

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



**DISEÑO DE UN HORNO DE CUBILOTE PARA USO  
DIDÁCTICO**

PRESENTADO POR:

**BYRON STEFAN BRAN MOLINA**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 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 DE CUBILOTE DE USO  
DIDÁCTICO**

Presentado por :

**BYRON STEFAN BRAN MOLINA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

San Salvador, octubre de 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi mamá Ana Lourdes Molina y mi abuela Ángela Molina por el esfuerzo que ellas 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.

*Byron Bran*

## **AGRADECIMIENTO**

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

A mi hermano Ing. Cristian Bran, por apoyarme en toda mi carrera.

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 Antonio Berríos Ortiz por darme la oportunidad de demostrar mi conocimiento, quien también me asesoró de la mejor manera posible y mostró la manera correcta de realizar las cosas con sus consejos y recomendaciones.

*Byron Bran*

# DISEÑO DE UN HORNO DE CUBILOTE DE USO DIDÁCTICO PARA FUNDIR HIERRO

Estudiante: Br. Byron Stefan Bran Molina<sup>1</sup>  
Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz<sup>2</sup>  
Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Universidad de El Salvador

## RESUMEN

Se ha recopilado información bibliográfica sobre hornos de cubilote para la obtención de hierro fundido con el fin de describir las partes que lo constituyen y su funcionamiento con el fin de obtener los parámetros que caracterizan un horno de cubilote. Luego se realizó una propuesta de diseño térmico y mecánico de un horno de cubilote con fines didácticos, considerando los diferentes componentes que conforman el horno de cubilote, así también las correspondientes estimaciones de la adecuada selección de sus dimensiones para poder realizar el mantenimiento, ya que la propuesta de diseño considera que el horno estará constituido por dos partes. También, se han determinado los costos de los materiales, mano de obra y costos indirectos necesarios para su construcción. Además, se elaboraron los planos de conjunto, subconjunto y detalles para la construcción y ensamblaje del horno. Finalmente, se concluye que el costo estimado de fabricación y mantenimiento del horno de cubilote diseñado no tiene rentabilidad desde el punto de vista económico, no obstante su rentabilidad es alta si se mide desde una perspectiva didáctica.

Palabras claves: Horno, cubilote y fundición.

---

1 byronbran0024@gmail.com

2 jonathan.berrios@ues.edu.sv

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	1
1. MARCO TEORICO .....	3
1.1. Generalidades.....	3
1.2. Estructura del horno de cubilote .....	4
1.3. Zonas del cubilote .....	6
1.3.1. Cuba del cubilote .....	7
1.3.2. Zona de fusión .....	8
1.3.3. Zona de reducción de la carga de sólo coque.....	9
1.3.4. Zona de oxígeno de la carga de sólo coque .....	10
1.3.5. Crisol del cubilote .....	11
1.4. Combustión y combustible .....	12
1.4.1. Estequiometría de los combustibles.....	13
1.4.2. Coeficiente de exceso de aire .....	15
1.4.3. Poderes caloríficos .....	16
1.5. Combustión y contaminación ambiental.....	17
1.5.1. Contaminación debida al carbono.....	18
1.5.2. Contaminación debida al azufre.....	18
1.5.3. Contaminación debida al nitrógeno.....	19
1.6. Reacciones de combustión en el horno de cubilote .....	20
1.6.1. La reacción de combustión .....	20
1.6.2. La reacción de gasificación por CO <sub>2</sub> .....	22
1.6.3. Reacción de gasificación por vapor de agua.....	24
1.7. Acondicionamiento del aire forzado .....	25
1.7.1. Tipos de sopladores para cubilote .....	26
1.7.2. Ductos del aire .....	27
1.8. Materiales refractarios.....	27
1.8.1. Tipos de refractarios .....	28
1.8.2. Características de los ladrillos refractarios.....	30
1.8.3. Condiciones y requerimientos de operación .....	30
1.8.4. Aislamiento.....	31

	Pág.
2. DISEÑO DEL HORNO DE CUBILOTE .....	32
2.1. Propuesta del horno de cubilote .....	32
2.2. Diámetro interno .....	33
2.3. Altura del horno.....	33
2.4. Altura efectiva del horno .....	34
2.5. Toberas.....	34
2.6. Altura del crisol .....	37
2.7. Conductos de aire.....	38
2.8. Caja de viento .....	40
2.9. Altura de la caja de viento.....	41
2.10. Altura de las toberas .....	41
2.11. Orificio de escoriado .....	41
2.12. Piquera de escoriado .....	42
2.13. Orificio de sangrado .....	43
2.14. Piquera de sangrado.....	43
2.15. Mirilla.....	43
2.16. Caudal.....	44
2.17. Ventilador centrífugo .....	46
2.18. Revestimiento refractario .....	47
2.19. Diámetro exterior del horno.....	55
2.20. Apaga chispas .....	56
2.21. Peso total del horno .....	58
2.22. Placa base .....	62
2.23. Puerta de descarga.....	65
2.24. Columnas de apoyo .....	68
2.25. Cimentación .....	69
3. DETERMINACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO.....	72

	Pág.
4. FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO .....	76
4.1. Funcionamiento .....	76
4.1.1. Encendido .....	76
4.1.2. Introducción de la carga .....	77
4.1.3. Período de operación .....	78
4.1.4. Fin de la fusión .....	79
4.1.5. Vaciado del horno .....	79
4.1.6. Funcionamiento y operación .....	80
4.2. Mantenimiento .....	81
4.2.1. Costo de mantenimiento .....	83
 CONCLUSIONES .....	 85
 BIBLIOGRAFÍA .....	 86
 ANEXOS .....	 88
Anexo A: Planos de fabricación .....	88
Anexo B: Cotizaciones .....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Número de toberas en función del diámetro interno del cubilote .....	35
Tabla 2.2. Potencia de ventilador en función al diámetro interno.....	47
Tabla 2.3. Velocidades de gases en las chimeneas. ....	49
Tabla 2.4. Factor de seguridad con distintos espesores de la base. ....	65
Tabla 2.5. Factor de seguridad para distintos espesores de la descarga. ....	67
Tabla 3.1. Costos de materiales para la fabricación de elementos del horno... ..	72
Tabla 3.2. Costos de mano de obra para la fabricación del horno de cubilote. ..	74
Tabla 3.3. Costos indirectos en la fabricación de los elementos del horno.....	75
Tabla 3.4. Resumen de los costos de fabricación del horno de cubilote. ....	75
Tabla 4.1. Costos de materiales para el mantenimiento del revestimiento. ....	83
Tabla 4.2. Costos de mano de obra para el mantenimiento del revestimiento. ..	83
Tabla 4.3. Costos indirectos para el mantenimiento del revestimiento. ....	84
Tabla 4.4. Resumen de los costos de mantenimiento del revestimiento. ....	84

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Cubilote Wilkinson. ....	4
Fig. 1.2. Cubilote moderno de carga a mano. ....	6
Fig. 1.3. Zonas del horno de cubilote. ....	7
Fig. 2.1. Altura del horno y altura efectiva del horno. ....	33
Fig. 2.2. Altura del crisol, altura de tobera y altura de la caja de viento. ....	37
Fig. 2.3. Conductos de aire. ....	39
Fig. 2.4. Caja de viento. ....	40
Fig. 2.5. Orificio de escoriado, sangrado y mirilla. ....	42
Fig. 2.6. Piquera del escoriado y sangrado. ....	43
Fig. 2.7. Revestimiento refractario. ....	47
Fig. 2.8. Radios de las secciones del horno. ....	51
Fig. 2.9. Conductividad térmica en las secciones del horno. ....	52
Fig. 2.10. Apaga chispa parte superior. ....	56
Fig. 2.11. Apaga chispa parte inferior. ....	57
Fig. 2.12. Apaga chispa. ....	58
Fig. 2.13. Distribución de fuerzas y momentos con carga uniforme. ....	62
Fig. 2.14. Puerta de descarga uniformemente cargada. ....	65
Fig. 2.15. Diagrama a compresión. ....	68
Fig. 2.16. Fuerzas en el eje vertical del horno. ....	69
Fig. 4.1. Comprobación de la altura de la carga. ....	77
Fig. 4.2. Reparación de las paredes internas del horno. ....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- $A_c$ : Área de conducto de aire.
- $A_{cv}$ : Área de caja de viento.
- $A_{s_{coque}}$ : Área superficial del coque.
- $b_{placa1}$ : Base de la placa.
- $b_{placa2}$ : Base de la placa de la puerta de descarga.
- C: Orificio de escoriado.
- $C_{CO_2}$ : Es la concentración de  $CO_2$  en la corriente gaseosa.
- $C_{H_2O}$ : Concentración de vapor de agua en la corriente gaseosa.
- $C_{O_2}$ : Concentración de oxígeno en los gases.
- $D_e$ : Diámetro exterior del horno.
- $D_i$ : Diámetro interno del horno.
- $d_{ext}$ : Diámetro exterior del tubo.
- $d_{int}$ : Diámetro interno del tubo.
- $d_{s_{coque}}$ : Diámetro promedio de las partículas de coque.
- $d_{toberas,n}$ : Diámetro de tobera.
- $e_{aisl}$ : Espesor del aislante refractario.
- $e_{chapa}$ : Espesor de la chapa.
- $e_{ref}$ : Espesor del refractario.
- $F_A$ : Factor de altura.
- $F_c$ : Factor de la altura de crisol.
- $F_d$ : Factor de diámetro.
- $F_{fu}$ : Factor o coeficiente de la carga del fundente.
- $G_{gases}$ : Es el flux de la corriente gaseosa.
- H: Altura del horno.
- $H_c$ : Altura del crisol.
- $H_e$ : Altura efectiva del horno.
- $H_t$ : Altura de las toberas.
- $h_{cv}$ : Altura de la caja de viento.
- $h_{placa1}$ : Altura de la placa base.
- $h_{placa2}$ : Altura de la placa base de la puerta de descarga.
- $h_{sombbrero}$ : Altura del sombrero.
- $h_1$ : Coeficiente de convección en el interior del horno.
- $h_2$ : Coeficiente de convección del aire a temperatura ambiente en lugares cerrados.
- K: Coeficiente de conductividad térmica de los gases en el interior del horno.
- $K_a$ : Conductividad térmica a la temperatura máxima de servicios del mortero refractario.
- $K_b$ : Conductividad térmica a la temperatura de servicio del aislante refractario.
- $K_c$ : Conductividad térmica a la temperatura de servicio de la chapa metálica.
- $k_v$ : Constante cinética de gasificación.
- $k_1$ : Coeficiente de transferencia de masa del oxígeno hacia el coque.
- L: Longitud comprendida entre la zona de reducción y fusión.

$L_c$ : Lado de la salida del conducto de aire.  
 $L_{\text{mín}}$ : Lado mínimo de la pletina cuadrada.  
 $L_{\text{pletina}}$ : Lado de la pletina.  
 $L_{\text{req}}$ : Lado mínimo requerido de la pletina cuadrada.  
 $L_s$ : Altura de cada una de las secciones del horno  
 $L_{ts}$ : Largo de la diagonal de la parte superior del apaga chispa.  
 $L_{ti}$ : Largo de la diagonal de la parte inferior del apaga chispa.  
 $I_{pb}$ : Momento de inercia para sección transversal de la placa base.  
 $I_{pd}$ : Momento de inercia para sección transversal de la puerta de descarga.  
 $M_C$ : Peso molecular del carbono.  
 $M_{\text{gases}}$ : Peso molecular de la corriente gaseosa.  
 $M_{pb}$ : Momento cortante de la placa base del horno.  
 $M_{pd}$ : Momento cortante de la carga base del horno.  
 $m_{\text{aisl}}$ : Peso del aislante refractario  
 $m_{\text{chapa}}$ : Peso de la chapa metálica.  
 $m_{\text{refractario}}$ : Peso del refractario.  
 $m_{\text{sección inferior}}$ : Peso de las secciones inferiores del horno.  
 $m_{\text{sección superior}}$ : Peso de las secciones superiores del horno.  
 $m_{\text{Total}}$ : Peso total del horno.  
 $N_t$ : Numero de toberas.  
 $N_{ud}$ : Número de Nuselt.  
 $n_{pb}$ : Factor de seguridad de la placa base.  
 $n_{pd}$ : Factor de seguridad de la puerta de descarga.  
 $P_{\text{coque}}$ : Peso del coque.  
 $P_f$ : Carga del fundente.  
 $P_{\text{gases}}$ : Presión de los gases.  
 $P_{\text{máx}}$ : Peso del horno más la carga.  
 $Pr$ : Número de Prant.  
 $P_{\text{vol}}$ : Peso volumétrico del coque.  
 $Q$ : Caudal del aire.  
 $q_r$ : Resistencia térmica del sistema.  
 $R$ : Constante de gas ideal  
 $Re_d$ : Número de Reynolds.  
 $R_y$ : Reacción de una de las patas del horno.  
 $R_1$ : Velocidad de reacción.  
 $R_2$ : Velocidad global de la reacción de gasificación por  $\text{CO}_2$ .  
 $R_{2.1}$ : Velocidad de reacción en la superficie del coque.  
 $R_{2.2}$ : Velocidad de la reacción por la difusión a través de los poros.  
 $R_3$ : Velocidad global de la reacción de gasificación del coque por vapor de agua.  
 $R_{3.1}$ : Velocidad de la reacción de gasificación por vapor de agua en la superficie del coque.  
 $R_{3.2}$ : Velocidad de la reacción de gasificación por vapor de agua debida a la difusión por los poros del coque.  
 $r_e$ : Radio de diámetro exterior.  
 $r_i$ : Radio de diámetro interno.  
 $r_{\text{sombbrero}}$ : Radio del sombrero.  
 $r_{1v}$ : Radio interno de la cámara de fusión del horno.  
 $r_2$ : Radio exterior del mortero refractario.

- $r_3$ : Radio exterior de la capa aislante refractario.
- $r_4$ : Radio exterior del horno.
- $Sc$ : Número de Schmidt.
- $S_{carga}$ : Espesor de la carga del coque.
- $S_{nivel\ de\ toberas}$ : Área de nivel de toberas.
- $S_{toberas}$ : Área total de las toberas.
- $S_{toberas,n}$ : Área de cada tobera.
- $S_{yt}$ : Resistencia a la fluencia del tubo estructural.
- $T_{gases}$ : Temperatura de la corriente gaseosa.
- $T_{s1}$ : Temperatura de la pared interna del refractario.
- $T_{s4}$ : Temperatura externa del horno.
- $T_1$ : Temperatura máxima registrada en el interior del horno.
- $T_2$ : Temperatura de la pared del refractario.
- $T_3$ : Temperatura de la capa del aislante refractario.
- $T_4$ : Temperatura del medio ambiente.
- $U_m$ : Velocidad de los gases en el interior del horno.
- $V_{aisl}$ : Volumen de la capa de aislante refractario.
- $V_{chapa}$ : Volumen de la chapa metálica.
- $V_{Refractario}$ : Peso del refractario.
- $V_T$ : Volumen total de una de las secciones del horno.
- $V_1$ : Volumen de la cámara de combustión.
- $V_2$ : Volumen del refractario de una de las secciones.
- $V_3$ : Volumen total del refractario y aislante de una de las secciones.
- $\eta$ : Difusividad efectiva por los poros.
- $\mu$ : Viscosidad de los gases en el interior del horno.
- $\nu$ : Coeficiente de Poisson, para hierro dulce.
- $\rho$ : Densidad de los gases en el interior del horno.
- $\rho_{aire}$ : Densidad del aire.
- $\rho_{aisl}$ : Densidad de aislante refractario.
- $\rho_{chapa}$ : Densidad de la chapa.
- $\rho_{gases}$ : Densidad de la corriente gaseosa.
- $\rho_{S_{Coque}}$ : Densidad del coque.
- $\rho_{Refractario}$ : Densidad del refractario.
- $\sigma_{actuante}$ : Es el esfuerzo actuante de la pletina.
- $\sigma_{actuante_{min}}$ : Esfuerzo actuante en la pletina mínima del diámetro del tubo.
- $\sigma_{máxpb}$ : Esfuerzo máximo de la placa base del horno.
- $\sigma_{máxpd}$ : Esfuerzo máximo de la puerta de descarga.
- $\sigma_m$ : Esfuerzo sometido por el peso máximo.
- $\sigma_{suelo}$ : Esfuerzo admisible del suelo.

## INTRODUCCIÓN

Un horno de cubilote es una de las unidades de fusión más utilizadas para la obtención de hierro fundido, el combustible más utilizado en estas unidades es el coque de fundición, esta se obtiene sometiendo el carbón mineral a un proceso de coquización, que tiene como finalidad eliminar los materiales volátiles y aumentar el poder calorífico.

El horno de cubilote no sólo por su facilidad de construcción y manejo se utiliza, sino también por la gran producción que puede brindar estos a escalas industriales, siendo éste una herramienta cuyo uso se remonta hace siglos, sin embargo, la tecnología aún sigue siendo vigente y útil para elaborar piezas metálicas integrales y funcionales.

En la actualidad los hornos de cubilote ofrecen a la industria de la fundición, una gran flexibilidad con respecto a fundir el metal, el tamaño de la pieza fundida, y técnicas de manufactura.

El horno de cubilote consiste en un cilindro vertical recubierto en su interior con material refractario, en la zona inferior se localizan las toberas a través de las cuales se inyecta el aire que transporta el oxígeno necesario para la combustión. Al mismo tiempo, por la parte superior del horno se introducen los materiales de carga sólida, entre ellos se encuentra el coque, el metal de carga y el fundente.

Los hornos de cubilote presentan la aparente ventaja de extraer el metal fundido con mayor facilidad ya que cae sobre una piquera sin la necesidad de exponer a los operarios al calor proveniente de la cámara del horno.

En este trabajo se tiene como finalidad realizar una propuesta de diseño de un horno de cubilote pequeño y desmontable para facilitar el mantenimiento, el interior del horno, así se diseñará con materiales refractarios y aislante. El término refractario se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin que se descomponga. 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 la unión de los ladrillos con mortero refractario con una capa en el

interior de concreto refractario y en la pared del exterior una capa de aislante refractario que reduce 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 cubilote 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.

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

## **1. MARCO TEÓRICO**

Los hornos de cubilote son necesarios para la obtención de piezas de hierro fundido, por lo que se emplean en distintas áreas de ingeniería a lo largo de los últimos siglos, son relativamente fáciles de operar, se introduce el combustible sólido (coque), luego la chatarra y posteriormente el fundente, a medida que el coque se consume y el metal se funde y va descendiendo, se introducen nuevas cargas en el interior del horno de cubilote, el aire que es suministrado por un ventilador hace que produzca una llama y genere calor necesario para fundir las carga metálica.

En este marco teórico se abordan ciertos apartados tales como los componentes del horno de cubilote, se especifica cada pieza del horno, combustible, reacciones de combustión entre otros.

### **1.1. GENERALIDADES**

El horno más usado en la fundición del hierro colado es el cubilote un horno de manga o cúpula. Es también el más antiguo de los hornos para la fusión del hierro colado ya que se emplea desde hace siglos, si bien el progreso y la experiencia han sugerido muchas modificaciones que han cambiado totalmente el aspecto de los cubilotes modernos con respecto a los antiguos. Sin embargo, los principios en que se basa su funcionamiento continúan siendo los mismos en la actualidad.

En el año 1500, en efecto, un tecnólogo italiano, Vannoccio Biringuccio, de Siena, en su tratado *D Pirotechnia* describía un tipo de horno de cuba que funcionaba en aquella época y que se puede considerar como el precursor del moderno horno de cubilote, y dos siglos más tarde el inglés Wilkinson diseñó un horno muy parecido al cubilote actual (ver, Fig. 1.1) [1].

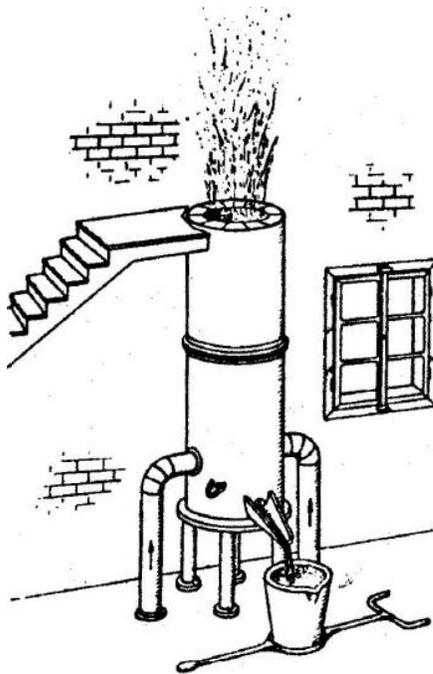


Fig. 1.1. Cubilote Wilkinson.

El cubilote es un horno que funciona con combustible sólido, en el cual la carga metálica, el combustible y el carburante están en íntimo contacto entre sí. Esto permite un intercambio térmico directo y activo y, por lo tanto, un rendimiento elevado. Sin embargo, a causa de este mismo contacto entre el metal, las cenizas y el oxígeno el hierro colado producido no puede ser rigurosamente controlado desde el punto de vista metalúrgico [1].

## 1.2. ESTRUCTURA DEL HORNO DE CUBILOTE

Las partes principales de un horno de cubilote convencional (ver, Fig. 1.2) son [1]:

- a) Envoltura cilíndrica de eje vertical chapa de hierro soldada.
- b) Revestimiento interno de material refractario, entre este y la envoltura se deja una capa intermedia de unos 2 cm, rellana de arena seca, para permitir las dilataciones radiales y axiales de refractario.

- c) Chimenea y su correspondiente cobertura, algunas veces se añade un apaga chispas.
- d) Boca de carga, es pequeña y provista de una plancha inclinada para la introducción de las cargas cuando se realizan a mano, más amplia si se hace mecánicamente, para el paso de las carretillas o de los calderos de carga.
- e) Cámara de aire anular, es de plancha delgada, circunda todo o parte de la envoltura y dentro de la cual, pasa aire o viento (enviado por una máquina sopladora) para la combustión del coque.
- f) Toberas, de hierro colado, en forma de caja horadada y adaptada al revestimiento para conducir el aire al interior del cubilote. En la parte correspondiente de cada tobera la pared exterior de la cámara de viento está agujereada y provista de portillos con mirillas (de mica o cristal) para vigilancia de la combustión.
- g) Evacuador de escoria, es una abertura dispuesta por debajo del plano de toberas, que se destina a la evacuación de la escoria, la cual, por ser más ligera, flota sobre el hierro fundido líquido.
- h) Puerta lateral de encendido y limpieza. Antes de cerrarla, al comienzo de la fusión, se tiene que rehacer el murete que completa el revestimiento.
- i) Canal de colada, de plancha de hierro revestido de masa refractaria. Parte de la piqueta y con una ligera inclinación de  $\sim 10^\circ$ , hace caer el hierro fundido en el caldero de colada.
- j) Solera o fondo de cubilote, de arena de fundición, inclinada hacia la piqueta.
- k) Plancha base de envoltura; de hierro colado o chapa fuerte. En su centro existe una abertura del diámetro de la solera, que se puede cerrar con un portillo de descarga de uno o dos batientes que se abren hacia abajo por medio de un cerrojo, de una palanca o quitando el puntual.
- l) Columnas de apoyo, casi siempre son cuatro, de hierro colado y son sostenidas a su vez por unos cimientos de ladrillos de hormigón.
- m) Crisol, es la inferior del cubilote comprendido entre la solera y plano de las toberas.

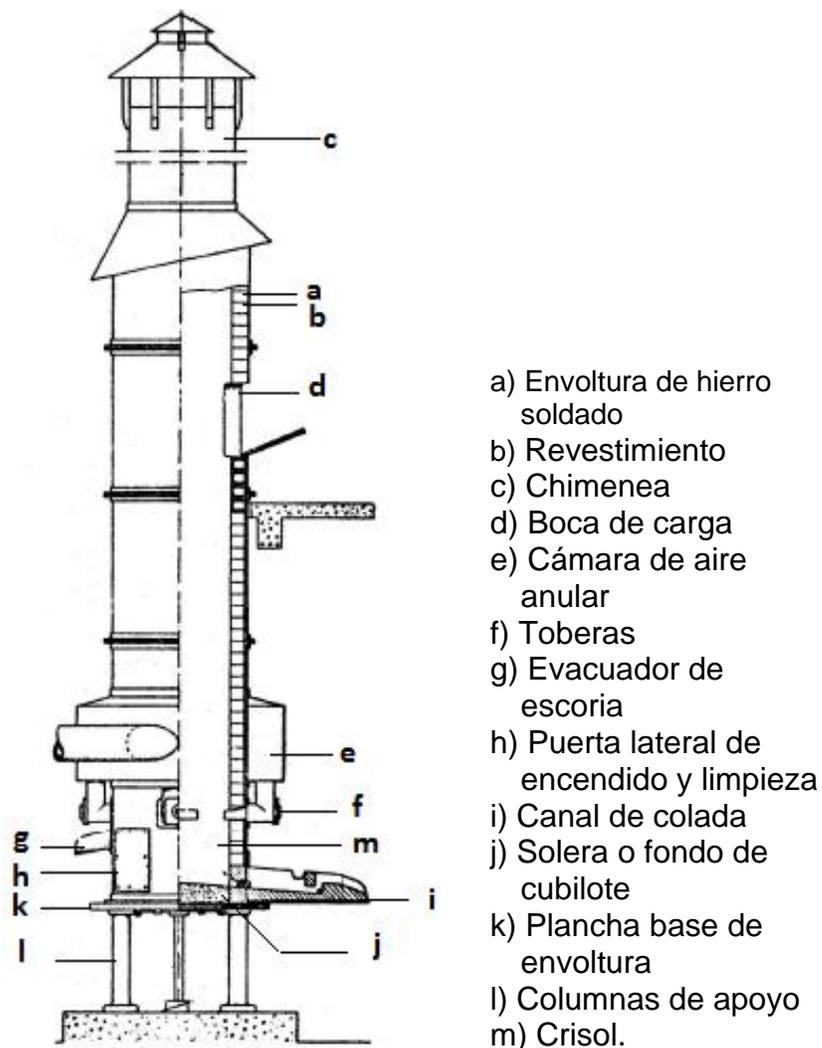


Fig. 1.2. Cubilote moderno de carga a mano.

### 1.3. ZONAS DEL CUBILOTE

Durante la fusión en el cubilote los materiales de carga y los gases avanzan unos al encuentro de otros. Los materiales de carga descienden y se calientan con los gases, que ascienden desde el nivel de las toberas, transmitiendo su calor a los materiales de la carga. Además de la transmisión de calor en el cubilote transcurre una gran cantidad de procesos químicos [2].

El cubilote por su altura se puede dividir en cinco zonas, las cuales se presentan en la Fig. 1.3 [2].

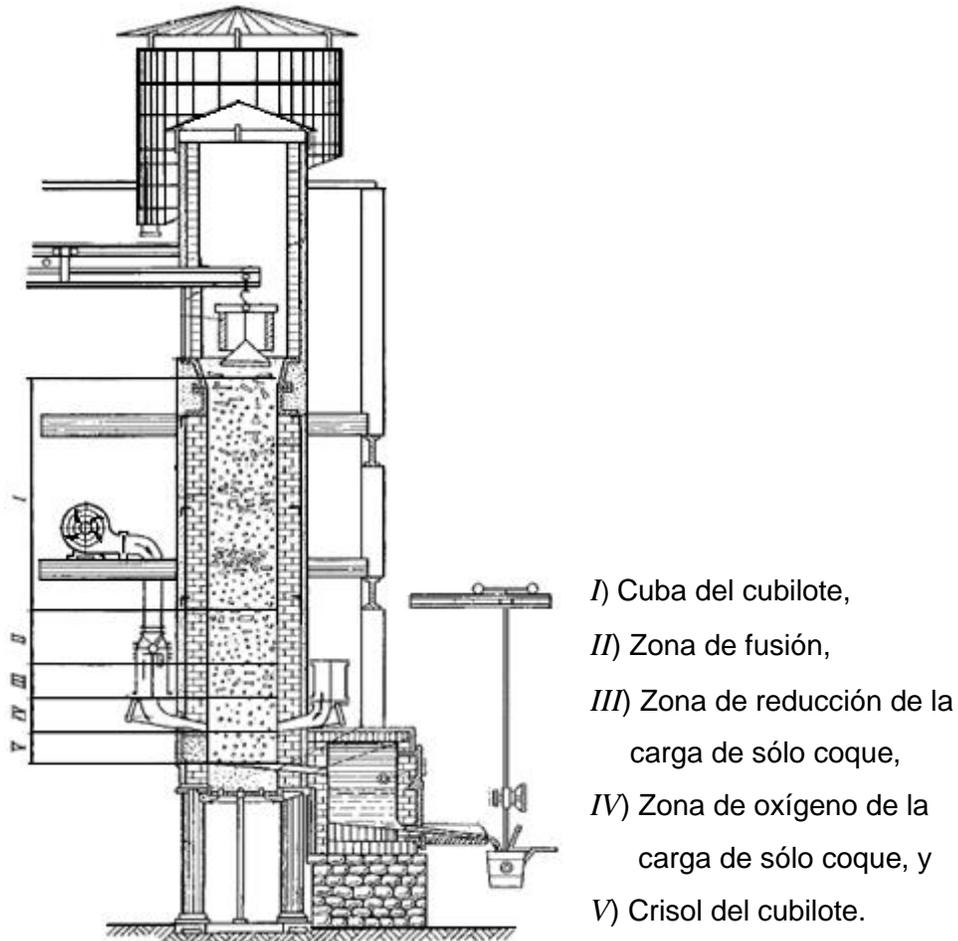
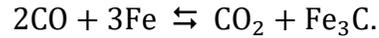


Fig. 1.3. Zonas del horno de cubilote.

### 1.3.1. CUBA DEL CUBILOTE

En esta zona (o zona I) el metal sólido que se caliente entra en reacciones químicas solamente con la fase gaseosa. El hierro, se combina con los gases, para formar  $Fe_2O_3$  y  $Fe_3O_4$ , y también se puede carbonizar. En este caso tiene lugar la disolución del carbono en la fase metálica. La solubilidad del carbono en  $Fe_\gamma$  varía de 0.8% a 723 °C hasta 2% a 1,130 °C. El exceso de carbono se halla en forma de carburo y grafito [2].

La creación del carburo y grafito transcurre por las reacciones siguientes:



Como resultado de la oxidación se crean productos gaseosos que se desprenden de la superficie del metal, en la superficie del metal se oxida el silicio y el manganeso, creando las composiciones  $\text{SiO}_2$  y  $\text{MnO}$ , las cuales juntos con el  $\text{FeO}$  forman en la superficie del metal una capa de óxido. Además, tiene lugar también la saturación de la superficie del metal sólido lo cual dificulta la saturación del metal con azufre y su oxidación. El combustible en la zona *I*, se calienta hasta  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , pierde la humedad que contiene y luego las sustancias volátiles, lo hace amorfo y poroso, y adquiere un elevado poder de reacción. Por eso el combustible para cubilotes debe tener el mínimo de sustancias volátiles. La caliza en la zona *I* se debe calentar hasta la temperatura necesaria para su disociación completa, por la reacción siguiente:

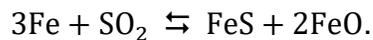


### 1.3.2. ZONA DE FUSIÓN

En la zona *II* los trozos de metal, que se están calentando, se comienzan a fundir. Si la carga está bien colocada, la fusión de todos los trozos, finaliza en la zona *III* de oxidación débil, que no contiene oxígeno, como resultado de lo cual el metal no se oxida. Los trozos de metal de mayor masa se pueden no fundir en la zona *III* y descender hasta la zona *IV*, o sea, hasta la zona del oxígeno, lo que puede provocar una fuerte oxidación del metal. Si la carga metálica se funde en

los límites de la zona *III*, que no contiene oxígeno, tienen lugar los procesos o reacciones de la zona *I*.

En el período de fusión es posible la absorción del azufre por el metal conforme a la reacción siguiente:



Con más intensidad que en las capas superiores de la cuba del cubilote.

En esta zona los gases no varían su composición, pero se enfrían considerablemente, puesto que ceden el calor para el calentamiento y la fusión del metal [2].

### **1.3.3. ZONA DE REDUCCIÓN DE LA CARGA DE SÓLO COQUE**

En la zona *III* las gotas de metal se recalientan debido a la alta temperatura de la fase gaseosa y principalmente, por consecuencia del coque ardiente. La atmósfera en esta zona, como en las primeras dos zonas, es débilmente oxidante. Los óxidos de hierro creados en la superficie de la gota de metal se disuelven en la misma gota y transmiten el oxígeno a las impurezas de la fundición, que tienen más afinidad con el oxígeno que el hierro, el silicio, manganeso y parcialmente el carbono. Al mismo tiempo las gotas de metal, al hacer contacto con el combustible, disuelven el carbono y el azufre del combustible [2].

Entre el gas y el combustible transcurre la reacción siguiente:



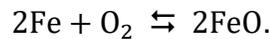
En esta zona también ocurre la escorificación de la cal sólida (CaO) con sílice líquido SiO<sub>2</sub> creando la escoria [2].

#### 1.3.4. ZONA DE OXÍGENO DE LA CARGA DE SÓLO COQUE

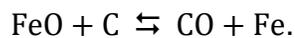
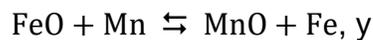
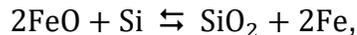
La atmósfera en la zona *IV* es más oxidante que en la zona *III*, ya que en esta existe oxígeno libre. Las gotas de metal se recalientan por consecuencia del calor de los gases y el coque y, a causa de la oxidación de las impurezas de la fundición en la fase gaseosa. Al pasar por el flujo de aire frío junto a las toberas, las gotas de escoria se enfrían, y las gotas de fundición se recalientan por el calor de oxidación de las impurezas.

En la zona de recalentamiento la temperatura es máxima, de 1,600 a 1,650 °C.

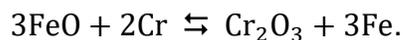
El hierro se oxida mediante la reacción siguiente:



Luego el oxígeno del óxido de hierro entra en combinación con el S, Mn y C, produciendo las reacciones siguientes:



Si en la fundición está presente el cromo, éste también se oxida mediante la reacción siguiente:



Con un fuerte recalentamiento de la fundición la combustión del silicio, manganeso y el cromo se puede interrumpir. Cuanto mayor es el recalentamiento

de la fundición, tanto más intensiva es la combustión del carbono con la simultánea saturación de la fundición líquida con carbono del coque. En la zona *IV* del cubilote el azufre del coque se quema fundamentalmente en  $\text{SO}_2$  [2].

### **1.3.5. CRISOL DEL CUBILOTE**

La atmósfera en el crisol en la parte superior es oxidante, en la parte media débilmente oxidante y en la parte inferior junto a la solera es inoxidante. En la zona *V* el metal y la escoria se enfrían debido a las pérdidas de calor a través de las paredes y el fondo del crisol.

La influencia de la fase gaseosa depende del nivel del metal y la escoria que se acumula en el crisol del cubilote. Si el nivel de la escoria en el cubilote, sin antecrisol, se eleva hasta las toberas o cerca de ellas, ocurre la oxidación del metal a través de la escoria por el oxígeno del aire. Cuanto menor es el nivel de la escoria menos oxidante será la atmósfera en el crisol del cubilote, Cuanto mayor es la profundidad del crisol, más lejos de las toberas se halla el nivel de la escoria y menos es la oxidación del metal en el crisol y viceversa: Cuanto menos es la profundidad del crisol, más cerca de las toberas se halla el nivel de la escoria y mayor es la oxidación del metal en el crisol. Cuanto más grueso es la capa de escoria, más lentamente transcurre el proceso de transmisión del oxígeno al metal y menos es su oxidación.

Si el cubilote tiene antecrisol, la oxidación del metal al pasar a través del crisol será mínima. En el crisol continúa el proceso de disolución del carbono en la fundición líquida, si esta disolución no alcanzó el límite de saturación en las zonas *III* y *IV* dispuestas más arriba. Como límite de saturación se puede considerar el contenido de carbono correspondiente a la composición eutéctica.

En las primeras porciones de fundición se disuelve el azufre de las capas superficiales de los trozos de coque, dispuestos en el crisol del cubilote. Fundiéndose, el metal desciende al crisol en gotas separadas y chorros, sin que

se mezclen entre sí, por eso en los cubilotes sin antecrisol no ocurre el mezclado completo de la fundición [2].

#### **1.4. COMBUSTIÓN Y COMBUSTIBLE**

La combustión es un tipo de reacción química exotérmica. Puede involucrar materia en estado gaseoso o en estado heterogéneo (líquido-gaseoso o sólido-gaseoso), genera luz y calor y se produce de manera más o menos rápida [3].

Tradicionalmente, la combustión se entiende como un proceso de oxidación rápida de ciertos elementos combustibles, o sea, constituidos principalmente por hidrógeno, carbono y a veces azufre. Además, necesariamente tiene lugar en presencia de oxígeno [3].

En realidad, las combustiones son formas de reacción redox (reducción-oxidación) que se pueden producir tanto de manera controlada, como también en los motores de combustión interna, o descontrolada, como en las explosiones. Implican intercambio de electrones entre los átomos de la materia durante la reacción. Por eso, generan energía térmica y lumínica [3].

Además, dan como resultado otras sustancias gaseosas y sólidas, como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el vapor de agua, o los residuos sólidos del combustible (la sustancia consumida en la reacción) y del comburente (la sustancia que propicia la reacción), de acuerdo siempre a su naturaleza química [3].

Las combustiones son un tipo de reacción redox, es decir, reducción-oxidación. Esto significa que en ellas un material se oxida (pierde electrones), mientras que el otro se reduce (gana electrones) [3].

En el caso de la combustión, el agente oxidante (oxígeno) obtiene electrones del agente reductor (combustible), o lo que es lo mismo, entre el comburente y el combustible. Esto se da generalmente según la reacción siguiente:



Los compuestos pueden variar, según sea su naturaleza, así como pueden variar los niveles de energía. Pero el dióxido de carbono y el vapor de agua están presentes en todo tipo de combustión [3].

### 1.4.1. ESTEQUIOMETRÍA DE LOS COMBUSTIBLES

Las consideraciones siguientes se refieren al uso de aire como comburente, ya que es el utilizado en la totalidad de la práctica de las instalaciones de calderas.

La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones másicas y volumétricas entre reactivos y productos. Los aspectos a determinar son principalmente [4]:

- ✓ Aire necesario para la combustión, y
- ✓ Productos de la combustión y su composición.

Para predecir estas cantidades es preciso referirse a un proceso ideal que dependa de unos pocos parámetros, básicamente la naturaleza del combustible.

Definiendo este proceso ideal se consideran los tipos de combustión que se pueden producir, los cuales son los siguientes [4]:

➤ **Combustión completa**

Conduce a la oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. En el caso de hidrocarburos:

Carbonato → CO<sub>2</sub>,

Hidrógeno → H<sub>2</sub>O,

Azufre → SO<sub>2</sub>,

Nitrógeno → N<sub>2</sub>,

Oxígeno → O<sub>2</sub>,

Oxígeno Participará como oxidante.

El Nitrógeno se considera como masa inerte, si bien a las altas temperaturas de los humos se pueden formar óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones (del orden de 0.01%).

En este caso no habrá presencia de sustancias combustibles en los productos o humos de la reacción.

➤ **Combustión incompleta**

Se produce cuando no se alcanza el grado máximo de oxidación y se tiene la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de la reacción.

Aparecen los denominados inquemados, los más importantes son CO y H<sub>2</sub>; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, etc.

➤ **Combustión estequiométrica o teórica**

Es la combustión que se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible sin que se produzcan inquemados. En consecuencia, no se encuentra O<sub>2</sub> en los humos, ya que dicho O<sub>2</sub> se consumió totalmente durante la combustión.

Esta combustión se denomina teórica porque en la práctica siempre se producen inquemados, aunque sea en muy pequeña proporción.

La combustión estequiométrica permite definir los parámetros característicos de los combustibles [5]:

- ✓ Poder comburívoro: Es la cantidad de aire seco, medida en condiciones normales (T = 0 °C y P =1 atm), mínima necesaria para la combustión completa y estequiométrica de la unidad de combustible. Es un parámetro característico únicamente de la composición del combustible y se puede tabular con facilidad.
- ✓ Poder fumígeno: Es la cantidad de productos de la combustión que se producen en la combustión estequiométrica de la unidad de combustible. En función de considerar o no el vapor de agua existente en los productos de la combustión, se tienen poderes fumígenos húmedo y seco.

## 1.4.2. COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE

La mayor parte de las combustiones no transcurren en estas condiciones ideales (completa y estequiométrica), el principal aspecto a considerar será la posibilidad de que la combustión transcurra con exceso o defecto de aire, para caracterizar la proporción de oxígeno se define el parámetro coeficiente de exceso de aire [5]:

$n$  es el volumen aire por unidad de combustible / poder comburívoro.

$n = 1$ : Combustión estequiométrica.

$n < 1$ : Defecto de aire, se dice que la mezcla es rica.

$n > 1$ : Exceso de aire, se dice que la mezcla es pobre.

Así la combustión se puede clasificar en [5]:

➤ **Combustión con defecto de aire**

La cantidad de aire utilizada no contiene el oxígeno necesario para oxidar completamente a los componentes del combustible.



Además de los productos normales de la combustión, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y agua ( $H_2O$ ), se producen inquemados como el monóxido de carbono ( $CO$ ) e hidrógeno ( $H_2$ ); en algunos casos con mucho defecto de aire puede haber incluso carbono y combustible sin quemar, en los humos.

El calor producido es inferior al de la combustión completa.

➤ **Combustión con exceso de aire**

En este caso la cantidad de aire aportada es superior a la correspondiente a la combustión estequiométrica; la combustión en estas condiciones puede ser completa o incompleta [6]:

- ✓ **Completa:** Al emplear más aire que el estrictamente necesario, en los humos se da la presencia de oxígeno. El calor generado es el correspondiente a la combustión completa.

- ✓ Incompleta: La cantidad de aire utilizada es superior a la correspondiente a la combustión estequiométrica, pero a pesar de ello, debido fundamentalmente a que no se ha logrado una buena mezcla entre el combustible y el aire, los componentes del combustible no se oxidan totalmente.

Respecto a la combustión incompleta con defecto de aire, en los productos de la combustión también se tiene oxígeno; en casos extremos en los humos puede haber carbono y combustible sin quemar. El calor producido es inferior al de la combustión completa. La combustión estequiométrica prácticamente es irrealizable, lo que obliga a operar con excesos de aire con el fin de lograr combustiones completas.

### **1.4.3. PODERES CALORÍFICOS**

Se define como poder calorífico de un combustible, a la cantidad de calor que se obtiene de la oxidación completa, a presión atmosférica, de los componentes de la unidad de masa (o volumen) de dicho combustible.

En la combustión, por la oxidación del hidrógeno, se forma agua; además, los combustibles pueden tener un cierto grado de humedad en su composición; dependiendo del estado en que aparezca el agua en los humos, se distinguen dos tipos de poderes caloríficos [5]:

- Poder calorífico inferior (PCI).-

Es la cantidad de calor que se puede obtener en la combustión completa de la unidad de combustible, si en los productos de la combustión el agua está en forma de vapor. En este caso una parte del calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua, por lo tanto, esta parte del calor no se aprovecha.

- Poder calorífico superior (PCS).-

En los productos de la combustión el agua aparece en forma líquida, por lo que se aprovecha todo el calor de oxidación de los componentes del

combustible. Habitualmente el agua se evacua con los humos en fase vapor, por lo que el poder calorífico más comúnmente utilizado es el inferior.

➤ Rendimiento de la combustión.-

El calor que se puede obtener en una combustión es el correspondiente al Poder Calorífico del combustible (PCI o PCS), habitualmente referido al PCI. Al realizar la combustión, una parte del calor producido se pierde, asociado a los productos de la combustión; estas pérdidas se pueden agrupar en dos tipos [5]:

➤ Pérdidas por inquemados.-

Corresponden al poder calorífico de los productos de la combustión que no han sido totalmente oxidados. Únicamente se presentan en el caso de combustiones incompletas, siendo más altas cuanto mayor sea la cantidad de inquemados.

➤ Entalpía de los productos de la combustión.-

Corresponde al calor utilizado en calentar los humos hasta la temperatura a la cual escapan por la chimenea, ya que a partir de ese punto el calor que llevan no se recupera. Estas pérdidas son mayores cuanto más altas sean las temperaturas de humos. También aumentan con el exceso de aire, ya que con el mismo aumenta el volumen de humos, transportando mayor cantidad de calor.

## **1.5. COMBUSTIÓN Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL**

Cuando se selecciona el combustible y se optimiza el proceso de combustión se deben considerar aspectos relacionados con la emisión de agentes polucionantes. Las normas actuales restringen estas emisiones, y de hecho uno de los factores más importantes en el diseño de dispositivos de combustión en la actualidad reside en el control de emisiones contaminantes. Estas emisiones tienen diversos efectos perjudiciales [5]:

- ✓ Afectan al equilibrio de la atmósfera terrestre: efecto invernadero, desaparición de la capa de ozono, alteración de la meteorología, entre otros;
- ✓ Afectan a la salud humana;
- ✓ Afectan a la vida animal y vegetal; y
- ✓ Ensucian y deterioran los materiales: edificios, vehículos, entre otros.

### **1.5.1. CONTAMINACIÓN DEBIDA AL CARBONO**

La combustión completa del carbono produce  $\text{CO}_2$  que es el principal contribuyente al efecto invernadero. Este componente es una consecuencia inevitable de la combustión. Si la combustión del carbono no es completa se produce  $\text{CO}$ , gas tóxico que en concentraciones elevadas puede provocar incluso la muerte, por lo que se debe evitar al máximo.

La mejor forma de reducir el efecto de estos agentes es la de tratar de conseguir combustiones completas que no produzcan  $\text{CO}$ , y la de obtener los mayores rendimientos de combustión de modo que se consuma el mínimo combustible necesario, produciendo así la menor cantidad de  $\text{CO}_2$ ; otra manera es seleccionar combustibles con menor producción de  $\text{CO}_2$  para la misma energía, el mejor en este aspecto es el gas natural.

### **1.5.2. CONTAMINACIÓN DEBIDA AL AZUFRE**

El azufre está presente en los combustibles en proporciones variables; la oxidación del azufre puede producir  $\text{SO}_3$ , éste en contacto con el agua de la combustión o de la atmósfera puede dar lugar a ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) condensado que acompaña a las gotas de lluvia, dando lugar a lo que se conoce como lluvia ácida.

Para combatir este problema se debe tratar de utilizar combustibles con mínima presencia de azufre; en este sentido la normativa de combustibles fija la cantidad máxima de Azufre que los mismos pueden contener.

Otro efecto perjudicial a tener en consideración es la posibilidad de condensaciones ácidas en los dispositivos de combustión (calderas, chimeneas) si las temperaturas son suficientemente bajas, esto limita la temperatura de expulsión de los gases de la combustión. A presión atmosférica, las temperaturas de condensación ácida son del orden de 160 °C, variando con la composición de los humos.

### **1.5.3. CONTAMINACIÓN DEBIDA AL NITRÓGENO**

A las elevadas temperaturas de la llama, el nitrógeno que forma parte del combustible y el nitrógeno del aire comburente se pueden combinar con el oxígeno para formar NO, este producto en la atmósfera se combina lentamente con el oxígeno del aire para formar NO<sub>2</sub>.

Entre los diferentes efectos perjudiciales de estos óxidos (NO y NO<sub>2</sub>, denominados conjuntamente como NO<sub>x</sub>) [5]:

- ✓ Colaboran en la destrucción de la capa de ozono de forma importante,
- ✓ En combinación con el agua de la atmósfera pueden dar lugar a condensaciones ácidas lo que incrementa la lluvia ácida, y
- ✓ El NO<sub>2</sub> es un gas venenoso.

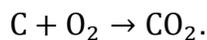
La formación del NO se potencia a elevadas temperaturas, a temperaturas inferiores a unos 1,300 °C apenas es considerable. El exceso de aire en la combustión también favorece su formación, aunque en menor medida que la temperatura [5].

## 1.6. REACCIONES DE COMBUSTIÓN EN EL HORNO DE CUBILOTE

La relación que existe entre la masa de combustible que entra al horno y el caudal de aire usado para su combustión es de suma importancia para la correcta operación de fundición en el interior del horno de cubilote. Si esta relación es la adecuada los costos de producción y temperatura del metal son los que se requieren, si esto no es así se presentarán problemas durante la operación de fusión que terminarán afectando el desempeño del horno y se obtendrán piezas metálicas de mala calidad.

### 1.6.1. LA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

Cuando el oxígeno que se transporta el aire forzado entra en contacto con el coque incandescente, ocurre la reacción de combustión siguiente:



Esta reacción es exotérmica y produce la mayor parte del calor necesario para el proceso. En el horno de cubilote ocurre en una zona muy cercana a las toberas, en donde la temperatura se encuentra por encima de 2,000 °C. La reacción es de carácter heterogéneo ya que en ella se encuentran involucrados un sólido (coque) y un fluido gaseoso (aire); bajo las condiciones térmicas en las cuales ocurre, la cinética está controlada por el transporte del reactante gaseoso (oxígeno), hasta la superficie del coque. Por lo tanto, se propone que la velocidad de reacción se puede expresar como se indica en la Ec. 1.1 [7].

$$R_1 = K_1 A_{S\text{Coque}} C_{O_2} \quad (1.1)$$

donde:

$R_1$  es la velocidad de reacción en  $\text{kmol/m}^3\cdot\text{s}$ ,

$A_{\text{Scoque}}$  es el área superficial del coque en  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ,

$C_{\text{O}_2}$  es la concentración de oxígeno en los gases en  $\text{kmol/m}^3$ , y

$K_1$  es el coeficiente de transferencia de masa del oxígeno hacia el coque en  $\text{m/s}$ .

El coeficiente de transferencia de masa se evalúa con la Ec. 1.2:

$$K_1 = \left(\frac{0.99G_{\text{gases}}}{P_{\text{gases}}}\right) \left(\frac{d_{\text{Scoque}}G_{\text{gases}}}{\mu}\right)^{-0.41} Sc^{-2/3} \quad (1.2)$$

donde:

$G_{\text{gases}}$  es el flux de la corriente gaseosa en  $\text{kg/m}^3\cdot\text{s}$ ,

$\rho_{\text{gases}}$  es la densidad de la corriente gaseosa en  $\text{kg/m}^3$ ,

$d_{\text{Scoque}}$  es el diámetro promedio de las partículas de coque en el lecho empacado en m,

$\mu$  es la viscosidad de la corriente gaseosa en  $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ , y

$Sc$  es el número de Schmidt el cual se toma como 0.86.

La viscosidad de los gases se calcula con la Ec. 1.3:

$$\mu = 1.149 \times 10^{-5} \left(\frac{T_{\text{gases}}}{273.1}\right)^{0.768} \quad (1.3)$$

donde:

$T_{\text{gases}}$  es la temperatura de la corriente gaseosa en K.

Además, la densidad se calcula con la Ec. 1.4:

$$\rho_{\text{gases}} = \frac{P_{\text{gases}}M_{\text{gases}}}{RT_{\text{gases}}} \quad (1.4)$$

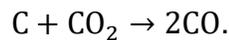
donde:

$P$  es la presión de los gases en atm,

$M_{\text{gases}}$  es el peso molecular de la corriente gaseosa en kg/kmol, y  
R es la constante de los gases ideales la cual se toma como 0.08206  
 $\text{m}^3 \cdot \text{atm} / \text{K} \cdot \text{kmol}$ .

### 1.6.2. LA REACCIÓN DE GASIFICACIÓN POR $\text{CO}_2$

El  $\text{CO}_2$  generado durante la reacción de combustión puede reaccionar con el carbono en el coque para producir la reacción [7]:



Esta reacción es endotérmica y consume gran parte del calor generado en el proceso. Aunque desde el punto de vista energético se podría considerar indeseable, ya que disminuye las pérdidas por oxidación de los elementos metálicos en la carga. La cinética de esta reacción es también de carácter heterogéneo. Los mecanismos cinéticos que la gobiernan dependen de la temperatura. A temperaturas inferiores a 1,000 °C la velocidad está controlada por la reactividad, ésta a su vez depende de la calidad del coque y de las condiciones bajo las cuales se haya llevado a cabo el proceso de coquización [6].

En el rango de temperaturas entre 1,000 y 1,200 °C la velocidad está limitada por dos mecanismos: el transporte del reactante gaseoso  $\text{CO}_2$  hasta la superficie del coque y la difusión de éste a través de los poros, por lo tanto, la propiedad más importante en este intervalo es el volumen y la estructura de los poros. Por último, cuando la temperatura es mayor que 1,200 °C la reacción se hace muy rápida y el dióxido de carbono no tiene suficiente tiempo para difundirse hacia el interior, por lo tanto, la velocidad de reacción queda limitada por el transporte del reactante en la fase gaseosa y depende del área específica del coque [6].

Para la difusión externa del CO<sub>2</sub> hasta la superficie del coque la velocidad de reacción se puede expresar como se indica en la Ec. 1.5 [7], así:

$$R_{2.1} = K_1 A_{\text{SCOQUE}} C_{\text{CO}_2} \quad (1.5)$$

donde:

R<sub>2.1</sub> es la velocidad de reacción en la superficie del coque en kmol/m<sup>3</sup>·s, y

C<sub>CO<sub>2</sub></sub> es la concentración de CO<sub>2</sub> en la corriente gaseosa en kmol/m<sup>3</sup>.

En el caso de la difusión a través de los poros se utiliza la Ec. 1.6.

$$R_{2.2} = \frac{d_{\text{SCOQUE}}}{6} * \frac{\rho_{\text{SCOQUE}}}{M_C} * K_v * \eta_{\text{SCOQUE}} * C_{\text{CO}_2} \quad (1.6)$$

donde:

R<sub>2.2</sub> es la velocidad de la reacción por la difusión a través de los poros en kmol/m<sup>3</sup>·s,

ρ<sub>SCOQUE</sub> es la densidad del coque en kg/m<sup>3</sup>,

M<sub>C</sub> es el peso molecular del carbono en kg/kmol,

k<sub>v</sub> es la constante cinética de gasificación en m<sup>3</sup>/kmol·s, y

η es la difusividad efectiva por los poros.

La combinación de ambos mecanismos se expresa mediante la Ec. 1.7. Ésta simplemente establece el mecanismo cinético como un sistema de resistencias en serie.

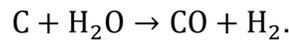
$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_{2.1}} + \frac{1}{R_{2.2}}} \quad (1.2)$$

donde:

R<sub>2</sub> es la velocidad global de la reacción de gasificación por CO<sub>2</sub> en kmol/m<sup>3</sup>·s.

### 1.6.3. REACCIÓN DE GASIFICACIÓN POR VAPOR DE AGUA

El agua ingresa al cubilote a través de dos vías. La primera es la humedad presente en los materiales de carga, la segunda es el vapor de agua que ingresa con el aire de soplado. La humedad de los materiales de carga, se evapora luego de ingresar al horno en una zona muy cercana a la puerta y sale con los gases en la chimenea, su efecto es despreciable [2]. El vapor de agua que ingresa en el aire de soplado llega directamente a la zona de combustión del horno y reacciona con el coque de acuerdo con la reacción [7].



De la misma manera como para la reacción de Boudouard, la cinética de la gasificación por vapor de agua está determinada por el transporte del reactante hasta la superficie de reacción y por la difusión del reactante a través de los poros; las velocidades para ambos mecanismos han sido establecidas como lo indican las Ecs. 1.8 y 1.9, respectivamente [7]:

$$R_{3.1} = K_1 A_{S\text{Coque}} C_{H_2O} \quad (1.8)$$

donde:

$R_{3.1}$  es la velocidad de la reacción de gasificación por vapor de agua en la superficie del coque en  $\text{kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ , y

$C_{H_2O}$  es la concentración de vapor de agua en la corriente gaseosa en  $\text{kmol/m}^3$ .

$$R_{3.2} = \frac{d_{S\text{Coque}}}{6Mc} * A_{S\text{Coque}} * 4.367 \times 10^7 \exp \left[ \frac{-32121}{T_{\text{gases}}} \right] * (C_{H_2O})^{0.58} \quad (1.9)$$

donde:

$R_{3.2}$  es la velocidad de la reacción de gasificación por vapor de agua debida a la difusión por los poros del coque en  $\text{kmol/m}^3\cdot\text{s}$ .

La combinación de ambos mecanismos en serie se presenta en la Ec. 1.10.

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{3.1}} + \frac{1}{R_{3.2}}} \quad (1.3)$$

donde:

$R_3$  es la velocidad global de la reacción de gasificación del coque por vapor de agua en  $\text{kmol/m}^3\cdot\text{s}$ .

## 1.7. ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE FORZADO

La selección del equipo de soplado es uno de los parámetros de mayor importancia para un adecuado funcionamiento del cubilote, el cual debe reunir las características apropiadas que dependen tanto del diámetro interno del horno como también de la carga a fundirse.

Existen factores que se deben tomar en consideración al hacer el análisis en la selección del equipo de soplado adecuado, estos son [6]:

- Factores que determinan el volumen y presión del aire:
  - ✓ Tipo y tamaño del horno de cubilote,
  - ✓ Relación de carga hierro-coque,
  - ✓ Régimen de fusión (normal o máximo),
  - ✓ Temperatura del hierro en el pico,
  - ✓ Altura de la cama de coque y la carga arriba de las toberas, y
  - ✓ Tamaño y calidad del coque.
- Factores que definen el tamaño del soplador:
  - ✓ Costo inicial y de operación,

- ✓ Localización del soplador con referencia al cubilote,
- ✓ Método de impulso,
- ✓ Altitud de la instalación, y
- ✓ Volumen y presión máxima para condiciones de fusión máximos.

### **1.7.1. TIPOS DE SOPLADORES PARA CUBILOTE**

Los tres sopladores más utilizados generalmente para la fusión de cubilotes son [6]:

- 1) De desplazamiento positivo o soplador lobular: Este tipo de soplador entrega un volumen definido de aire en cada revolución de sus paletas o lóbulos a cualquier presión requerida o a cualquier resistencia que hubiese al interior del cubilote dentro de las limitaciones del diseño del soplador y de su motor.
- 2) Soplador centrífugo o turbo soplador: Entrega aire a la presión de diseño por la acción centrífuga de uno o más impulsores de velocidad relativamente alta. La acción no es positiva ya que en cada momento existe una trayectoria abierta desde la descarga hasta la succión, en este tipo de soplador el consumo de fuerza varía directamente con el volumen estándar de aire entregado.
- 3) Soplador ventilador: Opera de acuerdo al mismo principio que el soplador centrífugo, aunque posee una eficiencia más baja. Este tipo de soplador es más ampliamente usado para suministrar aire de soplado a cubilotes pequeños, en los que la operación no es continua y en los que el bajo costo inicial es la primera consideración. La presión varía con la densidad del aire, entonces el ventilador soplador deberá ser capaz de brindar la máxima presión necesaria para el cubilote en un día caluroso.

### **1.7.2. DUCTOS DEL AIRE**

La disposición de los ductos debe ser de manera tal que se obtenga las mejores características en cuanto a flujo y para mantener la fricción dentro de un intervalo mínimo de codos y vueltas, además las tuberías y sus conexiones deben ser lo más estancas posibles, ya que un sistema con pérdidas o fugas dará problemas de fusión. Además, se tiene que considerar que los ductos redondos son preferibles a los cuadrados o rectangulares, principalmente cuando se hace uso de sopladores de desplazamiento positivo, ya que los pulsos de aire tienden a causar rupturas y por ende fugas en los ductos.

Es indispensable ventilar la caja de aire durante períodos cortos de parada, cuando no existe presión de aire en esta, existen un sin número de válvulas especiales del tipo trampa que se utilizan entre la caja de viento y cada una de las toberas para ventilar las mismas al bajar la presión a cero en la caja de viento [6].

### **1.8. MATERIALES REFRACTARIOS**

Un material refractario es capaz de resistir las condiciones del medio en el que está inmerso sin alteraciones importantes en sus propiedades físico-químicas, durante un período económicamente rentable. En las condiciones del medio no incluyen únicamente el efecto de la temperatura, sino también la resistencia al ataque por materiales fundidos, al choque térmico y, en general, todos los efectos a los que estará sometido el material en servicio.

También, los materiales refractarios se definen como aquellos cuyas propiedades permiten que pueda soportar temperaturas muy elevadas, sin embargo, estos deben de soportar una temperatura en específica sin sufrir ningún tipo de deterioro en sus condiciones internas, como por ejemplo la corrosión. Esta condición permite que los materiales refractarios sean utilizados en todos los hornos de fabricación, ya sea en las refinerías y las industrias

químicas, metalúrgicas, de vidrios y cerámicas. El material refractario conocido por excelencia es la Cerámica. Estos materiales están formados por partículas diminutas de óxido, las cuales están unidas a otro material de características refractarias, pero más finas.

Los ladrillos refractarios se utilizan para revestir parrillas, calderas, ollas de aceración, hornos rotatorios de cementeras, entre otros, los cuales deben de estar pegados con mortero refractario, estos se pueden adherir con firmeza si se utiliza cemento refractario.

Se debe tener suma precaución con estos ladrillos, ya que si se llegan a utilizar con otro material pueden llegar a explotar. Estos al igual que el mortero refractario, además de cumplir con su función que es refractar, mantienen el calor. Lo que más se destaca del ladrillo es que se fabrican en gran variedad de calidades que van desde el 36% hasta el 99% de contenido de alúmina para soportar diferentes temperaturas y usos distintos.

Los ladrillos que se utilizan para recubrir hornos de fundición de acero son los ladrillos de dióxido de silicio, ahora bien, cuando algunos ladrillos se comienzan a licuar estos trabajan a una temperatura superior de 1,650 °C. Estos ladrillos se forman bajo altas presiones y se queman a temperaturas muy elevadas, salvo los ladrillos que se ligan químicamente y los que se aglutinan con alquitrán, resinas, los cuales no se queman, sino cuando están instalados en el horno, es cuando se curan [8].

### **1.8.1. TIPOS DE REFRACTARIOS**

Los refractarios más comúnmente utilizados son:

- ✓ Refractarios ácidos: Incluyen la arcilla de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla. La sílice pura a veces se utiliza para contener metal derretido. Los refractarios de arcilla por lo general son relativamente débiles, aunque de

menor costo. Contenidos de alúmina por arriba de ~50% constituyen los refractarios de alta alúmina [8].

- ✓ Refractarios básicos: Varios refractarios se basan en la magnesia o periclasa (MgO). El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractariedad, buena resistencia al ataque por los entornos que a menudo se encuentran en los procesos de fabricación de acero. Típicamente, los refractarios básicos son más costosos que los refractarios ácidos [8].
- ✓ Refractarios neutros: Normalmente incluyen la cromita y la magnesita, pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que uno ataque al otro [8].
- ✓ Refractarios especiales: El carbono (grafito), es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando operan en atmósfera no oxidante. Estos materiales refractarios incluyen la zirconia ( $ZrO_2$ ), el zircón ( $ZrO_2 \cdot SiO_2$ ) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros [8].
- ✓ Ladrillos refractarios con alto contenido en alúmina: Estos ladrillos tienen un coeficiente de dilatación térmica muy bajo, por lo cual están preparados para soportar altas temperaturas y luego se enfrían sin llegar a presentar dilataciones o deformaciones significativas que lo afecten. Son ladrillos de alto costo porque son escasas las arcillas con que se fabrican [9].
- ✓ Ladrillos refractarios con alto contenido de sílice: Estos ladrillos pueden soportar altas temperaturas, y a diferencia de los anteriores, se dilatan de manera considerable cuando se someten a etapas alternas y continuas de calor y frío. Dichos cambios bruscos de temperatura los afecta de tal modo, que finalmente se desintegran, si se emplean en aquellos sitios en donde las temperaturas altas son continuas [9].

### 1.8.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS

Las características de los ladrillos refractarios son [9]:

- ✓ El color que adoptan estos ladrillos se debe al proceso de fabricación, los cuales pueden ser amarronados o pardos blancuzcos;
- ✓ Piezas de alta densidad;
- ✓ Poseen textura lisa y homogénea;
- ✓ Baja conductividad térmica; y
- ✓ Alto punto de fusión.

### 1.8.3. CONDICIONES Y REQUERIMIENTOS DE OPERACIÓN

Los requerimientos para el refractario del horno de cubilote están entre los más severos encontrados en la práctica metalúrgica, y aun bajo las condiciones mejor controladas será necesario reparar el revestimiento refractario, esto es generalmente, resultado de abrasión, calor, esfuerzo mecánico y actividad química [6].

Desde el punto de vista de condiciones de servicio el cubilote está dividido en cuatro zonas que dispuestas por orden de severidad decreciente que son [6]:

- ✓ **Zona de fusión:** Es la zona comprendida entre las toberas hasta la altura de la cama de coque, esta zona es la que se halla sometida a las más altas temperaturas, justo por debajo de esta zona existen las condiciones más severas ya que en esta parte existe la oxidación del hierro y otros elementos, además los óxidos reaccionan con la escoria que es formada por la acción del fundente de la caliza, cenizas del coque, arena y en cierto grado por el propio revestimiento refractario.
- ✓ **Zona de crisol:** En ésta la temperatura es más baja que en la zona de fusión y el refractario está en contacto solamente con el hierro fundido, la escoria y el coque relativamente estático, de manera que los efectos de la temperatura

y la abrasión producida por el aire soplado y los materiales de carga no son tan serios como en la zona de fusión.

- ✓ **Zona de carga:** El revestimiento en la zona de carga no está sujeto a temperaturas muy altas ni al ataque de la escoria, pero la abrasión es muy severa, tanto por los impactos de la operación de carga como también por la fricción de la carga al moverse hacia abajo.
- ✓ **Zona sobre la puerta de carga:** Arriba de la puerta de carga las condiciones no son severas, siendo la función del revestimiento solamente la de proteger la coraza de calor de los gases de escape del cubilote. En esta zona tienen una cierta acción los elementos climáticos, los cuales tendrán efecto según el tipo de protección de que disponga la chimenea del cubilote, así como las condiciones climáticas en las que está operando el cubilote.

#### **1.8.4. AISLAMIENTO**

El cubilote no se presta al aislamiento por dos razones [6]:

- ✓ La cantidad de calor que se puede ahorrar por las pérdidas por radiación a través de la coraza es pequeña comparada con la gran cantidad acarreada por los gases de escape a través de la chimenea.
- ✓ La resistencia de la estructura de refractario disminuirá a causa de la temperatura excesiva, ya que la pérdida de revestimiento y al mayor gradiente de calor a través del mismo.

## **2. DISEÑO DEL HORNO DE CUBILOTE**

El horno de cubilote como todo equipo posee parámetros para su diseño, así en el presente diseño se tomarán valores para obtener un horno pequeño y desmontable a través de pernos para su proceso de mantenimiento.

### **2.1. PROPUESTA DEL HORNO DE CUBILOTE**

El horno de cubilote está conformado por una coraza cilíndrica de acero revestida con material refractario que estará conectado a un ventilador hacia las toberas para la admisión del aire. La característica principal de la propuesta del horno es que se pueda desmontar a través de pernos en dos partes para facilitar el mantenimiento interno. El diseño se enfocará a un horno pequeño por lo cual no tendrá un recuperador de calor, porque se requiere una chimenea de altura elevada y una tasa de transferencia de calor necesaria para que los gases de escape lleguen a la chimenea y se puedan recuperar.

Entre las ventajas del horno de cubilote se tienen:

- ✓ Desmontar el horno de cubilote en dos partes, facilitará el mantenimiento y reparación de la parte interna del horno.
- ✓ Bajos costos de mantenimiento.

Por otro lado, entre las desventajas de un horno de cubilote se tienen:

- ✓ El horno de cubilote tendrá dimensiones pequeñas por lo que no puede tener un recuperador de calor.
- ✓ La cantidad de fundente debe ser la adecuada para no contaminar las piezas fundidas.

## 2.2. DIÁMETRO INTERNO

El diámetro interno es el parámetro más importante en el diseño de un horno de cubilote. Se han realizado diseños de horno con distintos tipos de diámetro interno y forma de colocar los ladrillos refractarios [6].

Se usarán ladrillos rectangulares unidos con mortero refractario para que el espacio entre ellos sea el mínimo. En el presente diseño de horno de cubilote de este trabajo se tomará el valor de diámetro interno igual a 25 cm.

$$D_i = 25 \text{ cm.}$$

## 2.3. ALTURA DEL HORNO

La altura (H) (ver, Fig. 2.1), es la distancia de la solera a la puerta de carga. Para determinar su valor se utiliza la Ec. 2.1 [1]:

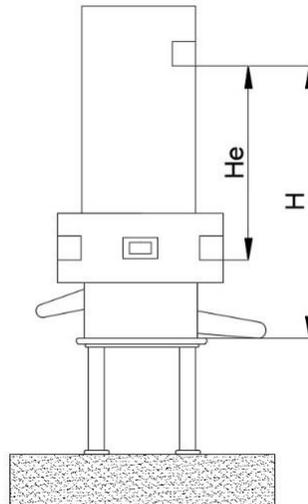


Fig. 2.1. Altura del horno y altura efectiva del horno.

$$H = F_d (D_i) \tag{2.1}$$

donde:

$F_d$  es un factor o coeficiente de diámetro que toma el intervalo de 5 a 7 para los hornos desde los más pequeños a los más grandes, y  $d_i$  es el diámetro interno del horno.

Así, dado que el horno tendrá las dimensiones más pequeñas por lo que se escoge el valor de 5.

Sustituyendo en la Ec. 2.1, se obtiene:

$$H = 5 \cdot d_i$$

$$H = 5 \cdot 25 \text{ cm}$$

$$H = 125 \text{ cm.}$$

## 2.4. ALTURA EFECTIVA DEL HORNO

La altura efectiva ( $H_e$ ) (ver, Fig. 2.1), es aquella que se toma desde el nivel de las toberas hasta la puerta de carga, la cual se calcula mediante la Ec. 2.2 [1]:

$$H_e = F_A D_i \quad (2.2)$$

donde:

$F_A$  es un factor de altura que toma el intervalo de 4 a 6 para hornos de cubilote de pequeños a grande.

Tomando un  $F_A$  igual a 4 y sustituyendo en la Ec. 2.2, se obtiene.

$$H_e = 4 \cdot 25 \text{ cm}$$

$$H_e = 100 \text{ cm.}$$

## 2.5. TOBERAS

A través del sistema de toberas, se ingresa el aire necesario para quemar el material combustible en el horno de cubilote. Todas las toberas se deben

colocar en un mismo plano, ya que colocadas a diferentes niveles perturbarán la combustión.

El número de toberas ( $N_t$ ) a colocar en el horno se obtiene de la Tabla 2.1, en la cual observa que el número de toberas está en función del diámetro interno del horno ( $D_i$ ). Así, se ingresa teniendo en consideración el valor del diámetro interno del cubilote y se obtiene el número de toberas.

Tabla 2.1. Número de toberas en función del diámetro interno del cubilote [10].

$D_i$ , mm	Número de toberas, $N_t$
500	2
600	3
700	
800	
900	
1000	4
1100	
1200	
1300	
1400	5
1500	
1600	

Dado que este horno de cubilote tendrá un diámetro interno de 250 mm, y dado que se aproxima el valor más pequeño de diámetro que es de 500 mm, por lo tanto, se obtienen dos (2) toberas.

Con respecto a la determinación del área de cada tobera ( $S_{\text{tobera},n}$ ), ésta se obtiene mediante la Ec. 2.3, así:

$$S_{\text{tobera},n} = \frac{S_{\text{toberas}}}{N_t} \quad (2.3)$$

donde:

$S_{\text{toberas}}$  es el área total de las toberas del horno en  $\text{cm}^2$ .

Luego, para determinar el área total de las toberas se utiliza la Ec. 2.4, así:

$$S_{\text{toberas}} = F_s * S_{\text{nivel de tobera}} \quad (2.4)$$

donde:

$F_s$  es un factor de sección que está en el intervalo de 1/4 a 1/8, para el caso el factor de sección más usual es 1/5 [2].

$S_{\text{nivel de toberas}}$  es el área del horno a nivel de toberas en  $\text{cm}^2$ .

Posteriormente, para determinar el área del horno a nivel de toberas se utiliza la Ec. 2.5, así:

$$S_{\text{nivel de toberas}} = \frac{\pi}{4} * D_i^2 \quad (2.5)$$

donde:

$D_i$  es el diámetro interno del horno, el cual es de 25 cm.

Sustituyendo en la Ec. 2.5 y resolviendo, se obtiene:

$$\begin{aligned} S_{\text{nivel de toberas}} &= \frac{\pi}{4} * D_i^2 \\ S_{\text{nivel de toberas}} &= \frac{\pi}{4} * (25 \text{ cm})^2 \\ S_{\text{nivel de toberas}} &= 490.87 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

Posteriormente, sustituyendo en la Ec. 2.4 y resolviendo, se obtiene:

$$\begin{aligned} S_{\text{toberas}} &= \left(\frac{1}{5}\right) 490.87 \text{ cm}^2 \\ S_{\text{toberas}} &= 98.17 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

Luego, sustituyendo en la Ec. 2.3, queda:

$$\begin{aligned} S_{\text{toberas,n}} &= \frac{98.17}{2} \\ S_{\text{toberas,n}} &= 49.09 \text{ cm}^2. \end{aligned}$$

Finalmente, al haber calculado el área de cada tobera es posible determinar el diámetro de cada tobera mediante la Ec. 2.6.

$$d_{\text{tobera},n} = \sqrt{\frac{4S_{\text{tobera},n}}{\pi}} \quad (2.6)$$

donde:

$d_{\text{tobera},n}$  es el diámetro de la tobera en cm.

Así, sustituyendo en la Ec. 2.6, queda:

$$d_{\text{tobera},n} = \sqrt{\frac{4(49.09 \text{ cm}^2)}{\pi}}$$

$$d_{\text{tobera},n} = 7.9 \text{ cm.}$$

En el mismo sentido, para el diseño se debe considerar una inclinación de las toberas de  $8^\circ$  respecto a la horizontal hacia abajo [7].

## 2.6. ALTURA DEL CRISOL

Luego de determinar el número de toberas y el diámetro de cada una es oportuno determinar la altura del crisol (ver, Fig. 2.2), la cual es una dimensión que también depende del diámetro interno del horno. Así, para calcular la altura del crisol se utiliza la Ec. 2.7.

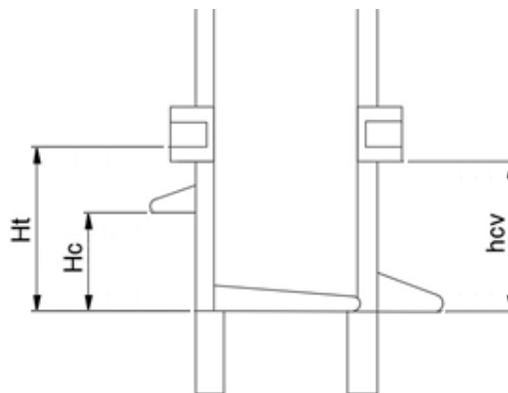


Fig. 2.2. Altura del crisol, altura de tobera y altura de la caja de viento.

$$H_c = F_c D_i \quad (2.7)$$

donde:

$H_c$  es la altura del crisol, y

$F_c$  es un factor de la altura de crisol que toma el intervalo de 0.8 a 1. Se usará el valor de 0.8 para obtener los cálculos de un horno de cubilote pequeño [6].

Sustituyendo en la Ec. 2.6, se obtiene:

$$H_c = (0.8)(25 \text{ cm})$$

$$H_c = 20 \text{ cm.}$$

Finalmente, es importante recalcar que se estima que en el crisol el metal líquido ocupará un 46% del volumen.

## **2.7. CONDUCTOS DE AIRE**

Se denomina el conducto de aire (ver, Fig. 2.3) a la tubería que va desde el ventilador centrífugo hasta la caja de viento del horno de cubilote. Esta tubería debe ser recta y de sección circular, esto garantizará una pérdida mínima de presión del aire necesario para la combustión.

Su dimensionamiento se estima que sea 1.15 veces el área de las toberas por lo tanto se utiliza la Ec. 2.8 [2]:

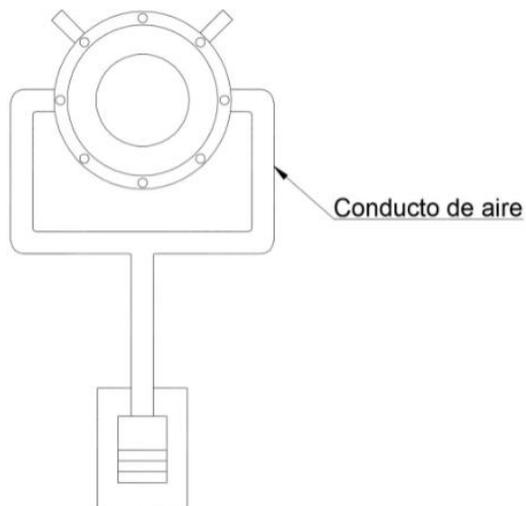


Fig. 2.3. Conductos de aire.

$$A_c = 1.15 * S_{\text{toberas}} \quad (2.8)$$

donde:

$A_c$  es el área del conducto del aire.

Sustituyendo, queda:

$$A_c = 1.15 * 98.17 \text{ cm}^2$$

$$A_c = 112.9 \text{ cm}^2.$$

La salida del ventilador a usar será cuadrada por lo que cada lado se puede obtener de la Ec. 2.9:

$$A_c = L_c^2 \quad (2.9)$$

donde:

$L_c$  es el lado de la salida del conducto del aire.

Sustituyendo el valor del área en la Ec. 2.9, se obtiene:

$$L_c = \sqrt{A_c}$$

$$L_c = \sqrt{112.9}$$

$$L_c = 10.63 \text{ cm.}$$

## 2.8. CAJA DE VIENTO

La caja de viento se sitúa a nivel de las toberas (ver, Fig. 2.4), rodea al horno de cubilote, recibe y redistribuye el aire para la combustión a través de las toberas. Además, ayuda al precalentamiento del aire debido a la radiación causada por el horno de cubilote. La sección de la caja o anillo de viento puede ser cuadrada o circular, se prefiere circular para evitar la acumulación de suciedad. El valor de la sección de la caja de viento es el doble de los conductos de aire, Ec. 2.10.

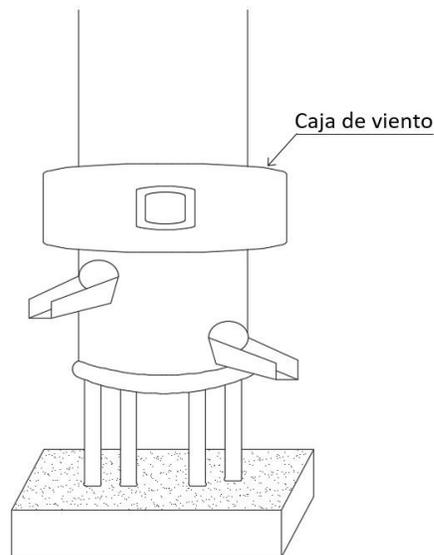


Fig. 2.4. Caja de viento.

$$A_{cv} = 2A_c \quad (2.10)$$

Así, sustituyendo en la Ec. 2.10, se obtiene:

$$A_{cv} = 2 * 112.9$$

$$A_{cv} = 225.8 \text{ cm}^2.$$

## 2.9. ALTURA DE LA CAJA DE VIENTO

La altura de la caja de viento ( $h_{cv}$ ) sobre el nivel de la solera tal como se observa en la Fig. 2.2, se calcula con la Ec. 2.11:

$$h_{cv} = \sqrt{2A_{cv}} \quad (2.11)$$

Así, sustituyendo en la Ec. 2.11, se obtiene:

$$h_{cv} = \sqrt{2 * 225.8}$$
$$h_{cv} = 21.3 \text{ cm.}$$

## 2.10. ALTURA DE LAS TOBERAS

La ubicación de las toberas depende de la capacidad del crisol del horno de cubilote. Se recomienda que la hilera de toberas se debe colocar de ~25 a 50 cm del fondo de la solera del horno en cubilotes pequeños (ver, Fig. 2.2).

La altura sobre el nivel de la solera será de:

$$H_t = 25 \text{ cm.}$$

## 2.11. ORIFICIO DE ESCORIADO

La escoria es menos densa que el metal fundido, por lo cual flota en el crisol, y se considera que el volumen de la fundición es 20%, por lo cual se necesita un orificio para evacuarla. Este orificio de escoriado se dispone a una altura igual al 80% de la línea de las toberas (ver, Fig. 2.5), de manera que cuando se detecte metal a la altura de las toberas esta no es más que escoria y tiene que

ser evacuada, para hornos de cubilote pequeño el diámetro del orificio debe estar comprendido entre 0.03 a 0.05 m, en este caso se toma el valor de 0.03 m [6].

La altura del orificio de escoria está dada por la Ec. 12:

$$C = 0.8 * H_t \quad (2.12)$$

Sustituyendo la altura de toberas en la Ec. 2.12, queda:

$$C = 0.8 * 25$$

$$C = 20 \text{ cm.}$$

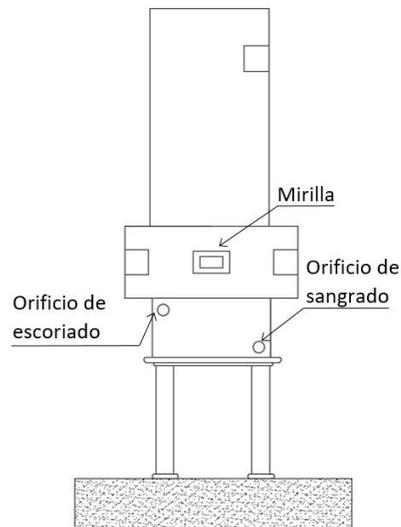


Fig. 2.5. Orificio de escoriado, sangrado y mirilla.

## 2.12. PIQUERA DE ESCORIADO

La piqueta del escoriado no tiene un cálculo para definir su longitud, pero debe ser lo suficientemente largo para evacuar la escoria flotante en el metal fundido, su inclinación puede variar entre 15 y 30°. Así, el diseño tendrá una longitud de 20 cm y 20° de inclinación, tal como se presenta en la Fig. 2.6.

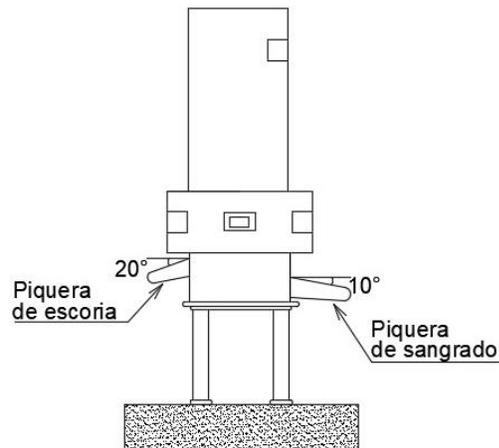


Fig. 2.6. Piqueta del escoriado y sangrado.

### 2.13. ORIFICIO DE SANGRADO

El orificio de sangrado se halla ubicado al nivel de la solera (ver, Fig. 2.5), para hornos de cubilote pequeños el diámetro del orificio debe estar entre 0.02 a 0.04 m [6].

Se tomará un valor intermedio de 0.03 m.

### 2.14. PIQUERA DE SANGRADO

La piqueta de sangrado o colada se coloca a nivel de la solera del horno (ver, Fig. 2.6), debe tener una inclinación de 10°.

Se tomó un valor a 0.20 m de largo de la piqueta y una inclinación de 10°.

### 2.15. MIRILLA

Las mirillas son dos cuerpos a manera de ventana (ver, Fig. 2.5), una se halla fijo sobre la caja de aire y dispuesta a nivel de las toberas en tanto que la

otra se despliega sobre la primera, estas se utilizan para poder observar si el coque de la carga está encendido durante la operación del horno, así como para picar el coque y permitir el paso del aire hacia el interior de la cámara de combustión, también son de vital importancia cuando se presentan atascos de metal fundido en las toberas, entonces por medio de una barra se puede picar y limpiar las toberas de cualquier impureza.

Estas no tienen una forma determinada, pero si deben estar lo mejor dispuestas para impedir que se registren fugas de aire por las mismas.

## 2.16. CAUDAL

La cantidad de aire que se inyecta a un horno de cubilote, viene dada por la relación de hierro y coque, junto con el diámetro interno del horno, y la producción horaria del mismo. Así, es normal que un cubilote debe consumir ~100 m<sup>3</sup> de aire por cada metro cuadrado de sección transversal del horno (a nivel de toberas) [6].

El cálculo del caudal de aire para que se produzcan las reacciones en el cubilote activadas por el aire, en las cuales se producen cantidades específicas de CO<sub>2</sub> y CO dentro de ciertos intervalos y cuya eficiencia está estrechamente relacionada con la de estos gases.

Para calcular el caudal de aire teórico se harán uso de las siguientes relaciones:

$$\frac{\text{kg aire}}{\text{min}} = \frac{\text{kg carbón}}{60 \text{ min}} * \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

$$\frac{\text{kg carbón}}{\text{min}} = \frac{\text{kg hierro}}{60 \text{ min}} * \frac{\text{kg coque}}{\text{kg hierro}} * \frac{\text{kg aire}}{\text{kg coque}}$$

$$\frac{\text{kg aire}}{\text{min}} = \frac{\text{kg hierro}}{60 \text{ min}} * \frac{\text{kg coque}}{\text{kg hierro}} * \frac{\text{kg carbón}}{\text{kg coque}} * \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

$$\frac{\text{kg aire}}{\text{min}} = \frac{\text{Produccion horaria}}{60 \text{ min}} * \text{real} \frac{\text{coque}}{\text{metal}} * \frac{\text{Contenido de carbón}}{\text{Contenido de coque}} * \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

Las condiciones de operación del cubilote son:

Relación de coque/metal = 1/8

Producción horaria del horno = 50 kg/h

Contenido de carbón en coque = 0.90%

kg de aire / kg de carbón = 8.35 para un 12% de CO<sub>2</sub> y 14.8% de CO, los cuales son los porcentajes establecidos para un cubilote que opera en condiciones normales.

Los valores de contenido de carbono en coque y la relación kg aire / kg carbón, se tomaron del libro el horno de cubilote y su operación [6].

La relación para calcular los kilogramos de aire por minuto se calcula con la Ec. 2.13:

$$\frac{\text{kg aire}}{\text{min}} = \frac{\text{Produccion horaria}}{60 \text{ min}} * \text{real} \frac{\text{coque}}{\text{metal}} * \frac{\text{Cont de carbón}}{\text{Cont de coque}} * \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}} \quad (2.13)$$

Sustituyendo los valores en la Ec. 2.13, se obtiene:

$$\frac{\text{kg aire}}{\text{min}} = \frac{50}{60} * \frac{1}{8} * 0.9 * 8.35$$

$$\frac{\text{kg aire}}{\text{min}} = 0.78.$$

El caudal necesario para alimentar el horno se obtiene con la Ec. 2.14, así al considerar el 5% de pérdidas en las tuberías y la caja de aire, se obtiene:

$$Q = \frac{\frac{\text{kg aire}}{\text{min}}}{\rho_{\text{aire}}} * 1.05 \quad (2.14)$$

donde:

$\rho_{\text{aire}}$  es la densidad del aire.

Sustituyendo en la Ec. 2.14, se obtiene:

$$Q = \frac{0.78}{1.1839} * 1.05$$

$$Q = 0.69 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

$$Q = 0.01157 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

## 2.17. VENTILADOR CENTRÍFUGO

El ventilador centrífugo es un soplador que gira a velocidad constante y trabaja a bajas presiones. El objetivo principal es impulsar cierto flujo de aire adentro del horno de cubilote. El funcionamiento de este ventilador debe vencer las pérdidas de presión originadas en el circuito de ventilación, se recomienda un circuito recto. En la Tabla 2.2 se observa la potencia necesaria del ventilador para cada diámetro interno [6].

Dado que el horno de cubilote del presente trabajo es de menor diámetro que los especificados en la Tabla 2.2, se tomará un ventilador con la potencia de 1 Hp, con las especificaciones necesarias como la salida y el caudal de aire.

Algunas de las recomendaciones que se deben seguir para un mejor rendimiento del ventilador en el horno de cubilote son:

- ✓ La entrada del conducto de aire a la caja de aire del horno, debe ser tangente,
- ✓ Utilizar válvula de regulación del flujo (sólo para ventiladores centrífugos),
- ✓ Debe estar alejado de los equipos de medición,
- ✓ El equipo de soplado debe estar en un lugar aireado, sin comunicación con el ambiente polvoriento de la fundición, y
- ✓ Ninguna sección del conducto puede ser menos que el diámetro de salida del equipo soplador.

Tabla 2.2. Potencia de ventilador en función al diámetro interno [2].

D <sub>i</sub> , mm	Potencia,		
	CV	kW	HP
400	3	2.00	2.96
450	4	3.00	3.94
500	5	3.73	4.93
550	6	4.50	5.92
600	7	5.22	6.90
650	9	6.70	8.87
700	11	8.20	10.85
800	15	11.20	14.79
900	22	16.40	21.69
1000	29	21.60	28.59

## 2.18. REVESTIMIENTO REFRACTARIO

El revestimiento refractario del horno debe cumplir la función de retener la mayor cantidad de calor producida en la cámara de combustión, necesaria para la fusión del metal (ver, Fig. 2.7).

El material refractario para su diseño en el presente trabajo, es una combinación de mortero refractario combinado con ladrillo refractario más una capa de aislante refractario alrededor de la capa de mortero refractario (ver, Fig. 2.7), que a su vez sirve como aislante y para el alivio de esfuerzos generados en el refractario por las altas temperaturas.

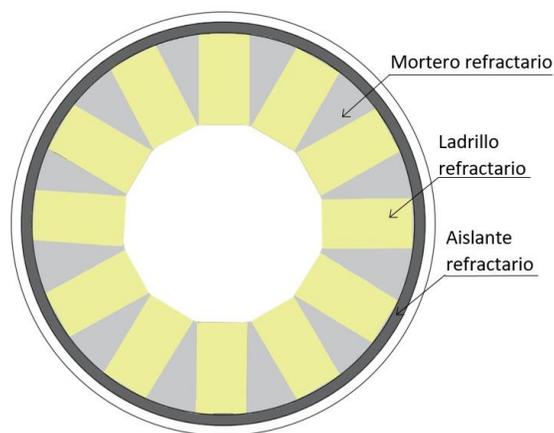


Fig. 2.7. Revestimiento refractario.

Las características del cemento refractario son [11]:

- ✓ Cemento refractario marca HarbisonWalker International,
- ✓ Refractario ácido con 60% de contenido de alúmina,
- ✓ Temperatura máxima de servicio 1,649 °C, y
- ✓ Conductividad térmica a la temperatura de servicio de 0.04 W/m·K.

Las características del mortero refractario son [11]:

- ✓ Cemento refractario marca HarbisonWalker International,
- ✓ Refractario ácido con 60% de contenido de alúmina, y
- ✓ Temperatura máxima de servicio 1,650 °C.

Las características del ladrillo refractario de alúmina son [11]:

- ✓ Los ladrillos refractarios con un contenido de alúmina es un material refractario de silicato de alúmina con un contenido de óxido de alúmina;
- ✓ El uso de los ladrillos refractarios de alúmina es ampliamente usado en los hornos, calderas y equipos térmicos;
- ✓ Temperatura de refractariedad es 1,770 °C;
- ✓ Conductividad térmica a la temperatura de servicio 0.08 W/m·K.

Características de la capa aislante refractaria son [11]:

- ✓ Temperatura máxima de servicio 1,425 K,
- ✓ Densidad típica 385 kg/m<sup>3</sup>, y
- ✓ Conductividad térmica a la temperatura de servicio 0.1 W/m·K.

En el mismo sentido, la velocidad de los gases en el interior de un horno de cubilote se obtiene a partir de la Tabla 2.3, en la cual se presenta que para un horno pequeño y para altas temperaturas, la velocidad a través de los canales de humos y respiros debe ser baja de alrededor de 5.58 m/s, así se ha de evitar una presión excesiva en el horno, en tal forma que se evite picos no deseados de temperatura y arrastre de partículas apreciables al exterior del mismo [12].

Tabla 2.3. Velocidades de gases en las chimeneas.

Temperatura en la cuba, °C	649			871			1204		
Altura, m	0.91	2.44	60.96	0.91	2.44	60.96	0.91	2.44	60.96
Tamaño de la chimenea, m	Velocidad máxima permitida en la chimenea y en la cuba, m/s								
0.114 x 0.114	4.24	5.49	6.95	4.81	6.31	8.04	5.58	7.34	9.36
0.114 x 0.228	4.30	5.67	7.47	4.91	6.55	8.62	5.70	7.68	10.06
0.228 x 0.228	4.39	5.91	8.05	5.00	6.83	9.30	5.82	7.98	10.91
0.457 x 0.457	4.45	6.16	8.72	5.09	7.10	10.06	5.91	8.32	11.86

Para el cálculo del coeficiente de convección de los gases en el interior del horno, se calcula el número de Reynolds mediante la Ec. 2.15 para determinar el tipo de flujo.

$$Re_D = \frac{\rho * U_m * D_i}{\mu} \quad (2.15)$$

donde:

$Re_D$  es el número de Reynolds,

$\rho$  es la densidad de los gases en el interior del horno,

$U_m$  es la velocidad de los gases en el interior del horno,

$D_i$  es el diámetro interno del horno, y

$\mu$  es la viscosidad de los gases en el interior del horno.

Así, estos valores a temperatura de 1,300 °C son [4]:

$$U_m = 5.58 \text{ m/s}$$

$$\rho = 0.2216 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 576.71 \times 10^{-7} \text{ Ns/m}^2$$

Sustituyendo los valores en la Ec. 2.15, se determina el número de Reynolds.

$$Re_D = \frac{0.2216 * 5.58 * 0.25}{576.71 \times 10^{-7}}$$

$$Re_D = 5360.27$$

Con  $Re = 5360.27 > 2300$ , el flujo es turbulento.

El número de Nuselt se obtiene de la Ec. 2.16 en función del número de Reynolds y el número de Prant.

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{(0.8)} Pr^{0.4} \quad (2.16)$$

donde:

$Nu_D$  es el número de Nuselt.

Pr es el Número de Prant.

Sustituyendo en la Ec. 2.16, se obtiene:

$$Nu_D = 0.023 (5360.27)^{(0.8)} (0.687)^{0.4}$$

$$Nu_D = 19.05.$$

El coeficiente de convección en el interior del horno se obtiene de la Ec. 2.17.

$$h_1 = Nu_D \frac{K}{D_i} \quad (2.17)$$

donde:

$h_1$  es el coeficiente de convección en el interior del horno, y

K es el coeficiente de conductividad térmica de los gases en el interior del horno.

Sustituyendo en la Ec. 2.17, se obtiene:

$$h_1 = 19.05 \frac{104.38 \times 10^{-3}}{0.25}$$

$$h_1 = 7.95 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}.$$

La resistencia térmica del sistema viene dada por la Ec. 2.18:

$$q_r = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_A L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_B L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi K_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_2}} \quad (2.18)$$

donde:

$q_r$  es la resistencia térmica del sistema;

$T_1$  es la temperatura máxima registrada en el interior del horno;

$T_4$  es la temperatura del medio ambiente;

$r_1$  es el radio interno de la cámara de fusión del horno;

$r_2$  es el radio exterior del mortero refractario;

$r_3$  es el radio exterior de la capa aislante refractario;

$r_4$  es el radio exterior del horno;

$L$  es la longitud comprendida entre la zona de reducción y fusión, sitio donde se registra la máxima temperatura del horno [6];

$K_A$  es la conductividad térmica a la temperatura máxima de servicios del mortero refractario;

$K_B$  es la conductividad térmica a la temperatura de servicio del aislante refractario;

$K_C$  es la conductividad térmica a la temperatura de servicio de la chapa metálica;

$h_1$  es el coeficiente de convección en el interior del horno; y

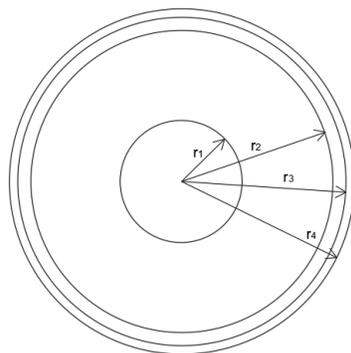
$h_2$  es el coeficiente de convección del aire a temperatura ambiente en lugares cerrados [6].

Así, las temperaturas en el interior del horno ( $T_1$ ) y en el exterior ( $T_4$ ) son:

$$T_1 = 1573 \text{ K}$$

$$T_4 = 293 \text{ K.}$$

Los radios en las secciones del horno (ver, Fig. 2.8) son:



$r_1$  es el radio de la cámara de combustión.

$r_2$  es el radio del ladrillo refractario.

$r_3$  es el radio del refractario y aislante.

$r_4$  es el radio exterior del horno.

$L_s$  es la altura de cada una de las secciones del horno.

Fig. 2.8. Radios de las secciones del horno.

Los valores de las dimensiones presentadas en la Fig. 2.8 son:  
 $r_1 = 0.125 \text{ m}$ ,  $r_2 = 0.2393 \text{ m}$ ,  $r_3 = 0.2643 \text{ m}$ ,  $r_4 = 0.2673 \text{ m}$  y  $L_s = 0.7 \text{ m}$   
 Las conductividades térmicas en cada sección del horno (ver, Fig. 2.9) es:

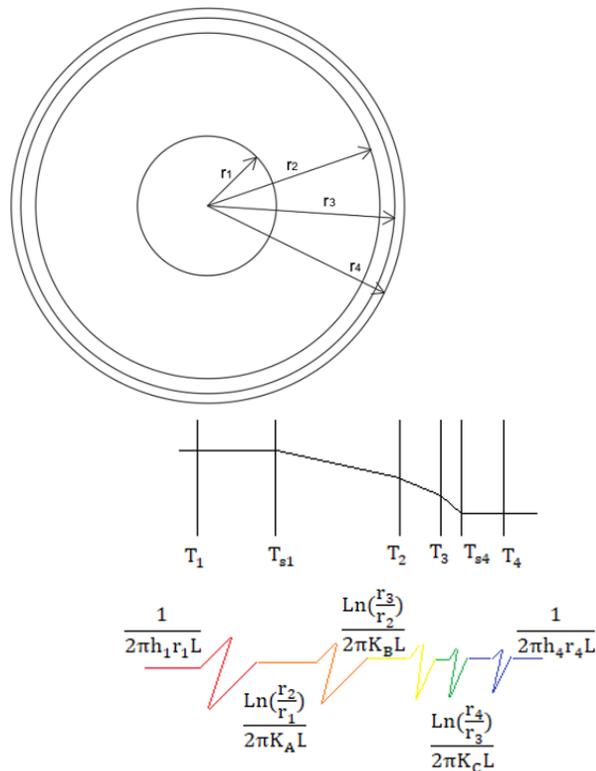


Fig. 2.9. Conductividad térmica en las secciones del horno.

$$K_A = 0.04 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$K_B = 0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$K_C = 79.5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

La longitud comprendida entre la zona de reducción y fusión es:

$$L = 0.5 \text{ m.}$$

El coeficiente de convección del aire a temperatura ambiente en lugares cerrados es:

$$h_2 = 3.06 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Sustituyendo en la Ec. 2.18, resulta:

$$q_r = \frac{(1573 - 293)}{\frac{1}{2\pi * 0.125 * 0.5 * 7.95} + \frac{\ln\left(\frac{0.222}{0.125}\right)}{2\pi * 0.04 * 0.5} + \frac{\ln\left(\frac{0.247}{0.222}\right)}{2\pi * 0.1 * 0.5} + \dots} \dots$$

$$\dots 1 / \left( \frac{\ln\left(\frac{0.25}{0.247}\right)}{2\pi * 79.5 * 0.5} + \frac{1}{2\pi * 0.25 * 0.5 * 3.06} \right)$$

$$q_r = 226.68 \text{ W.}$$

La relación térmica en cada sección del horno está dada por la Ec. 2.19:

$$q_r = \frac{T_1 - T_{s1}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1}} = \frac{T_{s1} - T_2}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_A L}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_B L}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi K_C L}} = \frac{T_4 - T_{s4}}{\frac{1}{2\pi r_4 L h_2}} \quad (2.19)$$

La temperatura en la pared interna del horno viene dada por la Ec. 2.20:

$$T_{s1} = T_1 - \frac{q_r}{2\pi r_1 L h_1} \quad (2.20)$$

donde:

$T_{s1}$  es la temperatura de la pared interna del refractario.

$T_1$  es la temperatura máxima registrada en el interior del horno.

Sustituyendo en la Ec. 2.20, se obtiene:

$$T_{s1} = 1573 - \frac{226.68}{2\pi * 0.115 * 0.5 * 7.95}$$

$$T_{s1} = 1494.07 \text{ K.}$$

La temperatura en la pared del refractario del horno viene dada por la Ec. 2.21:

$$T_2 = T_{s1} - \frac{q_r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_A L} \quad (2.21)$$

donde:

$T_2$  es la temperatura de la pared del refractario.

Sustituyendo en la Ec. 2.21, se obtiene:

$$T_2 = 1494.07 - \frac{226.68 \ln\left(\frac{0.222}{0.125}\right)}{2\pi * 0.04 * 0.5}$$

$$T_2 = 458 \text{ K.}$$

La temperatura en la capa del aislante refractario del horno está dada por la Ec. 2.22:

$$T_3 = T_2 - \frac{q_r \ln(r_3/r_2)}{2\pi K_B L} \quad (2.22)$$

donde:

$T_3$  es la temperatura de la capa del aislante refractario.

Sustituyendo en la Ec. 2.22, se obtiene:

$$T_3 = 458 - \frac{226.68 \ln(0.247/0.222)}{2\pi * 0.1 * 0.5}$$

$$T_3 = 381 \text{ K.}$$

La temperatura externa del horno viene dada por la Ec. 2.23:

$$T_{s4} = T_3 - \frac{q_r \ln(r_4/r_3)}{2\pi K_C L} \quad (2.23)$$

donde:

$T_{s4}$  es la temperatura externa del horno.

Sustituyendo en la Ec. 2.23, se obtiene:

$$T_{s4} = 381 - \frac{226.68 \ln(0.25/0.247)}{2\pi * 79.5 * 0.5}$$

$$T_{s4} = 380.98 \text{ K.}$$

## 2.19. DIÁMETRO EXTERIOR DEL HORNO

La envoltura exterior del horno de cubilote (chapa metálica), cumple la función de sostener toda la mampostería del horno, los esfuerzos a los cuales está sometida son muy pequeños, su espesor para hornos pequeños varía entre 3 a 5 mm. Para este diseño se escogerá una chapa metálica de 3 mm de espesor.

El diámetro exterior se calcula sumando los espesores del diámetro interno, el espesor del refractario, el espesor de la capa del aislante refractario y el de la chapa metálica.

Para el espesor del refractario, se ocupará el ancho del ladrillo refractario de 11.43 cm y para el espesor del aislante refractario se toma el valor de 0.025 m [6].

El diámetro externo se obtiene con la Ec. 2.24:

$$D_e = D_i + 2e_{ref} + 2e_{aisl} + 2e_{chapa} \quad (2.24)$$

donde:

$D_e$  es el diámetro exterior

$e_{ref}$  es el espesor del refractario de 0.1143 m.

$e_{aisl}$  es el espesor del aislante refractario es de 0.025 m.

$e_{chapa}$  es el espesor de la chapa es de 0.003 m.

Sustituyendo datos en la Ec. 2.24, se obtiene:

$$D_e = 0.25\text{m} + 2(0.1143 \text{ m}) + 2(0.025 \text{ m}) + 2(0.003 \text{ m})$$

$$D_e = 0.5346 \text{ m.}$$

## 2.20. APAGA CHISPAS

Este es un dispositivo de doble cono formado con placa de acero gruesa y perforada, soportada por patas de hierro colado.

Para el diseño del apaga chispas de la parte superior (ver, Fig. 2.10), fue necesario conocer el diámetro externo del horno de cubilote, se determinó el radio y altura del sombrero con la Ecs. 2.25 y 2.26, respectivamente.

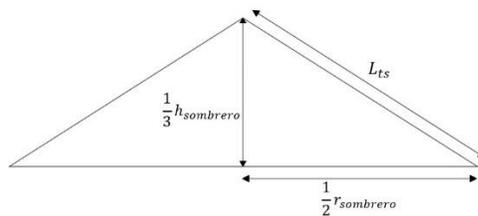


Fig. 2.10. Apaga chispa parte superior.

Para el radio y la altura del apaga chispa se utilizan las Ecs. 2.25 y 2.26, respectivamente.

$$r_{\text{sombrero}} = \frac{1.25D_e}{2} \quad (2.25)$$

$$h_{\text{sombrero}} = 0.5D_e \quad (2.26)$$

donde:

$r_{\text{sombrero}}$  es el diámetro de la parte superior del apaga chispa.

$h_{\text{sombrero}}$  es la altura de la parte superior del apaga chispa.

$D_e$  es el diámetro exterior del horno.

Sustituyendo el diámetro exterior en la Ec. 25, se obtiene:

$$r_{\text{sombrero}} = \frac{1.25(0.5346)}{2}$$

$$r_{\text{sombrero}} = 0.334 \text{ m.}$$

Sustituyendo el diámetro exterior en la Ec. 26, se obtiene:

$$h_{\text{sombrero}} = 0.5(0.5346)$$

$$h_{\text{sombrero}} = 0.267 \text{ m.}$$

El largo del techo superior se obtiene aplicando el teorema de Pitágoras  
Ec. 2.27:

$$L_{\text{ts}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}r_{\text{sombrero}}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}h_{\text{sombrero}}\right)^2} \quad (2.27)$$

donde:

$L_{\text{ts}}$  es el largo de la diagonal de la parte superior del apaga chispa.

Sustituyendo los valores en la Ec. 27, queda:

$$L_{\text{ts}} = \sqrt{(0.167)^2 + (0.089)^2}$$

$$L_{\text{ts}} = 0.189 \text{ m.}$$

Posteriormente, se calcula la parte inferior del apaga chispas (ver, Fig. 2.11), aplicando el teorema de Pitágoras.

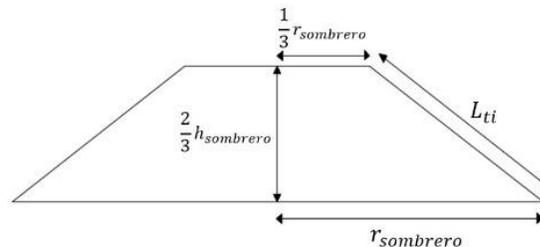


Fig. 2.11. Apaga chispa parte inferior.

El largo del techo inferior se obtiene con el uso del teorema de Pitágoras,  
según la Ec. 2.28:

$$L_{\text{ti}} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}r_{\text{sombrero}}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}h_{\text{sombrero}}\right)^2} \quad (2.28)$$

donde:

$L_{ti}$  es el largo de la diagonal de la parte inferior del apaga chispa.

Sustituyendo los valores en la Ec. 2.28, se obtiene:

$$L_{ti} = \sqrt{(0.222)^2 + (0.178)^2}$$

$$L_{ti} = 0.285 \text{ m.}$$

Por último, se une mediante barras soldadas (ver, Fig. 2.12). Así, su finalidad es retener la mayor cantidad posible de restos sólidos incandescentes que se disparan al exterior del horno.

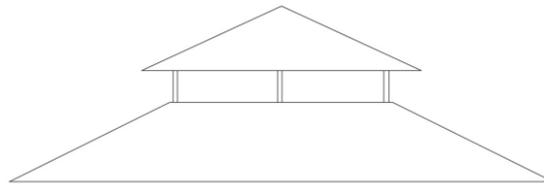


Fig. 2.12. Apaga chispa.

## 2.21. PESO TOTAL DEL HORNO

En el presente diseño se hará en dos (2) secciones iguales, una sección inferior y una sección superior con el fin de hacer el desmontaje del horno para su mantenimiento. Los diferentes radios de las secciones del horno (ver, Fig. 2.8) se tomarán en consideración para obtener el peso de cada sección.

El volumen total ( $V_{Total}$ ) de una sección del horno está dado por el volumen de un cilindro que está dado por la Ec. 2.29:

$$V_T = \pi r_4^2 * L_s \quad (2.29)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.29, queda:

$$V_T = \pi * 0.2673^2 * 0.7$$

$$V_T = 0.1571 \text{ m}^3.$$

El volumen total del refractario y aislante ( $V_3$ ) de la sección inferior está dado por la Ec. 2.30:

$$V_3 = \pi r_3^2 * L_s \quad (2.30)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.30, queda:

$$V_3 = \pi * 0.2643^2 * 0.7$$
$$V_3 = 0.1536 \text{ m}^3.$$

El volumen del refractario ( $V_2$ ) de una sección del horno está dado por la Ec. 2.31:

$$V_2 = \pi r_2^2 * L_s \quad (2.31)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.31 queda:

$$V_2 = \pi * 0.2393^2 * 0.7$$
$$V_2 = 0.1259 \text{ m}^3$$

El volumen de la cámara de combustión ( $V_1$ ) de una sección del horno está dado por la Ec. 2.32:

$$V_1 = \pi r_1^2 * L_s \quad (2.32)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.32, queda:

$$V_1 = \pi * 0.125^2 * 0.7$$
$$V_1 = 0.034 \text{ m}^3.$$

El volumen de la chapa metálica ( $V_{\text{chapa}}$ ) de la sección inferior del horno está dado por la Ec. 2.33:

$$V_{\text{Chapa}} = V_T - V_3 \quad (2.33)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.33 queda:

$$V_{\text{Chapa}} = 0.1571 - 0.1536$$

$$V_{\text{Chapa}} = 3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3.$$

El cálculo del peso de la chapa metálica está dado por la Ec. 2.34, así:

$$m_{\text{Chapa}} = \rho_{\text{Chapa}} * V_{\text{Chapa}} \quad (2.34)$$

donde:

$m_{\text{chapa}}$  es el peso de la chapa metálica del horno.

$\rho_{\text{Chapa}}$  es la densidad de la chapa metálica del horno.

Sustituyendo en la Ec. 2.34, queda:

$$m_{\text{Chapa}} = 7860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m_{\text{Chapa}} = 27.51 \text{ kg}.$$

El cálculo del volumen de la capa del aislante refractario está dado por la Ec. 2.35:

$$V_{\text{aisl}} = V_3 - V_2 \quad (2.35)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.35, queda:

$$V_{\text{aisl}} = 0.1536 \text{ m}^3 - 0.1259 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{aisl}} = 27.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3.$$

El cálculo del peso del aislante refractario está dado por la Ec. 2.36:

$$m_{\text{aisl}} = \rho_{\text{aisl}} * V_{\text{aisl}} \quad (2.36)$$

donde:

$m_{\text{aisl}}$  es el peso del aislante refractario del horno.

$\rho_{\text{aisl}}$  es la densidad del aislante refractario del horno.

Sustituyendo en la Ec. 2.36, queda:

$$m_{\text{aisl}} = 385 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 27.7 \times 10^{-3} \text{m}^3$$
$$m_{\text{aisl}} = 10.66 \text{ kg.}$$

El cálculo del volumen del refractario está dado por la Ec. 2.37:

$$V_{\text{Refractario}} = V_2 - V_1 \quad (2.37)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.37, queda:

$$V_{\text{Refractario}} = 0.1259 \text{m}^3 - 0.034 \text{m}^3$$
$$V_{\text{Refractario}} = 91.9 \times 10^{-3} \text{m}^3.$$

El cálculo del peso del mortero refractario está dado por la Ec. 2.38:

$$m_{\text{Refractario}} = \rho_{\text{Refractario}} * V_{\text{Refractario}} \quad (2.38)$$

donde:

$m_{\text{refractario}}$  es el peso del refractario del horno.

$\rho_{\text{refracatio}}$  es la densidad del refractario del horno.

Sustituyendo en la Ec. 2.38, queda:

$$m_{\text{Refractario}} = 1900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 91.9 \times 10^{-3} \text{m}^3$$
$$m_{\text{Refractario}} = 174.61 \text{ kg.}$$

El cálculo del peso de la sección superior está dado por la Ec. 2.39:

$$m_{\text{Seccion superior}} = m_{\text{Chapa}} + m_{\text{aisl}} + m_{\text{Refractario}} \quad (2.39)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.39 queda:

$$m_{\text{Seccion superior}} = 27.51 \text{ kg} + 10.66 \text{ kg} + 174.61 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Seccion superior}} = 212.78 \text{ kg.}$$

El peso total del horno se calcula por la Ec. 2.40:

$$m_{\text{Total}} = m_{\text{Seccion superior}} + m_{\text{Seccion Inferior}} \quad (2.40)$$

Teniendo en consideración que las dos secciones del horno se hicieron iguales para el desmontaje del horno.

$$m_{\text{seccion superior}} = m_{\text{Seccion Inferior}}$$

Sustituyendo en la Ec. 2.40, queda:

$$m_{\text{Total}} = 212.78 \text{ kg} + 212.78 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Total}} = 425.56 \text{ kg.}$$

## 2.22. PLACA BASE

La placa base es aquella que se encuentra ubicada en el fondo del horno a nivel de la solera, esta tiene que soportar todo el peso del refractario de la primera y segunda sección del horno (ver, Fig. 2.13).

La placa base tiene una configuración de anillo; es decir, una placa circular de radio  $a$  con agujero en el centro de radio  $b$ , la cual se la considera empotrada en su borde y cuya carga se halla repartida uniformemente.

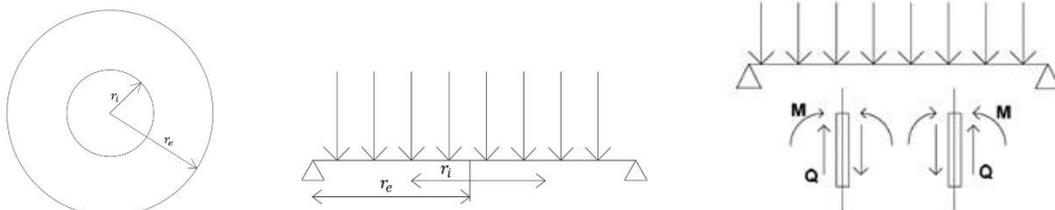


Fig. 2.13. Distribución de fuerzas y momentos con carga uniforme.

El cortante en una sección  $r_e > r > r_i$  se anula al no existir fuerzas verticales actuando sobre la placa, por lo que el momento de cortante se obtiene de la Ec. 2.41:

$$M_{pb} = \frac{m_{Total}}{16} (3 + \nu)(r_e^2 - r_i^2) \quad (2.41)$$

donde:

$M_{pb}$  es el momento cortante de la placa base

$m_{total}$  es el peso del horno, es cual es igual a 425.56 kg;

$\nu$  es el coeficiente de Poisson, para hierro dulce ( $\nu = 0.3$ )

$r_e$  es el radio exterior de la placa, el cual es igual a 0.2673 m; y

$r_i$  es el radio interior de la placa, el cual es igual a 0.125 m.

Sustituyendo en la Ec. 2.41, queda:

$$M_{pb} = \frac{425.56 \text{ kg}}{16} (3 + 0.3)(0.2673^2 - 0.125^2)$$

$$M_{pb} = 4.89 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

El momento de inercia para sección transversal de la placa base y se calcula mediante la Ec. 2.42, así:

$$I_{pb} = \frac{b_{placa1} h_{placa1}^3}{12} \quad (2.42)$$

donde:

$I_{pb}$  es el momento de inercia de la sección transversal de la placa base;

$b_{placa1}$  es la base de la placa, la cual es igual a 0.5346 m; y

$h_{placa1}$  es la altura de la placa,

Sustituyendo en la Ec. 2.42, queda:

$$I_{pb} = \frac{(0.5346)(19.05 \times 10^{-3})^3}{12}$$

$$I_{pb} = 3.08 \times 10^{-7} \text{ m}^4.$$

El esfuerzo máximo en la placa base se calcula mediante la Ec. 2.43, así:

$$\sigma_{\text{máxpb}} = \frac{M_{\text{pb}}}{I_{\text{pb}}} \quad (2.43)$$

donde:

$\sigma_{\text{máxpb}}$  es el esfuerzo máximo de la placa base del horno.

$M_{\text{pb}}$  es el momento del cortante de la base del horno.

$I_{\text{pb}}$  es el momento de inercia de la sección transversal de la placa

Sustituyendo en la Ec. 2.43, queda:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{máxpb}} &= \frac{4.89 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{3.08 \times 10^{-7} \text{ m}^4} \\ \sigma_{\text{máxpb}} &= 15.88 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

El factor de seguridad de la placa base se calcula mediante la Ec. 2.44, así:

$$n_{\text{pb}} = \frac{S_y}{\sigma_{\text{máxpb}}} \quad (2.44)$$

donde:

$n_{\text{pb}}$  es el factor de seguridad de la placa base

$S_y$  es el esfuerzo de fluencia del hierro dulce es de  $14.07 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$

$\sigma_{\text{máxpb}}$  es el esfuerzo máximo de la placa base del horno.

Sustituyendo en la Ec. 2.44, queda:

$$\begin{aligned} n_{\text{pb}} &= \frac{14.07 \times 10^6 \text{ kg/m}^2}{15.88 \times 10^6 \text{ kg/m}^2} \\ n_{\text{pb}} &= 0.88 \end{aligned}$$

El factor de seguridad no es aceptable, por lo que se aumentará el espesor de la placa yal como se presenta en la Tabla 2.4 para obtener un factor de seguridad mayor que uno.

Tabla 2.4. Factor de seguridad con distintos espesores de la base.

Espesor de la placa, m	Inercia, $m^4$	Esfuerzo máximo, $kg/m^2$	Factor seguridad
0.01905	$3.08 \times 10^{-7}$	$15.88 \times 10^6$	0.88
0.020638	$3.92 \times 10^{-7}$	$12.49 \times 10^6$	1.13
0.0254	$7.30 \times 10^{-7}$	$6.69 \times 10^6$	2.1

Así, el factor de seguridad de 1.13 es aceptable para una placa de espesor de 20 mm.

### 2.23. PUERTA DE DESCARGA

La puerta de descarga se encuentra ubicada en la parte inferior del horno (ver, Fig. 2.14), la misma forma que la placa base por medio de expresiones de los esfuerzo, momentos y cortantes referidos al sistema cartesiano.

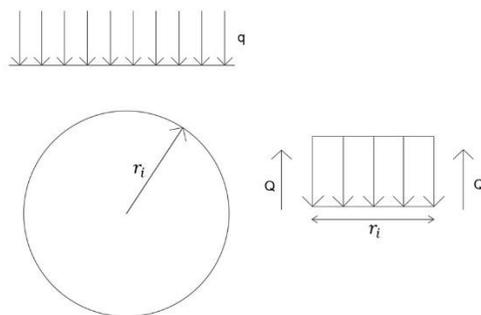


Fig. 2.14. Puerta de descarga uniformemente cargada.

Si la placa base de radio soporta una carga uniforme sobre toda su superficie de intensidad, el esfuerzo cortante a una distancia genérica del centro de la placa está dado por la Ec. 2.45.

$$M_{pd} = -\frac{q * r_i^2}{8} (1 + \nu) \quad (2.45)$$

donde:

$M_{pd}$  es el momento cortante de la puerta de descarga.

$q$  es la carga máxima del horno, la cual es igual a 50 kg;

$r_i$  es el radio interno; y

$\nu$  es el coeficiente de Poisson, el cual es igual a 0.3.

Sustituyendo en la Ec. 2.45, queda:

$$M_{pd} = -\frac{50 \text{ kg} * (0.125\text{m})^2}{8} (1 + 0.3)$$

$$M_{pd} = 0.127 \text{ kg} * \text{m}^2.$$

El momento de inercia para sección transversal de la puerta de descarga se determina usando la Ec. 2.46, así:

$$I_{pd} = \frac{b_{placa2} h_{placa2}^3}{12} \quad (2.46)$$

donde:

$I_{pd}$  es el momento de inercia de la sección transversal de la puerta de descarga;

$b_{placa2}$  es la base de la puerta de descarga, la cual es igual a 0.25 m; y

$h_{placa2}$  es la altura de la puerta de descarga.

Sustituyendo los valores de la Ec. 2.46, se obtiene:

$$I_{pd} = \frac{(0.25)(6.35 \times 10^{-3})^3}{12}$$

$$I_{pd} = 5.39 \times 10^{-9} \text{ m}^4.$$

El esfuerzo máximo se obtiene con la Ec. 2.47, así:

$$\sigma_{\text{máxpd}} = \frac{M_{\text{pd}}}{I_{\text{pd}}} \quad (2.47)$$

donde:

$\sigma_{\text{máxpd}}$  es el esfuerzo máximo de la puerta de descarga.

$M_{\text{pd}}$  es el momento del cortante de la puerta de descarga.

$I_{\text{pd}}$  es el momento de inercia de la sección transversal de la puerta de descarga.

Sustituyendo los valores de la Ec. 2.47, se obtiene:

$$\sigma_{\text{máxpd}} = \frac{0.127 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{5.39 \times 10^{-8} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{\text{máxpd}} = 23.8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$$

El factor de seguridad de la puerta de descarga se calcula mediante la Ec. 2.48, así:

$$n_{\text{pd}} = \frac{S_y}{\sigma_{\text{máxpd}}} \quad (2.48)$$

Sustituyendo en la Ec. 2.48, queda:

$$n_{\text{pd}} = \frac{14.07 \times 10^6 \text{ kg/m}^2}{23.8 \times 10^6 \text{ kg/m}^2}$$

$$n_{\text{pd}} = 0.59.$$

El factor de seguridad no es aceptable, por lo que se aumentara el espesor de la placa, tal como se presenta en la Tabla 2.5 para obtener un factor de seguridad mayor que uno.

Tabla 2.5. Factor de seguridad para distintos espesores de la descarga.

Espesor de la placa, m	Inercia, m <sup>4</sup>	Esfuerzo máximo, kg/m <sup>2</sup>	Factor seguridad
0.00635	5.33x10 <sup>-9</sup>	23.80x10 <sup>6</sup>	0.59
0.00793	1.04x10 <sup>-8</sup>	12.22x10 <sup>6</sup>	1.15
0.00950	1.79x10 <sup>-8</sup>	7.11x10 <sup>6</sup>	1.98

Así, el factor de seguridad de 1.15 es aceptable para un espesor de 7.93 mm.

## 2.24. COLUMNAS DE APOYO

El número de columnas de apoyo utilizado en el diseño es de cuatro, con el fin de lograr la mayor estabilidad del horno y sus accesorios, cada una de las columnas estarán sometidas a compresión (ver, Fig. 2.15), lo cual puede producir falla por pandeo, entonces se diseñan las columnas para evitar ese tipo de fallas.

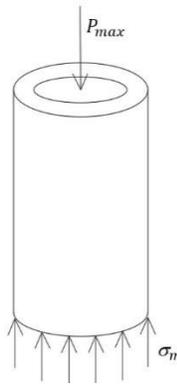


Fig. 2.15. Diagrama a compresión

El esfuerzo sometido por la carga se obtiene con la Ec. 2.49:

$$\sigma_m = \frac{P_{\text{máx}}}{\frac{\pi(d_{\text{ext}}^2 - d_{\text{int}}^2)}{4}} \quad (2.49)$$

donde:

$\sigma_m$  es el esfuerzo sometido del tubo.

$P_{\text{máx}}$  es el peso del horno más la carga, el cual es igual a 500 kg.

$d_{\text{ext}}$  es el diámetro exterior del tubo, el cual es igual a 0.0508 m; y

$d_{\text{int}}$  es el diámetro interior del tubo, el cual es igual a 0.0478 m.

Sustituyendo los valores en la Ec. 2.49, se obtiene:

$$\sigma_m = \frac{500 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\frac{\pi(0.0508^2 - 0.0478^2)}{4} \text{ m}^2}$$
$$\sigma_m = 21.11 \text{ MPa.}$$

El esfuerzo de fluencia del tubo estructural es de 230 MPa y el peso total del horno con su carga máxima no produce un esfuerzo mayor que el esfuerzo de fluencia del tubo, por lo que las columnas no fallarán.

## 2.25. CIMENTACIÓN

La cimentación es la zona donde se sostiene el horno, esta soporta todo el peso del mismo por lo que se puede diseñar una zapata o colocar una pletina en cada pata.

El peso del horno y de la carga cae sobre cada una de las patas del horno haciendo que tengan una reacción en el eje vertical (ver, Fig. 2.16).

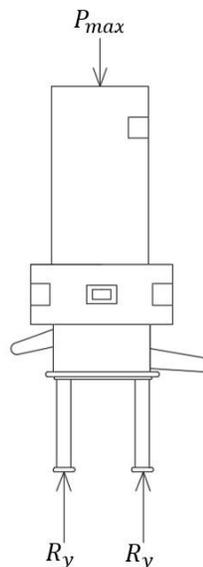


Fig. 2.16. Fuerzas en el eje vertical del horno

Haciendo sumatoria de fuerzas en el eje vertical y por simetría se puede calcular la reacción en cada una de las cuatro (4) patas del horno con la Ec. 2.50.

$$P_{\text{máx}} = 4 R_y \quad (2.50)$$

donde:

$P_{\text{máx}}$  es el peso del horno más la carga.

$R_y$  es la reacción de una de las patas del horno

Sustituyendo valores en la Ec. 2.50, se obtiene:

$$500 = 4 R_y$$

$$R_y = 125 \text{ kg.}$$

El esfuerzo actuante con una pletina mínima del diámetro del tubo se obtiene de la Ec. 2.51, así:

$$\sigma_{\text{actuante}_{\text{mín}}} = \frac{R_y}{L_{\text{mín}}^2} \quad (2.51)$$

donde:

$\sigma_{\text{actuante}_{\text{mín}}}$  es el esfuerzo actuante en la pletina mínima del diámetro del tubo.

$L_{\text{mín}}$  es el lado mínimo de la pletina cuadrada.

Sustituyendo valores en la Ec. 2.51, se obtiene:

$$\sigma_{\text{actuante}_{\text{mín}}} = \frac{125}{5.08^2}$$

$$\sigma_{\text{actuante}_{\text{mín}}} = 4.84 \text{ kg}_f/\text{cm}^2.$$

El esfuerzo admisible por el suelo es de  $2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ , por lo que:

$$\sigma_{\text{actuante}_{\text{mín}}} > \sigma_{\text{suelo}}$$

Por lo que se requiere aumentar los lados de la pletina, el área de la pletina mínima requerida se obtiene de la Ec. 2.52, así:

$$L_{\text{req}}^2 = \frac{R_y}{\sigma_{\text{suelo}}} \quad (2.52)$$

donde:

$L_{\text{req}}$  es el lado mínimo requerido de la pletina cuadrada.

$R_y$  es la reacción de una de las patas del horno.

$\sigma_{\text{suelo}}$  es la carga admisible por el suelo de 2 kgf/cm<sup>2</sup>.

Sustituyendo valores en la Ec. 2.52, se obtiene:

$$L_{\text{req}} = \sqrt{\frac{125}{2}}$$

$$L_{\text{req}} = 7.9 \text{ cm.}$$

Se seleccionará la pletina más cercana al largo requerido, una pletina de 10.16 cm de lado. Posteriormente de seleccionar la pletina se hace nuevamente el cálculo del esfuerzo actuante con el nuevo valor del largo con la Ec. 2.53, así.

$$\sigma_{\text{actuante}} = \frac{R_y}{L_{\text{pletina}}^2} \quad (2.53)$$

donde:

$\sigma_{\text{actuante}}$  es el esfuerzo actuante con la pletina seleccionada.

$L_{\text{pletina}}$  es el largo de la pletina seleccionada.

Sustituyendo valores en la Ec. 2.53, se obtiene:

$$\sigma_{\text{actuante}} = \frac{125}{10.16^2}$$

$$\sigma_{\text{actuante}} = 1.21 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

El esfuerzo admisible del suelo es mayor al esfuerzo actuante con una pletina de 10.16 cm por lado, por lo que no se necesitará una zapata para el horno de cubilote.

$$\sigma_{\text{suelo}} > \sigma_{\text{actuante}}$$

### 3. DETERMINACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO

Es importante 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 el material refractario, pasando por aquellos puramente mecánicas, hasta llegar a lo más básico; es decir soportes, estructuras, entre otros elementos mecánicos.

Así, en las Tablas 3.1 – 3.3 se presentan los costos de materiales, mano de obra e indirectos de fabricación, respectivamente.

En la Tabla 3.1 se presenta las especificaciones de las piezas que conformarán el horno de cubilote, con su correspondiente costo de adquisición (ver, Anexo B).

Tabla 3.1. Costos de materiales para la fabricación de elementos del horno.

Elemento		Unidad	Cantidad	C/U, \$	C/T, \$
Material refractario	Ladrillo refractario 22.86 cm x 11.43 cm x 6.35 cm	Unidad	72	4.05	291.60
	Concreto refractario	Saco	1	73.95	73.95
	Mortero refractario	Cubeta	3	69.95	209.85
	Aislante refractario	Saco	1	49.50	49.50
Sistema de ventilación	Caño Ø 7.62 cm, 1.8 mm de espesor	Unidad	1	27.20	27.20
	Tubo estructural cuadrado Ø 1 pulg, 1.5 mm de espesor y 6 m de longitud	Unidad	1	13.50	13.50
	Ventilador centrifugo blower CSB	Unidad	1	785.00	785.00
	Codo galvanizado a 90° de 3 pulg	Unidad	4	11.50	46.00
	Tee galvanizada de Ø 3 pulg	Unidad	1	14.95	14.95
Estructura del horno	Perno de Ø 12.7 mm x 38 mm, con cabeza hexagonal	Unidad	8	0.60	4.80
	Arandela plana de Ø 12.7 mm	Unidad	16	0.14	2.24
	Arandela de presión Ø 12.7 mm, alto carbono	Unidad	8	0.08	0.64

*Continúa.*

Continuación.- Tabla 3.1. Costos de materiales para la fabricación de los elementos del horno.

Elemento		Unidad	Cantidad	C/U, \$	C/T, \$
Estructura del horno	Tuerca de seguridad de $\varnothing$ 12.7 mm	Unidad	8	0.28	2.24
	Lámina Hierro 2 x 1 m de 1.5 mm	Unidad	1	37.00	37.00
	Lámina Hierro de 3 mm, 4 pies x 8 pies	Unidad	2	101.00	202.00
	Lámina Hierro de 3 mm, 2x1m	Unidad	1	67.75	67.75
	Lámina Hierro de 25.4 mm 2x1m	Unidad	1	550.00	550.00
	Lámina Hierro de 9.5 mm, 2x1 m	Unidad	1	196.00	196.00
	Caño galvanizado de $\varnothing$ 5.08 cm, 1.5 mm de espesor, 6 m de longitud	Unidad	1	24.80	24.80
	Pletina 4 x 3/16 pulg, 6 m de longitud	Unidad	1	29.70	29.70
	Varilla redonda de $\varnothing$ 3/8 pulg, 6 m de longitud	Unidad	1	4.80	4.80
	Pintura aerosol alta temperatura 649 °C	Lata	1	5.96	5.96
	Electrodo E6013 de $\varnothing$ 3/32 pulg de diámetro	Libra	3	1.05	3.15
	Perno ancla 3/8" x 1 7/8" largo	Unidad	16	1.30	20.80
				Total	2,663.43

En la Tabla 3.2 se presenta una estimación de los costos de mano de obra para la fabricación de los elementos principales del horno de cubilote, estos costos unitarios se calcularon 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 existen tiempos muertos, además se ha tomado en consideración las tolerancias 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.

Así, 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 3.2. Costos de mano de obra para la fabricación del horno de cubilote.

Elemento		Tiempo de operación, h	Cant.	C/h, \$	C/T, \$
Horno de cubilote	Charla técnica sobre los procedimientos a realizar en el proceso de la fabricación del horno de cubilote, dar instrucciones, especificar operaciones y recursos, especificar la forma en que se realizará la fabricación de las piezas y las medidas de higiene y seguridad industrial a tomar en consideración en el taller, conocer las máquinas que se van a utilizar durante la fabricación.	8	1	25.00	200.00
Estructura metálica del horno	Medición y corte de lámina metálica, tubos y pletina.	3	1	20.00	60.00
	Forjar el cilindro del cuerpo, base.	4	1	20.00	80.00
	Soldadura de la carcasa metálica del horno, tubos y pletinas	3	1	25.00	75.00
	Limpieza de piezas de impurezas como óxidos.	1	1	5.00	5.00
Paredes del horno	Preparación de la mezcla del mortero refractario, limpieza y colocación de ladrillos.	6	1	15.00	90.00
	Preparación y colocación de la mezcla del concreto y aislante refractario.	3	1	25	75.00
	Pintar el horno	1	1	10	10.00
Sistema de ventilación	Medición y corte de tubería y tubo estructural	2	1	20.00	40.00
	Ensamble de tuberías y accesorios del ventilador con el horno	3	1	25.00	75.00
	Soldadura tubería y mesa	2	1	25.00	50.00
<b>Total</b>					<b>760.00</b>

En la Tabla 3.3 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 3.3. Costos indirectos en la fabricación de los elementos del horno.

Elemento	C/T, \$
Electricidad	80.00
Depreciación de las máquinas	120.00
Depreciación de las herramientas	50.00
Otros gastos	25.00
Total	275.00

En la Tabla 3.4 se presenta el resumen con los costos totales de fabricación, clasificados en materiales, costos de mano de obra y costos indirectos.

Tabla 3.4. Resumen de los costos de fabricación del horno de cubilote.

Tipos de costos	Costo total, \$
Costos de materiales	2,663.43
Costos de mano de obra	760.00
Costos indirectos	275.00
Costo total de la máquina	3,698.43

El costo total para la fabricación de horno de cubilote para fundir hierro es de \$ 3,698.43 tomando en consideración los 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, la estabilización de precios que se espera post pandemia, la demanda o existencia del producto.

## **4. FUNCIONAMIENTO Y MANTENIMIENTO**

En los capítulos anteriores se realizó el diseño de los elementos esenciales para la fabricación de un horno de cubilote y se determinaron los costos de fabricación de cada uno de ellos.

En este apartado se explica el funcionamiento del horno de cubilote, observaciones generales del horno de cubilote y su respectivo mantenimiento.

### **4.1. FUNCIONAMIENTO**

El objetivo principal de explicar el funcionamiento del horno de cubilote es que el equipo se conozca de la mejor manera posible para realizar los pasos correctos desde el encendido, la colada y el vaciado del horno.

#### **4.1.1. ENCENDIDO**

Se debe preparar la solera del horno con arena de moldear mojada y se secará con fuego de leña o llama de gas. Esto se realiza dos horas antes de dar inicio a la colada, se introduce leña seca que se enciende hasta obtener un fuego vivo y abundante. En esta etapa se introduce el coque, y se adiciona entre el 5 al 10% de caliza, también conocida como fundente. Se comprueba este parámetro usando una barra doblada en zeta (ver, Fig. 4.1), así el encendido de la columna se comprueba observando el color rojo del revestimiento del refractario, se debe dar viento durante 5 min, esto ayudará a desulfurar el coque [1].

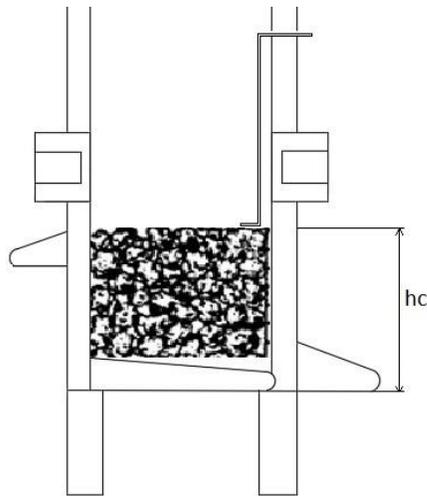


Fig. 4.1. Comprobación de la altura de la carga.

#### 4.1.2. INTRODUCCIÓN DE LA CARGA

La carga del horno se comienza colocando sobre la capa de coque de encendido una carga de coque adicional a la cantidad necesaria de fundente y encima de ésta la carga metálica. A continuación, se coloca una carga de coque con fundente y la segunda carga metálica, y así alternando hasta alcanzar la carga final.

Se espera un período de tiempo de 20 min, para que el coque encendido de la cama precaliente las cargas añadidas al horno. Luego se enciende la cámara de calentamiento registrando que la cantidad de aire y gas sea la necesaria, se enciende el ventilador y luego se obtendrá el primer hierro fundido en la piquera de colada. Este hierro se considera frío y no se utiliza. Sólo se emplea cuando comienza a salir fluido y bien caliente por el canal de sangrado [1].

Dado lo anterior, para calcular la carga de coque en un área de 1 m<sup>2</sup>, se utiliza la Ec. 4.1:

$$P_{\text{coque}} = \frac{\pi}{4} * D_i^2 * S_{\text{carga}} * P_{\text{vol}} \quad (4.1)$$

donde:

$P_{\text{coque}}$  es el peso del coque en kg,

$D_i$  es el diámetro interno del horno, el cual es igual a 0.25 m

$S_{\text{carga}}$  es el espesor de la carga del coque, el cual es igual a 0.16 m; y

$P_{\text{vol}}$  es el peso volumétrico del coque, el cual es igual a 450 kg/m<sup>3</sup>.

Sustituyendo en la Ec. 4.1, queda:

$$P_{\text{coque}} = \frac{\pi}{4} * (0.25)^2 * 0.16 * 450$$
$$P_{\text{coque}} = 3.53 \text{ kg.}$$

La carga del fundente en trozos de tamaño promedio de cuatro (4) centímetros, se distribuye sobre cada carga de coque, la cual se calcula mediante la Ec. 4.2, así:

$$P_f = F_{fu} * P_{\text{coque}} \quad (4.2)$$

donde:

$P_f$  es la carga del fundente en kg,

$F_{fu}$  es el factor o coeficiente de la carga del fundente que toma un valor en el interno intervalo de 0.3 a 0.35, para un horno pequeño se tomará el valor de 0.3.

Sustituyendo el factor en la Ec. 4.2 se obtiene:

$$P_f = (0.3) * 3.53 \text{ kg}$$
$$P_f = 1.06 \text{ kg.}$$

### 4.1.3. PERÍODO DE OPERACIÓN

Una vez que el primer hierro fundido fluye libremente por el canal de sangrado, se cierra este orificio con un tapón de arcilla o barro refractario. Luego

se espera que se acumule el hierro fundido líquido en el crisol del horno. La medida para que el crisol esté lleno le da la salida de escoria por la piquera correspondiente.

La fluidez con que sale la escoria es un índice del buen funcionamiento del horno. Inmediatamente que sale toda la escoria, quiere decir que el crisol está lleno de hierro fundido líquido. Entonces se rompe el tapón del orificio de sangrado y se recibe el hierro en los recipientes de vertido. Así, al vaciar el crisol se coloca un nuevo tapón en el orificio de sangrado y se repite todo el proceso. Lo descrito aquí es lo que se denomina operación del horno por picada y se hace cuando se demandan grandes cantidades de hierro de una vez o por la práctica establecida [1].

#### **4.1.4. FIN DE LA FUSIÓN**

Después del período de operación del horno, se comprueba la cantidad de piezas que quedan todavía por colar y se introduce la última carga, reservado para esta los trozos de metal más ligeros, cuando el nivel de la carga alcanza aproximadamente las tres cuartas partes de la altura del horno, se reduce gradualmente el viento, cerrando por completo la entrada de aire al horno cuando esta próxima la fusión del último hierro colado. Cuando aparece escoria en la piquera se vacía el horno [1].

#### **4.1.5. VACIADO DEL HORNO**

Una vez terminada de fundir la última carga, se abren la compuerta y se hace correr el cerrojo o el puntal que cierra la puerta inferior del horno. La solera del horno cae al igual que los residuos de la capa de coque y de material contenidos, que se apagan con chorros de agua y se retiran para que no se

estropee el cubilote. Por otro lado, el coque recuperado se puede aprovechar cuando se tienen estufas [1].

#### **4.1.6. FUNCIONAMIENTO Y OPERACIÓN**

Las observaciones más importantes a considerar sobre el funcionamiento del horno de cubilote son:

- a) El primer hierro colado que se extrae nunca está lo suficientemente caliente salvo en los cubilotes cuyo crisol está muy bajo, por lo que se emplea para colar piezas de poca importancia. A falta de éstas, el hierro colado se convierte en lingotes para volverlo a utilizar en las próximas fundiciones.
- b) La piquera de colado se cierra con un tapón cónico de arcilla cruda, que se introduce con la ayuda de una barra larga. Para dar salidas intermitentemente al hierro fundido, se perfora el tapón con una barra puntiaguda, si el hierro se solidifica en la piquera de colado, se tiene que picar con una barra de sangrar.
- c) Si a los 20 o 30 min de obtenido el primer hierro fundido la producción del cubilote resulta anormal, o la temperatura de hierro colado es persistentemente baja se tienen que indagar las causas que lo producen, esta cuales pueden ser:
  - 1) Carga metálica de tamaño inadecuado a las dimensiones del cubilote;
  - 2) Carga muy oxidada, con exceso de tierra o de arena adherida;
  - 3) Coque en trozos de tamaño inadecuado, con escaso poder calorífico o con elevado contenido de cenizas;
  - 4) Piedra caliza de mala calidad con exceso de sílice;
  - 5) Revestimiento refractario de mala calidad;
  - 6) Obstrucción de las toberas;
  - 7) Formación de algún puente; o
  - 8) Reducción de la sección transversal del cubilote por encoronamiento, acumulación de escorias adheridas al revestimiento.

d) La marcha del cubilote se puede juzgar por la llama de la boca de carga y por la fractura de la escoria:

➤ Llama:

- 1) Ausencia de llama en la boca de carga, salvo en la fase final que eso indica funcionamiento y proporción normal del horno;
- 2) Llama azul turquesa: Indica que prevalece CO (se tiene exceso de carbón en las cargas);
- 3) Llama blanca brillante: Indica que prevalece el CO<sub>2</sub> (exceso de viento);
- 4) Llama humosa: Es indicio de una marcha lenta (exceso de coque).

➤ Escoria:

- 1) Escoria fluida, pero no demasiada vítrea, compacta, color verde botella: Indica buena marcha con oxidación escasa;
- 2) Escoriada demasiada fluida, con fractura quebradiza y oscura: Indica exceso de fundente;
- 3) Escoria demasiado viscosa: Indica escasez de fundente;
- 4) Escoria compacta, con fractura vítrea de color amarillento: Indica buena marcha y elevado contenido de manganeso en la carga;
- 5) Escoria negra: Indica la presencia de óxidos pesados.

## 4.2. MANTENIMIENTO

Después de cada colada, el cubilote se debe dejar enfriar y al día siguiente con un cincel se remueve la escoria o el material refractario vitrificado adherido al revestimiento, que se presenta más o menos corroído en torno a las toberas, hasta alcanzar el material refractario que no ha sufrido deterioro, como se presenta en la Fig. 4.2, donde ha sufrido un aumento de su diámetro interno, las partes afectadas se deben recubrir entonces con cemento refractario nuevo [1].

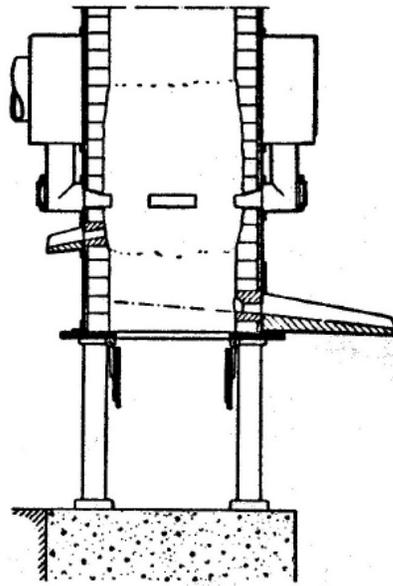


Fig. 4.2. Reparación de las paredes internas del horno.

El horno de cubilote de la presente propuesta, tiene la facilidad de desmontaje para su mantenimiento, así con la ayuda de un cincel se reparan las zonas afectadas para quitar las partes adheridas en el revestimiento del horno y posteriormente retirar los residuos, por el cual la reparación del refractario se facilitará, el mayor daño siempre se encuentra en la zona de fusión, por encima del plano de las toberas, así se tiene que tener cuidado ya que el horno por tener una sección pequeña y no tener la disponibilidad de que una persona ingrese dentro del mismo, se puede desmontar verticalmente por medio de pernos y separar las dos partes cilíndricas y efectuar dicho mantenimiento.

Antes de volver a usar el cubilote es necesario reparar la zona refractaria dañada, con concreto refractario en las paredes, cuando las condiciones de funcionamiento son extensas puede ser necesario poner ladrillos nuevos en la zona de fusión, donde existe más erosión del revestimiento. La reparación se debe hacer cuidadosamente y se tiene que secar el revestimiento antes de volver a usar el cubilote [1].

#### 4.2.1. COSTO DE MANTENIMIENTO

Es importante que se consideren los costos de mantenimiento del revestimiento total del horno, ya que así se puede establecer un valor más exacto del costo de mantenimiento.

Se presentarán en tablas los costos de materiales de fabricación, los costos de mano de obra y los costos indirectos para el mantenimiento del revestimiento del horno.

En la Tabla 4.1 se presenta las especificaciones de los materiales a utilizar del cambio total del revestimiento que conforma el horno de cubilote, con su correspondiente costo de fabricación.

Tabla 4.1. Costos de materiales para el mantenimiento del revestimiento.

Elemento		Unidad	Cant.	C/U, \$	C/T, \$
Material refractario	Ladrillo refractario 22.86 x 11.43 x 6.35 cm	Unidad	72	4.05	291.60
	Concreto refractario	Saco	1	73.95	73.95
	Mortero refractario	Cubeta	3	69.95	209.85
	Aislante refractario	Saco	1	49.50	49.50
Total					624.90

En la Tabla 4.2 se presenta una estimación de los costos de mano de obra para el mantenimiento del revestimiento total del horno de cubilote, estos costos unitarios de mano de obra se calculan en base al apartado de costo de mano de obra del proyecto.

Tabla 4.2. Costos de mano de obra para el mantenimiento del revestimiento.

Elemento		Unidad	Cant.	C/h, \$	C/T, \$
Paredes del horno	Remover y limpiar el revestimiento dañado del horno	h	2	20.00	40.00
	Preparación de la mezcla del mortero refractario, limpieza y colocación de ladrillos	h	4	15.00	60.00
	Preparación y colocación de la mezcla del concreto y aislante refractario	h	4	15.00	60.00
Total					160.00

En la Tabla 4.3 se presenta los costos indirectos, estos incluyen el costo por costo de 11 horas de mantenimiento 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 para el mantenimiento del revestimiento.

Elemento	Costo total, \$
Electricidad	20.00
Depreciación de las máquinas	20.00
Depreciación de las herramientas	20.00
Otros gastos	20.00
<b>Total</b>	<b>80.00</b>

En la Tabla 4.4 se presenta el resumen con los costos totales del mantenimiento total del revestimiento del horno de cubilote, clasificados en materiales, costos de mano de obra y costos extra.

Tabla 4.4. Resumen de los costos de mantenimiento del revestimiento.

Tipos de costos	Costo total, \$
Costos de materiales	624.90
Costos de mano de obra	160.00
Costos indirectos	80.00
<b>Costo total de la máquina</b>	<b>864.90</b>

El costo total del mantenimiento del horno de cubilote para fundir hierro es de \$ 864.90 tomando en consideración los materiales, mano de obra, costos indirectos. Los precios de los materiales pueden variar debido a diferentes factores como: la variación del precio de mano de obra, la estabilización de precios que se espera post pandemia, la demanda o existencia del producto.

El tiempo de trabajo del mantenimiento del revestimiento total se estimó que es de 11 h, este tiempo no se considera el tiempo de secado del cemento ni del aislante.

## CONCLUSIONES

Finalizando el presente trabajo de graduación sobre el diseño de un horno de cubilote para fundir hierro de uso didáctico se puede concluir que:

- ✓ El horno de cubilote diseñado puede operar con la menor cantidad de materias primas, lo cual es de fundamental importancia ya que con ello se disminuirán los costos de prácticas de laboratorio, con lo cual se cumple el aspecto para uso didáctico.
- ✓ El horno de cubilote diseñado en dos partes o desmontable, permite realizar la operación de mantenimiento apropiadamente, lo cual es de fundamental importancia ya que de ello depende obtener una larga vida útil de dicho horno.
- ✓ El horno de cubilote diseñado, de acuerdo a sus dimensiones y parámetros funcionales se halla dirigido a la práctica de laboratorios con el fin de obtener fundiciones blanca y gris.
- ✓ El beneficio de optar por la construcción de este horno de cubilote es de tipo académico y/o de investigación y no de rentabilidad, así, el costo total determinado de fabricación del horno de cubilote es de \$ 3,698.43 tomando en consideración materiales, mano de obra de los componente, costos indirectos, gastos imprevistos y tiempos de ensamblaje.
- ✓ Los costos de mantenimiento para un revestimiento total del horno de cubilote es de \$ 864.90 considerando los materiales, la mano de obra, costos indirectos y gastos imprevistos con un tiempo de trabajo del mantenimiento de 11 horas, son bajos ya que esto permitirá alargar la vida útil de dicho horno de cubilote.

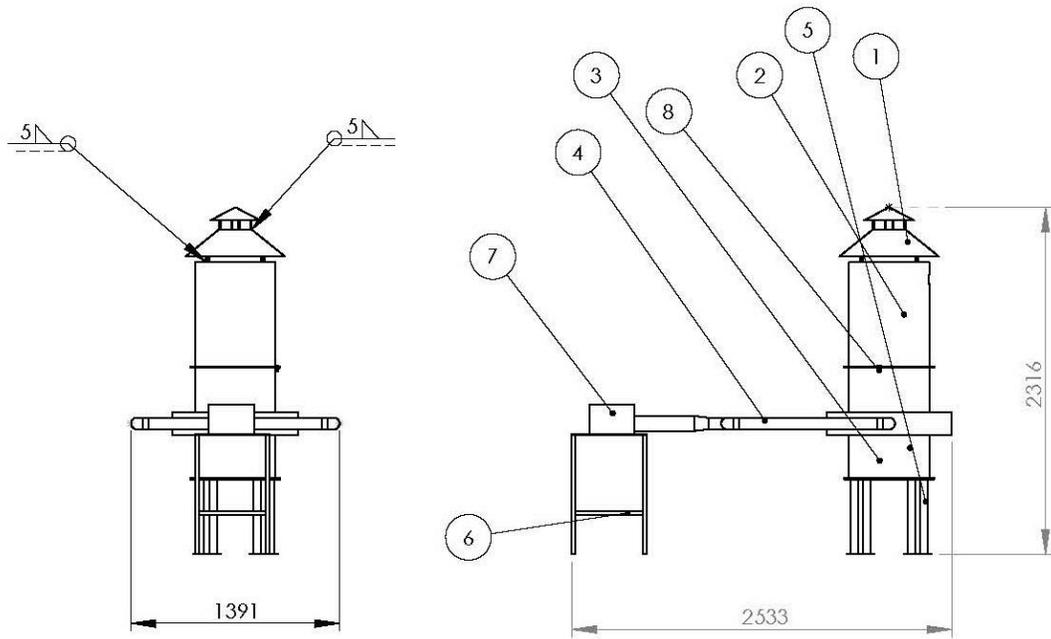
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Capello, E. (1974). *Tecnología de la fundición*. Barcelona – España: Gustavo Gili, S.A.
- [2] Titov, N. & Stepánov, T. (1978). Fusión de la fundición en cubilotes. *Tecnología del proceso de fundición*. Moscú: Mir.
- [3] Raffino, M. (13 de febrero de 2020). *Combustión*. Recuperado de <https://concepto.de/combustion/>
- [4] Castro, R. (2010). *Introducción a la Termoquímica*. Estudio de la combustión. Universidad de Sevilla Rodas. Recuperado de <https://rodas5.us.es/items/9ec3e035-fa2d-8a0e-72c6-0240fbaede55/1/>
- [5] García R. (2001). *Combustión y combustibles*. Recuperado de <http://kimerius.com/app/download/5780666669/Combusti%C3%B3n+y+combustibles.pdf>
- [6] Medina, J. & Taco, J. (2009). *Diseño y construcción de un horno cubilote con aire precalentado para fines didácticos*. (Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero mecánico). Escuela Politécnica nacional, Quito.
- [7] Sierra, R.A., Mejía, H.D., Silva, C., Pineda, D.A. & Rojas, M. (2006). Modelo matemático para los fenómenos de combustión en un horno de cubilote. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 1(36), pp (70-84).
- [8] EcuRed (2011). *Refractario*. Recuperado de <https://www.ecured.cu/Refractario>
- [9] Construmática (2011). *Ladrillo refractario*. Recuperado de [https://www.construmatica.com/construpedia/Ladrillo\\_Refractario.com](https://www.construmatica.com/construpedia/Ladrillo_Refractario.com)
- [10] Baquero, A.A. (2000). *Diseño, operación y control del Cubilote* (pp. 59). División Editorial y de publicaciones UIS.

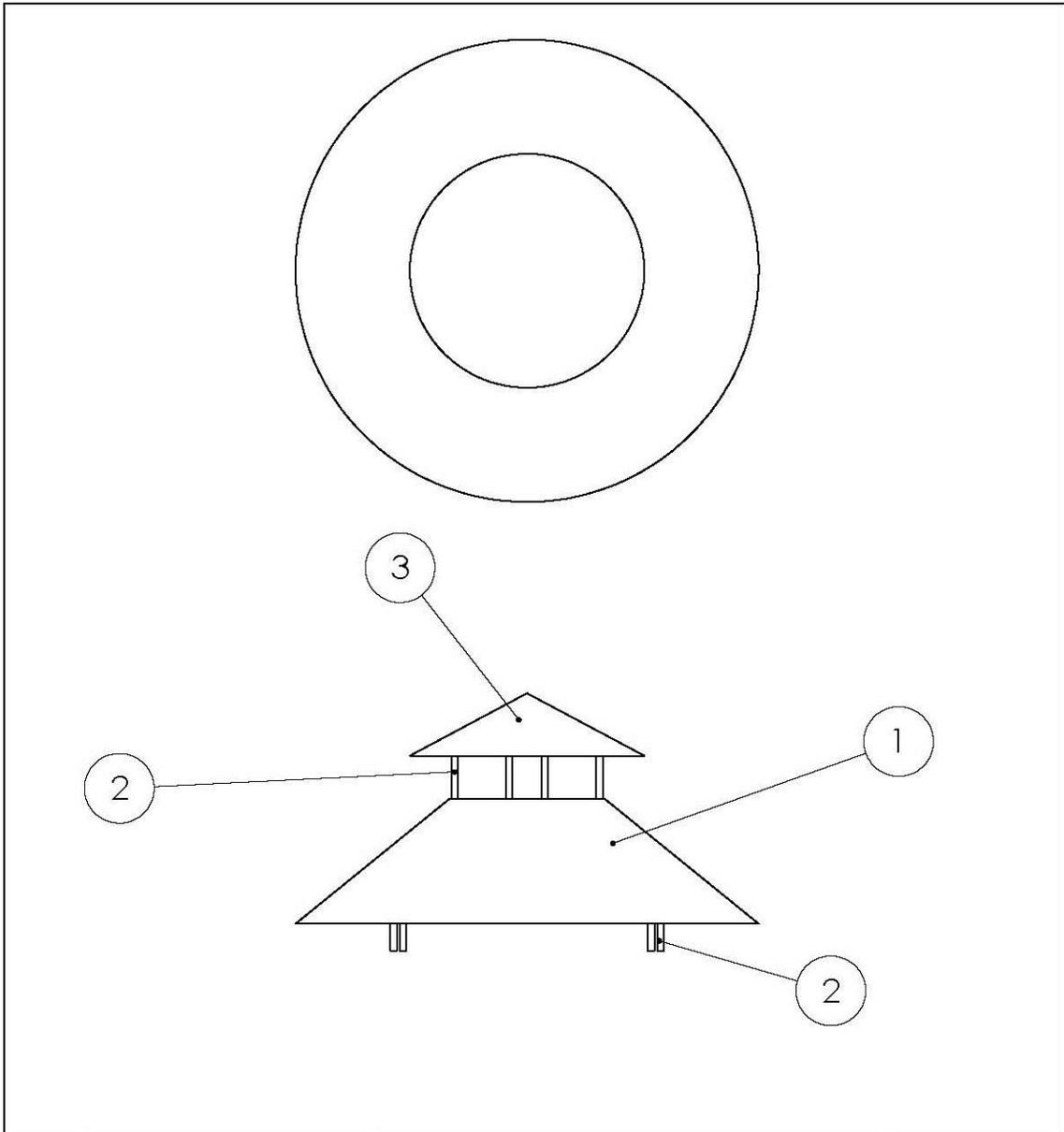
- [11] HarbisonWalker International Refractory Products: HWI (2021). Recuperado 18 Julio 2021, de <https://thinkhwi.com>
- [12] Incropera, F. & Dewitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (9th ed.). Prentice Hall.

## **ANEXOS**

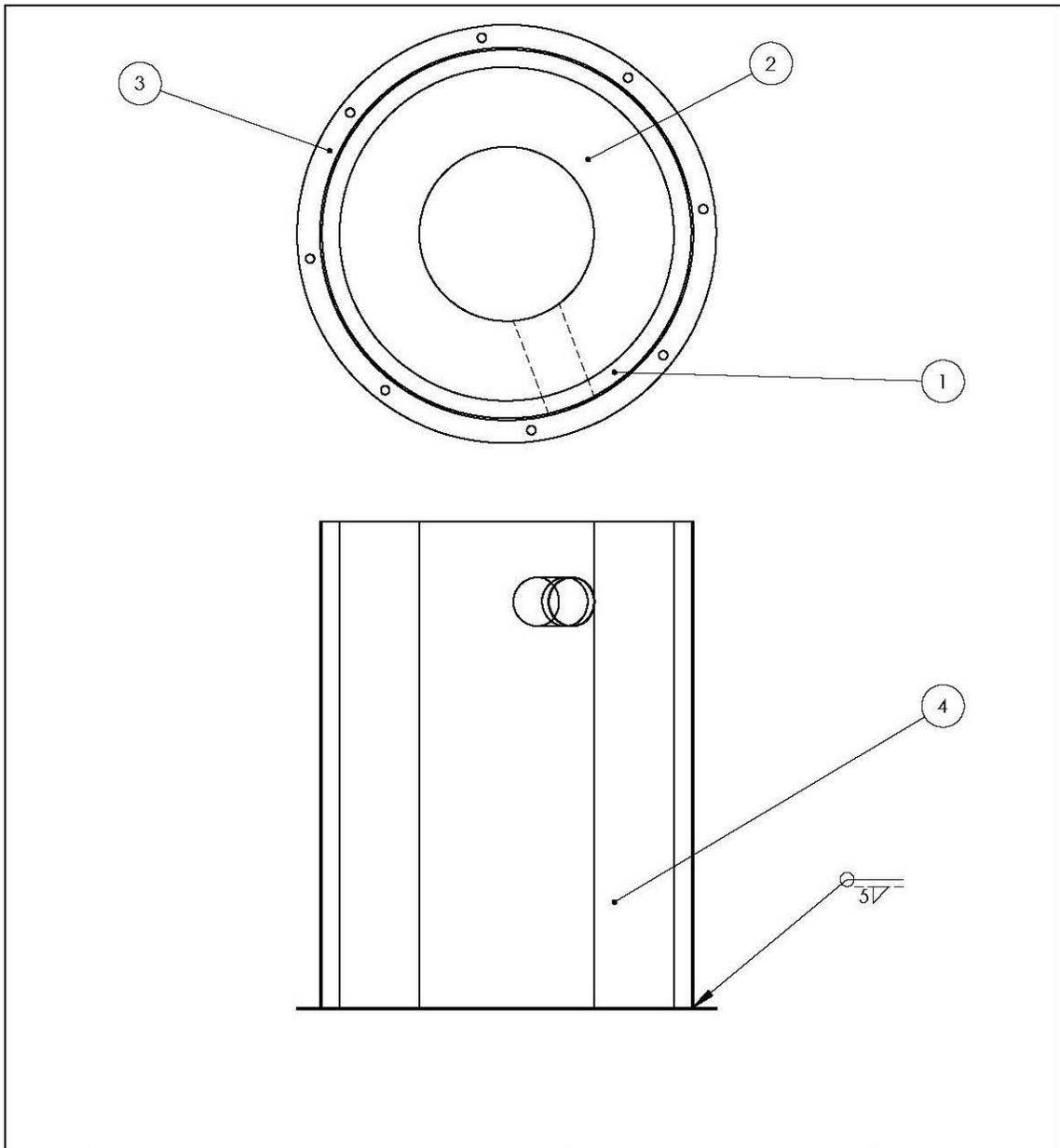
### **ANEXO A: PLANOS DE FABRICACIÓN**

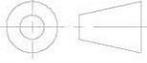


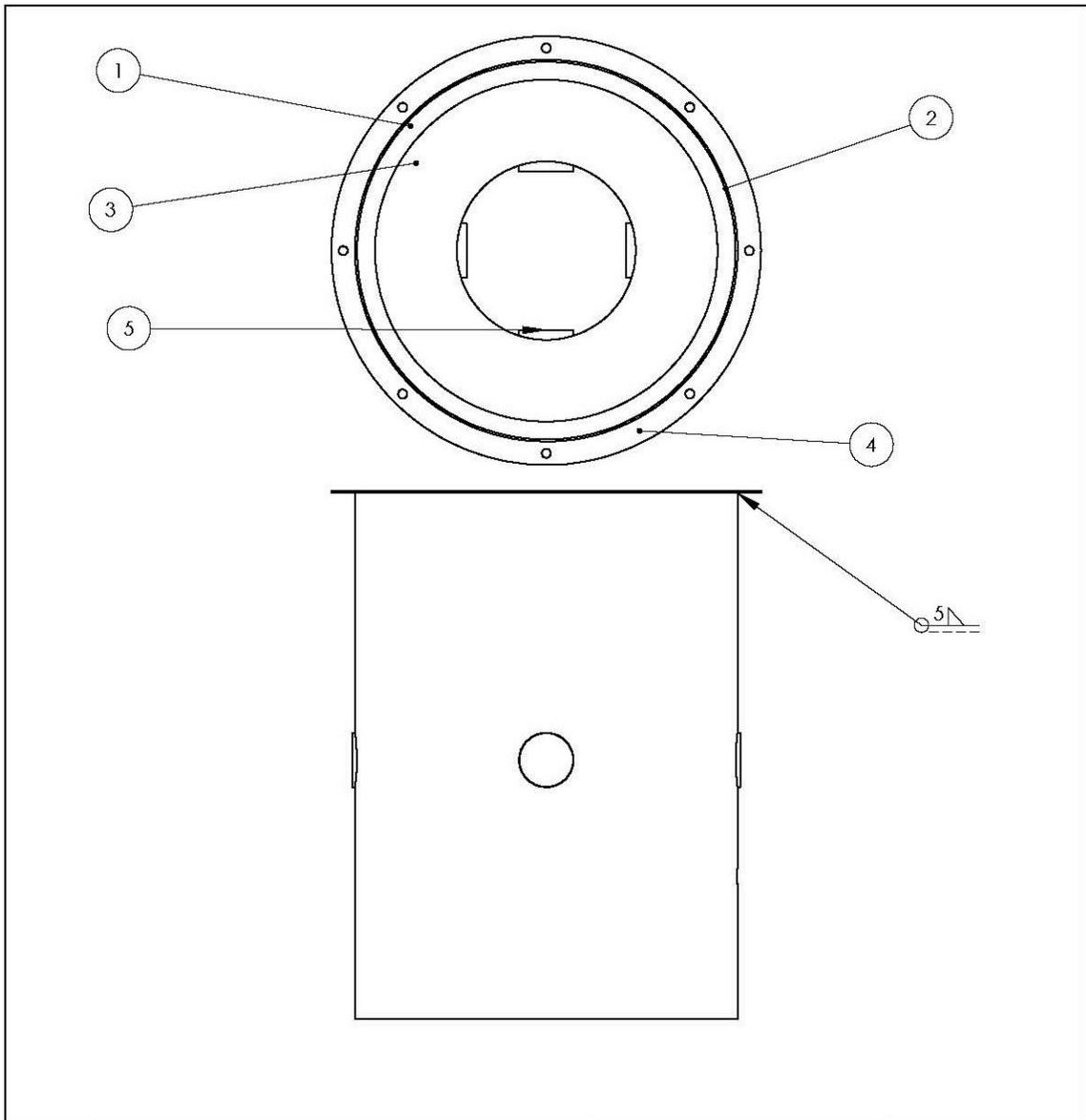
9	SUB CONJUNTO 3	1
8	SUB CONJUNTO 2	1
5	VENTILADOR	1
4	MESA SOPORTE DEL VENTILADOR	1
3	SUB CONJUNTO 4	1
2	SUB CONJUNTO 5	1
1	SUB CONJUNTO 1	1
N° DE ELEMENTO	N° DE PIEZA	CANTIDAD
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina
N° PLANO: A1	Fecha: Septiembre de 2021	Conjunto: Horno de cubilote
		ESCALA 1:50
		UNIDADES: milímetros



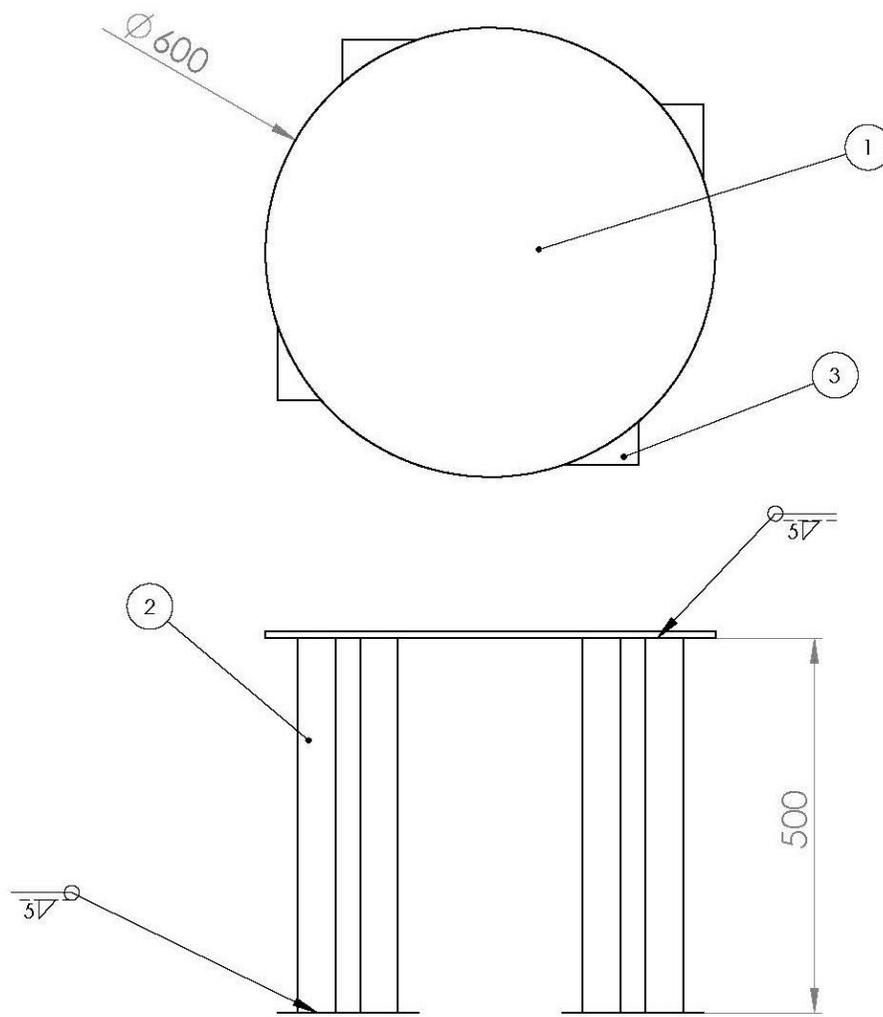
3	SOMBRERO 2	Detalle 1.2	1
2	Varillas de soporte	Varilla hierro redondo 3/8 pulg x 30 cm	8
1	SOMBRERO 1	Detalle 1.1	1
ITEM	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: B1	Fecha: Septiembre de 2021	Sub conjunto 1: Apaga chispa	



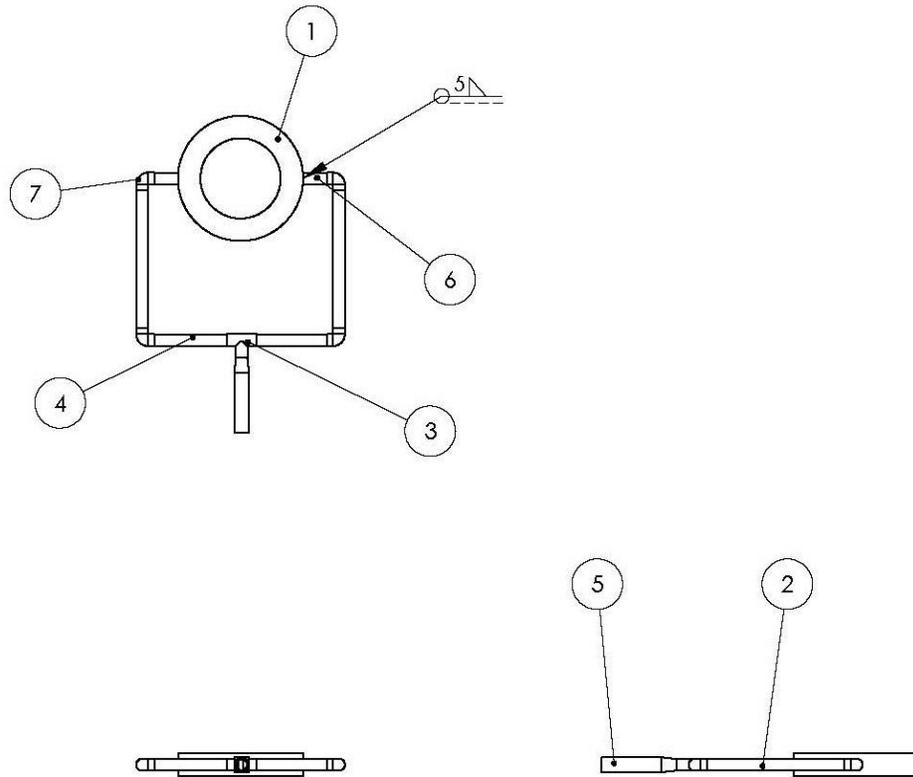
4	Chapa metálica superior	Detalle 2.4	2
3	Brida de sujección	Detalle 2.3	1
2	Capa de mortero refractario superior	Detalle 2.2	1
1	Capa de aislante superior	Detalle 2.1	1
ITEM	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: B2	Fecha: Septiembre de 2021	Sub conjunto 2: Parte inferior del horno	



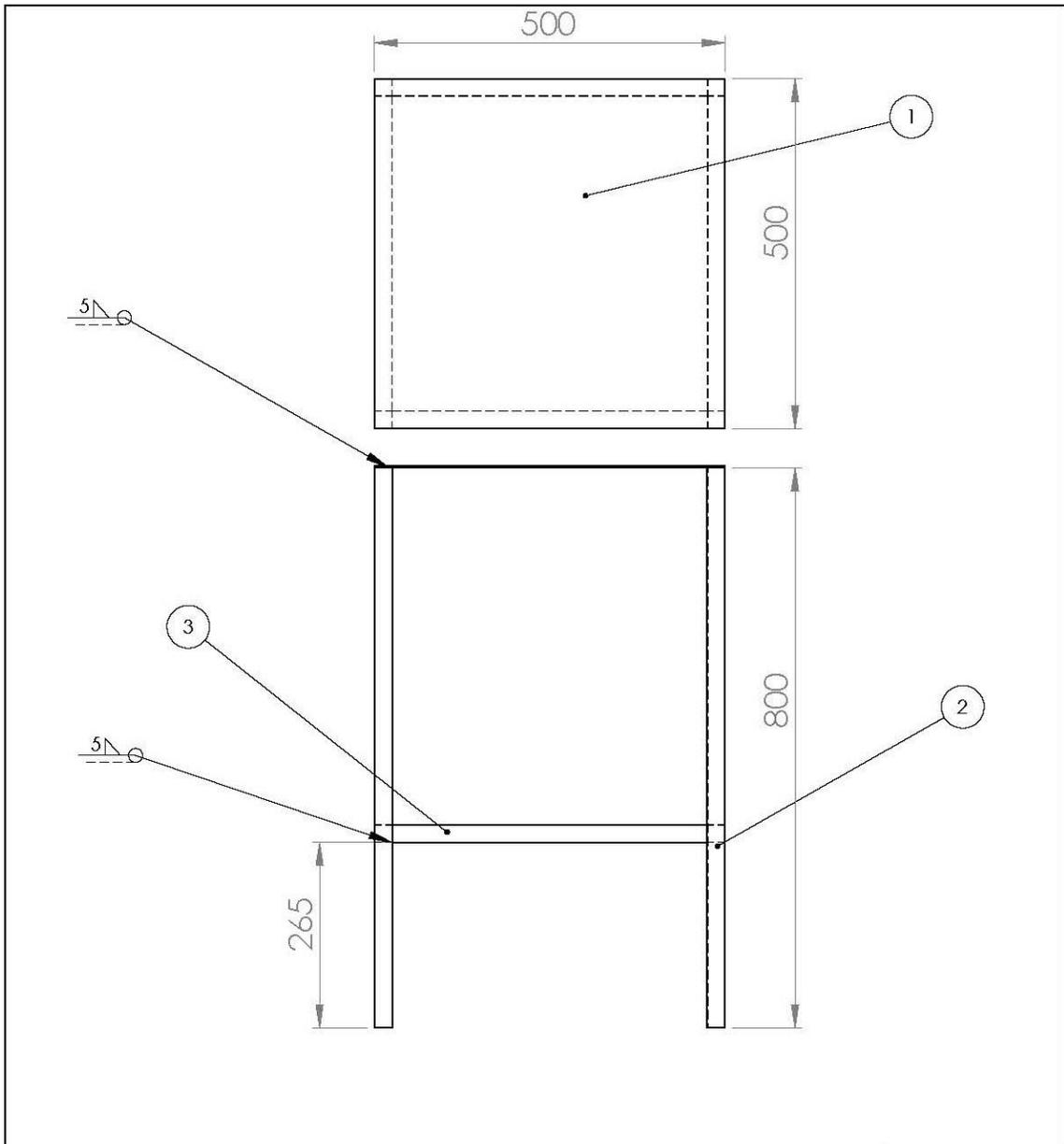
5	Tubos de extracción de aire caliente	Detalle 3.4	4
4	Brida de sujección	Detalle 2.3	1
3	Capa mortero refractario inferior	Detalle 3.3	1
2	Chapa metálica inferior	Detalle 3.2	1
1	Capa de aislante inferior	Detalle 3.1	1
ITEM	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: B3	Fecha: Septiembre de 2021	Sub conjunto 3: Parte inferior del horno	



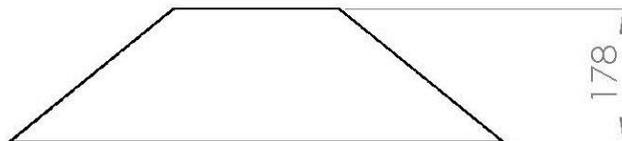
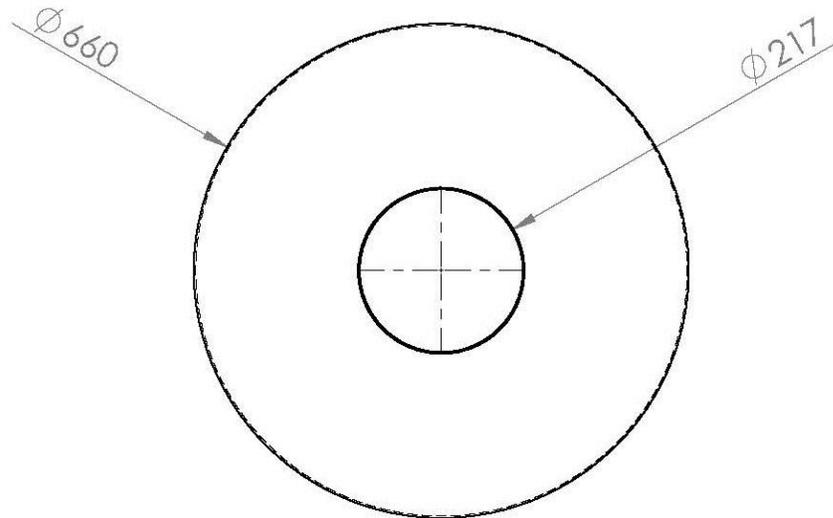
ITEM	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
3	Pletinas de soporte	Pletina 4 pulg x 3/16 pulg	4
2	Tubos de soporte del banco	Caño galvanizado 2 pulg de diámetro	4
1	Pletina circular de soporte	Pletina hierro dulce, espesor de 10 mm	1
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: B4	Fecha: Septiembre de 2021	Sub conjunto 4: Banco de soporte del horno	



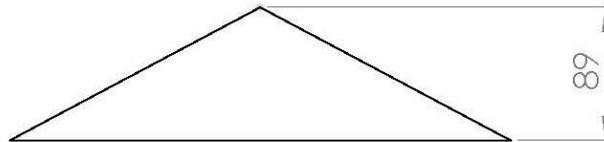
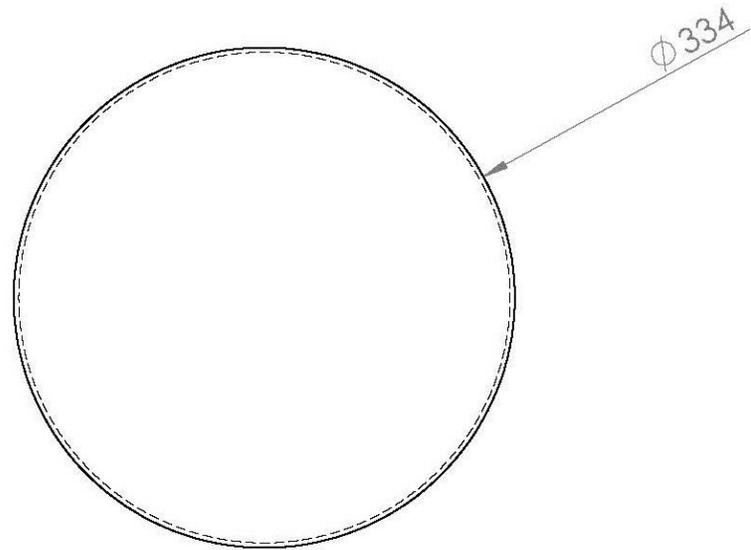
7	Codo metalico de 90°	Codo galvanizado de 90° de 3 pulg	4
6	Tubo metálico 1	Caño negro mecánico de 3 pulg	2
5	Tubo metálico 5	Caño negro mecánico de 3 pulg	1
4	Tubo metálico 3	Caño negro mecánico 3 pulg	2
3	Conexión metálica tipo T	T galvanizada de 3 pulg	1
2	Tubo metálico 2	Caño negro mecánico de 3 pulg	2
1	Anillo de extracción	Detalle 5.1	1
ITEM	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: B5	Fecha: Septiembre de 2021	Sub conjunto 5: Tubería de extracción de aire	



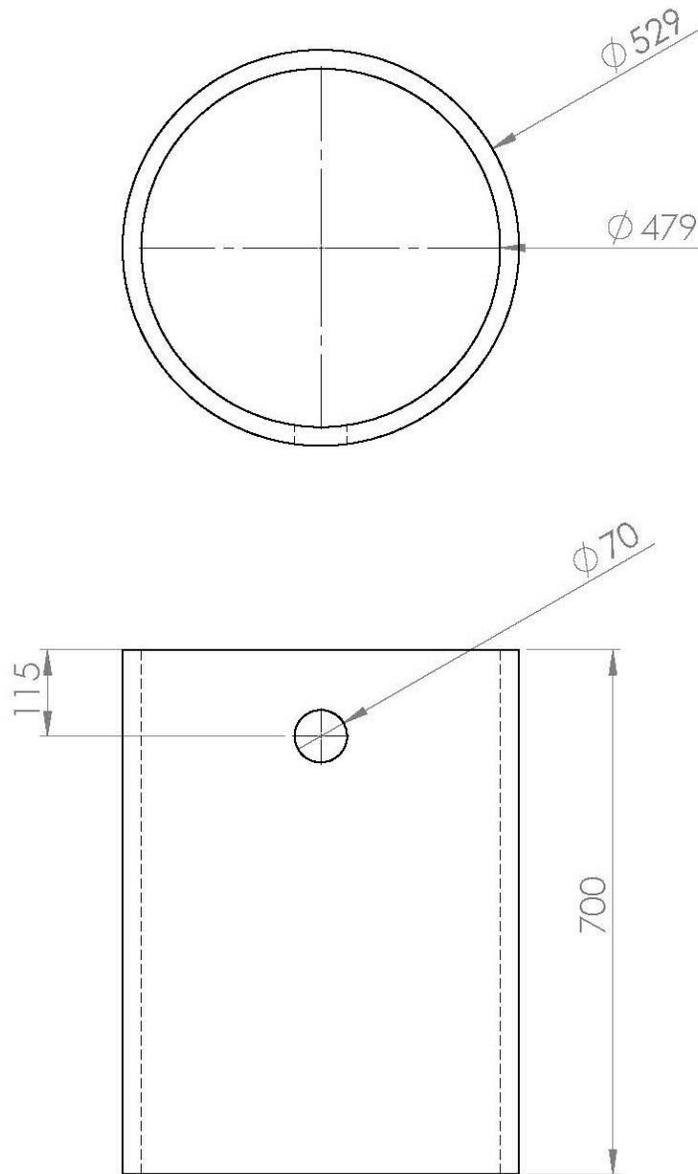
3	Tubos de soporte	Tubo estructural cuadrado de 1 pulg	4
2	Tubo de soporte	Tubo estructural cuadrado de 1 pulg	4
1	Pletina de mesa	Pletina hierro dulce 500 x 500 x 3 mm	1
ITEM	NOMBRE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un homo de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: B6	Fecha: Septiembre de 2021	Sub conjunto 6: Mesa de soporte del ventilador	



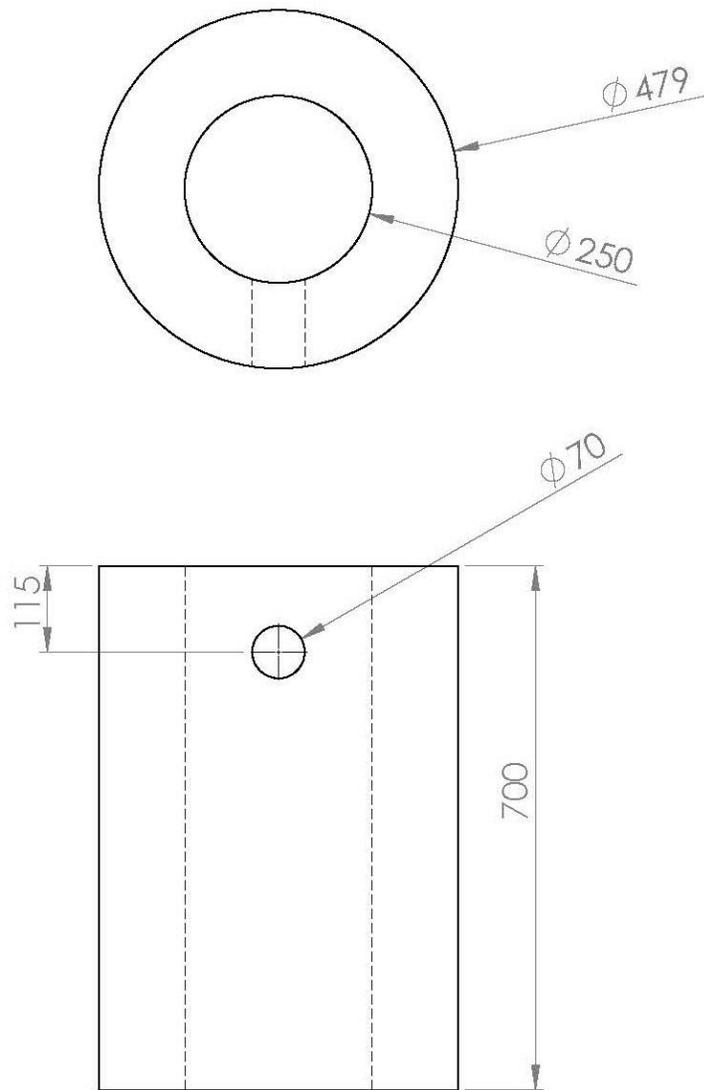
1	Hierro dulce	Lámina 1.5 mm, 2 x 1 m
Cantidad	Material	Especificaciones
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un homo de cubilote para uso didáctico
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina
Nº PLANO: C1	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 1.1: Sombrero inferior



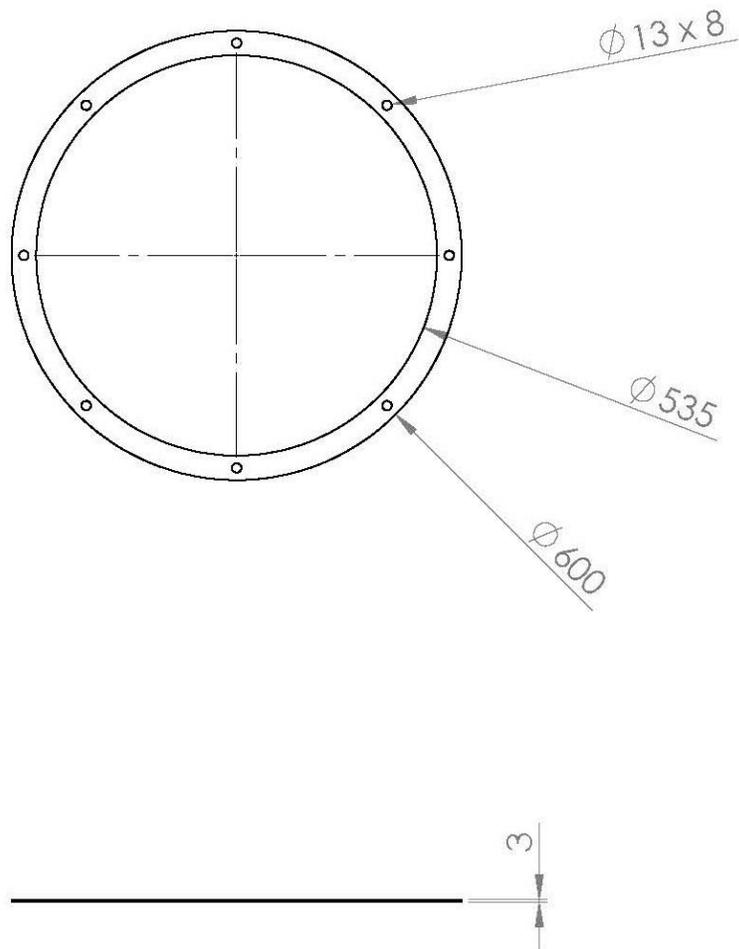
1	Hierro dulce	Lámina 1.5 mm, 2 x 1 m
Cantidad	Material	Especificaciones
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina
Nº PLANO: C2	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 1.2: Sombrero superior



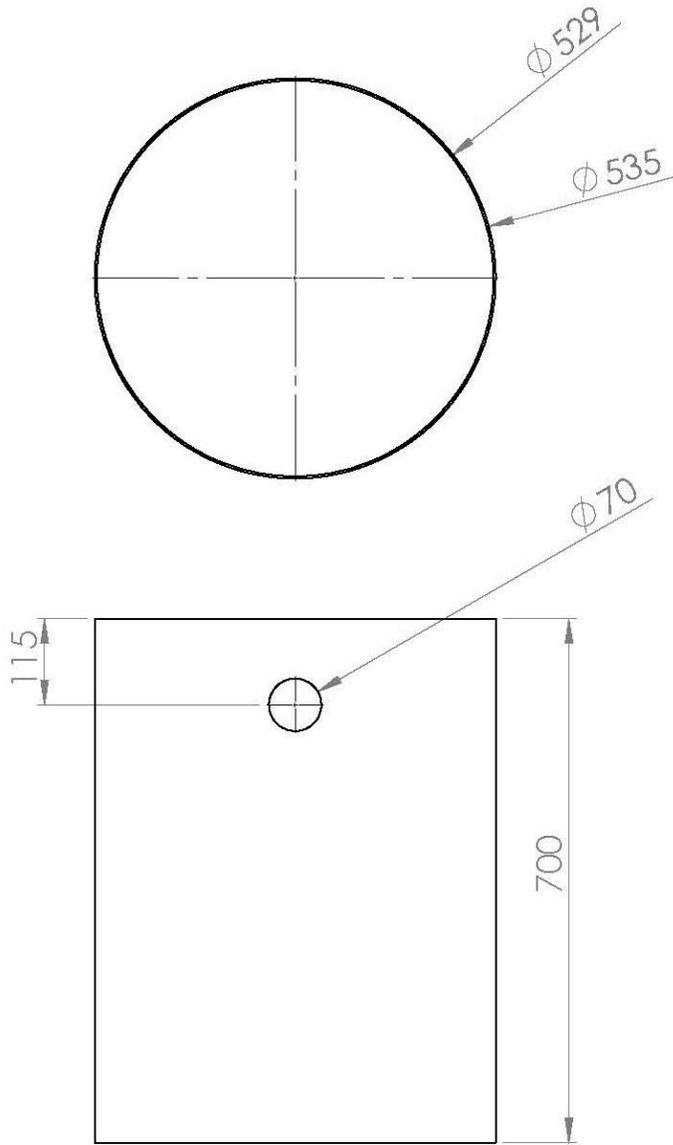
1	Aislante térmico	Aislante refractario	
Cantidad	Material	Especificaciones	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: C3	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 2.1: Capa de aislante superior	



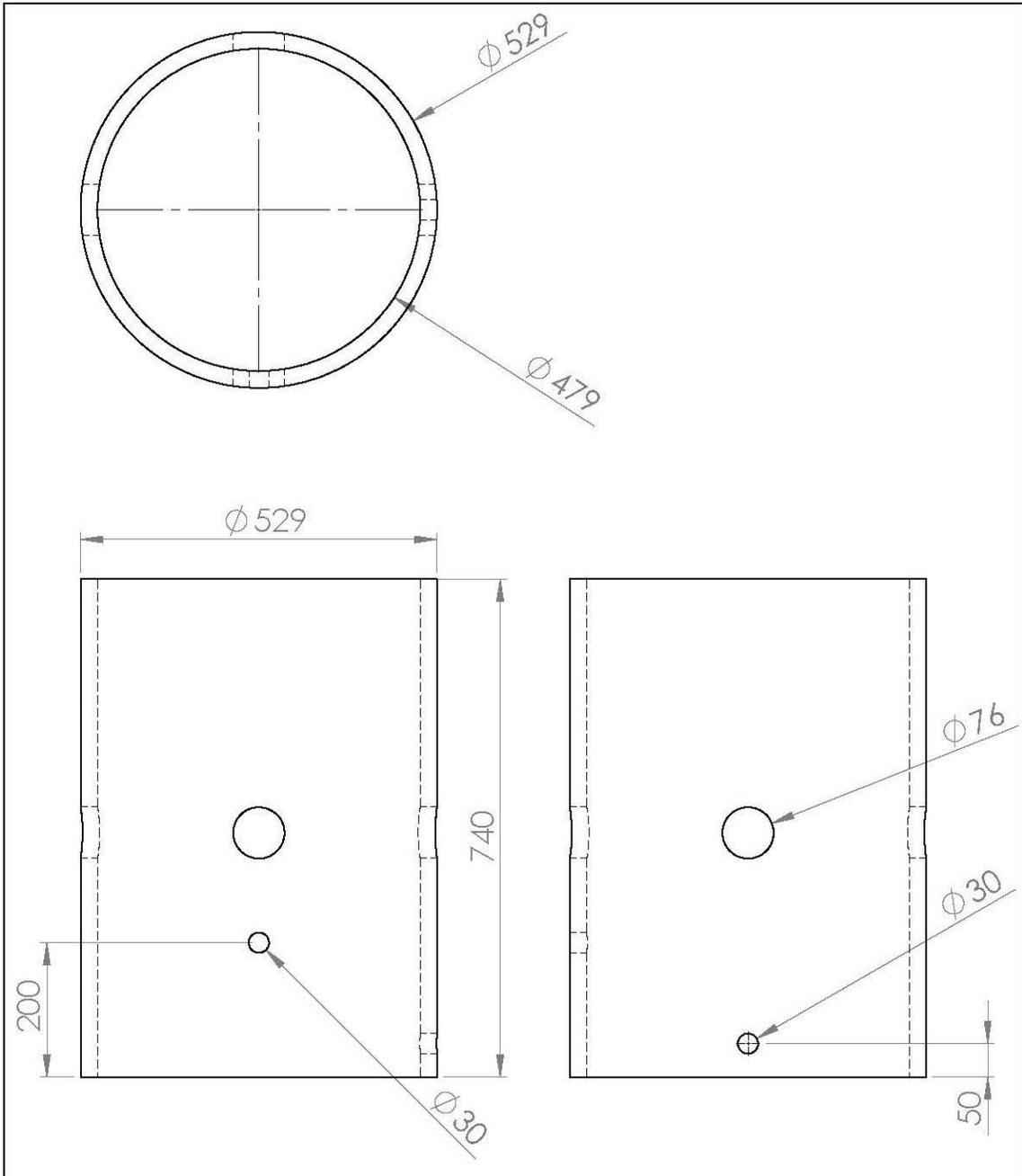
1	Mortero refractario	Ladrillo refractario 22.86 cm x 11.43 cm x 6.35 cm
Cantidad	Material	Especificaciones
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina
Nº PLANO: C4	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 2.2: Capa de mortero refractario superior
		 



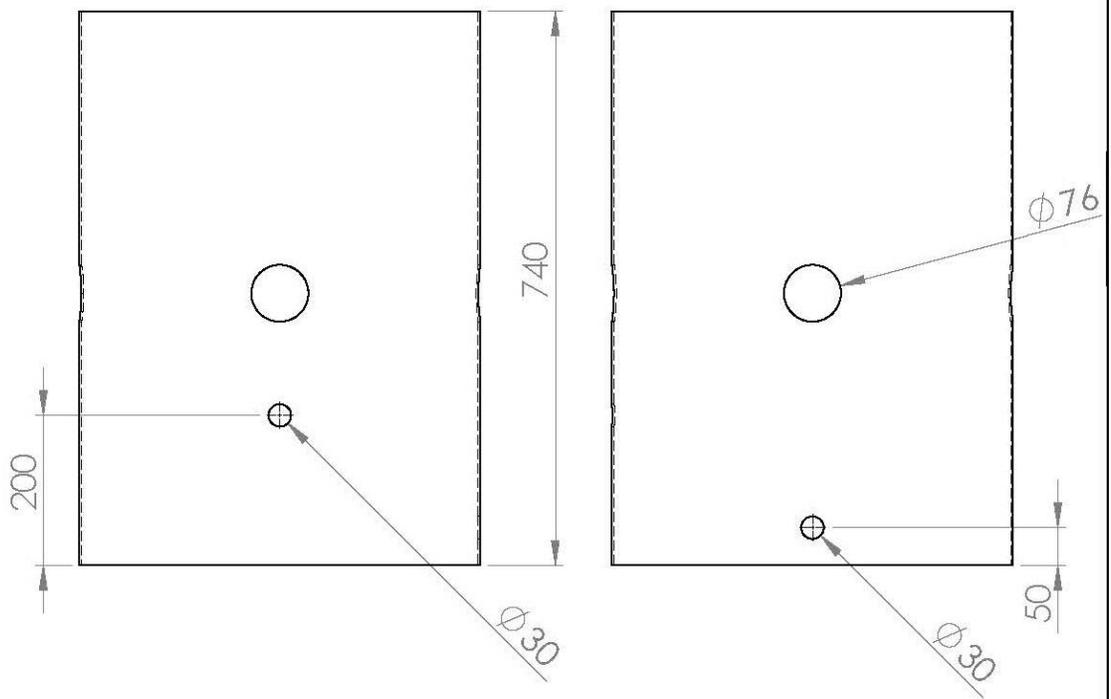
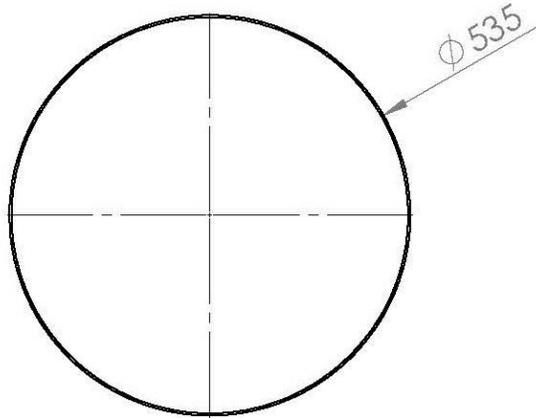
1	Hierro dulce	Lamina 3 mm, 2 x 1 m	
Cantidad	Material	Especificaciones	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: C5	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 2.3: Brida de sujeción	



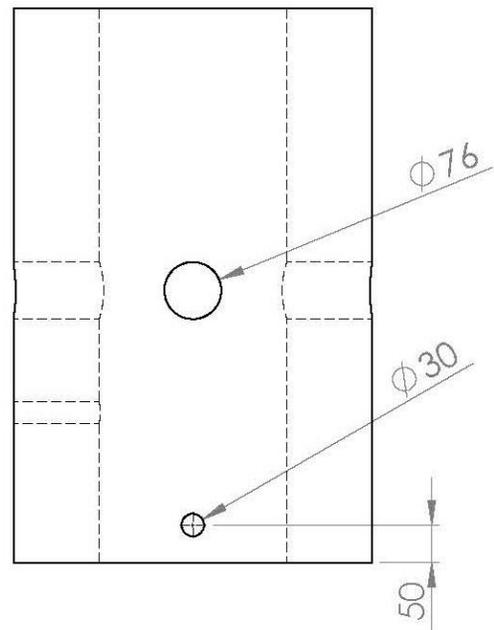
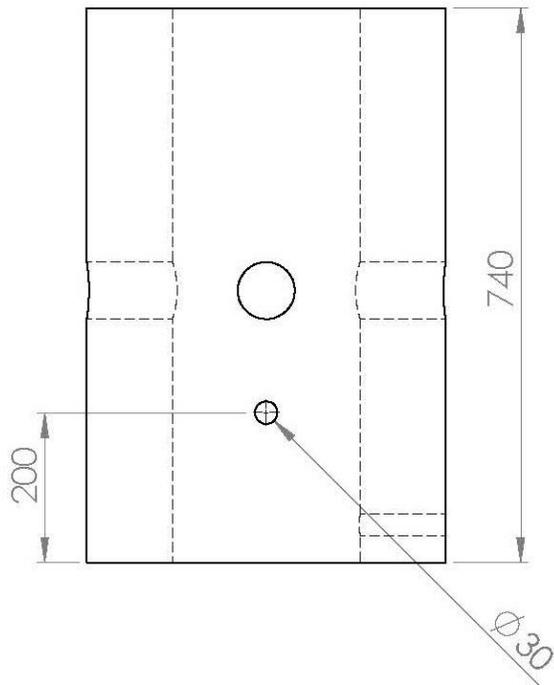
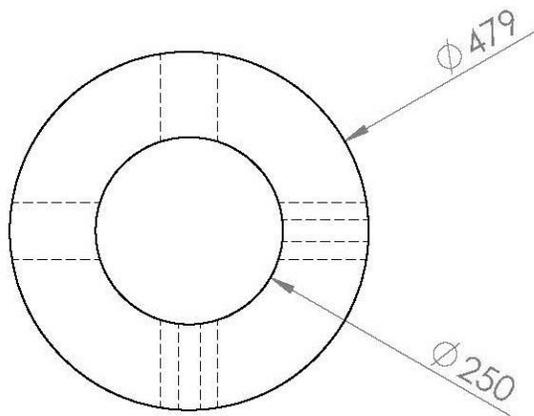
1	Hierro dulce	Lámina 9.5 mm, 2 x 1 m	
Cantidad	Material	Especificaciones	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un homo de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: C6	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 2.4: Chapa metálica superior	



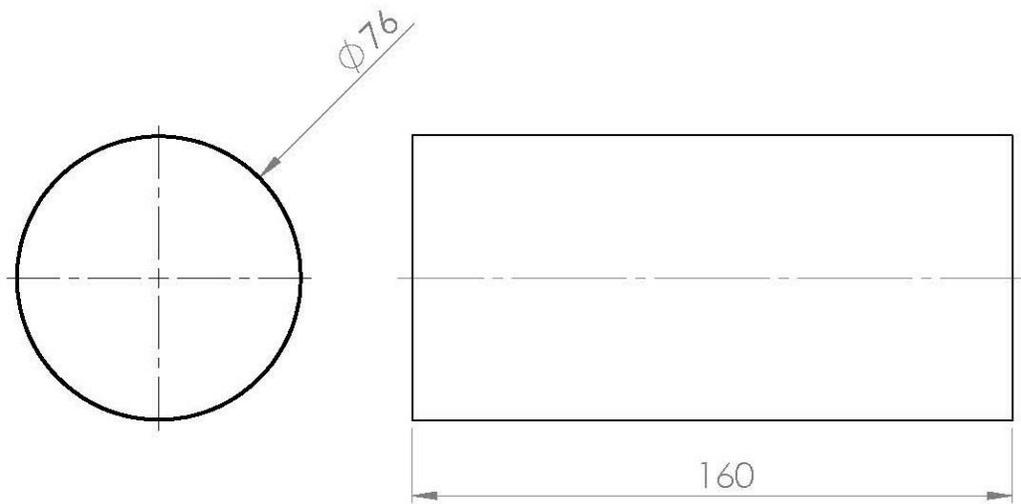
1	Aislante térmico	Aislante refractario	
Cantidad	Material	Especificaciones	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: C7	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 3.1: Capa de aislante inferior	



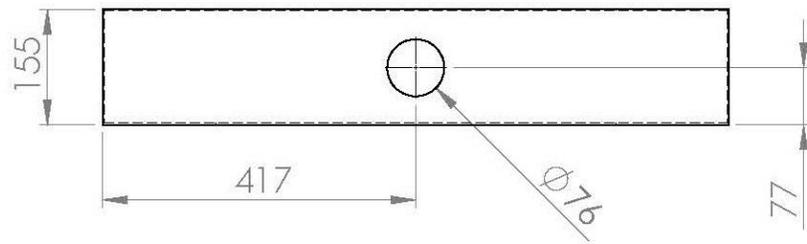
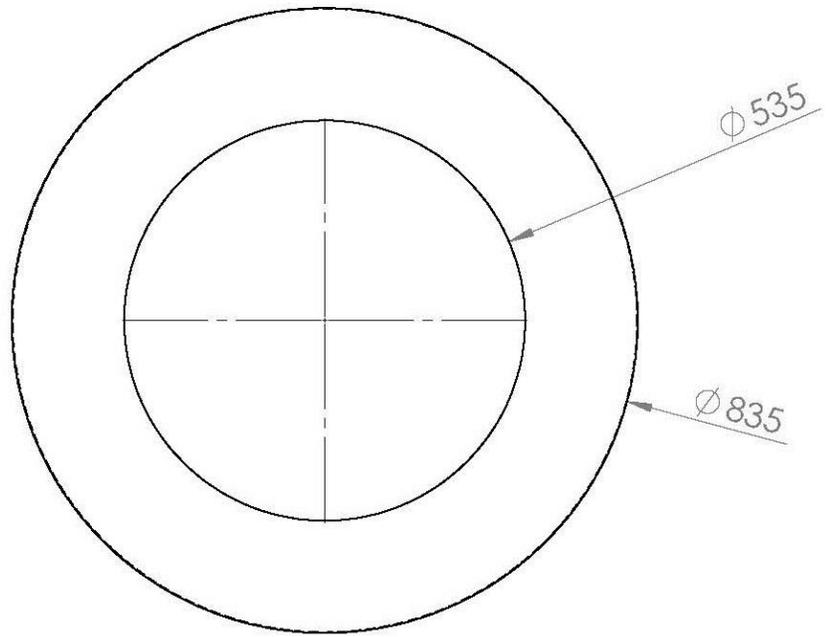
1	Hierro dulce	Lámina 9.5 mm 2x1
Cantidad	Material	Especificaciones
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un homo de cubilote para uso didáctico
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina
Nº PLANO: C8	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 3.2: Chapa metálica inferior
		ESCALA 1:10 UNIDADES: milímetros



1	Mortero refractario	Ladrillo refractario 22.86 cm x 11.43 cm x 6.35 cm	
Cantidad	Material	Especificaciones	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: C9	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 3.3: Capa de mortero refractario inferior	



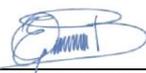
1	Caño metálico	Caño negro mecánico de 3 pulg	
Cantidad	Material	Especificaciones	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: C10	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 3.4: Tubos de extracción de aire caliente	



1	Hierro dulce	Lámina 3 mm, 1.22x 1.44 mm	
Cantidad	Material	Especificaciones	
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño de un horno de cubilote para uso didáctico	ESCALA 1:10
DOCENTE ASESOR: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz		ESTUDIANTE: Byron Stefan Bran Molina	UNIDADES: milímetros
Nº PLANO: C11	Fecha: Septiembre de 2021	Detalle 5.1: Anillo de extracción	

## ANEXO B: COTIZACIONES

### Cotización A.B.C1. Estructura y soporte

	<b>COTIZACION N° 255059</b>	Pagina: 1/1			
	<b>ASESOR VE: QUERUBINA BARILLAS</b>	Fecha: 23/10/2021			
Dirección: Bulevar Los Procer y Calle No 1, Col. San Francisco, San Salvador E-mail: <a href="mailto:ventaempresas5@sv.epa.biz">ventaempresas5@sv.epa.biz</a> Teléfono: 2536-4400 ,Whatsapp: 7167-5487					
Cliente: <b>Byron Bran</b> Contacto: Teléfonos / Correo: Dirección de Entrega: Condición de Pago:					
ENTREGA	DESCRIPCIÓN	U/V	CANTIDAD	P SIN IVA \$	TOTAL \$
02-25-022	SPRAY A TEMP BBQ NG 1200F		1	5.27	5.27
14-20-033	ELECTRODO E6013 3/32 LBR		3	0.93	2.79
18-48-020	PERNO HEX 1/2X1 1/2 TR		8	0.53	4.25
18-62-141	TUERCA SEGURIDAD 1/2"		8	0.25	1.98
18-66-150	ARANDELA PLANA 1/2" GALVANIZAD		16	0.12	1.98
18-66-158	ARANDELA PRESIÓN 1/2 ALTO CARB		8	0.07	0.57
30-02-086	CAÑO GAL MALLA 2" CH 16 1.5MM		1	21.95	21.95
30-05-068	CAÑO NEGRO MECANICO 3" 1.8MM C		1	24.07	24.07
30-08-009	VARILLA REDONDA 3/8" 6M		1	4.25	4.2478
30-09-048	PLATINA 4"X3/16		1	26.28	26.2832
30-11-005	LAM HO 1/16 1.50MM 2X1		1	32.7434	32.7434
30-11-007	LAM HO 1/8 3.00MM 2X1		1	59.9558	59.9558
30-11-046	LAM HO 3/8 9.5MM 2X1		1	173.4513	173.4513
30-11-066	LAM HO 1" 25.4MM 2X1		1	486.7257	486.7257
30-11-071	LAM HO 1/8 3MM 4"X8"		2	89.3805	178.7611
30-05-126	TUBO EST CUA 1" CH16 1.5MM 6M		1	11.9469	11.9469
18-70-086	PERNO ANCLA 3/8"X1 7/8" HLC HX		16	1.1504	18.4071
<b>OBSERVACIONES:</b>			17	<b>SUB TOTAL</b>	<b>\$ 1,055.38</b>
				<b>IVA</b>	<b>\$ 137.20</b>
				<b>VENTAS</b>	<b>\$ 1,192.58</b>
				<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1,192.58</b>
Cheque a nombre de "FERRETERIA EPA SA DE CV" **VERSION 30.03.2021 20.35 **Precios sujetos a cambios sin previo aviso **Precio individual sin incluye IVA **Presupuesto válido por 2 día					
			 <b>EPA-VE</b> 735 Querubina Barillas Asesor Venta Empresas		

## Cotización B.C2. Ventilador blower



### VALORIZANDO EL AIRE

Calle a San Antonio Abad No.4, Rpto. Bernal, S.S. Tel.: (503) 2284-3402, (503) 2274-0663  
www.serkingelsalvador.com fredy.ortiz@serking.com

**Cliente:** EPA  
**Para:** SR. BYRON BRAN  
**Ref.:** EQUIPO BLOWER DE 1 HP  
**e-mail:**

**Fecha:** 30/07/21  
**Total Pags.:** 3  
**Tel.:** +503 7271 8729

CANT.	DESCRIPCION	P. UNITARIO	TOTAL
1	<b>BLOWER MARCA SOLER Y PALAU.</b> Modelo CSB-1300 de 765 CFM. Motor de 1 hp fuera de la corriente de Aire, 3510 rpm. 220 voltios/ monofásico/ 60 hrz. Incluye: Trámision directa, Base y Turbina Metalica. <i>NOTA IMPORTANTE: El equipo debe ser conectado a Voltaje: 220 Monofasico</i> <i>Equipo agotado y no disponible en stock actualmente.</i>		

Sub-Total \$694.69  
IVA \$90.31

EL SUMINISTRO ESTA SUJETO A EXISTENCIA AL MOMENTO DE COMPRA

**TOTAL: \$785.00**

No garantizamos existencia permanente de todos los modelos.

NOTA: La presente oferta NO incluye ninguna instalación, por razones de garantía se debe poner término y arrancador botonera separado con guarda motor por cada equipo instalado.

**PRECIO ES SOLO POR SUMINISTRO DEL EQUIPO EN NUESTRA SALA DE VENTAS, NO INCLUYE ENVIO.**

PARA MAS DETALLES DEL EQUIPO VER FICHA TECNICA A NEXA.

Muy Importante:

Se recomienda una adecuada instalación eléctrica de equipo para efectos de garantía. Con sus respectivas protecciones eléctricas como arrancador tipo botonera con guarda motor, dado térmico y Cableado Vulcan separado para cada equipo.



Imagenes solo de referencia

Validez Oferta: 08 días calendario.

Tiempo de entrega: Sujeto a existencia al momento de la compra

Garantía: 6 meses por defectos en la fabricación.

**Forma de Pago: 60% Anticipo para Ordemar y 40% Contra entrega**

PRECIO ES POR SUMINISTRO EN NUESTRA SALA DE VENTAS.

Cuenta Cuscatlan: 15-40-004788 a nombre Serking El Salvador, S.A. de C.V.

Cuenta Bco America Central: 200784650 a nombre Serking El Salvador, S.A. de C.V.

Cheques a nombre: SERKING EL SALVADOR, S.A. DE C.V.

PRECIO INCLUYE IVA.

Atentamente,

Fredy Ortiz  
Asesor Técnico  
Serking El Salvador, S.A. DE C.V.

Equipos - Mantenimiento - Reparación - Productos de Limpieza

## Cotización B.C3. Materiales refractarios y Sistema de ventilación.



ALMACENES VIDRI, S.A. DE C.V.

SUCURSAL : SOYAPANGO

N.R.F. : 2-7

N.I.T. : 0210-191171-001-6

COTIZACION No. 551200017038

GIRO : FERRETERIA

DIRECCION : CALLE A TONACATEPEQUE Y C. CIUDADELA DON BOSCO,  
SOYAPANGO, SAN SALVADOR

EMAIL : alvisa055@vidri.com.sv

TELEFONO : 2292-3877



Fecha 09/08/2021 09:37:08  
 Cliente JONATHAN BRAN NRF Cliente  
 Direccion CF  
 Atención a CONSUMIDOR FINAL  
 Vendedor 0000555 - SOYAPANGO Validez Oferta  
 Observaciones Valido por 2 días. Condición de pago CONTADO

Código	Descripción	U.M.	Cantidad	Precio	Total
41516	LADRILLO REFRACTARIO RECTANGULAR 9X4.1/2X2.1/2"	PZA	72.00	\$4.050000	\$291.60
72659	CONCRETO REFRACTARIO MIZZOU 55LBS	BLS	1.00	\$73.950000	\$73.95
72662	MORTERO REFRACTARIO SAIRSET 55 LBS	CLB	3.00	\$69.950000	\$209.85
72660	AISLANTE REFRACTARIO KAST-O-LITE 25 LBS	BLS	1.00	\$49.500000	\$49.50
4042	CODO GALVANIZADO 90° 3"	PZA	4.00	\$11.500000	\$46.00
14261	TEE GALVANIZADA 3"	PZA	1.00	\$14.950000	\$14.95

Datos Adicionales:

Sub Total	\$685.85
IVA	\$0.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$685.85</b>

Precios incluyen IVA  
 \*\* Precios sujetos a cambio sin previo aviso \*\*

VENDEDOR \_\_\_\_\_ AUTORIZADO \_\_\_\_\_ ACEPTADO \_\_\_\_\_  
 Página 1/1 Consumidor Final