

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



**DISEÑO DE UN HORNO BASCULANTE DE USO
ACADÉMICO PARA FUNDIR COBRE**

PRESENTADO POR:

**ERICK EDENILSON ALVARADO URBINA
KATHERINE ANDREA MENDOZA ARTIGA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JULIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIA GENERAL :

Ing. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Dr. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

Ing. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR INTERINO :

Ing. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

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

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título :

**DISEÑO DE UN HORNO BASCULANTE DE USO
ACADÉMICO PARA FUNDIR COBRE**

Presentado por :

**ERICK EDENILSON ALVARADO URBINA
KATHERINE ANDREA MENDOZA ARTIGA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

San Salvador, julio de 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Irma Urbina y Abraham Alvarado por el esfuerzo que cada uno de ellos demostraron en el transcurso de este camino, por siempre apoyarme pese a las adversidades y servir de ejemplo para mejorar día tras día como persona de tal manera que pueda cumplir mis objetivos y metas.

También dedico esto a mi abuela Amalia Alvarado, que en paz descanse, desearía que pudiera compartir conmigo esta etapa de mi vida, y el logro académico que he alcanzado.

Erick

DEDICATORIA

Dedico de una manera muy especial este trabajo a mi amada madre Patricia Artiga de Mendoza por ser la mejor persona del mundo, por ayudarme y apoyarme siempre en todo sentido, por luchar y sacrificarse para que su hija fuera autosuficiente y profesional, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles, por no solo ser mi madre sino mi mejor amiga, mi confidente y mi cómplice de sueños, por inspirarme a ser una mejor persona y creer en mi cada día, en fin, por brindarme su amor incondicional y todo lo mejor de ella cada día de mi vida.

También dedico esto a mi abuela Rosa Aminta López que Dios la tenga en su santa gloria, por su gran amor brindado, porque sé que anhelaba verme como profesional y mientras vivía siempre me cuidó, consintió y apoyó en mis deseos por lo que estará en mi mente el resto de mi vida.

Katherine

AGRADECIMIENTO

A mis padres que nunca se rindieron y confiaron en mí, su persistencia me impulso a dar mi mayor esfuerzo para seguir siempre adelante a pesar de los tropiezos.

A mi hermana por motivarme en los momentos más difíciles de tal manera que evitara que me diera por vencido.

A mi novia y compañera de tesis quien me mostro su apoyo incondicional y cariño, en las buenas y las malas siempre ha estado conmigo.

A mi familia quienes estuvieron pendiente de mis avances y ayudaron en circunstancias que lo necesitaba.

A mis compañeros y amigos por los consejos que compartieron conmigo y fueron de gran ayuda.

A los docentes de la carrera que me permitieron adquirir un poco del conocimiento de ellos con buena ética académica y enseñaron a convertirme en un profesional.

Al Dr. y M.Sc. Jonathan Berrios por darnos la oportunidad de demostrar nuestro conocimiento, quien también nos asesoró de la mejor manera posible y nos mostró la manera correcta de realizar las cosas con sus consejos y recomendaciones.

Erick

AGRADECIMIENTO

A Dios por nunca abandonarme y darme sabiduría, fortaleza, perseverancia y paciencia durante todo este tiempo.

A mi madre por su amor incondicional, por su esfuerzo y dedicación, por ser mi apoyo y mi pilar para poder culminar con éxito esta etapa de mi formación académica.

A mi padre por sus palabras de aliento y apoyarme en algunas ocasiones.

A mi hermana y familia por estar pendientes de mis avances y por brindarme palabras de aliento.

A mi novio y compañero de tesis por compartir muchas experiencias y alegrías juntos, por su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

A mis compañeros y amigos universitarios por animarme y por compartir conmigo las tristezas y alegrías en esta carrera.

A los docentes universitarios que poseen ética pedagógica y se esmeran por formar mejores profesionales día a día.

A la Universidad de El Salvador por ser mi alma mater y permitirme formar como ingeniero.

Y de manera muy especial al Dr. y M.Sc Jonathan Berríos Ortiz por su ética pedagógica en el transcurso de la carrera y por ser nuestro asesor en el trabajo de grado en el que nos brindó su ayuda, conocimiento y atención en el transcurso de la pandemia, para poder culminarlo con éxito.

Katherine

DISEÑO DE UN HORNO BASCULANTE DE USO ACADÉMICO PARA FUNDIR COBRE

Estudiantes: Brs. Erick Edenilson Alvarado Urbina¹ y

Katherine Andrea Mendoza Artiga²

Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz³

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,
Universidad de El Salvador

RESUMEN

Se ha realizado una propuesta de diseño de un horno de crisol basculante con fines didácticos y de investigación, el cual es un equipo para la fusión de aleaciones no ferrosas hasta el cobre, para esto se ha recopilado información de diferentes fuentes bibliográficas para describir su funcionamiento y las partes que lo componen tanto estructuralmente como también térmicamente, así como las propiedades sobre las fundiciones de materiales no ferrosos. Posteriormente se seleccionaron los parámetros de diseño térmico y mecánico. Así, a partir de lo anterior se realizó el diseño térmico de las paredes del horno y el diseño mecánico en el cual se tuvieron en cuenta los diferentes componentes que conforman la estructura tomando sus respectivas consideraciones en la adecuada selección de dimensiones y material. Posteriormente, se realizó la descripción del proceso de construcción y planos de ensamble que se debe seguir para cada uno de los componentes, se detallan los costos de materiales, piezas y herramientas necesarias para realizar su construcción. Finalizando con una presentación de los planos de conjunto, subconjunto y detalles.

Palabras claves: horno basculante, horno de crisol y fusión del cobre.

1 edenilson.alvarado1993@gmail.com

2 katherine.mendozartiga@hotmail.com

3 jonathan.berrios@ues.edu.sv

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	4
1.1. Horno de crisol.....	7
1.1.1. Horno de crisol fijo estacionario.....	9
1.1.2. Horno de crisol basculante.....	10
1.2. Materiales no ferrosos.....	11
1.2.1. Clasificación de los metales no ferrosos.....	12
1.2.2. El cobre.....	13
1.2.3. Aleaciones de cobre.....	15
1.2.4. Fundición del cobre.....	22
1.3. Sistema de suministro de energía: definición de quemadores.....	23
1.3.1. Reacción de combustión.....	24
1.3.2. Llama.....	26
1.3.3. Poder calorífico.....	28
1.3.4. Principios de funcionamiento del quemador.....	29
1.4. Materiales refractarios.....	32
1.4.1. Propiedades de los refractarios.....	33
1.4.2. Tipos de refractarios.....	34
1.4.3. Criterios de selección para refractarios.....	41
1.5. Conservación de calor dentro del horno.....	42
1.5.1. Efecto aislante térmico en la temperatura de refractarios.....	45
1.5.2. Cantidad de transferencia de calor.....	46
1.6. Proceso de fundición.....	51
1.7. Generalidades del crisol.....	54
1.7.1. Manejo de crisoles.....	56
1.7.2. Instalación de crisoles.....	57
1.7.3. Instalación del quemador.....	57
1.7.4. Precalentamiento y curado del crisol.....	59
1.7.5. Carga del crisol.....	59
1.8. Mantenimiento del horno crisol.....	61
1.8.1. Curado del concreto refractario y sus cuidados.....	61
1.8.2. Preservación de la vida del refractario.....	63
1.8.3. Pintura de alta temperatura.....	64

	Pág.
2. Consideraciones de diseño térmico.....	66
2.1. Consideraciones de diseño.....	66
2.2. Parámetros de diseño.....	67
2.3. Dimensiones del horno.....	68
2.4. Requerimientos energéticos.....	72
2.4.1. Energía requerida para llevar a cabo la fusión del metal.....	73
2.4.2. Perdidas al ambiente.....	76
2.5. Potencia del quemador.....	102
3. Diseño mecánico.....	108
3.1. Determinación de cargas para basculación	108
3.2. Diseño de engranes.....	114
3.3. Diseño de ejes.....	120
3.3.1. Diseño de eje 1 apoyo A.....	121
3.3.2. Diseño del eje 1 apoyo B.....	131
3.3.3. Diseño de eje 2.....	142
3.4. Diseño de estructura.....	149
3.4.1. Cálculo de centro de gravedad del horno.....	149
3.4.2. Estructura de basculación	155
3.4.3. Reacciones en la estructura.....	155
3.5. Diseño de soldadura.....	161
4. Análisis de costos y técnico en la construcción del proyecto.....	181
4.1. Indicaciones del proceso constructivo del horno de crisol basculante.....	181
4.1.1. Elaboración de moldes.....	181
4.1.2. Vaciado y fraguado del concreto refractario.....	183
4.1.3. Construcción de las carcasas metálicas para el cuerpo, base y tapa del horno.....	185
4.1.4. Construcción del sistema basculante.....	186
4.1.5. Montaje del horno de crisol basculante.....	187
4.2. Costos del proyecto.....	188
Conclusiones.....	194
Bibliografía.....	196
Anexos.....	199

	Pág.
Anexos A Planos de fabricación.....	199
Anexos B Cotizaciones.....	213

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiométrica de algunos combustibles.....	26
Tabla 1.2. Algunos límites de inflamabilidad para gases comunes.....	31
Tabla 1.3. Propiedades físicas de materiales aislantes.....	38
Tabla 1.4. Operación continua recomendada para diferentes composiciones de fibras cerámicas.....	39
Tabla 1.5. Crisoles convenientes para hornos basculantes.....	55
Tabla 1.6. Manejo general de crisoles.....	56
Tabla 1.7. Ubicación del crisol dentro de la cámara del horno.....	57
Tabla 1.8. Instalación de quemador y recomendaciones de operación.....	58
Tabla 1.9. Carga del crisol.....	60
Tabla 1.10. Programas de secado.....	62
Tabla 1.11. Aspectos constructivos importantes.....	64
Tabla 2.1. Dimensiones de un crisol de grafito para fundir cobre.....	68
Tabla 2.2. Interpolación de propiedades del aire a T_f	79
Tabla 2.3. Espesor óptimo de la tapadera de la carcasa metálica.....	89
Tabla 3.1. Densidades volumétricas.....	109
Tabla 3.2. Masas de materiales utilizados.....	113
Tabla 3.3. Tipos de cojinetes.....	123
Tabla 3.4. Centroide del crisol.....	150
Tabla 3.5. Pesos de materiales utilizados.....	151
Tabla 3.6. Centro de masa del horno.....	154
Tabla 3.7. Tamaños mínimos de soldadura en filetes recomendados.....	170
Tabla 4.1. Costos de materiales para la fabricación de los elementos de horno.....	188
Tabla 4.2. Costos estimados de mano de obra para la fabricación de los elementos principales del horno de crisol basculante.....	190
Tabla 4.3. Costos indirectos estimados en la fabricación de los elementos de horno.....	192
Tabla 4.4. Costo de mantenimiento y de herramientas implícitas en el proceso de fabricación del horno basculante.....	192
Tabla 4.5. Resumen de los costos de fabricación del horno basculante.....	193

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Crisol.....	8
Fig. 1.2. Tres tipos de horno de crisol.....	11
Fig. 1.3. Clasificación de los metales no ferrosos.....	12
Fig. 1.4. Esquema de extracción de cobre.....	15
Fig. 1.5. Diagrama de fases del sistema cobre-zinc.....	16
Fig. 1.6. Diagrama de fases del sistema cobre-estaño.....	19
Fig. 1.7. Diferentes tipos de llamas en un mechero Bunsen.....	28
Fig. 1.8. Esquema de un corte transversal del quemador.....	29
Fig. 1.9. Diferentes formas de materiales prefabricados.....	34
Fig. 1.10. Ladrillos refractarios de arco.....	34
Fig. 1.11. Mezcla monolítica (concreto refractario Ultra-70).....	35
Fig. 1.12. Transferencia unidimensional de calor por conducción.....	49
Fig. 1.13. Efecto de la conductividad y el tiempo sobre las gradientes de temperaturas de dos sólidos de diferente temperatura al transmitir el calor por conducción.....	49
Fig. 2.1. Especificaciones de las dimensiones de un crisol.....	68
Fig. 2.2. Esquema que presenta el diámetro interior y exterior del horno. Notar las diferentes capas que conforman el recubrimiento.....	70
Fig. 2.3. Esquema del corte del horno que presenta las dimensiones.....	72
Fig. 2.4. Esquema que ilustra la transferencia de calor por las paredes del horno ...	78
Fig. 2.5. Área efectiva del cemento refractario de la tapadera: Diámetro exterior de 672.6 mm, diámetro interior de 165.1 mm y espesor efectivo de 390 mm.....	85
Fig. 2.6. Superficies expuestas a radiación.....	90
Fig. 2.7. Dimensiones de la pared de la base del horno.....	97
Fig. 3.1. Cargas involucradas en el movimiento basculante del horno.....	108
Fig. 3.2. Partes de acero del horno.....	110
Fig. 3.3. Partes de refractario del horno.....	111
Fig. 3.4. Parte de cerámica del horno.....	112
Fig. 3.5. Transmisión de engranes.....	115
Fig. 3.6. Ubicación de ejes en el sistema.....	120
Fig. 3.7. Diagrama de cuerpo libre eje 1 apoyo A.....	121

Fig. 3.8. Diagramas para el eje 1 con apoyo A. a) Diagrama de cuerpo libre; b) Diagrama de fuerzas cortantes; y c) Diagrama de momentos.....	.124
Fig. 3.9. Factor de muesca por flexión eje 1.....	.125
Fig. 3.10. Diagrama de cuerpo libre eje 1 apoyo B.....	.131
Fig. 3.11. Diagramas de cortante y momento en el eje 1 apoyo B. a) Diagrama de cuerpo libre; b) Diagrama de fuerzas cortantes; y c) Diagrama de momentos en el eje.....	.134
Fig. 3.12. Factor de muesca por flexión eje 1 apoyo B en X_1135
Fig. 3.13. Factor de muesca por flexión eje 1 apoyo B en X_2138
Fig. 3.14. Factor de muesca por flexión eje 1 apoyo B en X_3140
Fig. 3.15. Diagrama de cuerpo libre eje 2.....	.142
Fig. 3.16. Diagramas en el eje 2. a) Diagrama de cuerpo libre; b) Diagrama de fuerzas cortantes en el eje 2; y c) Diagrama de momentos en el eje 2...	.146
Fig. 3.17. Factor de muesca para carga en flexión eje 3 en x_1147
Fig. 3.18. Centroides del horno.....	.150
Fig. 3.19. Medidas del crisol para la determinación del centroide.....	.151
Fig. 3.20. Cargas R en los cojinetes.....	.155
Fig. 3.21. Diagrama de cuerpo libre 1 reacción A1 y A2.....	.156
Fig. 3.22. Diagrama de cuerpo libre 2 reacciones B1 y B2.....	.157
Fig. 3.23. Diagrama de cuerpo libre 3 reacciones C1 y C2.....	.158
Fig. 3.24. Diagrama de cuerpo libre 4 reacciones D1 y D2.....	.159
Fig. 3.25. Diagrama de cuerpo libre 5 reacciones E1 y E2.....	.160
Fig. 3.26. Diagrama de cuerpo libre 6 reacciones F1 y F2.....	.161
Fig. 3.27. Esquema de las soldaduras; a) Soldadura de los ejes en el refuerzo; b) Soldadura del refuerzo en parte inferior del horno; c) Soldadura en los refuerzos laterales.....	.162

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

A:	Área de superficie de contacto
A_{base} :	Área de la base del horno
$A_{cortante}$:	Área de cortante
a_f :	Factor de carga para maquinaria sin impacto
A_s :	Área superficial de la pared del cilindro
$A_{superficial\ total}$:	Sumatoria de todas las áreas superficiales del horno
A_{tap} :	Área anillo de tapadera
AY_{tap} :	Espesor de la tapadera
A_w :	Factor de relación área / longitud
B:	Parámetro de forma que controla el sesgo (Parámetro distribucional de Weibull)
B:	Ancho neto a la cara del engrane
c :	Distancia donde el punto de torque es máximo
C:	Cálculo de la carga dinámica en el cojinete
C_{10} :	Carga nominal del cojinete seleccionado
C_e :	Coefficiente elástico
C_F :	Factor de condición superficial
C_H :	Factor de relación de dureza
Cp:	Calor específico del cobre
Cp_{Cu3} :	Calor específico de fusión del cobre
D:	Diámetro interior del crisol
D:	Diámetro interno del cojinete
D:	Diámetro externo del crisol
D_a :	Es el diámetro de la abertura al ambiente
d_e :	Diámetro del engrane
D_{ef} :	Diámetro efectivo de la tapadera
D_{ext} :	Diámetro exterior del horno
D_i :	Diámetro interior de la tapadera
D_{int} :	Diámetro interior del horno
$D_{int\ b}$:	Diámetro interior de la base del horno
d_p :	Diámetro del piñón
$D_{tub\ min}$:	Diámetro de tubería mínimo
$E_{aislante}$:	Espesor del aislante
E_{car} :	Espesor de la carcasa
E_L :	Espacio libre sugerido
$E_{L\ max}$:	Espacio libre máximo sugerido
$E_{L\ min}$:	Espacio libre mínimo sugerido
$E_{quemador}$:	Potencia suministrada por el quemador
$E_{refractario}$:	Espesor del refractario
E_{xx} :	Resistencia de tensión del material del electrodo
F_{11} :	Es el factor de visión que es la fracción de radiación que sale de la superficie 1 y que choca directamente consigo misma

- F_{12} : Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 1 y choca directamente contra la superficie 2
- F_{13} : Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 1 y choca directamente contra la superficie 3
- F_{21} : Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 2 y choca directamente contra la superficie 1
- F_{23} : Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 2 y choca directamente contra la superficie 3
- F_{31} : Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 3 y choca directamente contra la superficie 1
- F_{32} : Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 3 y choca directamente contra la superficie 2
- f_b : Carga que se transmite a la pieza
- F_e : Carga equivalente en el cojinete, carga aplicada
- F_R : Fuerza unitaria resultante
- f_s : Carga debido a cortante directo
- f_t : Carga debido a torsión
- F_T : Fuerza tangencial en el diente
- G : Aceleración gravitacional
- G_{RL} : Número de Grashof
- h : Coeficiente de transferencia de calor por convección
- H : Altura interno del crisol
- H_a : Es la altura de la abertura al ambiente
- H_{base} : Altura de la base
- H_{crisol} : Altura del crisol
- h_{Cuf} : Entalpía de fusión del cobre
- H_{horno} : Altura del horno
- $H_{salida\ de\ gases}$: Altura de la salida de gases de escape
- I : Factor geométrico de resistencia a la picadura
- J_i : Radiosidad de la superficie i
- J_1 : Radiosidad de la superficie 1
- J_2 : Radiosidad de la superficie 2
- J_3 : Radiosidad de la superficie 3
- J_w : Momento polar de inercia para el área transversal del eje
- k : Factor de vida del cojinete
- K : Conductividad térmica
- K_a : Factor de modificación de la condición superficial
- K_b : Factor de modificación de tamaño
- K_c : Factor de modificación de la carga

K_d :	Factor de modificación de la temperatura
K_e :	Factor de modificación de efectos varios
K_f :	Factor de concentración de esfuerzo
K_s :	Factor de tamaño
K_T :	Factor de temperatura
K_v :	Factor dinámico
L :	Longitud del crisol
L :	Largo del cojinete
L_{10} :	Vida de cojinete en h
L_c :	Longitud característica de superficie caliente
L_d :	Vida útil del diseño del cojinete
L_g :	Longitud característica de la configuración geométrica
L_h :	Longitud del horno
$L_{timón}$:	Longitud total que utiliza el timón
m :	Masa del cobre
m :	Módulo de piñón y engrane
M :	Momento en muesca
m_{acero} :	Masa total de acero
m_{crisol} :	Masa del crisol
m_e :	Masa del engrane
$m_{piñón}$:	Masa del piñón
$m_{refractario}$:	Masa total de refractario
m_{total} :	Masa total del horno incluyendo sobrecarga de 15%
m_{1a} :	Masa de acero correspondiente a la carcasa del horno
m_{1R} :	masa del refractario correspondiente a las paredes del horno
m_{2a} :	Masa de acero correspondiente a la base del horno
m_{2R} :	masa del refractario correspondiente a la base del horno
m_{3a} :	Masa de acero correspondiente a la parte lateral de la tapa del horno
m_{3R} :	masa del refractario correspondiente al pedestal del crisol del horno
m_{4a} :	Masa de acero correspondiente a la parte superior de la tapa del horno
m_{4R} :	masa del refractario correspondiente a la tapa del horno
\dot{m}_{aire} :	Flujo másico de aire
$\dot{m}_{min} = \dot{m}_{gas}$:	Flujo másico mínimo del quemador en condiciones de operación
\dot{m}_t :	Flujo másico total a la entrada del quemador
n :	Factor de seguridad
n_{comb} :	Rendimiento del combustible
n_e :	Velocidad del engrane en rpm
N_e :	Número de diente del engrane
N_{fr} :	Factor de seguridad en soldadura
n_p :	Velocidad del piñón en rpm

N_p :	Número de dientes del piñón
N_u :	Número de Nusselt
p :	Paso circular
P :	Paso diametral
P :	Perímetro
P :	Presión nominal que soporta el cojinete
PCI:	Poder calorífico inferior del propano
P_{max} :	Presión máxima en el rodamiento
P_{ot} :	Potencia en el engrane
P_r :	Número de Prandtl
Q_{aber} :	Es la perdida de calor por radiación de la abertura
Q_{carga} :	Es el flujo de calor requerido para alcanzar la temperatura de fusión del metal
Q_{cc} :	Transferencia de calor por conducción y convección
$Q_{cc.tap}$:	Transferencia de calor por conducción y convección de la tapadera
Q_{cond} :	Calor por conducción
$Q_{cond p}$:	Calor de conducción en las paredes del cilindro
$Q_{conv p}$:	Calor por convección en la pared del cilindro
Q_{conv} :	Calor por convección
Q_{rad} :	Calor por radiación
Q_{Cu1} :	Calor necesario para llevar al cobre al punto de fusión
Q_{Cu2} :	Calor latente por fusión del cobre
Q_{Cu3} :	Calor adicional a la temperatura de fusión hasta llevarlo a la temperatura de colada
Q_{crisol} :	Calor necesario para llevar el crisol a la temperatura de colado del cobre
$Q_{Cu total}$:	Calor total requerido para poder colar el cobre
$Q_{rad p}$:	Calor por radiación en la pared del cilindro
$Q_{pared total}$:	Transferencia de calor total al ambiente por las paredes
$Q_{rad.tap}$:	Calor por radiación en la tapadera
Q_{tt} :	Transferencia de calor total al ambiente por la tapadera
Q_{total} :	Cantidad de energía mínima necesaria para disponer del cobre fundido en el crisol
Q_k :	Flujo de calor necesario para fundir el metal
$Q_{cc.base}$:	Transferencia de calor por conducción y convección de la base
$Q_{rad.base}$:	Calor perdido por radiación en la base
$Q_{t.base}$:	Transferencia de calor al ambiente por la base del horno
$Q_{perdido}$:	Pérdidas totales del horno en operación
Q_{escape} :	Pérdidas de calor en los gases de escape
$Q_{superficial}$:	Flujo de calor superficial
q_{21} :	Es la perdida de calor por radiación de la abertura de la superficie 2 a la superficie 1

q_{31} :	Es la perdida de calor por radiación de la abertura de la superficie 3 a la superficie 1
R :	Confiabilidad del cojinete
r_e :	Radio exterior del horno
r_i :	Radio interior del horno
R :	Resistencia térmica por capa del horno
r_a :	Es el radio de la abertura al ambiente
R_{aL} :	Número de Rayleigh
R_{base} :	Resistencia por convección de la base
R_i :	Radio interno de capa
R_o :	Radio externo de capa
R_t :	Radio necesario para el timón
R_{tap} :	Transferencia de calor por conducción en la tapadera
R_1 :	Resistencia por capa del cemento refractario
R_2 :	Resistencia por capa de manta cerámica
R_3 :	Resistencia por capa de carcasa metálica
R_4 :	Resistencia por convección de las paredes
R_5 :	Resistencia por convección en la tapadera
S_{ac} :	Resistencia a la fatiga superficial
S_{ers} :	Resistencia en el límite de fatiga para un intervalo de esfuerzo cortante
S_F :	Factor de seguridad
S_n :	Esfuerzo nominal el límite de la resistencia a la fatiga
S_u :	Esfuerzo último
S_w :	Módulo de sección
S'_n :	Límite de resistencia a la fatiga en vigas rotatoria
t_w :	Dimensión de la garganta en soldadura
T_e :	Temperatura exterior del crisol
T_i :	Temperatura interior del crisol
T_{giro} :	Torque necesario para bascular el horno
T_s :	Temperatura de superficie
T_2 :	Torque del piñón
T_∞ :	Temperatura del ambiente
ν :	Viscosidad cinemática
V :	Vector cortante máximo
V_{acero} :	Volumen total de acero
V_{acero1} :	Volumen de acero correspondiente a la carcasa del horno
V_{acero2} :	Volumen de acero correspondiente a la base del horno
V_{acero3} :	Volumen de acero correspondiente a la parte lateral de la tapa del horno
V_{acero4} :	Volumen de acero correspondiente a la parte superior de la tapa del horno
$V_{ceramica}$:	Volumen total de cerámica
V_e :	Volumen del engrane
V_{ent} :	Velocidad de entrada de la tubería

$V_{piñon}$:	Volumen del piñón
$V_{refractario}$:	Volumen total de refractario
$V_{refractario1}$:	Volumen del refractario correspondiente a las paredes del horno
$V_{refractario2}$:	Volumen del refractario correspondiente a la base del horno
$V_{refractario3}$:	Volumen del refractario correspondiente al pedestal del crisol del horno
$V_{refractario4}$:	Volumen del refractario correspondiente a la tapa del horno
w :	Tamaño de la pierna en soldadura
W_{1a} :	Peso de acero correspondiente a la carcasa del horno
W_{2a} :	Peso de acero correspondiente a la base del horno
W_{3a} :	Peso de acero correspondiente a la parte lateral de la tapa del horno
W_{4a} :	Peso de acero correspondiente a la parte superior de la tapa del horno
$W_{engrane}$:	Peso del engrane
$W_{piñón}$:	Peso del piñón
W_{1R} :	peso del refractario correspondiente a las paredes del horno
W_{2R} :	peso del refractario correspondiente a la base del horno
W_{3R} :	peso del refractario correspondiente al pedestal del crisol del horno
W_{4R} :	peso del refractario correspondiente a la tapa del horno
$W_{timón}$:	Peso del timón
W_{total} :	Peso total del horno incluyendo sobrecarga de 15%
w_{45} :	Tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45°
Y :	Ubicación del centroide vertical
Z_n :	Factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la picadura
ΔT :	Diferencia o delta de temperatura
ΔT_3 :	Diferencia de temperatura de colada y fusión del cobre
β :	Coeficiente de expansión volumétrica
ϵ :	Emisividad de la superficie
σ :	Constante de Stefan Boltzmann
σ_a :	Esfuerzo alterno
σ_{ea} :	Esfuerzo equivalente alterno
σ_{em} :	Esfuerzo equivalente medio
σ_m :	Esfuerzo medio
\dot{Q}_i :	Razones netas de transferencia de calor por radiación de la superficie i
\dot{Q}_1 :	Razones netas de transferencia de calor por radiación de la superficie 1
\dot{Q}_2 :	Razones netas de transferencia de calor por radiación de la superficie 2
\dot{Q}_3 :	Razones netas de transferencia de calor por radiación de la superficie 3

τ_a :	Cortante alterno
τ_m :	Cortante medio
$\tau_{permissible}$:	Esfuerzo cortante permisible
X_0 :	Valor garantizado o mínimo de la variante (Parámetro distribucional de Weibull)
\bar{Y} :	Centroide del crisol
\bar{Y}_g :	Centro de gravedad
$\theta - X_0$:	Parámetro característico que corresponde al valor del percentil de la variable (Parámetro distribucional de Weibull)
ρ_{rel} :	Densidad relativa
ϕ_{aire} :	Flujo volumétrico del aire
ϕ_{min} :	Flujo volumétrico de gas
$\phi_{propano}$:	Flujo volumétrico del propano

INTRODUCCIÓN

Un horno de crisol para fundir metales no ferrosos está directamente relacionado con el proceso de fundición, siendo éste una herramienta cuyo uso se remonta a miles de años en el pasado. Sin embargo, la tecnología aún sigue siendo vigente y útil para elaborar piezas metálicas integrales y funcionales. Su uso se justifica al contemplar lo importante que es la fundición para la industria y la necesidad que tiene el estudiante de ingeniería mecánica de experimentar el fundir metal.

En la actualidad los hornos de crisol ofrecen a la industria de la fundición, una gran flexibilidad y una amplia variedad de opciones con respecto al tipo de metal a fundir, reducción y refinación de metales, el tamaño de la pieza fundida, combustibles y técnicas de manufactura.

Los hornos de crisol basculante presentan la aparente ventaja de extraer el metal fundido con mayor facilidad sin la necesidad de exponer a los operarios al calor proveniente de la cámara del horno. Sin embargo, se requiere la fabricación de una base especial, lo suficientemente resistente para soportar el peso del crisol y un sistema que permita el control del giro del horno; en este último caso el contenido del crisol del horno se vierte íntegramente en la cuchara sin mover ésta o bien directamente en los moldes.

En este trabajo se tiene como meta diseñar un horno capaz de fundir cobre, ya que es uno de los metales no ferroso de gran abundancia en la tierra. Las aleaciones de cobre comerciales más importantes se clasifican en latones, bronces, cuproníqueles y plata níquel.

En los hornos el quemador resulta ser el elemento crítico ya que sin éste no existirá transferencia de energía y sin energía no se producirá la fusión del metal, su correcta selección será muy importante para producir una rápida inflamación del combustible, la más alta temperatura de combustión, lograr una correcta dosificación del oxígeno o del aire, así como una adecuada atomización.

Una de las condiciones para garantizar la combustión completa de cualquier combustible es lograr una mezcla homogénea entre el combustible y el

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

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

El interior del horno se diseñará con materiales refractarios y aislante. El término refractario se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse. Los refractarios son materiales inorgánicos, no metálicos, porosos y heterogéneos, compuestos por agregados minerales termoestables, un aglomerante y aditivos. En el diseño se ha considerado los refractarios monolíticos que son mezclas refractarias que pueden ser usadas directamente en el estado que se suministran, como es el caso de las masas plásticas o bien después de la adición de un líquido apropiado, como es el caso de los hormigones o cementos refractario. En el caso de los materiales aislantes reducen considerablemente la pérdida de calor a través de las paredes de los hornos. Una baja transferencia de calor se puede alcanzar al colocar capas de material con baja conductividad térmica entre la superficie interna caliente de un horno y la superficie externa, haciendo que esta última se mantenga a una baja temperatura esto se debe a su baja conductividad.

Al diseñar un horno de fundición generalmente se comete el error de no darle la suficiente atención a la selección del refractario, lo que hace que la vida útil de éste disminuya considerablemente y sea una fuente de costos de mantenimiento futuros que se podrían evitar. Por lo tanto, la selección del refractario se basa en lo que se considera ser el factor más crítico con relación al patrón de desgaste bajo los parámetros de operación normal del horno con el objetivo de poder alcanzar el mejor ahorro económico. La selección correcta no sólo otorga una mayor vida útil sino también reduce el tiempo en que el horno está fuera de servicio.

Uno de los retos a vencer en el diseño y fabricación de hornos es la economía en el uso de combustible, la cual se debe equilibrar con los costos de fabricación y la resistencia térmica de los materiales. Se habla de economía porque a medida que el horno posee una mayor capacidad para evitar las fugas de calor a través de sus recubrimientos, el consumo de combustible disminuye y la rapidez de calentamiento aumenta, por lo tanto, el suministro de energía se ve grandemente reducido. Por lo que se hace indispensable determinar las potenciales pérdidas de calor en el horno por lo que se hará un estudio térmico.

Los tipos de transferencia de calor y los más utilizados en este trabajo de horno de fundición es el flujo de calor ya sea por conducción, convección y radiación por medio del estudio térmico se detallará con mayor precisión las pérdidas del horno basculante.

Conociendo estos detalles y el material a ocupar para la fundición se seleccionará un crisol adecuado el cual es el recipiente utilizado para albergar metales a ser fundidos en un horno y es utilizado para soportar las altas temperaturas encontradas en la fundición metálica. El material del crisol debe tener una alta temperatura de fusión, mucho mayor que la del metal a fundir, resistente al ataque químico del metal y, además, debe tener una excelente resistencia en caliente.

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

Finalmente, se realizará el diseño mecánico y los planos correspondientes para tener un diseño que sea factible con fines didácticos y de investigación.

1. ANTECEDENTES

Alrededor del año 4,000 a. de C., en plena edad neolítica, algún habitante anónimo en lo que actualmente es Irán, encontró una extraña piedra roja que podía moldear a martillazos, la cual se trataba de un trozo de cobre metálico ya que en la superficie de la tierra a veces se solía encontrar en estado puro. Tendrían que pasar siglos antes de que el hombre aprendiera a extraer este metal de los minerales, a fundirlo y refinarlo, al alearlo con el estaño para lograr ese metal duro y relativamente indestructible, el bronce que reemplazaría a la piedra pulida como materia prima de instrumentos y herramientas.

La extracción de los metales dio origen a la nueva ciencia de la metalurgia. Sus comienzos son materia de conjetura, es probable que, para adornar su hogar, el hombre neolítico haya buscado las bellas piedras de colores, azul, verde, rojizo, que contenían, sin que él lo supiese, una alta proporción del mineral cuprífero. Al encender una fogata encima de un piso forrado con trozos de mineral, este se fundía y dejaba entre las cenizas una sustancia relativamente plástica que se podía moldear a golpes. Fue así como desde el comienzo el hombre descubrió que necesitaría la ayuda del fuego para extraer los metales de sus minerales.

Los inventores, desconocidos, del Neolítico comprendieron que era necesario encender el fuego sobre una cavidad en la cual se recogiera el metal fundido, y concentrar su calor mediante un hornillo de piedras unidas con barro, para que llegase a la temperatura necesaria para fundir el mineral. Nació así el primer horno metalúrgico; pero pronto quedó en evidencia que la leña, único combustible conocido, producía con mucha dificultad la cantidad requerida de calor.

Soplado sobre el fuego era posible activar las llamas; este principio conocido desde los albores de la Edad de Piedra, condujo a la creación de numerosos dispositivos de ventilación forzada, diseñados para producir un viento artificial que avivase la combustión. Durante los milenios siguientes la metalurgia no desarrolló innovaciones esenciales: el primitivo horno de piedra se transformó

en horno de crisol, y sólo después del Renacimiento creció para tomar la forma del cubilote y del alto horno actual; el carbón de leña se reemplazó sólo alrededor del año 1700 por el carbón de origen mineral; la introducción de la energía motriz agrando las instalaciones, aumento y facilito la producción de metal [1].

En Centroamérica durante la época de la colonia, la técnica de fundición fue mayormente utilizada para la elaboración de herramientas, armas, elementos decorativos entre otros. En el siglo XX surgieron talleres de herreros forjadores y fundidores que brindaban este servicio para una creciente demanda de herramientas y elementos realizados por medio de estas técnicas.

Al referirse a los metales fundidos, mayormente se encuentra el manejo del plomo y aluminio y en algunos casos bronce por ser metales que requiere de una temperatura inferior o igual a los 1000 °C, temperatura que estos artesanos podían alcanzar sin ningún problema. Actualmente el oficio de la fundición y los talleres dedicados a esta técnica son escasos, debido a diversos factores que han impedido que se mantenga vigente en una época donde muchos oficios se ven afectados por la industrialización, que brinda los mismos servicios con costos más bajos.

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

En la actualidad, la fundición se ha situado como uno de los procesos más prácticos para la elaboración de piezas de gran complejidad en cualquier metal. Virtualmente, cualquier metal que puede ser fundido puede ser vertido en un molde para tomar la forma impresa en este. En términos de valor y volumen en la industria metalúrgica, la fundición se ve superada únicamente por el acero rolado [2].

Un horno de fundición es una máquina usada para obtener metales a partir de minerales o reprocessar metales de piezas de desechos conocidos como

chatarras. Un horno de fundición rudimentario también se puede usar 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 [3].

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

- Necesidades de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible y elevarla a la temperatura de vaciado requerida (ahorro de energía y de tiempo);
- La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga, como precisión de su composición (control de calidad);
- Producción requerida del horno (productividad y economía);
- El costo de operación del horno (productividad y economía); e
- Interacción entre la carga, el combustible y los productos de la combustión.

La aplicación de los hornos depende de factores como: cantidad de volumen a fundir, tipo de materiales a fundir, capacidad económica, tipo de industria, entre otros [2].

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 fundición, se halla la bóveda o cámara de combustión, las paredes y la solera o crisol, construidas de materiales refractarios y termoaislantes, una cañería para suministrar el combustible líquido o gaseoso, el cual está provisto de accesorios de control de regulación y paso; a continuación, se explicaran más a detalle:

- 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.

- Paredes. Las paredes rodean la zona de trabajo del horno, generalmente ellas mantienen la bóveda. Deben de proteger la zona de la pérdida de calor, no permite 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.
- 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 o mortero refractarios de baja conductividad térmica para unirla.
- 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.
- 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 [3].

1.1. HORNO DE CRISOL

De manera sencilla un horno de crisol no es más que una recámara a la cual se le suministra energía, almacena calor y promueve la transferencia de éste a un metal contenido en un recipiente conductor del calor y resistente a la acción

del metal y a las altas temperaturas denominado crisol, el cual permite fundir el metal en su interior para luego ser vertido a un molde previamente preparado [4].

En estos hornos se funde el metal, sin entrar en contacto directo con los gases de combustión. Por esta razón se llama en algunas veces hornos calentados indirectamente [5].

Los hornos de crisol pueden ser operados básicamente a través de energía eléctrica o de combustible el cual calienta el crisol que contiene el metal fundido. En relación con la energía eléctrica los hornos más comunes son de resistencia e inducción. En cuanto a los combustibles se puede utilizar una serie de formas diferentes [1].

El crisol se apoya sobre la base que está hecha también en material refractario y le da la posición necesaria con respecto a la salida del gas. Para lograr concentrar el calor alrededor del crisol este está contenido entre unas paredes refractarias que generan una cavidad para el flujo de los gases de combustión [2].

El crisol es un recipiente que se coloca dentro de los hornos para que contenga el metal fundido. Normalmente está fabricados de grafito con cierto contenido de arcilla (ver, Fig. 1.1) y puede soportar materiales a altas temperaturas, como el bronce fundido, o cualquier otro metal, normalmente a más de 500 °C [2].



Fig. 1.1. Crisol.

En la actualidad los hornos de crisol ofrecen a la industria una gran flexibilidad y una amplia variedad de opciones con respecto al tipo de metal a fundir, reducción y refinación de metales, el tamaño de la fundición, combustibles y técnicas de procesamiento. Aluminio, latón, bronce, cobre, hierro gris y dúctil, acero, magnesio, monel, níquel, aleaciones refractarias, y otras aleaciones y metales han podido ser elaborados utilizando hornos de crisol. La capacidad del crisol puede variar de apenas unas cuantas onzas para fundiciones de laboratorio hasta 1400 kg (3000 lb) para la fundición de aleaciones de aluminio. Entre las opciones para el combustible figuran el carbón, coque, gases comerciales (natural, propano, entre otros) y combustibles oleosos; y también existen hornos de crisol eléctricos [2].

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

1.1.1. HORNO DE CRISOL FIJO O ESTACIONARIO

Es un tipo de horno cuya característica es que el crisol se puede remover del horno o puede ser fijo (ver, Fig. 1.2). Si se trata de un crisol removible se pueden utilizar pinzas y cargadores para levantar y trasladar el crisol hasta los moldes para efectuar la colada, de esta manera se evita la necesidad de transferir el metal fundido a otro contenedor, esto es beneficioso porque se evita el daño potencial del metal en la transferencia. Si el crisol esta fijo al horno, uno de los problemas constituye la extracción del metal liquido razón por la cual se emplean las denominadas cazuelas cuando se necesita extraer pequeñas cantidades de metal pero son adecuadas cuando se necesita tomar pequeñas cantidades de metal a intervalos frecuentes. Se pueden emplear 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 bajo de 3 a 7%, 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 y 3].

1.1.2. HORNO DE CRISOL BASCULANTE

Son hornos móviles apoyados sobre un sistema de sustentación (ver, Fig. 1.2). La ventaja aparente que otorga el horno de crisol basculante es la capacidad que tiene este de extraer el metal fundido con mayor facilidad sin la necesidad de exponer a los operarios al calor proveniente de la cámara del horno. Sin embargo, se requiere la fabricación de una base especial, lo suficientemente resistente para soportar el peso del crisol y un sistema que permita el control del giro del horno.

Usualmente se les utiliza cuando es necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada. El metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado, con la excepción de casos especiales en que es vaciado directamente en los moldes [2].

Los hornos de crisol basculante con calentamiento por combustible líquido o gaseoso se caracterizan por un alto rendimiento de fundición, llegan a tener un rendimiento térmico aproximadamente del 7 al 18%. Son extraordinariamente idóneos para la fundición de aleaciones no ferrosas. El empleo de materiales aislantes de alta calidad repercute en un consumo energético muy bajo [3].

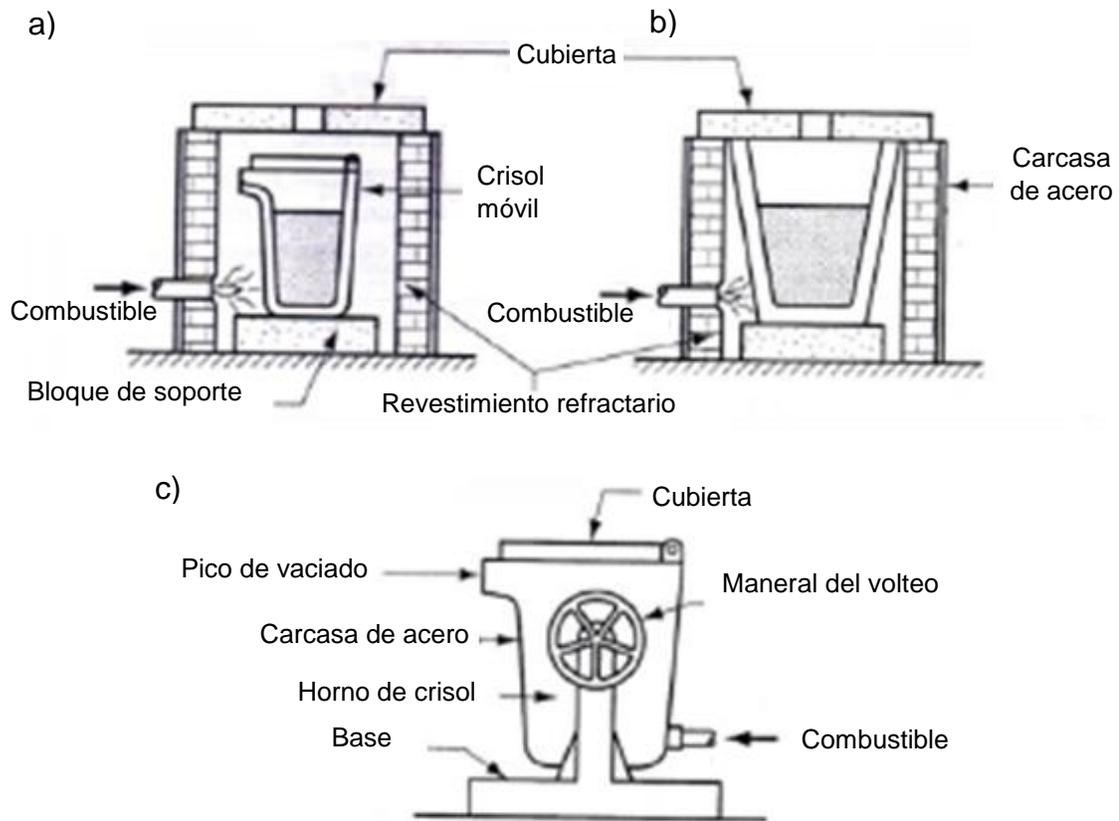


Fig. 1.2. Tres tipos de hornos de crisol: a) Crisol removible, b) crisol fijo, c) crisol basculante.

1.2. MATERIALES NO FERROSOS

Los materiales no ferrosos son aquellos que poseen algún elemento diferente del hierro como constituyente principal. Lo más importante de los materiales no ferrosos está formado por las aleaciones de cobre, aluminio, magnesio, níquel, estaño, plomo y zinc. Otros metales y aleaciones no ferrosas que se utilizan con mayor frecuencia incluyen elementos como el cadmio, molibdeno, cobalto, zirconio, berilio, titanio, tantalio, así como los metales preciosos como lo son el oro y la plata y también el grupo de platino [6].

Los metales no ferrosos se clasifican en tres grupos: Pesados, son aquellos cuya densidad es igual o mayor que 5 kg/dm^3 . Ligeros, su densidad está

comprendida entre 2 y 5 kg/dm³. Ultraligeros, su densidad es menor que 2 kg/dm³ [2].

1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS METALES NO FERROSOS

Dependiendo de sus características, estos materiales sustituyen con ventaja a los derivados del hierro en múltiples aplicaciones tecnológicas. Sin embargo, su proceso de fabricación o fundición resultan más costosos debido a diversas razones, entre las que destacan las siguientes [2].

- La baja concentración de algunos de estos metales es la corteza terrestre;
- La energía consumida en los procedimientos de obtención, y afino, ya que, la mayoría de los casos se trata de procesos electrolíticos para los que se emplea energía eléctrica; y
- La demanda reducida, que obliga a producirlos en pequeñas cantidades.
- Se pueden clasificar de acuerdo con su densidad, esta clasificación se presenta en la Fig. 1.3.

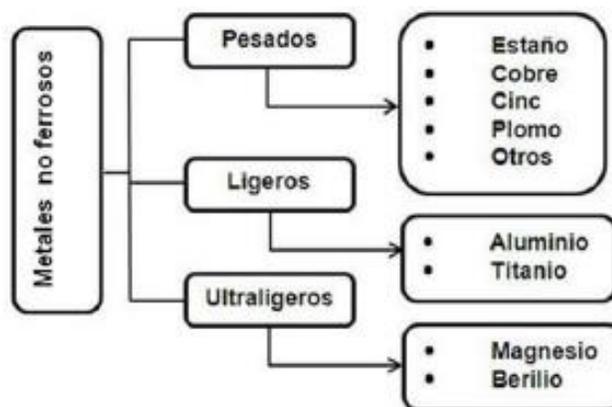


Fig. 1.3. Clasificación de los metales no ferrosos.

Los metales no ferrosos de mayor aplicación industrial son el cobre y sus aleaciones, el aluminio y sus aleaciones, el plomo, el estaño y el cinc. Otros como el mercurio y el tungsteno, se aplican en ámbitos industriales muy específicos [2].

Los demás metales casi nunca se emplean en estado puro sino formando aleaciones, como son para este caso el níquel, cromo, titanio o manganeso [2].

1.2.2. EL COBRE

El cobre es el metal no ferroso más extendido en la tierra. Las propiedades más importantes del cobre son la alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, maquinabilidad, resistencia y facilidad de fabricación. Además, el cobre no es magnético, tiene un color atractivo, puede ser soldado con latón o con estaño, y fácilmente se termina por revestimiento metálico (galvanizado) o barnizado. Algunas de estas propiedades básicas se pueden mejorar mediante una aleación adecuada [6].

En la condición de fundido (sin tratamiento térmico), el óxido de cobre y el cobre forman una mezcla interdendrítica eutéctica. Después de trabajada y recocida, la red interdendrítica se destruye, y la resistencia mejora. El cobre de oxígeno ligero se utiliza en tubos electrónicos o aplicaciones similares porque logra un sello perfecto con el vidrio [6].

El cobre arsenical que contiene como 0.3% de arsénico tiene resistencia mejorada a condiciones corrosivas especiales y se utiliza para ciertas aplicaciones en condensadores e intercambiadores de calor [6].

El cobre de alta maquinabilidad, con aproximadamente 0.6% de telurio, tiene excelentes propiedades de maquinado y se utiliza para pernos, tornillos, puntas para soldar y diversas piezas eléctricas, como puntos de contactos, dispositivos de control para motores eléctricos, reveladores y equipo eléctrico de precisión [6].

El cobre con contenido de plata tiene de 7 a 30 oz/ton de plata, la cual eleva la temperatura de recristalización del cobre, evitando así el suavizamiento durante la soldadura de conmutadores. Se prefiere en la manufactura de motores eléctricos para usos en ferrocarriles y aviones [6].

Según la riqueza de los minerales empleados se puede utilizar dos técnicas en el proceso de obtención de dicho cobre, las cuales son [2]:

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

El mineral se somete a un proceso de trituración y molienda hasta reducirlo a polvo. Después, se procede a la separación por flotación del mineral de cobre: éste flota mientras la ganga se deposita en el fondo, en la Fig. 1.4 se puede observar un diagrama del proceso de extracción del cobre [2].

El mineral húmedo es sometido a un proceso de tostación en un horno; en este proceso se elimina el azufre y se forman óxidos de hierro y de cobre. A continuación, el óxido de cobre sufre un proceso de calcinación en un horno de reverbero. Los óxidos de hierro se combinan con la sílice y forman la escoria mientras se produce la mata blanca (sulfuro de cobre). La mata blanca se somete a un proceso de reducción en un convertidor similar a los empleados en siderurgia y se obtiene cobre bruto, mezclado con algo de óxido de cobre [2].

Afino: El proceso de afinado del cobre se lleva a cabo en dos fases: la fase térmica y la fase electrolítica [2]:

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

otros metales, como oro y plata, que pueden ser recuperados. De este modo se consigue cobre electrolítico con una pureza superior al 99.85%.

En las aplicaciones del cobre gracias a su elevada conductividad para el calor y la electricidad, uno de los principales campos de aplicación del cobre es la fabricación de recipientes como calderas, serpentines y alambiques (industria química). A continuación, se detallarán características y propiedades del cobre [2].

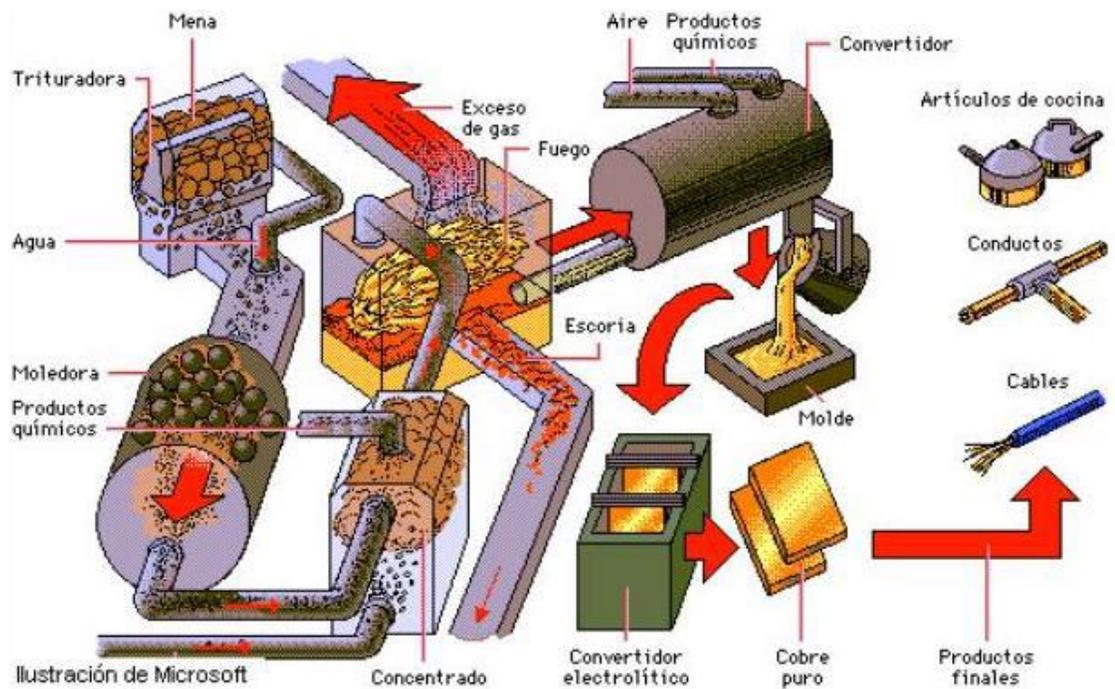


Fig. 1.4. Esquema de extracción del cobre.

1.2.3. ALEACIONES DE COBRE

Como el cobre y las aleaciones del cobre constituyen fases homogéneas únicas, no son susceptibles a tratamiento térmico y su resistencia se puede aumentar por trabajado en frío. Las aleaciones de cobre comerciales más importantes se pueden clasificar de la siguiente manera [6]:

- 1) Latones.- Aleación de cobre y zinc (ver, Fig. 1.5):

- A) Latones alfa, son aleaciones que contienen hasta 36% de zinc
 - i) Latones amarillos alfa de 20 a 36% de zinc, y
 - ii) Latones rojos de 5 a 20% de zinc.
- B) Latones alfa más beta, son aleaciones que contienen de 54 a 62% de cobre.
 - A) Bronces al estaño.
 - B) Bronces al silicio.
 - C) Bronces al aluminio.
 - D) Bronces al berilio.
- 2) Bronces.- hasta 12% de elemento de aleación.
- 3) Cuproníqueles: aleaciones de cobre y níquel.
- 4) Platas níquel: aleaciones de cobre, níquel y zinc.

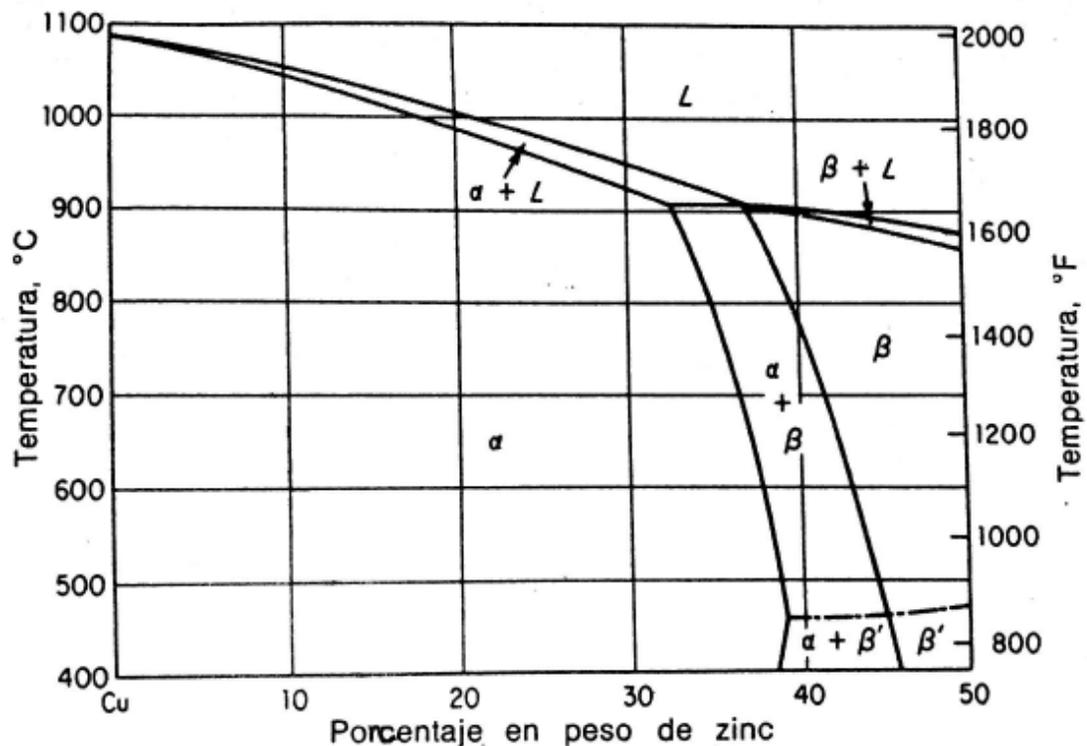


Fig. 1.5. Diagrama de fase del sistema cobre-zinc.

Según la clasificación de aleaciones de cobre detallan a continuación:

- Latones en general

Esencialmente, los latones son aleaciones de cobre y zinc, algunas de las cuales tienen pequeñas cantidades de otros elementos, como plomo, estaño o aluminio. Las variaciones en composición darán como resultado las características de color, resistencia, ductilidad, maquinabilidad, resistencia a la corrosión deseadas o una combinación de tales propiedades. La solubilidad del zinc en la solución alfa (α) sólida aumenta desde 32.5% a 1,657 °F hasta 39% a 850 °F (ver, Fig. 1.5). Como el cobre es FCC, la solución alfa sólida es FCC. La fase beta (β) es un compuesto de electrones BCC y sufre un ordenamiento, en la región de 850 a 875 °F. Al enfriar en este intervalo de temperatura, la fase β BCC, con los átomos de cobre y de zinc dispersados al azar en los puntos de red, cambia continuamente hasta que se convierte en una estructura β' ordenada, la cual es todavía BCC pero con los átomos de cobre en las esquinas y los zinc en los centros de los cubos unitarios [6].

La adición de zinc incrementa la ductilidad junto con la resistencia. La mejor combinación de resistencia y ductilidad se obtiene de un latón 70Cu–30Zn. Los latones comerciales se pueden dividir en dos grupos: latones para trabajo en frío (latones α) y latones para trabajo en caliente (latones α más β) [6].

➤ Latones alfa α

Los latones que contienen hasta 36% de zinc poseen relativamente buena resistencia a la corrosión y buenas propiedades de trabajo. El color de los latones α varía de acuerdo con el contenido de cobre desde rojo en las aleaciones de alto cobre, hasta amarillo en los contenidos de 62% de cobre. Los latones α se pueden dividir en dos grupos: latones amarillos α y latones rojos [6].

Los latones amarillos contienen de 20 a 36% de zinc, combinan la buena resistencia con la alta ductilidad y, por lo tanto, son adecuados para efectuar drásticas operaciones de trabajo en frío. La presencia de fisuras intercristalinas o fisuras debidas al efecto de los esfuerzos de corrosión, se debe a los altos esfuerzos residuales dejados en el latón como resultado del trabajo en frío. Estos latones también están sujetos a corrosión por formación de cavidades en la

superficie, llamada dezincificación. La adición de 0.5 a 3% de plomo mejora la maquinabilidad, de manera que el latón plomado se utiliza en piezas de máquinas para hacer tornillos, placas para grabado, llaves, piezas de cerradura, tambores, engranes y piezas para reloj [6].

Los latones rojos contienen entre 5 y 20% de zinc; generalmente tiene mejor resistencia a la corrosión que los latones amarillos y no son susceptibles a la presencia de fisuras por esfuerzo de corrosión o dezincificación. Los latones al bajo zinc más comunes son el oropel (95Cu-5Zn), el bronce comercial (90Cu-10Zn), el latón rojo (85Cu-15Zn) y el latón bajo (80Cu-20Zn) [6].

➤ Latones alfa más beta.

Estos contienen de 54 a 62% de cobre. Estas aleaciones constan de dos fases: α y β' . La fase β' es más dura y frágil a temperatura ambiente que la fase α ; por lo tanto, estas aleaciones son más difíciles de trabajar en frío que los latones α . A altas temperaturas, la fase β se hace muy plástica y, como la mayoría de estas aleaciones se pueden calentar para obtener una región de una sola fase β , tienen excelentes propiedades de trabajo en caliente [6].

➤ Latones fundidos.

Los latones fundidos son semejantes en nombre a los forjados, pero generalmente contienen cantidades apreciables de otros elementos de aleación. El estaño puede estar presente desde 1 hasta 6% y el plomo desde 1 hasta 10%; algunas aleaciones pueden contener hierro, manganeso, níquel y aluminio [6].

El latón plomado rojo es un ejemplo de latón fundido el cual se utiliza para piezas fundidas en general, que requieren propiedades de regular resistencia, pocos defectos internos y buena maquinabilidad, tales como válvulas para bajas presiones, accesorios para tubería, engranes pequeños y piezas fundidas para bombas pequeñas [6].

➤ Bronces en general.

Originalmente el término bronce se aplicó a las aleaciones cobre-estaño; sin embargo, ahora el término se emplea para designar cualquier aleación de cobre, con excepción de las cobre-zinc, que contiene hasta aproximadamente

12% (ver, Fig. 1.6) del elemento principal de aleación. Como nombre, el bronce lleva la idea de una aleación de mayor clase del latón y, se ha aplicado incorrectamente a algunas aleaciones que son realmente latones especiales. Los bronce comerciales son sobre todo aleaciones de cobre y estaño, aluminio, silicio y berilio; además, pueden contener fósforo, plomo, zinc o níquel [6].

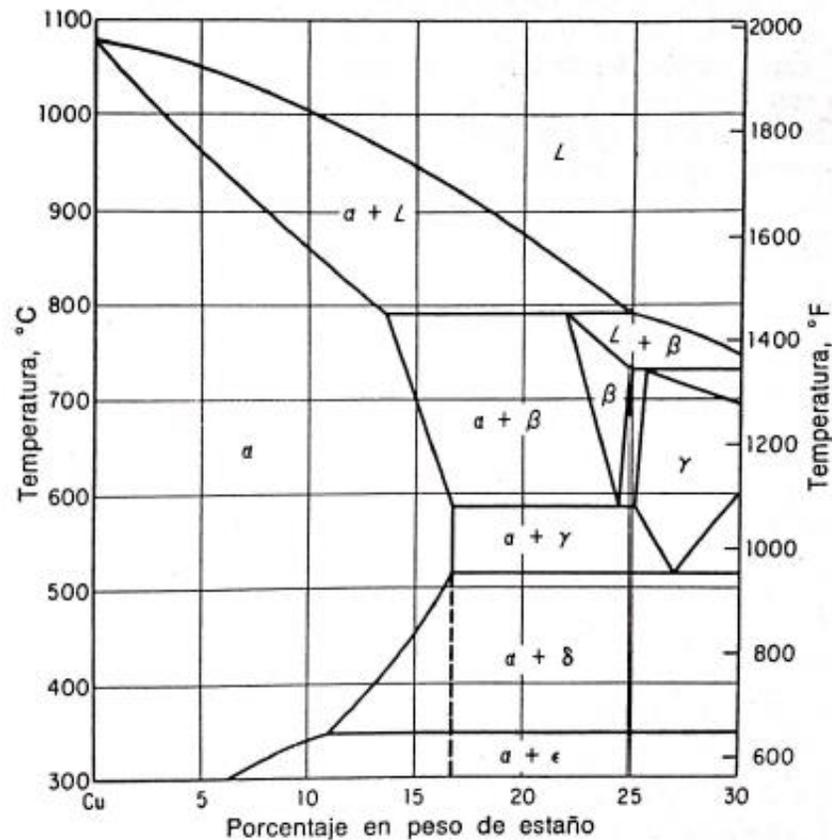


Fig. 1.6. Diagrama de fase de sistemas cobre-estaño.

➤ Bronces al estaño.

Estos generalmente se refieren a bronce al fósforo, ya que este siempre se halla presente como un desoxidador al fundir. El rango usual de contenido de fósforo está entre 0.01 y 0.5% y el estaño entre 1 y 11%. En la mayoría de piezas fundidas que contienen sobre 7% de estaño, hay algo de la fase δ . La estructura del bronce fundido al 10% de fósforo enfriado rápidamente presenta pequeñas partículas de la fase δ en una fina matriz dendrítica α [6].

Los bronce al fósforo se caracterizan por tenacidad, alta resistencia a la corrosión, bajo coeficiente de fricción y libertad de presencia de fisuras por esfuerzos de corrosión. Algunas veces, el zinc se emplea para sustituir parte del estaño, cuyo resultado es una mejoría en las propiedades de las piezas fundidas y en la tenacidad con poco efecto sobre la resistencia al desgaste. Generalmente se añade plomo al bronce y al estaño a fin de mejorar la maquinabilidad y la resistencia al desgaste [6].

➤ Bronces al silicio.

Los bronce al silicio son los más fuertes de las aleaciones al cobre endurecibles por trabajado. Tienen propiedades mecánicas comparables a las de los aceros al medio carbón y resistencia a la corrosión comparable con la del cobre. Se utilizan para tanques, recipientes de presión, construcción marina y conductos hidráulicos sujetos a presión [6].

La solubilidad del silicio en la fase α es de 5.3% a 1,565 °F y disminuye con la temperatura. La reacción eutéctica a 1,030 °F es muy lenta, de modo que los bronce al silicio comerciales, que suelen contener menos del 5% de silicio, son aleaciones unifásicas [6].

➤ Bronces al aluminio

La máxima solubilidad del aluminio en la solución α sólida es aproximadamente del 9.5% a 1,050 °F. La fase β sufre una reacción eutéctica a 1,050 °F para formar la mezcla [6].

La mayoría de los bronce al aluminio comerciales contienen entre 4 y 11% de Al. Aquellas aleaciones que contienen hasta 7.5% de aluminio suelen ser aleaciones monofásicas, en tanto que las que poseen entre 7.5 y 11% de aluminio son aleaciones bifásicas. Otros elementos como el hierro, el manganeso y el silicio, frecuentemente se añaden a los bronce al aluminio. El hierro incrementa la resistencia a la dureza y refina el grano; el níquel tiene el mismo efecto que el hierro pero no es tan efectivo; el silicio mejora la maquinabilidad; el manganeso disminuye la formación de defectos en las piezas fundidas cuando se combina con gases y también mejora la resistencia [6].

➤ Bronces al berilio.

La solubilidad del berilio en la solución α sólida disminuye desde 2.1% a 1,590 °F hasta menos de 0.25% a temperatura ambiente. Este cambio en solubilidad siempre indica posibilidades de endurecimiento por envejecimiento [6].

Las propiedades mecánicas óptimas se obtienen en una aleación que contiene aproximadamente 2% de berilio. Los bronce al berilio se utilizan para piezas que necesitan una combinación de excelentes conformabilidad en la condición suave con alta resistencia de cedencia, mediana resistencia a la fatiga y resistencia a la fluencia en la condición de endurecido; piezas que requieren resistencia a la corrosión, alta resistencia, y relativamente alta conductividad eléctrica; piezas duras que se desgastaran bastante contra acero endurecido [6].

➤ Cuproníqueles.

Son aleaciones de cobre-níquel que contienen hasta 30% de níquel. No son susceptibles al tratamiento térmico y sus propiedades se pueden alterar sólo por trabajo en frío [6].

Estas aleaciones tienen alta resistencia a la corrosión por fatiga y la acción corrosiva y erosiva del rápido movimiento del agua de mar. Se emplean mucho en tubos de condensadores, destilerías, evaporadores e intercambiadores de calor por recipientes navales y plantas de energías costeras [6].

➤ Plata alemana o latón al níquel.

Esencialmente son aleaciones ternarias de cobre, níquel y zinc. Las aleaciones comerciales se producen con la siguiente variación de composición: cobre, de 50 a 70%; níquel, 5 a 30%; y zinc, de 5 a 40% [6].

Los latones al níquel que contienen más del 60% de cobre son aleaciones de una fase que presentan sólo regulares propiedades de trabajo en caliente, pero son dúctiles y se trabajan fácilmente a temperatura ambiente. Estas aleaciones hacen excelentes metales base para electrodeposición con cromo, níquel o plata.

Los latones al níquel que contienen entre 50 y 60% de cobre son aleaciones de dos fases; tienen un módulo de elasticidad relativamente alto y, al igual que los latones alfa más beta, fácilmente se trabajan en caliente. Los latones al níquel son menos susceptibles a la corrosión por esfuerzos que las aleaciones binarias cobre-zinc del mismo contenido de zinc [6].

1.2.4. FUNDICIÓN DEL COBRE

La fundición es el proceso de remover el metal de un mineral calentando para quemar el azufre y otras impurezas y crear un óxido en el proceso. Este mineral oxidado es reducido usando coque o carbón, removiendo el óxido y dejando el metal. La fundición del cobre ha sido una parte de la civilización humana durante diez milenios, haciéndolo uno de los primeros metales recolectados y utilizados para varios propósitos, moviendo a la humanidad más allá de la época neolítica. Para la fundición del cobre se necesitan de dos etapas las cuales son [2]:

➤ **Recepción y Muestreo:**

En esta primera fase el objetivo que tiene es que como normalmente se trabaja con concentrados de diferentes procedencias, es necesario hacer un muestreo de ellos y clasificarlos de acuerdo con la concentración de cobre, hierro, azufre, sílice y porcentaje de humedad que tengan. Este proceso consiste en que el concentrado adquirido se deberá almacenar, donde se obtienen muestras que son sometidas a análisis de laboratorio para determinar los contenidos de cobre, hierro, azufre, sílice y la humedad, información que es fundamental para iniciar el proceso de fusión. El contenido máximo de humedad es de 8%, ya que, con valores superiores, el concentrado se comporta como barro difícil de manipular y exige más energía para la fusión. De acuerdo con los resultados de los contenidos de cobre, el material se clasifica y almacena [2].

➤ **Proceso de Fusión:**

En esta segunda parte el objetivo es lograr el cambio de estado que permite que el concentrado pase de estado sólido a líquido para que el cobre se separe de los otros elementos que componen el concentrado. Y como ocurre esto, en la fusión el concentrado de cobre es sometido a altas temperaturas (1200 °C) para lograr el cambio de estado de sólido a líquido. Al pasar al estado líquido, los elementos que componen los minerales presentes en el concentrado se separan según su peso, quedando los más livianos en la parte superior del fundido, mientras que el cobre, que es más pesado se concentra en la parte baja. De esta forma es posible separar ambas partes vaciándolas por vías distintas [2].

1.3. SISTEMA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA: DEFINICIÓN DE QUEMADORES

El quemador resulta ser el elemento crítico en el horno. Sin un quemador no existirá transferencia de energía y sin energía no se producirá la fusión del material [2].

Una de las condiciones para garantizar la combustión completa de cualquier combustible es lograr una mezcla homogénea entre el combustible y el aire. Además, para producir una rápida inflamación del combustible y la más alta temperatura de combustión es necesario también lograr una correcta dosificación del oxígeno o del aire, así como una adecuada atomización del mismo. Para tales fines se utilizan los dispositivos denominados quemadores [7].

Cuando estos quemadores no producen una correcta atomización del combustible, el proceso de inflamación es muy lento o no se produce, esto provoca una disminución en la temperatura de la llama obtenida, pues parte del calor se emplea en calentar el aire excesivo de la mezcla [7].

Después de lograr el encendido en un quemador es preciso mantener la estabilidad de la llama. Si no es así, la combustión se podrá extinguir o dar como resultado varias pulsaciones que dañen los equipos del horno. En los casos extremos se puede producir explosiones con efectos desastrosos.

Para mantener de la llama en un punto es necesario que la velocidad de los gases se iguale a la velocidad de propagación de la llama este es el caso de los quemadores [7].

Los problemas frecuentes de estabilidad de la llama pueden atribuir al sistema de transporte de combustible o al sistema de alimentación del aire donde se puede originar variaciones transitorias en la relación de aire-combustible, incluso cuando las condiciones promedio son favorables [7].

Las condiciones básicas que deben reunir un quemador son [7]:

- Margen de regulación, índice de la relación entre caudal máximo y mínimo de combustible que gasta un quemador, debe ser adecuado a las necesidades del proceso. Debe existir la estabilidad en un quemador definiendo esta como la capacidad de mantener la llama dentro de los límites de sus campos de regulación.
- Se debe poder controlar la forma y dimensiones de la llama, que vienen determinadas fundamentalmente por la potencia del quemador.
- Se debe seleccionar de acuerdo con la cámara de combustión.

1.3.1. REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

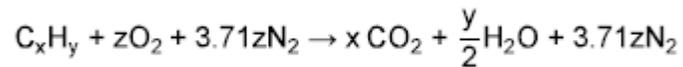
La combustión es una reacción química de oxidación, en la cual generalmente se desprende una gran cantidad de energía, en forma de calor y luz, manifestándose visualmente como fuego [8].

En toda combustión existe un elemento que arde (combustible) y otro que produce la combustión (comburente), generalmente es oxígeno en forma de O_2 gaseoso [8].

En una reacción completa todos los elementos que forman el combustible se oxidan completamente. Los productos que se forman son el dióxido de carbono (CO_2) y el agua; el nitrógeno no reacciona y por lo tanto se mantiene invariable en los productos [8].

Combustible + aire → agua + dióxido de carbono + nitrógeno

La reacción química para la combustión estequiométrica (combustión completa) del hidrocarburo en aire se presenta a continuación [8].



donde:

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

Los requerimientos de aire u oxígeno para diferentes combustibles para que estos alcancen la combustión estequiométrica son descritos en la Tabla 1.1. Sin embargo, una combustión completa no se puede alcanzar en la realidad ya que los reactivos y reactantes están compuestos de otras moléculas que al reaccionar forman productos ajenos a la combustión completa, estos productos pueden ser monóxido de carbono, hidrógeno, óxidos de azufre (si el combustible posee azufre), carbón (en forma de hollín o ceniza) y, si la temperatura es alta, óxido de nitrógeno. En la combustión incompleta los productos que se queman pueden no reaccionar con el mayor estado de oxidación, debido a que el comburente y el combustible no están en la proporción adecuada [9].

Para la mayoría de combustibles, como el aceite diésel, carbón o madera, una reacción de pirolisis ocurre antes de la combustión. En la combustión incompleta, los productos de la pirolisis del combustible permanecen sin quemarse y contaminan el humo con partículas dañinas y gases [8].

Para iniciar la combustión de cualquier combustible, es necesario alcanzar una temperatura mínima, llamada temperatura de ignición, que se define como la temperatura, en °C y a 101.325 kPa (1 atm) de presión, a la que los vapores de un combustible arden espontáneamente [8].

La temperatura de ignición, en °C y a 1 atm, es aquella a la que, una vez encendidos los vapores del combustible, éstos continúan por sí mismos el proceso de combustión [8].

Tabla 1.1. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiométrica de algunos combustibles.

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

1.3.2. LLAMA

La llama es la manifestación visual de la reacción de combustión. La llama es provocada por la emisión de energía de los átomos de algunas partículas que se encuentran en los gases de la combustión, al ser excitados por el intenso calor generado en este tipo de reacciones [10].

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 [3].

La velocidad de propagación depende de la transferencia de calor de los gases quemados y a quemarse, cuando alcanzan la temperatura de ignición [3]. Las características de las llamas son las siguientes [3]:

Distribución específica de transferencia de calor radiante y convectiva;

- Combustión completa,
- Mínimo de ruidos, y
- Ausencia de oscilaciones.

El color y la temperatura de la llama son dependientes del tipo de combustible involucrado en la combustión. Con respecto a los hidrocarburos, el factor más importante que determina el color de la llama es el suministro de oxígeno y el alcance que tiene la pre-mezcla oxígeno-combustible, este último también determina la tasa de combustión y la temperatura de la reacción [10].

Para ilustrar este efecto se describirá los distintos cambios por los que atraviesa una llama en un mechero Bunsen (ver, Fig. 1.7) [2]:

- 1) Bajo condiciones normales de gravedad y mientras la válvula de oxígeno está cerrada, la llama del mechero tiene un color amarillo (también llamada flama de seguridad) cuya temperatura esta alrededor de los 1,000 °C. Se generan partículas de hollín que quedan suspendidas en el aire.
- 2) A medida que la válvula se abre levemente, la mezcla oxígeno-butano se lleva a cabo, se reduce el hollín producido debido a que existe una combustión más completa, y la reacción genera la suficiente energía para ionizar las moléculas de gas en la flama, lo cual deriva en un cambio notable del color de la llama de amarillo a anaranjado.
- 3) Cuando la válvula se encuentra medio abierta o un poco más, mayor cantidad de oxígeno se ve mezclado con el combustible y la llama empieza a tomar un color azul, disminuyendo aún más el hollín e incrementando la temperatura de la llama.
- 4) Finalmente, la llave está completamente abierta y la mezcla oxígeno-combustible alcanza la estequiometria, llegando a elevar la temperatura de la llama al máximo (1,600 °C).

La combustión estequiométrica (combustión completa) del combustible con el aire genera la mayor temperatura de la llama. Exceso de aire/oxígeno la reduce al igual que la falta de este [10].

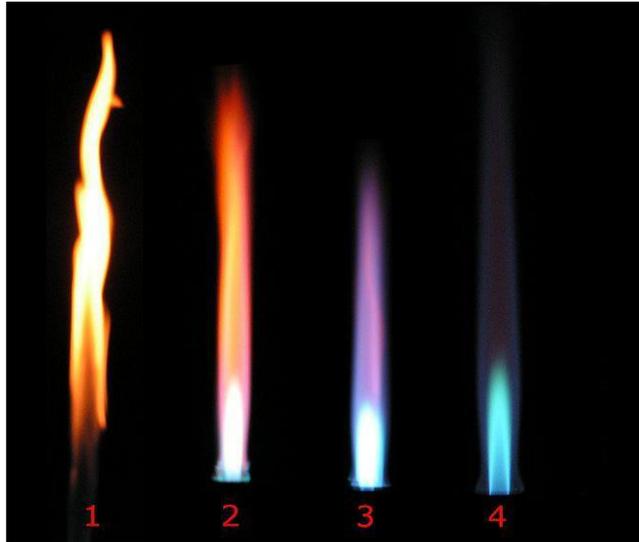


Fig. 1.7. Diferentes tipos de llama en un mechero Bunsen [10].

1.3.3. PODER CALORÍFICO

El poder calorífico de un combustible queda definido por el número de unidades de calor liberadas por la unidad de masa o de volumen del combustible, quemada en un calorímetro en condiciones previamente establecidas; es decir [2]:

- 1) Combustible sólido y líquido por unidad de masa, se expresa en kcal/kg o kJ/m^3 .
- 2) Combustibles gaseosos por unidad de volumen en condiciones normales (a 0°C y 760 mm de Hg), se expresa en kcal/m^3 o kJ/m^3 [9].

Del poder calorífico se establecen dos los cuales se detallan a continuación:

- Poder calorífico superior.- Es la cantidad total de calor de un combustible, incluyendo el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en dicho combustible [9].

- Poder calorífico inferior.- Es la cantidad de calor que resulta al restar del poder calorífico superior el calor latente del agua formada por la combustión del hidrógeno contenido en el combustible [9].

Una vez se ha establecido los principios básicos de la combustión, se procede a profundizar en el quemador [2].

1.3.4. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL QUEMADOR

En la Fig. 1.8 se presenta un tipo de quemador este resulta ser un quemador atmosférico, es decir, carece de un ventilador que fuerce el aire para que ocurra la mezcla. En este caso el gas, al pasar por la válvula de paso, viaja a gran velocidad a través del orificio y, el ímpetu con que entra el flujo de gas causa que el aire exterior sea succionado y forzado a ingresar al quemador. La presión de velocidad de la mezcla se convierte en presión estática suficiente para impulsar la mezcla hasta la salida y al hacer contacto con una chispa se ve incendiada la mezcla [11].

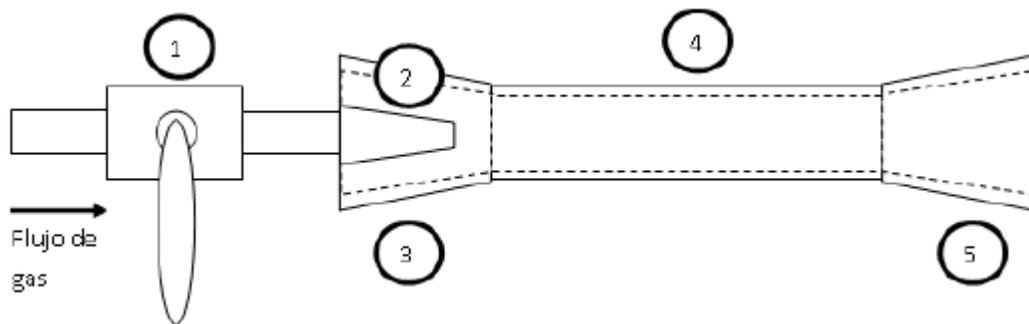


Fig. 1.8. Esquema de un corte transversal del quemador: Presenta los elementos del quemador de gas atmosférico empleado: 1) Válvula de paso, 2) Boquilla, 3) Ingreso primario de aire, 4) Tubo mezclador y 5) Difusor [12 y 13].

Como se presentó en los apartados anteriores, para que se produzca una correcta combustión es importante que ingrese suficiente aire al tubo de mezcla

para que junto con el combustible, al hacer contacto con una chispa, se incendie y haya una combustión estequiométrica [2].

Ahora bien, debido a las fluctuaciones de presión por los cambios de temperatura, cantidad de gas presente en el contenedor de gas, el transporte del mismo, como también, dificultades en el correcto mezclado del combustible con el aire, resulta casi imposible una combustión estequiométrica, por lo tanto se recomienda que exista aire en exceso en la mezcla. El aire en exceso asegura la combustión estequiométrica del combustible, evitando los nocivos gases de una combustión pobre en oxígeno y una llama fría. Se reconoce que el aire en exceso disminuye el poder calorífico del combustible pues este aire absorbe energía de la combustión para elevar su temperatura; sin embargo, resulta beneficioso al proveer una llama limpia y de alta temperatura [11].

El aire en exceso generalmente se mide en porcentaje de volumen, lo cual se presenta en la ecuación [14].

$$e \% = \frac{\text{Aire real} - \text{Aire estequiométrico}}{\text{Aire estequiométrico}} \times 100\%$$

Se debe evitar a toda costa que más aire que el provisto ingrese al quemador, esto se debe a que, si no existe un control del ingreso del aire, una gran cantidad puede ingresar al tubo de mezcla impidiendo la combustión del gas. Se debe tener en consideración que para cada combustible existen dos límites de ignición en donde éste, si la mezcla no está en la proporción correcta, no se puede encender. Esto quiere decir que por debajo del límite inferior de mezcla aire-combustible, la mezcla no es suficientemente rica en combustible; lo inverso es cierto también, sobre el límite superior de inflamabilidad la mezcla es pobre en comburente (aire) y por lo tanto no se puede encender. La tabla 1.2 muestra algunos límites de inflamabilidad en el aire para gases comunes expresados como porcentaje de combustible en la mezcla [14].

Tabla 1.2. Algunos límites de inflamabilidad para gases comunes [14].

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

Por ejemplo, para un volumen dado de mezcla propano-aire, si la cantidad de combustible es inferior al 1.86%, aun cuando haya chispa, no habrá combustión; de igual manera, si la proporción propano-aire supera el 8.41% nunca habrá combustión. Los factores que inciden en el ingreso total del volumen de aire se presentan a continuación [11]:

- 1) Cantidad de gas entrante,
- 2) Presión del gas,
- 3) Gravedad específica del gas,
- 4) Diseño de la boquilla,
- 5) Posición de la boquilla,
- 6) Área disponible de entrada de aire,
- 7) Diseño del tubo mezclador,
- 8) Dimensiones y forma del difusor,
- 9) Área total de salida, y
- 10) Temperatura de operación del difusor.

Todos los factores son posibles de controlar, sin embargo, la gran cantidad de condiciones y variabilidad de aplicaciones impiden que se especifiquen los factores para aplicaciones generales; por lo tanto, un buen diseño requiere de una gran cantidad de iteraciones para poder llegar al funcionamiento óptimo de un quemador [11].

Ahora bien, dentro de los objetivos planteados, el diseño y la construcción del quemador queda fuera del alcance de este trabajo de graduación, por lo tanto no se procederá a ahondar en los principios de funcionamiento del quemador, los fenómenos físicos involucrados ni la manera de construir uno que sea óptimo para esta aplicación en particular. Más bien, se adquirirá un quemador

atmosférico comercial que cumpla con los requerimientos mínimos de energía del horno; esto agilizará la construcción de éste y reducirá el tiempo de espera para la puesta en marcha [2].

El quemador para adquirir es un quemador atmosférico posee la ventaja de ser completamente independiente de una fuente de energía, lo cual le aporta versatilidad y mayor economía. Ahora bien, para que opere de manera adecuada, la cámara interior del horno se debe diseñar de manera tal que no exista una contrapresión dentro de ésta, ya que si la hay, impediría el funcionamiento adecuado del quemador atmosférico. Para ello se recomienda la elaboración de una chimenea para que los gases de escape puedan salir libremente sin incrementar la presión interior del horno [12].

1.4. MATERIALES REFRACTARIOS

El término refractario se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse. Los refractarios son materiales inorgánicos, no metálicos, porosos y heterogéneos, compuestos por agregados minerales termoestables, un aglomerante y aditivos. Las principales materias primas empleadas en la elaboración de estos materiales son óxidos de: silicio, aluminio, magnesio, calcio y circonio; y algunos refractarios no provenientes de óxidos como los carburos, nitruros, boratos, silicatos y grafito [15].

Los materiales refractarios deben mantener su resistencia y estructura a altas temperaturas, resistir los choques térmicos, ser químicamente inertes, presentar baja conductividad térmica y bajo coeficiente de dilatación. Los óxidos de aluminio (alúmina), de silicio (sílice) y, magnesio (magnesita) son los materiales refractarios más importantes [16].

Las propiedades de mayor peso en los refractarios son: composición química, estabilidad dimensional, porosidad, densidad, resistencia a la compresión en frío, cono pirométrico equivalente (PCE, por sus siglas en inglés), refractariedad bajo condiciones de alta temperatura, deformación por fluencia

lenta a alta temperatura, estabilidad volumétrica a alta temperatura (expansión y contracción) y conductividad térmica [15].

Normalmente, los refractarios no tienen una temperatura de fusión específica. Sin embargo, llega a una temperatura en donde el material empieza a reblandecerse. El cono pirométrico equivalente se refiere a la cuantificación de la transición de fase que tiene lugar dentro de un intervalo de temperaturas en donde se lleva a cabo dicho fenómeno. Este es medido a partir de la caída de la punta de un cono elaborado de material refractario sometido a incrementos controlados de temperatura; la caída se expresa en grados [15 y 17].

1.4.1. PROPIEDADES DE LOS REFRACTARIOS

Las propiedades de los refractarios se dividen por sus propiedades físicas y químicas, entre las propiedades más relevantes se encuentran las siguientes [18]:

➤ Porosidad:

Ésta representa la relación entre el volumen de los poros y el volumen total del material, la cual generalmente se expresa en porcentaje.

➤ Permeabilidad respecto a los gases

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

➤ Estabilidad térmica

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

➤ Resistencia a escorias.

Comprende la propiedad de los refractarios de resistir la acción de escorias recalentadas hasta el estado líquido. Ella depende de la composición mineralógica y de la estructura (porosidad, agrietamiento, entre otros) del refractario. Cuando las escorias son acidas, los refractarios deben ser ácidos también; cuando aquellas son alcalinas, también lo deben ser los refractarios.

- Solidez
- Termo conductividad,
- Conductividad eléctrica
- Calor específico.

1.4.2 TIPOS DE REFRACTARIOS

A continuación, se detallarán los tipos de refractarios, clasificaciones y características de estos:

- Prefabricados

Según este criterio los materiales refractarios prefabricados se clasifican en: materiales conformados, ladrillos normales (rectos), ladrillos de arco como en la Fig. 1.10, en cuña, bloques y formas especiales, en la Fig. 1.9 se tiene diferentes formas de estos materiales [2].



Fig. 1.9. Diferentes formas de materiales refractarios prefabricados.

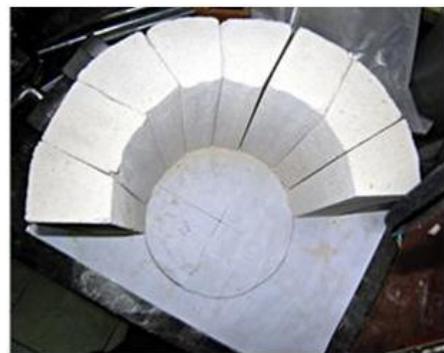


Fig. 1.10 Ladrillos refractarios de arco.

Estos ladrillos son piezas refractarias obtenidas por cualquiera de los métodos de conformado, principalmente por prensado, y luego sometidas a un proceso de cocción a alta temperatura, generalmente en un horno túnel, para lograr su aglomeración [19].

Los ladrillos refractarios representan la mayor parte de producción de refractarios por su versatilidad, costo y aplicación:

➤ Refractarios monolíticos

Son mezclas refractarias que pueden ser usadas directamente en el estado que se suministran, como es el caso de las masas plásticas o bien después de la adición de un líquido apropiado, como es el caso de los hormigones o cementos refractarios (ver, Fig. 1.11) [15].

La composición de un refractario moldeable depende del uso final pero están presentes los óxidos de Al_2O_3 , CaO y SiO_2 , en mayor o menor proporción, con otros componentes como impurezas de TiO_2 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 y otros aditivos que pueden modificar las propiedades físicas del refractario en función de su uso [15].



Fig. 1.11. Mezcla monolítica (Concreto refractario Ultra-70).

Las propiedades físicas de estos materiales dependen del empaquetamiento de sus constituyentes, siendo el objetivo principal que se persigue en la fabricación de estos materiales, para una composición dada, el obtener la máxima compactación con la menor cantidad de agua. Las propiedades de los refractarios moldeables están gobernadas por el tipo de

agregado y matriz, así como por la cantidad de cemento usado, ya que estas variables determinan la cantidad de agua requerida [15].

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

- 1) Elimina las uniones, las cuales resultan ser una inherente debilidad de los prefabricados;
- 2) La forma de aplicarlos resulta ser más rápida y fácil;
- 3) Las propiedades resultan mejores que la de los ladrillos;
- 4) El manejo y transporte es más simple;
- 5) Ofrece una efectiva reducción del espacio en bodega y elimina las formas especiales;
- 6) Poseen mejor resistencia a la fluencia lenta y mayor estabilidad volumétrica;
- 7) Se pueden instalar mientras el horno aún está caliente; y
- 8) Reducen los tiempos de mantenimiento [15].

Algunos tipos de refractarios monolíticos son:

- 1) Arcillas refractarias. Estos se mezclan con agua y luego se calientan para que las partículas (generalmente alúmina o sílice coloidal) se transformen o volatilicen para fomentar la unión cerámica entre ellas. Estos materiales generalmente se cuelean, y se conocen como concretos refractarios.
- 2) Refractarios plásticos. Son mezclas preparadas que se encuentran en una condición rígida, generalmente en bloques envueltos en polietileno. Cuando se aplican, deben ser cortados en piezas y luego son compactados neumáticamente. Pueden, fácilmente, ser compactados a cualquier forma y contorno.
- 3) Mezclas para compactado. Son materiales muy similares a los refractarios plásticos, pero son aún más rígidos. Estos se encuentran como una mezcla seca que se debe hidratar con un poco de agua antes de ser aplicados. Otras mezclas se pueden ya encontrar en su forma húmeda para su uso inmediato. Estos se deben instalar con un compactador neumático.

- 4) Recubrimientos refractarios. Usualmente son empleados cuando se quiere proteger la superficie de alguna herramienta en contra del ataque químico. Su propósito es únicamente cubrir la superficie de trabajo, por ello, estas se encuentran en capas delgadas.
- 5) Mortero refractario. Este producto también pertenece a los refractarios monolíticos adecuado para la colocación, anclaje y pegado de ladrillos refractarios, partes pre-manufacturadas (componentes) y productos aislantes; también para cubrir irregularidades de la superficie de las paredes de los hornos y para prevenir que la escoria ingrese a las uniones. La composición de este mortero varía dependiendo del grado específico de ladrillo o propósito de aplicación. Esos están compuestos de aditivos de grano fino y aglutinantes. Estos morteros son suministrados secos o listos para ser utilizados [15].

➤ Aislantes refractarios

Los materiales aislantes reducen considerablemente la pérdida de calor a través de las paredes de los hornos. Una baja transferencia de calor se puede alcanzar al colocar capas de material con baja conductividad térmica entre la superficie interna caliente de un horno y la superficie externa, haciendo que esta última se mantenga a una baja temperatura [15].

La razón de su baja conductividad se debe a la alta cantidad de poros dentro del material, los cuales están llenos de aire y por lo tanto impiden una alta tasa de transferencia de calor. Estos materiales usualmente son muy ligeros. Materiales con una porosidad entre 75 y 85% se consideran muy livianos, y por arriba de ese porcentaje se vuelven materiales ultra-livianos [15].

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

Entre los aislantes refractarios se pueden encontrar:

- ✓ Ladrillos aislantes,
- ✓ Cementos aislantes,

- ✓ Fibra cerámica,
- ✓ Silicatos de calcio, y
- ✓ Recubrimientos cerámicos.

Se debe tener en consideración que el calor excesivo afecta a todo material aislante de manera adversa; sin embargo, la temperatura a la cual el material empieza a deteriorarse varía considerablemente de acuerdo al tipo de material seleccionado. Por lo tanto, al escoger un material aislante se debe tener en seria consideración la temperatura de operación. La tabla 1.3 muestra algunas propiedades de los refractarios aislantes, en ella no está incluida la fibra cerámica [15 y 20].

Tabla 1.3. Propiedades físicas de materiales aislantes [20].

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

➤ Fibra cerámica

Es una familia de productos aislantes refractarios elaborados en fibras esponjosas parecidas al algodón. Estas pueden ser utilizadas para fabricar telas, mantas, tablas, bloques, entre otros. Estos materiales poseen una muy baja conductividad térmica, baja capacidad calorífica, extremadamente livianos e inmunes a los choques térmicos y son químicamente estables [15 y 20].

Usualmente se fabrican en dos calidades diferentes basadas en el contenido de Al_2O_3 . En la actualidad también se pueden encontrar productos que contienen ZrO_2 el cual ayuda a reducir la contracción del material al trabajar a altas temperaturas por un tiempo prologando. Algunas composiciones comerciales y sus temperaturas de operación se presentan en la Tabla 1.4 [15].

Tabla 1.4. Operación continua recomendada para diferentes composiciones de fibras cerámicas [20].

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

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

- 1) Baja conductividad térmica. Debido a su baja conductividad térmica posibilita la construcción de recubrimientos más delgados con la misma eficiencia energética de los refractarios convencionales. Resulta ser 40% más efectivo que los ladrillos refractarios de mejor calidad y 2.5 veces mejor que el asbesto. La fibra cerámica es mejor aislante que el silicato de calcio.
- 2) Liviano. La densidad promedio de la fibra cerámica es 96 kg/m³. Es un décimo del peso del ladrillo aislante refractario y un tercio del peso del asbesto. Los soportes estructurales de los hornos se pueden reducir hasta en un 40%.
- 3) Bajo almacenamiento calorífico. Los recubrimientos de fibra cerámica absorben menos calor debido a su baja densidad. Por lo tanto, los hornos pueden ser calentados y enfriados más rápidamente.
- 4) Resistentes al choque térmico. La fibra cerámica puede resistir el choque térmico debido a su matriz resiliente. Esto permite ciclos rápidos de calentamiento y enfriamiento, mejorando la disponibilidad y productividad de un horno.
- 5) Resistencia química. La fibra cerámica resiste la mayoría de ataques químicos y no se ve afectada por los hidrocarburos, agua y vapor presente en los gases de escape.

- 6) Resiliencia mecánica. La alta resiliencia mecánica de la fibra cerámica hace posible la fabricación de hornos con estos recubrimientos fuera del sitio de instalación, para luego transportarse ya armados sin el riesgo de daño.
- 7) Bajos costos de instalación. Como la instalación de la fibra cerámica es un proceso ya estandarizado, no se requieren de habilidades especiales. Estos materiales no requieren de curado ni de secado previo y tampoco existe riesgo de fisuras o descamación al ser calentados después de instalados.
- 8) Fácil mantenimiento. En caso de daño físico, la sección dañada puede ser rápidamente removida y reemplazada con una nueva pieza. Secciones de paneles pueden ser prefabricados para una rápida instalación.
- 9) Eficiencia térmica. La eficiencia térmica de un horno con recubrimiento cerámico se ve mejorada de dos formas. Primero, la baja conductividad de la fibra cerámica permite que el recubrimiento sea más delgado y, por lo tanto, que el horno sea más pequeño. Segundo, la rápida respuesta de la fibra cerámica a los cambios de temperatura también permite un control más preciso y uniforme de la distribución de temperatura dentro del horno.
- 10) Ahorro de combustible. Los ahorros pueden llegar hasta un 60% en el caso de algunos hornos de operación intermitente [15].

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

- 1) Contracción a altas temperaturas, hasta un 5% para un ciclo de operación de 24 h a 1300 °C.
- 2) La resistencia mecánica de la fibra cerámica es baja. Soporte apropiado debe ser provisto para todos los refractarios de fibra cerámica.
- 3) Tienden a combarse a altas temperaturas debido al ablandamiento de las fibras si estas no están apropiadamente soportadas.
- 4) No pueden ser utilizadas en ambientes hostiles y severos. Estos materiales recogen gran cantidad de polvo y humo. No se pueden emplear para procesar escorias o metales fundidos.
- 5) Tienden a ser más caros que los refractarios convencionales. Sin embargo, los ahorros en la mano de obra y energía sobrepasan la inversión inicial [15 y 20].

1.4.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA REFRACTARIOS

Al diseñar un horno de fundición generalmente se comete el error de no darle la suficiente atención a la selección del refractario, lo que hace que la vida útil de éste disminuya considerablemente y sea una fuente de costos de mantenimiento futuros que se podrían evitar [15].

Al seleccionar el mejor material se debe tomar en consideración el metal a fundir, las temperaturas a alcanzar, el tiempo de fundición, cuánto tiempo se mantendrá el metal en el horno, que aditivos o agentes aleantes se utilizarán y la forma en que recubrirán las superficies. Por lo tanto, la selección del refractario se basa en lo que se considera ser el factor más crítico en relación al patrón de desgaste bajo los parámetros de operación normal del horno con el objetivo de poder alcanzar el mejor ahorro económico. La selección correcta no sólo otorga una mayor vida útil sino también reduce el tiempo en que el horno está fuera de servicio [15].

En este sentido, es importante que se consideren las condiciones de utilización. Por ejemplo, los materiales refractarios ácidos no se pueden utilizar en presencia de una base química y viceversa dado que se produciría corrosión. El circonio, la chamota y el dióxido de silicio son ácidos, la dolomita y la magnesita son básicas, mientras que el óxido de aluminio, la cromita, el carburo de silicio o el carbono son neutros. El fallo en la correcta selección del material puede producir una acelerada disminución de la vida útil del refractario. En el caso de aleaciones no ferrosas se recomienda el uso de materiales básicos como la magnesita, dolomita o cromita [15 y 16].

Finalmente, el factor económico es el que incide enormemente en el proceso de selección. El costo de la instalación, de mantenimiento, de reparación y reemplazo del refractario se deben mantener al mínimo. Sin embargo, no se debe caer en el error de seleccionar un material refractario únicamente por su bajo precio y facilidad de instalación, las consideraciones anteriores se deben tomar en consideración para no incidir en pérdidas innecesarias [15].

1.5. CONSERVACIÓN DE CALOR DENTRO DEL HORNO

Uno de los retos a vencer en el diseño y fabricación de hornos es la economía en el uso de combustible, la cual debe equilibrarse con los costos de fabricación y la resistencia térmica de los materiales. Se habla de economía porque a medida que el horno posee una mayor capacidad para evitar las fugas de calor a través de sus recubrimientos, el consumo de combustible disminuye y la rapidez de calentamiento aumenta, por lo tanto, el suministro de energía (que resulta ser uno de los mayores costos de operación de un horno) se ve grandemente reducido [15].

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

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

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

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

- c) Espesor de la pared. Si la pared del refractario es delgada, el recorrido del calor a través de esta es más corto y por lo tanto hay un mayor flujo de calor al ambiente.
 - d) Velocidad y temperatura del aire. La transferencia de calor se ve favorecida con un flujo de aire turbulento característico de altas velocidades de flujo de aire y por los gradientes de temperatura existente entre el exterior del horno y el aire circundante.
 - e) Tipo de operación del horno, de manera continua o intermitente. Un horno operado de manera continua posee ciclos de trabajo largos, en donde las mayores pérdidas de calor se producen en las etapas de operación y mantenimiento, mientras que en un horno intermitente la mayor pérdida de calor se da en la etapa de enfriamiento y por ende el mayor consumo de combustible se da por calentar el horno en frío hasta la temperatura de operación.
- 6) Otras pérdidas. Existen muchas otras pérdidas, aunque cuantificar estas pérdidas resulta difícil, entre estas se incluyen:
- a) Pérdidas debido a la manipulación. Al introducir herramientas como pinzas, cucharones, entre otras. Éstas absorben calor y las pérdidas dependerán de la frecuencia y el tiempo en que éstas permanezcan en el horno.
 - b) Pérdidas por combustión incompleta. El calor se pierde debido a las partículas de combustible que no se queman o por productos de la combustión incompleta que absorben energía.
 - c) Pérdidas por la formación de escamas en el refractario [20].

En este sentido, al diseñar el horno se debe hacer un análisis de transferencia de calor para conocer la magnitud de las pérdidas estimadas que provocarán el consumo de combustible teórico del horno. Ahora bien, el diseñador debe saber que las mayores pérdidas de calor en un horno se pueden controlar al:

- 1) Instalar aislante térmico para conservar el calor.

2) Incrementar el espesor del ladrillo refractario (lo cual no resulta ser muy efectivo pues incrementa considerablemente el costo de construcción del horno).

Como ejemplo de lo anterior se establece el caso de un horno de ladrillo refractario de 230 mm de espesor y una temperatura interna de 1100 °C el cual pierde 1647 kJ/m². Si se instalan un aislante térmico de 102 mm de espesor, las pérdidas se reducen a 363.40 kJ/m² y si se incrementa el espesor del aislante a 203 mm las pérdidas de calor alcanzan el valor de 204.41 kJ/m² [15 y 19].

Es importante advertir que la aplicación del aislante térmico se debe realizar luego de una cuidadosa consideración de las consecuencias que este puede causar en las temperaturas del refractario [15].

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

Una temperatura de operación por encima de la de servicio del refractario puede debilitarlo o fundirlo. Si la cara exterior del refractario es aislada, se reducen las pérdidas de calor, pero también, es retenido un mayor calor en el sistema. Esto significa que, en la práctica, la temperatura promedio de las paredes del refractario se incrementa aun cuando el consumo de combustible se ve reducido. Esto puede resultar en un sobrecalentamiento del refractario o del aislante térmico y afectar de manera negativa al horno, de esto se deduce que [15]:

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

Para ilustrar este hecho se considera en un horno la temperatura en la entre cara ladrillo-aislante. Sin aislante, la cara externa del ladrillo estaría a 260 °C. Con aislante de 102 mm de espesor, esta misma sección tendría una temperatura de 900 °C y con 203 mm de espesor, la temperatura alcanzaría el valor de 982 °C [15].

Es por ello que antes de aislar un horno se deben considerar los efectos que el aislante puede causar en este. Como una regla empírica se puede mencionar que al colocar un aislante de 100 mm de espesor en la cara exterior de la pared del horno, el calor almacenado se incrementa en un 60% [15].

Aunque la reducción de las pérdidas de calor a través de las paredes puede compensar el incremento de calor almacenado. En hornos de ciclo intermitente se podría ahorrar aún más energía si se pudiera evitar que ese calor llegara a las paredes. Así, en primer lugar, se puede afirmar entonces que, entre más corto sea el ciclo de trabajo de un horno, mayor es la cantidad de calor almacenada en las paredes al comparar las pérdidas a través de ellas [15].

La solución a esta dificultad se encuentra en reducir al mínimo la cantidad de refractario que debe ser calentado y enfriado en cada ciclo. El desarrollo de ladrillos refractarios que a la vez son aislantes y el uso de fibras cerámicas de baja densidad han permitido que, en los hornos de operación intermitente, tenga una reducción drástica en el consumo de energía [15].

Hasta ahora se ha considerado los elementos que componen el horno, los cuales han ofrecido un panorama del diseño posterior. Sin embargo, también es importante considerar los metales a fundir, los cuales brindan una idea del proceso al cual estará sometido el horno y los consecuentes pasos, una vez el metal haya sido fundido. Por ello, en la sección 1.2 se han descrito brevemente el cobre que será el material a fundir [15].

1.5.2. CANTIDAD DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En todos los fenómenos de transferencia se identifican:

- Una diferencia de potencial, o fuerza conductora que causa la transferencia.
- Un flujo de la entidad que se transfiere, entre puntos a potenciales diferentes.
- Una resistencia que el medio opone a la transferencia en la región en que existe la diferencia de potencial.

- El potencial para la transferencia de calor es una diferencia de temperatura, así:

$$\Delta T = T_1 - T_2$$

donde:

ΔT es un diferencial de temperaturas,

T_1 es la temperatura inicial, y

T_2 es la temperatura final.

El calor se transfiere de alta a baja temperatura. El medio a través del cual el calor se transfiere opone una resistencia a la transferencia (R) [18].

A continuación, se presenta un breve resumen de los tipos de transferencia de calor, los cuales más se utilizarán en este trabajo de diseño de un horno de fundición:

- Flujo de calor por conducción:

La transmisión de calor solamente por conducción se presenta muy pocas veces en los hornos industriales. Se produce al dejar un metal frío sobre una solera caliente.

También se presenta durante un tiempo muy corto, al sumergir una pieza metálica en un baño de sales o de metal fundido. Si dos piezas de un material sólido están en contacto (no separadas por una capa de aire u otro fluido) las superficies de contacto alcanzan instantáneamente la misma temperatura, a la cual se halla entre las temperaturas de los cuerpos en contacto. Los gradientes de temperatura en las superficies de contacto son inversamente proporcionales a la conductividad de los materiales de contacto, como se puede observar en la Fig. 1.12. La cantidad de calor transmitido en la unidad de tiempo depende no solamente de las temperaturas de los cuerpos, sino también de la difusibilidad térmica y de la forma de los cuerpos [18].

Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos apropiados. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como ley de Fourier.

Para la pared plana unidimensional que se presenta en la Fig. 1.12, la cual tiene una distribución de temperatura $T(x)$, la ecuación o modelo se expresa como [18].

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx}$$

El flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área q''_x (W/m^2) es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección x por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. La constante de proporcionalidad, k , es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica ($W/m \cdot K$) que se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área de diferencia de temperatura y es una característica del material de la capacidad para conducir el calor [18].

En las condiciones de estado estable que se presenta en la Fig. 1.13, donde la distribución de temperatura es lineal, el gradiente de temperatura se expresa como [18]:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

donde:

T_1 es la temperatura inicial, y

T_2 es la temperatura final.

Además, el flujo de calor se calcula como:

$$q''_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L}$$

donde:

q''_x es el flujo de calor en dirección x en W/m^2 ,

dT/dx es el gradiente de temperatura,

k es la constante de proporcionalidad en $W/m \cdot K$,

A es el Área en m^2 , y

L es el espesor de la pared.

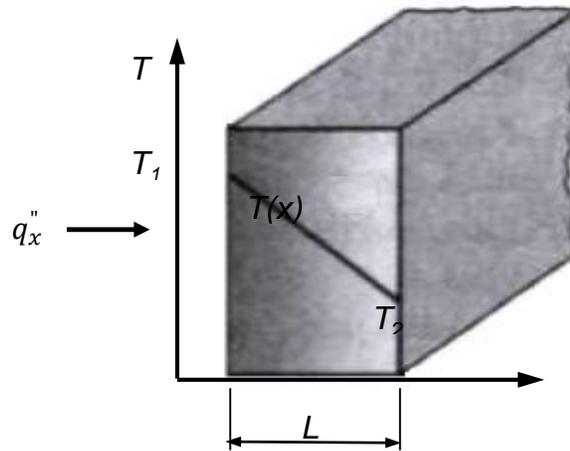


Fig. 1.12. Transferencia unidimensional de calor por conducción.

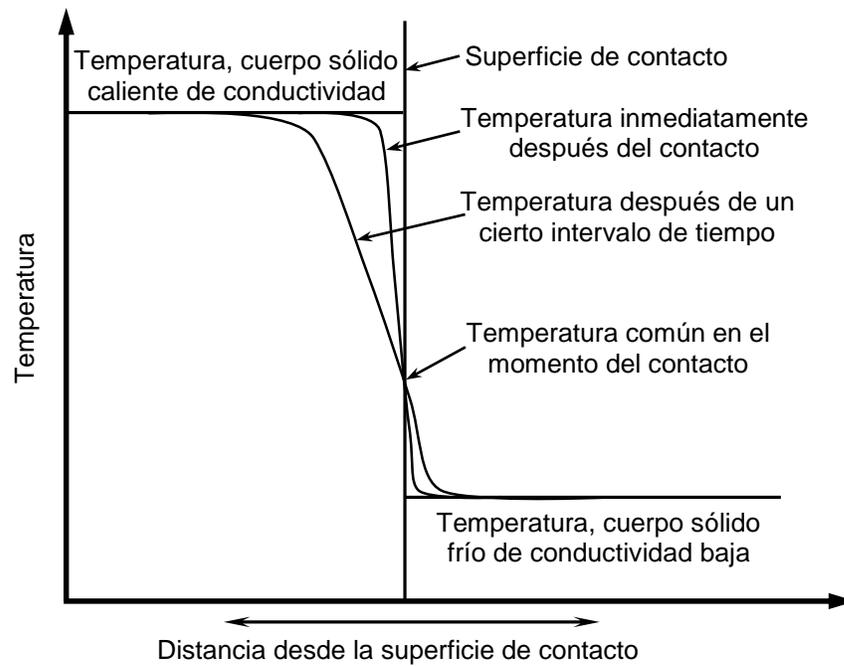


Fig. 1.13. Efecto de la conductividad y el tiempo sobre los gradientes de temperatura de dos sólidos de diferente temperatura al transmitir el calor por conducción.

➤ Flujo de calor por convección:

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos [21].

La convección recibe el nombre de convección natural o libre si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido.

Se puede decir que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton como [21]:

$$\dot{Q}_{cov} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

donde:

h es el coeficiente de transferencia de calor por convección en W/m^2 ,

A_s es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia calor por convección en m^2 ,

T_s es la temperatura de la superficie y

T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie.

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de este y la velocidad masiva del mismo [21].

➤ Flujo de calor por radiación:

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho la transferencia de calor por

radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Esta es la manera en que la energía del sol llega a la tierra [21].

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados [21].

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s en (K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann como [21]:

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \sigma A_s T_s^4$$

donde

σ es la constante de Stefan-Boltzman con un valor de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

1.6. PROCESO DE FUSIÓN

La fundición es uno de los más antiguos procesos de manufactura que se remonta a 6 mil años atrás, con la fundición se pudieron hacer formas mucho más complejas. En proceso de fundición el metal fundido fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde donde se solidifica y toma la forma de la cavidad del molde, el término fundición se aplica también a la parte resultante de este proceso [18].

Con origen en el latín fusión, el concepto de fusión permite describir al acto o consecuencia de fundir o fundirse, es decir, de derretir y licuar diversos cuerpos sólidos como el caso de los metales y lograr que de dos o más cosas quede sólo una.

De acuerdo a la teoría, se conoce como fusión al procedimiento de carácter físico que implica un cambio de estado en un material que pasa de sólido a líquido. Al calentar el material en estado sólido, tiene lugar una transferencia de energía a los átomos, que comienzan a vibrar con mayor rapidez.

Se podría decir que fusión y fundición hacen referencia a un mismo procedimiento, aunque el primer concepto se reserva para los metales y los sólidos cristalinos que se licuan a temperaturas elevadas.

Los procesos de fundición del metal se dividen en dos categorías de acuerdo al tipo de moldes, por moldes desechables y por moldes permanentes. En las operaciones de fundición con molde desechable, éste se destruye para remover la parte fundida, como se requiere un nuevo molde por cada nueva fundición, las velocidades de producción son limitadas, ya que se requiere más tiempo para hacer el molde que para la fundición en sí, sin embargo, para ciertas partes se pueden producir moldes y fundiciones a velocidades de 400 partes por hora o mayores. En los procesos de moldeo permanente, el molde se fabrica con metal u otro material durable que permita usarlos en repetidas operaciones de fundición. En consecuencia, estos procesos tienen una ventaja natural para mayores velocidades de producción [22].

El proceso de fundir consiste en una serie de pasos secuenciales realizados en un orden definido, cabe destacar que cada área presenta sus operaciones y estudios de importancia para la obtención de una pieza final de calidad, a continuación se presenta un breve resumen de estas etapas del proceso de fundición [2]:

- 1) Este proceso comienza con un modelo cuya forma geométrica determina la forma de la parte a fundir. La cavidad se debe diseñar de forma y tamaño ligeramente sobredimensionado, esto permitirá la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento. Cada metal sufre diferentes porcentajes de contracción; por lo tanto, la cavidad se debe diseñar para el metal particular que se va a fundir. Con el modelo se construye el molde. Los moldes se hacen de varios materiales que incluyen arena, yeso, cerámica y metal.
- 2) En una operación de fundición, se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido. Después se vierte directamente en la cavidad del molde. El sistema de vaciado en un molde de fundición es el canal o red de canales por

donde fluye el metal fundido hacia la cavidad desde el exterior. El sistema de vaciado, consiste típicamente en un bebedero de colada a través del cual entra el metal a un canal de alimentación que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero existe frecuentemente una copa de vaciado para minimizar las salpicaduras y la turbulencia del metal que fluye en el bebedero. Representado como un simple embudo en forma de cono.

- 3) Tan pronto como el material fundido en el molde empieza a enfriarse, y conforme desciende la temperatura, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. Se requiere tiempo para completar este cambio de fase, porque es necesario disipar una considerable cantidad de calor. Durante este proceso, el metal adopta la forma de la cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y características de la fundición. En cualquier fundición cuya contracción sea significativa se requiere, además del sistema de vaciado, una mazarota conectada a la cavidad principal. La mazarota es una reserva en el molde que sirve como fuente de metal líquido para compensar la contracción de la fundición durante la solidificación. A fin de que la mazarota cumpla adecuadamente con su función, se debe diseñar de tal forma que solidifique después de la fundición principal.
- 4) Una vez que la fundición se ha enfriado lo suficiente, se remueve del molde. Se pueden necesitar procesamientos posteriores, dependiendo del método de fundición y del metal que se usa. Entre éstos se encuentran el desbaste del metal excedente de la fundición, la limpieza de la superficie, la inspección del producto y el tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, se puede requerir maquinado para lograr tolerancias estrechas en ciertas partes de la pieza y para remover la superficie fundida y microestructura metalúrgica asociada.

El punto de fusión del cobre es aproximadamente de 1183 °C, al mezclarse con sus principales aleantes que son estaño y zinc, se tienen diferentes resultados, generalmente cuando se requiere fundir grandes cantidades de este material se usan hornos de reverbero; para fundidoras pequeñas constituyen en su mayoría los hornos que usan crisoles de grafito [1].

La denominación de latones hace referencia a las aleaciones de cobre que contienen zinc, en cambio aquellas que contienen elementos como estaño se les conoce como bronce, debido a esto dos casos se puede indicar la existencia de una amplia variedad de materiales la importancia radica en las propiedades mecánicas fundamentalmente que dependen de su composición [1].

Los latones con 5 a 10 % de zinc presentan un bajo contenido de este, razón por la cual resulta fácil trabajar en frío, son bastante dúctiles pero presentan dificultad para ser maquinados, poseen gran resistencia a la corrosión y se desarrolla en forma adecuada al ser sometidos en altas temperaturas. Aquellos con 20 a 36 % de zinc presentan un contenido medio de zinc, razón principal para ser lo suficientemente baratos en el mercado, su maquinabilidad es aceptable, la resistencia es mejor que los de bajo contenido pero presenta problemas relacionados con la resistencia a la corrosión. Y por último están los latones con 36 a 40 % de zinc que presentan un contenido mayor de zinc tienen menor ductilidad por lo que resultan con problemas para trabajar en frío, por lo general estos materiales se extruyen en caliente [1].

Los bronce presentan un amplio espectro de propiedades y composiciones, así por ejemplo el bronce de 5% de Si y 1% de Mn que poseen propiedades similares a un acero dulce mantienen una buena resistencia a la corrosión [1].

1.7. GENERALIDADES DEL CRISOL

El crisol es el recipiente utilizado para albergar metales a ser fundidos en un horno y es utilizado para soportar las altas temperaturas encontradas en la fundición metálica. El material del crisol debe tener una alta temperatura de fusión, mucho mayor que la del metal a fundir, resistente al ataque químico del metal y, además, debe tener una excelente resistencia en caliente [23 y 24].

Los tipos de crisol que ofrece la industria vienen en tamaños muy variados, generalmente son numerados acorde a la cantidad de aluminio que puedan

contener y si se multiplica el valor por 3 se obtiene la cantidad de bronce que puede contener; aunque, cabe aclarar, que cada fabricante posee su propia denominación y no necesariamente se sigue esta norma. Como ejemplo del sistema de denominación, un crisol # 6 puede contener 6 lb de aluminio o 18 lb de bronce [23].

La duración de los crisoles de grafito depende del tipo de horno, y por lo tanto, del tipo de calentamiento, de la aleación que se funde y de su temperatura de fusión, a la vez del tratamiento al que se someta el caldo. Por término medio la duración se puede calcular en unas 60 a 80 fusiones [5].

Con respecto al crisol de arcilla grafitada el de carburo de silicio presenta la ventaja de que la conductividad calorífica y el rendimiento de fusión permanecen constantes. Por eso no tiene límite su duración respecto a la conductividad. Tiene, además, una mayor resistencia a los cambios de temperatura. Los crisoles de carburo de silicio cuando se les trata con cuidado, tienen una duración mayor que los de arcilla grafitada; también tienen un valor monetario más alto [5].

El crisol en un horno de tipo basculante es estacionario y no es removido en la colada de metal, por lo tanto los tipos de crisol que pueden ser utilizados para este tipo de hornos pueden ser visualizados en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Crisoles convenientes para hornos basculantes [23].

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

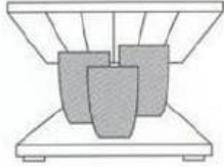
1.7.1. MANEJO DE CRISOLES

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

El correcto almacenamiento y transporte del crisol previene fallas futuras por ello se deben seguir algunas recomendaciones para la correcta manipulación del crisol que se pueden visualizar en la Tabla 1.6.

Cualquier daño en la superficie del vitrificado de protección acelera la oxidación, provoca pérdida de la resistencia mecánica y falla prematura [25].

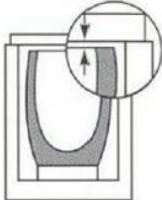
Tabla 1.6. Manejo general de crisoles.

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

1.7.2. INSTALACIÓN DE CRISOLES

Para una correcta operación del crisol y protección del mismo se deben tomar en consideración ciertas recomendaciones en cuanto a su instalación y condiciones de uso dentro de la cámara del horno las cuales se detallan en la Tabla 1.7 en la cual se indica la instalación correcta del crisol dentro de la cámara del horno.

Tabla 1.7. Ubicación del crisol dentro de la cámara del horno [25].

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

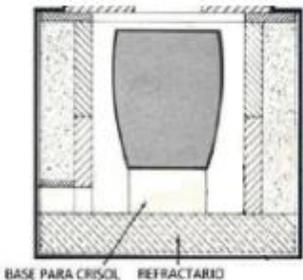
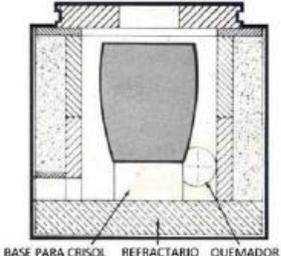
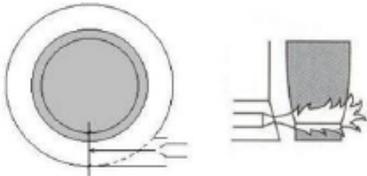
1.7.3. INSTALACIÓN DEL QUEMADOR

Los quemadores atmosféricos se utilizan para quemar gas y difieren principalmente en el modo en que se mezclan el aire y el combustible. El

quemador atmosférico es popular, como se aprecia en sus aplicaciones domésticas.

El momento cinético de la corriente gaseosa de entrada a baja presión se usa para aspirar parte del aire necesario para la combustión. Un cierre o mecanismo similar regula la cantidad de aire inducido de esta manera. El gas y el aire pasan juntos a través de un tubo que conduce a la abertura del quemador, mezclándose en el proceso. La mezcla arde en las puertas o aberturas del cabezal del quemador. En la Tabla 1.8 se especifica sobre la instalación del quemador y recomendaciones de operación en el horno.

Tabla 1.8. Instalación del quemador y recomendaciones de operación [25].

Descripción	Esquema
<p>1) Centrar el crisol en la base de soporte dentro del horno. El fondo de un crisol debe estar al mismo nivel o ligeramente arriba de la línea central de la entrada del quemador. Esto se realiza sentando el crisol en una base o block pedestal de altura apropiada. Los crisoles deben estar centrados para asegurar un buen espacio alrededor y una combustión uniforme.</p>	
<p>2) Revisión y limpieza del horno. Revisar el revestimiento interno del horno y reparar de ser necesario. Retirar cualquier objeto adherido a las paredes y piso. Asegurarse que el quemador esté limpio y correctamente alineado. Se debe realizar una limpieza previa a los diferentes elementos del horno.</p>	
<p>3) Verificar la alineación del quemador y asegurarse que la flama quede centrada y dirigida entre el crisol y la base. La salida del quemador debe correr tangencialmente alrededor del crisol y la base.</p>	
<p>4) Asegurarse que la llama sea ligeramente oxidante y no esté en contacto directo con el crisol. La llama debe rodear el crisol, es por ello que se recomiendan dos quemadores.</p>	

1.7.4. PRECALENTAMIENTO Y CURADO DEL CRISOL

El precalentamiento y curado del crisol es uno de los factores más importantes para prolongar la vida de dicho elemento. Se puede ocasionar un daño durante este proceso, el cual no se evidencia de inmediato, sino durante la operación del crisol. Para aumentar la vida útil de este es necesario tomar en consideración las siguientes recomendaciones [25]:

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

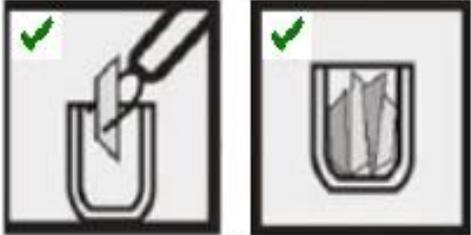
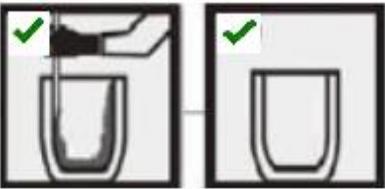
1.7.5. CARGA DEL CRISOL

La cantidad de metal que se cargara está establecido por el tamaño del crisol que se tiene.

La forma correcta de agregar el metal dentro del crisol se describe en la Tabla 1.9 en la cual se presenta explícitamente la manipulación en la carga y

recarga así también se presenta cómo evitar posibles daños al mismo y la limpieza correspondiente después de la operación del horno.

Tabla 1.9. Carga del crisol [25].

Descripción	Esquema
<p>1) Carga de material:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La carga debe ser colocada de forma que esta quede suelta en el crisol. • Colocar preferentemente las piezas más pequeñas y el material a granel en el fondo del crisol para que actúen como colchón a los lingotes grandes <p>Colocar los lingotes verticalmente dentro del crisol y asegurarse que haya espacio adecuado entre los lingotes y la pared del crisol</p>	 <p>Formas de colocación de la carga en el crisol.</p>
<p>2) Al recargar, se debe dejar un remanente de metal líquido en el crisol para permitir una fusión rápida. Evitar cargar lingotes grandes y en gran cantidad si el crisol tiene una pequeña cantidad de metal líquido. Esto causara la solidificación del metal, causando un agrietamiento inmediato del crisol.</p>	 <p>Evitar cargar gran cantidad de lingotes dentro del crisol.</p>
<p>3) El crisol se debe vaciar completamente al apagarse el horno. Un pequeño remanente de metal que quede se solidificará y muy posiblemente agrietará el crisol en la siguiente colada debido al diferencial de expansión entre el metal y el crisol. Los lingotes y otras piezas pesadas se deben colocar cuidadosamente dentro del crisol.</p>	 <p>Formas correctas de limpieza del crisol.</p>

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

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

1.8. MANTENIMIENTO DEL HORNO DE CRISOL

Es necesario conocer sugerencias para el empleo correcto de los materiales de construcción del crisol, su preservación y los pasos para mantener el horno en correcto funcionamiento. Se debe poseer una base para la construcción del horno y ponerlo en funcionamiento, de igual manera, propone información para desarrollar planes de mantenimiento en el mismo [2].

1.8.1. CURADO DEL CONCRETO REFRACTARIO Y SUS CUIDADOS

El curado del concreto refractario previene las pérdidas de humedad del refractario recién proyectado durante los cambios químicos asociados con la hidratación del aglomerante de aluminato de calcio [26].

Cuando éste se mezcla con agua se produce una reacción exotérmica en la cual se libera agua en una primera etapa. Se debe notar que las pérdidas de agua desde la superficie del concreto refractario antes de que el cemento este totalmente hidratado puede originar un revestimiento más débil y desprendimiento de polvo de la superficie cuando se pone en operación el horno. Para evitar ese problema, varios métodos de curado húmedo se pueden utilizar para prevenir éste. El refractario expuesto puede ser ligeramente rociado con agua, cubierto con un plástico o rociado con un componente de curado de concreto [26].

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

Es muy conveniente para los concretos refractarios que después de curados se les deje secar al aire el mayor tiempo posible, dando lugar a que se evapore parte del exceso de humedad [27].

Cuando se calienta por primera vez un revestimiento de concreto refractario se debe procurar que la temperatura suba lentamente y por igual. En

ningún caso debe subir más de 50 °C por hora. Un programa de calentamiento rápido hace que la cara caliente seque y eleve su temperatura mientras que el resto del hormigón se mantiene frío por la evaporación del agua. La cara caliente dilata causando el cuarteo de la cara fría. Como resultado, el revestimiento de hormigón refractario no es fuerte y se pierden algunas de las ventajas de un revestimiento monolítico [27].

En la Tabla 1.10 se presenta programas de secado que están basados en revestimientos de un componente para un espesor de 229 mm (9 pulg). El programa dependerá de la criticidad, temperatura de operación y tamaño del horno [28].

Tabla 1.10. Programas de secado del concreto refractario.

Pasos	Descripción
A	No aumentar la temperatura de los gases calientes en contacto con el concreto refractario a una velocidad mayor a 50 °C durante hora. Una vez se alcanza la temperatura de 120 y 260 °C, la temperatura se debe mantener un mínimo de media hora por 25 mm (1 pulg) de espesor de concreto refractario.
B	No aumentar la temperatura de los gases calientes en contacto con el hormigón refractario a una velocidad mayor de 40 °C durante hora. A las temperaturas de 120, 260 y 540 °C, se debe mantener la temperatura un mínimo de media hora por 25 mm (1 pulg) de espesor de concreto refractario.
C	No aumentar la temperatura de los gases calientes en contacto con el hormigón refractario a una velocidad mayor de 28 °C durante hora. A las temperaturas de 120, 260, 540 y 815 °C, se debe mantener la temperatura un mínimo de media hora por 25 mm (1 pulg) de espesor de concreto refractario.
D	No aumentar la temperatura de los gases calientes en contacto con el hormigón refractario a una velocidad mayor de 17 °C durante hora. A las temperaturas de 120, 260, 540 y 815 °C, se debe mantener la temperatura un mínimo de una hora por 25 mm (1 pulg) de espesor de cemento refractario.

En consecuencia entre más grande sea el horno, un programa de secado lento es ideal para mantener la integridad del mismo e incrementar su resistencia al choque térmico [28].

1.8.2. PRESERVACIÓN DE LA VIDA DEL REFRACTARIO

Los refractarios pueden fallar debido a errores constructivos y a que no se tomó en consideración el desempeño térmico y propiedades físicas de estos frente a las condiciones de operación del horno. Un ejemplo de esto es la colocación del quemador: insuficiente espacio en la cámara de combustión, una temperatura de llama muy elevada y que incide en el refractario, grandes gradientes de temperatura entre la superficie caliente y la superficie fría, el patrón de escape de los gases de combustión; son sólo algunos factores que podrían influir en la vida del refractario y que se podrían evitar con un diseño adecuado. Algunos aspectos importantes constructivos se presentan en la Tabla 1.11 [15].

Se debe asegurar que la persona a cargo de la albañilería del horno comprenda el funcionamiento y desempeño de los materiales involucrados a altas temperaturas [15].

Algunos factores clave que inciden en el buen uso e instalación del refractario [15]:

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

Tabla 1.11. Aspectos constructivos importantes [15].

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

1.8.3. PINTURA PARA ALTA TEMPERATURA

Las pinturas para la protección de superficies sujetas a temperaturas elevadas, tienen un campo de aplicación definitivamente específico. Son utilizadas para el pintado de caños de escapes, chimeneas, exterior de calderas, hornos, reactores, columnas de destilación y todo equipamiento sujeto a operar a altas temperaturas [2].

Las resinas de silicona son polímeros considerados como un grupo químico muy particular. Poseen una estructura similar a las orgánicas pero

presentan características inorgánicas por la presencia del silicio contenido en su molécula en combinación con hidrógeno y oxígeno. Cuando son expuestas a temperaturas elevadas, polimerizan, dando como resultado películas que soportan picos de temperatura de hasta 650 °C [2].

Los pigmentos seleccionados para formular una pintura de estas características deben también resistir la acción de la temperatura sin sufrir alteraciones. Comúnmente son utilizados pigmentos metálicos en forma de polvo o laminillas. Los que más se adaptan a esta finalidad son el zinc para temperaturas hasta 400 °C y el aluminio para temperaturas hasta 600 °C [2].

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

Los inconvenientes presentados, con las pinturas de silicona pura, son superados haciendo uso de productos sobre la base de siliconas modificadas con otras resinas tales como: hidrocarbonadas, acrílicas, alquídicas o combinaciones de éstas. Las pinturas sobre la base de siliconas modificadas, así como las de silicona pura, logran su curado final cuando son expuestas a las largas temperaturas de polimerización [2].

La gran diferencia de las pinturas formuladas con siliconas modificadas es que éstas permiten el transporte de las piezas pintadas y la manipulación durante el montaje, además de poder quedar expuestas por largos períodos a la intemperie sin sufrir alteraciones de resistencia física. Su inconveniente, es que ofrecen una pobre protección anticorrosiva ante la exposición por largos períodos de la película a la humedad y una menor resistencia a las temperaturas elevadas [2].

La necesidad de un horno basculante en las instalaciones de los laboratorio del Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador crea la importancia de realizar el diseño de un horno de este tipo, adecuado y que sustente la demanda de fundiciones a nivel académico, así de tal manera fomentar su construcción, y de esta forma aprovechar el refuerzo académico que el equipo pueda generar con su implementación en el área de metalurgia.

2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO TÉRMICO

El diseño del horno es una parte fundamental del proyecto, pues brinda un panorama de los requerimientos constructivos posteriores y parámetros de funcionamiento esperados. Implica, entonces, determinar dimensiones, seleccionar materiales y calcular requerimientos energéticos [29].

2.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Al diseñar un horno de crisol, se deben tomar algunas consideraciones para que éste pueda operar de manera óptima, entre estas se encuentran [30]:

- Los hornos cilíndricos son más eficientes que los hornos cuadrados,
- El horno se deben dimensionar acorde al crisol a utilizar,
- El diámetro de la cámara interior del horno debe ser entre 150 y 300 mm mayor que el diámetro del crisol,
- La altura de la cámara junto con su recubrimiento debe tener en cuenta el bloque base en el cual se colocará el crisol para evitar que la flama del quemador incida directamente sobre éste,
- El orificio del quemador se debe realizar en la parte inferior del horno, es decir por debajo del nivel del crisol y la salida sea tangente a la pared de éste, y
- El tiempo de fusión se debe estimar en una hora y la temperatura en la placa exterior del horno en 50 °C como medida de seguridad para no provocar por algún descuido de los usuarios una quemadura grave y, además, la pintura térmica de la carcasa metálica del horno puede soportar por mucho tiempo.

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

2.2. PARÁMETROS DE DISEÑO

En el horno de crisol se identifican los siguientes parámetros de diseño [29]:

- Metal a fundir,
- Tipo y tamaño del crisol a utilizar,
- Temperatura máxima de operación,
- Tiempo de operación, y
- Ubicación del horno y flujo de aire.

El metal a fundir ya ha sido definido, para lo cual se ha considerado el cobre por la alta temperatura de fusión para un metal o aleación no ferrosa, con lo cual se podrá fundir aleaciones de cobre y al aluminio y sus aleaciones, siendo importante destacar que dicho metal está especificado en el objetivo general de este trabajo de graduación.

El tipo y tamaño del crisol se selecciona tomando en consideración el tipo y la cantidad de metal a fundir y la necesidad de que éste no reaccione con el metal, los fundentes ni desgasificadores. Por lo tanto, se elige un crisol de grafito debido a que es neutro y no reacciona con el cobre y sus aleaciones ni el aluminio y sus aleaciones [29].

La temperatura máxima de operación se define por el metal cuya temperatura de fusión es la más elevada de los metales y sus aleaciones no ferrosas. En este caso el cobre determina la temperatura de operación máxima [29].

El tiempo de operación, al ser éste un horno para uso didáctico y de investigación, y cuyo uso será eventual se selecciona como intermitente y no más de 8 h por día (lo que toma en consideración el precalentamiento del horno) [29].

La ubicación del horno se establece en la planta piloto ubicada al costado norte del edificio de mecánica (al final del estacionamiento), con muros de 1.20 m de altura, lo demás de la pared con defensa metálica.

A continuación, en la Tabla 2.1 se presenta las dimensiones del crisol que se seleccionó de acuerdo con el volumen del metal a fundir que se ha estimado

y representa 80 % de la capacidad máxima del crisol. Además, en la Fig. 2.1 se presenta un corte de dicho crisol [29].

Tabla 2.1. Dimensiones de un crisol de grafito para fundir cobre.

Dimensiones del crisol	Pulg	Metros	Milímetros
Diámetro externo (D)	6.5	0.1651	165.1
Altura (H)	8	0.2032	203.2
Diámetro interno (d)	5.25	0.1334	133.4

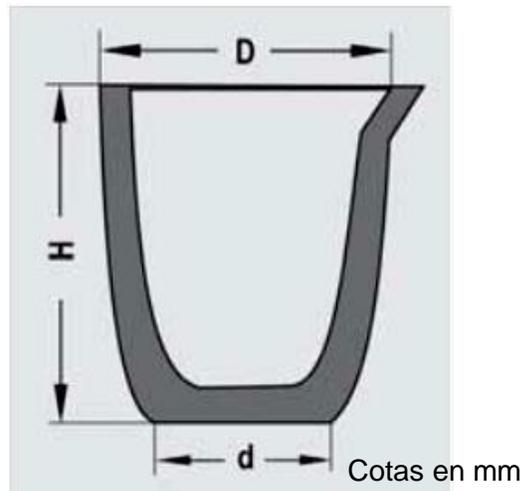


Fig. 2.1. Especificaciones de las dimensiones de un crisol [29].

2.3. DIMENSIONES DEL HORNO

Establecido los parámetros de diseño, se procede a determinar el tamaño del horno, para el cual se establece el diámetro interior (D_{int}) dado por la Ec. 2.1, así [29]:

$$D_{int} = D + E_L \quad (2.1)$$

donde:

D es el diámetro exterior del crisol en mm, y

E_L es el espacio libre sugerido en mm.

Luego, el espacio libre sugerido se calcula mediante la Ec. 2.2, la cual se expresa:

$$E_L = \left(\frac{E_{Lmin} + E_{Lmax}}{2} \right) \quad (2.2)$$

donde:

E_{Lmin} es el espacio libre mínimo sugerido que son 150 mm, y

E_{Lmax} es el espacio libre máximo sugerido que son 300 mm.

Sustituyendo la Ec. 2.2 en la Ec. 2.1, queda:

$$D_{int} = D + \left(\frac{150+300}{2} \right) = 165.1 + 225 = 390 \text{ mm.}$$

Para determinar las dimensiones exteriores del horno (D_{ext}) se calcula mediante la Ec. 2.3, así:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 * E_{refractario} + 2 * E_{aislante} + 2 * E_{car} \quad (2.3)$$

donde:

$E_{refractario}$ es el espesor del refractario en mm,

$E_{aislante}$ es el espesor del aislante en mm, y

E_{car} es el espesor de la carcasa en mm.

Para el refractario se asumió cemento refractario con un espesor de ~76 mm (3 pulg). Este espesor del recubrimiento es suficiente para proteger a la manta cerámica aislante y darle rigidez a la estructura [29].

Además del recubrimiento de cemento refractario se colocará una manta cerámica aislante que rodeará a éste por la cara exterior. Para este tipo de aplicación se recomiendan 63.5 mm (2.5 pulg) de espesor [12 y 13]. Siendo importante destacar que tanto el espesor del material refractario como el de la manta refractaria se justificarán su elección sobre los cálculos de la temperatura exterior alcanzada en el horno.

Finalmente, para el espesor de la carcasa (E_{car}) se selecciona una lámina negra de ~ 1.5 mm (1/16 pulg) de espesor. Siendo importante destacar que este espesor de lámina se justificará posteriormente sobre la base de los cálculos estructurales del horno.

Así, sustituyendo en la Ec. 2.3, queda:

$$D_{exterior} = 390mm + \left(6pulg * \frac{25.4mm}{1 pulg}\right) + \left(5pul * \frac{25.4mm}{1 pulg}\right) + (2 * 1.59) = 672.6 mm$$

En la Fig. 2.2 se presenta el diámetro interior y exterior del horno sin tomar en cuenta el espesor de la lámina, se observan las capas de recubrimiento representando de color gris claro la manta cerámica y de gris oscuro el cemento refractario.

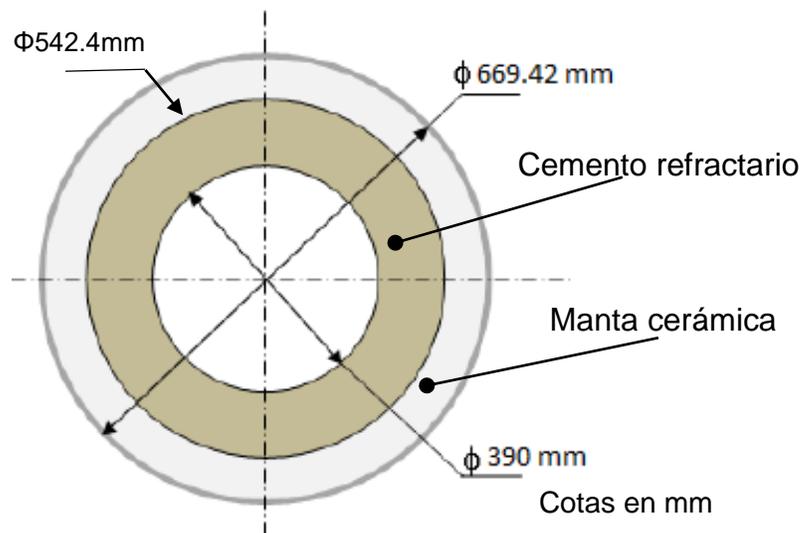


Fig. 2.2. Esquema que presenta el diámetro interior y exterior del horno. Notar las diferentes capas que conforman el recubrimiento [29].

La altura del horno (H_{horno}) se calcula mediante la Ec. 2.4, la cual se puede deducir de la Fig. 2.3, así:

$$H_{horno} = E_{refractario} + H_{base} + H_{crisol} + H_{salida de gases} + 2 * E_{car} \quad (2.4)$$

donde:

$E_{\text{refractario}}$ es el espesor del refractario en mm,

H_{base} es la altura de la base en mm,

H_{crisol} es la altura del crisol en mm,

$H_{\text{salida de gases}}$ es la altura de la salida de gases de escape.

Para la altura de la base (H_{base}) o base del crisol se elige 120 mm, la cual es un valor intermedio al recomendado por la industria de construcción de hornos, quienes establecen un valor entre 8 a 15 cm. Para la altura de salida de los gases se asume de 35 mm estas sugerencias las da la Industria FUNSA de hornos [3]. Dado que los otros parámetros de la Ec. 2.4 ya han sido determinados, se procede a sustituir en la Ec. 2.4, la cual queda:

$$H_{\text{horno}} = 76.2 + 120 + 203.2 + 35 + (2 * 1.59) \cong 513 \text{ mm}$$

Estas medidas básicas servirán de parámetro para realizar el análisis termodinámico: por lo tanto, se entiende que dichas medidas están sujetas a cambios, dependiendo de los resultados. En la Fig. 2.3 se presenta las dimensiones del horno.

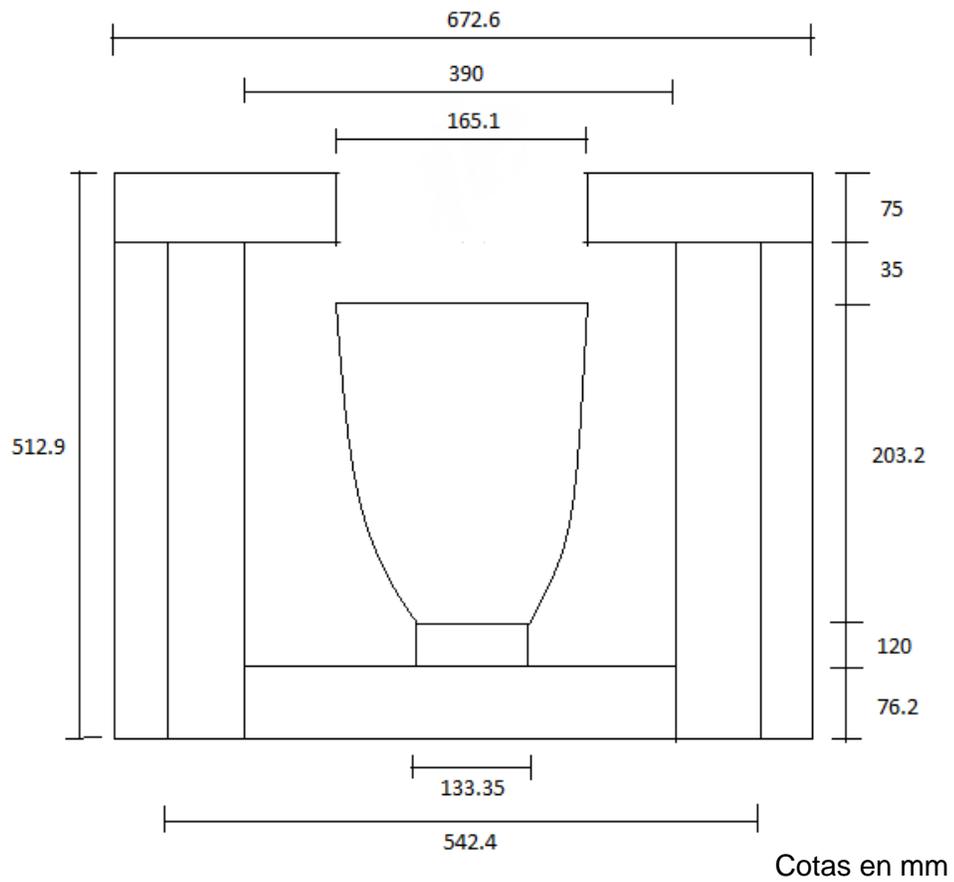


Fig. 2.3. Esquema del corte del horno que presenta las dimensiones.

2.4. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS

Una vez establecidas las dimensiones como se presentan en la Fig. 2.3 se procedió a calcular los requerimientos energéticos del horno mediante el cálculo del calor requerido tanto para la fusión del metal como también las pérdidas a través de las paredes del horno basculante.

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

El cálculo de la energía necesaria para fundir cualquier metal se puede simplificar si se supone que su conductividad térmica no varía en cierto intervalo de temperaturas. El error introducido debido a la suposición anterior resulta ser pequeño para esta aplicación en específico [29].

Para el cálculo se toma en consideración los diferentes calores específicos de los elementos en sus diferentes estados, así como el calor latente de fusión requerido para cambiar de estado el metal. El procedimiento y los resultados se presentan a continuación [29].

Así, en la primera etapa, se considera el cambio de temperatura del cobre en estado sólido, para lo cual se puede calcular el calor necesario para llevarlo a su temperatura de fusión (Q_{cu1}), el cual se expresa por la Ec. 2.5 [21].

$$Q_{cu1} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

donde:

m es la masa, la cual es de 8 kg

C_p es el calor específico del cobre y

ΔT es la diferencia de temperatura del punto de fusión del cobre y la temperatura ambiente

Sustituyendo en la Ec. 2.5, queda:

$$Q_{cu1} = 8 \text{ kg} * 385 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} * (1080 - 27) ^\circ\text{C} = 3\,243.24 \text{ kJ}$$

Luego, continua la etapa de fusión en la cual se calcula el calor latente por fusión (Q_{cu2}), la cual se expresa mediante la Ec. 2.6 [21]:

$$Q_{cu2} = m_{cu} h_{cu f} \quad (2.6)$$

donde:

h_{cuf} es la entalpía de fusión del cobre.

Sustituyendo en la Ec. 2.6, queda:

$$Q_{cu2} = 8 \text{ kg} * 13.10 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} * \frac{1 \text{ mol}}{0.0635 \text{ kg}} = 1,650.4 \text{ kJ}$$

Finalmente, para vaciar o colar el metal fundido en un molde se tiene que producir un calentamiento adicional a la temperatura de fusión del metal; es decir, se produce un sobrecalentamiento del Cu hasta llevarlo a la temperatura de colada, es decir, 1200 °C (Q_{cu3}), el cual se expresa por la Ec. 2.7 [21].

$$Q_{cu3} = m_{cu} C_{Pcu3} \Delta T_3 \quad (2.7)$$

donde:

C_{Pcu3} es el calor específico de fusión, y

ΔT_3 es la diferencia de temperatura de colada y fusión del cobre.

Sustituyendo en la Ec. 2.7, queda:

$$Q_{cu3} = 8 \text{ kg} * 430 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} * (1,200 ^\circ\text{C} - 1,080 ^\circ\text{C}) = 412.8 \text{ kJ}$$

Por lo tanto, el calor total requerido para poder colar el Cu ($Q_{cu\text{total}}$) se expresa por la Ec. 2.8 [21]:

$$Q_{cu\text{total}} = Q_{cu1} + Q_{cu2} + Q_{cu3} \quad (2.8)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.8 queda:

$$Q_{cu\text{total}} = 3\,243.24 + 1,650.4 + 412.8 = 5\,306.44 \text{ kJ}.$$

Lo anterior representa la cantidad de energía total para disponer del cobre para el colado, no obstante se tiene que considerar el calor necesario para

incrementar la temperatura del crisol hasta la temperatura del cobre disponible para el colado. Así, el calor necesario para llevar el crisol a la temperatura de colado del cobre (Q_{Crisol}), se expresa por la Ec. 2.9 [21].

$$Q_{crisol} = m_{crisol} C_{Pcrisol} \Delta T \quad (2.9)$$

donde:

m_{crisol} es la masa de crisol de 2.02 kg,

$C_{Pcrisol}$ es el calor específico del grafito de $0.17 \frac{kJ}{kg K}$, y

ΔT es la diferencia de temperaturas, así $T_0 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ y $T_f = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$.

Sustituyendo en la Ec. 2.9 queda:

$$Q_{crisol} = 2.02 \text{ kg} * 0.179 \frac{kJ}{kg K} * (1200 - 27) = 424.13 \text{ kJ}$$

Dado lo anterior, el calor total del metal fundido en un crisol disponible para el colado se calcula mediante la Ec 2.10, así:

$$Q_{total} = Q_{cu_{total}} + Q_{crisol} \quad (2.10)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.10, queda:

$$Q_{total} = 5 \text{ 306.44 kJ} + 424.13 \text{ kJ} = 5 \text{ 730.57 kJ}$$

Esta es la cantidad de energía mínima necesaria para disponer del cobre fundido en el crisol. Sin embargo, para conocer la energía a suministrar es necesario considerar los otros componentes del horno y pérdidas a través de las paredes, lo cual implica mayor consumo de combustible por el horno. A continuación, se consideran estas pérdidas.

2.4.2. PÉRDIDAS AL AMBIENTE

Bajo condiciones estables de operación, con una temperatura interna del horno a 1200 °C, las pérdidas del horno indican cuánto combustible será necesario para mantener el horno a esa temperatura. Así, estas pérdidas se producen en [29]:

- Las paredes,
- La tapadera,
- El fondo del horno, y
- Abertura del horno.

Es importante destacar que las pérdidas por convección se producen en las superficies expuestas al aire frío del ambiente circundante. También, las pérdidas por radiación se producen en toda superficie con alta emisividad, siendo considerable a altas temperaturas [29].

Aplicando la Ec. 2.11 de paredes cilíndricas para calor por conducción desde la cámara hacia el crisol se tiene [21]:

$$Q_K = \frac{2\pi kL(T_i - T_e)}{\ln \frac{r_e}{r_i}} \quad (2.11)$$

donde:

Q_K es el flujo de calor necesario para fundir el metal,

k es la conductividad térmica, el cual es igual a 1.6 W/m·K,

L es la longitud del crisol, el cual es igual a 0.2032 m,

T_i es la temperatura interior del crisol el cual es igual a 1,200 °C,

r_e es el radio exterior del horno, el cual es igual a 0.08255 m, y

r_i es el radio interior del horno, el cual es igual a 0.06345 m.

Calculando Q_K para 60 min, ya que las prácticas de laboratorio tienen una duración de 100 min, con lo cual quedan 40 min para realizar otras actividades en dicha práctica.

$$Q_K = 5\,730 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} ; \text{flujo de calor necesario para fundir el metal.}$$

Despejando T_e de la Ec. 2.11, queda:

$$T_e = T_i - \frac{Q_K \ln \frac{r_e}{r_i}}{2\pi kL}$$

$$T_e = 1473.15 - \frac{(1,591.83) \ln \frac{0.08255}{0.06345}}{2\pi * 1.6 * 0.2032}$$

Sustituyendo, se tiene:

$$T_e = 1,678.21 \text{ K} = 1,405.06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

A continuación, calculando las pérdidas por secciones, se tienen:

- Las paredes: En el horno se forman un cilindro hueco de materiales compuestas, en la cual la transferencia de calor será unidireccional en dirección radial al horno. Así, en la pared se producirá una transferencia de calor la cual se esquematiza en la Fig. 2.4. Por lo tanto, si las condiciones se cumplen, se puede utilizar la ecuación de transferencia de calor para estado estable, en la cual la pérdida de calor por conducción (Q_{cond}) se obtiene a partir de la Ec. 2.12, así [27 y 29]:

$$Q_{cond} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta X} \tag{2.12}$$

donde:

A es el área de la superficie de contacto.

ΔT es la diferencia de temperaturas.

Para pared cilindra la Ec. 2.12 se transforma en la Ec. 2.13, así:

$$Q_{cond} = -2\pi L \frac{\Delta T}{R} \quad (2.13)$$

donde:

L es la longitud del horno

R es la resistencia térmica por capa del horno, la cual se expresa por la Ec. 2.14, así:

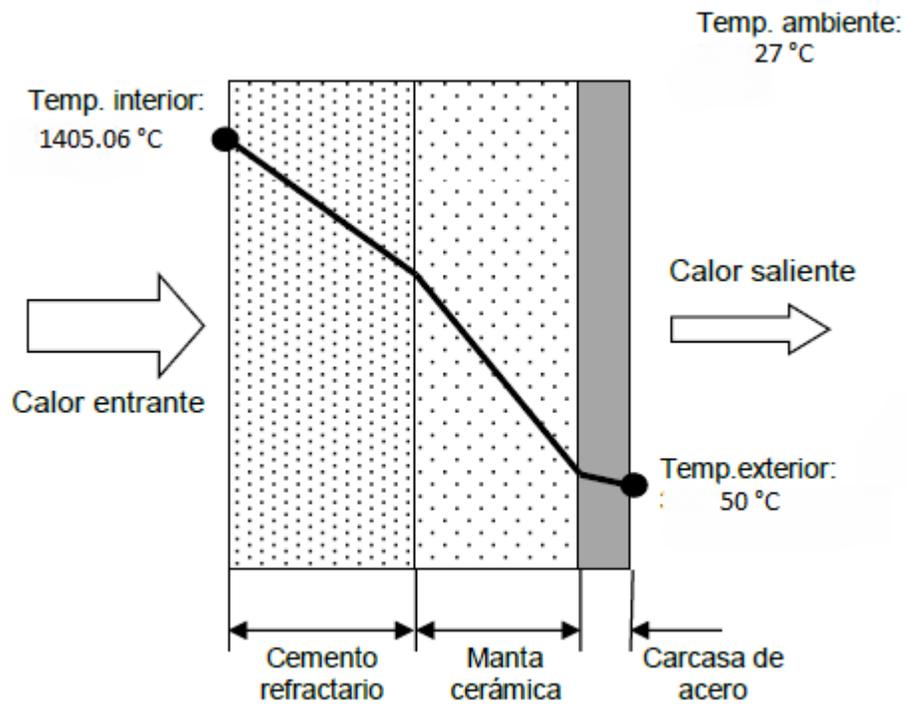


Fig. 2.4. Esquema que ilustra la transferencia de calor por las paredes del horno [29].

$$R = \frac{\ln \frac{R_o}{R_i}}{K} \quad (2.14)$$

donde:

R_o es el radio externo de capa.

R_i es el radio interno de capa.

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

Para el cemento refractario [21]:

$$R_1 = \frac{\ln \frac{271.2}{195}}{\frac{1}{m \cdot ^\circ C}} = 0.3299 \frac{m \cdot ^\circ C}{W}$$

Para manta cerámica:

$$R_2 = \frac{\ln \frac{334.7}{271.2}}{0.3 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0.7013 \frac{m \cdot ^\circ C}{W}$$

Para carcasa metálica:

$$R_3 = \frac{\ln \frac{336.3}{334.7}}{52 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 91.71 \times 10^{-6} \frac{m \cdot ^\circ C}{W}$$

El efecto de la convección se determina al conocer los coeficientes de transferencia de calor h , de las superficies. Para su cálculo se hacen las siguientes consideraciones:

- Se consideró una T_{interior} de 1,405 °C
- Presión externa igual a la atmosférica.
- Temperatura de la carcasa metálica 50 °C

$$T_s = 50 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_\infty = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Interpolando en la Tabla 2.2, usando tablas de aire y las propiedades del aire a la T de película (T_f) [21]:

$$T_f = T_s - T_\infty = 50 - 27 = 23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tabla 2.2. Interpolación de propiedades del aire a T_f

$T, \text{ } ^\circ\text{C}$	$K, \text{ W/m}\cdot\text{K}$	$\nu, \text{ m}^2/\text{s}$	P_r
20	0.02514	1.516×10^{-5}	0.7309
23	0.02536	1.544×10^{-5}	0.7301
25	0.02551	1.562×10^{-5}	0.7296

$$K_{23^{\circ}\text{C}} = 0.02536 \frac{\text{W}}{\text{m K}}$$

$$\nu_{23^{\circ}\text{C}} = 1.544 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr_{23^{\circ}\text{C}} = 0.7301$$

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{296 \text{ K}}$$

Se supone que el horno es un cilindro de $H \cong 513 \text{ mm} = 0.513 \text{ m}$. Por lo tanto, se puede determinar el número de Grashof (G_{RL}) por la Ec. 2.15, así [21]:

$$G_{RL} = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})L_g^3}{\nu^3} \quad (2.15)$$

donde:

G_{RL} es el número de Grashof.

g es la aceleración gravitacional.

β es el coeficiente de expansión volumétrica.

T_s es la temperatura de la superficie.

T_{∞} es la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie

L_g es la longitud característica de la configuración geométrica

$$T_s = 50^{\circ}\text{C} = 323 \text{ K} \quad T_{\infty} = 27^{\circ}\text{C} = 300 \text{ K}$$

$$T_f = 23^{\circ}\text{C} = 296 \text{ K} \quad \beta = \frac{1}{296 \text{ K}}$$

Sustituyendo en la Ec. 2.15, queda:

$$G_{RLp} = \frac{9.81 * \frac{1}{296} * (323 - 300) * 0.5129^3}{1.544 \times 10^{-5^2}} = 431\,428\,307.8$$

Además, verificando si el cilindro se puede analizar como placa vertical en la Ec. 2.16 [21]:

$$D \geq \frac{35Lg}{G_{RL}^{1/4}} \quad (2.16)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.16, queda:

$$0.6726 \geq \frac{35 * 0.5129}{431\ 428\ 307.8^{1/4}}$$

$$0.6726 \geq 0.1246$$

Por lo tanto, dado que la relación anterior se cumple, se puede analizar como placa vertical; por consiguiente, se puede obtener el número de Rayleigh (R_{aL}) por la Ec. 2.17 [21].

$$R_{aL} = G_{RL}P_R \quad (2.17)$$

donde:

P_R es el número de Prandtl

Sustituyendo en la Ec. 2.17, queda:

$$R_{aL} = 431\ 428\ 307.8 * 0.7301 = 314\ 985\ 807.5$$

Para una placa vertical el número de Nusselt (N_u) se determina por la Ec. 2.18 [21]:

$$N_u = \left(0.825 + \frac{0.387R_a^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{P_r} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (2.18)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.18, queda:

$$Nu = \left(0.825 + \frac{0.387 * 314\,985\,807.5^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{0.7301} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu = 86.58$$

El número de Nusselt también es igual a la Ec. 2.19 [21]:

$$Nu = \frac{hL_g}{K} \quad (2.19)$$

donde:

h es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

Por lo tanto, al despejar h de la Ec. 2.19, se obtiene:

$$h = \frac{NuK}{L_g} = \frac{86.58 * 0.02536}{0.5129} = 4.28 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Con esto se puede determinar la resistencia por convección con la Ec. 2.20 [21]:

$$R = \frac{1}{hA_s} \quad (2.20)$$

donde:

A_s es el área superficial de la pared del cilindro = $\pi D_{ext} L_h$

D_{ext} = Es el diámetro externo del horno que es de 0.6726 m.

L_h = Es la longitud del horno que es de 0.4379 m.

Sustituyendo en la Ec. 2.20, queda:

$$R_4 = R_{conv} = \frac{1}{\pi * 0.4379 * 0.6726 * 4.28} = 0.2525 \frac{^{\circ}C}{W}$$

La transferencia de calor por las paredes mediante conducción se calcula con la Ec. 2.13 [21]:

$$Q_{cond} = 2\pi L \frac{\Delta T}{R} = 2\pi * 0.4379 * \frac{1,405.06 - 50}{0.3299 + 0.7013 + 91.71 \times 10^{-6}}$$

$$Q_{cond p} = 3\,615.2\,W$$

La transferencia de calor por las paredes mediante convección se determina con la Ec. 2.21, lo cual es [21]:

$$Q_{conv} = \frac{\Delta T}{R_{conv}} \quad (2.21)$$

$$Q_{conv p} = \frac{\Delta T}{R_{conv}} = \frac{50 - 27}{0.2525} = 91.09\,W$$

donde:

R_{conv} es la resistencia de convección de la pared.

Finalmente, se puede determinar la transferencia de calor por radiación mediante la Ec 2.22 [21].

$$Q_{rad} = \varepsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (2.22)$$

donde:

ε es la emisividad de la superficie, la cual es igual a 0.35

A_s es el área superficial de la pared del cilindro = $\pi D_{ext} L_h$

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, la cual es igual a 5.67×10^{-8}

La emisividad de la superficie se determina al considerar que la superficie de la carcasa metálica se pintará con pintura anticorrosiva resistente al calor, así la emisividad común para este tipo de pinturas está dado entre 0.35 y 0.40 [29].

Por lo tanto, sustituyendo en la Ec. 2.22, queda [21]:

$$Q_{rad p} = \pi * 0.35 * 0.4379 * 0.6726 * 5.67 \times 10^{-8} * (323^4 - 300^4)$$

$$Q_{rad p} = 51.13 W$$

La transferencia de calor total al ambiente por las paredes se obtiene al sumar individualmente las aportaciones provenientes de las pérdidas por conducción, convección y radiación, respectivamente en la Ec. 2.23 [21]:

$$Q_{pared total} = Q_{cond p} + Q_{conv p} + Q_{rad p} \quad (2.23)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.23, queda:

$$Q_{pared total} = 3\ 615.2 + 91.09 + 51.13 = 3\ 757.42 W$$

Una vez obtenidas las pérdidas por las paredes, se procede a obtener las pérdidas por la tapadera.

➤ La tapadera:

Para determinar la transferencia de calor por conducción en esta sección del horno es necesario conocer el área efectiva. Por lo tanto, el área efectiva será aquella que esté directamente en contacto con los gases de combustión. Es decir, el área en contacto con la pared superior del cilindro, se supone que está aislada, recordando que el material del que está diseñada la tapadera es de cemento refractario. En la Fig. 2.5 se esquematiza el área efectiva de la tapadera [29].

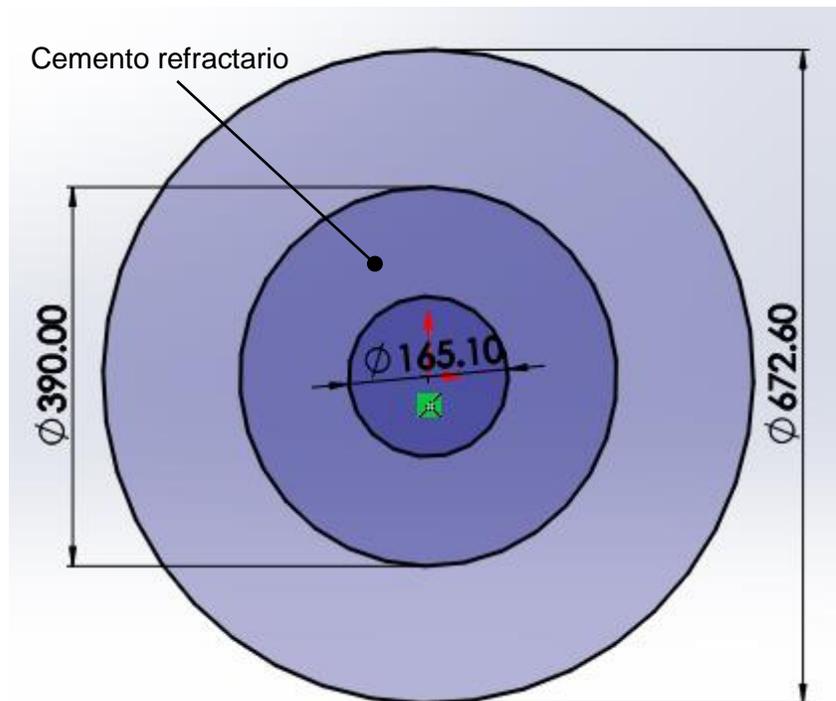


Fig. 2.5. Área efectiva del cemento refractario de la tapadera: Diámetro exterior de 672.6 mm, diámetro interior de 165.1 mm y espesor efectivo de 390 mm.

Si se supone aislada la circunferencia exterior tanto de la cubierta como de la tapadera, se puede ver que es un caso de transferencia de calor unidireccional a través de una pared plana; por lo tanto, así se determinará la transferencia de calor.

También, se puede determinar que la ecuación a emplear para este caso, la cual incluirá la transferencia de calor por convección y conducción que está dado por la Ec. 2.24 [27 y 29]:

$$Q_{cc} = \frac{\Delta T}{\Sigma R} \quad (2.24)$$

Además, el área del anillo de la tapadera considerado se calcula con la Ec. 2.25 [21]:

$$A_{tap} = \frac{\pi}{4} (Def^2 - Di^2) \quad (2.25)$$

donde:

Def es el diámetro efectivo de 0.39 m; y

Di es el diámetro interior de 0.1651 m.

Sustituyendo en la Ec. 2.25, queda:

$$A_{tap} = \frac{\pi}{4} (0.39^2 - 0.1651^2) = 0.098 \text{ m}^2$$

La transferencia de calor por conducción se calcula respectivamente con la Ec. 2.26 [21]:

$$R_{tap} = \frac{\Delta Y_{tap}}{K_{cm} A_{tap}} \quad (2.26)$$

donde:

ΔY_{tap} es el espesor de la tapadera, el cual es igual a 0.075 m

K_{cm} es la conductividad térmica del cemento refractario

Sustituyendo en la Ec. 2.26, queda:

$$R_{tap} = \frac{0.075}{1 * 0.098} = 0.7653$$

Para calcular el efecto de la convección es imprescindible determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección (h) con la Ec.2.19. Para el caso de una placa plana circular con la superficie superior caliente expuesta al ambiente, se tienen que [21]:

$$T_{superficie} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{amb} = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Así, la temperatura de película es:

$$T_p = T_s - T_\infty = 50 \text{ } ^\circ\text{C} - 27 \text{ } ^\circ\text{C} = 23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Además, las propiedades del aire:

$$T_p = 23 \text{ } ^\circ\text{C} \quad K_{23^\circ\text{C}} = 0.02536 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad \nu_{23^\circ\text{C}} = 1.544 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr_{23^\circ\text{C}} = 0.7301 \quad \beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{296}$$

La longitud característica de superficie caliente es [21]:

$$L_c = \frac{A_{tap}}{P} \tag{2.27}$$

donde:

P es el perímetro de la tapadera

Sustituyendo en la Ec. 2.27, queda:

$$L_c = \frac{0.098}{\frac{\pi}{2} * 0.39} = 0.1599 \text{ m}$$

Calculando el número de Rayleigh con la Ec. 2.28 [21]:

$$R_{AL} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^3} Pr \tag{2.28}$$

Sustituyendo en la Ec. 2.28, queda:

$$R_{AL} = \frac{9.81 * \frac{1}{296} * 23 * 0.1599^3 * 0.7301}{1.544 \times 10^{-5^2}} = 9\,544\,172.5$$

El número de Nusselt citado en la Ec. 2.29 para el cual entra ese valor de Rayleigh en placas planas con superficie superior caliente se establece como [21]:

$$N_u = 0.5R_{AL}^{\frac{1}{4}} \quad (2.29)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.29, queda:

$$N_u = 0.5 * 9\,544\,172.5^{\frac{1}{4}} = 27.79$$

Despejando de la Ec. 2.19 el coeficiente de convección:

$$h = \frac{N_u K}{L_c} = \frac{27.79 * 0.02536}{0.1599} = 4.41 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Por lo tanto, se determina la resistencia por convección en la tapadera con la Ec. 2.20:

$$R_5 = \frac{1}{hA_{tap}} = \frac{1}{4.41 * 0.098} = 2.31 \frac{^\circ C}{W}$$

Finamente, se calcula la transferencia de calor en la sección al sustituir en la Ec. 2.24:

$$Q_{cc.tap} = \frac{1,405.06 - 27}{0.7653 + 2.31} = 448.1 W$$

donde

$Q_{cc.tap}$ es la transferencia de calor por conducción y convección de la tapadera

Calculando el calor perdido por radiación sustituyendo en la Ec. 2.22, queda:

$$Q_{rad\ tap} = 0.94 * 0.098 * 5.67 \times 10^{-8} * (323^4 - 300^4) = 14.54\ W.$$

La transferencia de calor total al ambiente por la tapadera se obtiene al sumar individualmente las aportaciones provenientes de las pérdidas por conducción, convección y radiación, respectivamente en la Ec. 2.30 [21].

$$Q_{t.t} = Q_{cc.tap} + Q_{rad\ tap} \quad (2.30)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.30, queda:

$$Q_{t.t} = 448.1 + 14.54 = 462.64\ W$$

Para determinar el espesor óptimo se evalúan los mismos parámetros para diferentes espesores, los resultados se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Espesor óptimo de la tapadera de la carcasa metálica

Espesor cubierta, m	Calor perdido, W	ΔQ ,
0.025	550.84	-
0.050	502.44	48.4
0.075	462.04	40.4
0.10	427.83	34.21
0.125	398.48	29.35
0.15	373.02	25.46

Se obtiene que a medida el espesor aumenta, existe una mayor reducción en la pérdida de calor; sin embargo, la pérdida de calor no es proporcional al espesor de la tapadera y no existen una reducción significativa a medida que se incrementa el espesor. Por otro lado, el costo del recubrimiento aumenta proporcionalmente al espesor y se debe evitar incrementar dicho espesor innecesariamente [29].

- Analizando radiación en abertura hacia el ambiente:

Aun cuando la tapadera presenta una pequeña pérdida de calor hacia el ambiente en comparación con las paredes, la abertura de la cubierta del horno es aquella que más presenta pérdidas de calor por radiación hacia el exterior [29].

Si se supone que la abertura hacia el ambiente representa un cuerpo negro representado en la Fig. 2.6, el cálculo de transferencia de calor hacia los alrededores resulta [21]:

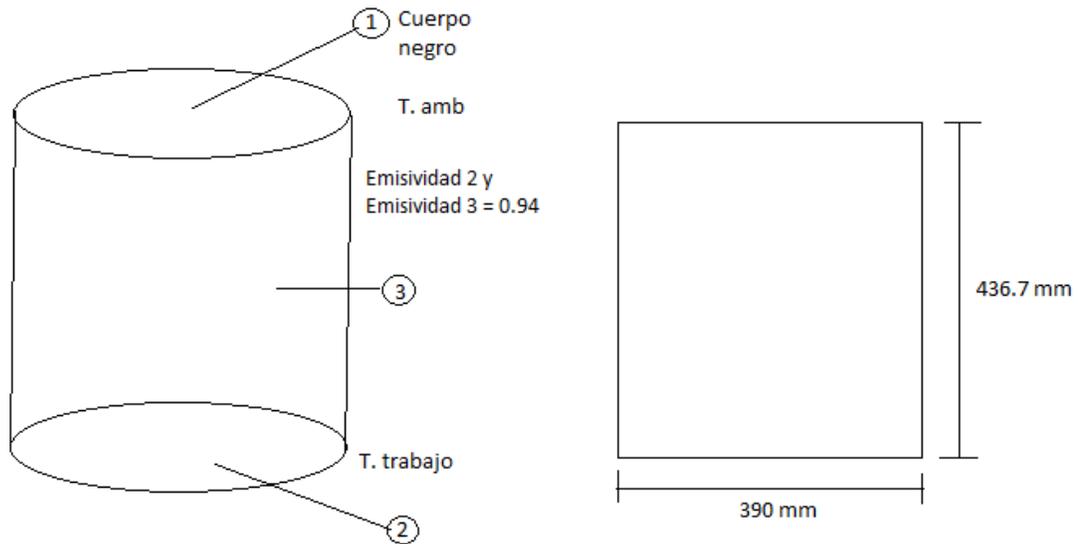


Fig. 2.6. Superficies expuestas a radiación

- Analizando Fig. 2.6.

El factor de visión de la base hacia la superficie superior se obtiene de gráficas [21], entonces, aplicando la regla de la suma se determina que el factor de visión de la base a la superficie lateral está dado por la Ec. 2.31:

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} = 1 \quad (2.31)$$

donde:

F_{11} Es el factor de visión que es la fracción de radiación que sale de la superficie 1 y que choca directamente consigo misma;

F_{12} Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 1 y choca directamente contra la superficie 2; y

F_{13} Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 1 y choca directamente contra la superficie 3.

$F_{11} = 0$; Porque es una pared plana que no se puede ver a sí misma.

$$A_1 = A_2 = \pi r_a^2 = \frac{\pi}{4} * D_a^2$$

donde:

D_a es el diámetro de la abertura al ambiente, que es igual a 0.39 m

r_a es el radio de la abertura al ambiente, que es igual a 0.195 m

$$A_1 = A_2 = \pi r_a^2 = \frac{\pi}{4} * 0.39^2 = 0.1195 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 2\pi r_a H_a = \pi D_a H_a$$

donde:

H_a es la altura de la abertura al ambiente, que es igual a 0.4367 m

$$A_3 = 2\pi r_a H_a = \pi * 0.39 * 0.4367 = 0.535 \text{ m}^2$$

Para obtener el factor de visión de la base hacia la superficie se necesitan obtener los siguientes datos para entrar en la gráfica, con esto se puede obtener el factor de visión F_{12} [21].

Además, dado que $L = H_a$ y $r_1 = r_2 = r_a$

$$\frac{L}{r_2} = \frac{0.4367}{0.195} = 2.24$$

$$\frac{r_1}{L} = \frac{0.195}{0.4367} = 0.45$$

$$F_{12} = 0.14$$

Sustituyendo en la Ec. 2.31, queda:

$$F_{13} = 1 - F_{12} = 1 - 0.14 = 0.86$$

Dado que las superficies superior e inferior son simétricas respecto a la superficie lateral [21].

$$F_{21} = F_{12} = 0.14$$

$$F_{23} = F_{13} = 0.86$$

donde:

F_{21} es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 2 y choca directamente contra la superficie 1.

F_{23} es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 2 y choca directamente contra la superficie 3.

El factor de visión F_{31} se determina a partir de la relación de reciprocidad [21].

$$A_1 F_{13} = A_2 F_{31} \quad (2.32)$$

donde:

F_{31} es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 3 y choca directamente contra la superficie 1.

Despejando F_{31} de la Ec. 2.32, queda:

$$F_{31} = F_{13} \frac{A_1}{A_3} = 0.86 \frac{0.1195}{0.535} = 0.192$$

Sustituyendo en la Ec. 2.32, queda:

$$F_{31} = F_{13} \frac{A_1}{A_3} = 0.86 \frac{0.1195}{0.535} = 0.192$$

Así mismo, los siguientes factores se igualan por simetría [21].

$$F_{32} = F_{31} = 0.192$$

donde:

F_{32} Es el factor de visión que es la fracción de la radiación que sale de la superficie 3 y choca directamente contra la superficie 2.

Calculados todos los factores de visión se proceden a determinar las radiosidades con la Ec. 2.33 [21].

$$\sigma T_i^4 = J_i + \frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^N [F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j)] \quad (2.33)$$

donde:

J_i es la radiosidad de la superficie i ,

J_1 es la radiosidad de la superficie 1,

J_2 es la radiosidad de la superficie 2, y

J_3 es la radiosidad de la superficie 3.

Sustituyendo la Ec. 2.33 para la superficie superior ($i = 1$)

$$\sigma T_1^4 = J_1 + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} [F_{12}(J_1 - J_2) + F_{13}(J_1 - J_3)]$$

Sustituyendo la Ec. 2.33 para la superficie inferior ($i = 2$)

$$\sigma T_2^4 = J_2 + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} [F_{21}(J_2 - J_1) + F_{23}(J_2 - J_3)]$$

Sustituyendo la Ec. 2.33 para la superficie lateral (i = 3)

$$\sigma T_3^4 = J_3 + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} [F_{31}(J_3 - J_1) + F_{32}(J_3 - J_2)]$$

Sustituyendo las cantidades conocidas de la Ec. 2.33 para las diferentes superficies

$$T_1 = T_{amb} = 27^\circ C = 300.15 K$$

$$T_2 = T_3 = 1,405.06^\circ C = 1,678.21 K$$

Sustituyendo la Ec. 2.33 para la superficie superior (i = 1)

$$\sigma T_1^4 = J_1 \quad \rightarrow \quad 5.67 \times 10^{-8} * 300.15^4 = J_1$$

$$J_1 = 460.19 \frac{W}{m^2}$$

Sustituyendo la Ec. 2.33 para la superficie inferior (i = 2)

$$\sigma T_2^4 = J_2 + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} [F_{21}(J_2 - J_1) + F_{23}(J_2 - J_3)]$$

$$5.67 \times 10^{-8} * 1,678.21^4 = J_2 + \frac{1 - 0.94}{0.94} [0.14(J_2 - 460.19) + 0.86(J_2 - J_3)]$$

Reduciendo la Ec. 2.33 para la superficie inferior (i = 2) se tiene:

$$449\,751.11 = 1.06383J_2 - 0.05489J_3 \quad (2.34)$$

Luego se tiene:

$$\sigma T_3^4 = J_3 + \frac{1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} [F_{31}(J_3 - J_1) + F_{32}(J_3 - J_2)]$$

Sustituyendo en la Ec. 2.33 para la superficie lateral (i = 3)

$$5.67 \times 10^{-8} * 1,678.21^4 = J_3 + \frac{1 - 0.94}{0.94} [0.192(J_3 - J_1) + 0.192(J_3 - J_2)]$$

Reduciendo la Ec. 2.33 para la superficie lateral (i = 3):

$$449\,747.64 = 1.02451J_3 - 0.01226J_2 \quad (2.34)$$

Sustituyendo la Ec. 2.33 en la Ec. 2.34:

$$449\,747.64 = 1.02451J_3 - 0.01226 \left[\frac{449\,751.11 + 0.05489J_3}{1.06383} \right]$$

Despejando se tiene:

$$J_3 = 444\,326.36 \frac{W}{m^2}$$

Sustituyendo J_3 en Ec. 2.33:

$$J_2 = 445\,691.68 \frac{W}{m^2}$$

Determinando las razones netas de transferencia de calor por radiación mediante la Ec. 2.35 en las tres superficies, esto es [21]:

$$\dot{Q}_i = A_i \sum_{j=1}^N [F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j)] \quad (2.35)$$

donde:

\dot{Q}_i es la razón neta de transferencia de calor por radiación de la superficie i

\dot{Q}_1 es la razón neta de transferencia de calor por radiación de la superficie 1

\dot{Q}_2 es la razón neta de transferencia de calor por radiación de la superficie 2

\dot{Q}_3 es la razón neta de transferencia de calor por radiación de la superficie 3

Sustituyendo en la Ec. 2.35 para la superficie 1

$$\dot{Q}_1 = A_1[F_{12}(J_1 - J_2) + F_{13}(J_1 - J_3)]$$

$$\dot{Q}_1 = 0.1195[0.14(460.19 - 445\ 691.68) + 0.86(460.19 - 444\ 326.36)]$$

$$\dot{Q}_1 = -53\ 064.85$$

Sustituyendo en la Ec. 2.35 para la superficie 2

$$\dot{Q}_2 = A_2[F_{21}(J_2 - J_1) + F_{23}(J_2 - J_3)]$$

$$\dot{Q}_2 = 0.1195[0.14(445\ 691.68 - 460.19) + 0.86(445\ 691.68 - 444\ 326.36)]$$

$$\dot{Q}_2 = 7\ 589.04$$

Sustituyendo en la Ec. 2.35 para la superficie 3

$$\dot{Q}_3 = A_3[F_{31}(J_3 - J_1) + F_{32}(J_3 - J_2)]$$

$$\dot{Q}_3 = 0.535[0.192(444\ 326.36 - 460.19) + 0.192(444\ 326.36 - 445\ 691.68)]$$

$$\dot{Q}_3 = 45\ 453.65$$

La pérdida se puede expresar también con la Ec. 2.36 [21]:

$$Q_{aber} = q_{21} + q_{31} \quad (2.36)$$

donde:

q es la pérdida de calor por radiación de la abertura

q_{21} es la pérdida de calor por radiación de la abertura de la superficie 2 a la superficie 1

q_{31} es la pérdida de calor por radiación de la abertura de la superficie 3 a la superficie 1

Sustituyendo la Ec. 2.22 en la Ec. 2.36 para el flujo de calor de la superficie 2 a 1 y la superficie de 2 a 3 indicada en la Fig. 2.6 se tiene:

$$Q_{aber} = A_2 F_{21} \sigma (T_2^4 - T_1^4) + A_3 F_{31} \sigma (T_3^4 - T_1^4)$$

$$Q_{aber} = 0.1195 * 0.14 * 5.67 \times 10^{-8} * (1,678.21^4 - 300.15^4) + 0.535 * 0.192 * 5.67 \times 10^{-8} * (1,678.21^4 - 300.15^4)$$

$$Q_{aber} = 53\,667.31 \text{ W}$$

➤ Base del horno:

La base del horno se puede analizar como una placa plana circular la cual se construirá de cemento refractario tal como se presenta en la Fig. 2.7.

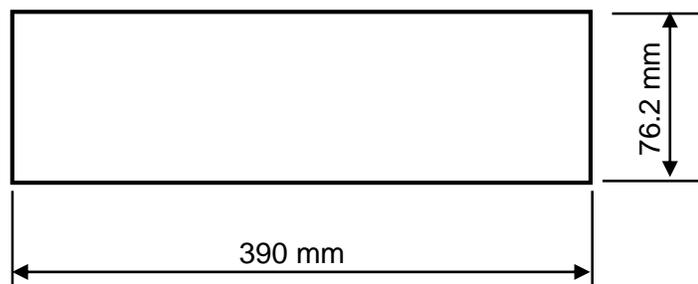


Fig. 2.7. Dimensiones de la pared de la base del horno.

$D_{int\ b} = 0.39 \text{ m}$ espesor de la base del horno = 0.076 m .

Se continuará calculando la transferencia de calor por convección y conducción utilizando las ecuaciones que previamente han sido detalladas.

Área de transferencia de calor:

$$A_{base} = \frac{\pi}{4} D_{int}^2 = \frac{\pi}{4} (0.39)^2 = 0.1195 \text{ m}^2$$

Calculando la resistencia del cemento con la Ec. 2.26 para la conducción [21]:

$$R = \frac{L}{KA} = \frac{0.0762}{1 * 0.1195} = 0.6377 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Para calcular el efecto de la convección es imprescindible determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección (h) [21]:

$$T_{superficie} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{amb} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Así, la temperatura de película es:

$$T_p = T_s - T_{\infty} = 50 \text{ }^{\circ}\text{C} - 27 \text{ }^{\circ}\text{C} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Además, las propiedades del aire:

$$T_p = 23 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{23^{\circ}\text{C}} = 0.02536 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \quad \nu_{23^{\circ}\text{C}} = 1.544 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Pr_{23^{\circ}\text{C}} = 0.7301 \quad \beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{296}$$

Para calcular la longitud característica de superficie caliente se utiliza la Ec. 2.27 [21]:

$$L_c = \frac{A_{base}}{P} = \frac{0.1195}{\frac{\pi}{2} * 0.39} = 0.1951 \text{ m}$$

Calculando el número de Rayleigh con la Ec. 2.28 [21]:

$$R_{AL} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^3} Pr = \frac{9.81 * \frac{1}{296} * 23 * 0.1951^3 * 0.7301}{1.544 \times 10^{-5}^2} = 17336630.66$$

El número de Nusselt citado en la Ec. 2.29 para el cual entra ese valor de Rayleigh en placas planas con superficie superior caliente se calcula [21]:

$$N_u = 0.5R_{AL}^{\frac{1}{4}} = 0.5 * 17336630.66^{\frac{1}{4}} = 32.26$$

Despejando de la Ec. 2.19 el coeficiente de convección [21]:

$$h = \frac{N_u K}{L_c} = \frac{32.26 * 0.02536}{0.1951} = 4.19 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$$

Por lo tanto, se determina la resistencia por convección en la Ec. 2.20 [21]:

$$R_{base} = \frac{1}{hA_{base}} = \frac{1}{4.19 * 0.1195} = 1.997 \frac{^\circ C}{W}$$

Finamente, se calcula la transferencia de calor en la sección sustituyendo en la Ec 2.24, ya que la ecuación a emplear para este caso incluirá la transferencia de calor por convección y conducción [21]:

$$Q_{cc.base} = \frac{\Delta T}{\Sigma R} = \frac{1,405.06 - 60}{0.6377 + 1.997} = 510.52 \text{ W}$$

Calculando el calor perdido por radiación con la Ec. 2.22, queda [21]:

$$Q_{rad.base} = \varepsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) = 0.94 * 0.1195 * 5.67 \times 10^{-8} * (323^4 - 300^4) = 17.76 \text{ W}$$

En donde la transferencia de calor total al ambiente por la base del horno se obtiene al sumar individualmente las aportaciones provenientes de las pérdidas por conducción, convección y radiación, respectivamente en la Ec. 2.30 [21].

$$Q_{t.base} = Q_{cc.base} + Q_{rad base}$$

Sustituyendo queda:

$$Q_{t.base} = 510.52 + 17.76 = 528.28 \text{ W}$$

Las pérdidas totales del horno en operación una vez alcanzada la temperatura máxima están dadas por la Ec. 2.37 [21]:

$$Q_{perdido} = Q_{pared total} + Q_{t.t} + Q_{aber} + Q_{t.base} \quad (2.37)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.37, queda:

$$Q_{perdido} = 3\,757.42 + 462.64 + 53\,667.31 + 528.28 = 58\,415.65 \text{ W} = 58.42 \text{ kW}$$

➤ Pérdida de calor en los gases de escape

Ante los diferentes combustibles disponibles, se selecciona el gas propano por los criterios siguientes [31]:

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

Parámetros útiles del gas propano [31]:

- Composición química C_3H_8 ,
- Masa molar 44 g/mol,
- PCI = 46 350 kJ/kg,
- Densidad relativa 15.56 °C (líquido) 500 – 510 kg/m³, y
- Densidad relativa a 15.56 °C (gas) de 1.86 kg/m³.

Ahora bien, es importante conocer la cantidad de aire requerido para que el combustible se quemara apropiadamente. Se necesita 15.68 kg de aire por kg de propano para que ocurra la combustión estequiometría, se recomienda 10 % de aire en exceso para asegurar combustión completa, se concluye que se requiere 17.25 kg de aire por kg de propano. Así, la pérdida de calor en los gases de escapes se calcula con la Ec. 2.38 [31].

$$Q_{escape} = \frac{m C_p \Delta T 100\%}{PCI} \quad (2.38)$$

donde:

m es la masa de los gases de combustión (aire + combustible), la cual se obtiene:

$$m = 17.25 \text{ kg} + 1 \text{ kg} = 18.25 \text{ kg};$$

C_p es el calor específico del aire a la temperatura esperada 700 °C, $C_p = 1135 \text{ J/kg}\cdot\text{°C}$;

ΔT es la diferencia de temperaturas (700 - 27) °C = 673 °C; y

PCI es el poder calorífico inferior del propano, 46350 kJ/kg.

Sustituyendo en la Ec. 2.38, queda:

$$Q_{escape} = \frac{(18.25 \text{ kg})(1.135 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{°C}})(673 \text{ °C})(100\%)}{46350 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 30\%$$

Esto significa que del 100% de energía disponible, 30% es lanzado al ambiente en los gases de escape por kg de combustible. Como es un valor por

kg de combustible este se añadirá en la forma de un factor y se define como:
 $n_{comb} = 1 - 0.3 = 0.7$, el cual será el rendimiento del combustible [31].

2.5. POTENCIA DEL QUEMADOR

Usualmente para poder conocer cuánto calor es suministrado por un quemador es necesario saber el flujo de combustible que se le provee a éste, el cual debe ser lo suficiente para proveer calor a la carga y afrontar las pérdidas de energía a través del recubrimiento del horno y en los gases de escape. Por lo tanto, el quemador debe ser capaz de suministrar al menos el resultado de la Ec. 2.39 [29]:

$$E_{quemador} = \frac{Q_{perdido} + Q_{carga}}{n_{comb}} \quad (2.39)$$

donde:

$E_{quemador}$ es la potencia suministrada por el quemador.

Q_{carga} es el flujo de calor requerido para alcanzar la temperatura de fusión del metal.

n_{comb} es el rendimiento del combustible

Se espera que la carga se pueda fundir en <20 min, una vez se alcance la temperatura de fusión del metal. Por lo tanto, el flujo de calor requerido este dado por la Ec. 5.40 [29]:

$$Q_{carga} = \frac{Q_{total}}{t} \quad (2.40)$$

donde:

t es el tiempo estimado para que la carga se pueda fundir que son 20 min.

Sustituyendo en la Ec. 2.40, queda:

$$Q_{carga} = \frac{5730.57 \text{ kJ}}{1200s} = 4.78 \frac{\text{kJ}}{s}$$

Entonces, el flujo másico mínimo del quemador \dot{m}_{\min} en condiciones de operación es dado por la Ec. 2.41 [29]:

$$\dot{m}_{\min} = \frac{Q_{perdido} + Q_{carga}}{(PCI)(n_{comb})} \quad (2.41)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.41, queda:

$$\dot{m}_{\min} = \frac{58.42 + 4.780 \text{ kJ/s}}{(46350 \text{ kg})(0.7)} = 1.9479 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{s} = 4.29 \times 10^{-3} \frac{\text{lb}}{s}$$

El flujo volumétrico ϕ_{\min} de gas es dado por la Ec. 2.42 [29]:

$$\phi_{\min} = \frac{\dot{m}_{\min}}{\rho_{rel}} \quad (2.42)$$

donde:

ρ_{rel} es la Densidad relativa a 15.56 °C (gas) que es de 1.86 kg/m³

Sustituyendo en la Ec. 2.42, queda:

$$\phi_{\min} = 1.9479 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{s} \times \frac{\text{m}^3}{1.86 \text{ kg}} = 1047.26 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{s} = 1.047 \frac{\text{l}}{s}$$

Usualmente los proveedores requieren la potencia del quemador o su flujo en h en kW, kcal/h o BTU/h. Por lo tanto, la potencia y el flujo en h se especifican a continuación [29]:

Sustituyendo en la Ec. 2.39, queda:

$$E_{quemador} = \frac{58.42 + 4.78 \text{ kW}}{0.7} = 90.29 \text{ kW}$$

$$E_{quemador} = 90.29 \text{ kW} \times \frac{860.21 \text{ kcal/h}}{1 \text{ kW}} = 77668.36 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 308006.84 \frac{\text{btu}}{\text{h}}$$

$$\phi_{min} = 1047.26 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = 3.77 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 133.14 \frac{\text{pie}^3}{\text{h}}$$

Ahora se conocerá el flujo de calor superficial con la Ec. 2.43 [29]:

$$Q_{superficial} = \frac{E_{quemador}}{A_{superficial \text{ total}}} \quad (2.43)$$

donde:

$A_{superficial \text{ total}}$ es la sumatoria de todas las áreas superficiales del horno

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

$$A_{superficial \text{ paredes}} = (\pi)(0.39 \text{ m})(0.3582 \text{ m}) = 0.4389 \text{ m}^2$$

$$A_{tapadera} = (\pi)(0.075 \text{ m})(0.6726 - 0.1651 \text{ m}) = 0.1196 \text{ m}^2$$

$$A_{base} = 0.1195 \text{ m}^2$$

$$A_{superficial \text{ total}} = A_{superficial \text{ paredes}} + A_{tapadera} + A_{base}$$

$$A_{superficial \text{ total}} = 0.4389 \text{ m}^2 + 0.1196 \text{ m}^2 + 0.1195 \text{ m}^2 = 0.678 \text{ m}^2$$

Sustituyendo en la Ec. 2.43, queda:

$$Q_{superficial} = \frac{90.29W}{0.678m^2} = 133.17 \frac{kW}{m^2}$$

➤ Sistema de transporte de gas:

Conociendo el flujo másico de propano necesario para realizar la combustión, se puede determinar el flujo másico de aire mínimo que se mezclará con éste mediante la relación aire-combustible determinada con anterioridad por lo que se conocerá el flujo másico de aire (\dot{m}_{aire}) con la Ec. 2.44 [29]:

$$\dot{m}_{aire} = 17.25 \text{ kg} \times \dot{m}_{gas} \quad \text{donde } \dot{m}_{gas} = \dot{m}_{min} \quad (2.44)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.44, queda:

$$\dot{m}_{aire} = (17.25 \text{ kg})(1.9479 \times 10^{-3}) = 0.0336 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Donde el flujo másico total a la entrada del quemador es dado por la Ec. 2.45 [29]:

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{aire} \quad (2.45)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.45, queda:

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_{aire} = 1.9479 \times 10^{-3} + 0.0336 = 0.0355 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$V_{ent} = 120 \frac{\text{pies}}{\text{s}} = 36.58 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Con este valor de velocidad se puede determinar el diámetro de tubería mínimo ($D_{tub\ min}$) en la Ec. 2.46 como [29]:

$$D_{tub\ min} = \frac{4\dot{m}_t}{\pi\rho V_{ent}} \quad (2.46)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.46, queda:

$$D_{tub\min} = \sqrt{\frac{4(0.0355)}{(\pi)(1.164)(36.58)}} = 32.58 \times 10^{-3} m = 32.58 \text{ mm}$$

El flujo volumétrico en tuberías se obtiene al dividir el flujo másico entre la densidad como en la Ec. 2.42 [29].

Sustituyendo la Ec. 2.42 para propano, queda:

$$\phi_{propano} = \frac{\dot{m}_{\min}}{\rho_{rel}} = 1.9479 \times 10^{-3} \frac{kg}{s} \times \frac{m^3}{1.86kg} = 1,047.26 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s} = 3.77 \frac{m^3}{h}$$

Sustituyendo la Ec. 2.42 para aire, queda:

$$\phi_{aire} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{rel}} = 0.0336 \frac{kg}{s} \times \frac{m^3}{1.164kg} = 28.87 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} = 103.92 \frac{m^3}{h}$$

Como resultados principales de los cálculos térmicos, queda:

- ✓ Dimensiones del horno

$$D_{int} = 390 \text{ mm.}$$

$$D_{exterior} = 672.6 \text{ mm}$$

$$H_{horno} \cong 513 \text{ mm}$$

- ✓ Calor necesario para llevar el crisol a la temperatura de colado del cobre

$$Q_{crisol} = 424.13 \text{ kJ}$$

- ✓ Calor total del metal fundido en el crisol disponible para el colado

$$Q_K = 5\,730 \frac{kJ}{h} ; \text{flujo de calor necesario para fundir el metal.}$$

- ✓ Temperatura exterior del crisol o temperatura interior de las paredes

$$T_e = 1,678.21 \text{ K} = 1,405.06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- ✓ Transferencia de calor total al ambiente por las paredes provenientes de las pérdidas por conducción, convección y radiación

$$Q_{pared\ total} = 3\ 757.42\ W$$

- ✓ Transferencia de calor total al ambiente por la tapadera provenientes de las pérdidas por conducción, convección y radiación

$$Q_{t.t} = 462.64\ W$$

- ✓ Pérdida de calor por radiación de la abertura

$$Q_{abertura} = 53\ 667.31\ W$$

- ✓ Transferencia de calor total al ambiente por la base del horno provenientes de las pérdidas por conducción, convección y radiación

$$Q_{t.base} = 510.52 + 17.76 = 528.28\ W$$

- ✓ Pérdidas totales del horno alcanzada la temperatura máxima de operación

$$Q_{perdido} = 58415.65\ W = 58.42\ kW$$

- ✓ Flujo de calor requerido para alcanzar la temperatura de fusión del metal en el tiempo requerido

$$Q_{carga} = 4.78\ \frac{kJ}{s}$$

- ✓ Potencia suministrada por el quemador

$$E_{quemador} = 90.29\ kW = 77668.36\ \frac{kcal}{h} = 308006.84\ \frac{btu}{h}$$

- ✓ Flujo volumétrico $\phi_{mín}$ de gas

$$\phi_{propano} = 1047.26 \times 10^{-6}\ \frac{m^3}{s} = 3.77\ \frac{m^3}{h} = 133.14\ \frac{ft^3}{h}$$

- ✓ Flujo másico total a la entrada del quemador

$$\dot{m}_t = 0.0355\ \frac{kg}{s}$$

- ✓ Flujo volumétrico de aire

$$\phi_{aire} = 28.87 \times 10^{-3}\ \frac{m^3}{s} = 103.92\ \frac{m^3}{h}$$

- ✓ Flujo másico de aire a la entrada del quemador

$$\dot{m}_{aire} = 0.0336\ \frac{kg}{s}$$

3. DISEÑO MECÁNICO

Este capítulo se enfoca en establecer el mecanismo de basculación del horno, el cual está basado en una relación de engranes rectos accionados manualmente. Además, dado que ya se tienen establecidas las dimensiones del horno y sus diferentes partes, según su diseño térmico, se determinan las cargas según el peso de cada componente y por ende la fuerza necesaria para realizar el movimiento que permite el vaciado de la fundición.

Los principales elementos a diseñar son:

- Sistema de engranaje,
- Ejes del sistema,
- Estructura de basculación, y
- Soldadura.

3.1. DETERMINACIÓN DE CARGAS PARA BASCULACIÓN

Es importante determinar las cargas que están involucradas en el movimiento basculante del horno presentado en la Fig. 3.1, así como las estáticas que soportan el peso del mismo, técnicamente se detallan los parámetros que se establecen para llevar a cabo el diseño.

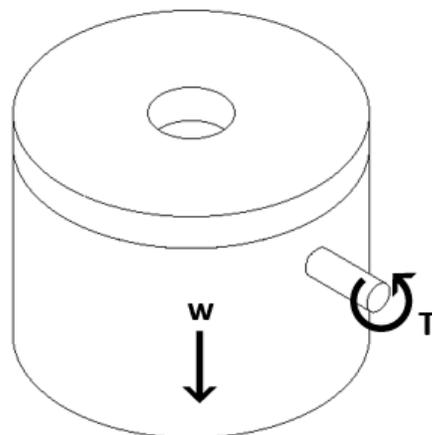


Fig. 3.1. Cargas involucradas en el movimiento basculante del horno.

Para determinar el peso del horno es necesario conocer las densidades volumétricas de los elementos que lo constituyen, que se detalla en la Tabla 3.1, el volumen de los elementos está basado en los parámetros establecidos en el diseño térmico realizado en el Capítulo 2.

Tabla 3.1. Densidades volumétricas.

Materiales	Densidad, kg/m ³
Acero	7850
Refractario	2800
Cerámica	2000

Así, determinando los volúmenes de materiales del horno:

➤ Para el acero se determinó los volúmenes por partes como lo es alrededor del horno, en el fondo del mismo, en la parte superior de la tapadera y en la parte lateral esta (ver, Fig. 3.2), los cálculos se definen correspondientemente sobre la base de la ecuación general de volumen aplicada a cilindros (ver, Ec. 3.1) de la manera siguiente:

$$V = \pi r h = \pi(R^2 - r^2)h \quad (3.1)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.1 para la parte de acero a (ver, Fig. 3.2), queda:

$$V_{acero1} = \pi(R^2 - r^2)h = \pi(0.3379^2 - 0.3347^2)(0.4379) = 2.9619 \cdot 10^{-3} m^3$$

Sustituyendo en la Ec. 3.1 para la parte de acero b (ver, Fig. 3.2), queda:

$$V_{acero2} = \pi r^2 h = \pi(0.3379)(3.18 \cdot 10^{-3}) = 1.1406 \cdot 10^{-3} m^3$$

Sustituyendo en la Ec. 3.1 para la parte de acero c (ver, Fig. 3.2), queda:

$$V_{acero3} = \pi(R^2 - r^2)h = \pi(0.3363^2 - 0.1950^2)(3.18 \cdot 10^{-3}) = 7.4999 \cdot 10^{-4} m^3$$

Sustituyendo en la Ec. 3.1 para la parte de acero d (ver, Fig. 3.2), queda:

$$V_{acero4} = \pi(R^2 - r^2)h = \pi(0.3363^2 - 0.3347^2)(0.075) = 2.5296 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

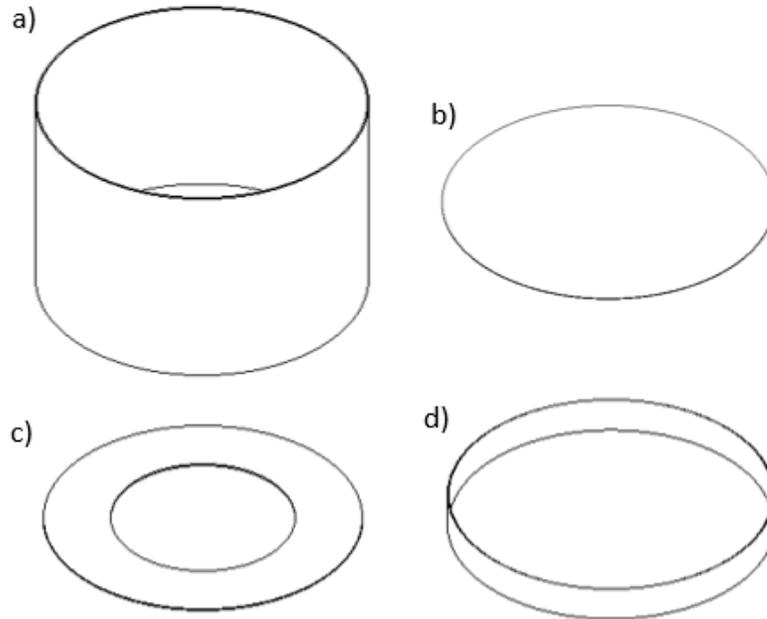


Fig. 3.2. Partes de acero del horno.

➤ El material refractario se ve reflejado en la forma de cilindro dentro del horno, en el fondo, el pedestal y el ubicado en la tapadera (ver, Fig. 3.3), por lo tanto se utiliza la Ec. 3.1 para su respectivo cálculo.

Por lo tanto, sustituyendo en la Ec. 3.1 para la parte de refractario a (ver, Fig. 3.3), queda:

$$V_{refractario1} = \pi(R^2 - r^2)h = \pi(0.2712^2 - 0.1950^2)(0.4379) = 48.8711 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Sustituyendo en la Ec. 3.1 para la parte de refractario b (ver, Fig. 3.3), queda:

$$V_{refractario2} = \pi(r^2)h = \pi(0.1950^2)(0.0762) = 9.1028 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Sustituyendo en la Ec. 3.1 para la parte de refractario c (ver, Fig. 3.3), queda:

$$V_{refractario3} = \pi(r^2)h = \pi(0.0667^2)(0.120) = 1.68 \cdot 10^{-3} m^3$$

Sustituyendo en la Ec. 3.1 para la parte de refractario d (ver, Fig. 3.3), queda:

$$V_{refractario4} = \pi(R^2 - r^2)h = \pi(0.3363^2 - 0.1950^2)(0.075) = 17.6886 \cdot 10^{-3} m^3$$

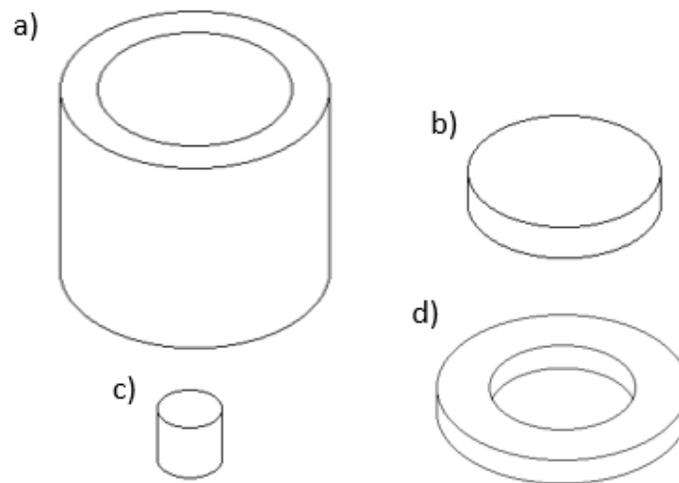


Fig. 3.3. Partes de refractario del horno.

➤ Para el caso de la cerámica sólo se utiliza la pared del cilindro de la misma forma entre la pared refractaria y la carcasa de acero del horno (ver, Fig. 3.4); por lo tanto, su volumen se establece como en la Ec. 3.1.

Por lo tanto, sustituyendo en la Ec. 3.1 para la cerámica, queda:

$$V_{ceramica} = \pi(R^2 - r^2)h = \pi(0.3347^2 - 0.2712^2)(0.4379) = 52.9297 \cdot 10^{-3} m^3$$

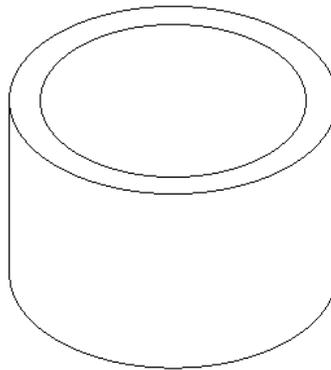


Fig. 3.4. Parte de cerámica del horno.

La factorización del volumen total de cada material y la densidad volumétrica de cada uno, da como resultado la masa de cada elemento, utilizando la Ec. 3.2 para cada uno de ellos:

$$m_{asa} = \rho_{material} V_{material} \quad (3.2)$$

- Para el acero sustituyendo en la Ec. 3.2:

$$\begin{aligned} m_{acero} &= \rho_{acero} V_{acero} \\ &= (7850)(2.96 \cdot 10^{-3} + 1.14 \cdot 10^{-3} + 7.49 \cdot 10^{-4} + 2.52 \cdot 10^{-4}) \\ m_{acero} &= 40.07 \text{ kg} \end{aligned}$$

- Para el refractario sustituyendo en la Ec. 3.2:

$$\begin{aligned} m_{refractario} &= \rho_{refractario} V_{refractario} \\ m_{refractario} &= (2800)(48.87 \cdot 10^{-3} + 9.10 \cdot 10^{-3} + 1.68 \cdot 10^{-3} + 17.69 \cdot 10^{-3}) \\ m_{refractario} &= 216.56 \text{ kg} \end{aligned}$$

- Para cerámica sustituyendo en la Ec. 3.2:

$$m_{cerámica} = \rho_{cerámico} V_{cerámica} = (2000)(52.93 \cdot 10^{-3}) = 105.86 \text{ kg}$$

Además, estas masas de los elementos determinadas se tabulan en conjunto con los elementos que influyen en la carga que debe soportar la estructura. Lo cual se debe a que con este valor se comienza con el análisis de diseño, así los elementos son el crisol cargado y el quemador, tal como se presenta en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Masas de materiales utilizados.

Material	Peso, kg
Acero	40.07
Refractario	216.56
Cerámica	105.86
Crisol cargado	11.00
Quemador	5.00
Total	378.49

También, se calcula una sobrecarga del 15% de la masa total calculada anteriormente (ver, Ec. 3.3), por posibles variaciones en las densidades de los elementos.

$$m_{total} = m \cdot 1.15 \quad (3.3)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.3, queda:

$$m_{total} = 378.49 \cdot 1.15 = 435.26 \text{ kg}$$

Por lo tanto, el peso total del horno se calcula mediante la Ec. 3.4:

$$w = m_{asas} \cdot g_{avedad} \quad (3.4)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.4, queda:

$$w_{total} = m_{total}g = 435.26 \cdot 9.81 = 4\,269.9 \text{ N} \cong 4.27 \text{ kN}$$

Luego para calcular el torque necesario para bascular el horno, se considera un brazo de 0.05 m ubicado arriba del punto de equilibrio del horno, tal como se presenta en la Ec. 3.5:

$$T_{giro} = w_{total} \cdot d \quad (3.5)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.5, queda:

$$T_{giro} = w_{total} \cdot d = 4\,269.9\,N \cdot 0.05\,m = 213.5\,N \cdot m$$

3.2. DISEÑO DE ENGRANES

Para la transmisión de potencia se requiere de una combinación de engrane-piñón que pueda cumplir con las cargas establecidas, se utilizan engranes rectos ya que las velocidades son considerablemente bajas, además del tipo de aplicación que estos tienen, en la sección anterior se determinó el torque necesario para vencer la inercia del horno. Por lo tanto, las consideraciones para el diseño de los engranes son (ver, Fig. 3.5) [32]:

- Un ángulo de presión de 20°,
- Una relación de velocidades de 1:4,
- Un paso diametral de 4, y
- Número mínimo de dientes en el piñón de 16 para que no se produzca interferencia.

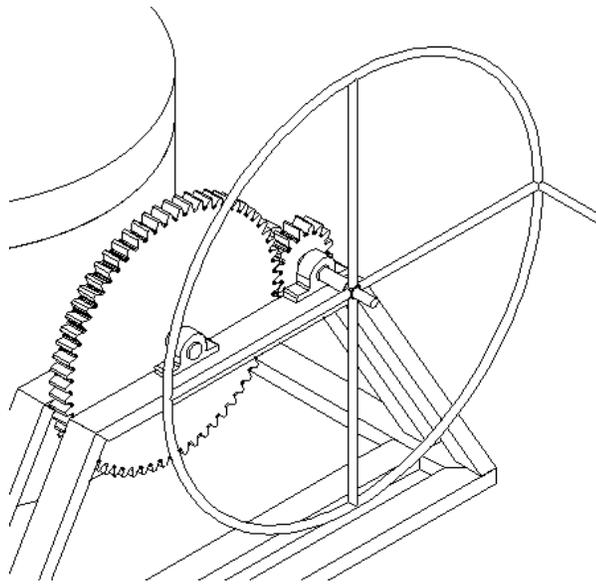


Fig. 3.5 Transmisión de engranes.

Por lo tanto, el número de dientes en el engrane es dado por la Ec. 3.6 [32]:

$$N_e = 4N_p \quad (3.6)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.6, queda:

$$N_e = 4N_p = 4 \cdot 16 = 64 \text{ dientes}$$

Utilizando el paso diametral de 4 se determinó los diámetros en el piñón y engrane mediante la Ec. 3.7 [32]:

$$d_x = \frac{N_x}{P} \quad (3.7)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.7 para el piñón, queda:

$$d_p = \frac{N_p}{P} = \frac{16}{4} = 4 \text{ pulg} \cong 0.1016 \text{ m}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.7 para el engrane, queda:

$$d_e = \frac{N_e}{P} = \frac{64}{4} = 16 \text{ pulg} \cong 0.4064 \text{ m}$$

Calculando el paso circular de piñón y engrane con la Ec. 3.8 [32]:

$$p = \frac{\pi}{P} \quad (3.8)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.8, queda:

$$p = \frac{\pi}{4} \text{ pulg} = 19.95 \text{ mm}$$

Calculando el módulo de piñón y engrane con la Ec. 3.9 [32]:

$$m = \frac{d_p}{N_p} \quad (3.9)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.9, queda:

$$m = \frac{101.6}{16} = 6.35 \text{ mm}$$

La velocidad de un horno basculante no debe ser mayor que 2 rpm, esta es la velocidad que transmite el engrane, por lo tanto la velocidad en el piñón se calcula con la Ec. 3.10 [32]:

$$n_p = \frac{d_e}{d_p} n_e \quad (3.10)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.10, queda:

$$n_p = \frac{d_e}{d_p} n_e = \frac{16}{4} \cdot 2 = 8 \text{ rpm}$$

Según el torque calculado y la velocidad determinada se calcula la potencia en el engrane con la Ec. 3.11 [32]:

$$P_{ot} = T_{giro} \cdot n_e \quad (3.11)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.11, queda:

$$P_{ot} = T_{giro} \cdot n_e = 213.5 \cdot \frac{2}{60} = 7.12 \text{ W}$$

Es importante analizar las fallas de las superficies de los dientes de los engranes, a la que se suele llamar desgaste. En la metodología AGMA se emplean dos ecuaciones fundamentales de esfuerzo, una de esfuerzo de flexión y otra de la resistencia a la picadura, para determinar de mejor manera el material de fabricación de los engranes se calcula la resistencia a la fatiga superficial utilizando la Ec. 3.12 [32].

$$\frac{Z_n C_H S_{ac}}{k_T k_R S_f} = C_p \left[\frac{F_T k_o k_s k_m k_v C_f}{dBI} \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

Determinado factores:

- *I es el factor geométrico de resistencia a la picadura:*
 $I = 0.102$ con una relación de 4 y $N_p = 16$
- *Z_n es el factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la picadura:*
 $Z_n = 1$ para vida infinita
- *k_T es el factor de temperatura:*

$$k_T = \frac{460 + T^{\circ}F}{620} = \frac{460 + 572}{620} = 1.66$$

- k_R es el factor de confiabilidad:

$$k_R = 0.85 \text{ menos de una falla en diez}$$

- k_O es el factor de sobrecarga:

$$k_O = 1.75 \text{ impacto medio}$$

- k_S es el factor de tamaño:

$$k_S = 1.05 \text{ por un paso diametral de cuatro}$$

- C_e es el coeficiente elastico:

$$C_e = 2300 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$$

- S_F es el factor de seguridad:

$$S_F = 1$$

- B es el ancho neto de la cara del engrane:

$$\frac{9}{P} < B < \frac{14}{P} \rightarrow 2.25 < B < 3.5 \text{ se escoge } B = 2.9$$

- k_m es el factor de distribucion de carga:

$$k_m = 1.7 \text{ distribuida en el ancho de cara de 2.9}$$

- k_v es el factor dinámico:

$$V_T = \frac{\pi d n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.4064 \cdot 2}{60} = 0.0426 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ por tanto } Q_v = 8$$

$$k_v = 1.05$$

- C_F es el factor de condición superficial:

$$C_F = 1.50 \text{ maquinado}$$

- C_H es el factor de la relación de dureza:

$$C_H = 1.013 \text{ con relación de 4}$$

- F_T es la fuerza tangencial en el diente:

$$F_T = \frac{T}{d} = \frac{213.5}{0.2032} = 1,050.69 \text{ N} \cong 236.20 \text{ lb}_f$$

Sustituyendo en Ec. 3.12:

$$\frac{1 \cdot 1.013 \cdot S_{ac}}{1.66 \cdot 0.85 \cdot 1} = 2300 \sqrt{\frac{236.20 \cdot 1.75 \cdot 1.05 \cdot 1.7 \cdot 1.05 \cdot 1.5}{16 \cdot 2.9 \cdot 0.102}}$$

$S_{ac} = 50\,200.11$ *resistencia a la fatiga superficial.*

El material de fabricación debe tener una resistencia mayor a la calculada, se recomienda un acero de clase AGMA de A-1 a A-5 templado completo y revenido con una dureza mínima en la superficie de 180 BHN o menor [32].

Determinando torque en el eje del piñón con Ec. 3.14, por relación de engranes [32]:

$$T_x = F_x \cdot d_x \quad (3.13)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.13 para el torque del piñón, queda:

$$T_2 = F_T \cdot d_p = 1,050.69 \cdot 0.0508 = 53.38 \text{ N.m}$$

Por lo tanto, el radio necesario para el timón aplicando una fuerza de 15 kg y despejando de la Ec 3.13:

$$R_t = \frac{T_2}{F} = \frac{53.38}{147.15} = 0.36 \text{ m} = 36 \text{ cm.}$$

Para tomar en consideración la fuerza del engrane en el eje Y, se determinó el peso de éste, a partir del material de fabricación elegido, el cual es de acero, y el volumen con los parámetros calculados en el diseño de esta transmisión se calcula con la Ec. 3.1.

$$V_e = \pi r^2 B = \pi \cdot 8^2 \cdot 2.9 = 583.08 \text{ pulg}^3 \cong 9.55 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

La masa del engrane se determina utilizando el volumen calculado anteriormente y la densidad del material del cual será fabricado el engrane, se toma un valor para el acero, y al sustituir en la Ec. 3.2 queda:

$$m_e = \rho_{acero} V_e = 7850 \cdot 9.55 \times 10^{-3} = 74.97 \text{ kg}$$

El peso del engrane se determina multiplicando la masa del engrane calculado por la aceleración gravitatoria utilizando la Ec. 3.4.

$$W_{engrane} = m_e g = 74.97 \cdot 9.81 = 735.43 \text{ N}$$

3.3. DISEÑO DE EJES

El sistema está compuesto por dos ejes los cuales se presentan en la Fig. 3.6, uno de estos mantiene al horno a una determinada elevación mediante dos puntos de apoyo, mientras que en el otro se ubican los elementos donde se inicia la transmisión de potencia de forma manual, en esta sección se determinará los diámetros adecuados de estos, así como los materiales de fabricación propuestos.

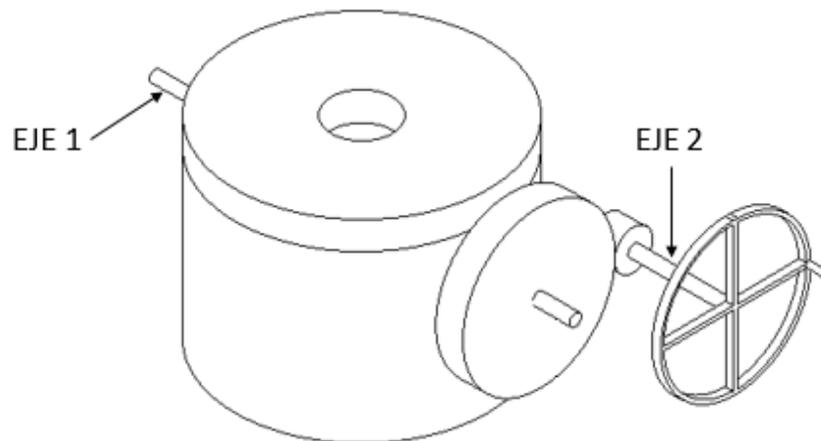


Fig. 3.6. Ubicación de ejes en el sistema.

3.3.1. DISEÑO DE EJE 1 APOYO A

Este eje está ubicado a un costado del horno y sobre éste solamente actúan dos fuerzas (ver, Fig. 3.7) que son el peso del horno dividido entre dos ya que éste está sostenido en ambos extremos, y el cojinete que permita la basculación para el vaciado de la colada.

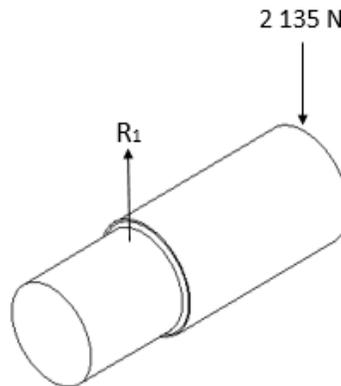


Fig. 3.7. Diagrama de cuerpo libre eje 1 apoyo A.

Sumatoria de fuerzas en el eje Y [33]:

$$\begin{aligned} +\uparrow \sum F_y &= 0 \\ R_1 - \frac{W_{total}}{2} &= 0 \\ R_1 &= 2.135 \text{ kN} \end{aligned}$$

Se analizan en R_1 como cojinete rodante que permita la basculación del horno y que pueda resistir la carga proporcionada por el peso del mismo, una característica de los cojinetes de bolas es que pueden soportar cargas radiales y de empuje por lo que aumenta su confiabilidad al usar este tipo de cojinete.

Determinando la carga equivalente para el cojinete con la Ec. 3.14 [32]:

$$F_e = VF_R \quad (3.14)$$

$V = 1.0$ factor para cuando la pista interna es la giratoria

$$F_e = 2.135 N$$

Cálculo de la carga dinámica en el cojinete (C) Ec 3.15 [32].

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}} \quad (3.15)$$

donde:

F_e es la carga equivalente en el cojinete,

L_d es la vida útil del diseño del cojinete, y

k es el factor de vida del cojinete.

Calculando la vida útil del diseño del cojinete mediante Ec. 3.16 [32].

$$L_d = L_{10} * n_e * 60 \quad (3.16)$$

donde:

L_{10} es la vida del cojinete en h.

Sustituyendo en la Ec. 3.16, queda:

$$L_d = 14 \times 10^3 * 2 * 60 = 1.68 \times 10^6$$

El factor de vida para cojinetes de bola es igual a 3. Por lo tanto, la carga dinámica en el cojinete queda:

Sustituyendo en la Ec. 3.15, queda:

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}} = 2.135 \left[\frac{1.68 \times 10^6}{10^6} \right]^{\frac{1}{3}} = 2.538 N \cong 570.6 lb$$

Selección de cojinete con ayuda de la Tabla 3.3:

Tabla 3.3. Tipos de cojinetes.

Serie 6200												
Número de cojinete	Dimensiones nominales de los cojinetes.							Diámetro de hombro que se prefiere		Peso del cojinete	Especif. Básico en cuanto a carga estática	Especif. Básica en cuanto a carga dinámica
	d		D		B		r*	Flecha	Carcasa			
	mm	pulg	mm	pulg	mm	pulg	pulg	pulg	pulg			
6200	10	0.3937	30	1.1811	9	0.3543	0.024	0.500	0.984	0.07	520	885
6201	12	0.4724	32	1.2598	10	0.3937	0.024	0.578	1.063	0.08	675	1180
6202	15	0.5906	35	1.3780	11	0.4331	0.024	0.703	1.181	0.10	790	1320
6203	17	0.6693	40	1.5748	12	0.4724	0.024	0.787	1.380	0.14	1010	1660
6204	20	0.7874	47	1.8504	14	0.5512	0.039	0.969	1.614	0.23	1400	2210
6205	25	0.9843	52	2.0472	15	0.5906	0.039	1.172	1.811	0.29	1610	2430
6206	30	1.1811	62	2.4409	16	0.6299	0.039	1.406	2.205	0.44	2320	3350
6207	35	1.3780	72	2.8346	17	0.6693	0.039	1.614	2.559	0.64	3150	4450

Número de cojinete: 6201,

Diámetro interno del cojinete: 12 mm,

Diámetro externo del cojinete: 32 mm, y

Ancho del cojinete: 10 mm.

Los diagramas de momento y cortante para el eje 1 con apoyo en A se visualizan en la Fig. 3.8 en donde se determinó el momento que actúa sobre el punto de muesca x (ver, Fig. 3.8c).

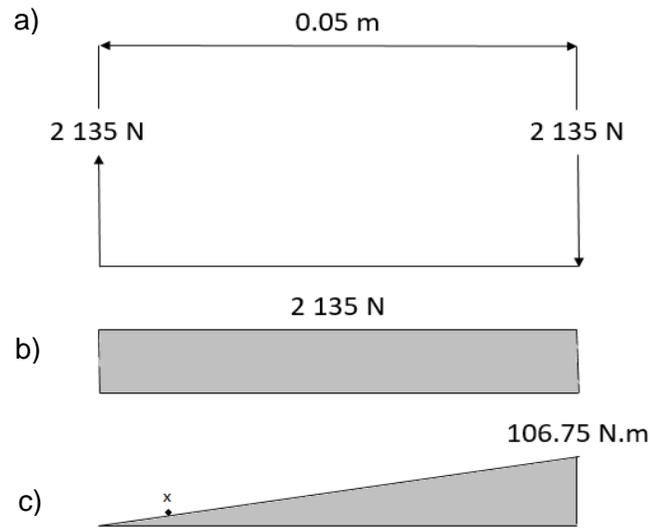


Fig. 3.8. Diagramas para el eje 1 con apoyo A. a) Diagrama de cuerpo libre; b) Diagrama de fuerzas cortantes; y c) Diagrama de momentos.

Determinando el momento en muesca por relación de triángulos en diagrama de momentos de la Fig. 3.8:

$$M = 5 \frac{106.75}{50} = 10.68 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Determinando factor de muesca para flexión gráficamente con la Fig. 3.9, para esto se determina las relaciones de radio de la muesca con respecto al diámetro menor del eje y del diámetro mayor con respecto al diámetro menor del mismo.

$$\frac{r}{d} = \frac{2}{10} = 0.2 \quad \frac{D}{d} = \frac{15}{10} = 1.5 \quad \text{Entonces de gráfica } K_T = 1.4$$

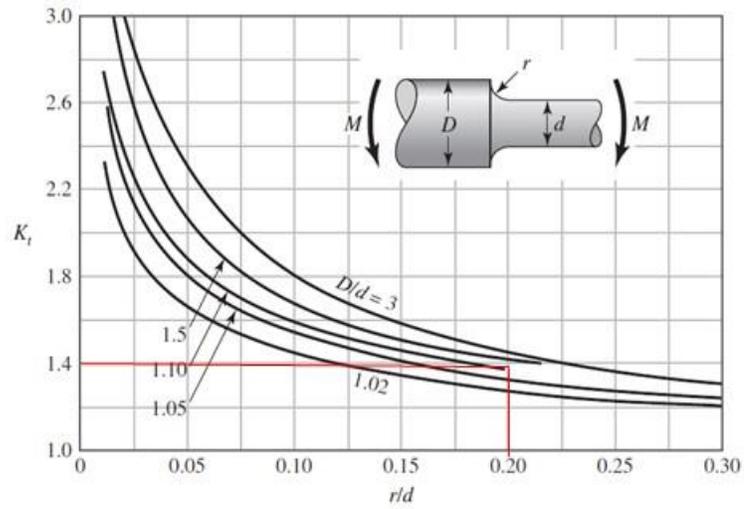


Fig. 3.9. Factor de muesca por flexión eje 1 [32]

Calculando factor K_f para los esfuerzos mediante la Ec. 3.17 [32]:

$$K_f = 1 + q(K_T - 1) \quad (3.17)$$

Asumiendo material de acero de $S_{ut} = 1$ GPa por lo tanto según gráfica q es igual a 0.9.

Entonces el valor del factor que se sustituye de la Ec. 3.17 queda:

$$K_f = 1 + 0.9(1.4 - 1) = 1.36.$$

Determinación de esfuerzos con la Ec. 3.18 [32]:

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} K_f \quad (3.18)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.18, queda:

$$\sigma = \frac{32(10.68)}{\pi(0.010)^3} (1.4) = 108.79 \text{ MPa}$$

Ahora determinando el esfuerzo último del material a utilizar, esto se hace asumiendo un factor de seguridad de 2, es decir para condiciones críticas del eje, y por medio de la aplicación de Goodman.

Determinando esfuerzo equivalente alterno con la Ec. 3.19 [32]:

$$\sigma_{ea} = [\sigma_a^2 + 3\tau_a^2]^{\frac{1}{2}} \text{ donde no existe cortante alterno} \quad (3.19)$$

Determinando el torque medio en la Ec. 3.20 [32]:

$$\tau_m = \frac{16T_{giro}}{\pi d^3} \quad (3.20)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.19, queda:

$$\sigma_{ea} = 108.79 \text{ MPa}$$

Determinando esfuerzo equivalente medio en la Ec. 3.21 [32]:

$$\sigma_{em} = [\sigma_m^2 + 3\tau_m^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.21)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.20, queda:

$$\tau_m = \frac{16(213.5)}{\pi(0.01)^3} = 1.09 \text{ GPa}$$

Por lo tanto:

Sustituyendo en la Ec. 3.21, queda:

$$\sigma_{em} = [3(1.09 \cdot 10^9)^2]^{\frac{1}{2}} = 1.89 \text{ GPa}$$

Determinando el esfuerzo nominal el límite de la resistencia a la fatiga en la Ec. 3.22 [32]:

$$S_n = k_a k_b k_c k_d k_e S'_n \quad (3.22)$$

donde:

k_a es el factor de modificación de la condición superficial

k_b es el factor de modificación del tamaño

k_c es el factor de modificación de la carga

k_d es el factor de modificación de la temperatura

k_e es el factor de modificación de efectos varios

S'_n es el límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

Determinando los factores de diseño, quedan:

$$k_a = 0.9 \text{ no se conoce material del eje}$$

$$k_b = 0.97 \text{ su diámetro ronda entre 2.8 y 50.6 mm}$$

$$k_c = 1 \text{ se determina en flexión}$$

$$k_d = 1 \text{ para temperatura ambiente}$$

$$k_e = 1 \text{ para otros efectos}$$

$$S'_n = 0.5 S_u \text{ para } S_u < 1.38 \text{ GPa}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.22, queda:

$$S_n = k_a k_b k_c k_d k_e S'_n = 0.5 * 0.9 * 0.97 * 1 * 1 * 1 * S_u = 0.4365 S_u \text{ kpsi}$$

Calculando esfuerzo nominal a partir de la Ec. 3.23 de Goodman [32]:

$$\frac{\sigma_{ea}}{S_n} + \frac{\sigma_{em}}{S'_n} = \frac{1}{n} \quad (3.23)$$

donde:

n es el factor de seguridad.

Sustituyendo en la Ec. 3.23, queda:

$$\frac{108.79 \times 10^6}{0.4365 S_u} + \frac{1.89 \times 10^9}{S_u} = \frac{1}{2} \text{ Por lo tanto, al despejar } S_u = 4.28 \text{ GPa}$$

Dado que el esfuerzo necesario es demasiado alto, se especifica un nuevo material y se calcula un nuevo diámetro del eje, se escoge un acero SAE 1045 laminado en caliente como material del eje, cuyo material tiene un $S_u = 570 \text{ MPa}$. Por lo tanto, sustituyendo todos los valores en la Ec. 3.18 se calcula el diámetro del eje:

$$\sigma_{ea} = \frac{32M}{\pi d^3} K_f = \frac{32(10.68)}{\pi(d)^3} (1.4) = \frac{147.95}{d^3}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.21, queda

$$\sigma_{em} = \sqrt{3} \frac{16T_{giro}}{\pi d^3} = \sqrt{3} \frac{16(213.5)}{\pi(d)^3} = \frac{1,883.34}{d^3}$$

Ahora se sustituye la Ec. 3.23 de Goodman para determinar el nuevo diámetro el cual queda:

$$\frac{147.95}{(0.4365)(520 \times 10^6)(d^3)} + \frac{1,883.34}{(520 \times 10^6)(d^3)} = \frac{1}{2}$$

despejando se obtiene: $d = 0.0205 \text{ m} \approx 20.5 \text{ mm}$

Selección de cojinete en 1, según su diámetro:

- Número de cojinete: 6205,
- Diámetro interno del cojinete: 25 mm,
- Diámetro externo del cojinete: 52 mm, y
- Ancho del cojinete: 15 mm.

El perfil de una evaluación de diseño de un cojinete de contacto rodante incluye, como mínimo:

- Confiabilidad existente para la carga impuesta y la vida esperada.
- Hombros en el árbol y alojamientos satisfactorios.
- Acabado del muñón, acabado del alojamiento, diámetro y tolerancias compatibles.
- Tipo de lubricante de acuerdo a la recomendación del fabricante, con el fin de mantener la temperatura de operación satisfactoria.
- Precargas, que se suministran si se requieren.

La confiabilidad del cojinete está representada por la Ec. 3.24 en términos de la clasificación básica de la carga dinámica del cojinete seleccionado [32].

$$R = 1 - \left\{ \frac{\frac{L_D}{L_{10}} \left(\frac{a_f F_e}{C_{10}} \right)^k - X_0}{\theta - X_0} \right\}^b \quad (3.24)$$

donde:

R es la confiabilidad del cojinete que debe ser mayor o igual a 0.9.

a_f es el factor de carga para maquinaria sin impactos $a_f = 1.2$.

C_{10} es la carga nominal del cojinete seleccionado $C_{10} = 14,000$ N.

$X_0, \theta - X_0, b$ son parámetros distribucionales de Weibull.

X_0 es el valor garantizado o mínimo de la variante $X_0 = 0.02$.

$\theta - X_0$ son parámetro característico que corresponde al valor del percentil de la variable $\theta - X_0 = 4.439$.

b es el parámetro de forma que controla el sesgo $b = 1.483$.

$$R = 1 - \left\{ \frac{\frac{1.68 * 10^6}{14 * 10^3} \left(\frac{1.2 * 2,135}{14,000} \right)^3 - 0.02}{4.439} \right\}^{1.483} = 0.9333$$

La confiabilidad del cojinete representa un 93.33% y cumple los requisitos mínimos establecidos.

Por factibilidad se calcula el material para fabricar los rodamientos deslizantes, utilizando el diámetro interno establecido para rodamientos de bola, empleando cojinetes de lubricación al límite se determina la carga máxima con la Ec. 3.25, utilizando la carga F_e aplicada al cojinete con un valor de 480 lb, un diámetro de 125/127 pulg, y una longitud de cojinete de 1 pulg [32].

$$P_{max} = \frac{4}{\pi} \frac{F_e}{DL} \quad (3.25)$$

donde:

F_e es la carga aplicada sobre el cojinete,

D es el diámetro interno del cojinete, y

L es el largo del cojinete.

$$P_{max} = \frac{4}{\pi} \frac{F_e}{DL} = \frac{4}{\pi} \frac{480}{\frac{125}{127} * 1} = 620.93 \text{ psi}$$

La presión nominal que soporta el cojinete se calcula con la Ec. 3.26, para los valores de carga aplicada 480 lb, diámetro interno del cojinete 125/127 pulg, y largo de cojinete de 1 pulg [32].

$$P = \frac{F_e}{DL} \quad (3.26)$$

$$P = \frac{F}{DL} = \frac{480}{\frac{125}{127} * 1} = 487.68 \text{ psi}$$

Se recomienda la fabricación del cojinete con acero SAE 1020, con lubricación al límite y buje sólido, la lubricación se debe realizar al dar inicio al movimiento [32].

3.3.2. DISEÑO DEL EJE 1 APOYO B

Esta parte del eje está ubicado en el otro apoyo del horno (ver, Fig. 3.6), así sobre éste se ubican 4 cargas que son la mitad del peso del horno y el peso del engrane de transmisión, así como los dos cojinetes que mantienen estable todos los elementos en éste, tal como se presenta en la Fig. 3.10.

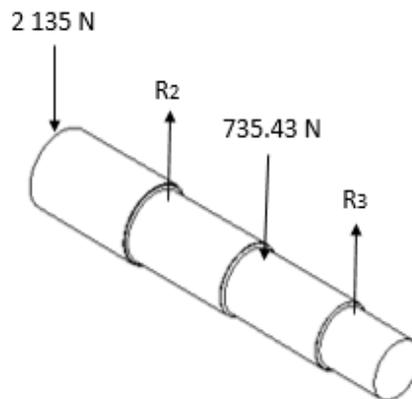


Fig. 3.10. Diagrama de cuerpo libre eje 1 apoyo B.

Realizando momento alrededor del cojinete 3 [33]:

$$\oplus \sum M_3 = 0$$

$$\frac{W_{horno}}{2} (0.15) - R_2(0.10) + w_{engrane}(0.05) = 0$$

$$R_2 = \frac{\frac{W_{horno}}{2} (0.15) + F_e(0.05)}{0.10} = \frac{(2,135)(0.15) + (735.43)(0.05)}{0.10} = 3\,570.22\,N$$

Ahora realizando sumatoria de fuerzas en el eje Y.

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$-\frac{W_{\text{horno}}}{2} + R_2 - w_{\text{engrane}} + R_3 = 0$$

$$R_3 = -3\,570.22 + 2,135 + 735.43 = 699.79 \text{ N} \downarrow$$

Se analiza el cojinete rodante en 2 debido al movimiento basculante del horno, y se determina la carga equivalente para el cojinete utilizando la Ec. 3.14 [32].

$$F_e = VF_R$$

$V = 1.0$ factor para cuando la pista interna es la giratoria

Entonces la carga equivalente para el cojinete 2 se obtiene al sustituyendo en la Ec. 3.14 es:

$$F_e = 3\,570.22 \text{ N}$$

Cálculo de la carga dinámica en el cojinete con la Ec. 3.15 [32]:

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}}$$

Utilizando la Ec. 3.16 queda:

$$L_d = L_{10} * n * 60$$

$$L_d = 14 * 10^3 * 1094 * 60 = 1.68 * 10^6$$

Se toma un valor de $k = 3$ para cojinetes de bola entonces su carga dinámica sustituyendo en la Ec. 3.15 es:

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}} = 3\,570.22 \left[\frac{1.68 * 10^6}{10^6} \right]^{\frac{1}{3}} = 4\,244.22 \text{ N} \cong 954.14 \text{ lb}$$

Selección de cojinete 2:

- Número de cojinete: 6201,
- Diámetro interno del cojinete: 12 mm,
- Diámetro externo del cojinete: 32 mm, y
- Ancho del cojinete: 10 mm.

Se analiza el cojinete rodante en 3 debido al movimiento basculante, determinando la carga equivalente con la Ec. 3.14 para el cojinete [32].

$$F_e = VF_R$$

$$V = 1.0 \text{ factor para cuando la pista interna es la giratoria}$$

Se calcula la carga equivalente para el cojinete 3 sustituyendo en la Ec. 3.14 con la carga calculada del cuerpo libre del eje y el factor V para pista giratoria interna.

$$F_e = 699.79 \text{ N}$$

Cálculo de la carga dinámica en el cojinete se determina con la Ec. 3.15 [32].

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}}$$

Utilizando la Ec. 3.16 para calcular la vida útil de diseño del cojinete.

$$L_d = L_{10} * n * 60$$

$$L_d = 14 * 10^3 * 1094 * 60 = 1.68 * 10^6$$

Se toma un valor de $k = 3$ para cojinetes de bola. Así, al sustituir en la Ec. 3.16 se obtiene la carga dinámica en el cojinete 3, la cual es:

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}} = 699.79 \left[\frac{1.68 * 10^6}{10^6} \right]^{\frac{1}{3}} = 831.9 \text{ N} \cong 187.02 \text{ lb}$$

Selección de cojinete 3:

- Número de cojinete: 6200,
- Diámetro interno del cojinete: 10 mm,
- Diámetro externo del cojinete: 30 mm, y
- Ancho del cojinete: 9 mm.

Los diagramas de cortante y momento en el eje 1 apoyo B se presentan en la Fig. 3.8 en donde apoyándose en el diagrama de momento se determinan los momentos en las muescas en los puntos ubicados en la Fig. 3.11.

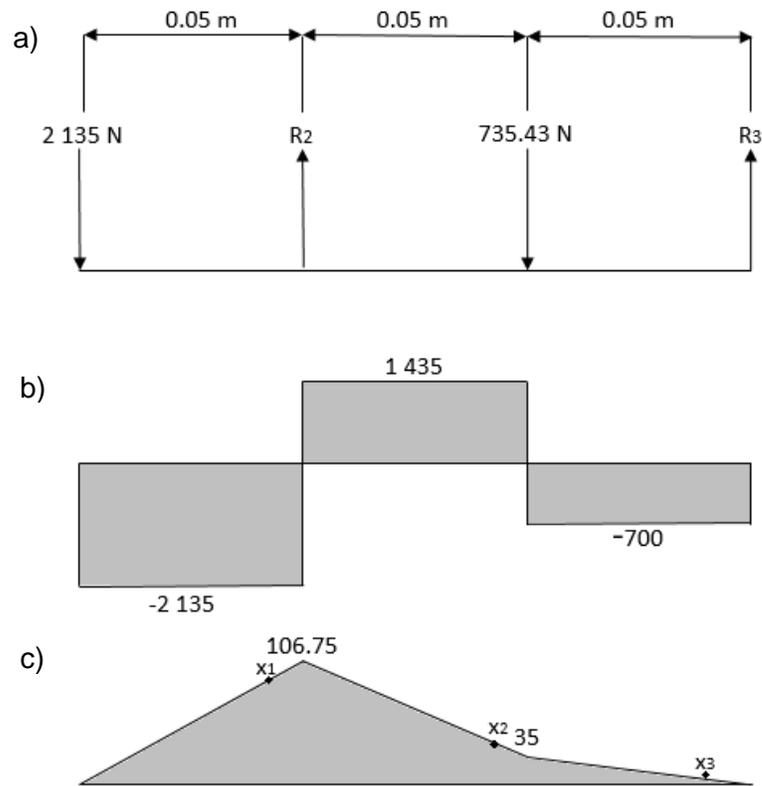


Fig. 3.11. Diagramas de cortante y momento en el eje 1 apoyo B: a) Diagrama de cuerpo libre; b) Diagrama de fuerzas cortantes; y c) Diagrama de momentos en el eje.

Determinación de momentos en las muescas X₁ y X₂ (ver, Fig. 3.11c) por método de relación de triángulos.

$$x_1 = 106.75 \frac{45}{50} = 96.08 \text{ N.m}$$

$$x_2 = 71.75 \frac{36}{50} + 35 = 86.66 \text{ N.m}$$

$$x_3 = 35 \frac{5}{50} = 3.5 \text{ N.m}$$

Determinado el factor de muesca con ayuda de la Fig. 3.12, para carga en flexión en x_1 (ver, Fig. 3.11c), con la relación de radio de muesca y diámetro mayor con respecto al diámetro menor del cambio de sección [32].

$$\frac{r}{d} = \frac{0.5}{9} = 0.06 \quad \frac{D}{d} = \frac{10}{9} = 1.11 \quad \text{Entonces de gráfica } K_T = 1.9$$

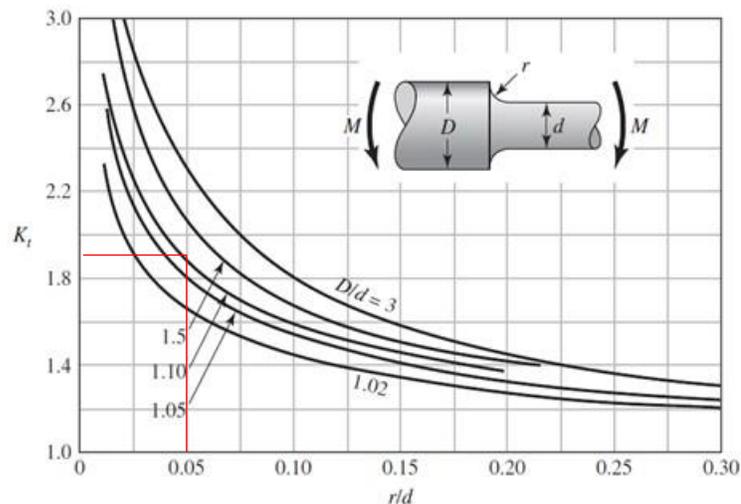


Fig. 3.12. Factor de muesca por flexión eje 1 apoyo B en X_1 [32].

Calculando factor K_f para los esfuerzos mediante la Ec. 3.17 asumiendo el material de fabricación es de acero con un esfuerzo último de 1 GPa por lo tanto según gráfica $q = 0.9$ [32].

$$K_f = 1 + q(K_T - 1)$$

$$K_f = 1 + 0.9(1.9 - 1) = 1.81$$

Utilizando material SAE 1045 laminado en caliente y aplicando Goodman con un factor de seguridad de 2 se determina un nuevo diámetro de eje.

Sustituyendo en la Ec. 3.19 para el cálculo del esfuerzo alterno [32].

$$\sigma_{ea} = \frac{32M}{\pi d^3} K_f = \frac{32(96.075)}{\pi(d)^3} (1.81) = \frac{1,771.29}{d^3}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.21 para el cálculo del esfuerzo medio [32]:

$$\sigma_{em} = \sqrt{3} \frac{16T_{giro}}{\pi d^3} = \sqrt{3} \frac{16(213.5)}{\pi(d)^3} = \frac{1,883.34}{d^3}$$

Por lo tanto, sustituyendo la Ec. 3.19 y Ec. 3.21 con los valores obtenidos para la muesca ubicada en el punto X_1 (ver, Fig. 3.11c) en la Ec. 3.23 de Goodman, determinando el diámetro adecuado para la fabricación del eje.

$$\frac{1,771.29}{(0.4365)(520 \times 10^6)(d^3)} + \frac{1,883.34}{(520 \times 10^6)(d^3)} = \frac{1}{2}$$

despejando se obtiene: $d = 0.0284 \text{ m} \approx 28.4 \text{ mm}$

Selección de cojinete 2 según su diámetro:

- Número de cojinete: 6206
- Diámetro interno del cojinete: 30 mm
- Diámetro externo del cojinete: 62 mm
- Ancho del cojinete: 16 mm

Se determina la confiabilidad del cojinete 2 mediante la Ec. 3.24 para la carga calculada F_e en relación con la carga nominal del cojinete seleccionado C_{10} , así como también la relación de vida útil de diseño L_D con respecto a la vida recomendada según tipo de maquinaria L_{10} [32].

$$R_2 = 1 - \left\{ \frac{\frac{1.68 * 10^6}{14 * 10^3} \left(\frac{1.2 * 3\,570.22}{19\,500} \right)^3 - 0.02}{4.439} \right\}^{1.483} = 0.8468$$

La confiabilidad del cojinete debe ser mayor al 90%, por lo tanto se selecciona un cojinete de mayores dimensiones con una carga nominal mayor, y se verifica la confiabilidad del mismo.

Selección del cojinete 2 según confiabilidad:

- Número de cojinete: 6207
- Diámetro interno del cojinete: 35 mm
- Diámetro externo del cojinete: 72 mm
- Ancho del cojinete: 17 mm

$$R_2 = 1 - \left\{ \frac{\frac{1.68 * 10^6}{14 * 10^3} \left(\frac{1.2 * 3\,570.22}{25\,500} \right)^3 - 0.02}{4.439} \right\}^{1.483} = 0.9549$$

Este cojinete cumple con los requisitos establecidos por la carga y diámetro mínimo del eje, y su confiabilidad es del 95.49%.

Para la fabricación de los rodamientos deslizantes, utilizando el diámetro interno establecido para rodamientos de bola, empleando cojinetes de lubricación al límite se determina la carga máxima con la Ec. 3.25, utilizando la carga F_e aplicada al cojinete con un valor de 802.59 lb, un diámetro de 1.38 pulg, y una longitud de cojinete de 1 pulg [32].

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{4}{\pi} \frac{F_e}{DL} = \frac{4}{\pi} \frac{802.59}{1.38 * 1} = 740.50 \text{ psi}$$

La presión nominal que soporta el cojinete se calcula con la Ec. 3.26, para los valores de carga aplicada 802.59 lb, diámetro interno del cojinete 1.38 pulg, y largo de cojinete de 1 pulg [32].

$$P = \frac{F_e}{DL} = \frac{802.59}{1.38 * 1} = 581.59 \text{ psi}$$

Se recomienda la fabricación del cojinete con acero SAE 1020, con lubricación al límite y buje sólido, la lubricación se debe realizar al dar inicio al movimiento.

Determinado factor de muesca con ayuda de la Fig. 3.13, para carga en flexión en X_2 (ver, Fig. 3.11c) gráficamente apoyándose en la Fig. 3.10, y con las relaciones de radio de muesca y diámetro menor de sección con respecto al diámetro mayor del mismo [32].

$$\frac{r}{D_1} = \frac{0.5}{9} = 0.055 \quad \frac{D_1}{D_2} = \frac{9}{8} = 1.13 \quad \text{Entonces de gráfica } K_T = 1.92$$

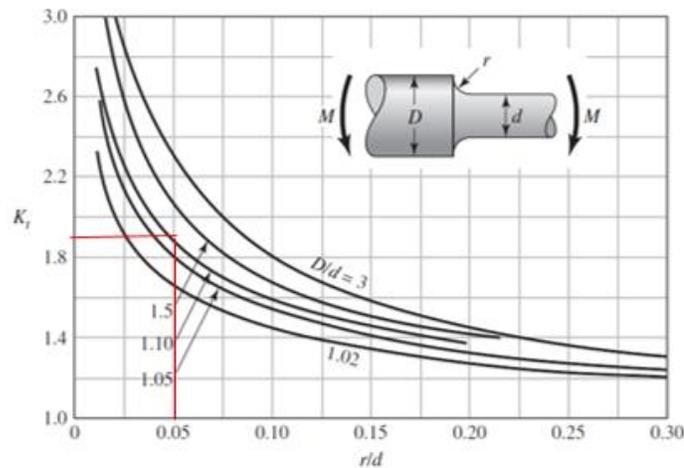


Fig. 3.13. Factor de muesca por flexión eje 1 apoyo B en X_2 .

Calculando factor K_f para los esfuerzos ubicados en la muesca X_2 mediante la Ec. 3.17 asumiendo el material de acero con un esfuerzo último de 1 GPa, por lo tanto según gráfica $q = 0.9$ [32].

$$K_f = 1 + q(K_T - 1)$$

$$K_f = 1 + 0.9(1.92 - 1) = 1.83$$

Utilizando material SAE 1045 laminado en caliente y aplicando la ecuación de Goodman con un factor de seguridad de 2 se determina un nuevo diámetro de eje sustituyendo en la Ec. 3.19 para el cálculo del esfuerzo alterno y en la Ec. 3.21 para el cálculo del esfuerzo medio [32].

$$\sigma_{ea} = \frac{32M}{\pi d^3} K_f = \frac{32(86.66)}{\pi(d)^3} (1.83) = \frac{1,615.36}{d^3}$$

$$\sigma_{em} = \sqrt{3} \frac{16T_{giro}}{\pi d^3} = \sqrt{3} \frac{16(213.5)}{\pi(d)^3} = \frac{1,883.34}{d^3}$$

$$\frac{1,615.36}{(0.4365)(520 \cdot 10^6)(d^3)} + \frac{1,883.34}{(520 \cdot 10^6)(d^3)} = \frac{1}{2}$$

Despejando se obtiene: $d = 0.0278 \text{ m} \approx 27.8 \text{ mm}$

Determinado factor de muesca para carga en flexión en x3 (ver, Fig. 3.11c) gráficamente con la Fig. 3.14 y las relación de radio de muesca r y diámetro d con respecto al diámetro D [32].

$$\frac{r}{d} = \frac{0.5}{8} = 0.063 \quad \frac{D}{d} = \frac{9}{8} = 0.89 \quad \text{Entonces de gráfica } K_T = 1.4$$

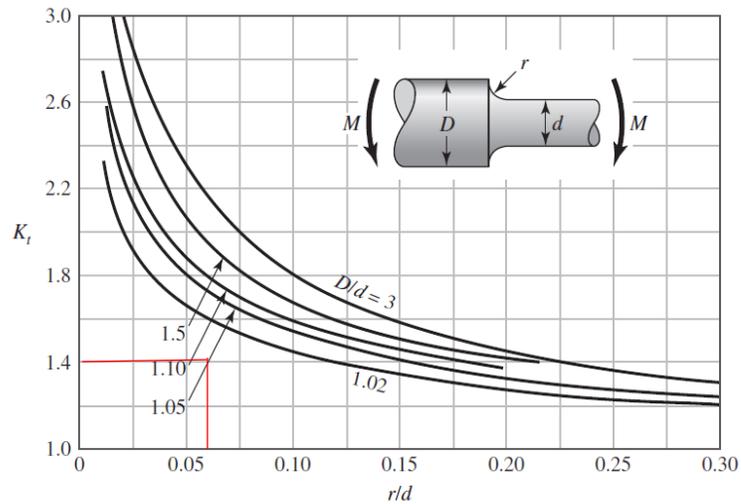


Fig. 3.14. Factor de muesca por flexión eje 1 apoyo B en X_3 .

Calculando factor K_f para los esfuerzos mediante la Ec. 3.17 y asumiendo material de fabricación de acero con un esfuerzo último de 1 GPa por lo tanto según gráfica $q = 0.9$ [32].

$$K_f = 1 + q(K_T - 1)$$

$$K_f = 1 + 0.9(1.4 - 1) = 1.36$$

Utilizando material SAE 1045 laminado en caliente y aplicando la Ec. 22 de Goodman con un factor de seguridad de 2 se determina un nuevo diámetro de eje, sustituyendo los esfuerzos alternos y medios [32].

$$\sigma_{ea} = \frac{32M}{\pi d^3} K_f = \frac{32(3.5)}{\pi(d)^3} (1.36) = \frac{48.48}{d^3}$$

$$\sigma_{em} = \sqrt{3} \frac{16T_{giro}}{\pi d^3} = \sqrt{3} \frac{16(213.5)}{\pi(d)^3} = \frac{1,883.34}{d^3}$$

$$\frac{48.48}{(0.4365)(520 \cdot 10^6)(d^3)} + \frac{1,883.34}{(520 \cdot 10^6)(d^3)} = \frac{1}{2}$$

despejando se obtiene: $d = 0.0197 \text{ m} \approx 19.7 \text{ mm}$

Selección de cojinete 3 según su diámetro:

- Número de cojinete: 6204,
- Diámetro interno del cojinete: 20 mm,
- Diámetro externo del cojinete: 47 mm, y
- Ancho del cojinete: 14 mm.

Se determina la confiabilidad del cojinete 3 mediante la Ec. 3.24 para la carga calculada F_e en relación con la carga nominal del cojinete seleccionado C_{10} , así como también la relación de vida útil de diseño L_D con respecto a la vida recomendada según tipo de maquinaria L_{10} [32].

$$R_3 = 1 - \left\{ \frac{\left(\frac{1.68 * 10^6}{14 * 10^3} \left(\frac{1.2 * 699.79}{12,700} \right)^3 - 0.02 \right)}{4.439} \right\}^{1.483} = 0.9998$$

El cojinete cumple con los requerimientos, por lo tanto se puede utilizar un cojinete 6204 o mayor a este, ya que cumple con los requerimientos de cargas y de diámetros mínimos y su confiabilidad es del 99.98%.

Para la fabricación de los rodamientos deslizantes, utilizando el diámetro interno establecido para rodamientos de bola, empleando cojinetes de lubricación al límite se determina la carga máxima con la Ec. 3.25, utilizando la carga F_e aplicada al cojinete con un valor de 157.31 lb, un diámetro de 0.79 pulg, y una longitud de cojinete de 1 pulg.[32]

$$P_{max} = \frac{4}{\pi} \frac{F_e}{DL} = \frac{4}{\pi} \frac{157.31}{0.79 * 1} = 253.54 \text{ psi}$$

La presión nominal que soporta el cojinete se calcula con la Ec. 3.26, para los valores de carga aplicada 157.31 lb, diámetro interno del cojinete 0.79 pulg, y largo de cojinete de 1 pulg [32].

$$P = \frac{F_e}{DL} = \frac{157.31}{0.79 * 1} = 199.13 \text{ psi}$$

Se recomienda la fabricación del cojinete con acero SAE 1020, con lubricación al límite y buje sólido, la lubricación se debe realizar al dar inicio al movimiento.

3.3.3. DISEÑO DE EJE 2

En el eje 2 están los elementos como el piñón de la transmisión de potencia, el timón para bascular el horno de forma manual y dos cojinetes para la estabilización del eje de forma estática, en la Fig. 3.15 se presenta el diagrama de cuerpo libre de las cargas en éste.

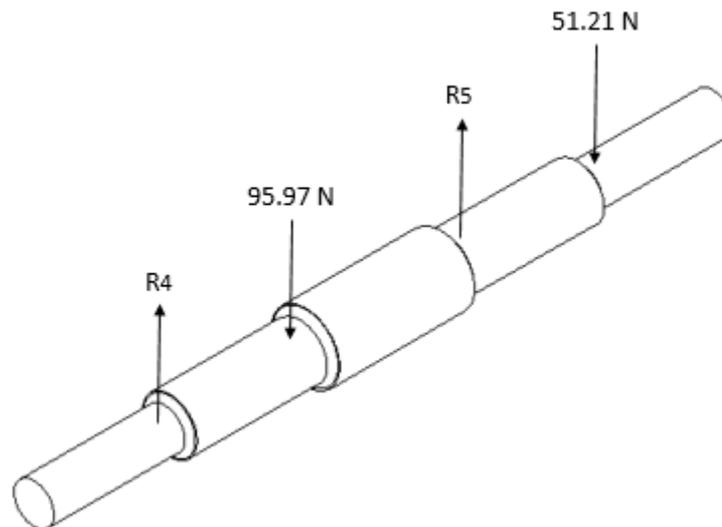


Fig. 3.15. Diagrama de cuerpo libre eje 2.

Determinando la fuerza que ejerce el piñón, de la misma manera que se determinó la fuerza que se aplica el engrane, se necesita conocer la fuerza que ejerce el piñón, conociendo el material de este se calcula el volumen del piñón.

Para el cálculo del volumen del piñón, se sustituye en la Ec. 3.1, posteriormente se calcular la masa con la Ec. 3.2 que al multiplicarla por la aceleración de la gravedad se determina el peso con la Ec. 3.4.

$$V_{piñon} = \pi r^2 B = \pi \cdot 2^2 \cdot 2.9 = 36.44 \text{ pulg}^3 \cong 5.97 \cdot 10^{-4} m^3$$

$$m_{piñon} = \rho_{acero} V_{piñon} = 7850 \cdot 5.97 \cdot 10^{-4} = 4.69 \text{ kg}$$

$$w_{piñon} = m_{piñon} g = 4.69 \cdot 9.81 = 45.97 \text{ N}$$

Para determinar la fuerza que ejerce el timón se considera un tubo de acero de ½ pulg de diámetro que tiene un peso por longitud de 1.27 kg/m por lo tanto la longitud total que utiliza el timón se determina con la Ec. 3.27, que es la suma del perímetro y 4 secciones que sirven de soporte.

$$P_{timón} = 2\pi r = 2 \cdot \pi \cdot 0.36 = 2.26 \text{ m}$$

$$L_{timón} = P_{timón} + (4 \cdot 0.36) \tag{3.27}$$

$$L_{timón} = 2.26 + (4 \cdot 0.36) = 3.7 \text{ m}$$

El peso del timón se determina factorizando la masa de la longitud total y la aceleración de la gravedad.

$$w_{timón} = mg = \left(1.27 \frac{\text{kg}}{\text{m}}\right) (3.7\text{m}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 46.10 \text{ N}$$

Realizando sumatoria de momentos en el cojinete 4 [33].

$$+\circlearrowleft \sum M_4 = 0$$

$$-w_{\text{piñon}}(0.05) + R_5(0.10) - w_{\text{tímon}}(0.15) = 0$$

$$R_5 = \frac{(45.97)(0.05) + (46.10)(0.15)}{0.10} = 92.14 \text{ N } \uparrow$$

Realizando sumatoria de fuerzas en el eje Y [33].

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

$$R_4 - w_{\text{piñon}} + R_5 - w_{\text{tímon}} = 0$$

$$R_4 = 45.97 - 92.14 + 46.10 = 0.07 \text{ N } \downarrow$$

Se analiza el cojinete rodante en 4 que permita el giro de transmisión para la basculación del horno, determinando la carga equivalente para el cojinete utilizando la Ec. 3.14 usando factor cuando la pista interna es la giratoria [32].

$$F_e = VF_R$$

$V = 1.0$ factor para cuando la pista interna es la giratoria

$$F_e = 0.07 \text{ N}$$

Cálculo de la carga dinámica en el cojinete con la Ec. 3.15 determinando primeramente la vida útil de diseño L_d y tomando un valor de $k = 3$ que es para cojinetes de bola [32].

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}}$$

$$L_d = L_{10} * n * 60$$

$$L_d = 14 * 10^3 * 1094 * 60 = 1.68 * 10^6$$

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}} = 0.07 \left[\frac{1.68 * 10^6}{10^6} \right]^{\frac{1}{3}} = 0.08 N \cong 0.02 lb$$

Selección de cojinete 4 según carga dinámica:

- Número de cojinete: 6200
- Diámetro interno del cojinete: 10 mm
- Diámetro externo del cojinete: 30 mm
- Ancho del cojinete: 9 mm

Se analiza el cojinete rodante en 5 que permita el movimiento basculante del sistema, determinando la carga equivalente para el cojinete con un factor de 1 por pista interna giratoria y sustituyendo en Ec. 3.14 para calcular la carga dinámica en el cojinete con la Ec. 3.15 con un factor de $k = 3$ para cojinetes de bolas y una vida útil de diseño según la Ec. 3.16 [32].

$$F_e = VF_R$$

$V = 1.0$ factor para cuando la pista interna es la giratoria

$$F_e = 92.14 N$$

$$L_d = L_{10} * n * 60$$

$$L_d = 14 * 10^3 * 1094 * 60 = 1.68 * 10^6$$

$$C = F_e \left[\frac{L_d}{10^6} \right]^{\frac{1}{k}} = 92.14 \left[\frac{1.68 * 10^6}{10^6} \right]^{\frac{1}{3}} = 109.53 N \cong 24.62 lb$$

Selección de cojinete 5 según carga dinámica:

- Número de cojinete: 6200,
- Diámetro interno del cojinete: 10 mm,
- Diámetro externo del cojinete: 30 mm, y
- Ancho del cojinete: 9 mm.

Los diagramas del eje se establecen en la Fig. 3.16, donde se determina el punto muesca X_1 (ver, Fig. 3.16c), que permita determinar el diámetro mínimo del eje.

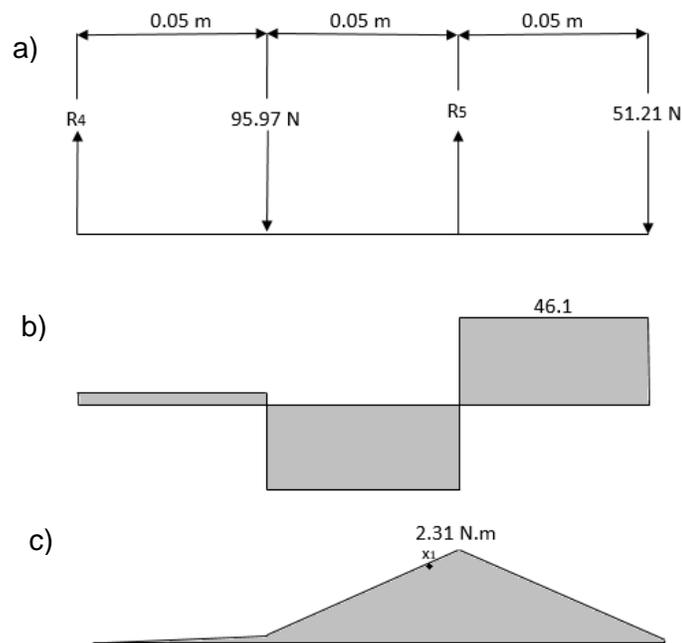


Fig. 3.16. Diagramas en el eje 2: a) Diagrama de cuerpo libre; b) Diagrama de fuerzas cortantes en el eje 2; y c) Diagrama de momentos en el eje 2.

Determinación de momento en muesca X_1 por relación de triángulos.

$$x_1 = 2.31 \frac{45}{50} = 2.10 \text{ N.m}$$

Determinado factor de muesca con el grafico de la Fig. 3.17 para carga en flexión en x_1 gráficamente con la Fig. 3.14, con relaciones de radio r y diámetro D con respecto al diámetro d del eje [32].

$$\frac{r}{d} = \frac{2}{10} = 0.2 \quad \frac{D}{d} = \frac{15}{10} = 1.5 \quad \text{Entonces de gráfica } K_T = 1.4$$

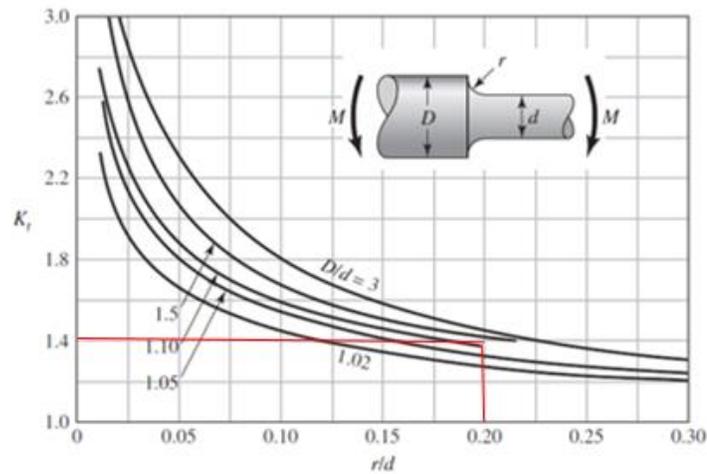


Fig. 3.17. Factor de muesca para carga en flexión eje 3 en x_1 .

Calculando factor K_f para los esfuerzos mediante la Ec. 3.17 asumiendo un material de acero con un esfuerzo último de 1 GPa, por lo tanto de gráfica $q = 0.9$ [32].

$$K_f = 1 + q(K_T - 1)$$

$$K_f = 1 + 0.9(1.4 - 1) = 1.36$$

Utilizando material SAE 1045 laminado en caliente y aplicando la ecuación de Goodman con un factor de seguridad de 2 se determina un nuevo diámetro de eje sustituyendo en la Ec. 3.19 para el cálculo del esfuerzo alterno y en la Ec. 3.21 para el cálculo del esfuerzo medio [32].

$$\sigma_{ea} = \frac{32M}{\pi d^3} K_f = \frac{32(2.10)}{\pi(d)^3} (1.36) = \frac{29.09}{d^3}$$

$$\sigma_{em} = \sqrt{3} \frac{16T_{giro}}{\pi d^3} = \sqrt{3} \frac{16(53.38)}{\pi(d)^3} = \frac{470.88}{d^3}$$

$$\frac{29.09}{(0.4365)(520 \times 10^6)(d^3)} + \frac{470.88}{(520 \times 10^6)(d^3)} = \frac{1}{2}$$

Despejando se obtiene: $d = 0.0127 \text{ m} \approx 12.7 \text{ mm}$

Selección de cojinetes 4 y 5 según su diámetro:

- Número de cojinete: 6202,
- Diámetro interno del cojinete: 15 mm,
- Diámetro externo del cojinete: 35 mm, y
- Ancho del cojinete: 11 mm.

Para la fabricación de los rodamientos deslizantes, utilizando el diámetro interno establecido para rodamientos de bola, empleando cojinetes de lubricación al límite se determina la carga máxima con la Ec. 3.25, utilizando la carga F_e aplicada al cojinete con un valor de 20.8 lb, un diámetro de 0.60 pulg, y una longitud de cojinete de 0.5 pulg [32].

$$P_{max} = \frac{4}{\pi} \frac{F_e}{DL} = \frac{4}{\pi} \frac{20.8}{0.6 * 0.5} = 89 \text{ psi}$$

La presión nominal que soporta el cojinete se calcula con la Ec. 3.26, para los valores de carga aplicada 20.8 lb, diámetro interno del cojinete 0.6 pulg, y largo de cojinete de 0.5 pulg [32].

$$P = \frac{F_e}{DL} = \frac{20.8}{0.6 * 0.5} = 70 \text{ psi}$$

Se recomienda la fabricación del cojinete con acero SAE 1020, con lubricación al límite y buje sólido, la lubricación se debe realizar al dar inicio al movimiento [32].

3.4. DISEÑO DE ESTRUCTURA

El sistema de basculación debe soportar el peso del horno, así como también sus componentes, se debe determinar el centro de gravedad para establecer la ubicación de los ejes de soporte, y calcular las cargas involucradas en toda la estructura para poder determinar de manera correcta, el tipo y perfil del material que se debe utilizar en su fabricación.

3.4.1. CÁLCULO DE CENTRO DE GRAVEDAD DEL HORNO

El centro de gravedad es importante conocerlo para que con una fuerza razonable se pueda realizar la operación de basculación del horno, así como la correcta ubicación del eje de transmisión y su debido torque. Para este cálculo de acuerdo con la simetría se puede decir que el centro de gravedad está ubicado en un eje imaginario que pasa por el centro del horno.

Para determinar el centro de gravedad, dato importante para el diseño del sistema basculante, en la Fig. 3.15 se presenta los centroides.

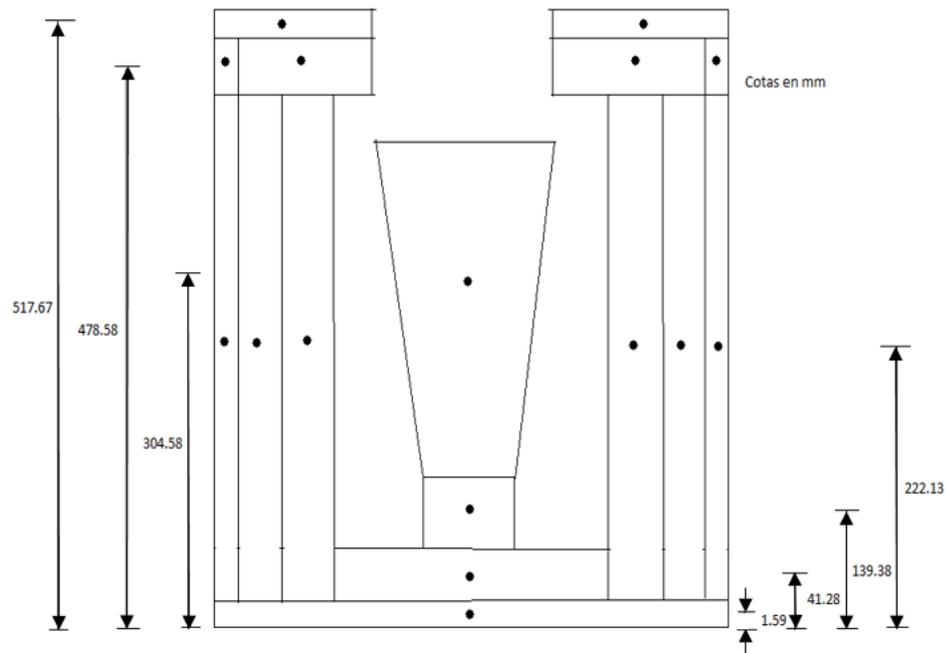


Fig. 3.18. Centroides del horno.

Para determinar el centroide del crisol con la Ec. 3.28 se tomó en consideración la Fig. 3.19, en ella están las medidas de las diferentes figuras que se tomaran en consideración para poder realizar el cálculo con la ayuda de la Tabla 3.4 [33].

Tabla 3.4. Centroide del crisol.

Figura	Área, mm ²	Y, mm	AY, mm ³
	33548.32	101.6	3408509.31
	-1612.90	67.73	-109241.72
	-1612.90	67.73	-109241.72
Sumatoria	30322.52	-----	3190025.87

$$\bar{Y} = \frac{\sum \Delta Y}{A} \quad (3.28)$$

donde:

Y es la ubicación del centroide vertical.

Así, sustituyendo en la Ec. 3.28, queda:

$$\bar{Y} = \frac{3190025.87}{30322.52} = 105.20 \text{ mm (Centroide del crisol)}$$

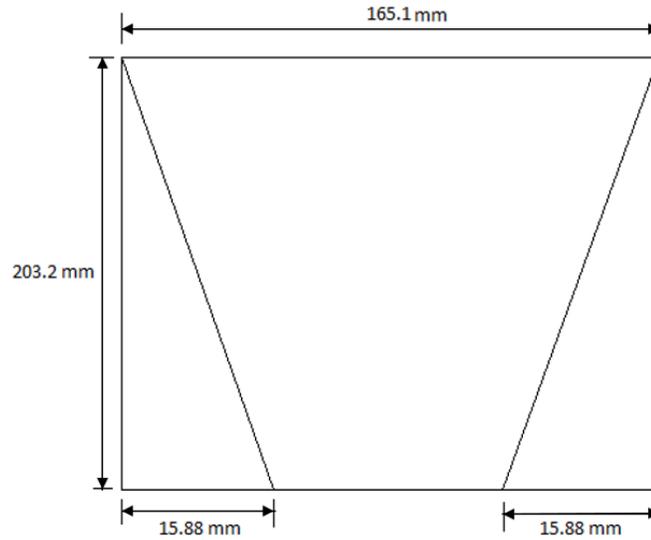


Fig. 3.19. Medidas del crisol para la determinación del centroide.

En la Tabla 3.5 se presenta la masa de cada uno de los materiales que conforman el horno de crisol.

Tabla 3.5. Pesos de materiales utilizados.

Material	Masa, kg	Peso sobrecarga de 15%, kg
Acero	40.07	46.08
Refractario	216.56	249.04
Cerámica	105.86	121.74
Crisol cargado	11.00	12.65
Quemador	5.00	5.75

La Ec. 3.29 para determinar el centro de gravedad [33].

$$\bar{Y}_g = \frac{Y_1 m_1 + Y_2 m_2 + \dots + Y_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (3.29)$$

Calculando la masa de los elementos individuales en el horno sobre la base de la Fig. 3.18.

Como el acero y refractario están distribuidos en distintas partes del horno, las masas se calcularán por separado para poder calcular el centro de masa.

En el acero la masa se calcula en este orden: cilindro, fondo, parte superior de la tapa y cilindro de la tapa. En el refractario la masa se calcula en el siguiente orden: paredes del cilindro, fondo, pedestal, tapa. En los elementos como crisol y cerámica el peso sólo se encuentra en una ubicación específica así que no es necesario calcular porciones de masa dependiendo del centroide, así [33]:

➤ Acero

Sustituyendo Ec. 3.2 en Ec. 3.4 queda:

$$w = \rho g v \quad m = w/g$$

Porción de masa 1 (ver, Fig. 3.2a):

$$w_{1a} = \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (2.9619 \times 10^{-3} m^3) = 228.09 N$$
$$m_{1a} = \frac{w_{1a}}{g} = 23.25 kg$$

Porción de masa 2 (ver, Fig. 3.2b):

$$w_{2a} = \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (1.1406 \times 10^{-3} m^3) = 87.84 N$$
$$m_{2a} = \frac{w_{2a}}{g} = 8.95 kg$$

Porción de masa 3 (ver, Fig. 3.2c):

$$w_{3a} = \left(7850 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (7.4999 \times 10^{-4} m^3) = 57.76 N$$

$$m_{3a} = \frac{w_{3a}}{g} = 5.89 \text{ kg}$$

Porción de masa 4 (ver, Fig. 3.2 d):

$$w_{4a} = \left(7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (2.5296 \times 10^{-4} \text{m}^3) = 19.48 \text{ N}$$

$$m_{4a} = \frac{w_{4a}}{g} = 1.99 \text{ kg}$$

➤ Refractivo

Porción de masa 1 (ver, Fig. 3.3 a):

$$w_{1R} = \left(2800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (48.8711 \times 10^{-3} \text{m}^3) = 1342.39 \text{ N}$$

$$m_{1R} = \frac{w_{1R}}{g} = 136.84 \text{ kg}$$

Porción de masa 2 (ver, Fig. 3.3b):

$$w_{2R} = \left(2800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (9.1028 \times 10^{-3} \text{m}^3) = 250.04 \text{ N}$$

$$m_{2R} = \frac{w_{2R}}{g} = 25.49 \text{ kg}$$

Porción de masa 3 (ver, Fig. 3.3 c):

$$w_{3R} = \left(2800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (1.68 \times 10^{-3} \text{m}^3) = 46.15 \text{ N}$$

$$m_{3R} = \frac{w_{3R}}{g} = 4.704 \text{ kg}$$

Porción de masa 4 (ver, Fig. 3.3 d):

$$w_{4R} = \left(2800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (17.6886 \times 10^{-3} \text{m}^3) = 485.87 \text{ N}$$

$$m_{4R} = \frac{W_{4R}}{g} = 49.53 \text{ kg}$$

$$m_{\text{crisol}} = 11 \text{ kg} \quad m_{\text{cerámica}} = 105.86 \text{ kg}$$

En la Tabla 3.6 se encuentra los centroides y masa de acuerdo a la figura para poder así calcular el centro de gravedad.

Tabla 3.6. Centro de masa del horno.

Material	Y, mm	m, kg	Y*m, mm (kg)
Acero	222.13	23.25	5164.52
	1.59	8.95	14.23
	517.67	5.89	3049.08
	478.58	1.99	952.37
Refractario	222.13	136.84	30396.27
	41.28	25.49	1052.23
	139.38	4.70	655.09
	478.58	49.53	23704.07
Cerámica	222.13	105.86	23514.68
Crisol	304.58	11.00	3350.38
Sumatoria		373.50	91853.47

Sustituyendo en la Ec. 3.29, queda:

$$\bar{Y}_g = \frac{91853.47 \text{ mm. kg}}{373.50 \text{ kg}} = 245.92 \text{ mm}$$

El centro de gravedad se encuentra localizado a 245.92 mm, medida ubicada desde la base del horno, por lo que el eje será ubicado 5 cm arriba de ésta.

3.4.2. ESTRUCTURA DE BASCULACIÓN

Las medidas se establecen según el centro de gravedad colocando los ejes con una distancia de 5 cm arriba de este punto, por lo tanto la altura se establece tomando en consideración tal distancia así como la longitud máxima al girar el horno y un espacio de seguridad en caso las dimensiones se sobrepasen en la construcción de éste, los anchos se determinan según las dimensiones del horno y las distancias de los componentes de los diferentes ejes, tomando en consideración todas las cargas en los cojinetes se establecen como se presenta en la Fig. 3.20.

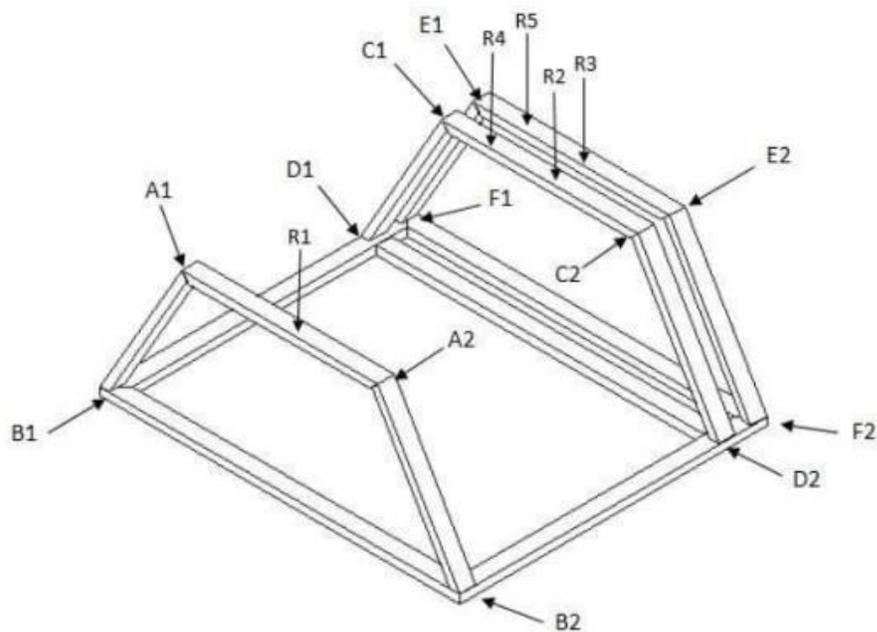


Fig. 3.20. Cargas R en los cojinetes.

3.4.3. REACCIONES EN LA ESTRUCTURA

Para determinar las reacciones en la estructura se establecen 6 puntos (ver Fig. 3.20), estas cargas se establecen de las reacciones en los cojinetes, por

lo tanto los puntos de cargas son donde se ubican los cojinetes y se desplazan las fuerzas como se presenta en la Fig. 3.21.

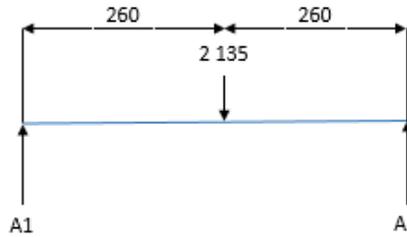


Fig. 3.21. Diagrama de cuerpo libre
1 reacción A1 y A2.

Realizando sumatoria de momentos alrededor de A1 [33]:

$$\begin{aligned}
 +\circlearrowleft \sum M_{A1} &= 0 \\
 -(2,135)(260) + (A2)(520) &= 0 \\
 A2 &= \frac{(2,135)(260)}{520} = 1,067.5 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sumatoria de fuerzas en el eje Y [33]:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_y &= 0 \\
 A1 - 2,135 + A2 &= 0 \\
 A1 &= 2,135 - 1,067.5 = 1,067.5 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Por consiguiente, se determina las cargas en la parte inferior de la estructura con la Fig. 3.22:

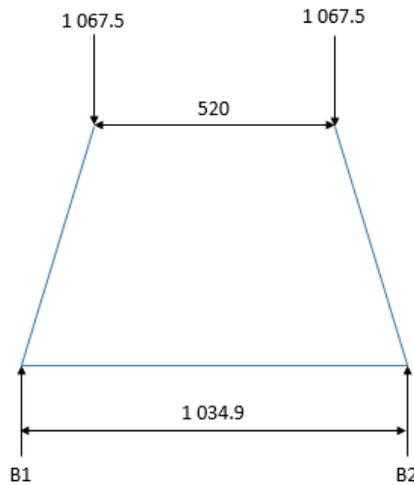


Fig. 3.22. Diagrama de cuerpo libre
2 reacciones B1 y B2.

Realizando sumatoria de momentos alrededor de B1 [33]:

$$\begin{aligned}
 +\circlearrowleft \sum M_{B1} &= 0 \\
 -(1,067.5)(257.45) - (1,067.5)(777.45) + (B2)(1,034.9) &= 0 \\
 B2 &= \frac{(1,067.5)(257.45) + (1,067.5)(777.45)}{1,034.9} = 1,067.5 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Ahora sumatoria de fuerzas en dirección Y [33]:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_y &= 0 \\
 B1 &= 1,067.5 + 1,067.5 - 1,067.5 = 1,067.5 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Ahora analizando la sección 2 en donde se ubican los cojinetes 2 y 4 como se presenta en la Fig. 3.23:

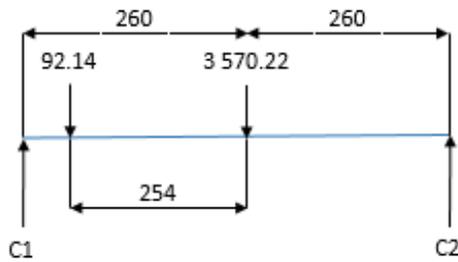


Fig. 3.23. Diagrama de cuerpo libre 3 reacciones C1 y C2.

Realizando sumatoria de momentos alrededor de C2 [33]:

$$\begin{aligned}
 +\circlearrowleft \sum M_{C2} &= 0 \\
 (3\,570.22)(260) + (92.14)(514) - (C1)(520) &= 0 \\
 C1 &= \frac{(3\,570.22)(260) + (92.14)(514)}{520} = 1,876.19 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sumatoria de fuerzas en dirección Y [33]:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_Y &= 0 \\
 C2 - 3\,570.22 - 92.14 + 1,876.19 &= 0 \\
 C2 &= 1,786.2 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Determinación de cargas en la parte inferior de la sección dos con la Fig. 3.24:

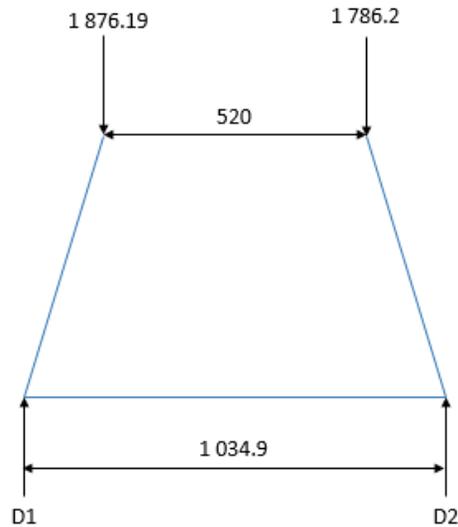


Fig. 3.24. Diagrama de cuerpo libre 4 reacciones D1 y D2.

Sumatoria de momentos alrededor de D1 [33]:

$$\begin{aligned}
 & +\circlearrowleft \sum M_{D1} = 0 \\
 & -(1,876.19)(257.45) - (1,786.2)(777.45) + (D2)(1,034.9) = 0 \\
 & D2 = \frac{(1,876.19)(257.45) + (1,786.2)(777.45)}{1,034.9} = 1,853.8 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sumatoria de fuerzas en dirección Y [33]:

$$\begin{aligned}
 & +\uparrow \sum F_y = 0 \\
 & B1 = 1,876.19 + 1,786.2 - 1,853.8 = 1,808.59 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Ahora analizando la sección 3 en donde se ubican los cojinetes 3 y 5 como se presenta en la Fig. 3.25:

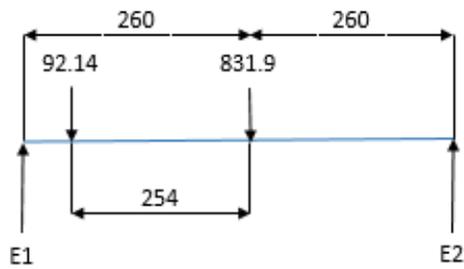


Fig. 3.25. Diagrama de cuerpo libre 5 reacción E1 y E2.

Sumatoria de momentos alrededor de E2 [33]:

$$\begin{aligned}
 +\circlearrowleft \sum M_{E2} &= 0 \\
 (831.9)(260) + (92.14)(514) - (E1)(520) &= 0 \\
 E1 &= \frac{(831.9)(260) + (92.14)(514)}{520} = 507.03 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sumatoria de fuerzas en dirección Y [33]:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_Y &= 0 \\
 E2 - 831.9 - 92.14 + 507.03 &= 0 \\
 E2 &= 417.01 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Determinación de cargas en la parte inferior de la sección 3 con la Fig. 3.26:

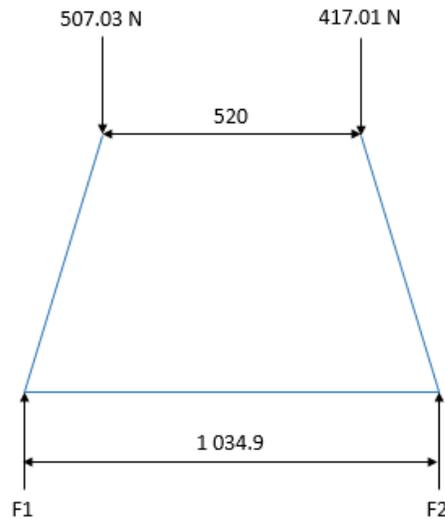


Fig. 3.26. Diagrama de cuerpo libre 6 reacción F1 y F2.

Sumatoria de momentos alrededor de F1 [33]:

$$\begin{aligned}
 +\cup \sum M_{F1} &= 0 \\
 -(507.03)(257.45) - (417.01)(777.45) + (F2)(1,034.9) &= 0 \\
 F2 &= \frac{(507.03)(257.45) + (417.01)(777.45)}{1,034.9} = 439.4 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Sumatoria de fuerzas en dirección Y [33]:

$$\begin{aligned}
 +\uparrow \sum F_y &= 0 \\
 B1 &= 507.03 + 417.01 - 439.4 = 484.64 \text{ N}
 \end{aligned}$$

3.5. DISEÑO DE SOLDADURA

Para la unión de los ejes al horno se propone por medio de soldadura, el horno debe ser reforzado para soportar el peso del mismo y los ejes serán

soldados sobre los refuerzos mencionados para una mayor seguridad, se debe determinar la altura de los cordones y el tipo de electrodo a utilizar (ver, Fig. 3.27)

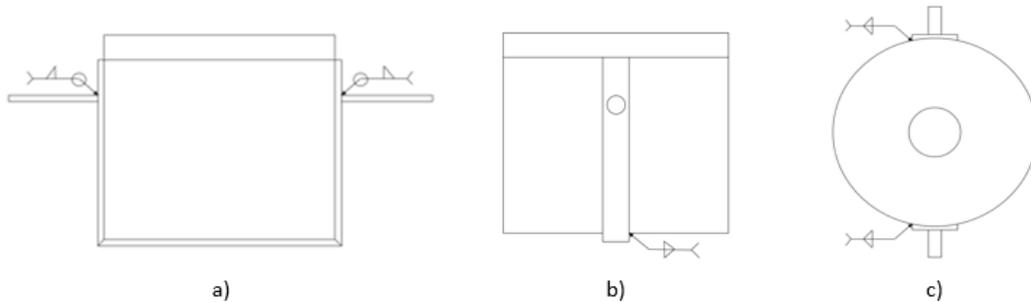


Fig. 3.27. Esquema de las soldaduras: a) Soldadura de los ejes en el refuerzo; b) Soldadura del refuerzo en parte inferior del horno; c) Soldadura en los refuerzos laterales.

Para el análisis de soldadura del ensamble eje-pletina se toma en cuenta que este ensamble debido al peso del horno y el torque suministrado para voltearlo se encuentra sometidos a una carga por cortante directo y una carga por torsión.

Calculando la fuerza unitaria resultante para eje de 30 mm y definiendo la categoría de la soldadura de acuerdo a la Ec. 3.30 [34].

$$F_R = \sqrt{(F_s^2 + F_t^2)} \quad (3.30)$$

La carga debida a cortante directo f_s se determina con la Ec. 3.31 [34]

$$f_s = \frac{V}{A_w} \quad (3.31)$$

donde:

V es el vector cortante máximo: $V = 2134.95 \text{ N}$, y

A_w es el factor de relación área/longitud.

$$A_w = \pi * d_{eje} = (\pi)(30 \text{ mm}) = 94.25 \text{ mm} = 0.09425 \text{ m}$$

Sustituyendo en la Ec. 3.31, queda:

$$f_s = \frac{2,134.95 \text{ N}}{0.09425 \text{ m}} = 22,651.99 = 22,652 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

La carga debido a torsión f_t se determina con la Ec. 3.32 [34].

$$f_t = \frac{T_{giro}c}{J_w} \quad (3.32)$$

donde:

T_{giro} es el torsor máximo: $T = 213.5 \text{ N}\cdot\text{m}$.

c es la distancia donde el punto de torque es máximo determinado con la Ec. 3.33.

J_w es el momento polar de inercia para el área transversal del eje.

$$c = \frac{d_{eje}}{2} \quad (3.33)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.33, para calcular la distancia del punto c .

$$c = \frac{d_{eje}}{2} = \frac{0.03 \text{ m}}{2} = 0.015 \text{ m}$$

Calculando momento polar de inercia de área con la Ec. 3.34 [34].

$$J_w = \frac{\pi * d_{eje}^3}{4} \quad (3.34)$$

$$J_w = \frac{\pi * d_{eje}^3}{4} = \frac{(\pi)(0.03)^3}{4} = 21.206 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Sustituyendo en la Ec. 3.32, queda:

$$f_t = \frac{Tc}{J_w} = \frac{(213.5 \text{ N.m})(0.015\text{m})}{21.206 \times 10^{-6} \text{m}^3} = 151,018.58 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Calculando la magnitud de la fuerza unitaria resultante F_R , sustituyendo en la Ec. 3.30.

$$F_R = \sqrt{(22652^2 + 151018.58^2)} = 152708 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 871.99 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}}$$

Sobre la base de las categorías de soldaduras definidas por el Instituto Americano de Construcción de Aceros (American Institute of Steel Construction, AISC), se utiliza la categoría F que otorga un límite de fatiga al cortante del metal soldado [34].

La dimensión de la garganta t_w y el tamaño de la pierna w en la soldadura se determinan por las ecuaciones 3.35 y 3.36 respectivamente [34].

$$t_w = \frac{F_R}{\tau_{\text{permisible}}} \quad (3.35)$$

$$w = 1.414 * t_w \quad (3.36)$$

Se procede a calcular el esfuerzo permisible de soldadura $\tau_{\text{permisible}}$ con la Ec. 3.37 [34].

$$\tau_{\text{permisible}} = \frac{S_{ers}}{N_{fr}} \quad (3.37)$$

donde:

S_{ers} es la resistencia en el límite de fatiga para un intervalo de esfuerzo cortante que para categoría F tiene un valor de 8000 psi.

N_{fr} es el factor de seguridad que se considera de 1.5.

$$\tau_{permissible} = \frac{S_{ers}}{N_{fr}} = \frac{8000 \text{ psi}}{1.5} = 5333 \text{ psi}$$

Sustituyendo en Ec. 3.35 y Ec. 3.36 la dimensión de la garganta y el tamaño de la pierna de la soldadura para un eje con diámetro de 30 mm es:

$$t_w = \frac{F_R}{\tau_{permissible}} = \frac{871.99}{5333} = 0.1635 \text{ pulg} = 4.15 \text{ mm}$$

$$w = 1.414 * t_w = (1.414)(0.1635) = 0.2312 \text{ pulg} = 5.87 \text{ mm}$$

Cálculo de dimensiones de soldadura para eje de 35 mm, la carga debida a cortante directo se determina con la Ec. 3.31, donde el cortante máximo tiene un valor de 2,134.95 N.

$$A_w = \pi * d_{eje} = (\pi)(35\text{mm}) = 109.96\text{mm} = 0.1099\text{m}$$

$$f_s = \frac{2134.95 \text{ N}}{0.1099 \text{ m}} = 19426.3 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

La carga debido a torsión f_t se determina con la Ec. 3.32, para un torque máximo de 213.5 N.m, la distancia donde el torque es máximo se determina con la Ec. 3.33, y el momento polar de inercia para el diámetro específico con la Ec. 3.34.

$$c = \frac{d_{eje}}{2} = \frac{0.035 \text{ m}}{2} = 0.0175 \text{ m}$$

$$J_w = \frac{\pi * d_{eje}^3}{4} = \frac{(\pi)(0.035)^3}{4} = 3.37 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$f_t = \frac{Tc}{J_w} = \frac{(213.5 \text{ N.m})(0.0175 \text{ m})}{3.37 \times 10^{-5} \text{ m}^3} = 110\,867.95 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

La magnitud de la fuerza unitaria resultante se determina con la Ec. 3.30.

$$F_R = \sqrt{(F_s^2 + F_t^2)} = \sqrt{(19426.3^2 + 110867.95^2)} = 112557.02 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 642.72 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}}$$

Sobre la base de las categorías de soldaduras definidas por el AISC, se utiliza la categoría F que otorga un límite de fatiga al cortante del metal soldado de 8,000 psi y considerando un factor de seguridad de 1.5 se calcula el esfuerzo permisible en la soldadura con la Ec. 3.37.

$$\tau_{permisible} = \frac{S_{ers}}{N_{fr}} = \frac{8,000 \text{ psi}}{1.5} = 5333 \text{ psi}$$

La dimensión de la garganta (t) y el tamaño de la pierna (w) de soldadura se calculan sustituyendo las ecuaciones 3.34 y 3.35.

$$t_w = \frac{F_R}{\tau_{permisible}} = \frac{642.72}{5333} = 0.12 \text{ pulg} = 3.05 \text{ mm}$$

$$w = 1.414 * t_w = (1.414)(0.12) = 0.17 \text{ pulg} = 4.31 \text{ mm}$$

Para el análisis de soldadura del ensamble soldado pletina carcasa se procede a realizar un análisis igual al anterior, calculando la dimensión de la

garganta con la Ec. 3.35 y el tamaño de la pierna con la Ec. 3.36 para el ensamble especificado en la Fig. 3.27 b y c. La carga debida a cortante directo se determina con la Ec. 3.31 en donde el cortante máximo tiene un valor de 2,134.95 N y se calcula el factor de relación área/longitud para un segmento rectangular con un ancho b de 100 mm y una altura d igual a 516.1 mm.

$$A_w = 2b + 2d = (2)(100\text{mm}) + (2)(516.1\text{mm}) = 1232.2\text{mm} = 1.2322\text{m}$$

$$f_s = \frac{2,134.95 \text{ N}}{1.2322 \text{ m}} = 1732.63 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

La carga debida a torsión f_t se calcula utilizando la Ec. 3.32 donde el torsor máximo es de 213.5 N.m y c es la distancia donde el torque es máximo calculado con la Ec. 3.33 y el momento polar de inercia con la Ec. 3.38 [34].

$$c = \frac{d}{2} = \frac{0.5161 \text{ m}}{2} = 0.25805\text{m}$$

$$J_w = \frac{(b + d)^3}{6} \tag{3.38}$$

donde:

- b es el ancho de la pletina.
- d es la altura de la pletina.

$$J_w = \frac{(b + d)^3}{6} = \frac{(0.100 + 0.5161)^3}{6} = 0.03898\text{m}^3$$

$$f_t = \frac{Tc}{J_w} = \frac{(213.5 \text{ N.m})(0.25805\text{m})}{0.03898\text{m}^3} = 1413.38 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Se procede a calcular la magnitud de la fuerza unitaria resultante sustituyendo la Ec. 3.30.

$$F_R = \sqrt{(F_s^2 + F_t^2)} = \sqrt{(1732.63^2 + 1413.38^2)} = 2235.99 \frac{N}{m} = 12.77 \frac{lb}{pulg}$$

Sobre la base de las categorías de soldaduras definidas por el AISC, se utiliza la categoría F que otorga un límite de fatiga al cortante del metal soldado de 8,000 psi y se considera un factor de seguridad de 1.5 y se calcula el esfuerzo permisible en la soldadura con la Ec. 3.37.

$$\tau_{permisible} = \frac{S_{ers}}{N_{fr}} = \frac{8,000 \text{ psi}}{1.5} = 5333 \text{ psi}$$

Se procede a obtener la dimensión de la garganta t de soldadura sustituyendo la Ec. 3.35 y el tamaño de la pierna con la Ec. 3.36.

$$t_w = \frac{F_R}{\tau_{permisible}} = \frac{12.77}{5,333} = 0.00239 \text{ pulg} = 0.061 \text{ mm}$$

$$w = 1.414 * t_w = (1.414)(0.00239) = 0.00339 \text{ pulg} = 0.086 \text{ mm}$$

Soldadura de pletina de refuerzo de la parte inferior el horno, la carga debida al cortante máximo directo se determina con la Ec. 3.31, en donde el cortante máximo es el peso del horno que es 4 269.9 N, y el factor de relación de área/longitud se calcula para un ancho de 100 mm y una altura de 675.78 mm de pletina.

$$A_w = 2b + 2d = (2)(100\text{mm}) + (2)(675.78\text{mm}) = 1551.56\text{mm} = 1.552\text{m}$$

$$f_s = \frac{4269.9 \text{ N}}{1.552 \text{ m}} = 2752 \frac{N}{m}$$

Se considera que existe un momento por flexión debido al peso puntual del horno, sólo el centro del refuerzo que produce una distribución de fuerzas en la pletina y que dichas cargas se transmite al extremo.

$$M = V * \frac{d}{2} = (4269.69 \text{ N}) \left(\frac{0.67578}{2} \right) = 1442.76 \text{ N.m}$$

Calculando el módulo de sección con la Ec. 3.39:

$$S_w = (b)(d) + \frac{d^2}{3} \quad (3.39)$$

$$S_w = (b)(d) + \frac{d^2}{3} = (0.1 * 0.67578) + \frac{(0.67578)^2}{3} = 0.2198 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, calculando la carga que se transmite a la pieza con la Ec. 3.40:

$$f_b = \frac{M}{S_w} \quad (3.40)$$

$$f_b = \frac{M}{S_w} = \frac{1442.76 \text{ N.m}}{0.2198 \text{ m}^2} = 6563.97 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Se procede a calcular la magnitud de la fuerza unitaria resultante sustituyendo la Ec. 3.30

$$F_R = \sqrt{(F_s^2 + F_t^2)} = \sqrt{(2752^2 + 6563.97^2)} = 7117.53 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 40.64 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}}$$

En base a las categorías de soldaduras definidas por el AISC, se utiliza la categoría F que otorga con un límite de fatiga cortante de metal soldado de 8 000

psi, considerando un factor de seguridad de 1.5 se calcula el esfuerzo permisible en la soldadura con la Ec. 3.37.

$$\tau_{permisible} = \frac{S_{ers}}{N_{fr}} = \frac{8000 \text{ psi}}{1.5} = 5333 \text{ psi}$$

Se procede a obtener la dimensión de la garganta (t) de soldadura sustituyendo en la Ec. 3.35 y el tamaño de la pierna (w) con la Ec. 3.36.

$$t_w = \frac{F_R}{\tau_{permisible}} = \frac{40.64}{5333} = 0.0076 \text{ pulg} = 0.019 \text{ mm}$$

$$w = 1.414 * t_w = (1.414)(0.0076) = 0.01077 \text{ pulg} = 0.2737 \text{ mm}$$

El código de soldadura estructural AWS D1.1 define tamaños mínimos de soldadura con base al espesor del material que se esté soldando, estos datos se pueden apreciar en la Tabla 3.7 [34].

Tabla 3.7. Tamaños mínimos de soldadura en filetes recomendados.

Espesor del metal base (T), mm	Tamaño mínimo de la pierna (w) en la soldadura, mm
T < 6	3
6 < T ≤ 12	5
12 < T ≤ 20	6
20 < T	8

Estos son los tamaños mínimos de soldadura en filetes recomendados.

✓ **Soldadura en estructura de basculación**

Se utilizará soldadura de metales por arco eléctrico la cual requiere una aplicación focalizada de calor suficiente para fundir el material base, mientras se agrega material de relleno compatible para unir las dos piezas. Para asegurar la fusión del metal en ambos lados de la junta se requiere una previa limpieza del material a unir y de esta manera obtener una buena soldadura.

El cálculo se realiza por el tipo de soldadura de filete que se define por la dimensión de la pierna, sin embargo, la resistencia de la soldadura está limitada por las dimensiones de la garganta [34].

El tipo de carga que recibiría la soldadura es en cierta forma estática, el material que se utilizará en la estructura está basado en ASTM A36, por lo tanto el electrodo más cercano a este tipo de material es el E7018 con una resistencia de tensión de 70 000 psi. La resistencia permisible para todas las soldaduras que serán realizadas con base 30% del valor se define en la Ec. 3.41 [34].

$$\tau_{permisible} = 0.30E_{xx} \quad (3.41)$$

Donde:

E_{xx} es resistencia de tensión del material del electrodo.

Sustituyendo en la Ec. 3.41, queda:

$$\tau_{permisible} = 0.30E_{xx} = 0.30(70) = 21 \text{ ksi}$$

✓ **Cálculo de soldadura en los puntos A₁, A₂, B₁ y B₂ (ver, Fig. 3.20)**

Se toma en cuenta que en estos puntos existe el mismo esfuerzo cortante en la unión por lo tanto el cálculo es igual para todos. Donde la carga cortante en los puntos es:

$$P_{cortante} = 1,067.5 \text{ N} \cong 239.98 \text{ lb}$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado por la Ec. 3.42 [34].

$$\tau_{xy} = \tau_{permisible} = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}} \quad (3.42)$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{239.98 \text{ lb}}{21,000 \text{ psi}} = 0.0114 \text{ pulg}^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo con la Ec. 3.43 [34].

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} \quad (3.43)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.43, queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0114 \text{ in}^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0019 \text{ pulg} \cong 0.048 \text{ mm}$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° con la Ec. 3.44 [34]-

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} \quad (3.44)$$

Sustituyendo en la Ec. 3.44, queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.048 \text{ mm}}{0.707} = 0.068 \text{ mm}$$

✓ **Cálculo de soldadura en el punto C₁**

La carga cortante en este punto es:

$$P_{cortante} = 1,876.19 \text{ N} \cong 421.78 \text{ lb}$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado por la Ec. 3.42:

$$\tau_{xy} = \tau_{permisible} = 21 \text{ kpsi} = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}}$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{421.78 \text{ lb}}{21,000 \text{ psi}} = 0.0201 \text{ pulg}^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo sustituyendo la Ec. 3.43 queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0201 \text{ pulg}^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0033 \text{ pulg} \cong 0.085 \text{ mm}$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° sustituyendo la Ec. 3.44 queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.085 \text{ mm}}{0.707} = 0.12 \text{ mm}$$

✓ **Cálculo de soldadura en el punto C₂**

La carga cortante en los puntos es:

$$P_{cortante} = 1,786.2 N \cong 401.55 lb$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado con la Ec. 3.42:

$$\tau_{xy} = \tau_{permisible} = 21 ksi = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}}$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{401.55 lb}{21,000 psi} = 0.0191 pulg^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo sustituyendo la Ec. 3.43 queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0191 pulg^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0032 pulg \cong 0.081 mm$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° sustituyendo la Ec. 3.44 queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.081 mm}{0.707} = 0.11 mm$$

✓ **Cálculo de soldadura en el punto D₁**

La carga cortante en los puntos es:

$$P_{cortante} = 1,808.59 N \cong 406.59 lb$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado con la Ec. 3.42:

$$\tau_{xy} = \tau_{permisible} = 21 \text{ kpsi} = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}}$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{406.59 lb}{21,000 psi} = 0.0194 \text{ pulg}^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo sustituyendo la Ec. 3.43 queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0194 \text{ in}^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0032 \text{ pulg} \cong 0.082 \text{ mm}$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° sustituyendo la Ec. 3.44 queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.082 \text{ mm}}{0.707} = 0.12 \text{ mm}$$

✓ Cálculo de soldadura en el punto D₂

La carga cortante en los puntos es:

$$P_{cortante} = 1,853.8 N \cong 416.75 lb$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado con la Ec. 3.42:

$$\tau_{xy} = \tau_{permisible} = 21 \text{ kpsi} = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}}$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{416.75 \text{ lb}}{21,000 \text{ psi}} = 0.0198 \text{ pulg}^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo sustituyendo la Ec. 3.43 queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0198 \text{ in}^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0033 \text{ pulg} \cong 0.084 \text{ mm}$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° sustituyendo la Ec. 3.44 queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.084 \text{ mm}}{0.707} = 0.12 \text{ mm}$$

✓ Cálculo de soldadura en el punto E₁

La carga cortante en los puntos es:

$$P_{cortante} = 507.03 \text{ N} \cong 113.98 \text{ lb}$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado con la Ec. 3.42:

$$\tau_{xy} = \tau_{permissible} = 21 \text{ ksi} = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}}$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{113.98 \text{ lb}}{21,000 \text{ psi}} = 0.0054 \text{ pulg}^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo sustituyendo la Ec. 3.43 queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0054 \text{ in}^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0009 \text{ pulg} \cong 0.023 \text{ mm}$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° sustituyendo la Ec. 3.44 queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.023 \text{ mm}}{0.707} = 0.032 \text{ mm}$$

✓ Cálculo de soldadura en el punto E₂

La carga cortante en los puntos es:

$$P_{cortante} = 417.01 \text{ N} \cong 93.75 \text{ lb}$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado con la Ec. 3.42:

$$\tau_{xy} = \tau_{permisible} = 21 \text{ kpsi} = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}}$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{93.75 \text{ lb}}{21,000 \text{ psi}} = 0.0045 \text{ pulg}^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo sustituyendo la Ec. 3.43 queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0045 \text{ in}^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0007 \text{ pulg} \cong 0.019 \text{ mm}$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° sustituyendo la Ec. 3.44 queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.019 \text{ mm}}{0.707} = 0.027 \text{ mm}$$

✓ Cálculo de soldadura en el punto F₁

La carga cortante en los puntos es:

$$P_{cortante} = 484.64 \text{ N} \cong 108.95 \text{ lb}$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado con la Ec. 3.42:

$$\tau_{xy} = \tau_{permisible} = 21 \text{ kpsi} = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}}$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{108.95 \text{ lb}}{21,000 \text{ psi}} = 0.0052 \text{ pulg}^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo sustituyendo la Ec. 3.43 queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0052 \text{ pulg}^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0009 \text{ pulg} \cong 0.022 \text{ mm}$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° sustituyendo la Ec. 3.44 queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.022 \text{ mm}}{0.707} = 0.031 \text{ mm}$$

✓ Cálculo de soldadura en el punto F₂

La carga cortante en los puntos es:

$$P_{cortante} = 439.4 \text{ N} \cong 98.78 \text{ lb}$$

El área de cortante necesario en la garganta para limitar el esfuerzo es dado con la Ec. 3.42:

$$\tau_{xy} = \tau_{permisible} = 21 \text{ kpsi} = \frac{P_{cortante}}{A_{cortante}}$$

Despejando $A_{cortante}$ y sustituyendo el valor de la carga en la Ec. 3.42 queda:

$$A_{cortante} = \frac{98.78 \text{ lb}}{21,000 \text{ psi}} = 0.0047 \text{ pulg}^2$$

Determinando la dimensión de la garganta de las soldaduras en el contorno del tubo sustituyendo la Ec. 3.43 queda:

$$t_w = \frac{A_{cortante}}{L} = \frac{0.0047 \text{ in}^2}{2(2) + 2(1)} = 0.0008 \text{ pulg} \cong 0.020 \text{ mm}$$

Calculando el tamaño de la garganta en la soldadura aplicando un ángulo de 45° sustituyendo la Ec. 3.44 queda:

$$w_{45} = \frac{t_w}{\cos 45} = \frac{0.020 \text{ mm}}{0.707} = 0.028 \text{ mm}$$

Según los cálculos de soldadura las dimensiones de garganta y pierna son menores a los mínimos establecidos de tablas para espesores menores a 6 mm, por lo que el tamaño de la pierna en todas las soldaduras se incrementa a 3 mm, siendo este el mínimo necesario para establecer una buena unión en las partes de la estructura [34].

4. ANÁLISIS DE COSTOS Y TÉCNICO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO

En este capítulo se realiza un análisis de los costos de todos los recursos involucrados para la construir de un horno de fundición basculante. Para realizar el análisis fue preciso cotizar los precios de todos los componentes que se utilizarán en la construcción del horno. Las cotizaciones se obtuvieron de la forma más precisa posible. En la parte técnica se presentarán las indicaciones necesarias para la fabricación y construcción del horno basculante de fundición.

4.1. INDICACIONES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL HORNO DE CRISOL BASCULANTE

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

A continuación, se describe el proceso para la etapa constructiva del horno de crisol basculante.

4.1.1. ELABORACIÓN DE MOLDES

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

Para el proceso de construcción de los moldes se debe [29]:

- 1) Utilizar lámina de 1/16 pulg de hierro negro para proporcionar mayor rigidez a los moldes ya que el concreto una vez vaciado ejerce presión en las paredes del molde o estructura provocando deformaciones.

También, se deben colocar crucetas en el interior del molde elaborado para el lado interior de la pared del horno para contrarrestar la deformación que se podría producir y a la misma vez moldear los soportes que sostendrán el crisol para mantener la uniformidad en el vaciado del concreto refractario, tomando en cuenta que en uno de los soportes se dejará un canal que ayudará al vaciado de la colada.

- 2) Se debe considerar en el molde la perforación de los orificios para colocación de los quemadores.
- 3) Se debe colocar una malla en el interior del molde, de tal forma que una vez fraguado el concreto refractario esta quede incrustada como alma de la pieza proporcionándole una mayor resistencia. La malla debe ser fina para que al dilatarse dentro del refractario por el calentamiento del mismo en operación no provoque fisuras reduciendo la vida útil del horno.
- 4) Elaborar molde para tapa del horno. En la elaboración de este molde se debe considerar también la colocación de malla para proporcionarle una mayor resistencia a la pieza.
- 5) Elaborar molde para la base del horno y base de crisol. En este caso se realizará un molde similar al de la tapa del horno. Además, se tiene que elaborar un cilindro para base o soporte del crisol, de altura de tal forma que éste acople perfectamente en el diámetro interior de la base, las medidas se encuentran especificadas en los planos.

Una vez se elaboren todos los moldes de las piezas del horno se procede a la etapa de vaciado y fraguado [29].

4.1.2. VACIADO Y FRAGUADO DEL CONCRETO REFRACTARIO

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

Materiales y herramientas necesarios [29]:

- Un recipiente plástico lo suficientemente grande para preparación de la mezcla,
- Un recipiente para medir la cantidad de agua requerida,
- Pala para mezclar,
- Cuchara de albañil,
- Cucharón para verter mezcla en los moldes,
- Apisonador para mezcla,
- Grasa para los moldes,
- Cinta adhesiva para sellar cualquier imperfección en los bordes de los moldes evitando fuga de agua o mezcla, y
- Tijeras para cortar malla.

Sellado y engrasado de moldes. Como primer paso se debe sellar los moldes con cinta para evitar fugas de agua o mezcla y que de esta forma queden imperfecciones en la pieza Posteriormente, se debe colocar una capa de grasa para facilitar la extracción de la pieza durante el desmoldeo [29].

Preparación de mezcla de concreto refractario. Una vez engrasados los moldes se debe proceder a la preparación de la mezcla para verterla en los moldes.

Es de carácter importante la correcta información del uso adecuado del concreto refractario con la correspondiente ficha técnica de este, logrando de esta manera el rendimiento más acertado y evitar que se deteriore en la operación durante su uso y cuando se halle trabajando [35].

Los concretos refractarios se suministran secos y se requiere solamente mezclarlos con agua potable y fría para ser vaciados como un concreto común en moldes [32].

Antes de agregar el agua es necesario mezclar el contenido total de la bolsa aun cuando sólo de vaya a emplear una parte del mismo, con el objeto de prevenir cualquier segregación durante el almacenamiento o transporte [35].

Una vez homogenizada y definida la cantidad de concreto a utilizar se procede a mezclarlo en seco, ya sea a mano o en mezcladora mecánica, luego se adiciona la cantidad indicada de agua y se continua la mezcla durante ~5 a 10 minutos [35].

La consistencia del concreto debe permitir la formación de una bola que al ser lanzado al aire no se desintegre ni se deslice en la mano [35].

Si se agrega exceso de agua los granos gruesos se decantan y las partículas finas se segregan, dando como resultado una disminución de las propiedades mecánicas y de la densidad, y un aumento de porosidad [35].

En caso contrario, si la adición de agua no es suficiente, las reacciones de hidratación son incompletas y no se logra fluidez, consistencia y compactación apropiadas, y consecuentemente se afectan las características físicas mecánicas del mortero así formado [35].

Luego de mezclarlo el concreto se debe vaciar inmediatamente en moldes. Los moldes pueden ser fabricados de madera o metal, en este caso serán de metal. En los moldes metálicos se recomienda primero eliminar completamente el óxido y las suciedades y lubricar con aceite liviano o grasa para facilitar el desmoldado [35].

Se recomienda la vibración manual para densificar el concreto, obteniéndose así mayor resistencia mecánica y menor porosidad [35].

El secado del elemento se recomienda realizarlo en forma gradual, si por alguna razón no se puede seguir la curva de secado se debe garantizar la permanencia del elemento a 120 °C durante 24 h recibiendo calor indirectamente.

El secado se debe controlar un mínimo de 24 h, remojando el concreto y los moldes dos veces al día para conservar la humedad [35].

El desmoldeo se puede realizar mediante disco de corte teniendo el cuidado de dañar lo menos posible la pieza [29].

En la reparación después del desmoldeo se debe proceder a resanar las piezas de las posibles imperfecciones que pueden haber quedado en la superficie y las provocadas en el proceso de desmoldeo [29].

Para el proceso de resanado se debe preparar una mezcla de concreto refractario previamente colado para que sea más fino, se aplica a las piezas y se finaliza con una esponja para obtener un mejor acabado superficial [29].

Se debe cortar la manta cerámica a partir del tamaño indicado en los planos se deben cortar dos pedazos rectangulares de tal forma que puedan recubrir al cuerpo del horno.

4.1.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS CARCASAS METÁLICAS PARA EL CUERPO, BASE Y TAPA DEL HORNO

A partir de la dimensión total de la chapa metálica se deben realizar 3 procesos de corte con plasma o con disco de corte de forma rectangular para las carcasas del cuerpo, tapa y base del horno, y 2 procesos de corte con plasma o con disco de corte de forma circular para los discos que completan la tapa y base del horno.

La chapa metálica cortada en forma rectangular se debe rolar para darle forma cilíndrica, en este caso se puede realizar mediante forjado utilizando un anillo guía y se deben unir temporalmente por puntos de soldadura para mantener su forma cilíndrica, esto hasta que posteriormente se unan con un correcto cordón de soldadura mediante un proceso de soldadura a tope en el cual se puede utilizar electrodo E7018 debido a los pequeños espesores de la carcasa metálica del cuerpo, tapa y base del horno.

Luego se tiene que cortar las platinas ya sea corte con plasma o con sierra mecánica, ambas existente en el taller de mecánica, esto con el fin de obtener las pletinas requeridas con las dimensiones preestablecidas, una de estas pletinas se debe rolar para darle la forma cilíndrica, se puede forjar utilizando un anillo guía. Para las pletinas que se soldarán en forma de L, se debe utilizar un

electrodo de alta penetración realizando una soldadura de filete horizontal, siempre teniendo en cuenta de utilizar los equipos de protección y la máquina de soldar existentes en el taller metal mecánica de esta escuela.

Al tener todas las pletinas listas se deben realizar soldaduras de filete con electrodo de alta penetración en la carcasa del cuerpo en la forma indicada en los planos, estas servirán de apoyo a la carcasa por el peso que ejerce el horno y a la vez evitar deformaciones. Los ejes de apoyo se deben soldar a la pletina con las indicaciones correspondientes en los planos.

Con las piezas finalizadas se deberá proceder a ensamblar primero las piezas refractarias para luego ser colocadas en la carcasa del horno, primero se introduce el cilindro de refractario que servirá como base del crisol en el orificio interior de la base del horno. Una vez colocada la base del horno, la base del crisol y las paredes del horno se tiene la estructura principal. Con la estructura principal dentro de la carcasa se debe proceder a la colocación de la fibra cerámica. Se debe tomar en cuenta que las boquillas de los quemadores deben estar instaladas para no cerrar con fibra los orificios de los quemadores.

Sobre esta estructura final se deben colocar la tapa refractaria. De igual forma que las paredes se debe colocar una capa base de concreto refractario en el borde superior de las paredes para evitar movimiento en las piezas, dar rigidez a la estructura y acople perfecto, la cubierta o tapa del horno se rellana con fibra. Por último, se procede a pintar el horno con pintura para alta temperatura y colocación de la estructura sobre la base del horno.

4.1.4. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA BASCULANTE

Para la bancada se utilizará tubo estructural de 1x2 pulg chapa 14 de la cual se procederá a cortar los perfiles que se necesitan para la estructura, estos perfiles con los ángulos de 45, 60 y 75° se encuentran a detalle en los planos del horno y posteriormente se soldaran.

En el caso de los cojinetes deslizantes se maquinarán en un torno y las chavetas rectangulares se realizará en una fresadora y se procederá hacer el redondeado mediante el uso de esmeril eléctrico en ambos apoyos se utilizará varilla sólida acero SAE 1020 estos se podrán maquinar en el taller metal mecánica de la escuela de ingeniería mecánica con los diámetros establecidos en los planos.

En el caso del timón se utilizará caño galvanizado que se le dará forma redonda mediante forjado con anillo guía y se procederá a soldar para que mantenga su forma.

Para los rodillos metálicos se pondrán con pernos en las esquinas de la base de la estructura de basculación.

4.1.5. MONTAJE DEL HORNO DE CRISOL BASCULANTE

Mediante un teclé se levanta el horno y se instalarán los elementos en el eje 1 apoyo A que será el cojinete 1 y en el eje 1 apoyo B de forma secuencial el cojinete 2, el engrane y el cojinete 3 y posteriormente se colocará sobre la estructura de basculación apretando los pernos de los cojinetes. Los elementos del eje 2 se podrán armar por separado y luego se colocarán sobre la estructura de basculación teniendo en cuenta que el piñón debe de coincidir con el engrane del eje 1 y así apretar los pernos de cojinete 4 y 5, por último, se colocará el timón con su respectiva chaveta que ayudara a la basculación del horno.

En el caso del montaje de los quemadores, la empresa que los vende realiza una visita técnica y hacen la respectiva instalación sin costo alguno, esto con el fin de contar con la garantía de fábrica, esto sería antes del montaje del crisol y el sistema de transmisión.

4.2. COSTOS DEL PROYECTO

En la Tabla 4.1 en la cual se presentan las especificaciones de las piezas que conformarán el horno de fundición basculante, con su correspondiente costo de fabricación.

Es imperante que se consideren todas y cada una de las partes que componen el horno, ya que así se puede establecer un valor total más exacto del costo que pueda tener la construcción completa del mismo, desde sus elementos de transmisión, pasando por aquellos puramente mecánicas, hasta llegar a lo más básico, es decir soportes, estructuras, entre otros elementos.

Se dividirán en tablas los costos de materiales de fabricación y los costos de mano de obra, estas clasificadas de acuerdo con elementos y dependiendo de su naturaleza de acción, para este horno, se tendrán los elementos mecánicos de transmisión y estructurales.

Los costos de materiales para la fabricación de los elementos de la máquina se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Costos de materiales para la fabricación de los elementos del horno.

Elemento		Costo unitario, \$	Cantidad	Costo total, \$
Paredes del Horno	Rollo de fibra cerámica 1 x 24 x 300 pulg 6 PFC	42.94	1	42.94
	Rollo de fibra cerámica 1/2 x 24 x 300 pulg 4 PFC	37.29	1	37.29
	Concreto refractario mizzou 55 lb	83.56	7	584.92
	Lámina de hierro negro 2x1 m de 3 mm (1/8 pulg)	70.00	2	140.00
	Spray a temp BBQ NG 1200 F	4.95	5	24.75
	Pletina 2 pulg x 1/8 pulg de 6 m	8.00	1	8.00
	Grasa para el desmolde	3.00	1	3.00
Disco de corte de 9 pulg.	3.95	1	3.95	

Continúa.

Continuación.- Tabla 4.1. Costos de materiales para la fabricación de los elementos del horno.

Elemento		Costo unitario, \$	Cantidad	Costo total, \$
Crisol	Crisol #6 Capacidad 8 kg	163.61	1	163.61
Estructura del horno	Tubo estructural rectangular 2 pulg x 1 pulg chapa 14 (1.80 mm) de 6 m.	20.90	2	41.80
	Caño galvanizado mediano 1/2 pulg con rosca de 6 m	13.50	1	13.50
	Hierro plano 1/8x2 pulg (3.17 mm) de 6 m	9.03	1	9.03
	Rodo 3 pulg metal móvil S/F 113 kg	6.50	4	26.00
	Electrodos E6013	2.00	5	10
	Pernos	1.00	10	10
Quemadores	Quemador industrial / Gas Brenner Capacidad 175000 BTU/h Modelo GB GLP175 Marca TPI-TECH	674.99	2	1349.98
	Tren de gas externo para quemador GB175	528.94	2	1057.88
Sistema de transmisión	Eje 1 apoyo A diámetro 28 mm y longitud 80 mm	15.00	1	15.00
	Eje 1 apoyo B diámetro 33 mm y longitud 180 mm	60.00	1	60.00
	Eje 2 diámetro 25 mm y longitud 250 mm	80.00	1	80.00
	Engrane 16 pulg.	1011.35	1	1011.35
	Piñón 4 pulg.	367.25	1	367.25
	Varilla sólida SAE 1020 para cojinete y chaveta 1 ¾ pulg. longitud 1.5 m	42.94	1	42.94
			Total	5103.19

En la Tabla 4.2 se presenta una estimación de los costos de mano de obra para la fabricación de los elementos principales del horno de crisol basculante, estos costos unitarios se calculan al obtener el tiempo del ciclo de trabajo para obtener la pieza multiplicado por el salario/hora del operario. Sin embargo, también se tiene que recurrir a la experiencia propia, pues se considera que el operario no mantiene un ritmo constante de producción, sino que se cansa hacia el final de cada turno y los tiempos muertos, y además se ha tenido en cuenta la

tolerancia de las piezas para que la máquina se pueda ajustar periódicamente por razón de desgaste de las herramientas o por el daño al herramental que sea preciso corregir.

Se considera un salario de \$800 mensuales para el operario a cargo de la fabricación de los elementos, considerando que trabaja de lunes a viernes y en una jornada de 8 h, el salario por hora correspondiente es de \$3.33. Se duplica el costo total de mano de obra porque se consideran dos operarios a cargo de la fabricación de los elementos mecánicos.

Tabla 4.2. Costos estimados de mano de obra para la fabricación de los elementos principales del horno de crisol basculante.

Elemento		Tiempo de operación, h	C/U, \$	Cant.	C/T, \$
Horno de crisol basculante	Charla técnica sobre los procedimientos a realizar en el proceso de la fabricación del horno de crisol basculante, dar instrucciones, especificar operaciones y recursos, especificar la forma en que se realizara la fabricación de las piezas y las medidas de higiene y seguridad industrial a tomar en cuenta en el taller, conocer las máquinas que se van a utilizar durante la fabricación y el debido análisis de los planos de diseño para solventar cualquier duda que se pueda tener.	8	25.04	1	25.04
Moldes	Medición y corte de lámina metálica	2	6.26	1	6.26
	Forjar el cilindro del cuerpo, base y tapa del horno	2	6.26	1	6.26
	Soldadura de los moldes y la cruceta en el cuerpo del horno	3	9.39	1	9.39
	Limpieza de moldes de impurezas como óxidos	1	3.13	1	3.13
Paredes del horno	Preparación de la mezcla de concreto refractario	0.33	1.04	7	7.30
	Limpieza y colocación de grasa en los moldes	0.33	1.04	1	1.04
	Vaciado del concreto refractario en los moldes	0.25	0.78	7	5.48

Continúa.

Continuación.- Tabla 4.2. Costos estimados de mano de obra para la fabricación de los elementos principales del horno de crisol basculante.

Elemento		Tiempo de operación, h	C/U, \$	Cant	C/T, \$
Carcasa metálica del horno	Medición y corte de lámina metálica	2	6.26	1	6.26
	Medición y corte de pletinas para carcasa metálica	1.61	5.04	1	5.04
	Forjar el cilindro del cuerpo, base, tapa del horno y pletina, agregando puntos de soldadura para mantención de forma	3	9.39	1	9.39
	Desmoldar y resanar piezas del concreto refractario	2	6.26	1	6.26
	Soldadura de la carcasa metálica del horno y pletinas	3	9.39	1	9.39
Paredes del horno	Ensamble de piezas refractarias y fibra cerámica	2	6.26	1	6.26
	Pintar el horno	2	6.26	1	6.26
Sistema basculante	Medición y corte de los perfiles con los ángulos determinados	2.5	7.83	1	7.83
	Soldadura de los perfiles del sistema basculante	4	12.52	1	12.52
	Ensamble de rodos de metal y pintura	1.5	4.70	1	4.70
Apoyos del sistema de transmisión	Medición y corte de la varilla sólida de acero SAE 1020 para cojinetes y chavetas	2	6.26	1	6.26
	Fabricación en torno de los cojinetes deslizantes	1	3.13	5	15.65
	Fabricación de chavetas	1	3.13	8	25.04
	Medición y corte de piezas para el timón	2	6.26	1	6.26
	Forjar las piezas del timón para proporcionarle la forma adecuada	2	6.26	1	6.26
	Soldadura de piezas para el timón	1	3.13	1	3.13
Ensamble del horno	Armado del tecele y levantamiento del horno crisol	1	3.13	1	3.13
	Ensamble de piezas del horno de crisol basculante	4	12.52	1	12.52
	Pruebas finales, ajustes o algún retraso no contemplado en el proceso de fabricación	11	34.43	1	34.43
Total					266.4

En la Tabla 4.3 se presenta los costos indirectos, estos incluyen el costo por el consumo mensual de electricidad (electricidad de las máquinas, de las lámparas, ventilador/extractor del taller, entre otras), también incluye la

depreciación de las máquinas, depreciación de las herramientas y otros gastos como papelería, herramientas menores, artículos de limpieza y seguridad.

Tabla 4.3. Costos indirectos estimados en la fabricación de los elementos del horno.

Elemento	Costo total, \$
Electricidad	80.00
Depreciación de las máquinas	120.00
Depreciación de las herramientas	50.00
Otros gastos	25.00
Total	275.00

Existen otros elementos que se consideran como extra y son parte en su mayoría del mantenimiento y herramientas de las máquinas a utilizar para el maquinado de las piezas, estos costos son parte del proceso de fabricación de piezas (ver, Tabla 4.4). Entre estos elementos se presentan en la Tabla 4.4

Tabla 4.4. Costo de mantenimiento y de herramientas implícitas en el proceso de fabricación del horno basculante.

Elemento	Costo Unitario, \$	Cantidad	Costo total, \$
Corte de la hoja de sierra marca ultra mayor 450 x 32 x 1.6 mm)	25.00	1	25.00
Aceite para introducir las piezas fabricadas y evitar corrosión de estas	25.00	1	25.00
Mantenimiento básico de fresadora	20.00	1	20.00
Mantenimiento básico de torno	20.00	1	20.00
Total			90.00

En el mantenimiento básico de fresadora y torno se encuentran los consumibles como buriles, en la Tabla 4.5 se presenta el resumen con los costos totales de fabricación, clasificados en materiales, costos de mano de obra y costos extra.

Tabla 4.5. Resumen de los costos de fabricación del horno basculante.

Tipos de costos	Costo total, \$
Costos de materiales	5103.19
Costos de mano de obra	532.80
Costos indirectos	275.00
Costos extras para fabricación de piezas	90.00
Costo total de la máquina	6000.99

El costo total para la fabricación de horno de fundición basculante es de \$6000.99 tomando en consideración tanto materiales, mano de obra, costos indirectos y gastos imprevistos.

Estos precios cotizados pueden variar debido a diferentes factores como: el constante cambio del precio del acero, la variación del precio de mano de obra ya sea en la contratación o en la fabricación de engranes y ejes, la estabilización de precios que se espera post pandemia, la demanda o existencia del producto.

CONCLUSIONES

Finalizado el presente trabajo de graduación sobre el diseño de un horno de fundición basculante para su uso didáctico se puede concluir lo siguiente:

- ✓ Toda la información recopilada mediante la investigación fue fundamental para comprender el funcionamiento y parámetro de diseños de los diferentes elementos que componen el horno de fundición y su estructura de basculación. Esta información y la combinación de conocimientos adquiridos de ingeniería mecánica permitió que el horno llegara a diseñarse tanto térmica como mecánicamente según la necesidad planteada para el proceso de enseñanza y fabricación de piezas del departamento de Materiales y Procesos de Fabricación de Ingeniería mecánica.
- ✓ La capacidad del horno se estableció en primera instancia al decidir fundir la cantidad de 8 kg considerando esta una cantidad adecuada para una práctica de laboratorio y en base a este criterio se seleccionó el crisol, a partir de las dimensiones de este y mediante cálculos se pudo establecer las dimensiones del horno y los requerimientos de calor.
- ✓ El horno se dimensiono acorde al crisol, con un espacio libre de 225 mm siendo el diámetro de la cámara interior de 390 mm y con un diámetro externo de 676 mm, los orificios de los quemadores se ubicaron en la parte inferior del horno por debajo del nivel del crisol para evitar que la flama incida directamente sobre él, para disponer del cobre fundido en el crisol según calculo necesita un calor total de 5730.5 kJ con un temperatura interna de 1200 °C y con un calor perdido total de 58.42 kW, operando el horno a temperatura máxima se necesita una fuente de energía que nos proporcione 308 006.84 Btu/h por lo cual se seleccionó 2 quemadores industriales para gas de 175 000.00 Btu/h. Para la basculación del horno se seleccionó un sistema de transmisión de 2 engranes rectos, 2 ejes y un timón acoplado a

uno de estos que posee una radio de 36 cm esto con el fin que una persona ejerciendo una fuerza de 15 kg pueda realizar el movimiento de basculación del horno. Realizados los cálculos pertinentes se procedió a seleccionar los materiales que cumplieran los requisitos de diseño para garantizar una larga vida útil del mismo.

- ✓ El costo total para la fabricación de un horno de fundición basculante para cobre de uso didáctico es de \$ 6,000.99 tomando en consideración materiales, mano de obra, costos indirectos, gastos imprevistos, y tiempos de fabricación. La rentabilidad del equipo no es medible económicamente ya que ha sido diseñado para uso didáctico sin fines de lucro, más bien se encuentra relacionado con el beneficio académico que se espera lograr al ser implementado dentro de los equipos disponibles del taller mecánico para las prácticas de laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Vargas Sepulveda, F. & Mora Peñaranda, J. R. (2012). *Implementar un horno de crisol basculante para el laboratorio de fundición de la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*. Tesis de grado. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Facultad de Ingenierías.
- [2] Hernández Beltrán, E. G. & Martínez Estrada, M. E. (2014). *Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición escultórica de bronce*. Trabajo de graduación. Universidad de El Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [3] Bone Maldonado, J. A. & Crespo Alvear, D. R. (2015) *Diseño y construcción de un horno basculante manual para la fundición de materiales no ferrosos de capacidad de hasta 150 kg para el laboratorio de ciencias de materiales de la Escuela Politécnica del Ejército*. Universidad de las Fuerzas Armadas. Departamento de ciencias de la energía y mecánica.
- [4] ASM committee. (1998). *ASM Handbook - Casting (Vol. 15)*. ASM International.
- [5] Capello, E. (1974). *Tecnología de la Fundición*. Barcelona - España: Gustavo Gili S.A.
- [6] Sydney H. Avner (1980) *Introducción a la metalurgia física*. Segunda edición. The McGraw-hill Companies Inc. México.
- [7] Correa Jaramillo P. G. & Robalino Gutiérrez S. I. (2007) *Construcción de un horno basculante a diésel para la fusión de 150 kg de cobre para la empresa "4G-metalurgia"*. Trabajo de Graduación. Escuela Politécnica Nacional. Escuela de formación tecnológica.
- [8] Wikipedia. (s.f.). *Combustión (en inglés)*. Recuperado el 22 de septiembre de 2013, de <http://en.wikipedia.org/wiki/Combustion>.
- [9] Universidad de Valladolid. (s.f.). *Cálculo relativo a la combustión*: [https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/375/51405/1/Documento 1.pdf](https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/375/51405/1/Documento%201.pdf).
- [10] Wikipedia. (s.f.). *Flame*. Recuperado el Septiembre de 2013, de Wikipedia the free encyclopedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Flame>.
- [11] Berry, W. M. (1921). *Design of Atmospheric Burners*. Washington, D.C.: Washington Government Printing Office.
- [12] Reil, R. (2011). *Hybridburners.com*. Recuperado el Abril de 2014: <http://www.hybridburners.com/Ron-Reil-foundry-notes.html>.
- [13] Reil, R. (Noviembre de 2007). *Forge and Burner Design*. Obtenido de <http://www.abana.org/ronreil/design1.shtml#Reil>.

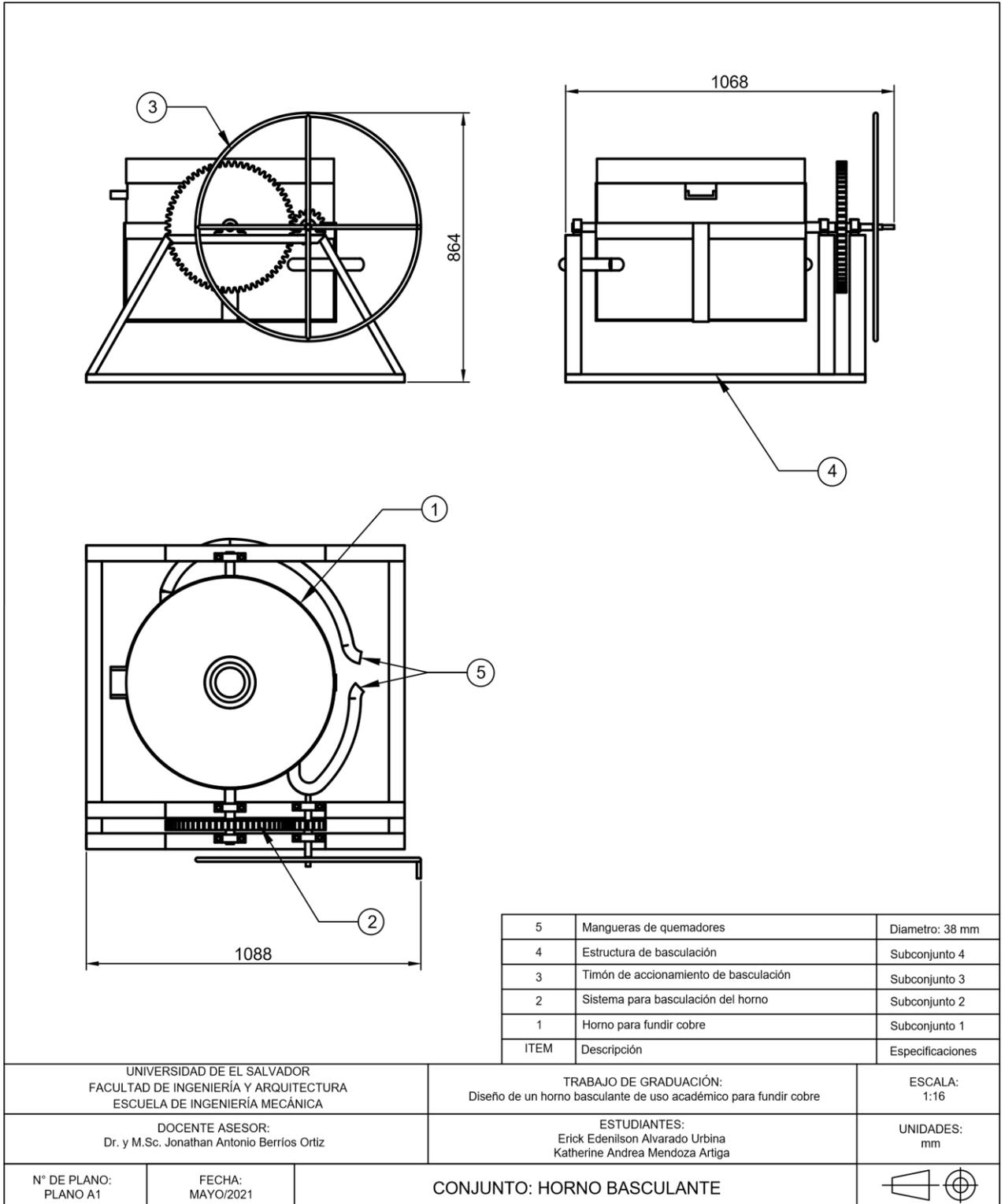
- [14] Metrogas. (2014). *Combustión*. Recuperado el Marzo de 2014: http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1.
- [15] A. Bhatia, B. E. (2011). Overview of Refractory Materials. Recuperado el Septiembre de 2013, de PDHonline - Course M158: http://www.mtec.or.th/images/users/78/FAQ_refractoryMetal/m158content.pdf
- [16] Wikipedia. (s.f.). Material Refractario. Recuperado el 18 de Septiembre de 2013, de Wikipedia the free encyclopedia: http://es.wikipedia.org/wiki/Material_refractario
- [17] Schalm, S. (2005). *Refractory Engineering* (Segunda edición ed.). Essen, Alemania: Vulkan-Verlag.
- [18] Chango Pilamunga B. O. (2014) *Estudio de hornos de fundición de cobre y sus aleaciones, para optimizar materia prima en el laboratorio de materiales de la carrera de ingeniería mecánica en la facultad de ingeniería civil y mecánica de la Universidad Técnica de Ambato*. Universidad Técnica de Ambato. Trabajo de Graduación. Facultad de ingeniería civil y mecánica.
- [19] Refractarios Arnabri S.A.C. (2014). Nuestros productos - Ladrillos refractarios. Recuperado el julio de 2014, de <http://www.refractariosarnabri.com/nuestros-productos#ladrillos>
- [20] United Nations Environment Program. (2006). *Furnaces and Refractories*. Recuperado en September de 2013, de Energy Efficiency Guide for Industry in Asia: www.energyefficiencyasia.org
- [21] Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar (2011) *Transferencia de calor y masa*. Cuarta edición. The McGraw-hill Companies Inc. México.
- [22] Gutiérrez Mena G. M. (2015). *Diseño y construcción de un horno de fundición de minerales auríferos*. Trabajo de Graduación. Unidad Técnica de Machala. Unidad académica de ciencias químicas y de la salud.
- [23] Finck, D. & Heumannskaemper, D. (4 de Junio de 2013). *Matching your crucible to your application*. Recuperado el 18 de Septiembre de 2013: Morgan Advanced Materials: http://www.morganmms.com/resources/technical-articles/matching-your-crucible-to-your-application/?page_index=1 Estados Unidos.
- [24] Heine, R. W., Loper, C. R., & Rosenthal, P. C. (1967). *Principles of Metal Casting*. Tokyo, Japón: McGraw-Hill, Inc.
- [25] Metalinsumos (2014). *Uso y cuidado de crisoles*. Recuperado el junio de 2014, de <http://www.metalinsumos.com/descarga/art3.pdf>
- [26] Refractarios Nacionales S.A. (2009). *Concretos Refractarios Proyectados*. Recuperado el 12 de Julio de 2014, de

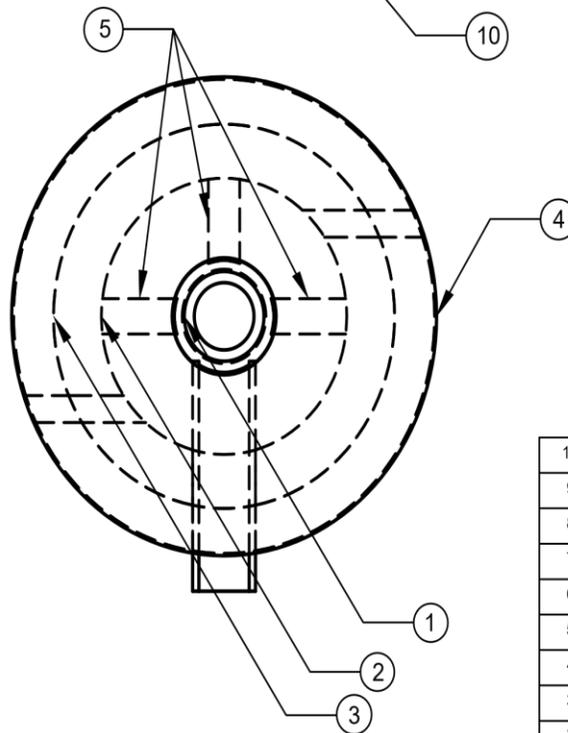
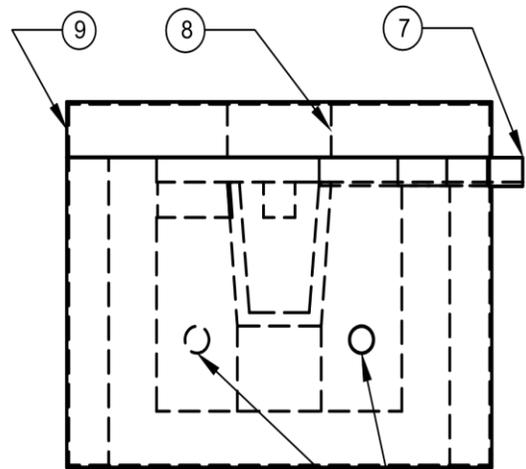
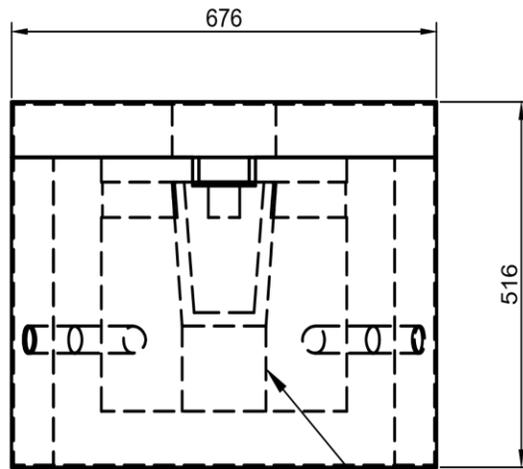
<http://www.byronruizg.com/airenic/Concretos%20Refractarios%20Proyectos.pdf>

- [27] J. J. Medina Cia. Ltda. (s.f.). *Recomendaciones para la instalación y secado de hormigones refractarios*. Recuperado el 12 de Julio de 2014: <http://jjmedina.com.ec/Instalacion%20de%20Hormigones%20Refractarios.pdf>
- [28] Morales, A. M. (Septiembre de 1965). *Revestimientos Refractarios Monolíticos para Calderas*. Recuperado el 12 de Julio de 2014: <http://boletines.secv.es/upload/196504495.pdf>
- [29] Flores García, E. Y. & Orellana Núñez, R.E. (Septiembre 2014) *Diseño y construcción de un horno crisol para aleaciones no ferrosas*. Universidad de El Salvador. Trabajo de graduación previo a la opción al grado de Ingeniero Mecánico. San Salvador, El Salvador.
- [30] Crucibles and their Furnaces. (Julio de 2012). Recuperado el Septiembre de 2013: *Metal Casting Theory and Design*: <http://me401metalcasting.files.wordpress.com/2012/07/401-crucible-furnaces.pdf>
- [31] Minnesota Technical Assistance Program. (2009). *Energy Efficiency Opportunities for Metal Casters*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2013: <http://www.mntap.umn.edu/metalcast/energy.htm>
- [32] Richard G. Budynas & J. Keith Nisbett (2012) *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley novena edición en español*. México. McGraw-Hill Interamericana editores S.A. de C.V.
- [33] Ferdinand P. Beer & E. Russell Johnston (1983) *Mecánica vectorial para ingenieros*. McGraw-Hill.
- [34] Robert L. Norton (2011) *Diseño de máquinas un enfoque integrado cuarta edición*. Pearson Educación. México.
- [35] Rosero Villareal B. G. (Marzo de 2006) *Diseño de un horno de crisol basculante para el laboratorio de fundición del departamento de materiales de la escuela politécnica nacional*. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico. Universidad Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.

ANEXOS

ANEXO A: PLANOS DE FABRICACIÓN

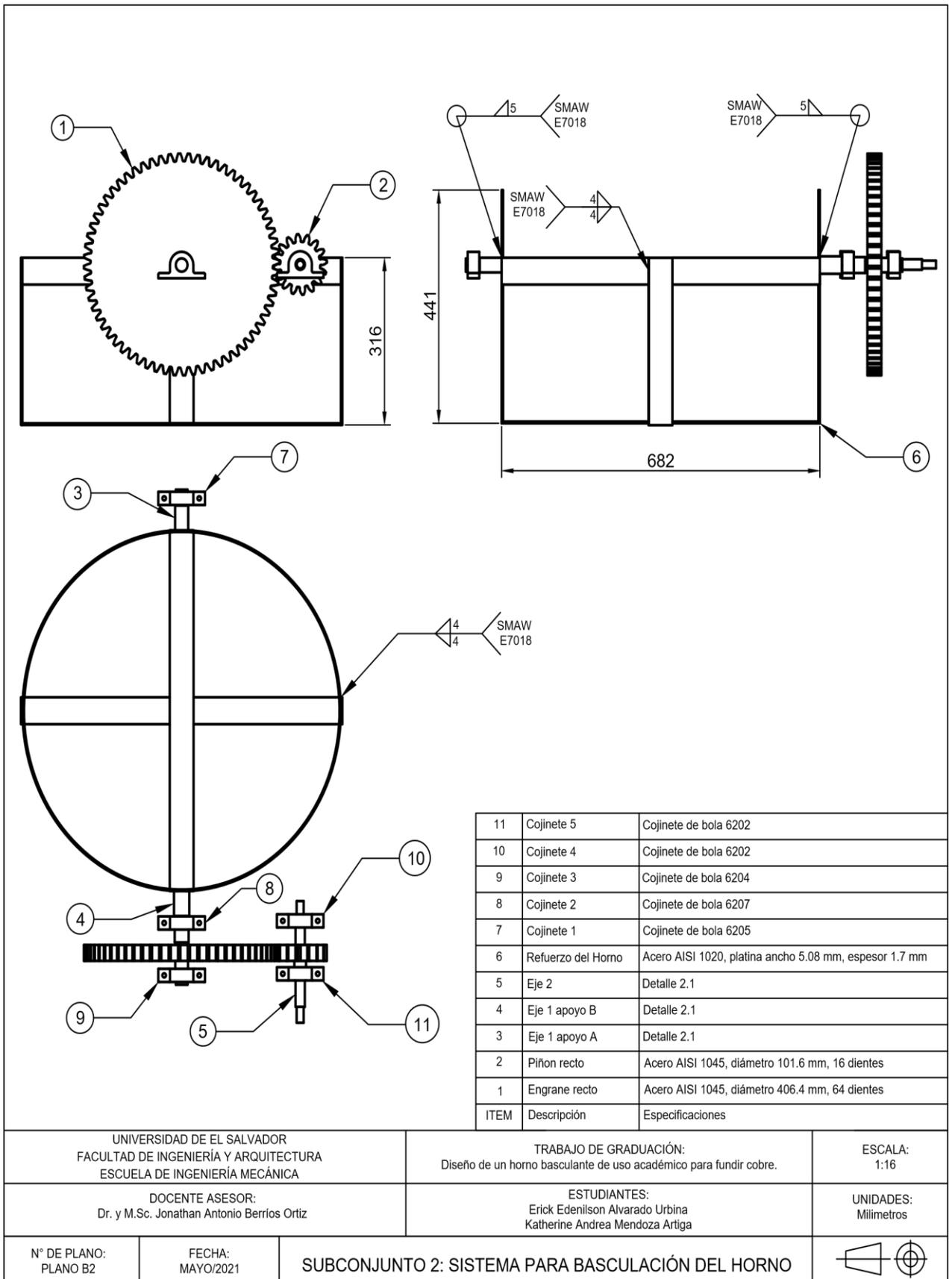




10	Pedestal	Detalle 1.1
9	Acero de tapadera	Detalle 1.5
8	Refractario de tapadera	Detalle 1.4
7	Vertedero	Refractario, espesor 5 mm, ancho 100 mm, alto 40 mm
6	Entrada quemadores	Agujeros de 38.1 mm de diámetro
5	Soportes del crisol	Detalle 1.1
4	Acero del horno	Detalle 1.3
3	Aislante	Detalle 1.2
2	Refractario del horno	Detalle 1.1
1	Crisol	Material refractario con capacidad de 8 kg
ITEM	Descripción	Especificaciones

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
Nº DE PLANO: PLANO B1	FECHA: MAYO/2021	SUBCONJUNTO 1: HORNO PARA FUNDIR COBRE	





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

DOCENTE ASESOR:
Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz

N° DE PLANO:
PLANO B2

FECHA:
MAYO/2021

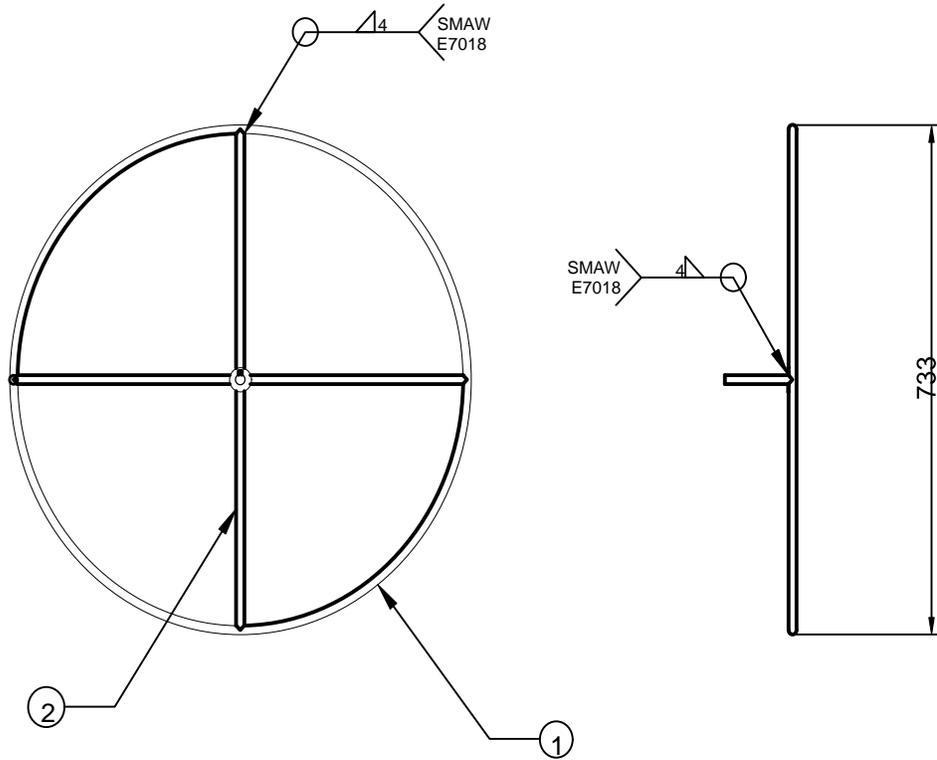
TRABAJO DE GRADUACIÓN:
Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.

ESTUDIANTES:
Erick Edenilson Alvarado Urbina
Katherine Andrea Mendoza Artiga

ESCALA:
1:16

UNIDADES:
Milímetros

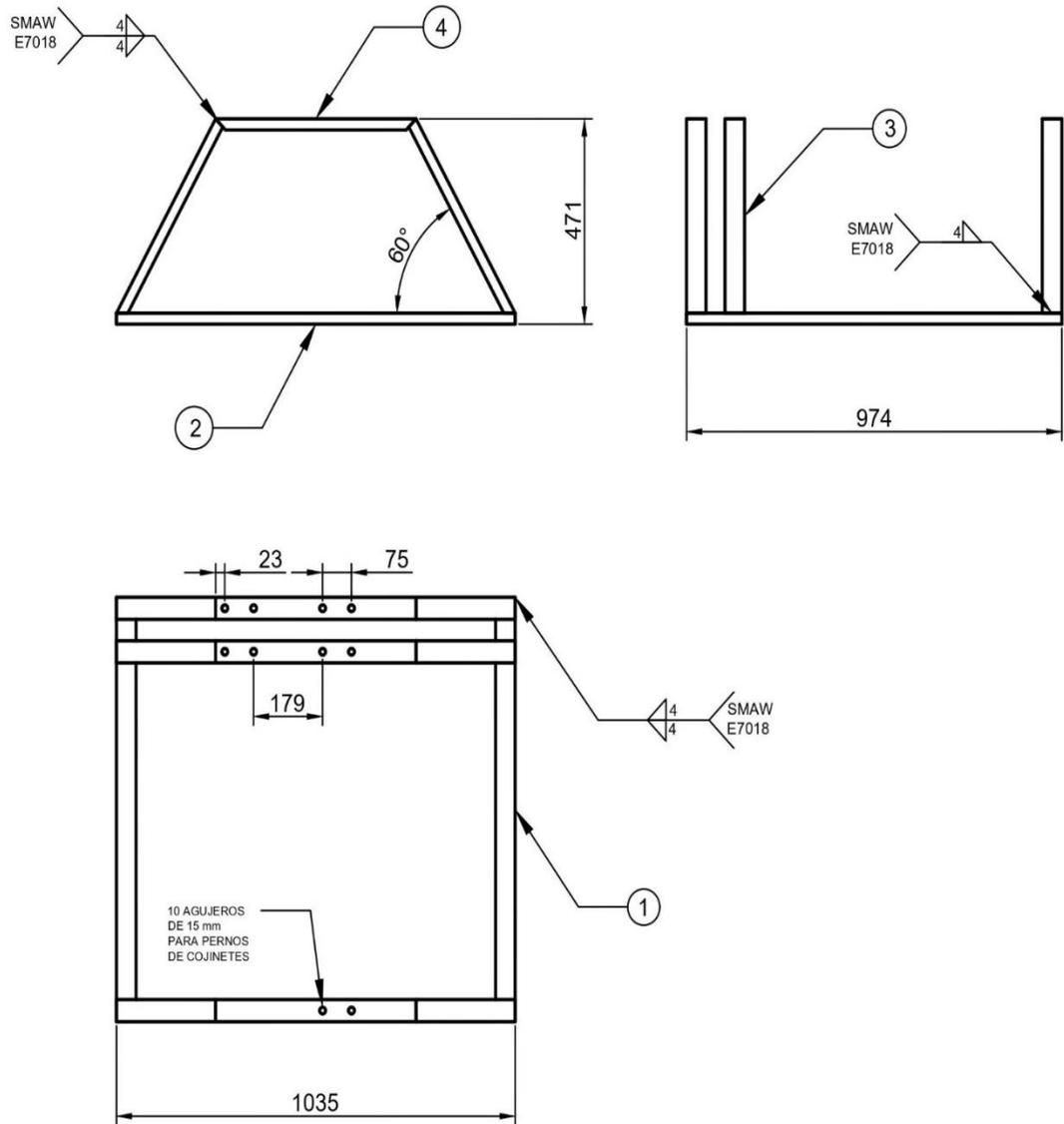




3	Manecilla	Detalle 3.1
2	Soportes de aro	Detalle 3.1
1	Aro	Detalle 3.1
ITEM	Descripcion	Especificaciones

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:10
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO B3	FECHA: MAYO/2021	SUBCONUNTO 3 : TIMÓN DE ACCIONAMIENTO	

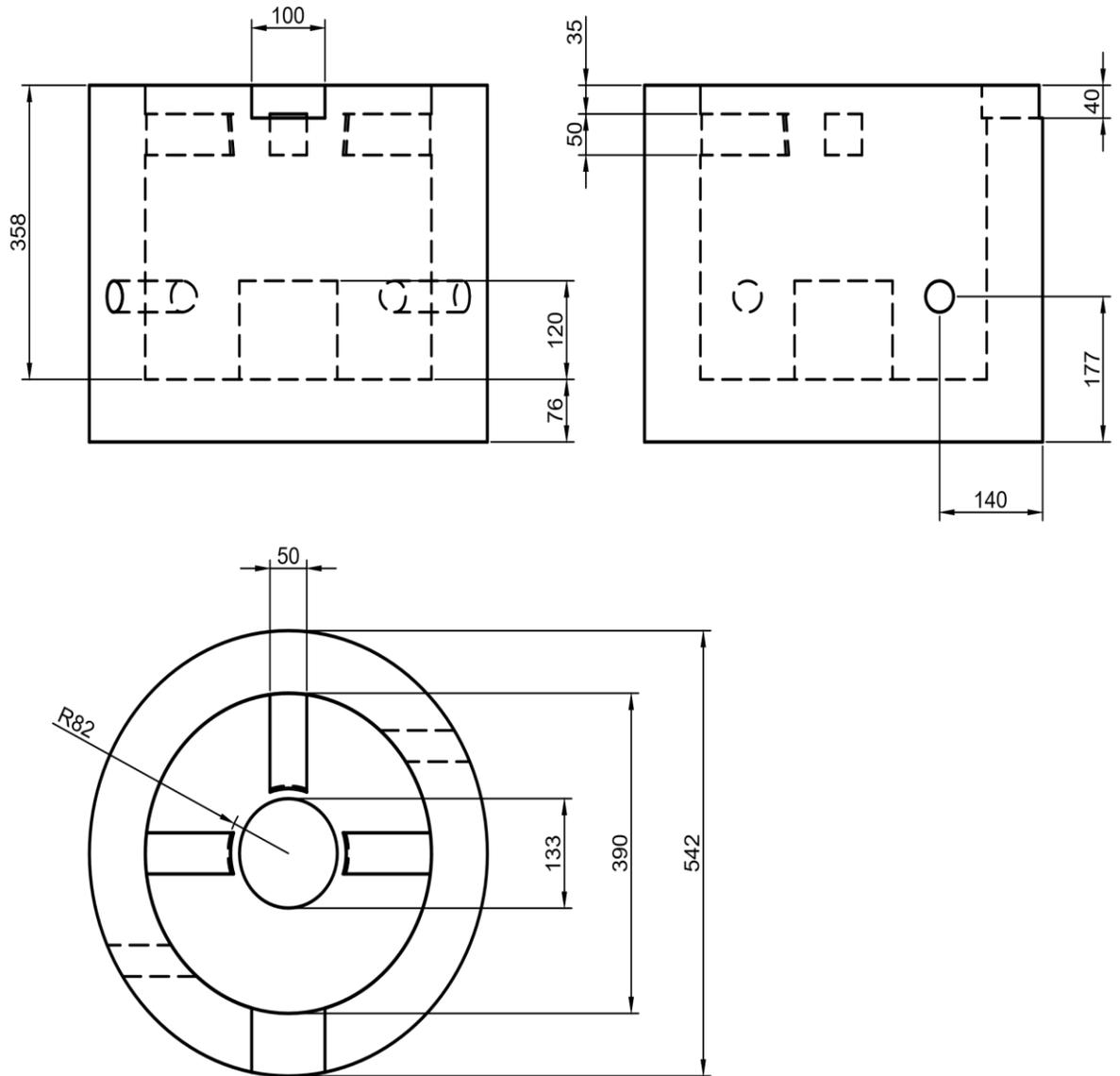




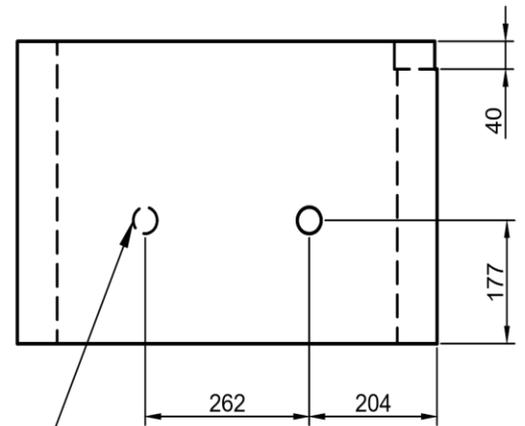
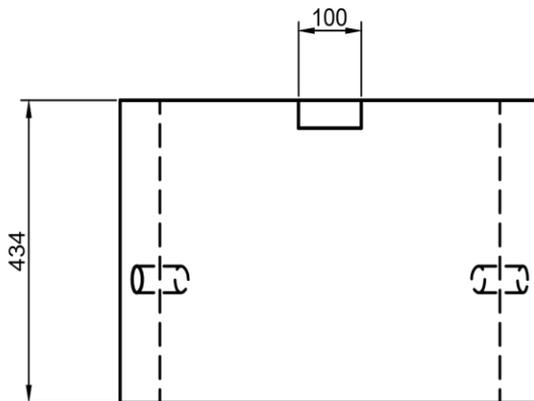
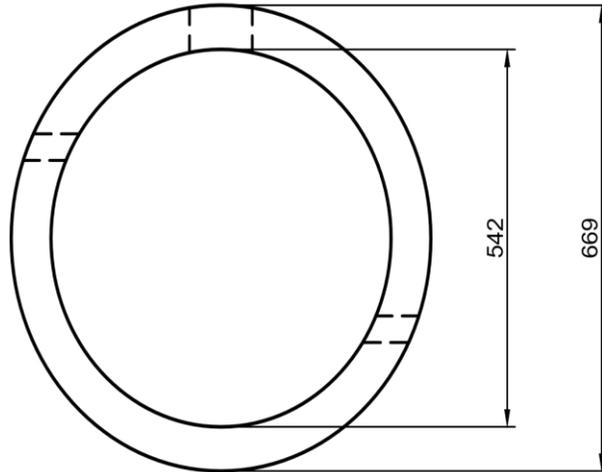
4	Soporte B	Detalle 4.1
3	Soporte A	Detalle 4.1
2	Base B	Detalle 4.1
1	Base A	Detalle 4.1
ITEM	Descripción	Especificaciones

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:16
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO B4	FECHA: MAYO/2021	SUBCONJUNTO 4 : ESTRUCTURA DE BASCULACIÓN	



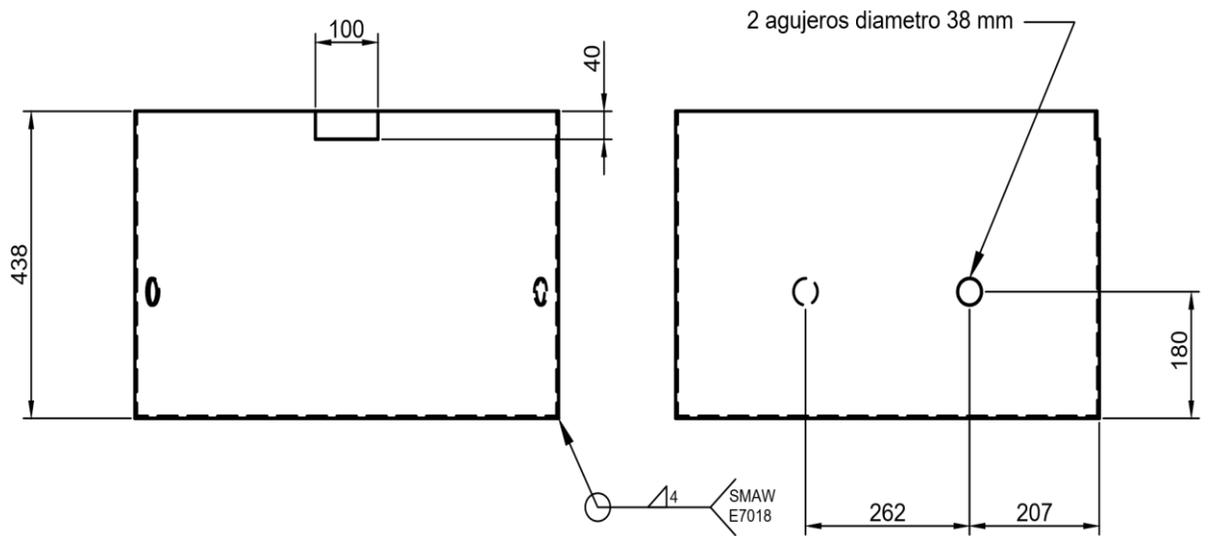
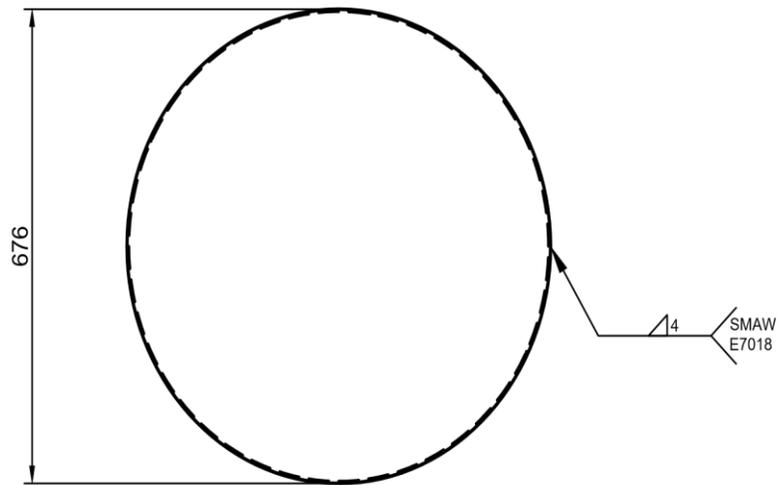


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:8
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: Plano C1	FECHA: MAYO/2021	DETALLE 1.1: REFRACTARIO DEL HORNO	

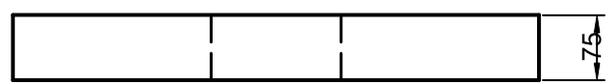
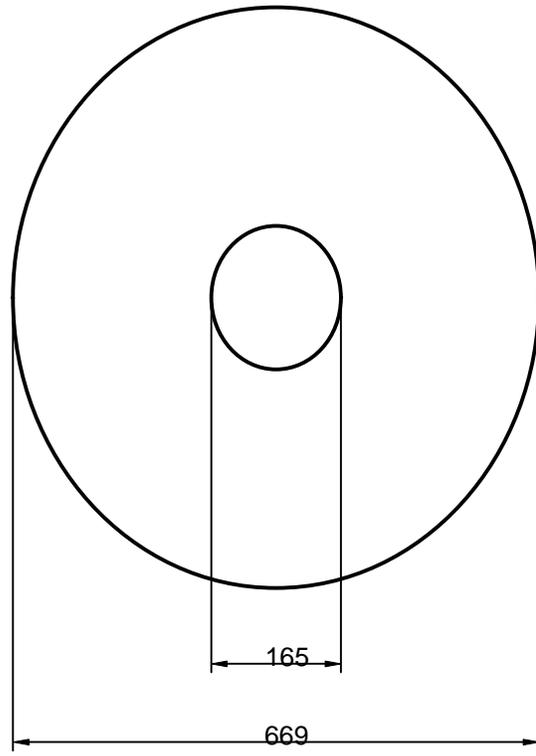


2 agujeros, diametro 38 mm

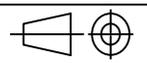
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:10
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO C2	FECHA: MAYO/2021	DETALLE 1.2: AISLANTE DEL HORNO	

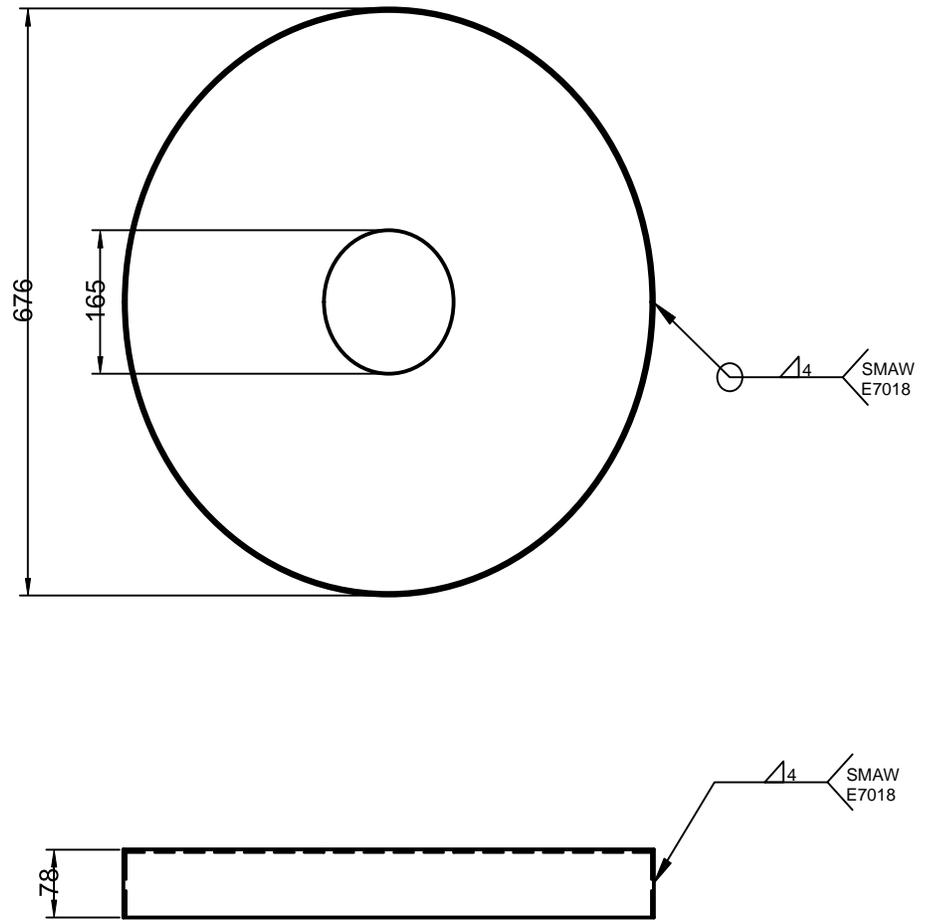


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:10
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO C3	FECHA: MAYO/2021	DETALLE 1.3 : ACERO DEL HORNO	



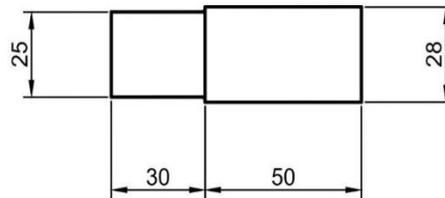
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:8
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO C4	FECHA: MAYO/2021	DETALLE 1.4 : REFRACTARIO DE LA TAPADERA	



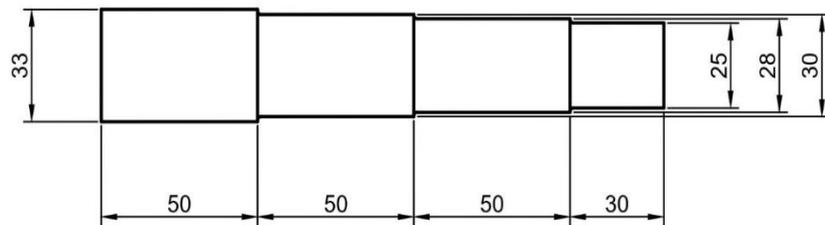


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:8
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO C5	FECHA: MAYO/2021	DETALLE 1.5 : ACERO EN LA TAPADERA	

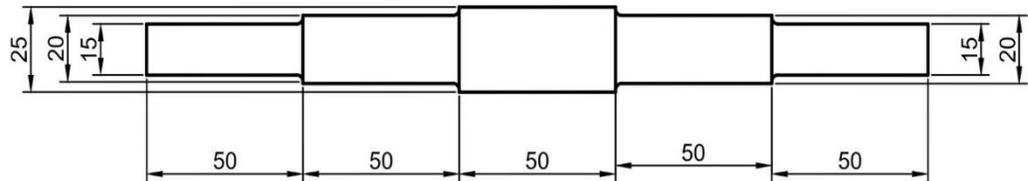
EJE 1 APOYO A



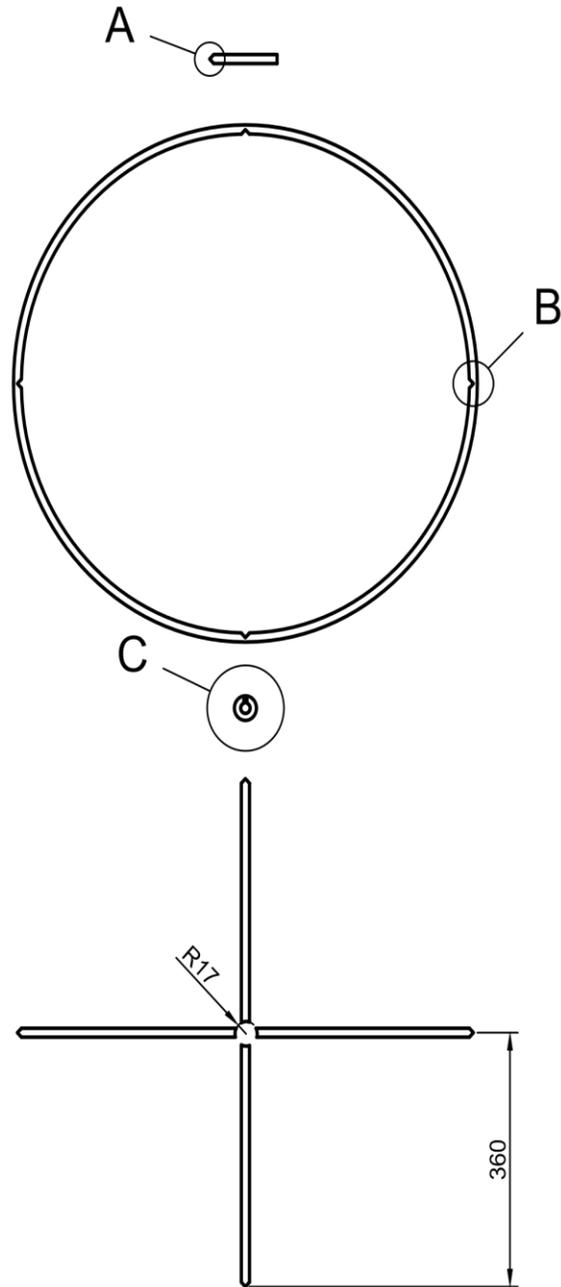
EJE 1 APOYO B



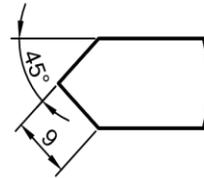
EJE 2



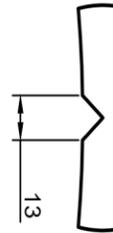
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:2
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO C6	FECHA: MAYO/2021	DETALLE 2.1 : EJES	



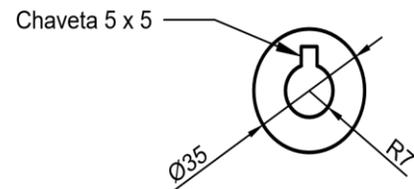
MANECILLA
DETALLE A (1:1)



ARO
DETALLE B (1:2)



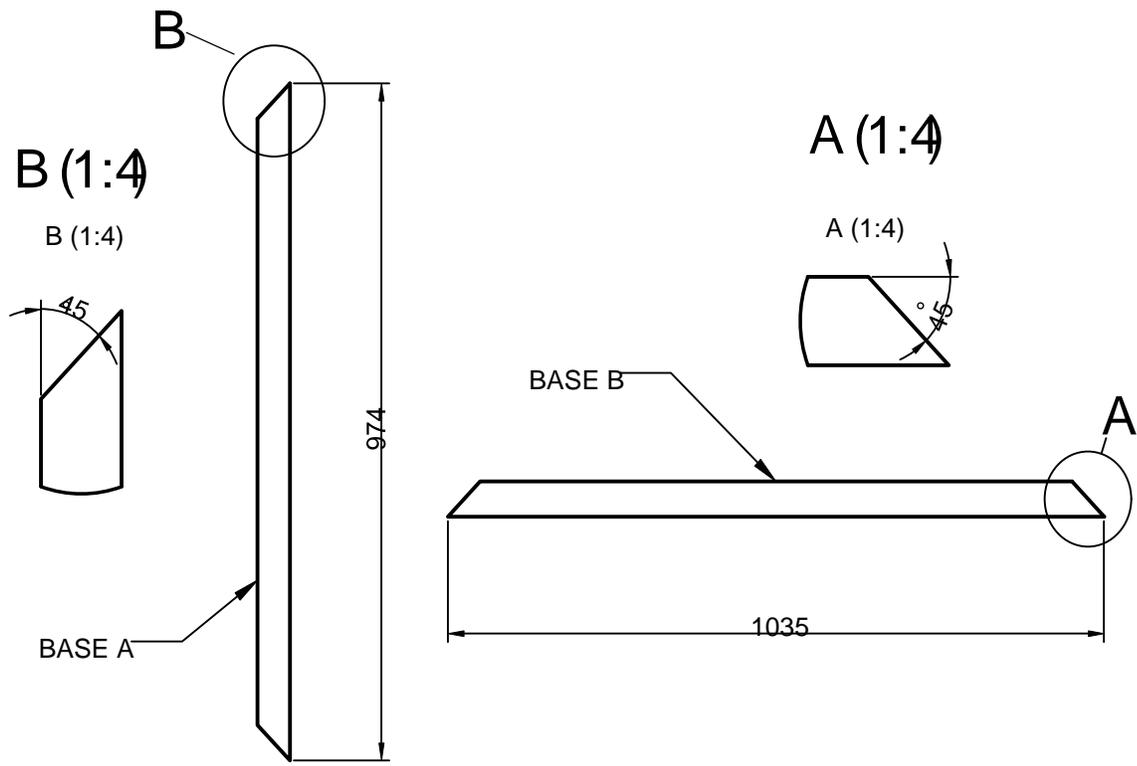
NUCLEO DE SOPORTES
DETALLE C (1:2)



Material	Tubo estructural redondo de 1/2"
Descripción	Especificaciones

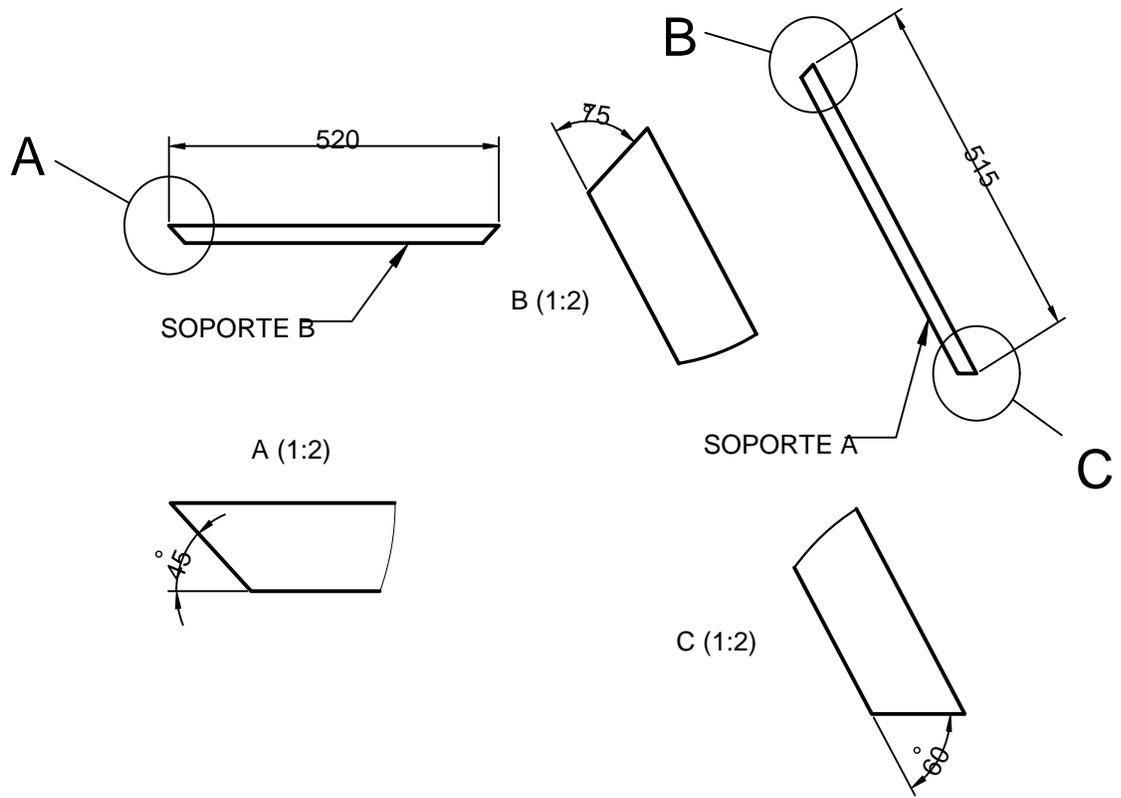
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:10
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berrios Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO C7	FECHA: MAYO/2021	DETALLE 3.1 : PARTES DEL TIMÓN DE ACCIONAMIENTO	





Base B	Tubo estructural 1 pulg x 2 pulg, chapa 14	2
Base A	Tubo estructural 1 pulg x 2 pulg, chapa 14	2
Descripción	Especificaciones	Cantidad

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:16
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO C8	FECHA: MAYO/2021	Detalle 4.1: PARTES DE ESTRUCTURA DE BASCULACIÓN	



SopORTE B	Tubo estructural 1 pulg x 2 pulg, chapa 14	3
SopORTE A	Tubo estructural 1 pulg x 2 pulg, chapa 14	6
Descripción	Especificaciones	Cantidad

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno basculante de uso académico para fundir cobre.	ESCALA: 1:16
DOCENTE DIRECTOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTES: Erick Edenilson Alvarado Urbina Katherine Andrea Mendoza Artiga	UNIDADES: Milímetros
N° DE PLANO: PLANO C9	FECHA: MAYO/2021	Detalle 4.2 : PARTES DE ESTRUCTURA DE BASCULACIÓN	

ANEXO B: COTIZACIONES

Cotización A.B.C1. Estructura y paredes del horno



ALMACENES VIDRI, S.A. DE C.V.
SUCURSAL : SOYAPANGO
 N.R.F. : 27 N.I.T. : 0210-191171-001-6
 GIRO : FERRETERIA
 DIRECCION : CALLE A TONACATEPEQUE Y C. CIUDADELA DON BOSCO,
 SOYAPANGO, SAN SALVADOR
 EMAIL : alvisa055@vidri.com.sv TELEFONO : 2292-3877

COTIZACION No. 551200015067



Fecha 1/2/2021 15:01:56
 Cliente KATHERIN MEDNDOZA NRF Cliente
 Direccion
 Atención a CONSUMIDOR FINAL CF
 Vendedor 0000555 - SOYAPANGO Validez Oferta
 Observaciones Condición de pago CONTADO

Código	Descripción	U.M.	Cantidad	Precio	Total
45375	TUBO ESTRUCTURAL RECTANGULAR 2"X1" CHAPA 14 (1.80MM)	PZA	2.00	\$18.490000	\$36.98
72659	CONCRETO REFRACTARIO MIZZOU 55LBS	BLS	7.00	\$73.950000	\$517.65
8171	LAMINA HIERRO NEGRO 2X1M DE 1/8" (3.00MM)	PLG	1.00	\$61.940000	\$61.94
3247	CAÑO GALVANIZADO MEDIANO 1/2" CON ROSCA	PZA	1.00	\$11.950000	\$11.95
7592	HIERRO PLANO 1/8X2" (3.17MM)	PZA	1.00	\$7.990000	\$7.99

Datos Adicionales:

Sub Total	\$636.51
IVA	\$0.00
TOTAL	\$636.51

Precios incluyen IVA
**** Precios sujetos a cambio sin previo aviso ****

 VENDEDOR

 AUTORIZADO

 ACEPTADO

Página 1/1

Consumidor Final

Cotización A.B.C2. Paredes del horno



DISTRIBUIDORA DE REPUESTOS INDUSTRIALES
TEL: (503) 2501-8900 Y FAX: (503) 2225-9938
Colonia Medica, Calle Guadalupe # 1329, San Salvador

RAZON SOCIAL: DISTRIBUIDORA DE REPUESTOS INDUSTRIALES, SA DE CV.
REGISTRO FISCAL: 446-4
NIT : 0614-250188-004-5
GIRO: VTA. DE OTROS PROD. NO CLASIFICADOS PREVIAMENTE.
CATEGORIA DE CONTRIB. : Mediano

PARA : ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA UES

FECHA: 02 DE FEBRERO DE 2021

ATTN.: SRTA. KATERINE MENDOZA

DE : FRANCISCO GALICIA

PEDIDO LOCAL :

Estimados Señores:

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

PEDIDO LOCAL	DESCRIPCION	TIEMPO DE ENTREGA	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
	ROLLO DE FIBRA CEERAMICA DE 1" X 24" X 300" 6 PCF	INMEDIATA	1	\$ 38.00	\$ 38.00
	ROLLO DE FIBRA CEERAMICA DE 1 1/2" X 24" X 300" 4 PCF	INMEDIATA	1	\$ 33.00	\$ 33.00
	ROLLO DE FIBRA CEERAMICA DE 1" X 24" X 300" 4 PCF	INMEDIATA	1	\$ 32.00	\$ 32.00
	ROLLO DE FIBRA CEERAMICA DE 2" X 24" X 300" 4 PCF	INMEDIATA	1	\$ 35.00	\$ 35.00
SUB-TOTAL					\$138.00
13%					\$17.94
TOTAL					\$155.94

CONDICIONES:

VALIDEZ DE LA OFERTA:	15 DIAS HABILES
PAGO:	CONTADO
ENTREGA:	DETALLADA EN OFERTA..

Francisco Galicia
DIDERI, S.A. DE C.V.
Tel: (503) 2226-2044 y 2501-8900
Email: servicioalcliente@diderisa.com



Cotización A.B.C3. Estructura

CREDULA:		COTIZACION No 0230830		Pag... 0001		
		EMISION 01/02/2021		Fecha 1/02/2021		
				Ped VxV: 000000		
		Señor(es): CAB860				
		ERIKA ALVARADO				
Tienda: BOULEVARD DEL EJERCITO NACIONAL, KM 3 Y 1/2, FRENTE HOSPITAL AMATEPEC						
Codigo	Descripcion	U/V	Cantidad	PVP	Total Articulo	
B011007	LAM HO 1/8 3.00MM 2X1	PZA	1.00	45.40	45.40	
B005016	TUBO EST REC 2X1" C14 1.8MM 6M	PZA	2.00	13.19	26.37	
B002081	CAÑO GAL LIVIANO 1/2" SR	PZA	1.00	7.21	7.21	
B009012	PLATINA 2"X1/8"	PZA	1.00	7.08	7.08	
B225022	SPRAY A TEMP BBQ NG 1200F	PZA	1.00	4.38	4.38	
B644010	RODO 3" METAL MÓVIL S/F 113KG	PZA	4.00	5.75	23.01	
					S/IVA.	
OBSERVACIONES:						
VALIDAR EXISTENCIA						
Cotización valida solo en la Ciudad donde se emitió. "Precio NO incluye IVA"						
Elaborar el cheque certificado a nombre de FERRETERIA EPA, S.A. DE C.V						
Presupuesto válido por 7 días						
"VV" Precio de Venta por Volumen						
"M" Precio de Venta x Empaque						
					Sub-Total	113.45
					Imp.Venta	14.75
					TOTAL	128.20
 Elaborado por 860/CESAR						

Cotización A.B.C4. Quemadores



COTIZACIÓN

REPRESENTANTES Y DISTRIBUIDORES DE EQUIPOS DE SEGURIDAD INTRINSECA
DISTRIBUIDORES DE EQUIPOS DE CONTROL
FABRICANTES DE MAQUINAS PARA CERAMICA Y QUEMADORES INDUSTRIALES

SIEMENS



AFRISO
EURO-INDEX



FECHA

2 feb 21

FOLIO

1TPI-UdESIFA-020221

EMPRESA: Universidad de El Salvador
ATENCIÓN: Katherin Mendoza
TEL: 2519-2154
CEL: 7715-1757
E-MAIL: [Envío de oferta por WA](#)

GESTOR DE VENTA: Ing. Rocio Ariga
TEL: 2226-2669 opción 1 /7037-6997
E-MAIL: operaciones@termoprocesos.net

ITEM	COD.	CANT.	DESCRIPCIÓN	PRECIO/U	TOTAL CON IVA	ENTREGA
1	645	1	QUEMADOR INDUSTRIAL /GAS BRENNER Capacidad : 350,000 BTU/H Modelo: GB_GLP350 Marca: TPI-TECH Nota: Oferta no incluye costos de instalación en sitio ni adecuamiento Ver catalogo Anexo	\$ 995.56	\$ 1,124.98	15 Días Hábiles
2	644	1	QUEMADOR INDUSTRIAL /GAS BRENNER Capacidad : 175,000 BTU/H Modelo: GB_GLP175 Marca: TPI-TECH Nota: Oferta no incluye costos de instalación en sitio ni adecuamiento Ver catalogo Anexo	\$ 597.34	\$ 674.99	10 Días Hábiles
ADICIONALES						
1	645-2	1	Tren de Gas Externo para quemador_GB-175	\$ 468.09	\$ 528.94	10 Días Hábiles
2	644-2	1	Tren de Gas Externo para quemador_GB-350	\$ 754.34	\$ 852.40	12 Días Hábiles

FORMA DE PAGO:	80% Anticipado y 20% Contra Entrega	SUB-TOTAL	\$ 3,181.32
VALIDEZ DE LA OFERTA:	15 días hábiles	IVA	\$ 413.57
TIEMPO DE FABRICACION:	inferior de oferta	TOTAL	\$ 3,594.89
TRANSPORTE/INSTALACION	Costo no incluido en Oferta		

En caso de favorecernos con su orden

REMESAS BANCARIAS:
> Cuenta DAV : 019510035953 (L.P.I Technologies S.A de C.V.)

CHEQUES:
> T.P.I Technologies S.A de C.V
> Termoprocesos Industriales Technologies S.A de C.V

NOMBRE/RAZON
Termoprocesos Industriales Technologies S.A de C.V

No. DE REGISTRO: 224378/2

NIT: 0614120413-105-2

Dirección: 23 CALLE PONIENTE, COLOMIA LAYCO #814,5AN SALVADOR, EL SALVADOR, C.A

ORDEN DE COMPRA

1TPI-UdESIFA-020221

NOMBRE:

FIRMA DE APROBACION:

SELLO:

Al firmar, el cliente acepta los términos y condiciones de esta cotización, incluyendo montos y forma de pago.
*No se aceptan devoluciones de efectivo.
*La empresa toma como Días hábiles de Lunes a viernes .

Cotización A.B.C5. Crisol de grafito



#6 - 8 Kg Grafito Horno de fusión de Fundición Crisol de arcilla refinación Oro Plata Cu

Totalmente nuevo

USD39.99

o Mejor oferta

+USD49.03 de envío estimado de United States

356 vendidos

[♥ Marcar como favorito](#)

Patrocinado

Vendedor Excelente

Se ofrecen servicios de aduana y de seguimiento internacional del envío

Calculadora



Producto	Herramientas - (23.00%)		
Peso Total :	<input type="text" value="8"/> Lbs	<input type="text" value="3.63"/> Kgs	
Valor en USD\$: Incluir Shipping y Tax	<input type="text" value="89.02"/>	Prealertado :	<input type="radio"/> Si <input checked="" type="radio"/> No
			Calcular

Valor declarado: **\$89.02**

Valor CIF (Valor Aduanero): **\$117.32**

Cargos	US\$
Flete	\$26.80
Programa Garantía/Retorno	\$1.50
Combustible	\$6.80
Manejo Aduanal	\$11.30
Impuestos	\$26.98
Total de Cargos	\$73.38
Total (incluyendo valor del producto)	\$162.40

La cotización se realizó con la calculadora de Aeropost para el envío al país.

Información sobre talleres de maquinado

Para la fabricación de los ejes y engranes se realizó una cotización informal en talleres, por lo cual se dará la información de contacto de los respectivos lugares.

✓ Taller Industrial Molina S.A de C.V

Correo de la empresa: tmi.ventas01@gmail.com

Teléfono: +503 6140-8325

✓ Torno y fresadora sv

Teléfono: +503 7120-0390