de la Información	80,00
Servicios Básicos	60,00
Otros	100,00
TOTAL	\$ 540,00

5.2.3.1. Opción A

Tabla 24

Opción A

Costos Directos	Subtotal
Diseño e Ingeniería	2.720,00
Materiales y elementos de construcción	2597,56
Mano de Obra	270,00
Construcción, montaje y validación	
Puesta a Punto y Operación	196,00
Pruebas de validación	80,00
Materiales de operación	105,00
Gastos Generales	
Tabla 23	540,00
SUBTOTAL	6508,56
IMPREVISTOS 3,5%	227,80
COSTO TOTAL	6736,36

5.2.3.2. Opción B

Tabla 25

Opción B

Costos Directos	Subtotal
Diseño e Ingeniería	2.720,00
Materiales y elementos de construcción	1390,76
Mano de Obra	270,00
Construcción, montaje y validación	
Puesta a Punto y Operación	196,00
Pruebas de validación	80,00
Materiales de operación	105,00
Gastos Generales	
Tabla 23	540,00
SUBTOTAL	5301,76
IMPREVISTOS 3,5%	185,56
COSTO TOTAL	5487,32

5.2.3.3. Opción C

Tabla 26

Opción C

Costos Directos	Subtotal
Diseño e Ingeniería	2.720,00
Materiales y elementos de construcción	1596,41
Mano de Obra	270,00
Construcción, montaje y validación	
Puesta a Punto y Operación	196,00
Pruebas de validación	80,00
Materiales de operación	105,00
Gastos Generales	
Tabla 23	540,00
SUBTOTAL	5507,41
IMPREVISTOS 3,5%	192,76
COSTO TOTAL	5700,17

5.2.4. Numero de servicios prestados al año estimados

Tabla 27

Número de servicios prestados al año estimado

	Periodo anual				
	1	2	3	4	5
Número de servicio prestados	72,00	79,20	87,12	95,83	105,42
NUMERO TOTAL	72,00	79,20	87,12	95,83	105,42

5.2.5. Determinación de costos

5.2.5.1. Costos de operación

Tabla 28

Costos de operación

	Periodo anual				
	1	2	3	4	5
Materiales	72000,00	83160,00	91476,00	100623,60	110685,96
Mano de obra	5400,00	5940,00	6534,00	7187,40	7906,14
Gastos generales de fabricación	7200,00	7560,00	7938,00	8334,90	8751,65
COSTO TOTAL	84600,00	96660,00	105948,00	116145,90	127343,75

5.2.5.2. Costos generales

Tabla 29

Costos Generales

	Periodo anual				
	1	2	3	4	5
Depreciación	1347,27	1077,82	862,25	689,80	551,84
Gastos administrativos	2.700,00	2.835,00	2.976,75	3.125,59	3.281,87
Gastos ventas	5.400,00	5.670,00	5.953,50	6.251,18	6.563,73
Gastos financieros	1.500,00	1.575,00	1.653,75	1.736,44	1.823,26
COSTO TOTAL	10.947,27	11.157,82	11.446,25	11.803,00	12.220,70

5.2.5.3. Valor del equipo anual

Tabla 30

Valor del equipo anual

	Periodo anual					
	0	1	2	3	4	5
	6736,36	5389,09	4311,27	3449,02	2759,21	2207,37

6. CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El presente proyecto de acuerdo a sus dimensiones y parámetros funcionales cumple con el objetivo de brindar apoyo didáctico al laboratorio de ciencia de los materiales.
- De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el diseño y los parámetros de operación del horno de fundición de materiales no ferrosos, podemos decir que el comportamiento de este es el adecuado, ya que el material obtenido se halla dentro de la calidad requerida.
- El proceso de combustión y de transferencia de calor con el diseño aplicado permitirá un aprovechamiento superior de la capacidad calórica de combustible.
- Se realizó la validación del equipo registrando los datos de su operación en tiempo real, evidenciando un perfecto funcionamiento el cual permitió finalizar esta investigación.
- Al obtener una temperatura de 23°C en las paredes del horno cuando se ha fundido el material brinda seguridad al operario y los alumnos que realicen prácticas de laboratorio con este proyecto.

- La selección de material fue considerando altos estándares de calidad, garantizando una larga vida útil del horno de fundición de materiales no ferrosos.
- De acuerdo a la investigación y cálculos de diseño se pudo identificar las variables de proceso que involucran la fundición de materiales no ferrosos.
- Se Determina al Diésel como fuente de energía más factible que alimentara al horno.
- Se realizó pruebas de eficiencia y de potencia del horno basculante para lograr una fundición homogénea corroborando los cálculos de diseño
- Se elaboró guías de prácticas de laboratorio, un manual de funcionamiento, mantenimiento y seguridad del horno de fundición de materiales no ferrosos para el adecuado uso por parte de los estudiantes que utilizan el laboratorio de ciencia de los materiales.

6.2. Recomendaciones

- Tener cuidado al momento de encender el quemador realizar el arranque seguro del equipo para evitar accidentes
- Se requiere conseguir arena y moldes para que se pueda obtener productos terminados los mismos que crearan el interés del estudiante para realizar las prácticas de laboratorio
- Se recomienda utilizar equipo de protección y seguridad industrial básicos para trabajar en fundición de materiales no ferrosos como son gafas, guantes de cuero y guantes de amianto
- Se recomienda tener cerca de este equipo un extintor de incendios
- Para la operación del horno es necesario seguir la secuencia descrita en el manual de funcionamiento del horno.

7. CAPITULO VII

BIBLIOGRAFIA Y ANEXOS

7.1. Bibliografía

- Botta, N. A. (n.d.). *Red Proteger*. Retrieved from http://www.redproteger.com.ar/temp_ignicion.htm
- Canek, C. R. (2007, Octubre 29). *Monografias.com*. Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos63/moldeo-fundicion/moldeo-fundicion2.shtml>
- Castillo, I. E. (n.d.). *La Red de Tecnologías más limpias*. Retrieved from http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/369101/369101_ee.htm
- Dipac manta. (2015). *Catálogo Tubería Dipac*. Quito, Ecuador.
- F. Incropera, D. Dewitt. (1999). *Fundamenteo de transferencia de calor*. Prentice Hall.
- Gauto, E. (n.d.). *Monografias.com*. Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos82/siderurgia/siderurgia2.shtml>
- Gomez, L. M. (1997). *Biblioteca Digital del ILCE*. Retrieved from http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_7.htm
- Grafinox, C. d. (n.d.). *Catálogo de Salamander Grafinox de Crisoles*. Maquinarias Heriquez.
- Hinojosa, E. P. (2010, Noviembre 24). *Diario Oficial de lista de combustibles*. Mexico D.F., Mexico: Comisión Nacional para el uso Eficiente de la Energía .
- Industrias FUNSA. (2014). *Registro Interno*. *Registro interno*. Quito, Píchincha, Ecuador.
- Joseph E. Shigley, Charles R. Mishke. (2002). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Krown. (n.d.). *Krown servicios integrales de fundición S.A.* Retrieved from http://www.krownsa.com/productos/horno-de-fusin-mantenimiento-a-crisol-_2480465_1.html#)

- *Mecatronica*. (n.d.). Retrieved from <http://www.motoresyautomatizacion.com/2013/03/hornos-electricos.html>
- Miliarium. (2008). *Miliarium.com Ingenieria Civil y Medio Ambiente* . Retrieved from <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Maquinas*. Mexico: Pearson Educacion .
- Oviedo. (1970). Tesis "Diseño de un horno para tratamiento termico mediante baño de sales. Escuela Politecnica Nacional.
- Pierre Louis Dulong y Alexis Therese Petit. (n.d.). *Educa Madrid*. Retrieved from <http://herramientas.educa.madrid.org/tabla/properiodicas/calorespecifico.html>
- Ricardo Ariztizabal Sierra, Hector Daniel Mejia, Claudia Silva, Diego Alfonso Pinedaa, Marcelo Rojas. (2005). Modelo matematico para fenomenos de combustion en un horno de cubilote. *Revista Facultad de Ingenieria Universidad de Antioquia*.
- Robert L. Mott, P. E. (2006). *Diseño de Elementos de Maquinas* . Mexico: Pearson Educacion.
- SKF. (2015). Catalogo de Rodamientos.
- Solid Works . (2012). Simulacion.
- Trinks. (n.d.). *Hornos industriales* (Vol. 1).
- Yunus A.Cengel y Michael A. Boles. (2009). *Termodinamica*. Mexico: Mc Graw Hill.