

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO CUBILOTE CON AIRE PRECALENTADO PARA FINES DIDACTICOS

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

JULIO CÉSAR MEDINA LÓPEZ
(julioce_medina@hotmail.com)

JORGE HUMBERTO TACO TERCERO
(jorge_taco_tercero@hotmail.com)

DIRECTOR: ING. FAUSTO OVIEDO
(fausto_o_ec@yahoo.com)

Quito, Octubre 2009

DECLARACIÓN

Nosotros, Julio César Medina López y Jorge Humberto Taco Tercero, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Julio Medina López

Jorge Taco Tercero

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Julio César Medina López y Jorge Humberto Taco Tercero bajo nuestra supervisión.

Ing. Fausto Oviedo
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Jorge Escobar
COLABORADOR

Ing. Ricardo Soto
COLABORADOR

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas involucradas tanto de manera directa e indirecta en la elaboración del presente proyecto.

JULIO MEDINA

A todas aquellas personas que supieron compartir sus experiencias y conocimientos al momento de realizar este proyecto, al Laboratorio de Fundición de Ingeniería Mecánica por su cooperación al momento en la ejecución del mismo.

JORGE TACO

DEDICATORIA

A mis padres Julio Medina y Eva López por su apoyo incondicional durante mi formación académica, y a las generaciones futuras que harán uso de este proyecto.

JULIO MEDINA

A la memoria de mi padre, y a mi madre que supieron inspirarme para seguir adelante en los momentos más difíciles.

A mi compañero de tesis y a toda la promoción de los Huarohumas.

JORGE TACO

CONTENIDO

CAPITULO I	1
GENERALIDADES.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL:	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	2
1.3 ALCANCES.....	2
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.5 ANTECEDENTES.....	3
CAPITULO II	7
MARCO TEORICO.....	7
2.1 FUNCIONAMIENTO TEÓRICO DE LA FUSIÓN EN EL CUBILOTE	7
2.2 ESTRUCTURA DEL HORNO DE CUBILOTE	8
2.3 ZONAS DEL CUBILOTE	10
2.3.1 ZONA DE PRECALENTAMIENTO.....	10
2.3.2 ZONA DE FUSIÓN.....	11
2.3.3 ZONA DE OXIDACIÓN	12
2.3.4 ZONAS DE REDUCCIÓN	12
2.3.5 ZONA DEL CRISOL.....	12
2.4 FACTORES FÍSICOS QUE EJERCEN INFLUENCIA SOBRE LAS ZONAS DEL CUBILOTE	13
2.4.1 PENETRACIÓN DEL AIRE DE SOPLADO.....	14
2.4.2 PRECALENTAMIENTO DEL AIRE DE SOPLADO.....	14
2.4.3 SOPLADO EQUILIBRADO	15
2.4.4 RESISTENCIA DE LA CAMA DE COMBUSTIBLE	15
2.4.5 EFECTO DE LAS PAREDES.....	16
2.5 ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE DE SOPLADO	17

2.5.1	MÉTODOS USADOS PARA EL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE PARA LA COMBUSTIÓN EN EL CUBILOTE	17
2.5.2	SISTEMAS RECUPERATIVOS DE SOPLADO DE AIRE CALIENTE... ..	18
2.5.3	SISTEMAS DE PRECALENTAMIENTO DEL AIRE DE SOPLADO POR MEDIOS EXTERNOS	18
2.5.4	VENTAJAS QUE OTORGAN LOS EQUIPOS RECUPERATIVOS DE CALOR.....	19
2.6	EQUIPOS DE SOPLADO	19
2.6.1	TIPOS DE SOPLADORES PARA CUBILOTES	20
2.6.2	DUCTOS DE AIRE	21
2.3	REFRACTARIOS	21
2.7.1	CONDICIONES Y REQUERIMIENTOS DE OPERACIÓN.....	22
2.7.2	AISLAMIENTO	23
2.7.3	TIPOS DE REFRACTARIOS	24
2.7.4	CARACTERÍSTICAS DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS.....	25
2.8	COMBUSTIÓN Y COMBUSTIBLES.....	25
2.8.1	ESTEQUIMETRIA DE LAS COMBUSTIONES	26
2.8.1.1	Combustión completa	27
2.8.1.2	Combustión incompleta	27
2.8.1.3	Combustión estequiométrica	27
2.8.2	COEFICIENTE DE EXCESO DE AIRE	28
2.8.3	COMBUSTION CON DEFECTO DE AIRE.....	29
2.8.4	COMBUSTION INCOMPLETA.....	29
2.8.5	PODERES CALORIFICOS	30
2.8.5.1	Poder calorífico inferior (PCI)	30
2.8.5.2	Poder calorífico superior (PCS)	30
2.8.6	RENDIMIENTO DE LA COMBUSTION.....	30
2.8.6.1	Perdidas por inquemados (QI)	31
2.8.6.2	Entalpía de los productos de la combustión (QHS).....	31
2.9	REACCIONES DE COMBUSTIÓN EN EL HORNO DE CUBILOTE	32

2.9.1 LA REACCIÓN DE COMBUSTION.....	32
2.9.2 LA REACCIÓN DE GASIFICACIÓN POR CO ₂ O REACCIÓN DE BOUDOUARD.....	34
2.9.3 REACCIÓN DE GASIFICACIÓN POR VAPOR DE AGUA	35
2.10 COMBUSTION Y CONTAMINACION AMBIENTAL	37
2.10.1 CONTAMINACION DEBIDA AL CARBONO	37
2.10.2 CONTAMINACION DEBIDA AL AZUFRE.....	38
2.10.3 CONTAMINACIÓN DEBIDA AL NITROGENO	38
CAPITULO III	40
SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	40
3.1 DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS TECNOLÓGICOS	40
3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS.....	40
3.2.1 ALTERNATIVA A: HORNO DE CUBILOTE DE COQUE Y AIRE PRECALENTADO.....	41
3.2.1.1 Ventajas	42
3.2.1.2 Desventajas	42
3.2.3 ALTERNATIVA B: HORNO DE CUBILOTE A GAS	43
3.2.3.1 Ventajas	43
3.2.3.2 Desventajas.....	43
3.3 SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	44
3.4 PROTOCOLO DE PRUEBAS	45
CAPITULO IV	47
DISEÑO.....	47
4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO.....	47
4.1.1 DIÁMETRO INTERIOR	47
4.1.2 ALTURA DEL HORNO.....	47
4.1.3 ALTURA EFECTIVA DEL HORNO	48
4.1.4 TOBERAS	48
4.1.5 ALTURA DEL CRISOL.....	50
4.1.6 CONDUCTOS DE AIRE.....	50

4.1.7 CAJA DE VIENTO.....	51
4.1.8 ALTURA DE LA CAJA DE VIENTO	52
4.1.9 ALTURA DE LAS TOBERAS	52
4.1.10 ORIFICIO DE ESCORIADO.....	52
4.1.11 PIQUERA DE ESCORIADO.....	53
4.1.12 ORIFICIO DE SANGRADO.....	53
4.1.13 PIQUERA DE SANGRADO.....	54
4.1.14 APAGACHISPAS	54
4.1.15 VOLUMEN DE AIRE	54
4.1.16 PRESIÓN DEL AIRE DE SOPLADO.....	58
4.1.17 MEDIDOR DE CAUDAL (TUBO PITOT)	59
4.1.18 VENTILADOR CENTRÍFUGO.....	61
4.1.19 REVESTIMIENTO REFRACTARIO	62
4.1.19.1 Análisis de transferencia de calor para determinar el espesor adecuado de la capa de refractario del horno	62
4.1.20 DIÁMETRO EXTERIOR DEL HORNO.....	70
4.1.21 PESO TOTAL DEL HORNO	70
4.1.22 PLACA BASE	74
4.1.23 PUERTA DE DESCARGA.....	79
4.1.24 COLUMNAS DE APOYO	83
4.1.25 CIMENTACIÓN	85
4.1.26 MIRILLAS.....	86
4.2 SISTEMA DE ENSAMBLE	87
4.2.1 TORNILLO DE POTENCIA.....	89
4.2.2 DISEÑO DE LAS GUÍAS ROSCADAS SUPERIOR E INFERIOR	96
4.2.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SOPORTE	98
4.2.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS SOPORTES-NERVADURAS DE LAS GUÍAS SUPERIOR E INFERIOR.....	99
4.3 DISEÑO DE LA CAMARA DE CALENTAMIENTO DE AIRE E INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	102
4.3.1 CAMARA DE CALENTAMIENTO DE AIRE	102

4.3.1.1	Análisis del proceso de combustión	103
4.3.1.2	Determinación de la temperatura de los productos de combustión y relación aire-combustible	103
4.3.1.3	Temperatura de los productos de combustión	104
4.3.1.4	Relación aire-combustible.....	106
4.3.1.6	Longitud de la cámara de calentamiento.....	108
4.3.1.7	Selección del ventilador centrífugo para la cámara de calentamiento	110
4.3.1.8	Espesor del refractario para la cámara de calentamiento de aire	111
4.3.2	DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	115
4.3.3	AISLAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	121
4.3.3	DISEÑO DE LAS TAPAS Y BRIDAS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	123
4.4	DISEÑO DE LOS SOPORTES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR Y CAMARA DE CALENTAMIENTO DE AIRE	127
4.4.1	DISEÑO DEL SOPORTE DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	128
4.4.2	DISEÑO DEL SOPORTE DE LA CAMARA DE CALENTAMIENTO DE AIRE.....	130
CAPITULO V		134
CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y ANALISIS DE COSTOS		134
5.1	GENERALIDADES.....	134
5.2	CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL HORNO	134
5.2.1	REQUERIMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN	135
5.2.2	HOJA DE PROCESOS	136
5.2.3	MONTAJE DE HORNO.....	137
5.3	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	142
5.3.1	ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS.....	142

5.3.1.1 Materiales Directos	142
5.3.1.2 Elementos Directos.....	144
5.3.1.3 Costos de Maquinado.....	145
5.3.1.4 Costos de Montaje.....	148
5.3.1.5 Costo Directo Total.....	148
5.3.2 ANÁLISIS DE COSTOS INDIRECTOS	148
5.3.2.1 Materiales Indirectos.....	148
5.3.2.2 Costo de Ingeniería.....	149
5.3.2.3 Gastos Indirectos	149
5.3.2.4 Costo Indirecto Total.....	150
5.3.3 COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA	150
CAPITULO VI.....	151
FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	151
6.1 FUNCIONAMIENTO	151
6.1.1 ENCENDIDO.....	151
6.1.2 INTRODUCCIÓN DE LA CARGA	152
6.1.3 PERÍODO DE OPERACIÓN	153
6.1.4 FIN DE LA FUSIÓN.....	155
6.1.5 VACIADO DEL HORNO.....	156
6.2 OPERACIÓN	156
6.2.1 PARÁMETROS DE OPERACIÓN.....	156
6.2.1.1 Producción horaria del horno.....	157
6.2.1.2 Suministro de aire.....	159
6.2.1.3 Altura de la cama.....	161
6.2.1.4 Relación metal / coque.....	163
6.2.1.5 Peso de las cargas.....	164
6.2.1.6 Emisión de los gases.....	165
6.2.1.7 Eficiencia del horno.....	165
6.3 OBSERVACIONES GENERALES DEL FUNCIONAMIENTO Y LA OPERACION EN EL CUBILOTE	169

6.4 MANTENIMIENTO	172
CAPITULO VII	174
PRUEBAS DE CAMPO	174
7.1 DATOS OBTENIDOS.....	174
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	177
CAPITULO VIII	178
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	178
8.1 CONCLUSIONES	178
8.2 RECOMENDACIONES	179
BIBLIOGRAFÍA	181
ANEXOS	183

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Horno de cubilote y sus partes.....	9
Figura 2.2. Localización de las zonas en el cubilote.	13
Figura 2.3. Triangulo de la Combustión	26
Figura 3.1. Esquema de la alternativa A. Horno de cubilote con aire precalentado.....	42
Figura. 3.2. Esquema de la alternativa B. Horno de cubilote a gas.....	44
Figura 4.1. Conexión del tubo Pitot al ducto de aire.....	60
Figura 4.2. Distribución de temperaturas en las paredes del horno	66
Figura 4.3. Radios de las diferentes secciones del horno	70
Figura 4.4. Distribución de fuerzas y momentos en la placa base con carga uniforme.....	75
Figura 4.5. Placa circular uniformemente cargada	79
Figura 4.6. Dimensiones de la cimentación del horno.....	86
Figura 4.7. Esquema del soporte de elevación de la sección superior del horno.	87
Figura 4.8. a) Esquema de sistema de elevación con carga, b) Diagrama de cuerpo libre del sistema.....	88
Figura 4.9. Distribución de fuerzas en el tornillo de potencia de rosca cuadrada.	90
Figura 4.11. Esquema que indica como el hilo de la primera tuerca recibe la carga total.....	97
Figura 4.12. Soporte-nervadura	100
Figura 4.13. Sección transversal del soporte nervadura	100
Figura. 4.14. Esquema del proceso de combustión	103
Figura 4.15. Zonas de chorro libre turbulento para una mezcla gas-aire	108
Figura 4.16. Longitud del tubo de mezcla en consideración al diámetro del ducto.....	109
Figura 4.17. Distribución de temperaturas y circuito térmico equivalente a través de una de las paredes de la cámara de calentamiento.....	111
Figura 4.18. Dimensiones de la cámara de calentamiento (medidas en cm).....	115
Figura 4.19. Distribución de temperaturas para el intercambiador de calor a contraflujo	117
Figura 4.20. Ensamble brida carcasa del intercambiador.....	125

Figura 4.21. Distribución de fuerzas en el soporte del intercambiador de calor .	128
Figura 4.22. Diseño del soporte del intercambiador de calor	129
Figura 4.24 Valores máximos de momento flector y fuerza cortante en el marco superior del soporte del intercambiador de calor	129
Figura 4.25. Valores máximos de momento flector y fuerza cortante en las patas del soporte del intercambiador de calor	130
Figura 4.27. Distribución de fuerza en el soporte de la cámara de calentamiento de aire	131
Figura 4.28. Diseño del soporte de la cámara de calentamiento de aire.....	131
Figura 4.29. Diagramas de momentos en las patas del soporte de la cámara de calentamiento de aire.....	132
Figura 4.30. Valores máximos de momento flector y fuerza cortante en las patas del soporte de la cámara de calentamiento de aire	132
Figura 4.31. Valores máximos de momento flector y fuerza cortante en el marco del soporte de la cámara de calentamiento de aire	133
Figura 5.1. Montaje del horno en su zona de trabajo	138
Figura 5.2. Cilindro inferior refractario con agujeros de piqueras y toberas.	139
Figura 5.3. Montaje del intercambiador de calor	140
Figura 5.4. Montaje de la cámara de calentamiento de aire.....	141
Figura 5.5. Instrumento de medida de presión del aire.	142
Figura 5.5 Proceso de cortado y doblado de las planchas.....	145
Figura 5.6. Proceso de barolado de las planchas.	146
Figura 5.7. Corte de las planchas.....	146
Figura 5.8. Soldado de las planchas	147
Figura 6.1. Encendido del horno	151
Figura 6.2. Introducción de la carga de coque	153
Figura 6.3. Horno de cubilote en plena operación.....	154
Figura 6.4. Picado del horno	154
Figura 6.5. Colado de las piezas	155
Figura 6.6. Piezas obtenidas por fundición en el cubilote	155
Figura 6.7. Vaciado del horno	156

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Evaluación de las alternativas de diseño.....	45
Tabla 3. 2. Pruebas a realizarse.....	46
Tabla 4.1. Características de diseño y operación de hornos referenciales.	55
Tabla 4.2. Caudal real de aire para diferentes porcentajes de CO ₂ y CO	57
Tabla 4.3. Velocidades de gases en las chimeneas.....	64
Tabla 4.4. Momentos, esfuerzos máximos y factores de seguridad para placas de diferentes espesores.	78
Tabla 4.5. Momentos, esfuerzos máximos y factores de seguridad para placas de diferentes espesores.	82
Tabla 4.6. Carta de dimensiones para cimentaciones.....	85
Tabla 4. 7. Entalpías de los productos y reactantes	104
Tabla.4.8. Espesor mínimo del aislamiento para el intercambiador de calor.....	122
Tabla 5.1. Costos de materiales directos	143
Tabla 5.2. Costos de elementos directos	144
Tabla5.3. Costos de mano de obra en máquinas-herramientas.....	147
Tabla 5.4. Costo directo total.....	148
Tabla 5.5. Costos de materiales indirectos.	149
Tabla 5.6. Costo indirecto total.....	150
Tabla 5.7. Costo total del horno de cubilote con aire precalentado.....	150
Tabla 6.1. Factor de corrección, según la relación hierro/coque	157
Tabla 6.2. Valores de presión en relación al diámetro interior del horno.....	160
Tabla 7.1. Protocolo de Pruebas	174

ANEXOS

ANEXO A: PROPIEDADES DE LOS LADRILLOS Y MORTEROS
REFRACTARIOS

ANEXO B: CATÁLOGOS

ANEXO C: CARACTERISTICAS GENERALES DE CARGA Y SOPLO DE AIRE
EN CUBILOTES

ANEXO D: CURVAS DE OPERACIÓN PARA CUBILOTES

ANEXO E: COMBUSTIBLES

ANEXO G: ANALISIS TERMICO DEL HORNO

ANEXO H: ANALISIS DEL SOPORTE DE ELEVACION

ANEXO I: BRIDAS Y EMPAQUES PARA BRIDAS

ANEXO J: FOTOS DEL HORNO DE CUBILOTE

ANEXO K: PLANOS

SIMBOLOGÍA UTILIZADA

H: Altura del horno (cm)

H_e : Altura efectiva del horno (cm)

S_1 : Área total de las toberas (cm^2)

S_1' : Área de cada una de las toberas (cm^2)

F: Área de la sección transversal de la caja de aire (cm^2)

h_{crisol} : Altura del crisol (cm)

A_c : Área del conducto de aire (cm^2)

A_{cv} : Área de la caja de viento (cm^2)

h_{cvl} : Altura del crisol (cm)

b: Ancho de la rosca (cm)

C: Altura del orificio de escoriado (cm)

H_u : Altura útil desde el plano de las toberas hasta la zona de carga (cm)

h: Altura de la columna de agua (cm)

l: Avance (cm)

h_c : Altura de la cama de coque (cm)

Q: Caudal de aire requerido para la cámara de combustión del horno (m^3/s)

K' : Coeficiente de resistencia en la zona de fusión

K'' : Coeficiente de conductividad térmica de los gases en el interior del horno (W/mK)

h_1 : Coeficiente de convección en el interior del horno ($W/m^2 K$)

h_2 : Coeficiente de convección del aire a temperatura ambiente en lugares cerrados ($W/m^2 K$)

K_A : Conductividad térmica a la temperatura máxima de servicio del Concrax 1700. (W/mK)

K_B : Conductividad térmica a la temperatura de servicio de la diatomita. (W/mK)

K_C : Conductividad térmica a la temperatura de servicio de la chapa metálica (W/mK)

μ : Coeficiente de fricción

μ_c : Coeficiente de fricción en el collarín

Q_u : Calor útil de la carga (KJ)

Q_t : Calor total que ingresa al horno (KJ)

Q_h : Calor de gases de combustión (KJ)

Q_p : Calor de pérdidas (KJ)

Q_c : Calor de combustión (KJ)

U : Coeficiente global de transferencia de calor ($W/m^2 ^\circ C$)

h_i : Coeficiente de convección interno ($W/m^2 K$)

h_o : Coeficiente de convección externo ($W/m^2 K$)

d_i : Diámetro interno del horno (cm)

d_e : Diámetro externo del horno (cm)

d : Diámetro externo del tornillo de potencia (cm)

d_c : Diámetro del collarín (cm)

d : Diámetro externo del tornillo de potencia (cm)

d_m : Diámetro medio del tornillo de potencia (cm)

ρ_{aire} : Densidad del aire (Kg/m³)

ρ : Densidad de los gases en el interior del horno (Kg/m³)

σ_a : Esfuerzo por aplastamiento (Kg/cm²)

σ_b : Esfuerzo a flexión en el diente del tornillo de potencia (Kg/cm²)

τ_b : Esfuerzo a corte en el diente del tornillo de potencia (Kg/cm²)

σ_{flex} : Esfuerzo a flexión en el cuerpo del tornillo de potencia (Kg/cm²)

\bar{h} : Entalpia e los elementos y productos de la combustión (KJ/Kmol)

e : Eficiencia del tornillo de potencia

R_g : Eficiencia del horno (%)

\dot{m} : Flujo de masa (Kg/s)

S_y : Limite de fluencia del Acero (Kg/cm²)

L : Longitud comprendida entre la zona de reducción y fusión, sitio donde se registra la máxima temperatura del horno (cm)

T_s : Momento torsor para subir la carga (Kg*cm)

T_b : Momento torsor para bajar la carga (Kg*cm)

M_{max} : Momento flector máximo (Kg*cm)

W_{xx} : Momento de resistencia (cm³)

I: Momento de inercia (cm^4)

J: Momento polar de inercia (cm^4)

m: Masa de combustible (Kg)

Pr: Numero de Prant

Re_D : Numero de Reynolds

Nu_D : Numero de Nuselt

n: Número de cuerdas en contacto

P: Presión de aire en las toberas (mm H_2O)

γ_a : Peso específico del H_2O en

P_t : Potencia teórica del venterol (HP)

F: Peso de la sección superior del horno (kgf)

p: Paso de la rosca (cm)

a: Profundidad de la rosca (cm)

P_e : Presión efectiva (Kg/m^2)

P: Producción horaria del horno (Kg/hr)

PCI: Poder calorífico inferior del combustible (KJ)

r_1 : Radio interior de la cámara de fusión del horno (cm)

r_2 : Radio exterior del mortero refractario (cm)

r_3 : Radio exterior de la capa aislante de diatomita (cm)

r_4 : Radio exterior del horno (cm)

AC: Relación aire combustible

T_1 : Temperatura máxima registrada en el interior del horno (K)

T_{s1} : Temperatura de la pared interna del refractario (K)

T_2 : Temperatura de la pared del refractario (K)

T_3 : Temperatura de la capa de diatomita (K)

T_{s4} : Temperatura externa del horno (K)

T_4 : Temperatura del medio ambiente (K)

q_x : Tasa de transferencia de calor (W)

V_c : Velocidad de movimiento de los gases (cm/s)

u_m : Velocidad de los gases en el interior del horno (cm/s)

μ : Viscosidad de los gases en el interior del horno (N/m^2s)

RESUMEN

El presente proyecto se basa en una metodología que considera los principales parámetros de diseño, construcción y operación de un horno de cubilote con aire precalentado utilizado para fines docentes y de investigación. En tal sentido, se evalúan la altura efectiva del horno, el área total de las toberas, las dimensiones de los conductos de aire, la productividad, el consumo de aire, la altura de la cama de coque, el peso de la carga, la relación metal/coque, entre otros parámetros de diseño y operación igualmente significativos.

Se ha hecho una síntesis de dos alternativas previas al diseño, escogiéndose la más adecuada de acuerdo a las necesidades y recursos disponibles. Una vez seleccionada dicha alternativa se procede al dimensionamiento de cada una de las partes que conforman el horno. Seguidamente se ha realizado un análisis económico de los procesos constructivos y de montaje donde se evalúa el costo total del equipo de fundición.

Se ha considerado al funcionamiento, operación y mantenimiento del horno como un capítulo yuxtapuesto, ya que cada uno de estos parámetros guardan estrecha relación y dependencia para que se dé un correcto proceso de fusión y menor escala de efectos nocivos producidos por los gases de combustión.

Finalmente se han realizado y evaluado las pruebas respectivas con el equipo a pleno uso, tanto para condiciones de precalentamiento de aire como con ausencia del mismo, y se han determinado las ventajas que presenta el aire precalentado evaluando su eficiencia y ahorro de combustible en este tipo de horno.

PRESENTACIÓN

El país en los últimos años ha venido experimentando cambios significativos en los diversos procesos de la industria metalmecánica, por este motivo se ha visto una continua y ferviente dedicación a la promoción y difusión de la fundición, esta ha sido considerada un proceso sencillo, pero la fusión en el cubilote se acompaña de la ocurrencia de fenómenos físicos y químicos un tanto complejos, en tal motivo hemos sintetizado los principales parámetros de diseño y operación en una unidad de fusión a escala para que se puedan no solo visualizar con facilidad las partes que conforman el equipo de fundición en sí, sino también tener desde una perspectiva más amplia y manejable, un horno de cubilote que permita el estudio de dichas reacciones y fenómenos mediante una metodología pre-establecida.

Con el fin de obtener un cuadro general que caracterice el horno como objeto de análisis, se hace uso de modelos matemáticos basados en las principales reacciones relacionadas con la combustión del coque en el horno de cubilote, que expresan los balances de masa de las especies gaseosas más importantes involucradas en el proceso y se utilice las expresiones cinéticas obtenidas por otros investigadores para evaluar los parámetros fundamentales en el diseño y construcción del equipo.

Con este proyecto se intenta que el estudiante tenga una mejor percepción de la fundición gris y se motive a incursionar en este campo que tiene una amplia acogida a nivel industrial.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El horno de cubilote es una de las unidades de fusión más utilizadas para la producción de hierro gris, no solo por su facilidad de construcción y manejo, sino también por la gran producción que pueden brindar estos a escala industrial. Más del 90% de los elementos mecánicos para equipos que se hallan sometidos a grandes esfuerzos están hechos de hierro como materia prima, por lo cual su fabricación se ha convertido en una de las más importantes a nivel mundial, en tal sentido el horno de cubilote pasa a ser la herramienta adecuada para su proceso de obtención.

La producción de hierro colado ha alcanzado un papel preponderante, tanto por sus características y propiedades mecánicas, así como por la vasta cantidad de recursos disponibles en varias regiones del globo, este metal es transformado para obtener los diversos tipos de fundiciones, entre las cuales se halla la fundición gris la cual es una aleación hipoeutéctica con un contenido de carbono de hasta el 4%; el grafito fluye mucho mejor cuando el porcentaje de carbono es mayor y la temperatura de fusión es alta, estas condiciones de servicio solo se encuentran en hornos que presten dichos requerimientos; además para tener un buen control de las variables de cualquier fundición es necesario saber cuáles son los contenidos de carbono de la materia prima utilizada.

En virtud a lo anteriormente expuesto y debido a que las fundiciones tienen un alto contenido de carbono, estas son relativamente duras y resistentes al desgaste por lo que tienen innumerables aplicaciones y mayores ventajas en relación al acero.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 OBJETIVO GENERAL:

El Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica dispondrá de un equipo que permita comprender la obtención de piezas de fundición gris utilizando un horno que es muy utilizado en nuestro medio.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar los cálculos para definir la cantidad de aire necesario para el horno; seleccionar y construir el intercambiador de calor correspondiente.
- Determinar las medidas y material correspondientes para la construcción de un horno cubilote que funda 30Kg. por carga.
- Construir un horno cubilote fácil de armar, desarmar y visualizar sus partes.

1.3 ALCANCES

- Construir el horno de cubilote y realizar las primeras fusiones de fundición gris.
- Operar y comprobar su facilidad para su utilización para fines docentes.
- Realizar un manual de operación, funcionamiento y mantenimiento

1.4 JUSTIFICACIÓN

La industria de producción de piezas fundidas en el Ecuador dispone de una buena cantidad de hornos de cubilote, esta producción requiere de un soporte de investigación para mejorar sus niveles de producción, con un horno de pequeña producción se facilitará la operación y por lo tanto la realización de investigaciones.

1.5 ANTECEDENTES¹

La palabra cubilote procede del vocablo latino “cupula”, que significa cuba, nombre que se le asigna a este tipo de horno por su forma particular a manera de cilindro vertical cuya cavidad se halla revestida de refractario, y que posee aberturas en la parte superior tanto para la carga del metal como para la salida de los gases, de la misma manera en su parte inferior está provisto de aberturas para el ingreso de aire, descarga del metal fundido y escoriado.

A pesar de que la primera patente de lo que se considera el cubilote moderno ha cumplido más de doscientos años hasta la fecha de ser otorgada a John Wilkinson, se puede decir que el cubilote mantiene su diseño fundamental hasta nuestros días. Naturalmente ha sufrido variaciones estructurales, se le han incorporado aditamentos y se han rediseñado algunas de sus partes, particularmente el sistema de toberas, pero su concepción inicial de horno tubular, en posición vertical, con la entrada de la carga metálica por la parte superior y un contacto directo entre el combustible sólido y dicha carga metálica, se ha mantenido inalterable.

Han existido diseños ingeniosos de cubilotes pequeños para fines específicos, uno de ellos fue el elaborado por W. J. Keep, que consistía en varias secciones montadas sobre ruedas, o el peculiar diseño de J. W. Paxon, que tenía su propio soplador y una protección para prevenir el daño del cable conductor, este horno fue utilizado para la reparación de las rieles de tranvía. T. D. West, un ingenioso experimentador diseñó un horno combinación de cubilote y crisol, con el objeto de practicar coladas experimentales, teniendo resultados infructuosos; investigo hasta diseñar el cubilote de fusión comparativa con tobera central para fundir toda clase de hierro.

El cubilote de Shaw-Walker fue uno de los más curiosos de la época, poseía un diámetro interior de unos 60 cm y unos 60 cm de altura sobre las toberas, con un

¹AMERICAN SOCIETY FOUNDRYMEN'S, El Horno de Cubilote y su Operación, Mexico, Continental, 1974.

soplador pequeño en cada tobera; poseía además un orificio sobre el coronamiento que ayudaba a forzar el chorro de aire hacia el centro, al mismo tiempo que irradiaba el calor hacia abajo. Su producción era de alrededor de 45 a 90 Kg alcanzando temperaturas de hasta 1425 °C.

Pero fueron años de investigación hasta que se empezaron a mejorar los diseños para una mayor producción, como se podía apreciar en el arreglo de Zippler, el cual poseía un estrechamiento ligero con tres hileras de ladrillo refractario de forma dispar, pero el mayor detalle en el diseño estaba enfocado a las toberas, en las cuales según Kirk el diseño de Zippler era el más indicado.

Tras verificar que la fusión del metal y su calidad dependían mucho de la posición de la tobera, sus dimensiones y del flujo de aire, se empezaron a diseñar diversos tipos de toberas entre las cuales se podían apreciar las toberas ovaladas, de ranura vertical, invertidas en T, de soplado laminar, triangulares, extendidas, las de Blakeney entre otras.

Pero fue hasta el cubilote de Machenzie con el cual la industria empezó a ver resultados a intervalos de tiempo corto, este cubilote fue conocido como el cubilote de las dos horas, ya que incluía un número de detalles nuevos, una de ellas era ya no dirigir el soplado al centro del cubilote proporcionado por el venterol y las toberas, sino que este más bien suponía suministrar un volumen de aire suficiente para llenar el cubilote, para lo cual se acoplaron a las corazas de hierro cajas de viento para recibir la tubería de soplo de aire y este era entregado al cubilote desde una cámara de aire que lo rodeaba a través de una tobera continua, la cámara de aire estaba enteramente abierta en el fondo dando un espacio limitado para la admisión del viento en el cubilote, pero una de las desventajas de este horno era que tenía una tendencia a abovedar la carga y atascarse cuando no era operado apropiadamente.

A inicios del siglo XIX los hornos más usados fueron los Colliau y el Newton, que incluso remplazaron al Irlandés muy usado en Inglaterra debido a su complicado

sistema de toberas. Existieron otros tipos de cubilotes de menor relevancia como el Greiner, el Poumay, y el escocés Stewart, que suponían poco ahorro de coque. Los primeros intentos de sobrecalentar el aire para aumentar la eficiencia del horno se dieron con el cubilote Sheehan, el cual contaba con dos juegos de toberas, mediante las cuales se proponía fundir con la fila superior y sobrecalentar con la inferior, además con este diseño se aseguraba la reducción del silicio en la zona de reacción en las toberas, otro horno que intentaba realizar una recuperación del calor cuyas pérdidas se generaban por la reducción del monóxido de carbono fue el cubilote de inyección balanceada de aire de la Asociación Británica para investigaciones en hierro fundido.

Se han hecho muchos intentos por recuperar el aire perdido tanto sensible como latente, en el propio aire inyectado; unos trataron enfriar los refractarios por un lado y calentarlos por otro mientras que otros intentaron aprovechar el calor que escapa por el orificio del escoriador. Para finales de 1890, se empezaron a probar los primeros intercambiadores de calor, aunque con poco éxito, estos suponían un cambio radical si se los diseñaba de manera apropiada, uno fue el de Holland el cual se lo ubico en la puerta de carga pero con muy pocas probabilidades de éxito. Otros investigadores como Frauenknecht probaron derivar parte de los gases calientes existentes en la zona de precalentamiento, por medio de tubos dirigidos hacia abajo calentado el aire de soplado.

En 1908 Baillot, consiguió calentar aire haciéndolo pasar a través de de una caja de metal a manera de anillo colocada en la chimenea, pero la recuperación del calor no fue la suficiente, luego Coplan mejoró este sistema aumentando el tamaño del anillo y fabricándolo de una aleación altamente resistente al calor. También puso aletas en el anillo para hacer recircular el aire a través de estas y aumentar la tasa de transferencia de calor. Moore experimento con un tipo vertical de caja de viento fundida, gradualmente aumentaban de tamaño, lo cual era un problema cuando se requerían de fundiciones sucesivas.

No fue hasta Barr y Holmes que diseñaron el intercambiador tubular con el que se obtuvieron resultados evidentes en el proceso de fundición, este intercambiador

constaba de tubos conectados en la parte alta a manera de U, con un anillo de embolo, con el propósito de absorber el esfuerzo longitudinal. Con el paso del tiempo y de varios procesos experimentales se llegó hasta el sistema Griffin de soplado con aire caliente el cual fue empleado más ampliamente y con éxito mediante la utilización tanto del calor sensible como del calor latente del gas del cubilote, en este sistema una gran parte de los gases era extraída por debajo de la puerta de carga y quemada en el intercambiador de calor a temperaturas de aproximadamente 320°C, pero a pesar de los resultados obvios que ofrecía este diseño su mantenimiento era complicado.

Se diseñaron nuevos intercambiadores de calor y con resultados excelentes como el de Fischers y Schaffhausen que marcaron la evolución del cubilote como un horno de producción en masa. Con el inminente avance industrial se empezó a investigar a profundidad los fenómenos de transferencia de calor y utilizar estos para los diferentes procesos de fundición, se empleo la combinación de temperaturas a intervalos regulares para obtener una mayor eficiencia, estudiándose además como la cantidad de flujo de aire intervenía en los procesos de oxidación del metal y en las diferentes proporciones de carga y coque.

También se idealizaron maneras de mejorar el proceso de combustión, para ello algunos investigadores probaron introducir junto con el aire de las toberas combustibles, alquitrán, carbón pulverizado y petróleo, pero todas estas idealizaciones se abandonaron al haber presenciado algunas explosiones provocadas por dichas sustancias.

A medida que la tecnología avanza se han realizado nuevos arreglos, y el horno de cubilote ha alcanzado un papel preponderante en la producción de hierro fundido alrededor del mundo, convirtiéndose este en una de las herramientas fundamentales en el progreso industrial.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 FUNCIONAMIENTO TEÓRICO DE LA FUSIÓN EN EL CUBILOTE²

El horno de cubilote es una unidad de fusión utilizada generalmente para la fabricación de hierros fundidos. La carga se realiza por un tragante superior (60 % de hierro, 20 % de chatarra, 15 % de carbón de coque y un 5 % de piedra caliza, o vidrio o mármol para preparar), mientras que el aire precalentado y el combustible inicial entran por la parte inferior. Tradicionalmente, el combustible más utilizado en estas unidades es el coque de fundición, éste se obtiene sometiendo la hulla o carbón mineral a un proceso de coquización, que tiene como finalidad eliminar los materiales volátiles y aumentar el poder calorífico del combustible.

En su versión más simple, el cubilote consiste en un cilindro vertical recubierto en su interior con material refractario. En la zona inferior se localiza una serie de toberas a través de las cuales se inyecta el aire que transporta el oxígeno necesario para la combustión llamado comúnmente sople. Al mismo tiempo, por la parte superior del horno se introducen los materiales de carga sólidos, entre los cuales se encuentran: el coque, el metal de carga y los fundentes.

Las reacciones más importantes relacionadas con la combustión son: la reacción de combustión, la reacción de gasificación por CO_2 y la reacción de gasificación por vapor de agua.

Tanto el balance térmico, como la pérdida por oxidación de los elementos metálicos en la carga, dependen del avance relativo de estas reacciones, el cual se ve reflejado directamente en la calidad de las piezas que se producen, ya que de la temperatura del metal de salida dependerá en gran parte el éxito de los

²RAMOS. A, BORIS. A, Metodología para evaluar los hornos de cubilote, El Cid Ed, Argentina, 2007.

procesos de metalurgia de cuchara y la generación de algunos defectos tales como las contracciones, juntas frías, segregación, mal acabado superficial, etc.

2.2 ESTRUCTURA DEL HORNO DE CUBILOTE³

En la figura 2.1 se muestran las partes principales de un cubilote convencional

- a. Envoltura cilíndrica de chapa de acero soldada.
- b. Revestimiento interno de material refractario (entre este y la envoltura se deja una capa intermedia de unos 2 cm, rellena de arena seca, para permitir las dilataciones radiales y axiales de refractario).
- c. Chimenea y su correspondiente cobertura. Algunas veces se añade apagachispas.
- d. Boca de carga: pequeña y provista de una plancha inclinada para la introducción de las cargas cuando se realizan a mano, más amplia si se hace mecánicamente.
- e. Cámara de aire anular, de plancha delgada, que circunda del todo o en parte la envoltura y dentro de la cual, pasa aire o viento (enviado por una máquina soplante) para la combustión del coque.
- f. Toberas, de hierro colado o chapas de acero, 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 está agujereada y provista de portillos con mirillas (de mica o cristal) para vigilar la combustión.
- g. Piquera de escoria. Abertura dispuesta a unos 15 o 20 cm aproximadamente por debajo del plano de toberas, inclinada de 30 a 40°, respecto a la horizontal, para facilitar la salida de la escoria.
- h. Puerta lateral de encendido y limpieza. Antes de cerrarla, al comienzo de la fusión, hay que rehacer el murete que completa el revestimiento.

³RAMOS. A, BORIS. A, Metodología para evaluar los hornos de cubilote, El Cid Ed, Argentina, 2007.

- i. Canal de colada, de plancha de hierro, revestido de masa refractaria. Mantiene la misma inclinación de la solera (10°), para hacer caer el hierro fundido en el caldero de colada.
- j. Solera a fondo de cubilote. Consiste en arena de moldeo apisonada e inclinada 10° hacia la piquera de sangría del horno.
- k. Plancha base de envoltura cilíndrica; de hierro colado o chapa fuerte. En su centro hay una abertura del diámetro de la solera, que puede cerrarse 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 puntal. A través de ella se descarga el contenido de coque de la cama, al final de la operación del horno.
- l. Columnas de apoyo: casi siempre son cuatro, de hierro fundido y son sostenidas a su vez por unos cimientos de ladrillos de hormigón.
- m. Crisol: es la parte inferior del cubilote comprendido entre la solera y el plano de las toberas. Se estima que el metal ocupa en él, el 46 % del volumen. El 54 % restante está ocupado por coque incandescente.

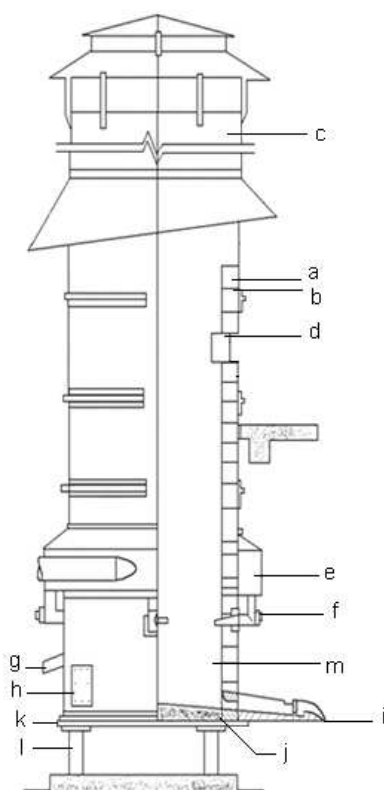


Figura 2.1. Horno de cubilote y sus partes

2.3 ZONAS DEL CUBILOTE⁴

La energía necesaria para el proceso de fusión se genera cuando el coque incandescente se pone en contacto con el oxígeno que entra en el soplo produciendo la reacción de combustión. Los gases calientes producto de la combustión suben a través de la columna del horno y entran en contacto con la carga metálica fundiéndola. Como los gases ascienden y los materiales de carga descienden, el proceso se considera a contracorriente. Ha sido común que los investigadores de cubilote lo dividan en zonas según los procesos y reacciones que ocurren en él. Las cinco zonas más comúnmente citadas son: la de precalentamiento, la de fusión, la de reducción, la de oxidación y el crisol.

2.3.1 ZONA DE PRECALENTAMIENTO

La función principal de esta sección del cubilote, que queda sobre la zona de fusión, es servir como cambiador de calor en el que se recupera el calor sobrante por un cambio de calor directo entre los gases que viajan hacia arriba y las cargas que descienden junto con el combustible. Además de ocurrir un intercambio de calor también se tienen reacciones químicas que no son necesariamente benéficas.

En la zona de precalentamiento pueden ocurrir también otras dos reacciones. Una de ellas es la descomposición analítica del monóxido de carbono, para depositar carbón. El régimen de esta reacción es despreciable abajo de 482°C, y arriba de unos 650°C el equilibrio es desfavorable. Sin embargo, a unos 540°C la reacción es bastante rápida en la presencia de una superficie catalítica tal como el carbón o los óxidos de hierro.

La forma de carbón depositado es relativamente reactiva, y el principal efecto de esta reacción es el cambio de la relación CO/CO₂ de los gases de escape y aumentar ligeramente la temperatura de descarga del gas. En efecto, el carbón

⁴ C. SILVA. Modelo matemático para la disolución del silicio en el horno de cubilote, Bogotá, 1995

entra en un ciclo en la zona de precalentamiento, debido a la deposición a bajas temperaturas y a la formación de CO a altas temperaturas cercanas a la zona de fusión.

Otra de las reacciones que se cree ocurre en la zona de precalentamiento es la calcinación de la caliza y una ligera oxidación de la carga, así como una absorción de azufre por el metal sólido, de los compuestos de azufre presentes en el gas. La química exacta de la reacción está algo en duda, debido a la escasa información disponible sobre la naturaleza y distribución de los gases que contienen azufre, a diferentes niveles en el cubilote.

2.3.2 ZONA DE FUSIÓN

Cuando se alcanza la temperatura de fusión de la carga metálica se entra a la zona de fusión, la extensión y comienzo de ésta va desde arriba de las toberas a la parte superior del cubilote y depende de la naturaleza del material cargado, ya que el hierro funde a unos 1.150 °C y el acero a unos 1.500 °C. Las condiciones más severas se encuentran precisamente arriba de las toberas, en donde tiene lugar la oxidación del hierro y otros elementos y el ataque de la escoria es más destructivo, debido a la alta temperatura de esta zona existe un incremento de la acción química y la erosión mecánica.

La reacción principal en esta zona es el cambio de fase de sólido a líquido. Esto extrae calor adicional, cuya cantidad exacta es función del calor de fusión del metal fundido y de la relación metal/combustible empleada.

En esta zona ocurre una parte significativa de la absorción de carbono por parte de los metales deficientes en este elemento. La reacción es:



$$\text{Calor a } 410^\circ\text{C} = \frac{44200\text{Kcal}}{\text{Kgmol}} \quad (2.2)$$

2.3.3 ZONA DE OXIDACIÓN

Se encuentra cercana a las toberas y es donde ocurre la reacción de combustión, por tanto es rica en dióxido de carbono; la extensión de esta zona depende de las condiciones del soplo (temperatura, caudal, enriquecimiento con oxígeno, etc.), de las características del coque (reactividad y tamaño), del diámetro y tipo de refractario del horno. Es precisamente en esta zona donde se produce el calor necesario para el proceso.

Los regímenes de todas las reacciones en esta zona están controlados primordialmente por el transporte de masa y son por lo tanto esencialmente independientes de la reactividad, combustibilidad, superficie interna o habilidad de ignición del combustible, y arriba de los 1100°C es dependiente de la temperatura solo ligeramente. Los regímenes de las reacciones que ocurren en esta zona dependen principalmente de la superficie aerodinámica del combustible, que es aproximadamente proporcional al diámetro promedio de los trozos de carga y a la concentración de los reaccionantes en la vena del gas.

2.3.4 ZONAS DE REDUCCIÓN

Son ricas en monóxido de carbono, la superior debido a la gasificación del coque por CO_2 y la inferior debido a las reacciones de oxidación del silicio y el carbono en el metal en la zona del crisol. La extensión de la zona de reducción superior depende de la altura de la cama y de las condiciones del soplo, especialmente del caudal. El tamaño de la zona de reducción inferior depende de la diferencia de altura entre las toberas y la parte superior de la capa de escoria en el crisol.

2.3.5 ZONA DEL CRISOL

Es la zona donde las reacciones están más relacionadas con la composición química del metal que con la combustión; en ella ocurren la separación del metal y la escoria debido a su diferencia de densidades, la recuperación de carbono en

el metal por el contacto con el coque y reacciones de oxidación-reducción en la interface metal escoria.

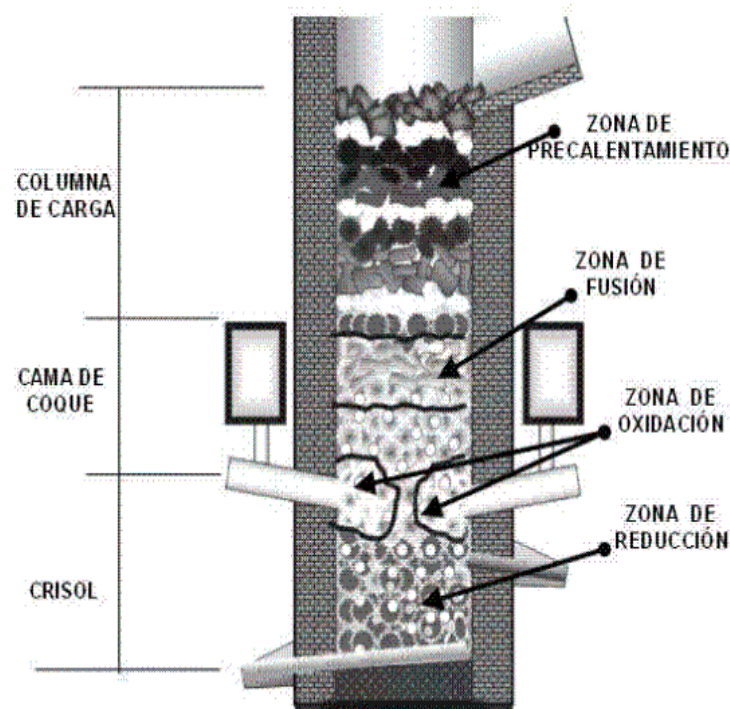


Figura 2.2. Localización de las zonas en el cubilote.

2.4 FACTORES FÍSICOS QUE EJERCEN INFLUENCIA SOBRE LAS ZONAS DEL CUBILOTE⁵

Existen múltiples factores que ejercen influencia y causan ciertas limitaciones físicas que causan que las zonas parezcan, en un cubilote real, muy diferentes de las representadas en la Fig. 2.2 para la cama idealizada, y que también influyen en los resultados de la operación real. Los más importantes de ellos se discuten a continuación.

⁵AMERICAN SOCIETY FOUNDRYMEN'S, El Horno de Cubilote y su Operación, , Mexico, Continental, 1974.

2.4.1 PENETRACIÓN DEL AIRE DE SOPLADO

En la práctica, el aire es introducido a través de un cierto número de toberas localizadas alrededor de la periferia del cubilote. Puesto que el oxígeno es consumido después de pasar una distancia equivalente a de 3 a 7 diámetros de trozo, y esto corresponde a la región de máxima temperatura, se deduce que existe una zona de reducción con temperaturas decreciendo progresivamente hacia el centro del cubilote, al nivel de las toberas. Afortunadamente, la velocidad del aire en sentido horizontal se acerca a cero según los gases penetran hacia el centro, y la extracción de calor no es demasiado grande si la zona de reducción no se deja extender por más de unos cuantos diámetros de trozo.

A pesar de todo, existe una relación óptima entre el diámetro del combustible (tamaño del combustible) y el diámetro del cubilote, que en la práctica parece estar entre $1/10$ y $1/12$ para los tipos de coque normales. Con relaciones significativamente mayores que éstas puede tenerse un flujo de gas suficiente como para causar un centro frío, con efectos adversos sobre el sobrecalentamiento del metal. Con relaciones significativamente menores que $1/10$, el oxígeno libre penetra hasta el centro del cubilote, en donde reacciona rápidamente con el metal fundido.

2.4.2 PRECALENTAMIENTO DEL AIRE DE SOPLADO

El precalentamiento del aire de soplado aumenta la temperatura de la zona de oxidación en proporción directa al calor sensible abastecido con el aire, mientras que al mismo tiempo decrece ligeramente la profundidad de esta zona. La zona de reducción es aumentada en profundidad en una cantidad igual al decrecimiento en la profundidad de la zona de oxidación, pero el cambio tiene poca influencia sobre la altura de la zona de fusión. Además, en el efecto general el precalentamiento del aire de soplado resulta en un mayor volumen de la

porción del fondo de la cama, estando a una temperatura significativamente más alta y constituyendo una mínima parte de este volumen una atmósfera oxidante.

2.4.3 SOPLADO EQUILIBRADO

El aire admitido arriba del nivel normal de toberas reacciona con el monóxido de carbono en la zona de reducción, o con el carbono del combustible. Indudablemente ocurren ambas reacciones, puesto que la cantidad de CO adyacente a las toberas auxiliares no es, probablemente, suficiente para consumir todo el oxígeno antes de que reaccione con el combustible sólido.

El efecto neto es el mismo, cualquiera que sea el mecanismo; por ejemplo, aumentar la temperatura en la zona de reducción alrededor de las toberas auxiliares en proporción a la cantidad de aire admitido, resultando así un aumento en la profundidad de la zona de reducción o sobrecalentamiento.

Esto puede ser especialmente benéfico con los combustibles más reactivos, que de otra manera tienden a dar zonas de reducción poco profundas. El efecto sobre la forma de las zonas en el cubilote de introducción de aire por medio de toberas auxiliares en la zona de reducción será, en general, acentuar la concavidad de las mismas. Cuanta más alta sea la superficie relativa del combustible y más pequeña la relación del diámetro del combustible al diámetro del cubilote, más pronunciado será el efecto.

2.4.4 RESISTENCIA DE LA CAMA DE COMBUSTIBLE

La resistencia de la cama de combustible es, con frecuencia, un factor importante en la operación del cubilote. Los intentos de operar el cubilote a capacidades apreciablemente más altas que las diseñadas, o a usar combustible de menor tamaño, resulta con frecuencia en presiones contra las que el soplador centrífugo comúnmente empleado es incapaz de entregar el volumen de aire necesario.

Los combustibles de calidad pobre, que se despedazan apreciablemente debido al choque térmico o al mecánico producen también una mayor resistencia de la cama de combustible, que puede dar lugar a problemas de presión, y asimismo el uso de combustible que contiene cantidades apreciables de materiales de tamaño pequeño. La resistencia al flujo de gas en el cubilote (aproximadamente proporcional a la presión en la caja de viento) se determina primordialmente por la resistencia de la cama, la que, en cambio, es una función de la homogeneidad de tamaño del combustible y de la velocidad del gas. Generalmente, el metal cargado es apreciablemente más grande que el combustible, y la columna de carga arriba de la zona de fusión influye la resistencia total sólo ligeramente, excepto en los casos en que tiende a apretar la cama de combustible debido a su peso.

2.4.5 EFECTO DE LAS PAREDES

A causa de la relación entre el tamaño del combustible y el contorno de la pared del cubilote, el combustible cercano a las paredes no puede apretarse de una manera normal, y volumen de espacios vacíos en esta región de la periferia es, por lo tanto, mayor que en el cuerpo principal del cubilote. Este aumento en volumen vacío causa una menor resistencia al flujo del gas y, por tanto, una tendencia de los gases a canalizarse.

Cualquier cantidad de oxígeno en el gas arriba de la zona de fusión es debido indudablemente a este efecto de canalización, a no ser que haya canales desarrolladas en la cama misma debido a otras causas. Este fenómeno es conocido generalmente como "factor de efecto de las paredes", y se define como "aquella fracción de la resistencia de una cama de diámetro infinito, exhibida por la cama bajo estudio". El "factor de efecto de las paredes" es una función de la relación del diámetro promedio de los trozos al diámetro del recipiente.

Para una relación de 1 a 12 el factor es 0.7, y para una relación de 1 a 6 el factor es 0.6. Entonces, según se reduce la relación" del tamaño del combustible al diámetro del cubilote, pasará hacia arriba a través de la cama un mayor porcentaje de los gases, en las secciones adyacentes a las paredes. El efecto, por supuesto, se notará principalmente en la cama. Arriba de ésta, la columna de material es generalmente tan abierta que ofrece una resistencia despreciable al paso del gas, y las velocidades tienden a igualarse en toda la sección.

2.5 ACONDICIONAMIENTO DEL AIRE DE SOPLADO

Con el precalentamiento del aire de soplado se aumenta tanto la eficiencia como la velocidad de combustión del cubilote. En la práctica existen ventajas con el precalentamiento del aire de soplado, lo cual da por resultado ahorros de coque entre 20 y 25%, cuando se usan temperaturas de soplado de 150 y 260°C, teniéndose además una operación mejorada impidiendo así el abovedamiento; otra de las mejoras es que hay una menor absorción de azufre, menores pérdidas por oxidación de silicio, manganeso y hierro, menor empleo de fundentes así como un ahorro en la compra de refractarios para el mantenimiento del horno.

2.5.1 MÉTODOS USADOS PARA EL PRECALENTAMIENTO DEL AIRE PARA LA COMBUSTIÓN EN EL CUBILOTE

- **Método recuperativo:** Se emplea el calor sensible y potencial de los gases que escapan del cubilote.
- **Método de calentamiento externo:** No se hace uso de ninguno de los productos de la combustión del cubilote, sino que en vez de estos se hace uso de un calentador independiente que emplea carbón gas o petróleo.
- **Método Recuperativo modificado:** En este únicamente se utiliza el calor sensible de los gases descargados por el cubilote.

2.5.2 SISTEMAS RECUPERATIVOS DE SOPLADO DE AIRE CALIENTE

- **Sistema Griffin:** Es el método más ampliamente empleado, en el cual se utiliza el calor sensible como el latente de los gases del cubilote, mediante este sistema una gran porción de gases del cubilote se extraen de él, a través de las tomas situadas en el revestimiento y localizadas sobre o bajo la puerta de carga. Para los dos tipos de tomas, los gases que pasan calientes a la cámara de combustión son mezclados con aire.

Cuando se emplean todos los gases que descarga el cubilote en este sistema se obtienen temperaturas algo más elevadas por medio del equipo de dos etapas, estando entonces las temperaturas de soplado caliente entre los 315 y 425°C.

- **Sistema Moore:** Este sistema de calentamiento del aire de soplado los tubos verticales de hierro colado están suspendidos dentro de la torre del cubilote, arriba de la zona de fusión y a través de ellos pasa el aire de soplado al cubilote, antes de entrar a las toberas. Puesto que solamente se usa el calor sensible de los gases de descarga del cubilote para el precalentamiento, se obtenían temperaturas en el soplado caliente entre 130 y 165°C.

- **Sistema Singen:** Se emplean tubos de aleación de acero obteniéndose temperaturas de 370 a 480°C en el aire de soplado, otro de estos diseños emplea un intercambiador de calor por radiación del tipo espiral y tiene una temperatura máxima del aire de soplado de 480°C.

- **Sistema economizador:** Extrae los gases de escape arriba de la puerta de carga. Empleando tubos cambiadores de calor con aletas, hechos de aleación de acero, con los cuales alcanza temperaturas del orden de 425°C en el aire de soplado.

2.5.3 SISTEMAS DE PRECALENTAMIENTO DEL AIRE DE SOPLADO POR MEDIOS EXTERNOS

- **Sistema de secado:** En los sistemas de secado con calentamiento externo se emplean ciertos tipos de estufas que emplean gas natural o petróleo. El aire frío

pasa a través de los cambiadores que no contienen aleación, y llegan al cubilote a una temperatura máxima de 250°C.

- **Sistema Thermo - Todd:** Este calentador externo alcanza temperaturas de entre 65 y 535°C, la cámara de combustión se halla por debajo de los tubos cambiadores de calor, siendo el diseño tal que los gases calientes salen de la cámara de combustión por la derecha y luego pasan de derecha a izquierda hacia arriba y alrededor de los tubos cambiadores de calor hasta la chimenea de escape, mientras que el aire frío pasa de izquierda a derecha a contraflujo, mejorando así la eficiencia del equipo.

2.5.4 VENTAJAS QUE OTORGAN LOS EQUIPOS RECUPERATIVOS DE CALOR

- Compatibilidad con los sistemas completamente cerrados.
- Los gases de escape son empleados como combustible.
- Asistencia en el problema de humo y descarga de partículas del cubilote al remover las partículas más gruesas antes de que pasen a través de los aparatos finales de eliminación de humos.

2.6 EQUIPOS DE SOPLADO

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 esto depende del diámetro interno del horno, así como la carga a fundirse.

Existen factores que deben tomarse en cuenta al hacer el análisis en la selección del equipo de soplado adecuado.

Factores que determinan el volumen y presión del aire

- Tipo y tamaño del cubilote

- Relación de carga hierro-coque
- Régimen de fusión (Normal y Máximo)
- Temperatura del hierro en el pico
- Altura de la cama de coque y la carga arriba de las toberas
- Tamaño y calidad del coque

Factores que definen el tamaño de la máquina soplante

- Costo inicial y de operación
- Localización del soplador con referencia al cubilote
- Método de impulsión
- Altitud de la instalación
- Volumen y presión máximos para condiciones de fusión máximos

2.6.1 TIPOS DE SOPLADORES PARA CUBILOTES ⁶

Existen tres tipos de sopladores utilizados generalmente para la fusión en cubilotes.

- **De desplazamiento positivo o soplador lobular:** 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 de cubilote dentro de las limitaciones del diseño del soplador y de su motor.

- **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 hay 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.

- **Soplador ventilador:** Opera de acuerdo al mismo principio que el soplador centrífugo aunque posee una eficiencia más baja.

⁶ AMERICAN SOCIETY FOUNDRYMEN'S El Horno de Cubilote y su Operación, Mexico, Continental, 1974.

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.

2.6.2 DUCTOS DE AIRE

La disposición de los ductos debe ser de manera tal que se obtengan las mejores características en cuanto a flujo y para mantener la fricción dentro de un rango mínimo, estos deben ser derechos y cortos como sea posible y obtener un mínimo de codos y vueltas, además las tuberías y sus conexiones deben ser lo más estancas posible, ya que un sistema con pérdidas o fugas dará problemas de fusión. Hay que tener en cuenta que los ductos redondos son preferibles a los cuadrados o rectangulares, principalmente cuando se hace uso de sopladores de desplazamiento positivo, ya que las pulsiones de aire tienden a causar rupturas y por ende fugas en los ductos.

Es indispensable ventilar la caja de aire durante periodos cortos de parada, cuando no hay presión de aire en esta, existen un sinnúmero de válvulas especiales del tipo trampa que son utilizadas 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

2.3 REFRACTARIOS

Los ladrillos refractarios son utilizados para revestir calderas, ollas de aceración, hornos rotatorios de cementeras, etc., los cuales deben de estar pegados con tierra refractaria, estos se pueden adherir con firmeza en la tierra si se utiliza un poco de cemento, en donde el resultado de esta mezcla parecerá como un barro. Se debe tener suma precaución con estos ladrillos, ya que si llegan a utilizarse con otro material pueden llegar a explotar. Estos al igual que la tierra refractaria, además de cumplir con su función que es refractar, mantienen el calor.

Lo que más se destaca de el ladrillo es que se fabrican en gran variedad de calidades que van desde el 36% hasta el 99% de contenido alúmina para soportar diferentes temperaturas y usos distintos.

Los ladrillos que son utilizados para recubrir hornos de fundición de acero son los ladrillos de dióxido de silicio, ahora bien, cuando algunos ladrillos comienzan a licuarse estos trabajan a una temperatura superior de 3000 °F (1650 °C). Estos ladrillos son formados bajo altas presiones y quemados a temperaturas muy elevadas, salvo los ladrillos que son ligados químicamente y los que son aglutinados con alquitrán, resinas o gomo - resinas, los cuales no son quemados, sino cuando están instalados en el horno, es cuando se les opera.

2.7.1 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 aún bajo las condiciones mejor controladas será necesario reparar el revestimiento después de haber completado las operaciones de fusión. La falla por erosión del revestimiento refractario, es generalmente, resultado de abrasión, calor, esfuerzo mecánico, y actividad química.

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:

- **Zona de fusión:** Es la zona comprendida entre la 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 del crisol:** En esta 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 por la fricción de la carga al moverse hacia abajo.
- **Sobre la puerta de carga:** Arriba de la puerta de carga las condiciones no son severas, siendo la función del revestimiento meramente la de proteger la coraza de calor de los gases de escape del cubilote. En esta área 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.

2.7.2 AISLAMIENTO

El cubilote no se presta al aislamiento térmico por dos razones:

- La cantidad de calor que puede ahorrarse de 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 que tuviera el cubilote si estuviera aislado con recubrimiento, ya que la pérdida de revestimiento sería mayor, a causa del mayor calor retenido en la superficie del refractario y al mayor gradiente de calor a través del mismo.

2.7.3 TIPOS DE REFRACTARIOS

- **Refractarios ácidos:** Incluyen las 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, pero poco costosos. Contenidos de alúmina por arriba de aprox. 50% constituyen los refractarios de alta alúmina.

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

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

- **Refractarios Especiales:** El carbono, el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando no hay oxígeno fácilmente disponible. Estos materiales refractarios incluyen la circonia (ZrO_2), el circón ($ZrO_2.SiO_2$) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros

- **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 coste porque son escasas las arcillas con que se fabrican.

- **Refractarios con Alto Contenido de Sílice:** Estos ladrillos pueden soportar altas temperaturas, y a diferencia de los anteriores, se dilatan de manera considerable cuando son sometidos a fases alternativas y continuas de calor y frío. Dichos cambios bruscos de temperatura los afecta de tal modo, que finalmente los desintegra. Se los emplea en aquellos sitios donde las temperaturas altas son continuas.

2.7.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS

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

2.8 COMBUSTIÓN Y COMBUSTIBLES

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el combustible, que puede ser un sólido (Carbón, Madera, etc.), un líquido (Gasóleo, Fuel-Oil, etc.) o un gas (Natural, Propano, etc.) y el comburente, Oxígeno.

La combustión se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable.

Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores: combustible, comburente y energía de activación.

Estos tres factores se representan en el denominado triángulo de combustión, en el cual si falta alguno de los vértices la combustión no puede llevarse a cabo.

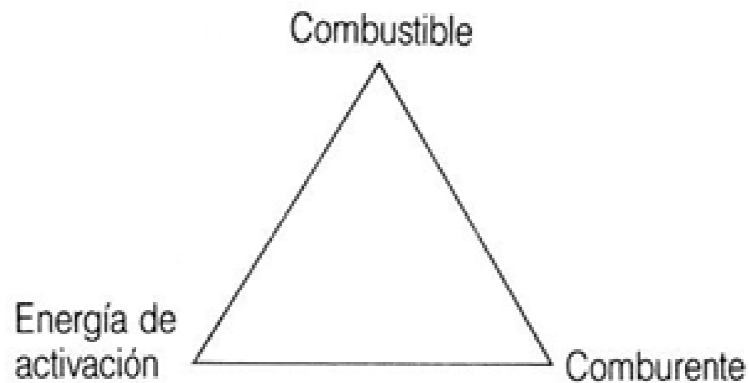


Figura 2.3. Triángulo de la Combustión

El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está compuesto, por 21% Oxígeno (O_2) y 79% Nitrógeno (N_2); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por ejemplo en soldadura). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas, etc.

2.8.1 ESTEQUIMETRIA DE LAS COMBUSTIONES

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

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

- Aire necesario para la combustión
- 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. Para definir este proceso ideal se consideran los tipos de combustión que pueden darse.

2.8.1.1 Combustión completa

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

El Nitrógeno se considera como masa inerte, si bien a las altas temperaturas de los humos pueden formarse óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones (del orden de 0,01%).

Las reacciones que se dan con el oxígeno y los principales elementos son:

Carbono \rightarrow CO₂

Hidrogeno \rightarrow H₂O

Azufre \rightarrow SO₂

Nitrógeno \rightarrow N₂

Oxígeno \rightarrow O₂

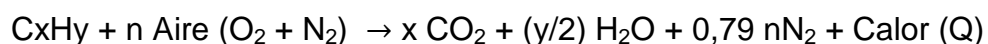
2.8.1.2 Combustión incompleta

Los componentes del combustible no se oxidan totalmente por lo que aparecen los denominados inquemados, los más importantes son CO y H₂; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, etc.

2.8.1.3 Combustión estequiométrica

Es la Combustión Completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

La expresión de esta combustión es:



En este caso $0,21 \cdot n = x + (y/4)$, siendo el calor generado es el correspondiente a la combustión completa.

La combustión estequiométrica permite definir los parámetros característicos de los combustibles:

- **Poder comburívoro:** Es la cantidad de aire seco, medida en condiciones normales ($T=0^{\circ}\text{C}$ y $P=1\text{atm}$), mínima necesaria para la combustión completa y estequiométrica de la unidad de combustible.

Es un parámetro característico únicamente de la composición del combustible y puede tabularse con facilidad.

- **Poder fumígeno:** Es la cantidad de productos de la combustión (Nm^3) 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, respectivamente

2.8.2 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.

$n = \text{volumen aire por unidad de combustible} / \text{Poder comburívoro}$

$n = 1$: Combustión estequiométrica

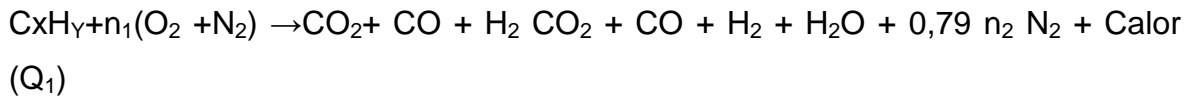
$n < 1$: Defecto de aire, se dice que la mezcla es rica

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

Así la combustión puede ser clasificada en:

2.8.3 COMBUSTION CON DEFECTO DE AIRE

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

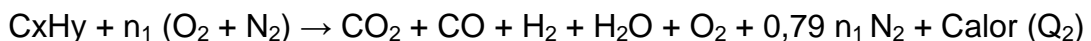


Además de los productos normales de la combustión, dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), se producen inquemados como el Monóxido de Carbono (CO) e Hidrógeno (H₂); en algunos casos con mucho defecto de aire puede haber incluso carbono y combustible sin quemar, en los humos.

El calor producido es inferior al de la combustión completa ($Q_1 < Q$).

2.8.4 COMBUSTION 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 ($Q_2 < Q$)

La combustión estequiométrica prácticamente es irrealizable, lo que obliga a operar con excesos de aire con el fin de lograr combustiones completas.

2.8.5 PODERES CALORIFICOS

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:

2.8.5.1 Poder calorífico inferior (PCI)

Es la cantidad de calor que puede obtenerse 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 tanto esta parte del calor no se aprovecha.

2.8.5.2 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.

2.8.6 RENDIMIENTO DE LA COMBUSTION⁷

El calor que puede obtenerse en una combustión es el correspondiente al Poder Calorífico del combustible (PCI ó PCS), habitualmente referido al PCI.

⁷ RICARDO GARCIA, Combustión y Combustibles, Ingeniería Industrial, 2001.

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:

2.8.6.1 Pérdidas por inquemados (QI)

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.

2.8.6.2 Entalpía de los productos de la combustión (QHS)

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.

Así el rendimiento de la combustión η_c queda definido por:

$$\eta_c = \frac{PCI - Q_i - Q_{hs}}{PCI} \quad (2.4)$$

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_i}{PCI} - \frac{Q_{sh}}{PCI} = 1 - Q_i - Q_{hs} \quad (2.5)$$

Con el fin de obtener el máximo rendimiento de combustión posible, ésta debe ajustarse de modo que se logre la combustión completa con el menor exceso de aire posible. Además, el gasto de combustible debe ajustarse de modo que se obtengan las temperaturas de humos más bajas posibles, produciendo la potencia necesaria para el servicio.

En el anexo E1 se presentan los límites de inmisión y resumen de características de los combustibles gaseosos.

2.9 REACCIONES DE COMBUSTIÓN EN EL HORNO DE CUBILOTE⁸

2.9.1 LA REACCIÓN DE COMBUSTION

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



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 1.000 °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, proponen que la velocidad de reacción puede expresarse como lo indica la relación (2.7).

$$R_1 = K_1 a_{S\text{Coque}} CO_2 \quad (2.7)$$

En donde:

R_1 , es la velocidad de reacción en [kmoles/m³ s].

$a_{S\text{Coque}}$ es el área superficial del coque [m²/m³].

CO_2 es la concentración de oxígeno en los gases [kmoles/m³].

⁸ J. DECLERY. "Chemical Reactions in Cupola Practice". The Foundry. Vol. 32. USA. Aug. 1908. pp. 296-298.

k_1 es el coeficiente de transferencia de masa del oxígeno hacia el coque [m/s]. El coeficiente de transferencia de masa se evalúa con la correlación:

$$K_1 = \left(\frac{0.99 G_{\text{gases}}}{\rho_{\text{gases}}} \right) \left(\frac{d_{\text{SCoque}} G_{\text{gases}}}{\mu} \right)^{-0.41} Sc^{-2/3} \quad (2.8)$$

En donde:

G_{gases} , es el flujo de la corriente gaseosa [kg/m³ s].

ρ_{gases} , es la densidad de la corriente gaseosa [kg/m³].

d_{SCoque} , es el diámetro promedio de las partículas de coque en el lecho empacado [m].

μ es la viscosidad de la corriente gaseosa [kg/m s].

Sc , es el número de Schmidt el cual se toma como 0,86.

La viscosidad de los gases se calcula con la correlación (2.9) y la densidad con la (2.10).

$$\mu = 1.149 \times 10^{-5} \left(\frac{T_{\text{gases}}}{273.1} \right)^{0.768} \quad (2.9)$$

En donde T_{gases} es la temperatura de la corriente gaseosa [K].

$$\rho_{\text{gases}} = \frac{PM_{\text{gases}}}{RT_{\text{gases}}} \quad (2.10)$$

En donde:

P , es la presión [atm].

M_{gases} , es el peso molecular de la corriente gaseosa [kg/kmol].

R , es la constante de gas ideal la cual se toma como 0,08206 [m³ atm/K kmol].

2.9.2 LA REACCIÓN DE GASIFICACIÓN POR CO₂ O REACCIÓN DE BOUDOUARD

El CO₂ generado durante la reacción de combustión puede reaccionar con el carbono en el coque para producir la reacción.



Esta reacción es endotérmica y consume gran parte del calor generado en el proceso. Aunque desde el punto de vista energético podría considerarse indeseable, es importante que durante el proceso avance en cierto grado, 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.

En el rango de temperaturas entre 1.000 y 1.200 °C la velocidad está limitada por dos mecanismos: el transporte del reactante gaseoso CO₂ hasta la superficie del coque y la difusión de éste a través de los poros, por tanto la propiedad más importante en este intervalo es el volumen y la estructura de los poros. Por último, cuando la temperatura es mayor a 1.200 °C la reacción se hace muy rápida y el dióxido de carbono no tiene suficiente tiempo para difundirse hacia el interior, por tanto la velocidad de reacción queda limitada por el transporte del reactante en la fase gaseosa y depende del área específica del coque.

Para la difusión externa del CO₂ hasta la superficie del coque la velocidad de reacción puede expresarse como lo indica la ecuación (2.12)

$$R_{2.1} = K_1 a_{\text{S Coque}} C_{\text{CO}_2} \quad (2.12)$$

En donde:

$R_{2.1}$, es la velocidad de reacción en la superficie del coque [kmoles/m³ s].

C_{CO_2} , es la concentración de CO_2 en la corriente gaseosa [$kmoles/m^3$].

En el caso de la difusión a través de los poros se utiliza la ecuación:

$$R_{2.2} = \frac{d_{S\text{Coque}}}{6} * \frac{\rho_{S\text{Coque}}}{M_C} K_v \eta a_{S\text{Coque}} C_{CO_2} \quad (2.13)$$

En donde:

$R_{2.2}$, es la velocidad de la reacción por la difusión a través de los poros en [$kmoles/m^3 s$].

$\rho_{S\text{Coque}}$, es la densidad en bulto del coque [kg/m^3].

M_C , es el peso molecular del carbono [$kg/kmol$].

k_v , es la constante cinética de gasificación [$m^3/kmol s$].

η , es la difusividad efectiva por los poros.

La combinación de ambos mecanismos se expresa mediante la ecuación (2.14). Ésta simplemente establece el mecanismo cinético como un sistema de resistencias en serie.

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_{2.1}} + \frac{1}{R_{2.2}}} \quad (2.14)$$

En la ecuación (2.11) R_2 es la velocidad global de la reacción de gasificación por CO_2 [$kmol/m^3 s$].

2.9.3 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. 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:



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 expresiones (2.16) y (2.17), respectivamente.

$$R_{3.1} = K_1 a_{S\text{Coque}} C_{H_2O} \quad (2.16)$$

En donde:

$R_{3.1}$, es la velocidad de la reacción de gasificación por vapor de agua en la superficie del coque [kmoles/m³ s].

C_{H_2O} , es la concentración de vapor de agua en la corriente gaseosa [kmol/m³].

$$R_{3.2} = \frac{d_{S\text{Coque}}}{6M_C} a_{S\text{Coque}} 4.367 \times 10^7 \exp\left[\frac{-32121}{T_{\text{gases}}}\right] (C_{H_2O})^{0.58} \quad (2.17)$$

En 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 [kmoles/m³ s].

La combinación de ambos mecanismos en serie se presenta en la ecuación (2.18).

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{3.1}} + \frac{1}{R_{3.2}}} \quad (2.18)$$

En donde R_3 es la velocidad global de la reacción de gasificación del coque por vapor de agua [kmoles/m³ s].

2.10 COMBUSTION Y CONTAMINACION AMBIENTAL

A la hora de seleccionar el combustible y de optimizar el proceso de combustión se deben considerar aspectos relacionados con la emisión de agentes contaminantes. 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 perniciosos:

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

2.10.1 CONTAMINACION DEBIDA AL CARBONO

La combustión completa del carbono produce 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 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 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 CO_2 ; otra manera es seleccionar combustibles con menor producción de CO_2 para la misma energía, el mejor en este aspecto es el Gas Natural.

2.10.2 CONTAMINACION DEBIDA AL AZUFRE

El azufre está presente en los combustibles en proporciones variables; la oxidación del azufre puede producir SO_3 , este en contacto con el agua de la combustión o de la atmósfera puede dar lugar a ácido sulfúrico (H_2SO_4) condensado que acompaña a las gotas de lluvia, dando lugar a lo que se conoce como "Lluvia ácida".

Para combatir este problema debe tratar de utilizarse 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 pernicioso a tener en cuenta 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.

2.10.3 CONTAMINACIÓN DEBIDA AL NITROGENO

A las elevadas temperaturas de la llama, el nitrógeno que forma parte del combustible y el nitrógeno del aire comburente pueden combinarse con el oxígeno para formar NO, este producto en la atmósfera se combina lentamente con el oxígeno del aire para formar NO_2 .

Entre los diferentes efectos perniciosos de estos óxidos (NO y NO_2 , denominados conjuntamente como NO_x) se pueden citar:

- 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".
- El NO_2 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.

En el Anexo E.1 se presentan los límites inmisión que pueden provocar problemas de contaminación.

CAPITULO III

SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

3.1 DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS TECNOLÓGICOS

La fundición en nuestro país es un proceso de fabricación muy ampliamente utilizado en la industria de la fundición de metales, por lo que el manejo de hornos de cubilote en el medio es algo común, la mayoría de estos tipos de hornos son de fabricación local, debido a la existencia de materia prima para su elaboración, así como del recurso técnico – humano.

A pesar de que algunos de los instrumentos como los de soplado de aire, medición y control de temperatura, importantes para el correcto manejo de la fusión de metales son importados, esto no se ha convertido en un obstáculo ya que el país posee un mercado apaciblemente bueno, en tanto que llena las necesidades existentes en el diseño y construcción de este tipo de hornos.

3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS

En esta etapa de pre-diseño se ha requerido de información sobre las características, ventajas, limitaciones, y la evaluación de los procesos tecnológicos de diseño, construcción y operación (técnicas existentes), así como sobre las restricciones económicas, sociales, ambientales y legales.

Toda esta información ha sido evaluada y comparada para dos tentativas de diseño de hornos cubilote, que se presentan a continuación.

3.2.1 ALTERNATIVA A: HORNO DE CUBILOTE DE COQUE Y AIRE PRECALENTADO

Es un horno sencillo por su constitución, este está conformado de una coraza cilíndrica de acero revestida con material refractario y equipado con intercambiador de calor, una caja de viento y toberas para la admisión del aire.

Una de de las características principales de esta alternativa de diseño es que los gases que ascienden, entran en contacto directo con los materiales de fusión que descenden, dando lugar a un cambio directo y eficiente de los gases calientes a los materiales de fusión.

Para ahorrar coque y hacer posible el empleo de cargas con mayor proporción de chatarra de hierro se hace uso de aire caliente. El empleo de aire precalentado permite usar coques de peor calidad y hacer disminuir las pérdidas de silicio, mientras que a la vez se incrementa la absorción de carbono por el metal. El viento se calienta normalmente de 250 a 300 °C empleándose un sistema de calentamiento externo para el precalentamiento del aire.

No se hará uso de métodos recuperativos de calor debido a que las dimensiones del horno son significativamente pequeñas, y para lo cual se requiere de una chimenea de altura elevada para obtener el tiro y la tasa de transferencia de calor necesaria de los gases de escape.

El intercambiador utilizado en el presente diseño es uno de una carcasa con un solo paso de tubos a contraflujo, el cual está constituido por tubos concéntricos de diámetro pequeño. En este intercambiador uno de los fluidos fluye por los tubos de menor diámetro y el otro fluye en sentido opuesto al primero por el espacio anular entre los tubos.

En el intercambiador a contraflujo la temperatura de salida del fluido frío puede ser superior a la temperatura de salida del fluido caliente. Se usara como se dijo anteriormente un medio externo para calentar el flujo de aire de entrada al horno, por medio de una cámara de combustión de gas natural.

3.2.1.1 Ventajas

- Disminución del consumo de coque y posibilidad de empleo de coques de menor calidad con muchas cenizas.
- Se pueden fundir y carburar mayores proporciones de chatarra de acero para fabricar fundición.
- Disminuye la pérdida de silicio.
- Es posible conseguir mayores temperaturas de colada, lo que importa principalmente para colar piezas delgadas.
- Bajos costos de mantenimiento del refractario.

3.2.1.2 Desventajas

- Subproductos de combustión mayoritariamente nocivos en relación a hornos cubilote que funcionan a gas natural.
- Si no se utiliza los fundentes en cantidades adecuadas, el metal fundido tiene buena probabilidad de contaminarse.

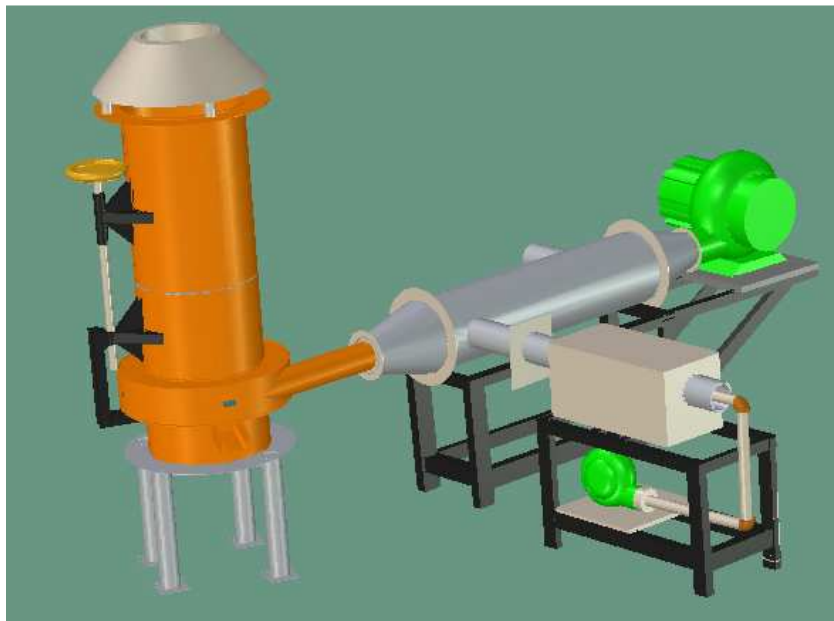


Figura. 3.1. Esquema de la alternativa A. Horno de cubilote con aire precalentado

3.2.3 ALTERNATIVA B: HORNO DE CUBILOTE A GAS

Su estructura es idéntica a la alternativa A, pero a diferencia de esta, este tipo de cubilote no posee coque como combustible, sino que en lugar del mismo utiliza gas natural.

Para su configuración se dispone de varios quemadores distribuidos de manera opuesta a la altura del crisol, zona en la cual cae libremente el metal fundido, para que esto suceda se coloca en la parte interior del horno a una altura equivalente a la de la piquera de escoriado y sobre los quemadores una malla de acero refractario para que el metal fundido pueda fluir libremente hacia el crisol.

En este tipo de horno el metal está en contacto directo con la llama, por lo que es aconsejable utilizar fundentes y tener un cuidadoso control sobre la llama, de manera que exista la mejor de las combustiones y evitar contaminar el metal.

3.2.3.1 Ventajas

- No existe demasiada contaminación del metal fundido cuando la combustión es completa, teniéndose una producción más limpia.
- Reduce las pérdidas energéticas producto de una mayor eficiencia.
- Aumenta la productividad y la elaboración de nuevas piezas.
- Disminución de las emisiones de particulado, CO₂, CO y SO₂, debido al uso de un combustible más limpio.
- Aumento y ampliación de la calidad del producto por mayor control y homogeneidad en las condiciones de fusión.

3.2.3.2 Desventajas

- En este sistema es necesaria una cantidad de calor suficiente para la fusión del metal, lo cual se traduce en términos de contar con unos quemadores de gran potencia y distribuidos de forma apropiada, para tener la tasa de calor demandada.

- Se tienen mayores costos en cuanto a combustible y mantenimiento del equipo se refiere.
- Requiere de mayor instrumentación.
- Existen más riesgos en su operación (fugas de gas).
- La malla usada en la zona de fusión, para que el metal fundido pueda fluir libremente hacia el crisol, se halla constituida de una aleación especial resistente a grandes temperaturas, por lo que su adquisición es difícil en el mercado local.
- Hace demasiado ruido al operar.

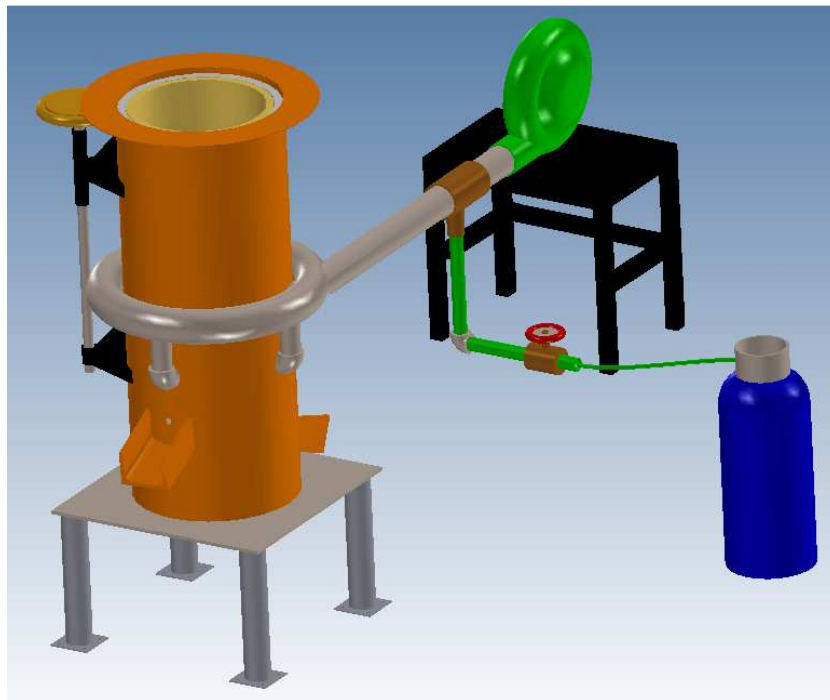


Figura. 3.2. Esquema de la alternativa B. Horno de cubilote a gas

3.3 SELECCIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Para la selección de la alternativa adecuada para el diseño se evalúan los diferentes parámetros de comparación que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3.1 Evaluación de las alternativas de diseño.

PARÁMETROS DE COMPARACIÓN	ALTERNATIVA REFERENCIAL	ALTERNATIVA A	ALTERNATIVA B
Costo	9	8	7
Facilidad de construcción	8	7	7
Facilidad de operación	9	8	7
Ventajas	10	8	9
Desventajas	5	7	8
Mantenimiento	9	9	7
Puntaje	50	47	45
Valores referenciales $x = z/zi$	1	0.94	0.90

Fuente: PROPIA

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge

Donde:

Z = Puntaje de las alternativas.

Zi = Puntaje de la alternativa modelo.

Conclusión: Como se puede apreciar de la evaluación, la alternativa A. Horno de cubilote de coque y aire precalentado es la de mayor puntaje, hecho por el cual se escoge esta como la alternativa de diseño.

3.4 PROTOCOLO DE PRUEBAS

En el protocolo de pruebas se hace un seguimiento y control de los parámetros de diseño y operación seleccionados, y verificarlos con las características propias del diseño.

En la tabla 3.2. Se detallan las pruebas, procedimientos e instrumentos de control seleccionados para el registro y calificación del diseño del horno seleccionado. Así como el control del dimensionamiento, prueba de funcionamiento, temperatura máxima de fusión, temperatura del fluido frío y caliente a la entrada y salida del intercambiador de calor, producción de metal fundido por hora, etc.

Tabla 3. 2. Pruebas a realizarse.

PRUEBA	PROCEDIMIENTO	INSTRUMENTO DE CONTROL
Funcionalidad del mecanismo de ensamblaje de las partes.	Inspeccionar el funcionamiento del tornillo de potencia usado para la elevación de las partes desmontables del horno.	Flexómetro, Calibrador pie de rey.
Funcionamiento del horno a pleno uso.	Verificar el funcionamiento de elementos tales como venterol, piqueras de colado y escoriado, que no se registren fugas en el intercambiador de calor	Inspección visual, medidor de flujo
Registro de la máxima temperatura de fusión	Comprobar que el horno opere bajo el rango establecido de temperaturas	Pirómetro, termocupla
Registro de la temperatura del fluido frío y caliente a la entrada y salida del intercambiador	Verificar el rango de temperaturas a las cuales trabaja el intercambiador de calor, y ver cuál es su máxima eficiencia con el horno a pleno uso.	Termocupla
Registro de la presión del aire a la entrada de la caja de viento	Verificar la presión del aire a la entrada del horno hacia las toberas, para obtener la mayor eficiencia del horno en el proceso de fusión.	Barómetro, tubo venturi
Producción del metal fundido por carga	Verificar la cantidad de metal fundido por carga. Ver cómo afecta la operación del cubilote a la composición química de la carga. Registrar el número de cargas fundidas por hora.	Inspección visual, Cronómetro.
Tiempo de fusión	Verificar cual es el rango establecido de fusión por carga	Cronometro.
Relación Metal/Coque	Verificar cual es la relación metal coque adecuada para el horno, y ver como varia cada uno de los factores al variar la relación metal/coque.	Balanza

Fuente: PROPIA

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge.

CAPITULO IV

DISEÑO

4.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

El cubilote como cualquier otro equipo posee sus parámetros de diseño, que en este caso concreto puede decirse que es el resultado de la experiencia acumulada en la construcción y operación de este tipo de horno. De igual forma las investigaciones y la práctica industrial han ido precisando las circunstancias en las cuales el horno funciona adecuadamente.

4.1.1 DIÁMETRO INTERIOR

El principal parámetro de diseño del horno de cubilote, es su diámetro interior (d_i), medido al nivel de tobera, en torno a este se dimensiona el horno y se calcula la capacidad de producción del mismo. En nuestro caso como se trata de un prototipo experimental tomaremos un valor mínimo e igual a 23 [cm].

4.1.2 ALTURA DEL HORNO

La altura (H), es la distancia de la solera a la puerta de carga

Su valor varía entre:

$$H = (5 \text{ a } 7)d_i \quad (4.1)$$

Caculo de la altura del horno

Datos:

$$d_i = 23 \text{ [cm]}$$

$$H = 6 * di$$

$$H = 6 * 23$$

$$H = 138 \text{ [cm]}$$

4.1.3 ALTURA EFECTIVA DEL HORNO

La altura efectiva (H_e), es aquella que se toma desde el nivel de toberas a la puerta de carga.

Su valor varía entre:

$$H_e = (4 \text{ a } 6)di \quad (4.2)$$

Cálculo de la altura efectiva del horno

Datos:

$$di = 23 \text{ [cm]}$$

$$H_e = 5 * di$$

$$H_e = 5 * 23$$

$$H_e = 115 \text{ [cm]}$$

4.1.4 TOBERAS

El aire para quemar el coque hace su entrada al horno a través del sistema de toberas. En el cubilote predomina el sistema de colocar todas las toberas en un mismo plano. En ese caso, el área total (S_1) de las mismas debe ser de 1/4 a 1/8 del área de la sección interior del horno (F), medido a nivel de toberas. El valor más empleado es 1/4 (25 %).

Otras recomendaciones son:

- Para cubilotes grandes----- $S_1=F/(5 \text{ a } 6)$
- Para cubilotes pequeños----- $S_1=F/(4 \text{ a } 5)$

Cálculo del área de la sección interior del horno

Datos.

$$d_i = 23 \text{ [cm]}$$

$$F = \pi r^2 \tag{4.3}$$

$$r = d_i/2$$

$$F = \pi * \left(\frac{23}{2}\right)^2$$

$$F = 420 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Cálculo del área de las toberas

$$S_1 = \frac{1}{5} * F \tag{4.4}$$

$$S_1 = \frac{1}{5} * 420$$

$$S_1 = 84 \text{ [cm}^2\text{]}$$

Cálculo del área de cada una de las toberas, considerando que el horno poseerá cuatro.

$$S'_1 = \frac{S_1}{4}$$

$$S'_1 = \frac{84}{4}$$

$$S'_1 = 21 \text{ [cm}^2\text{]}$$

4.1.5 ALTURA DEL CRISOL

Las dimensiones del crisol también dependen del diámetro interior del horno (d_i). Para hornos intermitentes, por picada, la altura del crisol (h_{crisol}) se puede tomar como:

$$h_{\text{crisol}} = (0.8 \text{ a } 1)d_i \quad (4.5)$$

Cálculo de la altura del crisol.

Datos:

$$d_i = 23 \text{ [cm]}$$

$$h_{\text{crisol}} = 0.8 * d_i$$

$$h_{\text{crisol}} = 0.8 * 23$$

$$h_{\text{crisol}} = 18 \text{ [cm]}$$

En el crisol se estima que el metal líquido ocupa el 46 % del volumen.

4.1.6 CONDUCTOS DE AIRE

La tubería, desde el ventilador hasta la caja de aire del horno, debe ser recta y de sección circular.

Su dimensionamiento se estima en 1.15 veces el área de las toberas, por tanto tenemos:

$$A_c = 1.15 * S_1 \quad (4.6)$$

Donde:

A_c : Área transversal de conducto de ingreso de aire al horno

S_1 : Área transversal de las toberas

Cálculo del área de la sección del conducto

$$S_1 = 84[\text{cm}^2]$$

$$A_c = 1.15 * 84$$

$$A_c = 97 [\text{cm}^2]$$

En el diseño del horno no debe existir una sección menor, en todo el sistema de soplo de aire, que la sección de salida del ventilador centrífugo. Lo anterior incluye el área total de las toberas.

4.1.7 CAJA DE VIENTO

A nivel del plano de toberas está situada la caja de viento que rodea el cubilote y que recibe y distribuye el aire a las toberas, esta es de sección cuadrada rectangular o redonda y con un área mayor a la del conducto de aire, generalmente este valor se toma el doble del área del conducto de aire para cubilotes pequeños.

En nuestro caso como el área de la sección transversal del ducto de aire es de $A_c = 0.0097 \text{ m}^2$, el área de la sección transversal de la caja de viento (A_{cv}) será:

$$A_{cv} = 2A_c \tag{4.7}$$

$$A_{cv} = 2 * 97$$

$$A_{cv} = 194[\text{cm}^2]$$

Entonces las dimensiones de la caja de viento de sección rectangular son de 0.12 [m] de ancho por 0.16 [m] de alto.

4.1.8 ALTURA DE LA CAJA DE VIENTO

La altura de la caja de viento (h_{cv}), sobre el nivel de la solera (capa removible de refractario de 0.1 m) se estima con la relación:

$$h_{cv} = \sqrt{2A_{cv}} \quad (4.8)$$

$$h_{cv} = \sqrt{2 * 194}$$

$$h_{cv} = 20 \text{ [cm]}$$

4.1.9 ALTURA DE LAS TOBERAS

La ubicación de las toberas está en dependencia de la capacidad del crisol del horno. Se recomienda que la hilera de toberas deba colocarse de 30 a 50 cm aproximadamente del fondo de la solera del horno en cubilotes pequeños.

Como las toberas se encuentran ubicadas en el interior de la caja de viento, su altura sobre el nivel de la solera será de 28 cm.

4.1.10 ORIFICIO DE ESCORIADO

Debido a que la escoria es menos densa que el metal fundido, esta flota sobre el mismo, considerándose como el 20% del volumen de la fundición, por lo cual es necesario un orificio para evacuarla, este se dispone a una altura igual al 80% de la línea de las toberas, de manera que cuando se detecte metal a la altura de las toberas esta no sea más que escoria y pueda ser evacuada paulatinamente.

Por lo tanto, la altura del orificio de escoriado sobre el nivel de la solera esta dado por:

$$C = 0.8 * H_t \quad (4.9)$$

Donde:

C: altura del orificio de escoriado.

H_t : altura de las toberas

Cálculo de la altura del orificio de escoriado.

$$H_t = 28 \text{ [cm]}$$

$$C = 0.8 * 28$$

$$C = 22 \text{ [cm]}$$

El diámetro de orificio debe ser de 0.3 a 0.5 mm.

En nuestro caso tomaremos un valor igual a 0.4 cm para el diámetro del orificio de escoriado.

4.1.11 PIQUERA DE ESCORIADO

No existen parámetros que definan la longitud de la piqueta de escoriado, pero esta debe ser lo suficientemente larga para evacuar la escoria del metal fundido y que guarde concordancia con el diseño del horno, su inclinación varía de 15 a 30°

Para el presente diseño tomaremos una longitud igual a 0.2 [m] y una inclinación de 15°.

4.1.12 ORIFICIO DE SANGRADO

El orificio de sangrado se halla ubicado al nivel de la solera, es decir a unos 0.1 [m] de altura del fondo del horno, medida establecida para hornos pequeños. El diámetro del orificio debe ser alrededor de 0.02 a 0.04 [m] y se lo ubica a nivel de la solera.

En nuestro diseño se tomará un diámetro igual a 0.03 [m].

4.1.13 PIQUERA DE SANGRADO

La piqueta de sangrado o colada se coloca al nivel de la solera del horno, debe tener una inclinación de 10° , su longitud debe guardar concordancia con el tamaño del horno.

Para el presente diseño se tomará un valor igual a 0.25 [m] de largo y una inclinación de 10° .

4.1.14 APAGACHISPAS

En el extremo final del horno se añade el apagachispas que es un capuchón de sección circular en forma de cono de unos 68 cm de diámetro y 20 cm de altura. Su finalidad es la de retener la mayor cantidad posible de restos sólidos incandescentes que se disparan al exterior del horno.⁹

4.1.15 VOLUMEN DE AIRE

La cantidad de aire que se inyecta a un horno de cubilote, viene dada por la relación hierro/coque que se emplea (dicha relación oscila normalmente entre 6/1 y 15/1) y determina, junto con el diámetro interior del horno, la producción horaria del mismo (t/h). Un cubilote debe consumir aproximadamente 100 metros cúbicos de aire por cada metro cuadrado de sección transversal del horno (a nivel de toberas).

Se determinara el valor del volumen de aire por dos métodos.

⁹RAMOS B, GUERRA Y, Metodología para evaluar los hornos de cubilote,; Ed Cid, Argentina, 2007

Primer Método: Extrapolando valores de volúmenes conocidos de cubilotes tomados de tabla.

De acuerdo a la tabla del Anexo C1 y extrapolando los valores de los hornos con diámetros exteriores de 686 mm y 813mm respectivamente y buscando los valores concernientes para un horno de diámetro externo de 480 mm se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 4.1. Características de diseño y operación de hornos referenciales.

Diámetro exterior (mm)	Espesor del revestimiento refractario (mm)	Carga de coque-hierro relación (8/1)	Aire por las toberas (m ³ /min)	Presión normal de la caja de viento (kg/m ³)	Soplador	
					Caudal (m ³ /min)	Presión (kg/m ²)
686	114	72	16.12	30.8	18.10	35.2
813	114	128	26.60	52.8	28.85	70.4
480	95	35.21	7.33	29.04	8.82	33.71

Fuente: El Horno de Cubilote y su Operación

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge.

De la tabla anterior se escoge:

$$Q = 8.82 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right]$$

Segundo Método: Determinando del caudal real a partir de las relaciones de combustión generadas en el interior del horno.

Cálculo del caudal de aire teórico.

Las reacciones producidas en el cubilote son activadas por el aire, en estas se producen cantidades específicas de CO₂ y CO dentro de ciertos rangos y cuya eficiencia está estrechamente relacionada con la producción de estos gases.

Para calcular el caudal de aire teórico se harán uso de las siguientes relaciones:¹⁰

$$\frac{\text{Kg aire}}{\text{min}} = \frac{\text{Kg carbón}}{60 \text{ min}} * \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg carbón}} \quad (4.10)$$

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

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

$$\frac{\text{Kg aire}}{\text{min}} = \frac{\text{Producción horaria}}{60 \text{ min}} * \text{rel} \frac{\text{coque}}{\text{metal}} * \frac{\text{Contenido de carbón}}{\text{Contenido de coque}} * \frac{\text{Kg aire}}{\text{Kg carbón}}$$

Las condiciones de operación del cubilote son:

Relación coque/hierro = 1/8

Producción horaria del horno = 257 [Kg/h]

Contenido de carbón en coque = 0.90%

Kg de aire/Kg de carbón = 8.35 para un 12% de CO₂ y 14.8% de CO, los cuales son los porcentajes establecidos para un cubilote que opera en condiciones normales.

Nota: Los valores del Contenido de carbono en coque y la relación Kg aire/Kg carbón, fueron tomados de la tabla del anexo F.

Remplazando valores tenemos:

$$\frac{\text{Kg aire}}{\text{min}} = \frac{375 \text{ Kg/h}}{60 \text{ min}} * \frac{1}{8} * 0.9 * 8.35$$

$$\frac{\text{Kg aire}}{\text{min}} = 5.87$$

Considerando el 5% de perdidas en la tubería y la caja de aire se tiene:

¹⁰ LATORRE RICAURTE.F, Diseño y Construcción de un cubilote convencional, EPN.

$$Q_{\text{teórico}} = \frac{\text{Kg aire}}{\text{min}} \cdot \frac{105}{\rho_{\text{aire}}} \cdot \frac{1}{100}$$

$$Q_{\text{teórico}} = \frac{4.51}{1.226} \cdot \frac{105}{100}$$

$$Q_{\text{teórico}} = 5.03 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right]$$

Considerando las condiciones de Quito, se calcula el caudal real de aire.

$$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P = 548 \text{ mm Hg}$$

$$Q_{\text{real}} = V_{\text{teórico}} \cdot \frac{1}{0.9475} \cdot \frac{1}{0.7244}$$

$$Q_{\text{real}} = 5.03 \cdot \frac{1}{0.9475} \cdot \frac{1}{0.7244}$$

$$Q_{\text{real}} = 7.32 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right]$$

Este caudal se calculo a partir de una consideración ideal, en la siguiente tabla se muestran el valor del Q_{real} , para diferentes porcentajes de CO_2 y CO

Tabla 4.2. Caudal real de aire para diferentes porcentajes de CO_2 y CO

% carbono	% CO_2	% CO	$\text{Kg}_{\text{aire}}/\text{Kg}_{\text{carbón}}$	$Q_{\text{real}} \text{ (m}^3/\text{min)}$
0.9	12	14.8	8.35	7.32
0.9	13	13.2	8.63	7.57
0.9	14	11.6	8.93	7.83
0.9	15	9.9	9.24	8.11
0.9	16	8.3	9.57	8.39
0.9	17	6.6	9.92	8.70

Fuente: Latorre Ricaurte.F, Diseño y Construcción de un cubilote convencional.

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge.

Se puede apreciar que los valores calculados del caudal por el primero y segundo método se aproximan entre sí, la diferencia se debe a consideraciones de idealización en el diseño como las que se toman en la construcción de la caja de aire y selección de ductos para el ventilador centrífugo.

Para nuestro diseño y operación del horno se tomara un valor mayor encontrado que corresponde a 8.82 m³/min de aire, es decir 0.147 m³/s.

4.1.16 PRESIÓN DEL AIRE DE SOPLADO

La presión de aire de soplado se calcula con la siguiente relación:

$$P = K' H_u V_c \quad (4.11)$$

Donde:

P: Presión de aire en las toberas

K': Coeficiente de resistencia en la zona de fusión, igual a 10 para cubilotes pequeños.

H_u : Altura útil desde el plano de las toberas hasta la zona de carga.

V_c: Velocidad de movimiento de los gases.

$$H_u = 4d_i$$

$$H_u = 4 * 0.25$$

$$H_u = 1 \text{ [m]}$$

$$V_c = \frac{Q}{A_t}$$

$$V_c = \frac{0.147}{0.049}$$

$$V_c = 3 \text{ [m/s]}$$

$$P = 10 * 1 * 3$$

$$P = 30 \text{ [mm]de H}_2\text{O}$$

Se conoce que:

$$P = \gamma_a * h$$

Donde:

γ_a : Peso específico del H₂O en [g/cm³]

h: Altura de la columna de agua en [cm]

$$P = 1 * 3.0$$

$$P = 3.0 \text{ [g/cm}^2\text{]}$$

$$P = 30 \text{ [Kg/m}^2\text{]}$$

4.1.17 MEDIDOR DE CAUDAL (TUBO PITOT)

El tubo Pitot para la indicación o registro de flujo, consiste en dos miembros, uno para indicar la suma de la presión estática y la cinética o de impacto dentro de una vena de aire en movimiento al registrar la intensidad del impacto debido a la interrupción de una pequeña parte del flujo, y otro para indicar solamente la presión. A causa de que el flujo está determinado solamente para un punto en el ducto, la precisión de la medición de volumen por medio del tubo Pitot no es grande, pero para las mismas condiciones, los resultados son siempre comparables y por tanto adecuados.

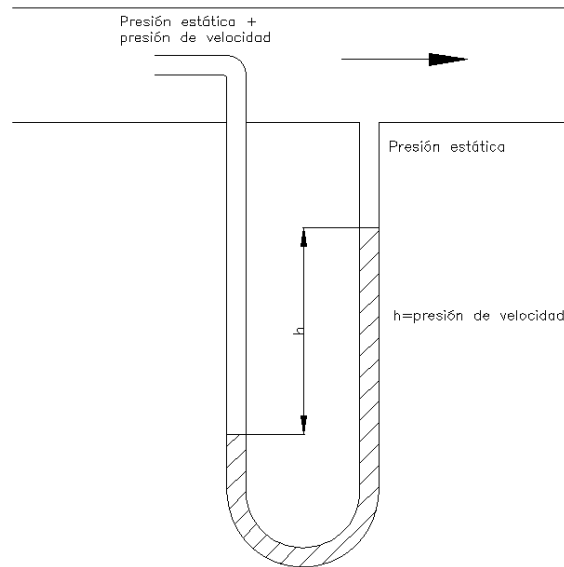


Figura 4.1. Conexión del tubo Pitot al ducto de aire.

Cálculos en tubo Pitot

$$Q = 0.0395 * D^2 * F_t * \sqrt{h * P}$$

Donde:

Q = metros cúbicos por minuto (0.72 atm de presión, y 20 °C)

D = Diámetro interior del ducto, en [cm]

F_t = Factor de corrección por temperatura. (Anexo F).

h = presión diferencial (cm de columna de agua)

P = presión en [Kg/cm²]

0.0395 = coeficiente básico del orificio (Foxboro) para el cual pueden ser aplicados los factores de corrección para cualquier grupo de condiciones.¹¹

¹¹AMERICAN SOCIETY FOUNDRYMEN's, El Horno de Cubilote y su Operación, , Mexico, Continental, 1974.pag 407.

4.1.18 VENTILADOR CENTRÍFUGO

La instalación de las máquinas soplantes resulta a menudo inadecuada. Dos errores muy frecuentes son: demasiado próximas a los hornos (lo cual no permite la instalación de los instrumentos de medición según las normas vigentes) y a un nivel diferente al de la caja de aire del horno. Algunas de las recomendaciones que deben seguirse son las siguientes: la entrada del conducto del aire a la caja de aire del horno debe ser tangencial; la válvula de regulación del flujo (solo para ventiladores centrífugos), debe estar alejada de los equipos de medición (metro orificio, Venturi, etc.); el equipo de soplado debe estar en un lugar aireado, sin comunicación con el ambiente polvoriento de la fundición y finalmente, como ya se señaló, ninguna sección del conducto puede ser menor que el diámetro de salida del equipo soplador.

Selección del ventilador centrífugo

El ventilador que se usara en nuestro diseño es uno centrífugo de presión por la utilidad que presenta frente a nuestras necesidades, para determinar sus características, lo haremos por medio del caudal elegido para hallar la potencia necesaria del ventilador centrífugo. ¹²

$$P_t = \frac{h * Q * \rho_{\text{aire}}}{75 * 60} \quad (4.12)$$

Donde:

P_t = Potencia teórica del ventilador (HP)

h = Presión del aire (cm de agua)

Q = Caudal del aire del ventilador (m^3/min)

ρ_{aire} = Densidad del aire (Kg/m^3)

¹² LATORRE RICAURTE.F, Diseño y Construcción de un cubilote convencional, EPN.

$$P_t = \frac{h * Q * \rho_{\text{aire}} * 1000}{75 * 60 * 100}$$

$$P_t = \frac{40 * 8.82 * 1,226 * 1000}{75 * 60 * 100}$$

$$P_t = 0.96 \text{ [HP]}$$

Como siempre existen pérdidas de presión en el ducto de la tubería e intercambiador de calor, y debido a condiciones de operación a la potencia teórica la multiplicamos por un factor de corrección para obtener la potencia real del ventilador. El factor de corrección utilizado para este tipo de ventilador es de 1.8, entonces tenemos:

$$P_{\text{real}} = 0.96 * 1.8$$

$$P_{\text{real}} = 1.73 \text{ [HP]}$$

Entonces el ventilador que necesitamos es uno de 2 HP.

4.1.19 REVESTIMIENTO REFRACTARIO

El revestimiento refractario del horno cumple la función de retener la mayor cantidad de calor producida en la cámara de combustión, necesaria para la fusión del metal.

4.1.19.1 Análisis de transferencia de calor para determinar el espesor adecuado de la capa de refractario del horno.

El material refractario empleado para en el presente diseño, es una combinación de cemento refractario combinado con ladrillo triturado, formando así un mortero adecuado para las condiciones de trabajo del horno, mas una capa de diatomita alrededor de la capa de mortero refractario, que a su vez sirve como aislante y

para el alivio de esfuerzos generados en el refractario producto de las altas temperaturas.

Características del cemento refractario utilizado:

- Cemento refractario Marca Vesuvius.
- Refractario ácido con 90% de contenido de alúmina.
- Temperatura máxima de servicio 1973 [K]
- Conductividad térmica a la temperatura de servicio de 0.04 [W/mK]

Características del ladrillo refractario utilizado:

- Ladrillo refractario U32 ácido.
- Temperatura de ablandamiento 1623 [K]
- Conductividad térmica a la temperatura de servicio 0.08 [W/mK]

Características de la capa aislante de diatomita utilizada:

- Temperatura máxima de servicio 1310 [K]
- Densidad típica 385 [Kg/m³]
- Conductividad térmica a la temperatura de servicio 0.1 [W/mK]

En el Anexo A se presentan algunas de las propiedades de los elementos refractarios usados en el horno.

Velocidad de los gases en el interior del horno¹³

En la tabla 4.3, se muestra que para un horno pequeño (canal de humos bajo y sección transversal pequeña) 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, si se ha

¹³ W. TINKS, H. MAWHINNEY, Hornos Industriales, Volumen 1, Urmo, 1971, pag 404.

de evitar una presión excesiva en el horno, en tal forma que evite picos no deseados de temperatura y arrastro de partículas apreciables al exterior del mismo.

Tabla 4.3. 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								
0.114X0.114	4.24	5.49	6.95	4.81	6.31	8.04	5.58	7.34	9.36
0.114X0.228	4.30	5.67	7.47	4.91	6.55	8.62	5.70	7.68	10.06
0.228X0.228	4.39	5.91	8.05	5.00	6.83	9.30	5.82	7.98	10.91
0.457X0.457	4.45	6.16	8.72	5.09	7.10	10.06	5.91	8.32	11.86

Fuente: Hornos Industriales, Volumen 1, W. Tinks, H. Mawhinney

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge

Cálculo del coeficiente de convección de los gases en el interior del horno.

Datos

$$u_m = 5.58 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\rho @ T = 1300 \text{ }^\circ\text{C} = 0.2216 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$\mu @ T = 1300 \text{ }^\circ\text{C} = 576.71 \times 10^{-7} \text{ [Ns/m}^2\text{]}$$

$$Pr @ T = 1300 \text{ }^\circ\text{C} = 0.687$$

$$K @ T = 1300 \text{ }^\circ\text{C} = 104.38 \times 10^{-3} \text{ [W/mK]}$$

Los valores de ρ , μ , Pr , $K @ T = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$, fueron tomados del Anexo A6, del libro de Incropera, Fundamentos de transferencia de calor

Donde:

u_m : Velocidad de los gases en el interior del horno.

ρ : Densidad de los gases en el interior del horno.

μ : Viscosidad de los gases en el interior del horno.

Pr: Numero de Prant.

K: Coeficiente de conductividad térmica de los gases en el interior del horno.

Re_D : Numero de Reynolds.

Nu_D : Numero de Nuselt.

h_i : Coeficiente de convección en el interior del horno.

$$Re_D = \frac{\rho * u_m * D}{\mu} \quad (4.13)$$

$$Re_D = \frac{0.2216 * 5.58 * 0.23}{576.71 \times 10^{-7}}$$

$$Re_D = 4931.45$$

Con $Re = 4931.45 > 2300$, el flujo es turbulento.

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{\frac{4}{5}} Pr^{0.4} \quad (4.14)$$

$$Nu_D = 0.023 * (4931.45)^{\frac{4}{5}} (0.687)^{0.4}$$

$$Nu_D = 17.82$$

De aquí:

$$h_i = Nu_D \frac{K}{D_i} \quad (4.15)$$

$$h_i = 17.82 * \frac{104.38 \times 10^{-3}}{0.23}$$

$$h_i = 8.09 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

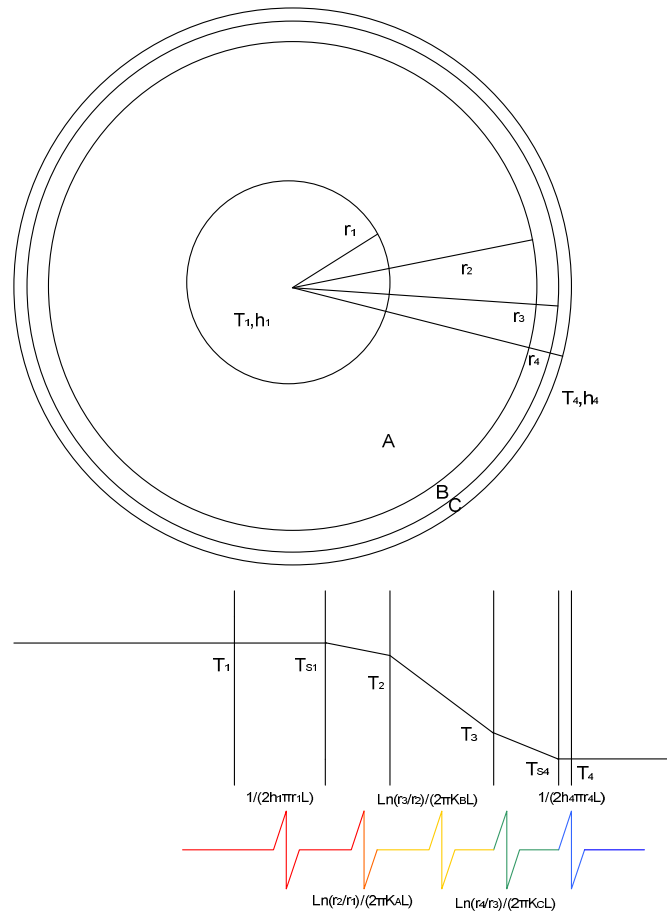


Figura 4.2. Distribución de temperaturas en las paredes del horno

Datos:

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

$$h_1 = 8.09 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$T_4 = 293 \text{ [K]}$$

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

$$r_1 = 0.115 \text{ [m]}$$

$$r_2 = 0.217 \text{ [m]}$$

$$r_3 = 0.237 \text{ [m]}$$

$$r_4 = 0.240 \text{ [m]}$$

$$L = 0.5 \text{ [m]}$$

$$K_A = 0.04 \text{ [W/mK]}$$

$$K_B = 0.1 \text{ [W/mK]}$$

$$K_C = 43 \text{ [W/mK]} \text{ (Tomado de HOLMAN, Transferencia de calor, pag. 448)}$$

Donde:

T_1 = Temperatura máxima registrada en el interior del horno.

T_{s1} : Temperatura de la pared interna del refractario

T_2 : Temperatura de la pared del refractario

T_3 : Temperatura de la capa de diatomita

T_{s4} : Temperatura externa del horno

T_4 = Temperatura del medio ambiente.

h_1 = Coeficiente de convección en el interior del horno.

h_2 = Coeficiente de convección del aire a temperatura ambiente en lugares cerrados, Anexo G1)

r_1 = Radio interior de la cámara de fusión del horno.

r_2 = Radio exterior del mortero refractario.

r_3 = Radio exterior de la capa aislante de diatomita.

r_4 = Radio exterior del horno

L = Longitud comprendida entre la zona de reducción y fusión, sitio donde se registra la máxima temperatura del horno.

K_A = Conductividad térmica a la temperatura máxima de servicio del Concrax 1700.

K_B = Conductividad térmica a la temperatura de servicio de la diatomita.

K_C = Conductividad térmica a la temperatura de servicio de la chapa metálica (Acero A36).

La resistencia térmica del sistema viene dada por la ecuación (4.16)

$$q_r = \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi K_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi K_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi K_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} \quad (4.16)$$

$$q_r = \frac{1573 - 293}{\frac{1}{2\pi * 0.115 * 0.5 * 8.09} + \frac{\ln(0.212/0.115)}{2\pi * 0.04 * 0.5} + \frac{\ln(0.237/0.212)}{2\pi * 0.1 * 0.5} \dots}$$

$$\dots \frac{1}{\dots + (\ln(0.240/0.237))/(2\pi * 43 * 0.5) + 1/(2\pi * 0.240 * 0.5 * 3.06)}$$

$$q_r = 213.69 \text{ [W]}$$

Además se sabe que:

$$q_r = \frac{T_1 - T_{s1}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1}} = \frac{T_{s1} - T_2}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_A L}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_B L}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi K_C L}} = \frac{T_4 - T_{s4}}{\frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} \quad (4.17)$$

Entonces las temperaturas en las diferentes zonas de la pared del horno vienen dadas por:

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

$$T_{s1} = 1573 - \frac{213.69}{2\pi * 0.115 * 0.5 * 8.09}$$

$$T_{s1} = 1499.89 \text{ (K)}$$

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

$$T_2 = 1499.89 - \frac{213.69 * \ln(0.217/0.115)}{2\pi * 0.04 * 0.5}$$

$$T_2 = 420.14 \text{ [K]}$$

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

$$T_3 = 420.14 - \frac{213.69 * \ln(0.237/0.217)}{2\pi * 0.1 * 0.5}$$

$$T_3 = 360.17 \text{ [K]}$$

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

$$T_{s4} = 360.17 - \frac{213.69 * \ln(0.240/0.237)}{2\pi * 43 * 0.5}$$

$$T_{s4} = 360.15 \text{ [K]}$$

Como se puede apreciar la temperatura a la que alcanza la chapa metálica es de alrededor de 87 °C por lo que el espesor del refractario y la capa de diatomita se hallan dentro del rango establecido de diseño, debido a que no se registra radiación de calor. Entonces el espesor de la pared de refractario incluida la capa de diatomita es de 12.5 cm.

En el Anexo G, se presenta una comprobación del análisis de transferencia de calor con las condiciones establecidas en el cálculo anterior, el cual fue realizado en el Software Visual Nastra 4.0.

4.1.20 DIÁMETRO EXTERIOR DEL HORNO

Envoltura exterior (chapa metálica).

La 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 nuestro diseño se escogerá una chapa metálica de 3 mm de espesor.

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

$$d_e = d_i + 2e_{ref} + 2e_{amt} + 2e_{chapa} \quad (4.18)$$

$$d_e = 0.23 + 2 * 0.097 + 2 * 0.025 + 2 * 0.003$$

$$d_e = 0.48 \text{ [m]}$$

4.1.21 PESO TOTAL DEL HORNO

Cálculos de las masas de las secciones inferior y superior.

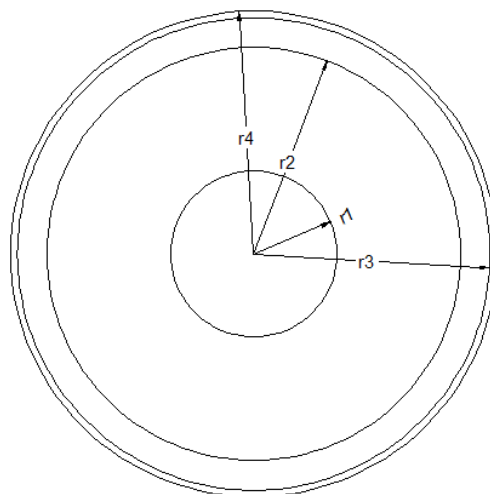


Figura 4.3. Radios de las diferentes secciones del horno

Cálculo de la masa de la chapa metálica

Datos:

r_1 = radio de la cámara de combustión ($r_1 = 0.115$ m)

r_2 = radio del ladrillo refractario ($r_2 = 0.217$ m)

r_3 = radio de todo el refractario y aislante ($r_3 = 0.237$ m)

r_4 = radio exterior del horno ($r_4 = 0.240$ m)

l = Longitud de cada una de las secciones del horno ($l = 0.70$ m)

El volumen total de una de las secciones del horno viene dado por la expresión:

$$V_T = \pi r_4^2 * l \quad (4.19)$$

El volumen total del refractario y aislante de una de las secciones viene dado por la expresión:

$$V_3 = \pi r_3^2 * l \quad (4.20)$$

El volumen del refractario de una de las secciones del horno viene dado por la expresión:

$$V_2 = \pi r_2^2 * l \quad (4.21)$$

El volumen de la cámara de combustión una de las secciones del horno viene dado por la expresión:

$$V_1 = \pi r_1^2 * l \quad (4.22)$$

El volumen de la chapa metálica de cada una de las secciones del horno viene dado por la expresión:

$$V_{\text{Chapa}} = V_T - V_3 \quad (4.23)$$

Con las expresiones anteriores se procede a los cálculos de los volúmenes de cada una de las secciones respectivas.

$$V_T = \pi r_4^2 * l$$

$$V_T = \pi * 0.240^2 * 0.70$$

$$V_T = 0.127 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_3 = \pi r_3^2 * l$$

$$V_3 = \pi * 0.237^2 * 0.70$$

$$V_3 = 0.124 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_{\text{Chapa}} = V_T - V_3$$

$$V_{\text{Chapa}} = 0.127 \text{ m}^3 - 0.124 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Chapa}} = 3 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

Cálculo del peso de la chapa metálica.

$$m_{\text{Chapa}} = \rho_{\text{Chapa}} * V_{\text{Chapa}} \tag{4.24}$$

$$m_{\text{Chapa}} = 7869 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$m_{\text{Chapa}} = 23.61 \text{ [Kg]}$$

Cálculo del peso de la capa de diatomita

$$V_{\text{Diat}} = V_3 - V_2 \tag{4.25}$$

$$V_2 = \pi r_2^2 * l$$

$$V_2 = \pi * 0.217^2 * 0.70$$

$$V_2 = 0.104 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_{\text{Diat}} = 0.124 - 0.104$$

$$V_{\text{Diat}} = 0.02 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_{\text{Diat}} = \rho_{\text{Diat}} * V_{\text{Diat}}$$

$$\rho_{\text{Diat}} = 385 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$m_{\text{Diat}} = 385 * 0.02$$

$$m_{\text{Diat}} = 7.7 \text{ [Kg]}$$

Cálculo del peso del refractario.

$$V_{\text{Refractario}} = V_2 - V_1 \tag{4.26}$$

$$V_1 = \pi * 0.115^2 * 0.70$$

$$V_1 = 0.029 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_{\text{Refractario}} = 0.104 \text{ m}^3 - 0.029 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Refractario}} = 0.075 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_{\text{Refractario}} = \rho_{\text{Refractario}} * V_{\text{Refractario}} \tag{4.27}$$

$$m_{\text{Refractario}} = 1900 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.075 \text{ m}^3$$

$$m_{\text{Refractario}} = 142.5 \text{ [Kg]}$$

Cálculo del peso de las secciones superior e inferior

$$m_{\text{Sección superior}} = m_{\text{Chapa}} + m_{\text{Diat}} + m_{\text{Refractario}} \tag{4.28}$$

$$m_{\text{Sección superior}} = 23.61 \text{ Kg} + 7.7 \text{ Kg} + 142.5 \text{ Kg}$$

$$m_{\text{Sección superior}} = 173.81 \text{ [Kg]}$$

$$m_{\text{Sección inferior}} = 173.81 \text{ [Kg]}$$

Peso Total del Horno

$$m_{\text{Total}} = m_{\text{Sección superior}} + m_{\text{Sección Inferior}} \quad (4.29)$$

$$m_{\text{Sección superior}} = m_{\text{Sección Inferior}}$$

$$m_{\text{Total}} = 2 * (173.81)$$

$$m_{\text{Total}} = 347.62 \text{ [Kg]}$$

4.1.22 PLACA BASE

La placa base es aquella que se encuentra ubicada en el fondo del horno a nivel de la solera, esta resiste todo el peso del refractario de la primera y segunda sección del horno.

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.

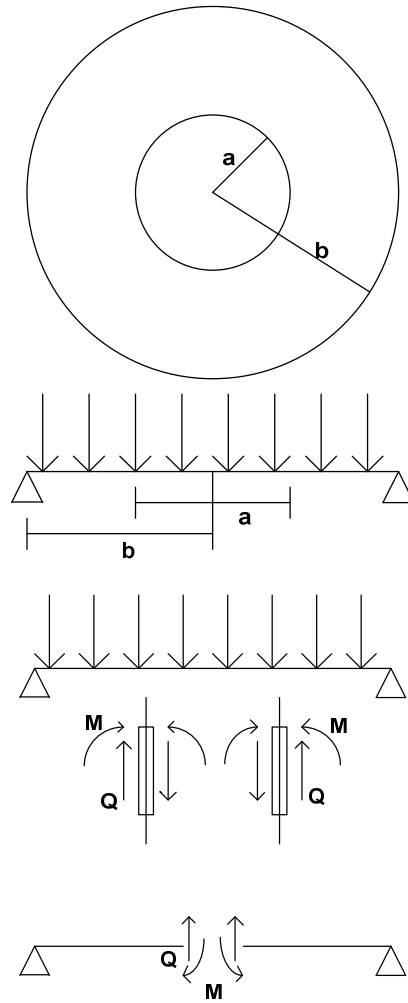


Figura 4.4. Distribución de fuerzas y momentos en la placa base con carga uniforme.

El cortante en una sección $a > r > b$ se anula al no existir fuerzas verticales actuando sobre la placa, $Q(r) = 0$. Esta circunstancia nos proporciona la ecuación diferencial siguiente:

$$0 = \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right]$$

Integrando tres veces esta ecuación se obtiene:

$$w(r) = -\frac{C_1 r^2}{4} - C_2 \ln \frac{r}{a} + C_3$$

Como la placa esta simplemente apoyada en su borde exterior se imponen las siguientes condiciones:

$$w(r)_{r=a} = -0$$

$$M_r(r)_{r=a} = M_2$$

$$M_r(r)_{r=b} = M_1$$

Las condiciones de momento se traducen en:

$$D \left[\frac{C_1}{2} (1 + \nu) - \frac{C_2}{b^2} (1 - \nu) \right] = M_1$$

$$D \left[\frac{C_1}{2} (1 + \nu) - \frac{C_2}{a^2} (1 - \nu) \right] = M_2$$

De donde:

$$C_1 = \frac{2(a^2 M_2 - b^2 M_1)}{(1 + \nu)D(a^2 - b^2)}$$

$$C_2 = \frac{a^2 b^2 (M_2 - M_1)}{(1 - \nu)D(a^2 - b^2)}$$

Con $w(r) = 0$ para $r = a$, tenemos:

$$C_3 = \frac{a^2(a^2 M_2 - b^2 M_1)}{2(1 + \nu)D(a^2 - b^2)}$$

Por lo tanto la flecha $w(r)$ de la placa viene dado por:

$$w(r) = (a^2 - r^2) \frac{(a^2 M_2 - b^2 M_1)}{2(1 + \nu)D(a^2 - b^2)} - \frac{a^2 b^2 (M_2 - M_1)}{(1 - \nu)D(a^2 - b^2)} \ln \frac{r}{a} \quad (4.30)$$

Por lo tanto la fuerza y momento cortante en la sección $r = b$ de la placa circular de radio exterior $r = a$ simplemente apoyada en su borde exterior, vienen dados para una carga uniforme por:

$$(Q)_{(r=b)} = \frac{qb}{2} \quad (4.31)$$

$$(M_{c_r})_{r=b} = \frac{q}{16}(3 + \nu)(a^2 - b^2) \quad (4.32)$$

Ejemplo de cálculo de la placa base.

Características definidas de la placa:

$$D_{\text{ext}} = 0.48 \text{ [m]}$$

$$D_{\text{int}} = 0.23 \text{ [m]}$$

$$e = 8 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

Material: Acero A36

$$S_y = 24.48 \times 10^{-6} \text{ [Kg/m}^2\text{]}$$

El momento máximo se registra en el centro de la placa y está dado por la ecuación 4.31

$$M_{c_{\text{max}}} = \frac{q}{16}(3 + \nu)(a^2 - b^2)$$

Donde:

a: radio exterior de la placa

b: radio interior de la placa

ν : coeficiente de Poisson, para el acero estructural ($\nu = 0.25$)

q: Peso total del horno ($q = 347.62 \text{ Kg}$)

Remplazando valores se tiene:

$$M_{c_{\text{max}}} = \frac{347.62}{16}(3 + 0.25)(0.24^2 - 0.115^2)$$

$$M_{c_{\text{max}}} = 3.13 \text{ [Kg * m}^2\text{]}$$

El momento de inercia para sección transversal de la placa viene dado por:

$$I_{xx} = \frac{bh^3}{12}$$

Donde:

b: largo de la sección mayor (b = 0.48 m)

h: ancho de la placa (h = 15x10⁻³ m)

Remplazando valores tenemos:

$$I_{xx} = \frac{0.48 * (12x10^{-3})^3}{12}$$

$$I_{xx} = 6.9X10^{-8} [m^4]$$

El esfuerzo máximo viene dado por:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc_{max}}{I_{xx}}$$

$$\sigma_{max} = \frac{3.13}{6.9X10^{-8}}$$

$$\sigma_{max} = 4.5X10^7 [Kg/m^2]$$

El factor de seguridad viene dado por la expresión:

$$n = \frac{Sy}{\sigma_{max}}$$

$$n = \frac{24.48X10^6}{4.5X10^7}$$

$$n = 0.54$$

Tabla 4.4. Momentos, esfuerzos máximos y factores de seguridad para placas de diferentes espesores.

Espesor de la	$M_{c_{max}}$ [Kg*m ²]	σ_{max} [kg/m ²]	n
---------------	------------------------------------	-------------------------------------	---

placa [m]			
12×10^{-3}	3.13	4.5×10^7	0.54
14×10^{-3}	3.13	28.72×10^6	0.85
16×10^{-3}	3.13	19.2×10^6	1.3

Fuente: PROPIA

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge

Como se puede apreciar el factor de seguridad optimo para la placa es el de 1.3, en consecuencia se usara una placa de 16 [mm] de espesor para la placa base.

4.1.23 PUERTA DE DESCARGA

Se halla ubicada en la parte inferior del horno, esta soporta toda la carga del horno. De la misma forma que la placa base por medio de expresiones de los esfuerzos, momentos y cortantes referidos al sistema cartesiano.

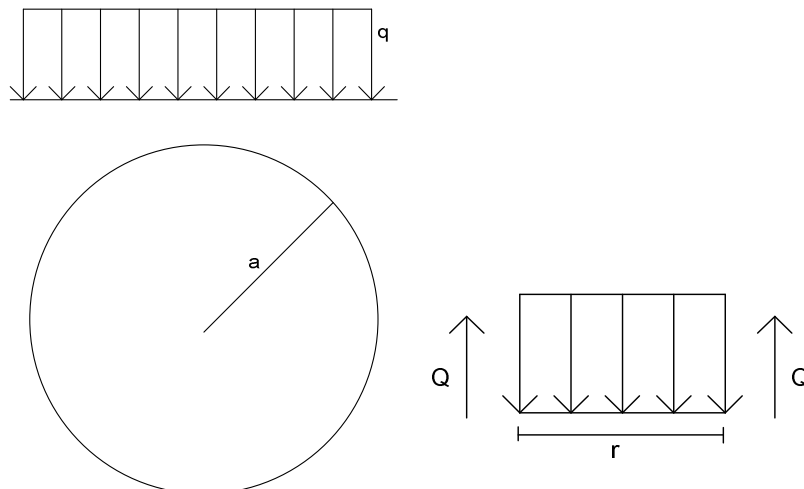


Figura 4.5. Placa circular uniformemente cargada

Si la placa base de radio a soporta una carga uniforme sobre toda su superficie de intensidad q , el esfuerzo cortante Q , a una distancia r genérica del centro de la placa viene dado por:

$$2\pi rQ = \pi r^2 q$$

Por lo tanto:

$$Q = \frac{qr}{2} \quad (4.33)$$

Derivando la Ec. (4.40) con respecto a r tenemos:

$$\frac{qr}{2} = -D \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right]$$

Integrando dos veces la expresión anterior se tiene:

$$w(r) = \frac{qr^4}{64D} + \frac{C_1 r^2}{4} + C_2 \ln \frac{r}{a} + C_3$$

Las constantes C_1 , C_2 y C_3 se determinan para condición de borde.

En nuestro caso como la placa tiene borde empotrado, entonces las ecuaciones para las respectivas condiciones de giro son:

$$\text{Giro en } r = a \quad \left(\frac{dw}{dr} \right)_{(r=a)} = 0 = \left(\frac{qr^3}{16D} + \frac{C_1 r^2}{2} + \frac{C_2}{r} \right)_{(r=a)}$$

$$\text{Giro en } r = 0 \quad \left(\frac{dw}{dr} \right)_{(r=0)} = 0 = \left(\frac{qr^3}{16D} + \frac{C_1 r^2}{2} + \frac{C_2}{r} \right)_{(r=0)}$$

De estas dos ecuaciones se tiene:

$$C_2 = 0; \quad C_1 = -\frac{qa^2}{8D}; \quad C_3 = -\frac{qa^2}{64D}$$

$$W(r) = \frac{q}{64D} (a^2 - r^2)^2$$

La flecha máxima se produce en el centro de la placa $r = 0$ y vale.

$$W_{\max} = qa^4/64D$$

Los momentos Flectores M_r y M_ϕ , vienen dados para cada posición de r por:

En el contorno $r = a$:

$$(M_r)_{c(r=a)} = -\frac{qa^2}{8}$$

$$(M_\phi)_{c(r=a)} = -\frac{vqa^2}{8}$$

Y en el centro $r = 0$

$$(M_r)_{c(r=0)} = -\frac{qa^2}{8}(1 + \nu) = (M_\phi)_{c(r=0)} = M_{c_{\max}} \quad (4.34)$$

Ejemplo de cálculo de la placa para la puerta de descarga:

Características definidas de la placa:

$$D = 0.23 \text{ [m]}$$

$$e = 8 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

Material Acero A36

$$S_y = 24.48 \times 10^{-6} \text{ [Kg/m}^2\text{]}$$

El momento máximo se registra en el centro de la placa y está dado por la ecuación 4.55

$$M_{c_{\max}} = -\frac{qa^2}{8}(1 + \nu)$$

Donde:

a: radio de la placa

ν : coeficiente de Poisson, para el acero estructural ($\nu = 0.25$)

q: Carga máxima del horno ($q = 100 \text{ Kg}$)

$$M_{c_{\max}} = \frac{100 * 0.115^2}{8} (1 + 0.25)$$

$$M_{c_{\max}} = 0.207 \text{ Kg} * \text{m}^2$$

El momento de inercia para sección transversal de la placa viene dado por:

$$I_{xx} = \frac{bh^3}{12}$$

Donde:

b: largo de la sección mayor ($b = 0.23 \text{ m}$)

h: ancho de la placa ($h = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$)

Remplazando valores tenemos:

$$I_{xx} = \frac{0.23 * (8 \times 10^{-3})^3}{12}$$

$$I_{xx} = 9 \times 10^{-9} \text{ [m}^4\text{]}$$

El esfuerzo máximo viene dado por:

$$\sigma_{\max} = \frac{Mc_{\max}}{I_{xx}}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{0.207}{9 \times 10^{-9}}$$

$$\sigma_{\max} = 23 \times 10^6 \text{ [Kg/m}^2\text{]}$$

El factor de seguridad viene dado por la expresión:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{\max}}$$

$$n = \frac{24.48 \times 10^6}{23 \times 10^6}$$

$$n = 1.06$$

Tabla 4.5. Momentos, esfuerzos máximos y factores de seguridad para placas de diferentes espesores.

Espesor de la placa [m]	Mc_{\max} [Kg*m ²]	σ_{\max} [kg/m ²]	n

8×10^{-3}	0.207	23×10^6	1.06
9×10^{-3}	0.207	15.92×10^6	1.54
10×10^{-3}	0.207	10.89×10^6	2.25

Fuente: PROPIA

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge

Conclusión: Como se puede apreciar el factor de seguridad óptimo para la placa es el de 1.54, en consecuencia se usará una placa de 9 [mm] de espesor para la placa de la puerta de descarga.

4.1.24 COLUMNAS DE APOYO

El número de columnas de apoyo utilizado para el presente diseño es cuatro, con el fin de lograr la mayor estabilidad del horno y de sus accesorios, cada una de las columnas están sometida a compresión, lo cual puede producir falla por pandeo, entonces se diseñan las columnas para evitar este tipo de falla.

Dimensionamiento.

Tubo Mecánico redondo Galvanizado (Tomado de Catalogo Dipac, Productos de acero, Anexo B3)

$$d_{\text{ext}} = 50.80 \text{ [mm]}$$

$$e = 0.95 \text{ [mm]}$$

$$I = 5.3 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$L = 500 \text{ [mm]}$$

Material: Acero negro galvanizado ASTM A36

$$S_y = 240 \text{ MPa} = 2448 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$A = \frac{\pi(d_{\text{ext}}^2 - d_{\text{int}}^2)}{4} \quad (4.35)$$

$$A = \frac{\pi * (5.08^2 - 4.89^2)}{4}$$

$$A = 1.49 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$r = \sqrt{\frac{d_{\text{ext}}^2 + d_{\text{int}}^2}{4}} \quad (4.36)$$

$$r = \sqrt{\frac{5.08^2 + 4.89^2}{4}}$$

$$r = 3.52 \text{ [cm]}$$

La relación de esbeltez viene dada por la expresión:

$$\frac{L}{r} = \frac{50}{3.52}$$

$$\frac{L}{r} = 14.2$$

La fuerza nominal viene dada por la ecuación (5.31):

$$P = A \left[1054.65 - 0.0176 \left(\frac{L}{r} \right)^2 \right] \quad (4.37)$$

$$P = 1.49[1054.65 - 0.0176 * 14.2^2]$$

$$P = 1566.14 \text{ Kg}$$

Cuando se trabaja con hierro galvanizado hay que considerar un 30% de pérdidas en la resistencia, por lo que tenemos:

$$P_{\text{crit}} = \frac{0.7P}{n}$$

Trabajando con un factor de seguridad $n = 2$

$$P_{\text{crit}} = \frac{0.7 * 1566.14}{2}$$

$$P_{\text{crit}} = 548.15 \text{ [Kg]}$$

El peso total del horno con la máxima carga es alrededor de 450 kg, la carga crítica calculada es mucho mayor por lo que no habrá falla en las columnas.

4.1.25 CIMENTACIÓN¹⁴

La cimentación es la zona donde se ubica el horno, esta absorbe todo el peso del mismo. La parte superior de la cimentación deberá quedar unos 15 cm abajo del piso de la fundición, de manera que se pueda llenar con arena u otro material aislante del calor, para protección de la zapata de concreto. De la carta de cimentación de la tabla 4.6, se extrapolo para obtener las dimensiones adecuadas para la parte superior de la cimentación del cubilote diseñado, estas dimensiones están representadas en la figura 4.6.

Tabla 4.6. Carta de dimensiones para cimentaciones

Tamaño del cubilote	Diámetro de la coraza	AB	AC	AD	AE
1	813	914	908	1372	305
2	914	914	952	1473	406
2 ½	1041	1041	1067	1626	406
3	1168	1168	1194	1753	406
3 ½	1295	1295	1270	1880	406
4	1422	1422	1321	2032	457
5	1600	1549	1549	2159	457
6	1676	1651	1539	2261	483
7	1829	1778	1778	2438	483
8	1981	1981	1924	2642	508
9	2134	2134	2102	2794	508

Fuente: El Horno de Cubilote y su Operación

¹⁴ AMERICAN SOCIETY FOUNDRYMEN'S, El Horno de Cubilote y su Operación, Mexico, Continental, 1974.

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge

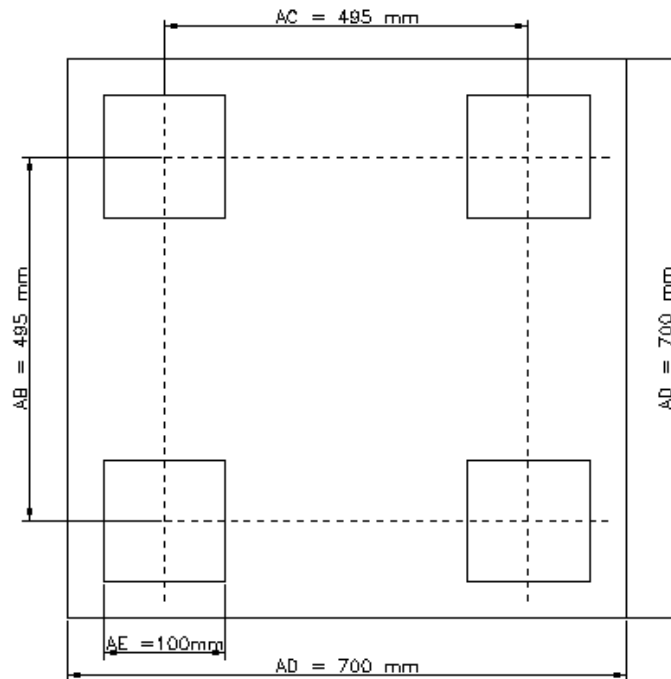


Figura 4.6. Dimensiones de la cimentación del horno

4.1.26 MIRILLAS

Las mirillas son dos cuerpos a manera de ventana, el uno se halla fijo sobre la caja de aire y dispuesto a nivel de las toberas en tanto que el otro se despliega sobre el primero, estas se utilizan para poder observar si el coque de la carga se halla 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. En el presente diseño se las elaborara de bronce por medio de fundición ya que una de las partes de

acople tiene una curvatura determinada e igual a la de la caja de aire, su número es de cuatro cada una dispuesta frente cada una de las toberas.

4.2 SISTEMA DE ENSAMBLE

Es el dispositivo usado para elevar la parte superior del cuerpo del horno con el fin de que se puedan visualizar sus partes, preparar el horno para cada encendida y poder dar el mantenimiento adecuado al refractario.

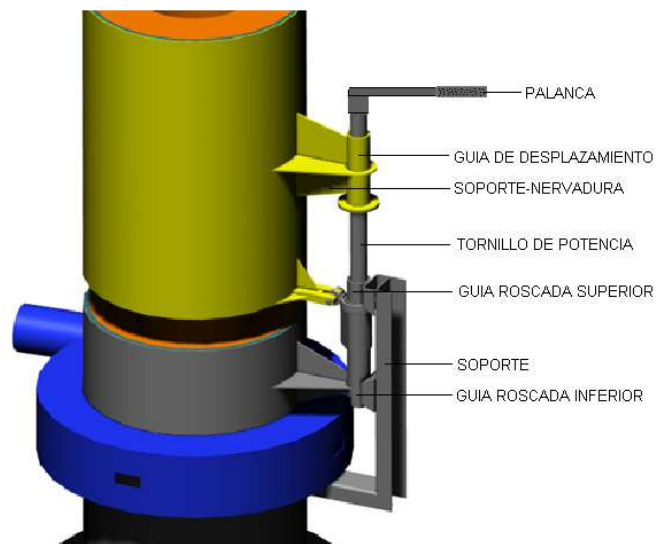


Figura 4.7. Esquema del soporte de elevación de la sección superior del horno

Para el dimensionamiento de cada uno de los elementos que conforman el sistema de elevación, se determinan primero la distribución de fuerzas en el sistema y los momentos máximos a los que se halla sometido el mismo.

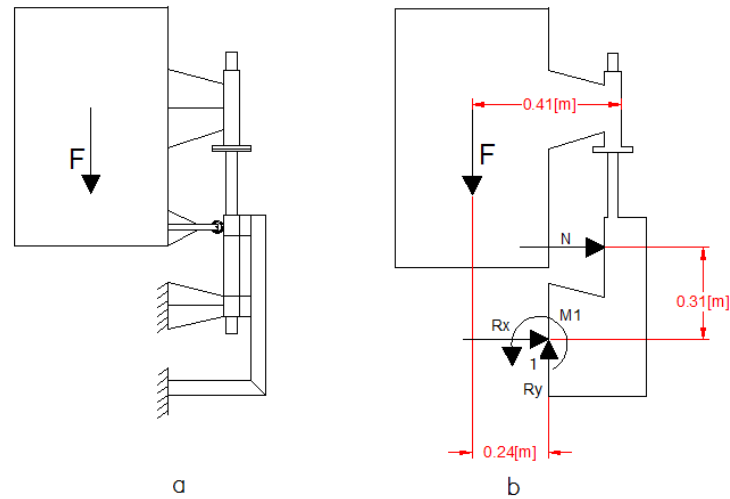


Figura 4.8. a) Esquema de sistema de elevación con carga, b) Diagrama de cuerpo libre del sistema.

De la figura 4.8, se determinan los momentos máximos a los que se hallan sometidos tanto el tornillo de potencia así como los soportes respectivamente.

Con los valores conocidos de:

$$F = 173.81 \text{ [Kg]}$$

$$N = 20 \text{ [Kg]}$$

Tenemos que la sumatoria de fuerzas y momentos es:

$$\Sigma F_x = 0$$

$$R_x = N$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_y = F$$

$$R_y = 173.81 \text{ [Kg]}$$

$$\Sigma M_1 = 0$$

$$M_1 - 0.31N + 0.41F = 0$$

$$M_1 - 0.31 * 20 + 0.41 * 173.81 = 0$$

$$M_1 = 65.06 \text{ [Kg * m]}$$

El momento máximo al que se halla sometido el tornillo de potencia se lo calcula con la expresión:

$$M_{\text{tor}} = 0.41F$$

$$M_{\text{tor}} = 0.41 * 173.81$$

$$M_{\text{tor}} = 71.26 \text{ [Kg * m]}$$

En el Anexo H1 se presenta un análisis en el software Solid Works de los esfuerzos a los que está sometido el tornillo de potencia.

4.2.1 TORNILLO DE POTENCIA

El tornillo de potencia es el encargado de subir todo el peso de la sección superior del horno, para su dimensionamiento se calcula los diferentes esfuerzos a los que está sometido el mismo

Material Acero ANSI 1018 HR; (En el Anexo B5, se presentan las propiedades del acero SAE-1018).

Tornillo de rosca cuadrada

$$S_y = 2249.82 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$F = 173.81 \text{ [Kg]}$$

$$\mu = 0.13$$

$$\mu_c = 0.09$$

Tornillo- Serie de paso basto

$$d = 0.35 \text{ [cm]}$$

$$d_c = 4.0 \text{ [cm]}$$

$$p = 0.6 \text{ [cm]}$$

Donde:

S_y = Limite de fluencia del Acero ANSI 1018

F = Peso de la sección superior del horno

μ = Coeficiente de fricción

μ_c = Coeficiente de fricción en el collarín

d = Diámetro externo del tornillo de potencia

d_c = Diámetro del collarín

p = Paso de la rosca

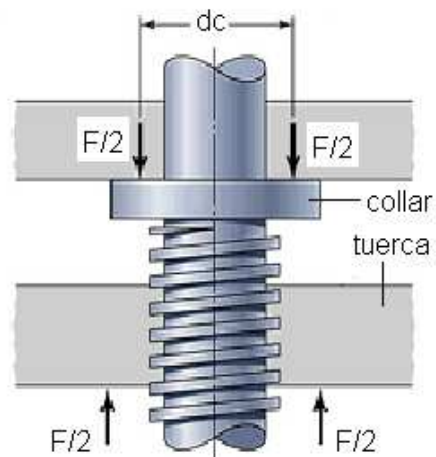


Figura 4.9. Distribución de fuerzas en el tornillo de potencia de rosca cuadrada

La profundidad de la rosca viene dada por la ecuación (5.32).

$$a = \frac{p}{2} \quad (4.38)$$

$$a = \frac{0.6}{2}$$

$$a = 0.3 \text{ [cm]}$$

El ancho de la rosca viene dado por la ecuación (5.33)

$$b = \frac{p}{2} \quad (4.39)$$

$$b = \frac{0.6}{2}$$

$$b = 0.3 \text{ [cm]}$$

El diámetro medio del tornillo de potencia esta dado por la ecuación (5.34)

$$d_m = d - \frac{p}{2} \quad (4.40)$$

$$d_m = 3.5 - \frac{0.6}{2}$$

$$d_m = 3.2 \text{ [cm]}$$

El diámetro menor viene dado por la ecuación (5.35)

$$d_r = d - p \quad (4.41)$$

$$d_r = 3.5 - 0.6$$

$$d_r = 2.9 \text{ [cm]}$$

El avance del tornillo esta dado por la ecuación (5.36)

$$l = 2p \quad (4.42)$$

$$l = 2 * 0.6$$

$$l = 1.2 \text{ [cm]}$$

El momento torsor para subir la carga, esta dado por la ecuación (5.37)

$$T_s = \frac{Fdm}{2} \left(\frac{l + \pi\mu dm}{\pi dm - \mu l} \right) + \frac{F\mu_c d_c}{2} \quad (4.43)$$

$$T_s = \frac{173.81 * 3.2}{2} \left(\frac{1.2 + \pi * 0.13 * 3.2}{\pi * 3.2 - 0.13 * 1.2} \right) + \frac{173.81 * 0.09 * 4.0}{2}$$

$$T_s = 101.87 \text{ [Kg * cm]}$$

El momento torsor para bajar la carga, esta dado por la ecuación (5.38)

$$T_b = \frac{Fdm}{2} \left(\frac{\pi\mu dm - l}{\pi dm + \mu l} \right) + \frac{F\mu_c d_c}{2} \quad (4.44)$$

$$T_b = \frac{173.81 * 3.2}{2} \left(\frac{\pi * 0.13 * 3.2 - 1.2}{\pi * 3.2 + 0.13 * 1.2} \right) + \frac{173.81 * 0.09 * 4.0}{2}$$

$$T_b = 34.2 \text{ [Kg * cm]}$$

La eficiencia viene dada por la ecuación (5.39)

$$e = \frac{Fl}{2\pi T} \quad (4.45)$$

$$e = \frac{173.81 * 1.2}{2\pi * 101.87}$$

$$e = 0.33$$

Esfuerzos ha los que se halla sometido el tornillo de potencia.

Esfuerzo por aplastamiento.

$$\sigma_a = \frac{F}{\pi d_m h n} \quad (4.46)$$

Donde:

σ_B = Esfuerzo por aplastamiento [Kg/cm^2]

F = Carga [Kg]

d_m = Diámetro medio de la rosca del tornillo [cm]

a = profundidad de la rosca [cm]

n = Número de cuerdas en contacto (n = 1)

$$\sigma_a = \frac{173.81}{\pi * 3.2 * 0.3 * 1}$$

$$\sigma_a = 57.63 [\text{Kg}/\text{cm}^2]$$

Esfuerzos de flexión y corte en la rosca

Flexión: Se obtiene considerando como si se tuviera una viga corta en cantiliver con una carga en el extremo del tornillo, la carga se supone que está uniformemente repartida, es decir que la carga actúa a la mitad de la altura de la rosca.

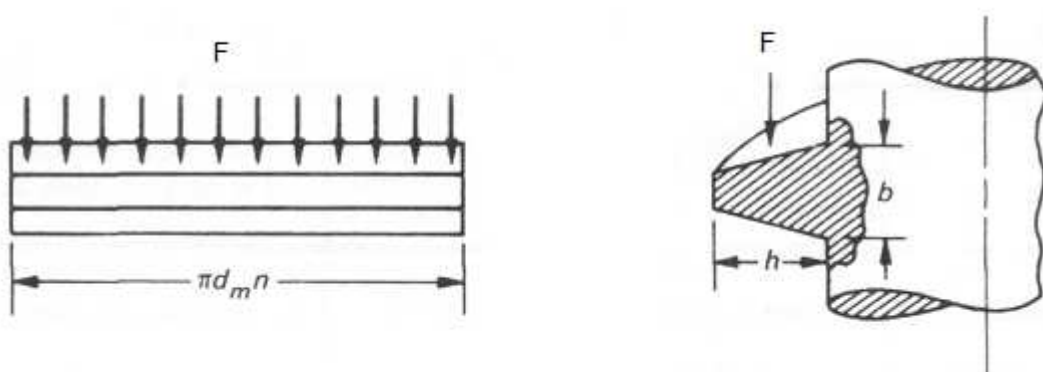


Figura. 4.10. Rosca del tornillo cargado como viga cantiliver

La sección transversal de la rosca desarrollada en la raíz es un rectángulo con una profundidad a y un ancho $\pi d_m n$ que se considera como viga

Tendremos de este modo una sección para la rosca de:

$$\frac{I}{c} = \frac{d_m n \pi}{6} \quad (4.47)$$

El momento flector máximo para esta viga es

$$M_{\max} = \frac{Fh}{2} \quad (4.48)$$

El esfuerzo flector esta dado por la ecuación (4.39):

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I}$$

Sustituyendo queda

$$\sigma_b = \frac{3Fh}{\pi d_m n b^2}$$

Reemplazando valores tenemos:

$$M_{\max} = \frac{Fa}{2}$$

$$M_{\max} = \frac{173.81 * 0.3}{2}$$

$$M_{\max} = 26.07 [\text{Kg} * \text{cm}]$$

$$\sigma_b = \frac{3Fa}{\pi d_m n b^2}$$

$$\sigma_b = \frac{3 * 173.81 * 0.3}{\pi * 3.2 * 1 * 0.3^2}$$

$$\sigma_b = 172.89 [\text{Kg}/\text{cm}^2]$$

Corte: tanto las roscas en el tornillo como en la tuerca están sujetas a cortante debido a la flexión. Para una sección rectangular el esfuerzo por corte transversal es:

$$\tau_b = \frac{3 F}{2 A} \quad (4.49)$$

$$\tau_b = \frac{3 F}{2 \pi d_m n b}$$

$$\tau_b = \frac{3 F}{2 \pi d_m n b}$$

$$\tau_b = \frac{3 \cdot 173.81}{2 \pi * 3.2 * 1 * 0.3}$$

$$\tau_b = 86.45 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

Esfuerzo de flexión al que se halla sometido el cuerpo del tornillo

$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_{\text{xx}}} \quad (4.50)$$

Donde:

σ_{flex} : Esfuerzo flector al que se halla sometido el cuerpo del tornillo

M_{max} : Momento máximo al que se halla sometido el cuerpo del tornillo

W_{xx} : Momento de resistencia de la sección transversal del tornillo

$$W_{\text{xx}} = \frac{\pi r^3}{4}$$

$$W_{\text{xx}} = \frac{\pi * 1.75^3}{4}$$

$$W_{\text{xx}} = 4.21 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{M_{\text{max}}}{W_{\text{xx}}}$$

$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{7126}{4.21}$$

$$\sigma_{\text{flex}} = 1692.64 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{\text{flex}}}$$

$$n = \frac{2249.82}{1692.64}$$

$$n = 1.33$$

4.2.2 DISEÑO DE LAS GUÍAS ROSCADAS SUPERIOR E INFERIOR

Una vez dimensionado el tornillo de potencia resulta sencillo escoger la guía roscada, ya que las características geométricas son semejantes. Hay que tener en cuenta que la guía se halla en compresión a diferencia del tornillo que sufrirá un alargamiento y por tanto sus hilos tenderán a separarse.

Teóricamente se supone que la carga en la tuerca está dividida en los tres primeros hilos de esta, teniéndose las cargas de compresión $F_A = -P$, $F_B = -2P/3$, $F_C = -P/3$, como se indica en la figura 4.11, pero estos efectos impiden compartir las cargas, por lo que se concluye que la carga no se comparte en absoluto y que, en cambio, el primer hilo resiste toda la fuerza.

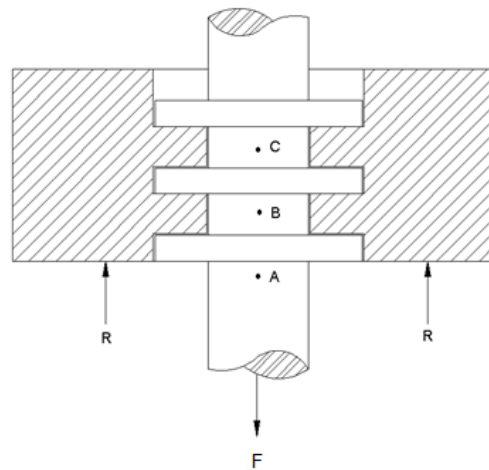


Figura 4.11. Esquema que indica como el hilo de la primera tuerca recibe la carga total

Características de la guía roscada:

Rosca cuadrada

Material Acero SAE 1018

Longitud de la guía roscada $L = 4.8$ cm

$S_y = 2249.82$ [Kg/cm²]

Paso de la rosca, $p = 3.5$ [mm]

Profundidad de la rosca, $a = 0.175$ [cm]

Ancho de la rosca, $b = 0.175$ [cm]

Diámetro exterior 4.5 [cm]

Diámetro medio 2.83 [cm]

Diámetro menor 2.65 [cm]

Avance 0.7 [cm]

4.2.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SOPORTE

El soporte del sistema se halla sometido tanto a flexión como a torsión, por lo que se calcularán cada uno de estos esfuerzos, para hallar el esfuerzo crítico.

Perfil en U de 80*40*2 (mm) (Ver Anexo B1)

$$W_{xx} = 7.71 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$I_{xx} = 30.80 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$I_{yy} = 4.89 \text{ [cm}^4\text{]}$$

$$S_y = 2448 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

Esfuerzo a flexión

$$\sigma_f = \frac{M_1}{W_{xx}} \quad (4.51)$$

$$\sigma_f = \frac{6506}{7.71}$$

$$\sigma_f = 843.84 \text{ Kg/cm}^2$$

Esfuerzo a torsión

$$\zeta = \frac{M_1 f}{J} \quad (4.52)$$

$$J = I_{xx} + I_{yy}$$

$$J = 30.80 + 4.89$$

$$J = 35.69 \text{ cm}^4$$

$$\zeta = \frac{6506 * 5}{35.69}$$

$$\zeta = 911.46 \text{ Kg/cm}^2$$

Esfuerzo combinado

$$\sigma_{\text{c}} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3\zeta^2} \quad (4.53)$$

$$\sigma_{\text{c}} = \sqrt{843.84^2 + 3 * 911.46^2}$$

$$\sigma_{\text{c}} = 1790.07 \text{ Kg/cm}^2$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{\text{c}}}$$

$$n = \frac{2448}{1790.07}$$

$$n = 1.4$$

El factor de seguridad $n = 1.4$ es aceptable para el diseño, hecho por el cual el perfil del soporte tendrá una medida de $80*40*2$ mm.

4.2.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS SOPORTES-NEVADURAS DE LAS GUÍAS SUPERIOR E INFERIOR

Los soportes-nervaduras, son los elementos que se hallan soldados a las secciones superior e inferior del horno y estos a su vez a la guía de deslizamiento y el soporte del sistema de elevación. Su forma es como la que se muestra en la figura 4.12.

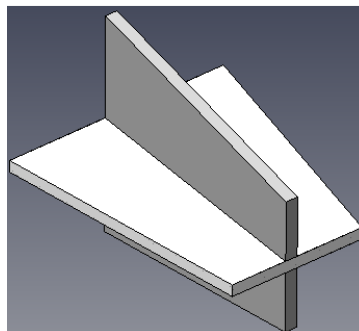


Figura 4.12. Soporte-nervadura

Características del material utilizado:

Acero A36 (Ver Anexo B2)

$$S_y = 2448 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$M_{\max} = M_1 = 6506 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

Esfuerzo a flexión

$$\sigma_f = \frac{M_1}{W_{yy}} \quad (4.54)$$

El momento de resistencia para la sección transversal del soporte-nervadura viene dado según su configuración por la ecuación 4.13.

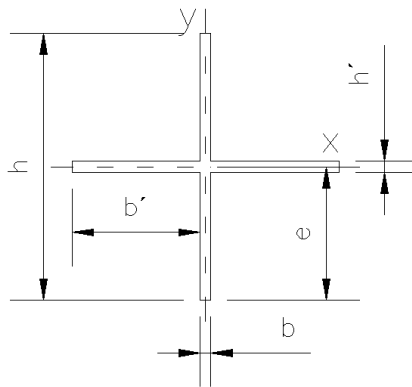


Figura 4.13. Sección transversal del soporte nervadura

Donde:

$$h = 10.0 \text{ [cm]}$$

$$h' = 0.3 \text{ [cm]}$$

$$b = 0.3 \text{ [cm]}$$

$$b' = 4.0 \text{ [cm]}$$

$$e = 6.0 \text{ [cm]}$$

$$W_x = \frac{bh^3 + 2b'h^3}{12e} \quad (4.55)$$

$$W_x = \frac{0.3 * 10^3 + 2 * 4 * 0.3^3}{12 * 6}$$

$$W_y = 4.17 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma_f = \frac{M_1}{W_{yy}}$$

$$\sigma_f = \frac{7126}{4.17}$$

$$\sigma_f = 1708.87 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_f}$$

$$n = \frac{2448}{1708.87}$$

$$n = 1.43$$

Como se puede apreciar el factor de seguridad es el adecuado para el diseño, entonces se utilizaran platinas de 3 mm de espesor para los soportes-nervaduras de las guías roscadas.

4.3 DISEÑO DE LA CAMARA DE CALENTAMIENTO DE AIRE E INTERCAMBIADOR DE CALOR

4.3.1 CAMARA DE CALENTAMIENTO DE AIRE

Como se indicó en el Capítulo III, el calentamiento del aire se lo realizará por medio externo, debido a que el horno en cuestión tendrá un funcionamiento intermitente, razón por la cual es inadecuado en este caso usar los gases producto de la combustión del horno como medio para precalentar el aire, además que el horno es pequeño para estos fines y tendría que utilizarse una chimenea de altura adecuada para conseguir el tiro necesario de los gases de la combustión.

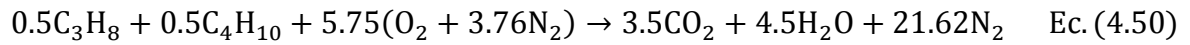
Para el precalentamiento del aire, se hará uso de una cámara de calentamiento, la cual en si es una cámara de combustión sencilla por su configuración, esta consta de una cámara de chapa metálica revestida internamente con ladrillo refractario, un quemador industrial y un venterol.

4.3.1.1 Análisis del proceso de combustión

El calentamiento del aire que ingresa al intercambiador de calor se lo realiza con gas natural, la combustión de este combustible se lo analiza con la suposición de que la combustión es completa, esto quiere decir que todo el carbono en el combustible se transforma en CO_2 , y todo el hidrógeno en H_2O , es decir todos los componentes combustibles del combustible se queman por completo durante el proceso de combustión completa.

La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa del combustible se la conoce como aire estequiométrico o teórico, de manera que cuando un combustible se quema por completo con aire teórico, no estará presente el oxígeno sin combinar el producto de los gases. En el proceso de combustión ideal durante el cual el combustible (GLP) se quema se lo conoce

como combustión estequiométrica o teórica, para el caso del gas natural la combustión teórica es:



4.3.1.2 Determinación de la temperatura de los productos de combustión y relación aire-combustible

La cámara de combustión usada en el presente diseño es adiabática de flujo estable donde entra GLP a 25°C y 0.72 atm. Se quema con 100% de exceso de aire que entra a 25°C y 0.72 atm. La $T_o = 298 \text{ K}$ y los productos salen de la cámara de combustión a una presión de 0.72 atm.

Suposiciones:

- 1.- Proceso de combustión de flujo estable.
- 2.- Cámara de combustión adiabática.
- 3.- El aire y los gases de combustión se los considera como ideales.
- 4.- Cambios de energía cinética y potencial son despreciables.
- 5.- La combustión es completa.

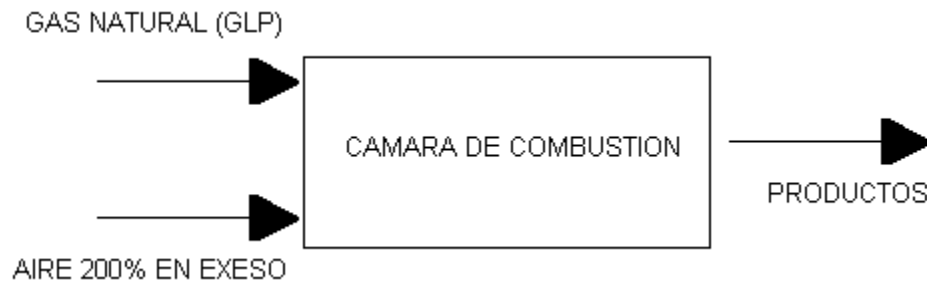
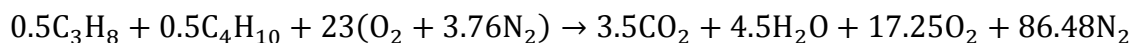


Figura. 4.14. Esquema del proceso de combustión

4.3.1.3 Temperatura de los productos de combustión

La ecuación balanceada para el proceso de combustión completo con 200% de exceso de aire es:



En condiciones de flujo estable, la temperatura de la flama adiabática se determina a partir de $H_{\text{prod}} = H_{\text{react}}$, la cual se deduce a:

$$\sum N_p(\dot{h}_f + \bar{h} - \dot{h})_p = \sum N_r \dot{h}_{fr} = (N\dot{h}_f)_{\text{CH}_4} \quad (4.56)$$

Ya que todos los reactivos están en el estado de referencia estándar y $\dot{h}_f = 0$ para el O_2 y N_2 . Suponiendo comportamiento de gas ideal para el aire y para los productos, los valores de \dot{h}_f y h de diversos componentes a 298 K son:

Tabla 4. 7. Entalpias de los productos y reactantes

Sustancia	\dot{h}_f KJ/Kmol	\bar{h}_{298K} KJ/Kmol
C_3H_8 (g)	-103850	-----
C_4H_{10} (g)	-126150	-----
O_2	0	8682
N_2	0	8669
H_2O (g)	-241820	9904
CO_2	-393520	9364

Fuente: Termodinámica, Yunus Cengel

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge.

Al remplazar se tiene.

$$(3.5 \text{ Kmol CO}_2)[(-393520 + \bar{h}_{\text{CO}_2} - 9364)\text{KJ/Kmol CO}_2]$$

$$+(4.5 \text{ Kmol H}_2\text{O})[(-241820 + \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} - 9904)\text{KJ/Kmol H}_2\text{O}]$$

$$\begin{aligned}
&+(86.48 \text{ Kmol N}_2)[(0 + \bar{h}_{\text{N}_2} - 8669)\text{KJ/Kmol N}_2] \\
&+(17.25 \text{ Kmol O}_2)[(0 + \bar{h}_{\text{O}_2} - 8682)\text{KJ/Kmol O}_2] \\
&= (0.5 \text{ Kmol C}_3 \text{ H}_8)(-103850\text{KJ/KmolC}_3 \text{ H}_8) \\
&+(0.5 \text{ Kmol C}_4 \text{ H}_{10})(-126150\text{KJ/KmolC}_4 \text{ H}_{10})
\end{aligned}$$

Que produce

$$3.5\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.5\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 5.75\bar{h}_{\text{O}_2} + 43.24\bar{h}_{\text{N}_2} = 3327311.62 \text{ KJ}$$

La temperatura de los productos es la única incógnita, ya que $h = h(T)$ para gases ideales. Por consiguiente se empleará una solución de ensayo y error para determinar la temperatura de los productos.

Dividiendo el lado derecho de la ecuación por el número total de moles, tendríamos:

$$\frac{3327311.62}{3.5 + 4.5 + 17.25 + 86.48} = 29779.93 \text{ [KJ/Kmol]}$$

Este valor de entalpia corresponderá a aproximadamente 989.3 K para el N_2 , 959.3 K para O_2 , 753 K para el CO_2 y 920 K para el H_2O . Como se ve que la mayoría de los moles son de N_2 , entonces la temperatura de los productos se acercará a esta, por lo que por ensayo y error, se encuentra que la temperatura de los productos es:

$$T_{\text{prod}} = 973 \text{ [K]}$$

En el Anexo E3 se presentan las propiedades de los combustibles: propano y butano comercial.

4.3.1.4 Relación aire-combustible

La relación aire-combustible para este proceso de combustión es

$$AC = \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{combustible}}} \quad (4.57)$$

$$AC = \frac{(NM)_{\text{aire}}}{(NM)_{\text{C}} + (NM)_{\text{H}_2}}$$

$$AC = \frac{(34.5 * 4.76 \text{Kmol})(29 \text{Kg/Kmol})}{(7 \text{Kmol})(12 \text{Kg/Kmol}) + (9 \text{Kmol})(2 \text{Kg/Kmol})}$$

$$AC = \frac{4762.38}{102}$$

$$AC = 46.69 \text{ [Kg aire/Kg combustible]}$$

4.3.1.5 Flujo de masa del combustible y aire

El caudal másico descargado por un orificio de sección s en m^2 , está dado por:

$$\dot{m}_{\text{comb}} = \Phi * s * \sqrt{2P_e \rho_g} \quad (4.58)$$

Donde:

\dot{m}_{comb} = Flujo másico de combustible

Φ = coeficiente de descarga, para agujeros de circulares en quemadores industriales es 1

P_e = Presión efectiva

ρ_g = densidad del GLP (1.91 Kg/m^3)

$$s = \Pi * r^2$$

Para un quemador industrial de 2 mm de diámetro del inyector se tiene:

$$s = \Pi * 0.001^2$$

$$s = 3.14 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$P_e = P_o - P_a \quad (4.59)$$

$$P_e = P_{\text{cilindro}} + P_{\text{atm}} - P_a$$

Donde

P_{cilindro} = presión en el cilindro de gas, la cual está estimada en 10 atm

P_e = Presión efectiva

P_{atm} = Presión atmosférica, para las condiciones de Quito es 0.72 atm.

P_a = Presión de descarga, la cual es alrededor de 2 atm

ρ_g = densidad del GLP (1.91 Kg/m³)

$$P_e = 10 + 0.72 - 2$$

$$P_e = 8.72 \text{ [atm]} = 90097.43 \text{ [Kg/m}^2\text{]}$$

Remplazando datos en (4.58) se tiene

$$\dot{m}_{\text{comb}} = 1 * 3.14 \times 10^{-6} * \sqrt{2 * 90097.43 * 1.91}$$

$$\dot{m}_{\text{comb}} = 1.84 \times 10^{-3} \text{ [Kg/s]}$$

Flujo másico de aire requerido para el proceso es

$$\dot{m}_{\text{aire}} = (AC)(\dot{m}_{\text{comb}}) \quad (4.60)$$

Considerando que el flujo másico del combustible es de 1.84×10^{-3} Kg/s

$$\dot{m}_{\text{aire}} = 46.69 * 1.84 \times 10^{-3}$$

$$\dot{m}_{\text{aire}} = 0.086 \text{ [Kg/s]}$$

4.3.1.6 Longitud de la cámara de calentamiento.¹⁵

Para saber la longitud de la cámara de calentamiento hay que determinar el chorro gas-aire descargado a la atmósfera, el cual adopta una forma cónica a partir del inyector, con un ángulo comprendido entre 18 y 20°, aumentando su caudal másico por incorporación del gas del ambiente y perdiendo velocidad a medida que va aumentando la distancia.

En la figura 4.15, se distinguen tres zonas: en la primera existe un núcleo central de gas descargado, el cual va desapareciendo por la dilución del chorro, su longitud se extiende de 4 a 5 diámetros de inyector. La segunda es una zona de transición, hasta aproximadamente los 8 diámetros, a partir de la cual se inicia la zona de semejanza, que puede prolongarse hasta los 100 diámetros.

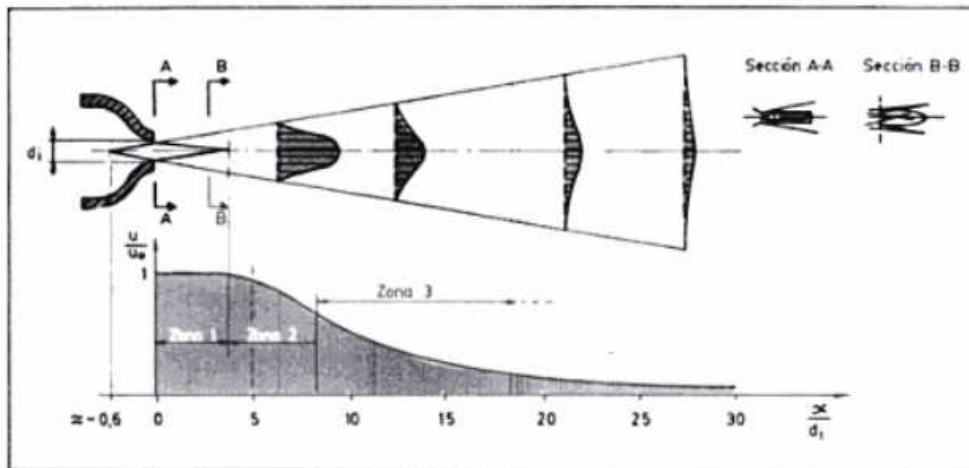


Figura 4.15. Zonas de chorro libre turbulento para una mezcla gas-aire

Una vez que el chorro libre penetra en el tubo de mezcla (cámara de calentamiento de aire) y se induce el gas ambiente en la embocadura del tubo. Se

¹⁵ Combustión y quemadores, Manuel Marquez, Ed. Marcobombo, España, 1994, pag 64

requiere una longitud de 6 a 8 diámetros del tubo de mezcla para conseguir homogeneidad de la misma.

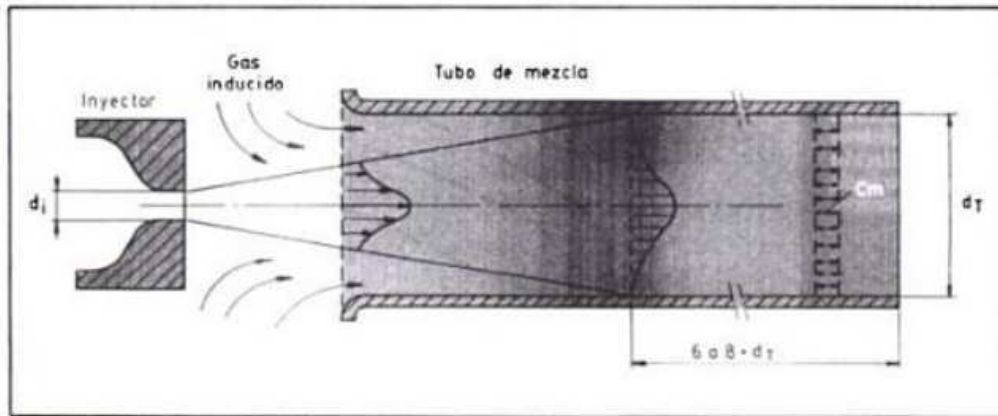


Figura 4.16. Longitud del tubo de mezcla en consideración al diámetro del ducto.

Con esta consideración y sabiendo que el tubo de mezcla tiene una sección circular de 11 cm de diámetro, la longitud de la cámara de calentamiento es:

$$L = 6 \cdot d_d$$

$$L = 6 \cdot 11$$

$$L = 66 \text{ cm}$$

4.3.1.7 Selección del ventilador centrífugo para la cámara de calentamiento

Es necesario determinar la potencia del ventilador centrífugo que se utiliza para el calentamiento del aire, para lo cual se determinará la potencia necesaria del mismo por intermedio del caudal requerido.

$$P_t = \frac{h \cdot Q \cdot \rho_{\text{aire}}}{75 \cdot 60} \quad (4.61)^{16}$$

Donde:

P_t = Potencia teórica del ventilador (HP)

¹⁶ LATORRE RICAURTE.F, Diseño y Construcción de un cubilote convencional, EPN.

h = Presión del aire (cm de agua)

Q = Caudal del aire del ventilador (m^3/min)

ρ_{aire} = Densidad del aire (Kg/m^3)

$$Q = \frac{\dot{m}_{\text{aire}}}{\rho_{\text{aire}}} \quad (4.62)$$

$$Q = \frac{0.086}{1.26}$$

$$Q = 0.068 [\text{m}^3/\text{s}] = 4.08 [\text{m}^3/\text{min}]$$

$$P_t = \frac{h * Q * \rho_{\text{aire}} * 1000}{75 * 60 * 100} \quad (4.63)$$

$$P_t = \frac{40 * 4.08 * 1,23 * 1000}{75 * 60 * 100}$$

$$P_t = 0.45 [\text{HP}]$$

Debido las perdidas en el ducto de mezcla de aire y gas en la cámara de calentamiento, la potencia del ventilador centrífugo se considera de 0.5 HP.

4.3.1.8 Espesor del refractario para la cámara de calentamiento de aire

Para determinar el espesor de refractario del interior de la cámara de calentamiento se hace un análisis de transferencia de calor, con la consideración que la distribución de temperaturas en cada frente se da a manera de una pared plana compuesta.

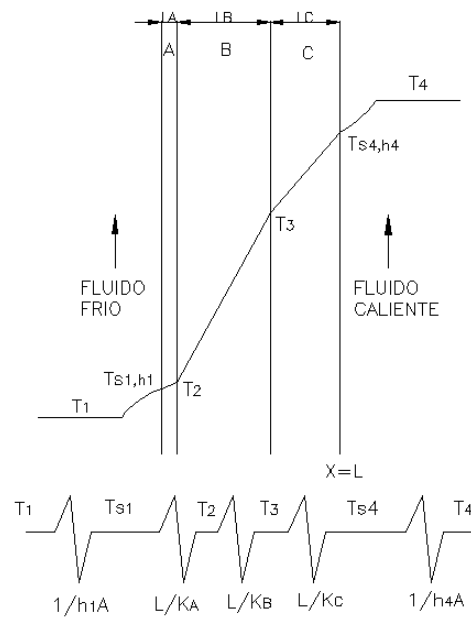


Figura 4.17. Distribución de temperaturas y circuito térmico equivalente a través de una de las paredes de la cámara de calentamiento.

La transferencia de calor para la pared compuesta está determinada por la ecuación (4.50):

$$q_x = \frac{(T_1 - T_3)}{\left[\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{K_A A} + \frac{L_B}{K_B A} + \frac{L_C}{K_C A} + \frac{1}{h_4 A} \right]} \quad (4.64)$$

De manera similar, la transferencia de calor se relaciona con la diferencia de temperaturas y la resistencia asociada con cada elemento y está dada por la ecuación (4.42).

$$q_x = \frac{T_1 - T_{s1}}{\frac{1}{h_1 A}} = \frac{T_{s1} - T_2}{\frac{L_A}{K_A A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L_B}{K_B A}} = \frac{T_3 - T_{s4}}{\frac{L_C}{K_C A}} = \frac{T_{s4} - T_4}{\frac{1}{h_4 A}} \quad (4.65)$$

Donde los coeficientes de convección, conductividad térmica y espesores para la chapa metálica y capa de refractario, así como las temperaturas interna y externa de la cámara de calentamiento son:

$$h_4 = 3.06 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$K_A = 43 \text{ [W/mK]}$$

$$K_B = 1.2 \text{ [W/mK]}$$

$$K_C = 0.04 \text{ [W/mK]}$$

$$L_A = 0.3 \text{ [cm]}$$

$$L_B = 7.0 \text{ [cm]}$$

$$L_C = 5.0 \text{ [cm]}$$

$$T_1 = 700 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_4 = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Donde:

h_3 = Coeficiente de convección del aire ambiente.

K_A = Conductividad térmica de la chapa metálica (Acero A36)

K_B = Conductividad térmica del ladrillo refractario U32

K_C = Conductividad térmica del refractario de las paredes (Concrax 1700)

L_A = Espesor de la chapa metálica

L_B = Espesor de la capa de ladrillo refractario

L_C = Espesor de la capa de Concrax 1700

T_1 = Temperatura de los gases de combustión

T_3 = Temperatura del aire externo

El área de la pared lateral de la cámara de combustión viene dada por la ecuación (4.40)

$$A_{cc} = L \cdot H \quad (4.66)$$

$$A_{cc} = 0.66 \cdot 0.11$$

$$A_{cc} = 0.073 \text{ [m}^2\text{]}$$

El coeficiente de convección h_o .

$$\rho @ T = 700 \text{ }^\circ\text{C} = 0.4975 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$\mu @ T = 700 \text{ }^\circ\text{C} = 338.8 \times 10^{-7} \text{ [Ns/m}^2\text{]}$$

$$Pr @ T = 700 \text{ }^\circ\text{C} = 0.695$$

$$K @ T = 700 \text{ }^\circ\text{C} = 52.4 \times 10^{-3} \text{ [W/mK]}$$

$$Re = \frac{4\dot{m}_h}{\pi D_i \mu}$$

$$\dot{m}_h = 0.088 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$Re = \frac{4 * 0.088}{\pi * 0.11 * 338.8 \times 10^{-7}}$$

$$Re = 30064.69$$

Como el número de Reynolds es mayor a 2200, el flujo es turbulento, por lo tanto:

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{\frac{4}{5}} Pr^{0.4}$$

$$Nu_D = 0.023 * 30064.69^{\frac{4}{5}} * 0.695^{0.4}$$

$$Nu_D = 76.03$$

$$h_o = Nu_D \frac{k}{D_i}$$

$$h_o = 76.03 * \frac{52.4 \times 10^{-3}}{0.11}$$

$$h_o = 36.22 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Remplazando valores en la Ec(4.65) se encuentra que la transferencia de calor es:

$$q_x = \frac{(T_1 - T_3)}{\left[\frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{K_A A} + \frac{L_B}{K_B A} + \frac{L_C}{K_C A} + \frac{1}{h_4 A} \right]}$$

$$q_x = \frac{(700 - 20)}{\left[\frac{1}{24.76 * 0.073} + \frac{3 \times 10^{-3}}{43 * 0.073} + \frac{0.07}{1.2 * 0.073} + \frac{0.05}{0.04 * 0.073} + \frac{1}{3.06 * 0.073} \right]}$$

$$q_x = 29.62 \text{ [W]}$$

Con la tasa de transferencia de calor a través de las paredes del calentador, se determinan cada una de las temperaturas.

$$T_{S4} = T_4 - q_x * \frac{1}{h_4 A}$$

$$T_{S4} = 973 - \frac{29.62}{24.76 * 0.073}$$

$$T_{S4} = 956.61 \text{ [K]}$$

$$T_3 = T_{S4} - q_x * \frac{L_C}{K_C A}$$

$$T_3 = 956.61 - \frac{29.62 * 0.063}{0.04 * 0.073}$$

$$T_3 = 317.55 \text{ [K]}$$

$$T_2 = T_3 - q_x * \frac{L_B}{K_B A}$$

$$T_2 = 317.55 - \frac{29.62 * 0.07}{1.2 * 0.073}$$

$$T_2 = 293.88 \text{ [K]}$$

$$T_{S1} = T_2 - q_x * \frac{L_A}{K_A A}$$

$$T_{S1} = 293.88 - \frac{29.62 * 3 \times 10^{-3}}{43 * 0.073}$$

$$T_{S1} = 293.85 \text{ [K]}$$

Con la temperatura de 293.85 K en la pared externa de la cámara de calentamiento de aire, esta se halla totalmente aislada, por lo que las medidas de la misma son las que se especifican en la figura 4.18

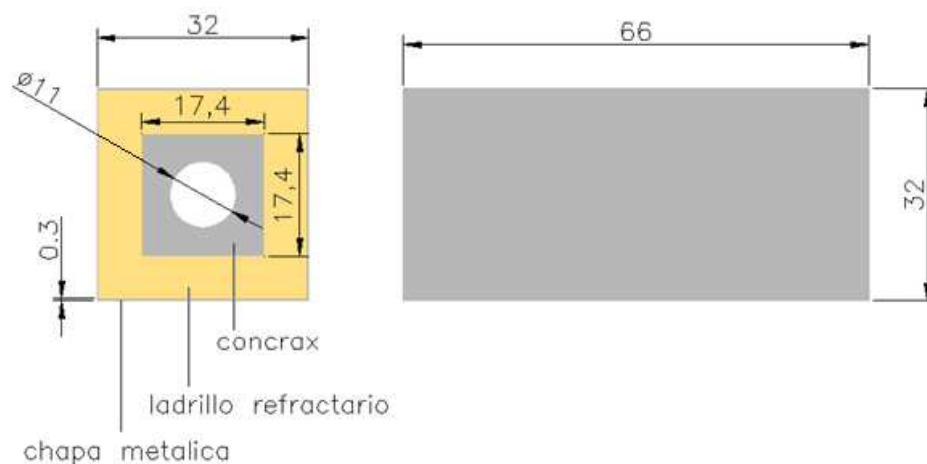


Figura 4.18. Dimensiones de la cámara de calentamiento (medidas en cm)

4.3.2 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

El intercambiador de calor utilizado en el presente diseño es de carcasa con un paso de tubos a contraflujo, esta configuración mantiene la transferencia de calor entre las partes más calientes de los dos fluidos en un extremo, así como entre las partes más frías en el otro. Hay que tener presente que para esta

configuración la temperatura de salida del fluido frío puede exceder la temperatura de salida del fluido caliente.

En el diseño se usara el método de diferencia media logarítmica de temperaturas.

Parámetros de diseño.

$$D_i = 3.2 \text{ [cm]}; \text{ cédula N}^\circ 4$$

$$N = 30$$

$$Q_c = 8.82 \text{ m}^3/\text{min} = 0.147 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$\rho_{\text{aire}} = 1.26 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$\dot{m}_c = \rho_{\text{aire}} * Q$$

$$\dot{m}_c = 1.26 * 0.147$$

$$\dot{m}_c = 0.185 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\dot{m}_h = 0.088 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$T_{ci} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{co} = 300 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$T_{hi} = 700 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h_o = 36.22 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Donde:

D_i = diámetro interno de los tubos

L = longitud del intercambiador de calor

Q_c = caudal másico del aire frío

ρ_{aire} = densidad del aire a la temperatura ambiente ($T = 293 \text{ K}$)

\dot{m}_c = flujo de masa del aire frío

\dot{m}_h = flujo de masa del fluido caliente

T_{ci} = temperatura de entrada del aire frío

T_{co} = temperatura de salida del aire frío

T_{hi} = temperatura de entrada del aire caliente

T_{ho} = temperatura de salida del aire caliente

h_o = coeficiente de convección del aire caliente

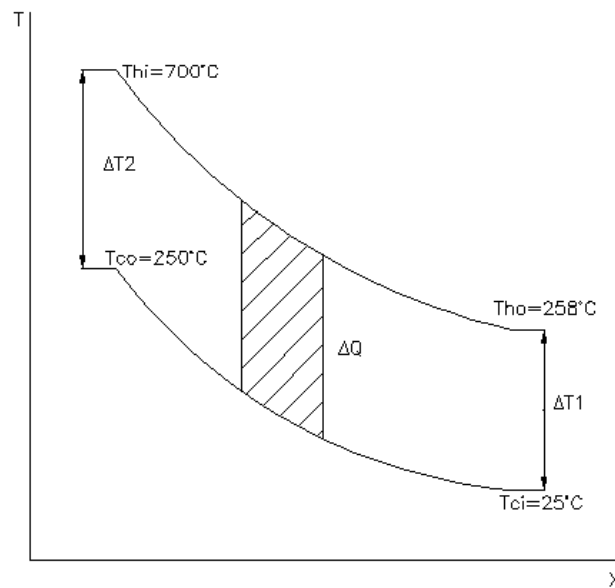


Figura 4.19. Distribución de temperaturas para el intercambiador de calor a contraflujo

Propiedades del aire, Anexo A6 (Incropera, Fundamentos de transferencia de calor)

$$\bar{T}_c = 435.5 \text{ K}, C_p = 1.015 \text{ KJ/KgK}, \mu = 234.43 \times 10^{-7} \text{ Ns/m}^2, K = 34.54 \times 10^{-3} \text{ W/mK}, \\ Pr = 0.6892$$

$$\bar{T}_h = 669.65 \text{ K}; C_p = 1.081 \text{ KJ/KgK}$$

La transferencia de calor que se requiere puede obtenerse a partir del balance global de energía para el fluido frío, con la relación:

$$q = \dot{m}_c * C_p * c * (T_{co} - T_{ci}) \quad (4.67)$$

$$q = 0.185 * 1015 * (250 - 25)$$

$$q = 42249.38 \text{ [W]}$$

Mediante el método interactivo de prueba y error se determina que la temperatura de salida del fluido caliente del intercambiador de calor es de alrededor de 258 C.

Para hallar la longitud del intercambiador de calor se hará uso de la siguiente expresión:

$$q = UA\Delta T_{ml} \quad (4.68)$$

Sabemos que:

$$A = N\pi d_i L \quad (4.69)$$

Para hallar la diferencia media logarítmica de temperaturas se tiene la siguiente expresión:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln[\Delta T_1/\Delta T_2]} \quad (4.70)$$

Donde

$$\Delta T_1 = (T_{hi} - T_{co})$$

$$\Delta T_2 = (T_{ho} - T_{ci})$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(700 - 250) - (258 - 25)}{\ln[(700 - 250)/(258 - 25)]}$$

$$\Delta T_{ml} = 329.79 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Para el flujo de aire frio tenemos:

$$Re = \frac{4\dot{m}_{1c}}{\pi D_i \mu} \quad (4.71)$$

$$\dot{m}_{1c} = \frac{\dot{m}_c}{N}$$

$$\dot{m}_{1c} = \frac{0.185}{30}$$

$$\dot{m}_{1c} = 6.17 \times 10^{-3} \text{ [Kg/s]}$$

$$Re = \frac{4 * 6.17 \times 10^{-3}}{\pi * 0.032 * 234.43 \times 10^{-7}}$$

$$Re = 10472.059$$

Como el número de Reynolds es mayor a 2200, el flujo es turbulento, por lo tanto:

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{\frac{4}{5}} Pr^{0.4} \quad (4.72)$$

$$Nu_D = 0.023 * 10472.059^{\frac{4}{5}} * 0.6892^{0.4}$$

$$Nu_D = 32.59$$

$$h_i = Nu_D \frac{k}{D_i} \quad (4.73)$$

$$h_i = 32.23 * \frac{34.54 \times 10^{-3}}{0.032}$$

$$h_i = 34.79 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

El coeficiente global de transferencia de calor es:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (4.74)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{34.79} + \frac{1}{36.22}}$$

$$U = 17.54 [W/m^2C]$$

Se recalcula el valor de U, considerando que el factor de suciedad es $R_f = 0.0004$, mediante la relación:

$$R_f = \frac{1}{U_{limpio}} + \frac{1}{U_{sucio}} \quad (4.75)$$

$$U_{sucio} = \frac{U_{limpio}}{R_f U_{limpio} + 1}$$

$$U_{sucio} = \frac{17.54}{0.0004 * 17.54 + 1}$$

$$U_{sucio} = 17.42 [W/m^2C]$$

De la ecuación de flujo se sigue que:

$$L = \frac{q}{NU\pi D_i \Delta T_{ml}}$$

$$L = \frac{42249.38}{30 * 17.42 * \pi * 0.032 * 329.79}$$

$$L = 2.4 [m]$$

Entonces se concluye que el intercambiador de calor tiene las siguientes características:

$$L = 2.4 \text{ [m]}$$

$$N = 30$$

$$d_e = 3.2 \text{ [cm]}$$

$$d_i = 3.0 \text{ [cm]}$$

Nº de cedula 4

En el Anexo B4 se presentan las características de tubos de vapor para diferentes dimensiones.

4.3.3 AISLAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Con el fin de evitar los consumos energéticos superfluos, el intercambiador de calor dispondrá de un aislamiento térmico para reducir las pérdidas de energía, este aislamiento se efectúa con las exigencias de carácter mínimas, entendiéndose que en cualquier caso las pérdidas energéticas globales horarias no superaran lo indicado en la instrucción técnica.

Cuando se trabaja con lana de vidrio (conductividad térmica de $0.04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) como aislamiento y para instalaciones que contengan fluidos mayores a los 40°C , se dispondrá de un aislamiento térmico equivalente a los espesores que se indica en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Espesor mínimo del aislamiento para el intercambiador de calor

Diámetro D de la carcasa en milímetros	Temperatura del fluido en °C			
	45-65	66-100	101-150	>150
$D \leq 32$	20	20	30	40
$32 < D \leq 50$	20	30	40	40
$50 < D \leq 80$	30	30	40	50
$80 < D \leq 125$	30	40	50	50
$125 < D \leq 150$	30	40	50	60
$150 < D \leq 200$	40	50	60	70
$200 < D \leq 250$	50	50	60	80
$250 < D \leq 300$	50	60	70	90
Espesor mínimo del aislamiento en mm				

Fuente: Enciclopedia de la Construcción

Elaborado por: Medina Julio, Taco Jorge.

De la tabla 4.8 se toma un espesor de aislamiento (lana de vidrio) igual a 80 mm.

La aplicación del material aislante deberá cumplir las exigencias que a continuación se indican:

- Antes de su colocación deberá quitarse de la superficie aislada toda materia aislante, herrumbre, etc.
- Se dispondrán de dos capas de pintura antioxidante u otra protección similar en todos los elementos metálicos que no están debidamente protegidos contra la oxidación.
- Cuando el espesor del aislamiento exigido requiere varias capas de este, se procurará que las juntas longitudinales y transversales de las distintas capas no coincidan y cada capa quede firmemente fijada.
- El aislamiento irá protegido con los elementos necesarios para que no se deteriore en el transcurso del tiempo, en nuestro caso haremos uso de una fina lamina de aluminio.
- Se dispondrá de amplios solares para evitar pasos de humedad al aislante y de manera que no se deteriore.
- Las bridas, se las aislara preferentemente con laminas aislantes desmontables entre estas, y sujetadas con pernos, con el fin de evitar fugas a través de las mismas.

4.3.4 DISEÑO DE LAS TAPAS Y BRIDAS DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Tapas: Las tapas del intercambiador de calor son de forma cónica, se toma esta configuración debido al cambio de diámetro que existe entre la sección transversal de la carcasa del intercambiador y las secciones transversales del ducto de entrada de aire al horno y la toma de aire del venterol principal.

La ecuación 4.76, determina la presión máxima que soporta una tapa de forma conica.¹⁷

$$P = \frac{(2t\cos\alpha)SE}{D + 0.6(2t\cos\alpha)} \quad (4.76)$$

Donde:

α = (Angulo de vértice /2) $\leq 30^\circ$

D = Diámetro interior mayor del cono (mm)

E = Eficiencia de las soldaduras

P = Presión de diseño (KPa)

S = Esfuerzo máximo permisible (KPa)

t = Espesor mínimo requerido en la tapa (mm)

Datos:

$\alpha = 17.5^\circ$

D = 300 [mm]

E = 0.60

S = 240066.8 [KPa]

t = 4 [mm]

$$P = \frac{(2 * 4 * \cos (17.5))240066.8 * 0.6}{300 + 0.6(2 * 4 * \cos (17.5))}$$

$$P = 3608.2 \text{ [KPa]}$$

La presión a la que está sometida las tapas del intercambiador de calor es de 981 Pa (10mm H₂O), la presión calculada es mayor, entonces se toma un valor de 4

¹⁷ LEON JUAN, Diseño y Calculo de Recipientes sujetos a Presión, España, 2001

mm de la chapa metálica usada para las tapas del intercambiador ya que estas deben proporcionar la suficiente rigidez a todo el conjunto del intercambiador.

Bridas: Todas las bridas utilizadas en el presente diseño son fijas, se las denomina así ya que deja de ser estanca durante el servicio, se la consolida con pernos. Por su configuración la brida soporta esfuerzos asimétricos y a estos esfuerzos se añade la acción de las dilataciones. Pero estos fenómenos no siempre pueden traducirse en números; de modo que, según parece, nunca estaremos en condiciones de calcular con exactitud una brida en lo que se refiere a su solidez y estanquidad.

La brida fija va unida firmemente al tubo, esta brida actúa sobre el tubo y viceversa, por lo que las superficies entre brida y tubo están animadas de los mismos movimientos, es decir de los mismos desplazamientos y de las mismas rotaciones.

Las tensiones exteriores y los esfuerzos diversos deben ejercerse de tal forma que desplazamientos y rotaciones sean los mismos para la brida y el tubo al que está unida, lo que permite determinar las reacciones estáticas mutuas.

El método de cálculo que se utilizara en el presente diseño será el propuesto por Wiederkehr, que según hemos podido observar da buenos resultados.¹⁸

¹⁸ GREGORING R, Enciclopedia de Tecnología Química, Urmo, España, 1979

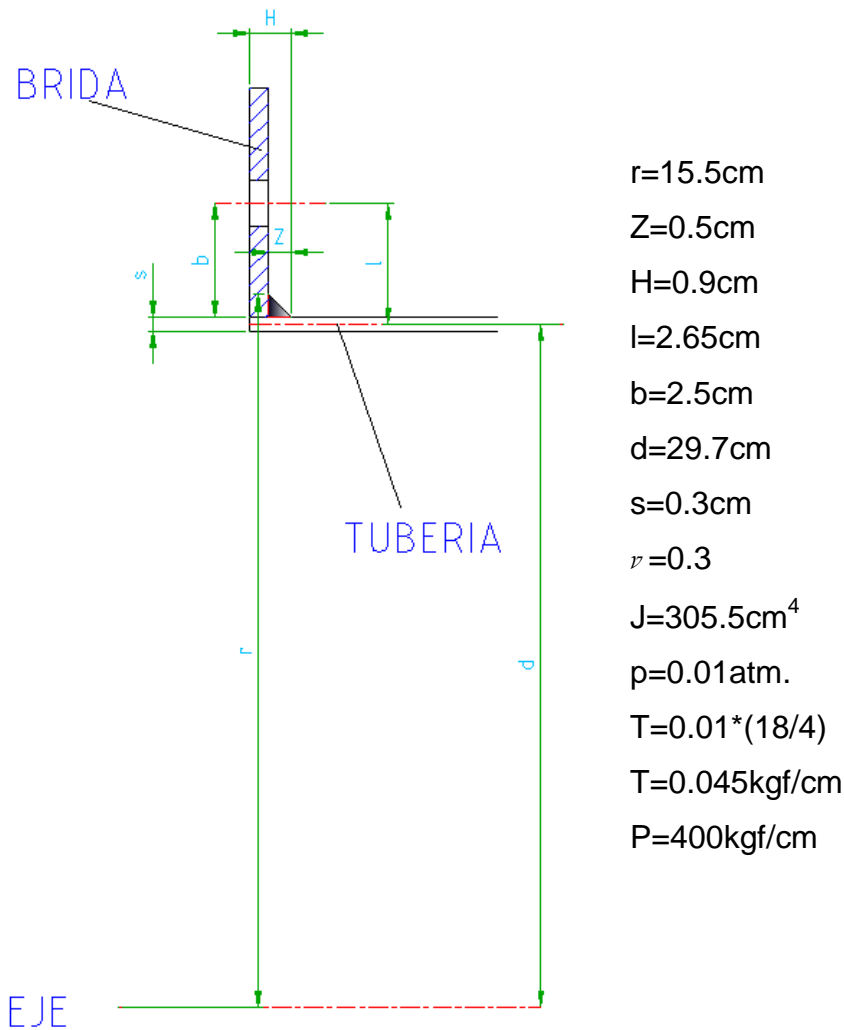


Figura 4.20. Ensamble brida-carcasa del intercambiador

Se calcula las incógnitas M y S aplicando las ecuaciones de Wiederkeher:

$$-r^2 \frac{J_0}{J} M + r^2 \frac{J_0}{J} ZS - r^2 \frac{J_0}{J} lT - r^2 \frac{J_0}{J} bP - r^2 \frac{J_0}{J} pH \left(Z - \frac{H}{2} \right) = xM + \frac{x^2}{2} S; \quad (4.77)$$

$$\begin{aligned}
 & r^2 \frac{J_0}{J} ZM - r^2 J_0 \left[\frac{1}{F} + \frac{Z^2}{J} \right] S + r^2 \frac{J_0}{J} ZlT + r^2 \frac{J_0}{J} ZbPr^2 + \frac{J_0}{J} ZpH \left(Z - \frac{H}{2} \right) + r^2 \frac{J_0}{F} pH = \\
 & = \frac{x^2}{2} M + \frac{x^3}{2} S + \frac{\nu}{d} * \frac{x^4}{2} T + \frac{x^4}{4} p
 \end{aligned} \quad (4.78)$$

$$J_0 = \frac{s^3}{12(1-v^2)} = \frac{(0.3)^3}{12[1-(0.3)^2]} = 2.31 * 10^{-3} \text{ cm}^4;$$

$$x = 0.55\sqrt{d * s} = 0.55\sqrt{29.7 * 0.3} = 1.642 \text{ cm};$$

$$Z - \frac{H}{2} = 0.5 - \frac{0.9}{2} = 0.05 \text{ cm};$$

$$F = 43.3 \text{ cm}^2;$$

$$\frac{x^2}{2} = \frac{(1.642)^2}{2} = 1.35 \text{ cm}^2;$$

$$\frac{x^3}{2} = \frac{(1.642)^3}{2} = 2.21 \text{ cm}^3;$$

$$\frac{x^4}{4} = \frac{(1.642)^4}{4} = 1.82 \text{ cm}^4;$$

$$r^2 \frac{J_0}{J} Z = (15.5)^2 * \frac{2.31 * 10^{-3}}{305.5} * 0.5 = 9.083 * 10^{-4} \text{ cm}^2;$$

$$r^2 \frac{J_0}{J} lT = (15.5)^2 * \frac{2.31 * 10^{-3}}{305.5} * 2.65 * 0.045 = 2.17 * 10^{-4} \text{ kgf.cm};$$

$$r^2 \frac{J_0}{J} bP = (15.5)^2 * \frac{2.31 * 10^{-3}}{305.5} * 2.5 * 400 = 1.82 \text{ kgf.cm};$$

$$r^2 \frac{J_0}{J} pH \left(Z - \frac{H}{2} \right) = (15.5)^2 * \frac{2.31 * 10^{-3}}{305.5} * 0.01 * 0.9 \left(0.5 - \frac{0.9}{2} \right) = 8.19 * 10^{-7} \text{ kgf.cm};$$

$$r^2 J_0 \left[\frac{1}{F} + \frac{Z^2}{J} \right] = (15.5)^2 * 2.31 * 10^{-3} * \left[\frac{1}{43.3} + \frac{(0.5)^2}{305.5} \right] = 0.0132 \text{ cm}^3;$$

$$r^2 \frac{J_0}{J} ZlT = (15.5)^2 * \frac{2.31 * 10^{-3}}{305.5} * 0.5 * 2.65 * 0.045 = 1.085 * 10^{-4} \text{ kgf.cm}^2;$$

$$r^2 \frac{J_0}{J} Zb = (15.5)^2 * \frac{2.31 * 10^{-3}}{305.5} * 0.5 * 2.5 = 2.275 * 10^{-3} \text{ cm}^3;$$

$$r^2 \frac{J_0}{J} ZbP = (15.5)^2 * \frac{2.31 * 10^{-3}}{305.5} * 0.5 * 400 = 0.91 \text{ kgf.cm}^2;$$

$$r^2 \frac{J_0}{J} ZpH \left(Z - \frac{H}{2} \right) = 4.095 * 10^{-7} \text{ kgf.cm}^2;$$

$$r^2 \frac{J_0}{F} pH = 1.15 * 10^{-4} \text{ kgf.cm}^2;$$

$$\frac{v}{d} * \frac{x^4}{2} T = 1.652 * 10^{-3} \text{ kgf.cm}^3;$$

Al remplazar los valores en las ecuaciones (4.77) y (4.78) de Wiederkeher se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-1.82 * 10^{-3} M + 9.08 * 10^{-4} S - 2.17 * 10^{-4} - 1.82 - 8.19 * 10^{-7} = 1.64M + 1.35S;$$

$$9.08 * 10^{-4} M - 0.013S + 1.085 * 10^{-4} + 0.91 + 4.095 * 10^{-7} + 1.15 * 10^{-4} = 1.35M + 2.21S$$

$$-1.652 * 10^{-3} + 0.0182;$$

De donde se deduce

$$S = 1.431$$

$$M = -2.28$$

Ángulo de giro

$$\alpha = \frac{xM + \frac{x^2}{2}S}{J_0E} \quad (4.79)$$

$$\alpha = \frac{(1.642)(-2.28) + (1.35)(1.431)}{2.31 * 10^{-3}(2.1 * 10^6)} = -0.00037 \text{ rad.}$$

La torsión máxima de la brida está limitada de tal forma que el ángulo de giro no rebase los 0.003 radianes, y para un espesor de 4 mm se tiene:

$$-0.00037 \text{ rad.} < 0.003 \text{ rad.}$$

Se aprecia que el valor obtenido es muy inferior al valor admisible 0.003. La brida, por tanto, se ha dimensionado ampliamente.

En el Anexo I se muestran diferentes tipos de bridas y empaques.

4.4 DISEÑO DE LOS SOPORTES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR Y CÁMARA DE CALENTAMIENTO DE AIRE

Tanto para el dimensionamiento del soporte del intercambiador de calor como para el soporte de la cámara de calentamiento de aire se hará uso del software SAP V12, las fuerzas involucradas en los dos soportes se las considera distribuidas; se presentan los principales diagramas de momentos flectores y fuerzas cortantes para las dos configuraciones establecidas.

4.4.1 DISEÑO DEL SOPORTE DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

El soporte del intercambiador de calor tiene la configuración establecida en la figura 4.21, este soporta la carga del intercambiador y del venterol de soplado principal. El peso de estos dos elementos se los registro en su sitio de construcción y montaje por medio de balanza, teniendo que el peso del intercambiador de calor es de alrededor de 110 Kgf, y el del venterol 20 Kgf, las mismas que se hallan distribuidas de forma uniforme.

Los perfiles idóneos de acuerdo al catalogo Dipac (Ver Anexo B) que se utilizaron para la simulación y posteriormente en la construcción del soporte son:

Canal en U de 80*40*4 [mm] para las patas

Canal en U de 50*30*3 para el marco superior del soporte

Angulo en L doblado de 30*30*3 para los largueros y marco inferior y marco del del venterol.

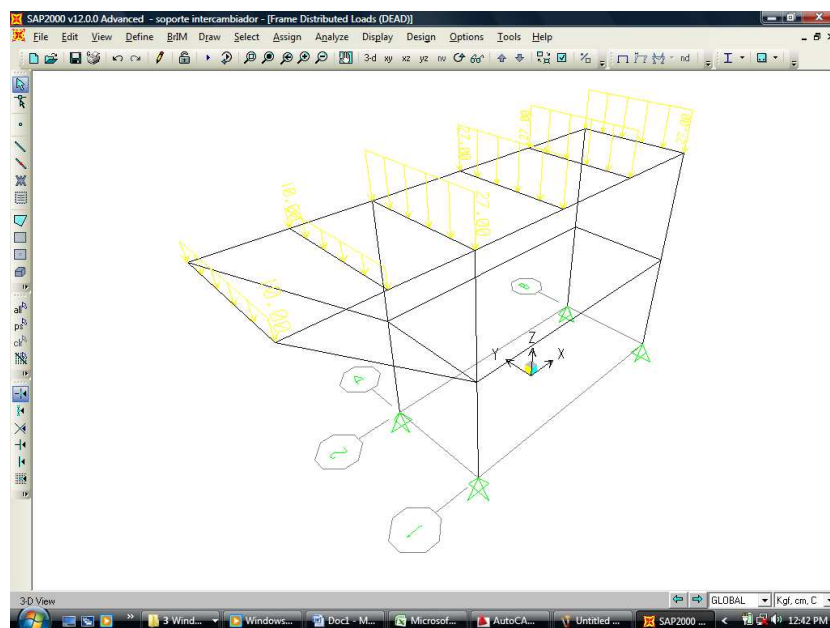


Figura 4.21. Distribución de fuerzas en el soporte del intercambiador de calor

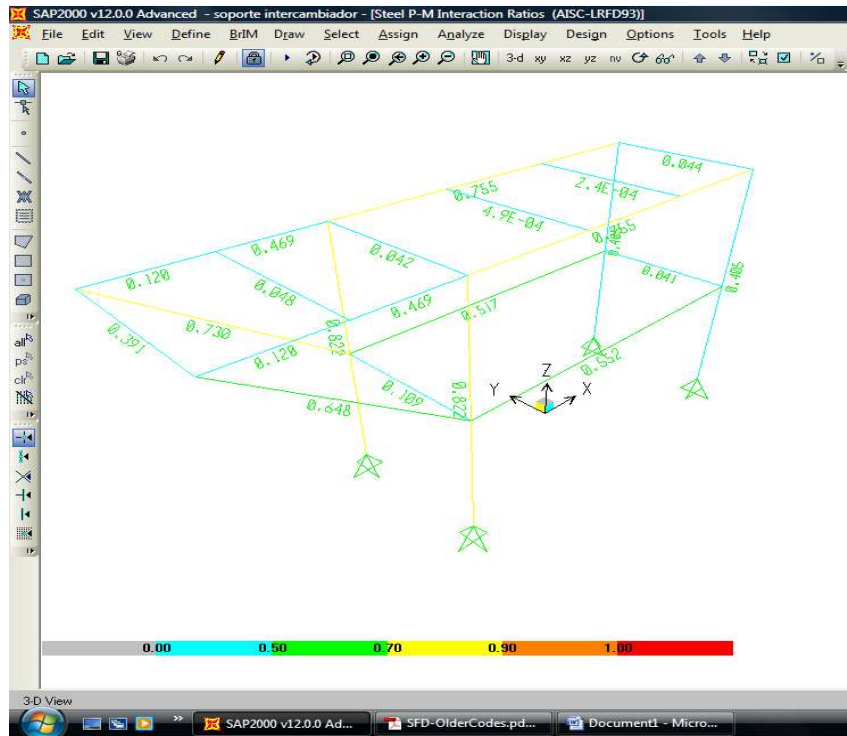


Figura 4.22. Diseño del soporte del intercambiador de calor

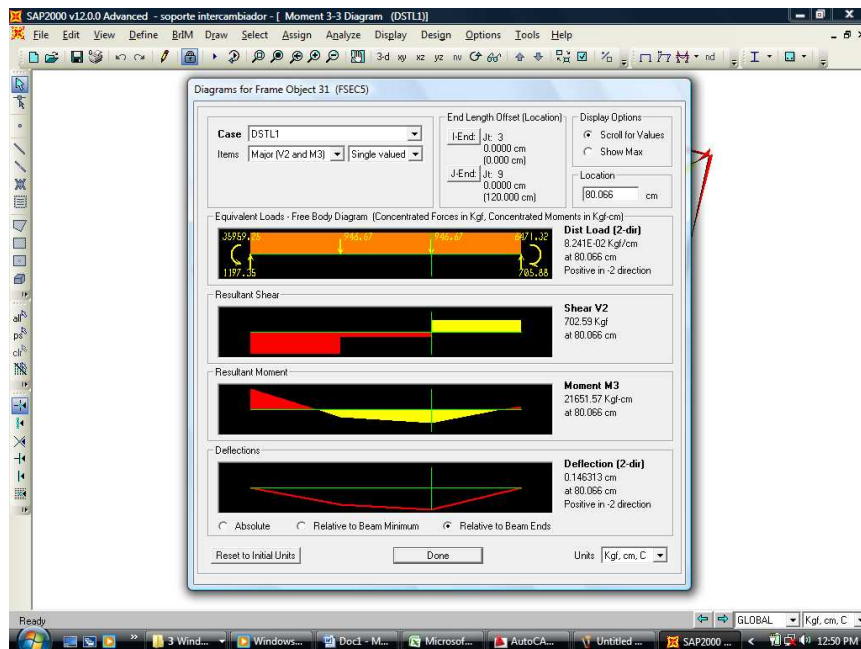


Figura 4.24 Valores máximos de momento flector y fuerza cortante en el marco superior del soporte del intercambiador de calor

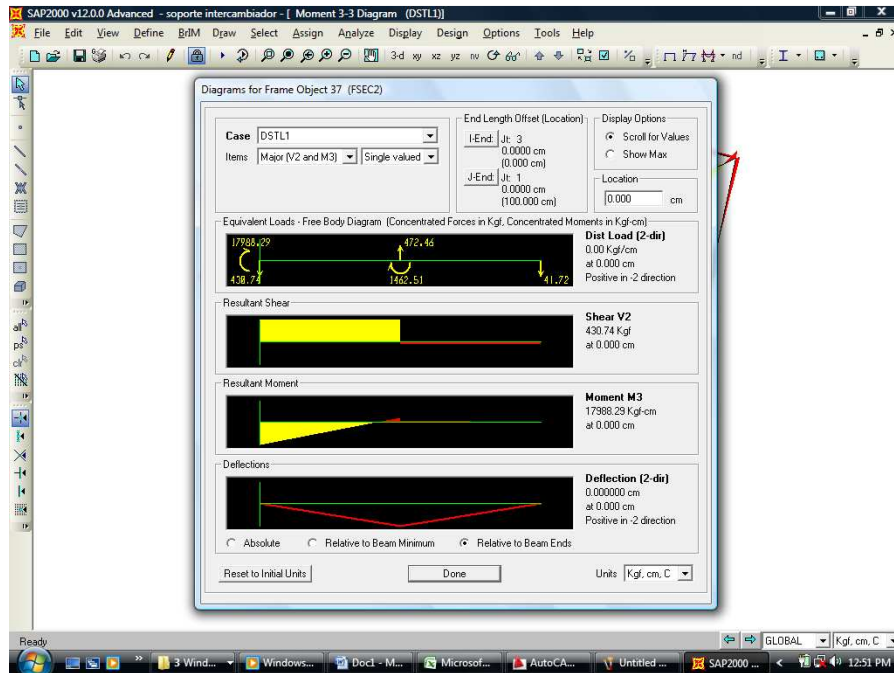


Figura 4.25. Valores máximos de momento flector y fuerza cortante en las patas del soporte del intercambiador de calor

4.4.2 DISEÑO DEL SOPORTE DE LA CÁMARA DE CALENTAMIENTO DE AIRE

El soporte de la cámara de calentamiento de aire tiene la configuración establecida en la figura 4.27, este soporta la carga de la cámara de calentamiento. El peso de este elemento se lo registro en su sitio de montaje por medio de balanza, teniendo que el peso de esta es de alrededor de 90 Kgf, el mismo que se hallan distribuido de manera uniforme.

Los perfiles idóneos de acuerdo al catalogo Dipac (Ver Anexo B) que se utilizaron para la simulación y posteriormente en la construcción del soporte son:

Canal en U de 80*50*3 [mm] para las patas

Canal en U de 60*30*3 para los marcos superior e inferior del soporte.

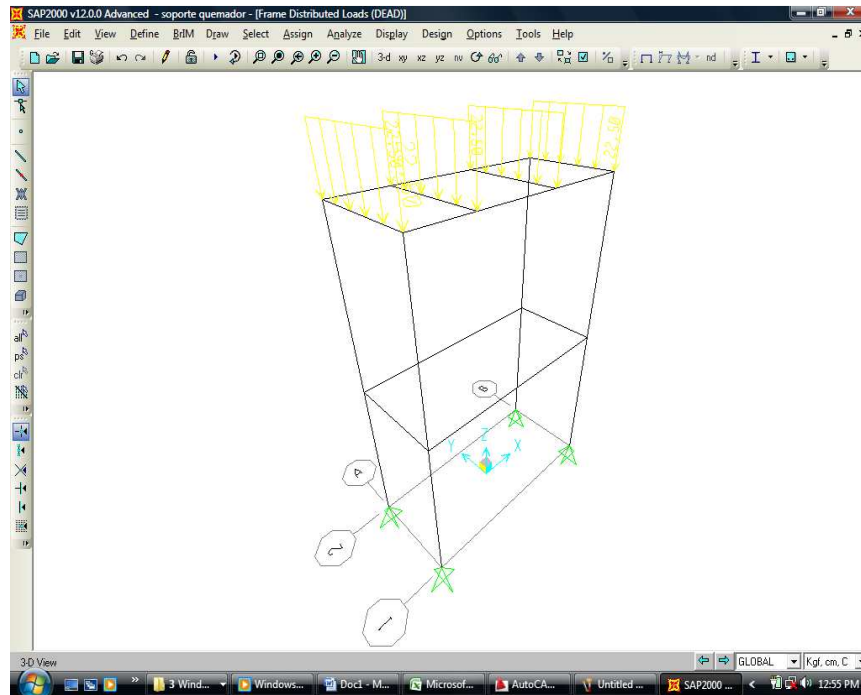


Figura 4.27. Distribución de fuerza en el soporte de la cámara de calentamiento de aire

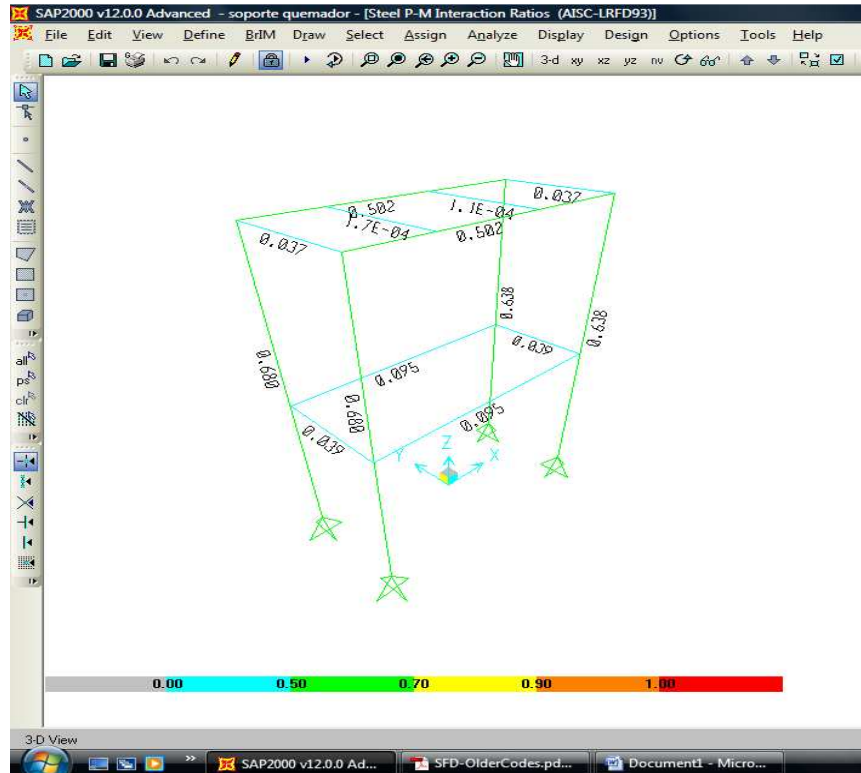


Figura 4.28. Diseño del soporte de la cámara de calentamiento de aire

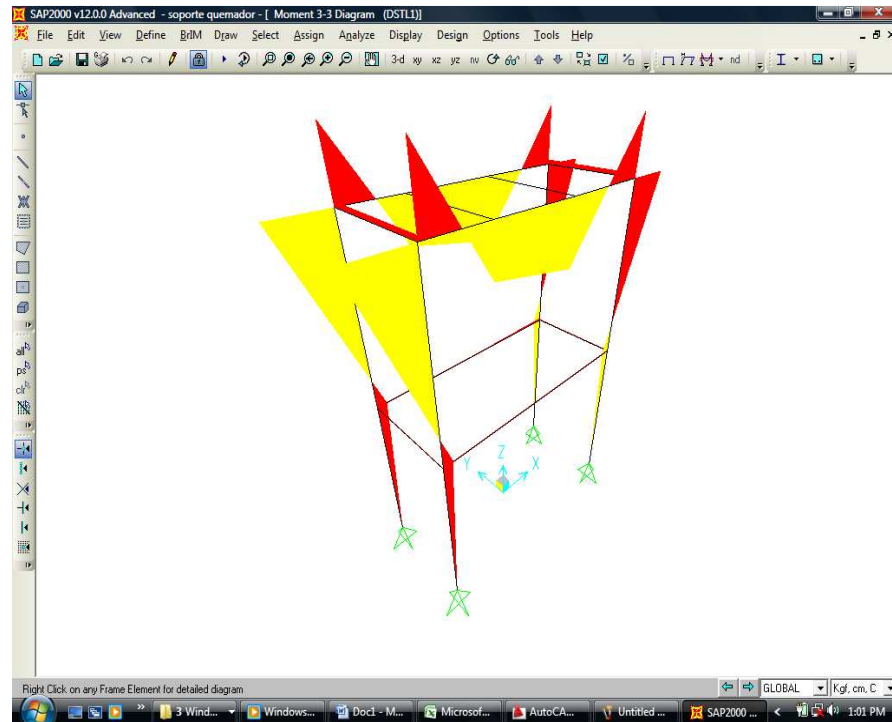


Figura 4.29. Diagramas de momentos en las patas del soporte de la cámara de calentamiento de aire

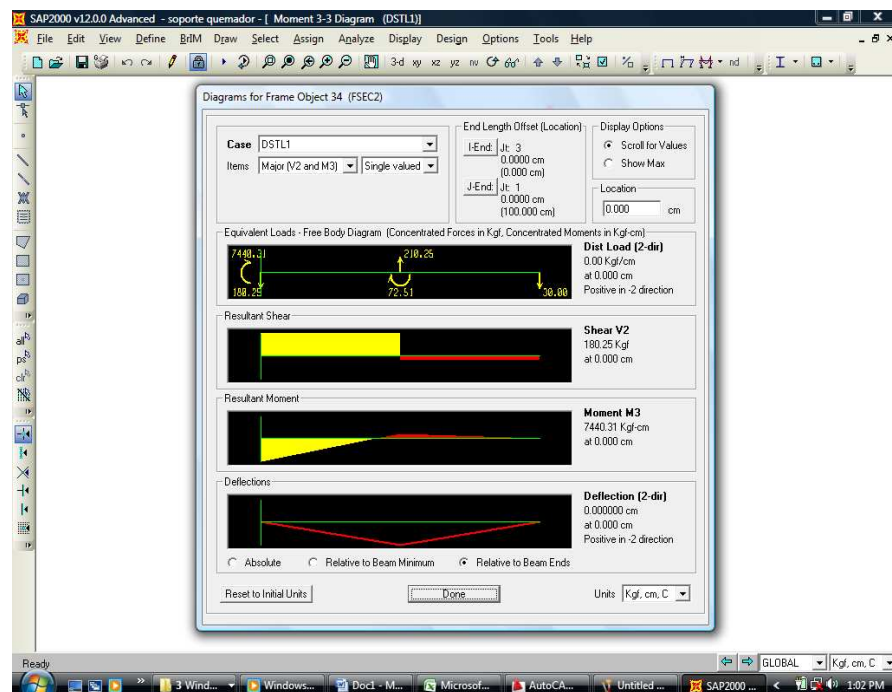


Figura 4.30. Valores máximos de momento flector y fuerza cortante en las patas del soporte de la cámara de calentamiento de aire

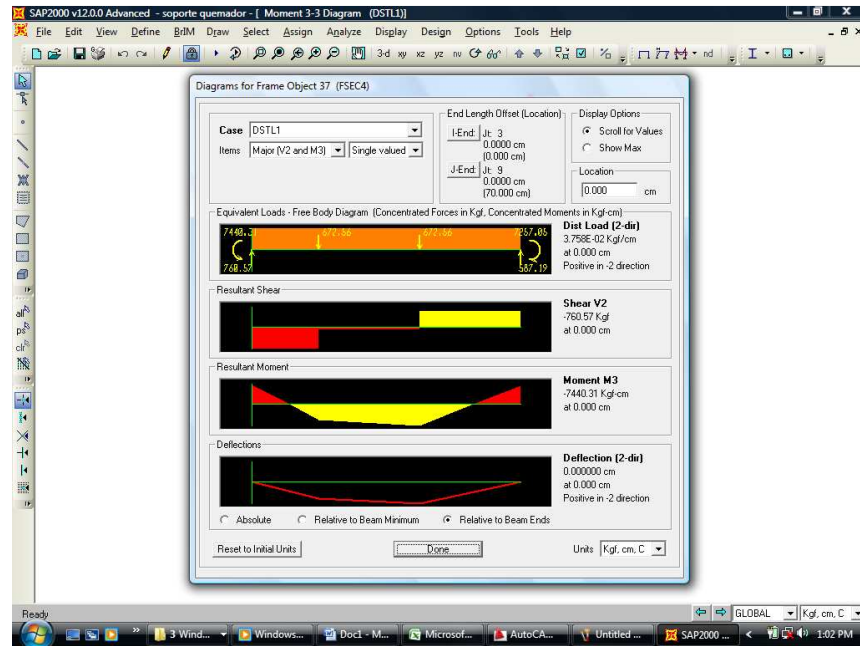


Figura 4.31. Valores máximos de momento flector y fuerza cortante en el marco del soporte de la cámara de calentamiento de aire

CAPITULO V

CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y ANÁLISIS DE COSTOS

5.1 GENERALIDADES

Una vez dimensionadas las partes que conforman el horno, se procede a la construcción y montaje de las mismas de manera sistemática, posteriormente se hará un análisis de costos de acuerdo al tiempo, material y mano de obra empleada.

5.2 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL HORNO

En el proceso de construcción de la máquina es necesario determinar los requerimientos para la construcción, entre los que tenemos:

- Herramientas.
- Maquinas y equipos que se va utilizar en la construcción
- Materia prima
- Instrumentos de medición y verificación.
- Elementos estandarizados.
- Elementos a construir.
- Hoja de procesos.

5.2.1 REQUERIMIENTOS PARA LA CONSTRUCCIÓN

Para la construcción del horno cubilote se utilizan equipos, herramientas e instrumentos de medida para la conformación de la misma, a continuación se detalla algunos de los equipos, herramientas, materia prima, elementos estandarizados y elementos a construir.

1. Máquinas y Equipos:

Cizalla, baroladora, torno, soldadora eléctrica, oxicorte, taladro, amoladora, equipo de pintura.

2. Herramientas:

Brocas, útiles de tornear, escuadras, martillo, llaves, rayador.

3. Instrumentos de medición y verificación:

Calibrador pie de rey, compas, flexómetro, escuadra, galga.

4. Materia Prima.

Planchas de acero A36, material para el eje ANSI 1018, perfil de acero en U, tubo estructural, mortero refractario, concrax 1700, ladrillo refractario U32, lana de vidrio.

5. Elementos normalizados y seleccionados.

Venterol de 2hp, Venterol ½ Hp, pernos, tuercas, arandelas.

6. Listado de elementos a construir.

- Sección cilíndrica superior e inferior
- Placa base
- Puerta de descarga
- Caja de aire

- Apagachispas
- Columnas de soporte (patas)
- Sección cilíndrica para el intercambiador de calor
- Tapas del intercambiador
- Bridas para el intercambiador
- Tornillo de potencia
- Guías roscadas
- Soporte del sistema de elevación

5.2.2 HOJA DE PROCESOS

Se realizara seis hojas de procesos de los elementos principales que conforman el horno, en las que se detallaran cada uno de los procedimientos que se debe seguir para obtener los diferentes elementos que se va construir.

- Sección cilíndrica superior e inferior
- Tapas del intercambiador
- Bridas para el intercambiador
- Tornillo de potencia
- Guía roscada

Las hojas de procesos respectivas se presentan en el Anexo K

5.2.3 MONTAJE DE HORNO

Una vez dimensionados y contruidos los elementos que conforman el horno, se procede a su montaje. Para lo cual se debe tener lista y establecida la zona donde se la va ensamblar el equipo, este espacio debe ser el adecuado para que exista la facilidad de movilidad durante el proceso de operación del mismo.

Todos los elementos que constituyen el horno se los arma en su sitio de operación, a diferencia del intercambiador de calor el cual se lo ha ensamblado previamente en su sitio de construcción. Es muy importante que horno se lo establezca sobre una base firme por lo que es necesaria la construcción de una base cimentada de hormigón armado, zona en la cual se funden los pernos que sujetaran al horno en conjunto.

El montaje del equipo se lo realiza de manera sistemática, primeramente se sujetan las patas a la base cimentada y esta a su vez a la placa base la cual tiene sujeta previamente la puerta de descarga; una vez que se tiene ensamblado este conjunto se procede a colocar las secciones inferior y superior del horno respectivamente, teniendo en cuenta que el sistema de elevación se encuentre perfectamente alineado y escuadrado a las dos secciones del mismo.



Figura 5.1. Montaje del horno en su zona de trabajo

Una vez armada la estructura del horno, procedemos a la colocación del refractario en las secciones inferior y superior, para lo cual se realizan unos moldes a las medidas externa e interna de los mismos ya que el refractario consiste en un único bloque a manera de cilindro hueco, la composición del mismo se estima en un 80% de concrax 1700 y 20% de ladrillo refractario U32 molido; toda la masa mezclada en conjunto con agua es vertida en el molde para obtener el cilindro con las características y medidas deseadas, en este particular es importante definir las zonas donde irán los agujeros de las toberas y piqueras, los cuales se los elaboran durante la fundición del cilindro refractario inferior, para lo cual se colocan tochos de espuma flex con las medidas establecidas en las zonas donde deben ir las mismas de acuerdo al cálculo previo.



Figura 5.2. Cilindro inferior refractario con agujeros de piqueras y toberas.

Una vez ensambladas las secciones superior e inferior del horno y colocado dentro de las mismas el refractario se procede a la colocación de un anillo o capa de diatomita entre el refractario previamente fundido y la chapa metálica, esta es colocada con la finalidad de absorber la dilatación que se da en el refractario debido a la gran temperatura que soporta el mismo y así minimizar daños por agrietamientos en la cámara de combustión.

El montaje del intercambiador de calor (carcasa, tubos, bridas, tapas) se lo realizó en su lugar de construcción, esto únicamente por facilidad, ya que se disponía de las herramientas adecuadas en dicho lugar. Seguidamente se trasladó el intercambiador a la zona de operación del cubilote, el mismo que fue anexo de manera directa por uno de sus extremos al ducto de entrada de aire del horno y por el otro al ventilador centrífugo que envía el caudal necesario de aire a la cámara de combustión.

Una vez colocado y sujetado dicho intercambiador se procede a aislarlo por medio de una capa de lana de vidrio que es distribuida alrededor de la carcasa hasta

alcanzar un espesor adecuado y sobre esta una lamina de aluminio para evitar el contacto directo con la lana de vidrio, y brindar mayor seguridad a los operarios.



Figura 5.3. Montaje del intercambiador de calor

El montaje de la cámara de calentamiento se lo realiza al igual que el horno en su zona de operación, este como se dijo en el capítulo de diseño no es más que una cámara de combustión de forma rectangular, en la cual al aire y gas previamente mezclados ingresan por uno de los extremos se combustionan en su interior y los gases producto de dicha combustión salen por el otro extremo ingresando al intercambiador de calor para calentar el aire que ingresa a la cámara de combustión del horno.

Esta cámara es anexada a la entrada del intercambiador de calor por medio de un ducto de diámetro igual al de su cámara de combustión. La cámara de calentamiento se halla sujeta a su soporte en el cual se encuentran además las válvulas de aire, gas, ductos de mezcla y ventilador centrífugo.



Figura 5.4. Montaje de la cámara de calentamiento de aire

Finalmente se coloca el apagachispas y el instrumento de medición de presión de aire. El apagachispas es colocado en la parte superior del horno, el cual consiste en un cono hecho de tol cuyo único fin es de minimizar la salida de chispas que se registran durante la operación del horno.

El instrumento de medición de presión del aire consiste en un tubo pitot, el mismo que sirve para registrar la presión dinámica de aire que ingresa al horno; un tubo colocado a nivel del ducto de entrada de aire, el cual sirve para registrar la presión estática del aire, estos a su vez se hallan anexados entre sí a un barómetro de cristal a manera de U lleno de agua, este dispositivo sirve para registrar como se dijo con anterioridad la presión estática, dinámica y de trabajo del aire que es enviado por el ventilador hacia la cámara de combustión del horno de cubilote.



Figura 5.5. Instrumento de medida de presión del aire.

En el Anexo J se presentan fotografías del horno terminado

5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico es necesario cotizar cada uno de los elementos que conforman el horno.

5.3.1 ANÁLISIS DE COSTOS DIRECTOS

En los costos directos se analizan: materiales directos, elementos directos, costos de maquinado y montaje.

5.3.1.1 Materiales Directos

Los costos de materiales directos se presentan en la tabla 5.1

Tabla 5.1. Costos de materiales directos

MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR (USD)
Chapas acero A36 2400*1200 mm e=3mm	3	70	210
Chapa acero A36 2400*1200 mm e=4mm	1	90	90
Cilindro acero ANSI 1018 Ø 30mm, L = 1 m	1	50	50
MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR (USD)
Cilindro acero ANSI 1018 Ø 50mm, L = 200 mm	1	10	10
Tubo redondo para vapor 1 ¹ / ₄ in e = 2 mm L = 6000 mm	9	9.88	88.92
Perfil en U 80*40*4 mm L = 1m	1	6	6
Chapa acero A36 680*680 mm e = 6 mm	1	20	20
Chapa acero A36 250*250 mm e = 10 mm	1	10	10
Tubo redondo estructural Φ = 600 mm e = 2 mm L = 2000 mm	1	10	10
Cemento refractario Concrax 1700	10	78	780
Ladrillo refractario U32	20	2.5	50
Subtotal			1324.92

Fuente: PROPIA

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

5.3.1.2 Elementos Directos

Los costos de los elementos directos se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Costos de elementos directos

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR TOTAL (USD)
Ventrol eléctrico Trifásico 3600RPM, 2HP	1	362.55	362.55
Ventrol eléctrico Trifásico 3600RPM, 1/2HP	1	148.5	148.5
Palanca de ratchet mando ¾ de 20"	1	39.20	39.20
Copa de ajuste 22mm, mando ¾"	1	3.07	3.07
Valvula para gas	1	3.20	3.20
Perno 10*1.5*30	50	0.20	10
Perno 10*1.25*120	12	0.65	7.80
Perno 8*1.25*40	1	0.20	0.20
Perno 5*1.25*30	16	0.12	1.92
Tuerca 8*1.25	1	0.120	0.12
Tuerca 10*1.25	50	0.150	7.50
Tuerca 10*1.50	12	0.150	1.80
Tuerca 5*1.25	12	0.08	0.96
Rodamieto puerta corrediza 40mm	1	0.20	0.20
Rodela plana 12mm	12	0.070	0.84

Continuación tabla 5.2

Rodela de presión 10 mm	50	0.050	2.50
Subtotal			590.36

Fuente: PROPIA

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

5.3.1.3 Costos de Maquinado

Otro aspecto que se debe considerar para obtener el costo de la máquina es la mano de obra para la construcción, ya que el salario del trabajador se considera en el análisis económico. El valor de los costos se presenta en la tabla 5.3.



Figura 5.5 Proceso de cortado y doblado de las planchas.



Figura 5.6. Proceso de barolado de las planchas.



Figura 5.7. Corte de las planchas



Figura 5.8. Soldado de las planchas

Tabla5.3. Costos de mano de obra en máquinas-herramientas.

MÁQUINA	COSTO MÁQUINA INCLUIDO DE OBRA	POR MANO (USD/h)	TIEMPO TOTAL (h)	COSTO TOTAL POR MÁQUINA (USD)
Baroladora	10		1	10
Torno	10		6	60
Soldadora	8		12	96
Taladro pedestal	5		1	5
Dobladora	10		0.45	4.5
Cizalla	5		1	5
Subtotal				180.5

Fuente: PROPIA

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

5.3.1.4 Costos de Montaje

Para obtener el costo de montaje se considera la mano de obra necesaria para el armado y ensamblado de cada uno de los subconjuntos y la totalidad de la máquina.

Se considera el trabajo de 2 personas durante 10 días a un costo de 15USD diarios/trabajador, resultando un costo total de 300 USD.

5.3.1.5 Costo Directo Total

En la tabla 5.4 se indica la cantidad total del costo directo.

Tabla 5.4. Costo directo total.

COSTOS	VALOR (USD)
Materiales directos	1324.92
Elementos directos	590.36
Costo de maquinado	180.5
Costo de montaje	300
Subtotal	2395.78

Fuente: PROPIA

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

5.3.2 ANÁLISIS DE COSTOS INDIRECTOS

Se analizan: materiales indirectos, costo de ingeniería, y gastos indirectos.

5.3.2.1 Materiales Indirectos

Los costos de materiales indirectos se presentan en la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Costos de materiales indirectos.

MATERIAL	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (USD)	VALOR TOTAL (USD)
Electrodo 6011 de 4.8mm	10 kg	3.97/1kg	39.70
Cuchilla torno HSS	1	8	8
Disco de corte	4	2.77	11.08
Disco de desbaste	2	3.05	6.10
Sierra para metal	5	1.53	7.65
Lija para hierro	4	0.40	1.60
Pintura anticorrosiva	2.5 L	3.50	8.75
Pintura esmalte	1.5L	4.10	6.15
Thiñer	4 L	1.30	5.2
Guaype	8	0.10	0.80
Subtotal			95.03

Fuente: PROPIA

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

5.3.2.2 Costo de Ingeniería

Este costo se refiere al tiempo empleado en el diseño de cada uno de los elementos constitutivos de la máquina.

Para el costo de ingeniería se considera el sueldo de un ayudante de laboratorio de la EPN de 570 USD durante 2 meses, el costo total de ingeniería es de 1140 USD.

5.3.2.3 Gastos Indirectos

Los gastos indirectos son referentes a costos de movilización de las personas y transporte de materiales para la construcción, montaje de la máquina, y pruebas realizadas. Se estima un valor de 150 USD.

5.3.2.4 Costo Indirecto Total

En la tabla 5.6 se indica la cantidad total del costo indirecto.

Tabla 5.6. Costo indirecto total.

COSTO	VALOR(USD)
Materiales indirectos	95.03
Costo de ingeniería	1140
Gastos indirectos	150
Subtotal	1385.03

Fuente: PROPIA

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

5.3.3 COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA

Tabla 5.7. Costo total del horno de cubilote con aire precalentado

COSTO	VALOR (USD)
Costo directo	2395.78
Costo indirecto	1385.03
TOTAL	3780.81

Fuente: PROPIA

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

Todos los costos de construcción del horno de cubilote con aire precalentado incluyen IVA, y se obtuvieron a partir de proformas facilitadas por distribuidoras y comercializadoras de la ciudad de Quito, entre estas: Talleres TESPА, Ferretería Gutiérrez, Ivan Bhoman, Castillo Hermanos, La casa del perno, Maquinarias Henríquez

CAPITULO VI

FUNCIONAMIENTO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

6.1 FUNCIONAMIENTO

6.1.1 ENCENDIDO

Dos horas antes de dar comienzo a la colada del metal, se repara la solera del horno con arena de moldear seca con una pequeña adición de grafito, arcilla y agua, secándose con fuego de leña o con una llama de fuel-oil o de gas, una vez seca la solera y desde arriba de la sección inferior del horno se introduce un montoncito de leña seca que se enciende hasta obtener un fuego abundante y vivo, favorecido por el enérgico tiro que producen las mirillas de las toberas, la piquera de colada y escoria.



Figura 6.1. Encendido del horno

Se empieza entonces a introducir el coque para encenderlo, en una capa de unos 30 cm para cada carga, a razón de 140 Kg por metro cuadrado de horno; con el coque debe mezclarse un 5 a 10 % de piedra caliza, llamada también fundente, antes de introducir una nueva capa hay que asegurarse de que el coque situado debajo debe estar bien encendido.

El coque de encendido debe alcanzar de 40 a 60 centímetros sobre el plano de las toberas. El nivel se comprueba introduciendo por la boca de carga una cadena o una cabilla doblada en (Z), el encendido de la columna se comprueba observando el color rojo del revestimiento refractario u observando directamente los trozos de coque por la mirilla de las toberas. Se activa el encendido dando viento por espacio de 4 a 5 minutos, lo cual sirve también para desulfurar el coque.

6.1.2 INTRODUCCIÓN DE LA CARGA

La carga del horno se comienza colocando sobre la capa de coque de encendido una carga de coque adicionada de la necesaria cantidad de fundente y encima de esta la carga metálica. A continuación se coloca una segunda carga de coque con fundente y la segunda carga metálica, y así alternativamente hasta alcanzar la boqueta de carga.

Se espera un período de tiempo de 20 minutos, para que el coque encendido de la cama precaliente las cargas añadidas al horno. Transcurrido ese tiempo, se cierran las mirillas de las toberas y las portillas, se enciende la cámara de calentamiento registrándose que la cantidad de aire y gas sea la necesaria se enciende la premezcla, se conecta el ventilador del intercambiador de calor y si todo ha sido bien ejecutado, transcurrido de 8 a 10 minutos, se presentará el primer hierro fundido en la piquera de colada. Este hierro se considera frío y no se utiliza. Solo se emplea cuando comienza a salir fluido y bien caliente por el canal de sangrado.

Si se desea un mayor rendimiento del horno hay que encender la cámara de calentamiento de aire 10 min antes de completada la hora de precalentamiento de las cargas, esto con el fin de que el aire que ingresa a la cámara de calentamiento ingrese a la temperatura deseada.



Figura 6.2. Introducción de la carga de coque

La carga de coque de encendido (cama), cuya función es sostener las cargas colocadas encima y dar con su combustión, la energía térmica necesaria, debe estar constituida por una cantidad de combustible cuya altura permanezca invariable durante toda la colada. Para ello, el coque consumido se reintegra de modo regular a través de las cargas sucesivas de coque, que entran por la boqueta de carga.

6.1.3 PERÍODO DE OPERACIÓN

A partir de que el primer hierro fluye libremente por el canal de sangría, se cierra este orificio con un tapón de arcilla o barro refractario. Ahora se espera a que se acumule el hierro líquido en el crisol del horno. La medida de que el crisol estará lleno le dará la salida de escoria por la piquera correspondiente.



Figura 6.3. Horno de cubilote en plena operación

La fluidez con que salga la escoria es índice del buen funcionamiento del horno. Inmediatamente que salga toda la escoria (comienza a salir hierro, junto con la escoria), quiere decir que el crisol está lleno de hierro líquido. Entonces se rompe el tapón del orificio de sangría y se recibe el hierro en las cazuelas de vertido. Vaciado el crisol se coloca un nuevo tapón en el orificio de sangría y se repite todo el proceso. Lo descrito aquí es lo que se denomina operar el horno por picada y se hace cuando se demandan grandes cantidades de hierro de una vez o por la práctica establecida.



Figura 6.4. Picado del horno

En el sistema por sifón (Pinar del Río), desde un inicio el orificio de sangría permanece abierto, el hierro y la escoria se separan en el sifón. Esto es lo que se conoce como colada continua.

6.1.4 FIN DE LA FUSIÓN

Después del periodo 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 está próxima la fusión del último hierro colado. Cuando aparece escoria en la piquera se vacía el horno.



Figura 6.5. Colado de las piezas



Figura 6.6. Piezas obtenidas por fundición en el cubilote

6.1.5 VACIADO DEL HORNO

Una vez terminada de fundir la última carga, se abren los portillos de las toberas, se abre el canal de colada y la portilla de encendido y se hace correr 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. El coque recuperado se aprovecha para las estufas o para el relleno de machos muy voluminosos. El hierro se funde para las piezas corrientes.



Figura 6.7. Vaciado del horno

6.2 OPERACIÓN

6.2.1 PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Al igual que los parámetros de diseño el horno de cubilote tiene varios parámetros de operación, los cuales deben estar muy bien controlados de manera que durante la marcha y funcionamiento del horno no exista ningún tipo de inconveniente cualquiera que sea este.

6.2.1.1 Producción horaria del horno¹⁹

Al igual que en su diseño, el parámetro fundamental de operación del horno es su diámetro interior (d_i , medido a nivel de toberas). De él depende la producción horaria del horno:

$$d_i = \sqrt{P/60} \quad (7.1)$$

Donde

P: producción horaria, en Kg/hr.

d_i : diámetro interior del horno a nivel de tobera, en dm.

Al respecto existen discrepancias en la literatura científica. Por ello se han propuesto otras formas de calcular la producción del horno. Entre ellas se encuentra la llamada producción por el factor de corrección del horno, en ton/hr. La misma se obtiene multiplicando el área de la sección del horno a nivel de toberas (en dm^2) por un factor, que depende de la relación hierro/coque.

Tabla 6.1. Factor de corrección, según la relación hierro/coque

Relación hierro/coque	Factor
6/1	0.047
7/1	0.054
7.5/1	0.057
8/1	0.062
8.3/1	0.064
9/1	0.069
10/1	0.077

Fuente: Ramos. A, Boris. A, Metodología para evaluar los hornos de cubilote

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

$$P = F \cdot \text{Factor para la relación hierro/coque que le corresponda.} \quad (7.2)$$

¹⁹ Capello Eduardo, Tecnología de la Fundición, 3^{er} ed, Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1974.

La productividad real se puede calcular teniendo los siguientes datos: volumen de cazuela (V_{caz}), densidad del hierro fundido ($P_{\text{Ho/Fo}}$) y el número de cazuela en una hora (No_{caz}).

$$P = V_{\text{caz}} \times P_{\text{Ho/Fo}} \times \text{No}_{\text{caz}} \quad (7.3)$$

Un cubilote operado adecuadamente debe producir 75 Kg de hierro fundido por hora y por decímetro cuadrado de sección (medida a nivel de toberas o su equivalente de 10lb/hora x pul²). Esto es lo que se conoce como producción específica del horno. De igual forma, debe fundir a un ritmo promedio de aproximadamente 10 cargas por hora.²⁰

La producción horaria del horno en el presente proyecto se la calculara por medio del factor de corrección y la Ec. (7.2); en nuestro caso como se trabaja con un horno cuya relación hierro/coque de 8/1, según la tabla 7.1 el factor de corrección es 0.062, entonces tenemos:

$$P = F * \text{Factor}$$

Donde

$$F = 4.15 \text{ dm}^2$$

$$\text{Factor} = 0.062$$

Remplazando datos tenemos:

$$P = 4.15 * 0.062$$

$$P = 0.257 \left[\frac{\text{Ton}}{\text{hr}} \right]$$

²⁰ HEINE, LOPER, Rosenthal, Principles of metal casting, Mc Graw Hill, New York, 1967

6.2.1.2 Suministro de aire²¹

El aire que se sopla dentro del horno, por lo general proviene de un ventilador centrífugo o de un ventilador de émbolos rotatorios (tipo Root). Cualquiera que este sea, debe garantizar la presión y el volumen de aire necesarios. El ventilador centrífugo, como se sabe, es más elástico a los efectos de su regulación y más ventajoso desde el punto de vista económico.

El de émbolos rotatorios, en cambio, garantiza una presión constante, lo cual posee particular importancia para un horno de cubilote, dado que la permeabilidad al aire y los gases dentro del horno puede variar durante la operación del mismo. (Variación en el tamaño del coque y los trozos de la carga metálica).

Los instrumentos de medición de la presión y el flujo de aire deben estar instalados en una porción recta del conducto de aire, sobre una distancia no menor de 14 veces el diámetro. El conducto de aire debe ser de sección circular y de un diámetro tal, que la velocidad lineal del flujo sea menor a 15 m/s. La cantidad de aire que se inyecta a un horno de cubilote, viene dada por la relación hierro/coque que se emplea (dicha relación oscila normalmente entre 6/1 y 15/1) y determina, junto con el diámetro interior del horno, la producción horaria del mismo (t/h). Un cubilote debe consumir aproximadamente 100 metros cúbicos de aire por cada metro cuadrado de sección transversal del horno (a nivel de toberas).

La instalación de las máquinas soplantes resulta a menudo inadecuada. Dos errores muy frecuentes son: demasiado próximas a los hornos (lo cual no permite la instalación de los instrumentos de medición según las normas vigentes) y a un nivel diferente al de la caja de aire del horno. Algunas de las recomendaciones que deben seguirse son las siguientes:

²¹ VETICHKA, Fundamentos Teóricos de la Producción por Fundición, Ed. Escuela Superior, Kiev, 1981.

- La entrada del conducto del aire a la caja de aire del horno debe ser tangencial.
- La válvula de regulación del flujo (solo para ventiladores centrífugos), debe estar alejada de los equipos de medición (metro orificio, Venturi, etc.).
- El equipo de soplado debe estar en un lugar aireado, sin comunicación con el ambiente polvoriento de la fundición
- Ninguna sección del conducto puede ser menor que el diámetro de salida del equipo soplador.

Como hemos visto, la calidad del coque, presión del aire y altura de la cama del horno, son parámetros esenciales para el buen funcionamiento del mismo. Es difícil dar una guía segura sobre la presión del aire que se suministra al horno, ya que depende de muchos factores, entre ellos: dimensiones de las toberas, tamaño promedio de los trozos de coque, características de los materiales de la carga y otros. En condiciones normales de operación suelen ser frecuentes los valores siguientes.

Tabla 6.2. Valores de presión en relación al diámetro interior del horno

Diámetro interior del horno (cm)	Presión (cm de agua)
60-75	30-40
76-100	41-55
101-125	56-70
126-150	71-90

Fuente: Ramos. A, Boris. A, Metodología para evaluar los hornos de cubilote

Elaborado Por: Medina Julio, Taco Jorge

Como se puede apreciar de la tabla anterior los valores de presión del aire descienden de manera secuencial a medida que disminuye el diámetro interno del horno, en nuestro caso con un diámetro interno de 23 cm y con el ventilador

hallado en el cálculo se obtiene un valor de presión de 10 cm de agua, valor que en este caso se encuentra dentro del rango de operación.

Un aspecto importante y al cual no se le presta siempre la debida atención, es el referido a la humedad relativa del aire que se sopla en el horno. Se ha demostrado que en un horno que funde a razón de 14 t/h, y 25°C y 75 % de humedad relativa del aire que se sopla, se introducen en el horno aproximadamente 192 Kg de agua por hora. Esto representa un consumo adicional de 230 Kg de coque por hora (San Solo, 1999).

6.2.1.3 Altura de la cama

Otro parámetro importante en la operación del horno es lo que se denomina altura de la cama del horno (h_c). Se entiende por tal, la distancia medida a partir del nivel de toberas y que representa el nivel máximo a que habrá de llegar el coque encargado de producir la combustión dentro del horno. Esta altura depende de la presión con que es soplado el aire (P_a) dentro del horno. Su cálculo se efectúa mediante fórmulas empíricas avaladas por la experiencia práctica²²

$$h_c = \sqrt{P_a} \times 10.5 + 6 \quad (7.4)$$

Donde

h_c : altura de la cama, en pulgada.

P_a : presión estática de la caja de aire, en onzas/pulg²

(1 onza/pulg² = 44 mmH₂O)

Calculo de la altura de la cama de coque.

²² AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, The Cupola and its Operation, Second Edition, A.F.S, Chicago, 1954.

La presión estática registrada en el barómetro para el horno de cubilote es de 100 mm de H₂O, lo cual es 2.27 [onza/pulg²].

Remplazando datos en la Ec (7.4), tenemos:

$$h_c = \sqrt{2.27} \times 10.5 + 6$$

$$h_c = 21.82 \text{ [pulg]}$$

$$h_c = 55.4 \text{ [cm]}$$

Dicha altura debe mantenerse constante durante toda la operación del horno y esa es la función de las cargas de coque que acompañan a las cargas metálicas. El coque empleado en producir la cama del horno debe ser de la mayor calidad posible y el tamaño de los trozos debe oscilar entre 1/10 y 1/12 del diámetro interior del horno. Una regla empírica muy efectiva consiste en lo siguiente: si la altura de la cama del horno está bien calculada, el primer hierro fundido líquido (se considera frío y no se utiliza), debe salir por la piqueta de colada entre 6 y 9 minutos después de iniciada la marcha del horno.

El coque para formar la cama del horno debe calcularse a razón de 140 Kg/m² de sección del horno y en capas que alcancen aproximadamente 32 cm por la altura del horno. Antes de añadirse una nueva capa de coque, para formar la cama, hay que asegurarse de que el coque añadido anteriormente esté bien encendido. Después de alcanzada la altura definitiva de la cama (en muchas fundiciones se hace por experiencia), se debe soplar aire durante 4 o 5 minutos. De esa forma se desulfura el coque.

A la cama del horno se le puede o debe añadir 5 a 10 % de piedra caliza (fundente), para desulfurar el coque. El coque que se emplea en el cubilote y particularmente en la cama, debe poseer buena resistencia mecánica, ya que tiene que soportar el peso de las cargas metálicas que se introducen por la puerta de carga. Un valor adecuado de resistencia mecánica se considera el siguiente: 15 MPa. El término resistencia mecánica aquí también puede entenderse como la mayor o menor tendencia al fraccionamiento de los trozos de coque. De ahí que

en algunas normas estatales, este valor se exprese en función del porcentaje de trozos retenidos sobre una malla, después de someter el coque a un tratamiento mecánico dentro de un tambor giratorio. En esas condiciones, la fracción menuda, en un buen coque, no debe sobrepasar el 15 % de la muestra.

6.2.1.4 Relación metal / coque

La relación metal / coque consumido, se considera como un índice de la eficiencia del funcionamiento del cubilote. Se admite muchas veces que si un cubilote funde 15 Kg de metal por cada kilogramo de coque consumido, funciona mejor que otro que para la misma cantidad de coque funda solo 10 Kg de metal. La relación metal coque depende de muchos factores, entre ellos la naturaleza del metal (más o menos fácil de fundir), el tamaño medio de las piezas cargadas, la temperatura necesaria para el caldo, la duración de la colada, y la calidad del coque empleado. Se consumirá más coque cuanto más elevada sea la temperatura necesaria y la fusión de trozos gruesos exigirá más coque que la chatarra ligera.

Si en ciertos periodos hay que mantener en un horno una velocidad de fusión baja, pero sin que descienda la temperatura del caldo, aumentará el consumo del coque. Cuando se emplea en la carga un porcentaje elevado de chatarra de acero, una parte del coque se emplea en carburar el acero. En la fusión de cargas con un 50% de acero son cifras buenas las relaciones metal/coque de 6/1 a 8/1. En la fabricación de piezas coladas a partir de mezclas con un 25% de acero es muy satisfactoria una relación 10/1.

Citándose traía de obtener fundiciones altas en fósforo para colar piezas ligeras se puede llegar a relaciones 15/1. Estos valores de la relación son válidos para cubilotes grandes. En los pequeños suele utilizarse una cantidad mayor de coque para obtener las mismas temperaturas. El metal para piezas de maleable con carga que contenga o no acero se produce raramente con relaciones metal coque inferiores a 8/1 porque se necesita una temperatura del caldo muy alta.

6.2.1.5 Peso de las cargas

El peso de las cargas, debe ser evidentemente el que dé mejores resultados para cada tamaño de cubilote pero depende en parte las condiciones de funcionamiento. Para ahorrar mano de obra debe reducirse al mínimo el número de cargas y por tanto de pesadas, lo que indica que el peso de cada carga debe ser el mayor posible para que la fusión sea satisfactoria. El empleo de cargas grandes produce mejores rendimientos en la combustión.

El peso máximo de las cargas debe estar comprendido entre $1/8$ y $1/6$ de la capacidad horaria de fusión. En muchos casos existen consideraciones especiales que aconsejan el uso de cargas menores, por ejemplo en la fusión de cargas que tienen materiales de composición diferente, como acero y arrabio, y es necesaria una buena mezcla en el crisol del horno o en la cuchara, en este caso es mejor emplear varias cargas de peso más pequeño en lugar de una grande, el peso recomendable puede ser de entre $1/10$ a $1/12$ de la producción horaria.

Pero como se dijo antes el peso de la carga depende del tamaño del cubilote y de las condiciones de funcionamiento. Esta es una condición independiente del tipo del metal o aleación que debe fundirse. Las cenizas del coque de cubilote y la arena adherida a la chatarra y el arrabio deben eliminarse con la escoria y ello exige el empleo de fundente, por ello se adiciona costina (caliza) a las cargas.

La práctica corriente es añadir un peso de costina que sea aproximadamente del 20% a 25% del peso de coque cargado. Con tal adición se consigue una escoria que contiene aproximadamente el 25% de cal y que fluye con facilidad sin producir erosiones importantes en el revestimiento.

Como en el funcionamiento normal del cubilote no se quema el coque totalmente a dióxido de carbono, se produce una determinada cantidad de monóxido de carbono, que se quema en el tragante o escapa por la chimenea.

En el Anexo C2 se muestra el formato de control de carga en cubilotes

6.2.1.6 Emisión de los gases²³

En ningún momento se debe olvidar que desde el punto de vista ambiental, el horno de cubilote es un emisor de gases nocivos. De ahí la importancia de conocer adecuadamente la composición de los gases de escape del horno. Se considera que un horno de cubilote opera correctamente, como proceso de combustión, cuando la composición de los gases de escape, medidos en la puerta de carga del horno, es aproximadamente la siguiente: 15%CO₂ y 9%CO. Lo anterior, sin embargo, debe considerarse como valores teóricos, ya que en la práctica pueden variar dichos contenidos en límites más amplios.

Por ejemplo, para cubilotes de soplo frío, empleando una relación hierro/coque de 10/1, son normales los valores siguientes: 12-15% de CO₂ y 8-12% de CO. En cualquier caso, el contenido de CO₂ en los gases de escape debe mantenerse entre el 50 y el 65% del total. Aunque son grandes variaciones en la relación hierro/coque, este valor puede descender hasta 33%. La ausencia de llamas en la puerta de carga del horno es uno de los índices que indican una operación normal del mismo. Algunos autores consideran que se pueden predecir fallas en el funcionamiento del horno, mediante la observación del tipo de llama que se tiene en la puerta de carga.

6.2.1.7 Eficiencia del horno

Otro de los parámetros importantes en el horno de cubilote es su eficiencia, es decir la energía útil en relación a la energía disponible, en nuestro caso como el horno puede operar con aire frío y aire precalentado, se determinara la eficiencia del mismo cuando opera de las dos maneras.

Eficiencia del horno cuando opera con aire frío

La eficiencia del horno viene dada por la relación:

²³ CAPELLO EDUARDO, Tecnología de la Fundición, 3^{er} ed, Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1974.

$$R_g = \frac{Q_u}{Q_t} \quad (7.5)$$

$$Q_t = Q_u + Q_h + Q_p = Q_c + Q_{\text{Otros}} \quad (7.6)$$

$$Q_c = m * PCI \quad (7.7)$$

Donde:

R_g : Eficiencia del horno

Q_u : Calor útil de la carga

Q_t : Calor total que ingresa al horno

Q_h : Calor de gases de combustión

Q_p : Calor de perdidas

Q_c : Calor de combustión

m : Masa de combustible

PCI : Poder calorífico inferior del combustible

Datos:

$$PCI = 29300 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$m = 25 \text{ [Kg]}$$

$$Q_c = 25 * 29300$$

$$Q_c = 732500 \text{ [KJ]}$$

En hornos se estima un 7% en pérdidas por las paredes ya sean estas por radiación, convección y o radiación, entonces tenemos que:

$$Q_p = 0.07 * 732500$$

$$Q_p = 51275 \text{ [KJ]}$$

El calor sensible perdido en la chimenea viene dado por la relación:

$$Q_s = K \frac{T_h - T_a}{CO_2} \quad (7.8)$$

Donde:

CO_2 : Contenido de dióxido de carbono en tanto por ciento (%)

T_a : Temperatura ambiente en el recinto donde se halla el horno en Grados centígrados (°C)

T_h : Temperatura de humos en Grados centígrados (°C)

K : Coeficiente del combustible

Datos:

$$\%CO_2 = 50\%$$

$$T_a = 25 \text{ C}$$

$$T_h = 800 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$K = 0.57$$

$$Q_s = 0.57 * \frac{800 - 25}{15}$$

$$Q_s = 8.84 \%$$

De aquí se tiene que:

$$Q_h = 0.0884 * 732500$$

$$Q_h = 64753 \text{ [KJ]}$$

Entonces tendríamos que el calor útil de la carga será:

$$Q_u = Q_t - Q_h - Q_p$$

$$Q_u = 732500 - 64753 - 51275$$

$$Q_u = 616472 \text{ [KJ]}$$

Remplazando los valores encontrados en la relación (7.5), hallamos la eficiencia del horno cuando opera con aire frio.

$$R_g = \frac{616472}{732500}$$

$$R_g = 0.84$$

Eficiencia del horno cuando opera con aire precalentado

La eficiencia del horno viene dada por la relación:

$$R_g = \frac{Q_u}{Q_t}$$

$$Q_t = Q_u + Q_h + Q_p - Q_{inter} = Q_c$$

$$Q_t = 732500$$

$$Q_p = 51275 \text{ [KJ]}$$

$$Q_h = 64753 \text{ [KJ]}$$

$$Q_{inter} = 42249.38 \text{ [KJ]}$$

Entonces tendríamos que el calor útil de la carga será:

$$Q_u = Q_t + Q_{inter} - Q_h - Q_p$$

$$Q_u = 732500 + 42249.38 - 64753 - 51275$$

$$Q_u = 658721.8 \text{ [KJ]}$$

Remplazando los valores encontrados en la relación (7.5), hallamos la eficiencia del horno cuando opera con aire frio.

$$R_g = \frac{658721.8}{732500}$$

$$R_g = 0.90 \%$$

Nota los poderes caloríficos del coque y otros combustibles se los indica en el Anexo E2.

6.3 OBSERVACIONES GENERALES DEL FUNCIONAMIENTO Y LA OPERACION EN EL CUBILOTE

a) El primer hierro colado que se extrae nunca es lo suficientemente caliente salvo en los cubilotes cuyo crisol está muy bajo; por lo tanto, este material se emplea para colar piezas macizas o de poca importancia. A falta de estas, el hierro colado se convierte en lingotes para volverlo a utilizar en fundiciones sucesivas.

b) La piqueta de colado se cierra con un tapón cónico de arcilla cruda, que se introduce con la ayuda de una barra larga. Para dar salidas a intervalos al hierro fundido, se perfora el tapón con una barra puntiaguda, si el hierro se solidifica en la piqueta de colado, hay que picarlo con una barra de sangrar, si es posible insuflar oxígeno en la piqueta misma con un tubo de diámetro de 5 a 10 mm adaptado al cilindro de oxígeno, activando eventualmente la combustión con un trozo de coque incandescente.

c) El cubilote debe fundir normalmente a un ritmo de ocho cargas por hora, y por tanto la introducción de una nueva carga debe realizarse cada cinco a siete minutos, si se observa que el descenso de la carga se detiene o retrasa puede ocurrir:

1) Que se haya formado un puente, es decir un atasco de carga metálica de forma que mantengan suspendidas las cargas superiores. Hay que deshacer el puente con una barra puntiaguda y pesada, que se introduce por la boca de carga. Una vez roto el puente, se añade el coque de encendido que se consumió entre tanto. Si las cargas metálicas se efectúan en trozos de tamaño adecuado no se produce este inconveniente.

2) Que queden obstruidas las toberas a causa de la escoria que, enfriada por la corriente de aire, se deposita entre ellas

3) Hay que vigilar las toberas a través de las mirillas y, periódicamente librarlas de suciedad que las cubre por medio de una barra que se introduce a través de las mirillas hasta que queden limpias.

4) Que se empleen fundentes inadecuados, o que el coque sea de bajo poder calorífico o con exceso de cenizas, o refractario de mala calidad.

d) Si a los 20 o 30 minutos de obtenido el primer hierro fundido la producción del cubilote resulta anormal, o la temperatura de hierro colado es persistentemente baja hay que indagar las causas que pueden ser:

1) Carga metálica de tamaño inadecuado a las dimensiones del cubilote (nunca mayor a 1/3 del diámetro del horno).

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) Reducción de la sección del cubilote por encoronamiento o acumulación de escoria adherida al revestimiento.

e) La piquera de escoria debe permanecer normalmente cerrada para evitar escapes de aire y para asegurar una capa de 4 a 6 cm de escoria sobre el baño metálico para que proteja a este último de oxidaciones. Se debe escoriar en intervalo de 40 a 60 minutos.

f) La marcha del cubilote puede juzgarse por la llama de boca de carga y por la fractura de la escoria. Por ejemplo:

Llama:

1) Ausencia de llama en la boca de carga, salvo en la fase final (indica funcionamiento y proporción normales del horno)

2) Llama azul turquesa: Indica que prevalece CO (hay exceso de carbón en las cargas)

3) Llama blanca brillante: Indica que prevalece CO₂ (hay exceso de viento).

4) Llama humosa: Es indicio de una marcha lenta (exceso de coque)

Escoria:

1) Escoria fluida, pero no demasiado vítrea, compacta, color verde botella: Indica buena marcha con oxidación escasa.

2) Escoria demasiado fluida, con fractura quebradiza y oscura: Indica exceso de fundente.

3) Escoria demasiado viscosa: Indica escasez de fundente.

4) escoria compacta, parda, 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 (de hierro y manganeso) y por tanto, oxidación excesiva.²⁴

²⁴ RAMOS. A, Metodología para evaluar los hornos de cubilote, El Cid Ed, Argentina, 2007.

En el anexo D se presentan diversas curvas de operación para cubilotes.

6.4 MANTENIMIENTO

Después de cada fusión de 2 a 3 horas, el cubilote se deja enfriar y, al día siguiente, se repara. A este fin, con un cincel o una piqueta, se quita la escoria o el material refractario vitrificado y adherido al revestimiento refractario, que se presenta más o menos corroído en torno a las toberas hasta alcanzar el material refractario que no ha sufrido deterioro. Las partes afectadas se recubren entonces con material nuevo, a mano y dejándolo reposar por lo menos 24 horas. Si el espesor a recubrir es muy grande, se utilizan trozos de ladrillos, siempre del mismo material refractario.

La reparación puede efectuarse también por medio de unos aparatos especialmente creados para este uso, que proyectan la masa refractaria contra las paredes que hay que reparar por medio de aire comprimido. Este sistema es aplicable a hornos de dimensiones grande y mediana.

En los cubilotes de fondo fijo hay que retirar la placa del agujero de limpieza y sacar los residuos con rastrillo. Antes de volver a usar el cubilote es necesario reparar el refractario, la importancia de las reparaciones depende de la duración de la colada. Cuando las condiciones de funcionamiento son duras puede ser necesario poner ladrillos nuevos en la zona de fusión, donde existe más erosión del revestimiento. En general suele bastar con un parchado con ganister para devolver al revestimiento sus dimensiones primitivas. La reparación debe hacerse cuidadosamente y hay que secar el revestimiento antes de volver a usar el cubilote.

En el horno de cubilote del presente diseño, además de tener en cuenta las indicaciones anteriores de mantenimiento, se toman otras muy especiales ya que el revestimiento refractario de la cámara de combustión de las secciones inferior y superior están hechas a manera de un cilindro hueco de un solo cuerpo, hecho por el cual la reparación del refractario es un tanto tediosa, y para impedir que

esta se complique gradualmente se la debe reparar después de cada periodo de operación del horno; de las pruebas realizadas se ha comprobado que la zona donde se registra mayor daño es la de fusión, por encima del plano de las toberas, en este particular hay que tener mucho cuidado ya que el horno por ser de sección pequeña y no tener la disponibilidad de que una persona ingrese dentro del mismo, tiene un sistema tal que permite que la parte superior del horno se despliegue de manera vertical y horizontal desacoplándose de la inferior, y para que estas dos partes se junten correctamente, tienen una configuración a manera de diente alrededor del contorno del refractario, tanto en las partes superior e inferior de las secciones respectivas, este diente tiende a desgastarse por las condiciones de servicio debido a la abrasión, reacciones químicas involucradas y a la utilización de fundentes inadecuados o exceso de los mismos, hecho por el cual se lo debe chequear y reparar continuamente después de cada periodo de operación del horno.

Otra de las partes que se le debe dar mantenimiento periódico es el sistema de elevación o acople de las secciones del horno, hay que tener cuidado en el momento que se opera el horno, en especial al momento de cargar las cargas ya que pueden caer restos de coque o tierra adherida al metal de carga e ingresar entre los dientes de la rosca del tornillo de potencia, impidiendo el normal funcionamiento del mismo ya sea que se desee utilizar este por atasco de metal fundido en el crisol durante la operación, o por mantenimiento del refractario de la cámara de combustión del horno.

El intercambiador de calor como la cámara de calentamiento están sujetas a condiciones menos severas de operación por lo que su mantenimiento es limitado, pero no por esto se lo debe descuidar. El refractario de la cámara de combustión del calentador de aire se la puede reparar ingresando la mano, tanto para limpiarlo o revestir las partes afectadas con mortero refractario. El intercambiador de calor se lo limpia desacoplando totalmente su carcasa de sus tapas a manera de cono, y utilizando aire presurizado en un compresor se limpian las impurezas adheridas tanto en las partes interna como externa de los tubos de calentamiento de aire.

CAPITULO VII

PRUEBAS DE CAMPO

7.1 DATOS OBTENIDOS

Considerando el protocolo de prueba descrito en el capítulo III se procede a realizar las pruebas de campo. En la tabla 7.1 se muestran los resultados obtenidos del protocolo de pruebas.

Tabla 7.1. Protocolo de Pruebas

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL		
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
PRUEBAS DE CAMPO		
FECHA DE PRUEBA:	10 de Septiembre del 2009	
FECHA DE APROBACIÓN:	14 de Septiembre del 2009	
NOMBRE DE LA EMPRESA:	ESCUELA POLITECNICA NACIONAL	
NOMBRE DE LA MAQUINA:	HORNO DE CUBILOTE	
CAPACIDAD DE LA MAQUINA:	30 Kg por carga	
PERSONAL RESPONSABLE:	Ing. Fausto Oviedo Sr. Julio Medina Sr. Jorge Taco	
DIMENSIONES DE LA MAQUINA		
VERIFICACION DE DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL HORNO DE CUBILOTE		
ELEMENTOS	PASA	NO PASA
Sistema de elevación	X	
Secciones superior e inferior	X	
Soportes	X	
Intercambiador de calor	X	

Continuación de la tabla 7. 1

Cámara de calentamiento de aire	X		
Estructuras	X		
VERIFICACION DE DIMENSIONES TOTALES DE LA MAQUINA			
PARAMETROS	DIMENSIONES	NO PASA	PASA
Largo	3000 mm		X
Ancho	480 mm		X
Altura	1900 mm		X
FUNCIONAMIENTO			
SISTEMAS	TIEMPO DE PRUEBA	FALLA	NO FALLA
Calentamiento de aire	120 min		X
Elevación			X
Estructura			X
VERIFICACION DE LA PRODUCCION DE HIERRO FUNDIDO CON AIRE PRECALENTADO			
PARÁMETROS	ACEPTABLE	NO ACEPTABLE	
Carga de metal (30Kg)	X		
Carga de coque (3Kg)	X		
Carga de Caliza (1Kg)	X		
Relación metal/coque (8/1)	X		
Caudal de aire requerido (0.15 m/s)	X		
Presión estática de aire requerida (10 cm de agua)	X		
Temperatura de ingreso de aire caliente (300°C)	X		
Tiempo estimado de fusión por carga (8 min)	X		
Régimen de fusión (240 Kg/h)	X		
Temperatura de colado (1200 °C)	X		

Continuación de la tabla 7. 1

VERIFICACION DE LA PRODUCCION DE HIERRO FUNDIDO SIN PRECALENTAMIENTO DE AIRE		
PARÁMETROS	ACEPTABLE	NO ACEPTABLE
Carga de metal (30Kg)	X	
Carga de coque (3Kg)	X	
Carga de Caliza (1Kg)	X	
Relación metal/coque (8/1)	X	
Caudal de aire requerido (8.2 m/min)	X	
Presión estática de aire requerida (10cm de agua)	X	
Temperatura de ingreso de aire (20°C)	X	
Tiempo estimado de fusión por carga (12 min)	X	
Régimen de fusión (150 Kg/h)	X	
Temperatura de colado (1200 C)		

OBSERVACIONES: Ninguna	
El prototipo Pasa: SI PASA	El prototipo no Pasa:
<p>.....</p> <p>Medina J Taco J</p> <p>FIRMA DE PERSONA(S) RESPONSABLES</p>	<p>.....</p> <p>Ing. Oviedo F</p> <p>FIRMA DE AUTORIZACIÓN</p>

CONCLUSIONES:

- Al evaluar al prototipo del horno de cubilote con aire precalentado en el protocolo de pruebas, se concluye que la geometría de cada uno de los

elementos y componentes cumplen con los parámetros y especificaciones con las que se realizó el diseño.

- El intercambiador de calor diseñado para el protocolo de pruebas cumple con los parámetros funcionales del horno.
- Se puede apreciar que el precalentamiento de aire aumenta el rendimiento de la fusión del metal, teniendo un ahorro de coque significativo del 38%, y un régimen de fusión mayor que cuando se opera el horno con aire frío.
- La producción de hierro fundido obtenida, satisface los requerimientos planteados en los objetivos del presente proyecto.

7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante las dos pruebas de campo del equipo de fundición, no se presentó ningún tipo de anomalía en las estructuras y componentes de igual forma no se registraron fugas de aire entre las bridas y acoples de la cámara de calentamiento, intercambiador de calor y mirillas.

El prototipo cumple con todos los requerimientos planteados en los objetivos del proyecto.

Se incluye un video de las pruebas realizadas, en el cual se verifican todos los procesos descritos antes en el capítulo VI.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- El Proyecto de Titulación cumple con los objetivos establecidos, los cuales están incorporados en la construcción del horno, intercambiador de calor y cámara de calentamiento de aire, y directamente involucrados con los parámetros funcionales y operacionales.
- El presente proyecto, de acuerdo a sus dimensiones y parámetros funcionales se halla dirigido a la práctica estudiantil y sobre a todo a impulsar el estudio y análisis de la fundición gris.
- Se ha demostrado que con aire precalentado alrededor de los 300 C durante la operación de un cubilote de 23 cm de diámetro interno se logra un ahorro de coque de un 30%, aumentado así la eficiencia del mismo durante el proceso de fusión.
- Se ha comprobado que para obtener una correcta combustión en la cámara de calentamiento de aire, se debe lograr una buena mezcla del combustible (GLP) con el aire, en este sentido los combustibles gaseosos presentan mayor facilidad de mezcla que los líquidos y éstos a su vez más que los sólidos.
- Se ha notado que con un intercambiador de calor a contra flujo se obtienen los máximos requerimientos de calentamiento de aire y que su rendimiento está por encima de otras configuraciones para el intercambio de calor, hecho por el cual este tipo de intercambiador es el adecuado para el este prototipo.
- El calentamiento del aire en el intercambiador puede ser regulado por la cantidad de exceso de aire en la cámara de combustión, el cual junto con el flujo de gas combustible es uno de los parámetros preponderantes en

cuanto se refiere a hallar un valor de temperatura de la llama adiabática adecuado.

- Para operar de manera adecuada el horno se ha comprobado de que se necesita de por lo menos cuatro personas, las cuales deben estar distribuidas de manera adecuada: tres en la piquera de sangrado para el picado y colado del metal fundido y una en la piquera de escoriado para controlar el flujo de escoria en la misma y para la colocación de las cargas.
- De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el diseño y los parámetros de operación del horno de cubilote, podemos decir que el comportamiento de este es el adecuado, ya que el hierro gris obtenido se halla dentro de la calidad requerida.

8.2 RECOMENDACIONES

- Es importante que el primer hierro fundido se lo deje salir libremente hasta que este sea lo más fluido posible, durante este tiempo se lograra que el crisol se caliente para las próximas coladas e impedir que así se forme un anillo de metal en el fondo de la solera.
- Cuando se opera con aire frío, o si no se dispone de un tiempo adecuado de calentamiento del horno, es indispensable disponer de lanzas oxígeno listas, ya que en las primeras picadas el metal frío del fondo de la solera tiende a solidificarse en la salida de la piquera de sangrado, hecho por el cual se pica con oxígeno para vencer este inconveniente.
- Es aconsejable que después de cada periodo de operación del horno, se dé el mantenimiento adecuado al revestimiento refractario del interior de la cámara de combustión del mismo y de las piqueras de sangrado y escoriado, ya que estas tienden a arruinarse durante la operación del equipo.
- Es adecuado encender la cámara de calentamiento de aire del intercambiador de calor, unos 5 a 10 minutos antes de iniciar el soplo de aire al interior del horno para obtener el máximo rendimiento de fusión.

- Antes de empezar a operar el horno es aconsejable cubrir la cimentación con una capa de arena de espesor adecuado, ya que si el metal caliente entra en contacto, esta puede resquebrajarse o reventar, causando posibles daños a los cimientos del horno.
- Después de cada periodo de operación y cuando se desfonda el horno, seguidamente se debe elevar el cilindro superior para evitar que el acople refractario se adhiera al cilindro inferior debido al metal líquido remanente que se encuentra en las paredes.
- Se ha notado que uno de los parámetros importantes durante la operación del horno, es disponer de las herramientas adecuadas para el sangrado y picado del metal, y así evitar inconvenientes durante el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY, El Horno de Cubilote y su Operación, México, Continental, 1974.
2. CAPELO E., Tecnología de Fundición, 3^{er} Edición, Editorial Gustavo Gili, Barcelona, 1974.
3. C. SILVA. Modelo matemático para la disolución del silicio en el horno de cubilote, Bogotá, 1995
4. DURIEUX P, RETAILLIAU F, Enciclopedia de la construcción, Editores Técnicos Asociados, Barcelona, 1983.
5. GREGORING R, Enciclopedia de Tecnología Química, Urmo, España, 1979
6. INCROPERA F, DEWITT D, Fundamentos de Transferencia de Calor, 4^{ta} Edición, Pearson Education, México, 1999.
7. J. DECLERY. "Chemical reactions in cupola practice", the foundry. vol. 32. USA.
8. LATORRE R, Diseño y construcción de un cubilote experimental, Quito, E.P.N, 1975.
9. LEON J, Diseño y Calculo de Recipientes sujetos a Presión, España, 2001
10. MARQUEZ M, Combustión y quemadores, Ed. Marcobombo, España, 1994
11. MARKS, "Manual del Ingeniero Mecánico", Editorial McGraw-Hill, México, 1993.

12. RAMOS B, GUERRA Y, Metodología para evaluar los hornos de Cubilote, El Cid Editor, Argentina, 2007.
13. SHIGLEY J. y LARRY M., "Diseño de Ingeniería Mecánica", 5ta Edición, Editorial McGraw-Hill, México, 1989.
14. VARGAS, J., "Fundamentos y Ejercicios del Dibujo Mecánico", EPN, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito-Ecuador, 2005.
15. VETICHKA, Fundamentos Teóricos de la Producción por Fundición, Editorial Escuela Superior, Kiev, 1981.
16. TRINKS W, MAWHINNEY M, Hornos Industriales, Bilbao, Urmo, 1971.
17. <http://onsager.unex.es/Apuntes/Termo/Tablas-Tema-3.pdf>
18. <http://www.monografias.com/trabajos41/hornos-de-cubilote/hornos-de-cubilote.shtml>
19. <http://www.editum.org/Hornos-de-cubilote-p-1285.html>
20. <http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/elemmaq/teorico/TornilloDePotencia2007.PDF>

ANEXOS

ANEXO A

PROPIEDADES DE LOS LADRILLOS Y MORTEROS REFRACTARIOS

LADRILLOS DE ARCILLA REFRACTARIA

TABLA "A"				
LADRILLOS DE ARCILLA REFRACTARIA				
CLASE*	MARCA	CPE⁽¹⁾	TEMP⁽²⁾ TIPICA TRABAJO	USOS Y APLICACIONES⁽³⁾
ALTA REFRACTARIEDAD	KERO	31-31 1/2	1450	Cámaras de tostación y secado, calderos, crisoles, cucharas metalúrgicas.
	REPSA	31 ½	1500	Cámaras de combustión, caladeros incineradores, hornos metalúrgicos, hornos de vidrio, de cerámica y enlozado.
	REPSA 18	31 ½	1500	Cubilotes, hornos de cal, hornos de cemento, hornos metalúrgicos.
SUPER REFRACTARIEDAD	REPSA ALAMO	33-34	1600	Hornos rotativos, hornos de cal, hornos de cemento, de vidrio, de enlozado, recuperadores de calor.
	REPSA VARNON	33-34	1600	Hornos de cal, hornos de cemento, de vidrio, regeneradores y recuperadores de calor.
	REPSA ALADIN	33-34	1650	Hornos metalúrgicos, cucharas de trasvase, cámaras de tostado.

* Según norma ASTM C-27

(1) Cono Pirométrico Equivalente

(2) Temperatura aplicada a una sola cara del ladrillo, en °C

(3) Para un mejor uso se recomienda consultar con SERVICIOS TECNICOS de REPSA

LADRILLOS REFRACTARIOS CON ALTO CONTENIDO DE ALUMINA

TABLA "B"				
LADRILLOS REFRACTARIOS DE ALTA ALUMINA				
CLASE*	MARCA	CPE⁽¹⁾	TEMP⁽²⁾ TIPICA TRABAJO	USOS Y APLICACIONES⁽³⁾
50% Al ₂ O ₃	REPSA DIALITE	34	1600	Paredes de calderos, regeneradores y recuperadores de calor, horno de cal y cemento y vidrio.
	REPSA 61-65	34	1600	Cucharas para trasvase de acero, carros torpedos, artesas de colada continua.
60% Al ₂ O ₃	REPSA ANCHOR	35	1700	Hornos rotatorios de cal y cemento, calderos bagaceros, hornos metalúrgicos de recalentamiento.
	REPSA UFALA	35	1700	Altos hornos y estufas de altos hornos, carros torpedos, tanques de vidrio, hornos de inducción.
	REPSA ALADIN 60	35	1700	Cucharas de trasvase de acero líquido.
70% Al ₂ O ₃	REPSA ALUSITE	36	1750	Zonas de sinterización de hornos de cemento y de calcinación de hornos de cal, bóvedas de hornos eléctricos, hornos de recalentamiento.
	REPSA ALUSA	36	1750	Bóvedas de hornos eléctricos de arco, cucharas metalúrgicas de trasvase, hornos rotatorios.
	REPSA ALADIN 70	36	1750	Cucharas de trasvase de acero líquido.
80% Al ₂ O ₃	REPSA CORALITE	37	1770	Hornos rotatorios de cemento, metalúrgicos, bóvedas de horno eléctricos de arco.
	REPSA ALADIN 80	37	1770	Cucharas de trasvase de acero líquido.
85% Al ₂ O ₃	REPSA 9 - 61		1800	Hornos de fundición de aluminio, reactores para negro e humo y reactores para fertilizantes sintéticos.
	REPSA CORAL BP		1800	Hornos de fundición y refinación de aluminio, hornos eléctricos de inducción con y sin núcleo.
90% Al ₂ O ₃	REPSA KORUNDAL XD		1850	Altos hornos, artesas de colada continua, hornos de inducción sin núcleo, regeneradores de hornos de vidrio y hornos de negro de humo.

* Según norma ASTM C-27

(1) Cono Pirométrico Equivalente

(2) Temperatura aplicada a una sola cara del ladrillo, en °C

(3) Para un mejor uso se recomienda consultar con SERVICIOS TECNICOS de REPSA

LADRILLOS REFRACTARIOS DE SILICE

TABLA "C"			
LADRILLOS REFRACTARIOS DE SILICE			
CLASE	MARCA	TEMP⁽¹⁾ TIPICA DE TRABAJO	USOS Y APLICACIONES⁽²⁾
ALTA REFRACTARIEDAD	REPSA STAR	1700	Hornos de vidrio con y sin recuperación, hornos eléctricos, operaciones metalúrgicas ácidas reverberos de cobre. Baterías de coquización.
SUPER REFRACTARIEDAD	REPSA VEGA	1705	Super estructura y bóveda de hornos de vidrio, reverberos de cobre, hornos eléctricos de arco.

* Según norma ASTM C-27

(1) Aplicada a una cara de ladrillo en °C

(2) Para un mejor uso se recomienda consultar con SERVICIOS TECNICOS de REPSA

LADRILLOS REFRACTARIOS BASICOS.

TABLA "D"				
LADRILLOS REFRACTARIOS				
CLASE*	MARCA	TIPO	%Mgo MINIMO	USOS Y APLICACIONES⁽²⁾
MAGNESITA	REPSA HARCON	98	96	Paredes superiores de hornos eléctricos de arco.
	REPSA NULINE	98	96	Revestimiento de hornos convertidores L-D, zonas más agresivas de hornos eléctricos de arco.
	REPSA OXILINE KLP ⁽³⁾	98	96	Revestimiento de hornos convertidores L-D
	REPSA OXIBAK H	98	96	Protección de seguridad y hornos convertidores L-D regeneradores de calor, hornos eléctricos de arco.
	REPSA REPMAG B	95	91	Paredes inferiores sub-solera y línea de escoria de hornos eléctricos de acería, reverberos de cobre.
	REPSA MAGNEL: ⁽⁴⁾	90	86	Zona de clínquerización de hornos rotatorios de cemento
MAGNESITA-CROMO	REPSA NUCON 80 ⁽⁵⁾	80	75	Puntos calientes de hornos eléctricos de arco, zona de clínquerización de hornos rotativos de cemento.

	REPSA MAGNEX H ⁽⁵⁾	70	65	Uso general en hornos siderúrgicos, paredes superiores de hornos eléctricos de arco.
	REPSA MAGNEX ⁽⁵⁾	60	55	Bóvedas de reverberos de cobre.
	REPSA NUCON 60 ⁽⁵⁾	60	55	Paredes superiores y bóvedas de hornos eléctricos de arco, zona de clinquerización de hornos rotatorios de cemento, hornos reverberos y convertidores de cobre
	REPSA NUCON 50 ⁽⁵⁾	50	45	Paredes y emparrillado de regeneradores de hornos de vidrio; reverberos, convertidores de cobre.
CROMO-MAGNESITA	REPSA CHROMEX BG	40	35	Paredes de regeneradores de hornos de vidrio, hornos reverberos y convertidores de cobre.
	REPSA CB-20	30	25	Uso general de ladrillos básicos, hornos metalúrgicos de cobre, plomo, zinc, fundiciones no ferrosas.
	REPSA CHROMEX	30	25	Fundiciones de metales no ferrosos, hornos de recalentamiento, regeneradores de hornos de vidrio.
CROMO	REPSA CHROMEX S		27 ⁽⁴⁾	Regeneradores de hornos de vidrio, fogón de calderos bagaceros y estructura de calderos recuperadores de calor.

* Clasificación y contenido mínimo de MgO según norma ASTM C-455

- (1) Contenido mínimo de Cr₂O₃ en el mineral cromita.
- (2) Par un mejor uso se recomienda consultar con SERVICIOS TECNICOS de REPSA.
- (3) Ladrillos Magnesita - Carbón.
- (4) Ladrillos Magnesita - Espinela.
- (5) Ladrillo también fabricados en la versión "METALKASE" (con funda metálica).

MORTEROS REFRACTARIOS

TABLA "E"			
MORTEROS REFRACTARIOS			
MARCA	MATERIAL BASE	CANTIDAD⁽¹⁾ REQUERIDA: Kg	PARA USARSE CON *
MORTEROS DE FRAGUA			
REPSA TIERRA REFRACTARIA	ARCILLA	135	A
REPSA BOND CLAY	ARCILLA	135	A
REPSA MORTERO REFRACTARIO	ARCILLA	135	A
REPSA MORTERO SUPER	ARCILLA	135	B
REPSA ANKORITE 65	ALUMINA	160	C
REPSA ANKORITE 80	ALUMINA	170	C
REPSA MORTERO DE SÍLICE	SÍLICE	135	D
REPSA VEGA BOND	SÍLICE	135	D
REPSA MORTERO DE CROMO	CROMITA	270	D-E-F
REPSA MORTERO DE MAGNESITA	MAGNESITA	270	E-F
MORTEROS DE FRAGUA EN FRIO			
REPSA PENSEAL	ARCILLA	135	A
REPSA HARWACO BOND	ALUMINA	135	A-B-C
REPSA FIREBOND	SÍLICE	135	A-D
REPSA CORAL BOND	ALUMINA	140	C
REPSA THERMOLITH	CROMITA	270	A-B-C-D-E-F-
REPSA MAGNABOND	MAGNESITA	270	E-F

(1) Por cada 100 ladrillos normales de 9x4 1/2 x 2 1/2

*A= Ladrillos de arcilla altamente refractaria.

B= Ladrillos de arcilla super refractaria.

C= Ladrillos de alta alúmina

D= Ladrillos de Sílice

E= Ladrillos de magnesita y magnesita -cromo

F= Ladrillos de cromo y cromo-magnesita.

ANEXO B

CATÁLOGOS

B1: PERFILES ESTRUCTURALES



DIPAC
PRODUCTOS DE ACERO



PERFILES ESTRUCTURALES CORREAS "G"

Especificaciones Generales

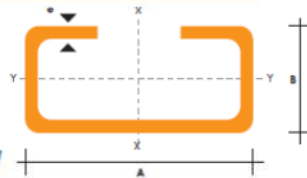
Norma	INEN 1 623: 2000
Otras calidades	Previa consulta
Largo normal	6mts
Otros largos	Previa consulta
Espesores	Desde 1,5mm hasta 12mm
Acabado	Natural
Otro acabado	Previa consulta



CORREAS "G"

DIMENSIONES				PESOS			PROPIEDADES					
A	B	C	e	6metros	1metro	SECCION	EJE X-X			I	W	I
mm	mm	mm	mm	Kg	Kg	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm
60	30	10	1,5	9.19	1.53	1.95	11.02	3.67	2.38	2.43	1.25	1.12
60	30	10	2	11.94	1.99	2.54	13.98	4.66	2.35	3.01	2.85	1.09
60	30	10	3	16.98	2.83	3.61	18.9	6.3	2.29	3.87	3.69	1.04
80	40	15	1,5	13.18	2.20	2.80	27.43	6.86	3.13	6.39	2.53	1.51
80	40	15	2	16.68	2.78	3.54	35.30	8.81	3.16	8.07	3.18	1.51
80	40	15	3	24.06	4.01	5.11	49.00	12.30	3.10	10.80	4.27	1.46
100	50	15	2	20.40	3.40	4.34	69.20	13.80	4.00	15.00	4.57	1.86
100	50	15	3	29.70	4.95	6.31	97.80	19.60	3.94	20.50	6.25	1.80
100	50	20	4	40.26	6.71	8.55	126.70	25.34	3.85	28.50	9.05	1.83
100	50	25	5	51.12	8.52	10.86	152.51	30.50	3.75	36.52	12.09	1.83
125	50	15	2	22.80	3.80	4.84	116.00	18.60	4.91	16.20	4.69	1.83
125	50	15	3	33.24	5.54	7.06	165.00	26.50	4.84	22.20	6.43	1.77
125	50	20	4	44.99	7.49	9.55	217.00	34.70	4.77	30.90	9.32	1.80
125	50	25	5	57.00	9.50	12.11	264.32	42.29	4.67	39.88	12.46	1.82
125	50	30	6	70.78	11.78	14.73	307.13	49.14	4.56	48.69	15.81	1.81
150	50	15	2	25.14	4.14	5.34	179.00	23.80	5.79	17.10	4.78	1.79
150	50	15	3	36.78	6.13	7.81	255.00	34.00	5.72	23.50	6.56	1.73
150	50	20	4	49.68	8.28	10.50	337.00	44.90	5.65	32.90	9.52	1.77
150	75	25	5	74.70	12.45	15.86	545.36	72.71	5.86	117.22	24.17	2.72
150	75	30	6	93.42	15.57	19.23	641.40	85.52	5.77	114.47	30.57	2.74
175	50	15	2	27.48	4.58	5.84	258.00	29.40	6.64	17.90	4.85	1.75
175	50	15	3	40.32	6.72	8.56	369.00	42.20	6.57	24.60	6.66	1.70
175	75	25	4	65.40	10.9	13.90	653.00	74.60	6.84	105.00	20.90	2.75
175	75	25	5	80.58	13.43	17.11	785.95	89.82	6.78	123.88	24.63	2.69
175	75	30	6	100.74	16.79	20.73	929.39	106.22	6.70	152.84	31.19	2.72
200	50	15	2	29.94	4.99	6.36	356.00	35.60	7.56	18.60	4.85	1.72
200	50	15	3	43.86	7.31	9.31	507.00	50.70	7.45	25.10	6.57	1.65
200	75	25	4	70.20	11.70	14.90	895.00	89.50	7.64	110.00	21.30	2.71
200	75	25	5	86.52	14.42	18.37	1080.00	108.00	7.67	129.62	25.02	2.66
200	75	30	6	108.00	18.00	22.23	1282.17	128.21	7.59	160.15	31.73	2.68
250	75	25	4	79.80	13.30	16.90	1520.00	122.00	9.48	118.00	21.70	2.64
250	100	25	5	109.98	18.33	23.36	2219.24	177.54	9.75	285.26	39.24	3.49
250	100	30	6	135.48	22.58	28.23	2647.38	219.79	9.68	383.54	55.58	3.69
300	100	30	4	100.80	16.80	21.30	2860.00	191.00	11.60	274.00	38.30	3.58
300	100	35	5	126.60	21.10	26.90	3560.00	237.00	11.50	351.00	49.90	3.62
300	100	35	6	154.74	25.79	31.80	4170.00	278.00	11.40	404.00	57.40	3.56

También en galvanizado e inoxidable

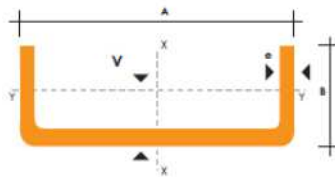




PERFILES ESTRUCTURALES CANALES "U"

Especificaciones Generales

Norma	INEN 1 623: 2000
Otras calidades	Previa consulta
Largo normal	6mts
Otros largos	Previa consulta
Espesores	Desde 1.5mm hasta 12mm
Acabado	Natural
Otro acabado	Previa consulta



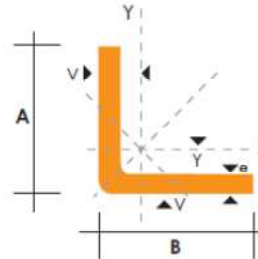
DIMENSIONES			PESOS				TIPOS							
A	B	e	6 metros		SECCION	EJE X-X			EJE Y-Y					
mm	mm	mm	kg	kg	cm ²	I	W	I	I	W	I	x		
						cm ⁴	cm ³	cm	cm ⁴	cm ³	cm	cm		
40	25	2	7.86	1.31	1.67	4.20	2.10	1.59	1.06	0.62	0.80	0.79		
50	25	2	8.82	1.47	1.87	7.06	2.83	1.94	1.13	0.63	0.78	0.72		
50	25	3	12.72	2.12	2.70	9.70	3.88	1.89	1.57	0.91	0.76	0.77		
60	30	2	10.62	1.77	2.26	12.50	4.16	2.35	2.00	0.93	0.94	0.85		
60	30	3	15.54	2.59	3.30	17.50	5.85	2.31	2.84	1.34	0.93	0.89		
60	30	4	19.80	3.30	4.20	21.10	7.03	2.24	3.51	1.72	0.91	0.95		
80	40	2	14.46	2.41	3.07	30.80	7.71	3.17	4.89	1.68	1.26	1.09		
80	40	3	21.24	3.54	4.50	43.90	11.00	3.12	7.01	2.45	1.25	1.14		
80	40	4	27.66	4.61	5.87	55.40	13.90	3.07	8.92	3.17	1.23	1.19		
80	40	5	34.44	5.74	7.18	65.49	16.37	3.02	10.62	3.83	1.21	1.23		
80	40	6	40.44	6.74	8.42	74.18	18.54	2.96	12.10	4.44	1.19	1.28		
100	50	2	18.24	3.04	3.87	61.50	12.30	3.99	9.72	2.66	1.58	1.34		
100	50	3	26.88	4.48	5.70	88.50	17.70	3.94	14.10	3.89	1.57	1.39		
100	50	4	35.22	5.87	7.47	113.00	22.60	3.89	18.10	5.07	1.56	1.44		
100	50	5	43.20	7.20	9.18	135.00	27.10	3.84	21.80	6.19	1.53	1.48		
100	50	6	51.96	8.66	10.82	155.26	31.05	3.79	25.14	7.24	1.52	1.53		
100	60	4	38.28	6.38	8.13	128.00	25.60	3.97	29.70	7.17	1.91	1.86		
100	60	5	46.86	7.81	9.95	152.00	30.50	3.91	35.70	8.76	1.90	1.92		
100	60	6	57.72	9.62	12.02	181.80	36.36	3.89	42.25	10.38	1.87	1.93		
100	60	8	74.40	12.40	15.50	22.60	44.52	3.78	52.47	13.32	1.83	2.06		
125	50	2	20.58	3.43	4.37	103.60	16.50	4.86	10.40	2.74	1.54	1.20		
125	50	3	30.42	5.07	6.45	149.00	23.90	4.81	15.10	4.02	1.53	1.24		
125	50	4	39.90	6.65	8.47	192.00	30.70	4.76	19.40	5.24	1.51	1.29		
125	50	5	49.14	8.19	10.40	231.00	37.00	4.71	23.40	6.40	1.50	1.34		
125	50	6	59.16	9.86	12.32	266.00	42.67	4.65	27.19	7.51	1.48	1.38		
125	60	5	53.82	8.97	11.43	266.98	42.71	4.83	39.36	9.15	1.86	1.70		
125	60	6	64.92	10.82	13.52	309.25	49.48	4.78	45.85	10.78	1.84	1.75		
125	60	8	84.00	14.00	17.50	383.34	61.33	4.68	57.30	13.94	1.80	1.81		
125	80	6	76.44	12.74	15.92	394.28	63.08	4.97	102.94	19.10	2.54	2.61		
125	80	8	99.30	16.55	20.69	493.02	78.88	4.88	130.27	24.30	2.50	2.64		
125	80	10	120.96	20.16	25.21	576.62	92.25	4.78	154.19	29.31	2.47	2.74		
150	50	2	22.92	3.82	4.87	159.00	21.10	5.71	10.90	2.80	1.50	1.09		
150	50	3	33.96	5.66	7.20	230.00	30.70	5.65	15.90	4.11	1.49	1.13		
150	50	4	44.64	7.44	9.47	297.00	39.60	5.60	20.50	5.36	1.47	1.17		
150	50	5	55.02	9.17	11.70	359.00	47.90	5.55	24.80	6.55	1.46	1.22		
150	50	6	66.36	11.06	13.82	416.69	55.55	5.49	28.80	7.70	1.44	1.26		
150	60	5	59.70	9.95	12.68	441.85	54.91	5.7	41.72	9.40	1.81	1.56		
150	60	6	72.12	12.02	15.02	478.93	63.85	5.64	48.70	11.07	1.80	1.60		
150	60	8	93.60	15.60	19.50	598.74	79.83	5.54	61.15	14.35	1.77	1.74		
150	80	6	83.64	13.94	17.42	603.42	80.45	5.88	109.91	19.73	2.51	2.43		
150	80	8	108.90	18.15	22.69	760.23	101.36	5.78	139.53	25.09	2.47	2.44		
150	80	10	132.96	22.16	27.71	896.29	119.50	5.68	165.85	30.37	2.44	2.54		

También en galvanizado e inoxidable



PERFILES ESTRUCTURALES
ANGULOS "L" DOBLADO
Especificaciones Generales

- Norma** INEN 1 623: 2000
- Otras calidades** Previa consulta
- Largo normal** 6,00 m
- Otros largos** Previa consulta
- Espesores** Desde 1,5 hasta 12 mm
- Acabado** Natural
- Otro acabado** Previa consulta



DIMENSIONES			PESOS			EJE X-X = EJE Y-Y					
A	B	e	6 metros	1 metro	SECCION	EJE X-X		EJE Y-Y		EJE U-U	EJE V-V
mm	mm	mm	Kg	Kg	cm ²	I	W	i	X=Y	i	i
						cm ⁴	cm ³	cm	cm	cm	cm
25	25	2	4.38	0.73	0.93	0.57	0.32	0.78	0.72	0.99	0.47
25	25	3	6.36	1.06	1.35	0.79	0.44	0.76	0.77	0.98	0.44
30	30	2	5.34	0.89	1.13	1.00	0.46	0.94	0.84	1.20	0.58
30	30	3	7.80	1.30	1.65	1.41	0.67	0.92	0.89	1.18	0.55
30	30	4	10.08	1.68	2.14	1.80	0.88	0.92	0.94	1.17	0.52
40	40	2	7.20	1.20	1.53	2.44	0.84	1.26	1.09	1.61	0.78
40	40	3	10.62	1.77	2.25	3.50	1.22	1.25	1.14	1.59	0.76
40	40	4	13.86	2.31	2.94	4.46	1.58	1.23	1.19	1.58	0.78
40	40	5	19.62	2.82	3.59	5.31	1.91	1.22	1.23	0.73	0.73
50	50	2	9.12	1.52	1.93	4.86	1.33	1.58	1.34	2.01	0.98
50	50	3	13.44	2.24	2.85	7.03	1.95	1.57	1.39	2.00	0.96
50	50	4	17.64	2.94	3.74	9.04	2.53	1.56	1.43	1.98	0.94
50	50	5	21.60	3.60	4.59	10.88	3.09	1.54	1.48	1.97	0.93
50	50	6	25.92	4.32	5.40	12.57	3.62	1.53	1.53	1.96	0.90
60	60	3	16.26	2.71	3.45	12.37	2.84	1.89	1.64	2.41	1.16
60	60	4	21.36	3.56	4.54	16.00	3.71	1.88	1.68	2.39	1.15
60	60	5	26.34	4.39	5.59	19.40	4.54	1.86	1.73	2.38	1.13
60	60	6	31.68	5.28	6.60	22.56	5.35	1.85	1.78	2.37	1.11
60	60	8	41.04	6.84	8.55	28.21	6.85	1.82	1.88	2.34	1.05
75	75	3	19.56	3.26	4.35	24.60	4.48	2.38	2.01	3.02	1.48
75	75	4	27.06	4.51	5.74	32.02	5.88	2.36	2.06	3.00	1.45
75	75	5	33.42	5.57	7.09	39.08	7.25	2.35	2.11	2.99	1.43
75	75	6	40.32	6.72	8.40	45.76	8.57	2.33	2.16	2.97	1.40
75	75	8	52.56	8.76	10.95	58.03	11.05	2.30	2.25	2.95	1.37
75	75	10	64.92	10.82	13.36	68.89	13.38	2.27	2.35	2.92	1.32
80	80	4	28.92	4.82	6.14	39.10	6.72	2.52	2.18	3.21	1.56
80	80	5	35.76	5.96	7.59	47.79	8.28	2.51	2.23	3.20	1.54
80	80	6	43.20	7.20	9.00	56.05	9.80	2.49	2.28	3.18	1.51
80	80	8	56.40	9.40	11.75	71.32	12.67	2.46	2.37	3.16	1.46
80	80	10	68.94	11.49	14.36	84.94	15.36	2.43	2.47	3.13	1.43
80	80	12	81.78	13.63	16.83	97.05	17.87	2.40	2.57	3.10	1.38

También en galvanizado e inoxidable - Medidas Especiales Bajo Pedido.

B2: PLANCHAS



PLANCHAS

**PLANCHAS
PL**



REDUCCIÓN DE FRACCIONES DE PULGADAS A MILIMETROS		
PULGADAS	MILIMETROS	PULGADAS MILIMETROS
1/128	= 0.20	25/64 = 9.92
1/64	= 0.40	13/32 = 10.32
3/128	= 0.60	27/64 = 10.72
1/40	= 0.64	7/16 = 11.11
1/32	= 0.79	29/64 = 11.51
1/25	= 1.02	15/32 = 11.91
3/64	= 1.19	31/64 = 12.30
1/20	= 1.27	1/2 = 12.70
1/16	= 1.59	33/64 = 13.10
5/64	= 1.98	17/32 = 13.49
3/32	= 2.38	35/64 = 13.89
7/64	= 2.78	9/16 = 14.29
1/8	= 3.18	37/64 = 14.68
9/64	= 3.57	19/32 = 15.08
5/32	= 3.97	39/64 = 15.48
11/64	= 4.37	5/8 = 15.88
3/16	= 4.76	41/64 = 16.27
13/64	= 5.16	21/32 = 16.67
7/32	= 5.56	46/64 = 17.07
15/64	= 5.95	11/16 = 17.46
1/4	= 6.35	45/64 = 17.86
17/64	= 6.75	23/32 = 18.26
9/32	= 7.14	47/64 = 18.65
19/64	= 7.54	3/4 = 19.05
5/16	= 7.94	49/64 = 19.45
21/64	= 8.33	25/32 = 19.84
11/32	= 8.73	51/64 = 20.24
23/64	= 9.13	13/16 = 20.64
3/8	= 9.53	53/64 = 21.03
		27/32 = 21.43
		55/64 = 21.83
		7/8 = 22.23
		57/64 = 22.62
		29/32 = 23.02
		59/64 = 23.42
		15/16 = 23.81
		61/64 = 24.21
		61/32 = 24.61
		63/64 = 25.00
		1 = 25.40
		11/10 = 27.00
		11/8 = 28.60
		18/16 = 30.20
		11/4 = 31.70
		15/16 = 33.30
		13/8 = 34.90
		17/16 = 36.50
		11/2 = 38.10
		19/10 = 39.70
		15/8 = 41.30
		111/16 = 42.90
		13/4 = 44.40
		113/16 = 46.00
		17/8 = 47.60
		115/16 = 49.20
		2 = 50.80

DIMENSIONES EN (mm)			PESOS
ANCHO	LARGO	ESPESOR	KG
1220	2440	2	46.74
1220	2440	3	70.10
1220	2440	4	93.47
1500	2440	4	114.92
1220	2440	5	116.84
1500	2440	5	143.66
1800	2440	5	172.39
1220	2440	6	140.21
1500	2440	6	172.39
1800	2440	6	206.86
1220	2440	8	186.94
1500	2440	8	229.85
1800	2440	8	275.82
1220	2440	10	233.68
1500	2440	10	287.31
1800	2440	10	344.77
1220	6000	12	689.54

METODO PRACTICO PARA CALCULAR PESO DE LAS PLANCHAS DE ACERO

NOMENCLATURA

- L = Largo (mm)
- A = Ancho (mm)
- E = Espesor (mm)
- Peso = Kgs.

$$\text{Peso} = \frac{L \times A \times E \times 7,85}{1,000.00}$$

Ejemplo: $(L = 1220\text{mm} \times A = 2440 \text{ mm} \times E = 1,0\text{mm}) \times 7,85 = 23.368 \text{ Kg}$
1,000.00

B3: TUBOS POSTE



DIPAC[®]
PRODUCTOS DE ACERO

TUBO POSTE

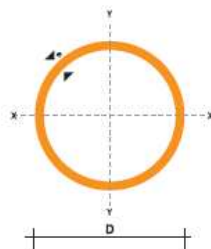
TUBO POSTE Cerramientos, Estructuras y Funiculares

Especificaciones Generales

Norma	ASTM A-500
Recubrimiento	Galvanizado
Largo normal	6 mts.
Otros largos	Previa Consulta
Dimensiones	Desde 1/2" a 4"
Espesor	Desde 1,8mm a 2,0mm



DIMENSIONES				PROPIEDADES			
DIAMETRO EXTERIOR		ESPESOR	PESO	AREA	I	W	I
D	e	P	A	I	W	I	
Pulg.	mm	mm	Kg/m	cm ²	cm ³	cm ³	cm
1"	25.40	1.80	1.09	1.34	0.93	0.73	0.83
1"	25.40	2.00	1.21	1.47	1.01	0.79	0.83
1 1/4"	31.75	1.80	1.37	1.69	1.90	1.20	1.06
1 1/4"	31.75	2.00	1.52	1.87	2.07	1.30	1.05
1 1/2"	38.10	1.80	1.65	2.05	3.38	1.78	1.28
1 1/2"	38.10	2.00	1.84	2.27	3.70	1.94	1.28
1 3/4"	44.45	1.80	1.98	2.41	5.48	2.47	1.51
1 3/4"	44.45	2.00	2.20	2.67	6.01	2.70	1.50
1 7/8"	47.63	1.80	2.11	2.59	6.80	2.86	1.62
1 7/8"	47.63	2.00	2.34	2.87	7.46	3.13	1.61
2"	50.80	1.80	2.22	2.77	8.32	3.27	1.73
2"	50.80	2.00	2.48	3.07	9.13	3.59	1.73
2 3/8"	60.33	2.00	2.92	3.67	15.58	5.17	2.06
2 1/2"	63.50	2.00	3.09	3.86	18.27	5.75	2.17
2 7/8"	73.03	2.00	3.56	4.46	28.14	7.71	2.51
3"	88.90	2.00	4.35	5.46	51.54	11.60	3.07
4"	114.30	2.00	5.67	7.06	111.23	19.46	3.97



NOMENCLATURA

- A**= Área de la selección transversal del tubo, cm²
- I**= Momento de inercia de la sección, cm⁴
- W**= Módulo resistente de la sección, cm³
- I**= Radio de giro de la sección, cm

B4: TUBERÍA PARA VAPOR



TSC

TUBERIA PARA VAPOR TUBERIA SIN COSTURA Y ACCESORIOS CEDULA 40

Especificaciones Generales

Norma	ASTM A 53 GR B para conducción de fluidos
Recubrimiento	Negro o galvanizado
Largo normal	6,00 m.
Otros largos	Prevía Consulta
Acabado	Natural
Otro acabado	Prevía Consulta

Resistencia Mecánica

Resistencia a la tracción	60000 psi (42,2 Kg F/mm ²)
Límite de elasticidad	35000 psi (24,6 Kg F/mm ²)
Alargamiento	0,5%



DIAMETRO NOMINAL	EXTERIOR		ESPESOR		PRESION/PRUEBA		PESO kg/mt
	mm	pulg	e	pulg	kg/cm ²	lb/pulg ²	
			mm				
1/4"	13.70	0.54	2.24	0.08	49	700	0.63
3/8"	17.10	0.37	2.81	0.09	49	700	0.85
1/2"	21.30	0.84	2.77	0.10	49	700	1.27
3/4"	26.70	1.05	2.87	0.11	49	700	1.68
1"	33.40	1.31	3.38	0.13	49	700	2.50
1 1/4"	42.20	1.66	3.56	0.14	91	1300	3.38
1 1/2"	48.30	1.90	3.68	0.14	91	1300	4.05
2"	60.30	2.37	3.91	0.15	176	2500	5.44
2 1/2"	73.00	2.87	5.16	0.20	176	2500	8.62
3"	88.90	3.50	5.49	0.21	176	2500	11.29
4"	114.30	4.50	6.02	0.23	155	2210	16.07
5"	141.30	5.56	6.55	0.25	137	1950	21.78
6"	168.30	6.62	7.11	0.28	125	1780	28.26
8"	219.10	8.62	8.18	0.32	110	1570	42.53
10"	273.00	10.75	9.27	0.36	101	1430	60.29
12"	323.80	12.75	10.31	0.40	94	1340	79.65

Composición Química	Máximo porcentaje
Carbono	0.3
Manganeso	1.2
Fósforo	0.05
Azufre	0.06

B5: PROPIEDADES ACERO SAE-1018.

PALMEXICO	1018
AISI, SAE, ASTM, NMX.	1018
UNS	G10180

Análisis químico según Norma Nacional NMX B-301 (% en peso):

C	Si	Mn	P máx..	S máx..
0.15-0.20	0.15-0.35	0.60-0.90	0.040	0.050

Tipo: Acero de bajo contenido de carbón

Formas y Acabados: Barra redonda, cuadrada, hexagonal y solera, laminadas o forjadas en caliente, estiradas en frío y peladas o maquinadas.
Placa laminada caliente.

Características: Entre los aceros de bajo carbono, el 1018 es el más versátil por sus características; análisis controlado, mejores propiedades mecánicas que otros aceros del mismo tipo por su alto contenido de manganeso, buena soldabilidad, buena maquinabilidad. Cuando se requiere una superficie muy dura pero un centro tenaz, este acero cementado cumple perfectamente. Estirado en frío mejora sus valores de resistencia mecánica y su maquinabilidad, haciéndose muy popular para un sin número de aplicaciones.

Aplicaciones: Se utiliza en la fabricación de partes para maquinaria; automotriz, línea blanca, equipo de proceso, etc.; que no estén sujetas a grandes esfuerzos. Por su ductilidad es ideal para procesos de transformación en frío como doblar, estampar, recalcar, etc.. Sus usos típicos son flechas, tornillos, pernos, sujetadores, etc., ya cementado en engranes, piñones, etc..

Tratamientos térmicos recomendados (valores en °C) :

FORJADO	NORMALIZADO	RECOCIDO		TEMPLADO	REVENIDO	PUNTOS CRÍTICOS APROX.	
		ABLANDAMIENTO	REGENERACIÓN			Ac1	Ac3
1100-1250	870-900	650-700 enfriar al aire	850-890 enfriar en horno	Cementar 925	150-250	724	840

Propiedades mecánicas mínimas estimadas según SAE J1397:

TIPO DE PROCESO Y ACABADO	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN			LÍMITE DE FLUENCIA			ALARGAMIENTO EN 2" %	REDUCCIÓN DE ÁREA %	DUREZA BRINELL	RELACIÓN DE MAQUINABILIDAD 1212 EF = 100%
	MPa (kgf/mm2)	Ksi	Ksi	MPa (kgf/mm2)	Ksi	Ksi				
CALIENTE Y MAQUINADO	400	41	58	220	22	32	25	50	116	70
ESTIRADO EN FRÍO	440	45	64	370	38	54	15	40	126	

ANEXO C

CARACTERISTICAS GENERALES DE CARGA Y SOPLO DE AIRE EN CUBILOTES

C1: INSTRUCCIONES GENERALES DE CARGA EN CUBILOTES

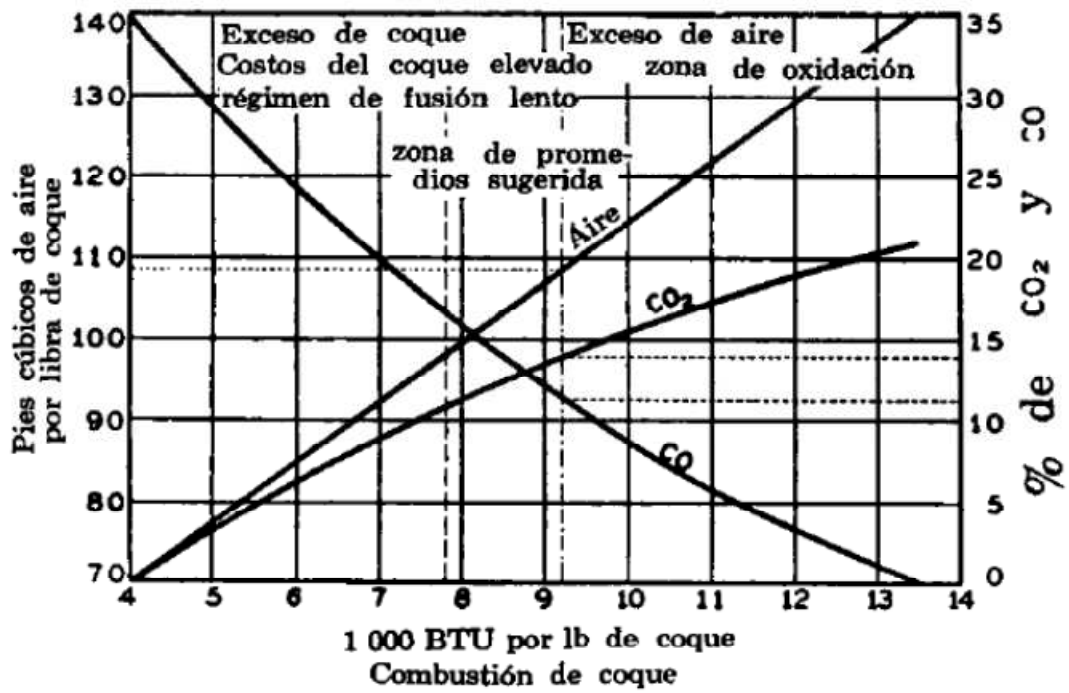
Tamaño del cubilote	Diám. coraza (mm)	Espesor del revestimiento bajo, (mm)	Diámetro interior revestimiento (mm)	Área adentro del revestimiento, (cm ²)	Producción fundida, en ton/hora, con relaciones hierro/coque de				Altura ³ de la cama arriba de los tableros (cm)	Cargas de coque y hierro kg				Fundente kg	Aire por toberas m ³ /min	Presión normal caja de viento, kg/m ² (mm agua)	Selección sugerida para el soplador		Área total de las toberas cm ²	
					de					Coque	Hierro						m ³ /min	presión desc. kg/m ²		
					6	8	10	12			6/1	8/1	10/1							12/1
0	686	114	457	1540	0.68	0.91	1.14	1.36	711-864	9	54	72	90	108	1.800	16.120	30.8	18.10	35.2	206.45
1	813	114	584	2975	0.91	1.36	1.82	2.27	914-1067	16	96	128	160	192	3.200	26.600	52.8	28.86	70.4	548.40
2	914	114	686	3690	1.59	2.05	2.50	2.96	914-1067	20	120	160	200	240	4.000	36.500	52.8	40.45	70.4	761.00
2 1/4 H	1041	178	686	3690	1.59	2.05	2.50	2.96	914-1067	20	120	160	200	240	4.000	36.500	52.8	40.45	74.4	780.00
2 1/4 L	1041	114	813	5180	2.27	2.96	3.64	4.32	1016-1168	30	180	240	300	360	6.000	51.150	61.6	56.60	70.4 ³	780.00
3	1166	178	813	5180	2.27	2.96	3.64	4.32	1016-1168	30	180	240	300	360	6.000	51.150	61.6	56.60	70.4 ³	1038.00
3 1/4	1286	178	940	6940	2.96	3.86	4.77	5.91	1016-1168	38	228	304	380	456	7.600	68.450	61.6	76.40	70.4 ³	1175.00
4	1422	178	1067	8935	3.64	5.00	6.36	7.50	1067-1219	50	300	400	500	600	10.000	82.700	70.4	97.50	88.0	1695.00
5	1600	229	1143	10255	4.08	5.67	7.26	8.82	1067-1219	59	354	472	590	708	11.800	104.000	70.4	113.00	88.0	2025.00
6	1676	229	1219	11668	5.00	6.58	8.17	9.75	1143-1295	66	396	528	660	792	15.200	116.000	79.2	127.30	105.6	2240.00
7	1829	229	1372	14785	6.36	8.40	10.42	12.48	1143-1295	84	504	672	840	1008	16.800	147.000	79.2	162.60	105.6	3010.00
8	1981	229	1524	18250	6.36	10.21	12.70	15.43	1143-1295	102	612	816	1020	1224	20.400	181.000	79.2	201.00	105.6	3520.00
9	2134	229	1676	22065	9.53	12.48	15.43	18.60	1143-1295	125	750	1000	1250	1500	25.000	218.000	79.2	243.50	105.6	4130.00
9 1/4	2296	229	1829	26258	11.12	14.75	18.40	22.24	1194-1346	148	888	1184	1480	1776	29.600	260.000	88.0	289.00	123.2	5165.00
10	2438	229	1981	30618	13.62	17.25	21.65	25.10	1194-1346	175	1050	1400	1750	2100	35.000	313.000	88.0	337.00	128.2	5925.00
11	2591	305	1981	30618	13.62	17.25	21.65	25.10	1194-1346	175	1050	1400	1750	2100	35.000	313.000	88.0	337.00	123.2	5925.00
12	2743	305	2134	35746	15.43	20.10	25.20	30.20	1194-1346	202	1212	1616	2020	2424	40.400	354.000	88.0	393.00	140.8	5545.00

C2: HOJA DE CONTROL DE CARGA EN CUBILOTES

TABLA 3. HOJA DIARIA DE CÁLCULO DE CARGAS

Mezcla No. 11	Hornada No. 9				Cubilote No. 2				Fecha 12/14/53			
Material cargado	%	kg por carga	Carbono % kg	Silicio % kg	Manganeso % kg	Azufre % kg	Fósforo % kg	%	kg	%	kg	
Lingote bajo fósforo	20	180	4.3 7.74	0.90 1.61	0.55 0.99	0.03 0.054	0.04 0.072					
Lingote fundición	26	234	4.2 9.83	2.25 5.26	0.85 1.99	0.06 0.144	0.17 0.398					
Lingotillos plateado	4	36	2.5 0.90	7.50 2.70	0.65 0.23	0.05 0.018	0.10 0.036					
Colada de fábrica (retorno)	30	270	3.30 8.91	1.40 3.78	0.60 1.62	0.10 0.270	0.13 0.351					
Chatarra comparada												
Briquetas de colado												
Briquetas de acero												
Chatarra de acero	20	180	0.30 0.54	0.20 0.36	0.60 1.08	0.03 0.054	0.03 0.054					
(Otros) Briquetas de Mn					0.90							
Total	100	900	27.92	13.72	6.81	0.537	0.911					
Análisis cargado (Totales divididos por el peso de la carga)			3.10	1.52	0.76	0.060	0.10					
Pérdida o ganancia en la fusión			+0.30	-0.15	-0.15	+0.04	+0.03					
Análisis estimado (Hierro en el pico del cub.)			3.40	1.37	0.61	0.10	0.13					
Tipo y cantidad de coque por carga _____ Tipo y cantidad de caliza por carga _____ Otros — Tales como combustibles especiales, fundentes, etc. _____												

C3: RELACION ENTRE AIRE Y COQUE PARA LA COMBUSTION EN CUBILOTES



C4: DISPOSICIÓN TÍPICA DE REVESTIMIENTOS Y EXPANSION TERMICA REVERSIBLE DE LOS REFRACTARIOS EN CUBILOTES

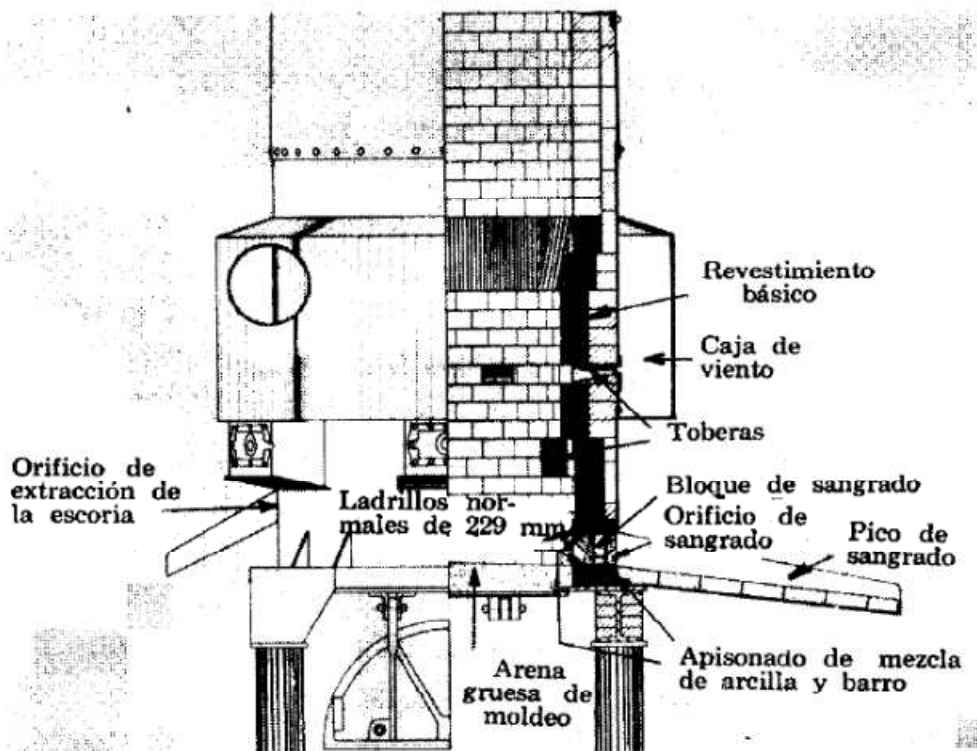
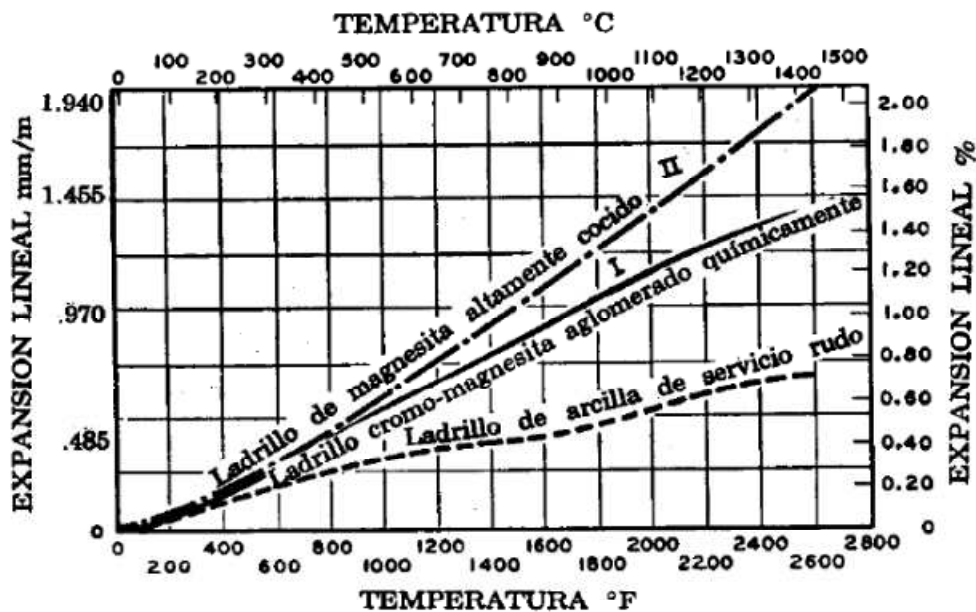


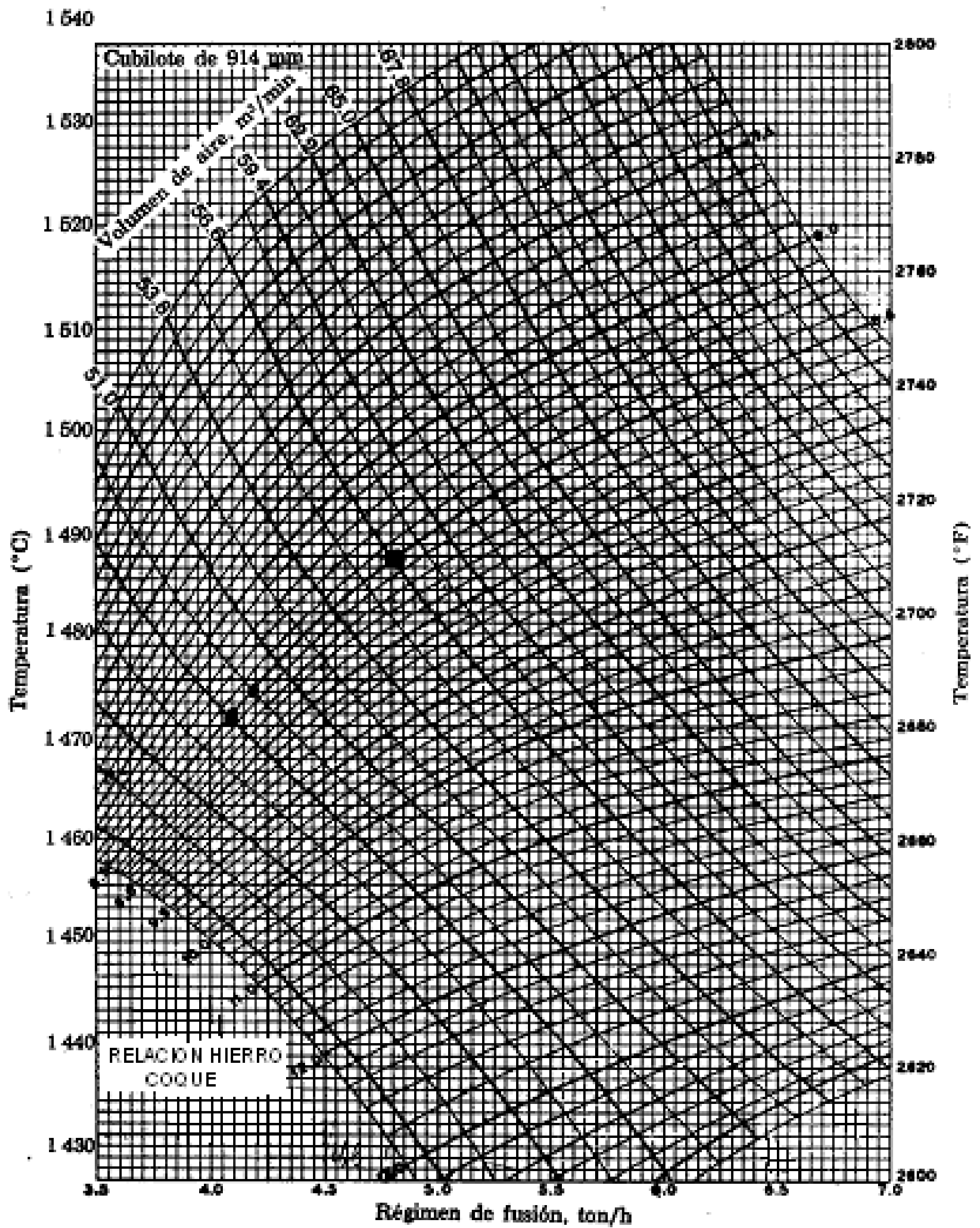
FIG. 258. Disposición típica del revestimiento para un cubilote básico.



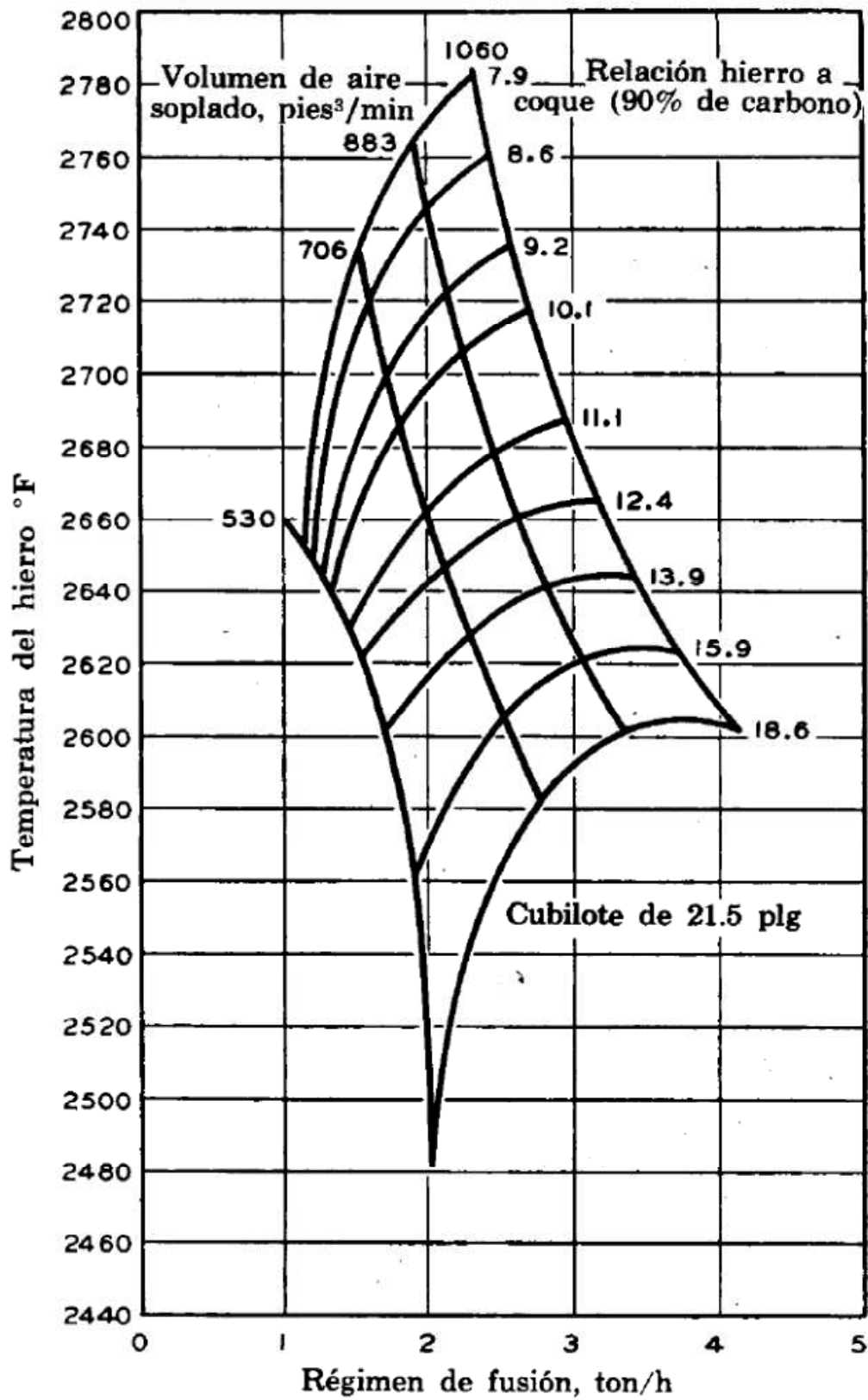
ANEXO D

CURVAS DE OPERACIÓN PARA CUBILOTES

D1: CURVAS DE OPERACIÓN PARA UN CUBILOTE DE 910 mm DE DIAMETRO



D2: CURVAS DE OPERACIÓN PARA UN CUBILOTE DE 546 mm DE DIAMETRO



ANEXO E

COMBUSTIBLES

E1: LIMITES DE INMISION Y RESUMEN DE CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES GASEOSOS

En la tabla siguiente se muestran las concentraciones máximas admisibles en el **aire interior**, desde el punto de vista sanitario, de las sustancias contaminantes procedentes de la combustión; estos datos se refieren a periodos de exposición de 8 horas y han sido obtenidos a partir de resultados publicados por organismos internacionales como WHO, EPA, ASHRAE; si bien no están recogidos en la normativa aplicable vigente. Para periodos de exposición más cortos se pueden admitir concentraciones superiores.

CONCENTRACIONES MAXIMAS (Periodo de estancia 8 horas)		
SUSTANCIA		CONCENTRACION
DIOXIDO DE CARBONO	CO ₂	800 ppm
MONOXIDO DE CARBONO	CO	9 ppm
OXIDOS DE NITROGENO	NO _x	0,15mg/m ³
DIOXIDO DE AZUFRE	SO ₂	0,80mg/m ³

CUADRO RESUMEN CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES			
COMBUSTIBLE	GASOLEO C	GAS NATURAL	GAS PROPANO
UNIDAD	l kg	Nm ³	kg Nm ³
DENSIDAD	890 kg/m ³	0,828 kg/Nm ³	2,038 kg/Nm ³
DENSIDAD RELATIVA		0,643	1,583
PCI (PODER CALORIFICO INFERIOR)	8,842 kcal/l	9,314 kcal/Nm ³	22,529 kcal/Nm ³
	10,28 kWh/l		26,20 kWh/Nm ³
	9,934 kcal/kg	10,83 kWh/Nm ³	11,055 kcal/kg
	11,55 kWh/kg		12,86 kWh/kg
PCS (PODER CALORIFICO SUPERIOR)	9,367 kcal/l	10,304 kcal/Nm ³	24,475 kcal/Nm ³
	10,89 kWh/l		28,46 kWh/Nm ³
	10,524 kcal/kg	11,98 kWh/Nm ³	12,011 kcal/kg
	12,24 kWh/kg		13,97 kWh/kg
PCI/PCS	0,944	0,904	0,920
(PC) PODER COMBURIVORO	9,44 Nm ³ /l	10,34 Nm ³ /Nm ³	24,61 Nm ³ /Nm ³
	10,61 Nm ³ /kg		12,08 Nm ³ /kg
	0,92 Nm ³ /kWhPCI	0,95 Nm ³ /kWhPCI	0,94 Nm ³ /kWhPCI
(PFS) PODER FUMIGENO SECO	8,90 Nm ³ /l	9,32 Nm ³ /Nm ³	22,56 Nm ³ /Nm ³
	10,00 Nm ³ /kg		11,07 Nm ³ /kg
	0,87 Nm ³ /kWhPCI	0,86 Nm ³ /kWhPCI	0,86 Nm ³ /kWhPCI
(PFH) PODER FUMIGENO HUMEDO	10,01 Nm ³ /l	11,42 Nm ³ /Nm ³	26,67 Nm ³ /Nm ³
	11,24 Nm ³ /kg		13,09 Nm ³ /kg
	0,97 Nm ³ /kWhPCI	1,05 Nm ³ /kWhPCI	1,02 Nm ³ /kWhPCI
PFS/PC	0,943	0,902	0,916
CO ₂ PRODUCIDO EN COMBUSTION	2,80 kg/l	2,21 kg/Nm ³	6,11 kg/Nm ³
	3,15 kg/kg		3,00 kg/kg
	273 g/kWhPCI	204 g/kWhPCI	233 g/kWhPCI
H ₂ O PRODUCIDO EN COMBUSTION	0,89 kg/l	1,68 kg/Nm ³	3,31 kg/Nm ³
	1,00 kg/kg		1,62 kg/kg
	87 g/kWhPCI	155 g/kWhPCI	126 g/kWhPCI
CO ₂ maximo (%)	16,05%	12,06%	14,03%
CONTENIDO DE AZUFRE	<0,2 %	NULO	< 0,05 %

E2: PODER CALORIFICO DEL CARBÓN

Combustible (Kg/m ³)	Densidad (Kg/KJ)	PCI (KJ/Kg)	PCS (KJ/Kg)	Combustible (KJ/Kg)	PCI (KJ/Kg)	PCS (KJ/Kg)
Turba	360	21300	22500	Aglomerados de carbón	31300	35600
Lignito	1050	28400	29600	Carbon de madera	31400	33700
Hulla	1350	30600	31400	Coque	29300	33700
Antracita	875	34300	34700	Coque de petroleo	34100	36500

E3: ESPECIFICACIONES DEL COQUE

Blast Furnace Coke	Grado			
	I	II	III	IV
Elementos	I	II	III	IV
Ceniza % máx.	12	13.5	15	12 - 13
Material Volátil % máx.	1.5	1.5	1.5	1.5-1.8
Carbón Fijo % mín.	85-88	85-88	83-85	83
Azufre, S _d % máx.	0.65	0.65	0.8	0.7-1.0
Fósforo P _d % máx	0.007	0.007	0.007	0.03-0.04
MICUM 40 % máx.	92	92	82	76-78
MICUM 10 % máx.	6	6	8	9
CSR (Coke Strength After Reduction) % min	62	62	62	57
CRI (Coke Reactivity Index)% max	25	25	25	30
Humedad % máx.	5	5	5	5
Tamaño mm 90% mín.	40-80	40-80	40-80	30-90

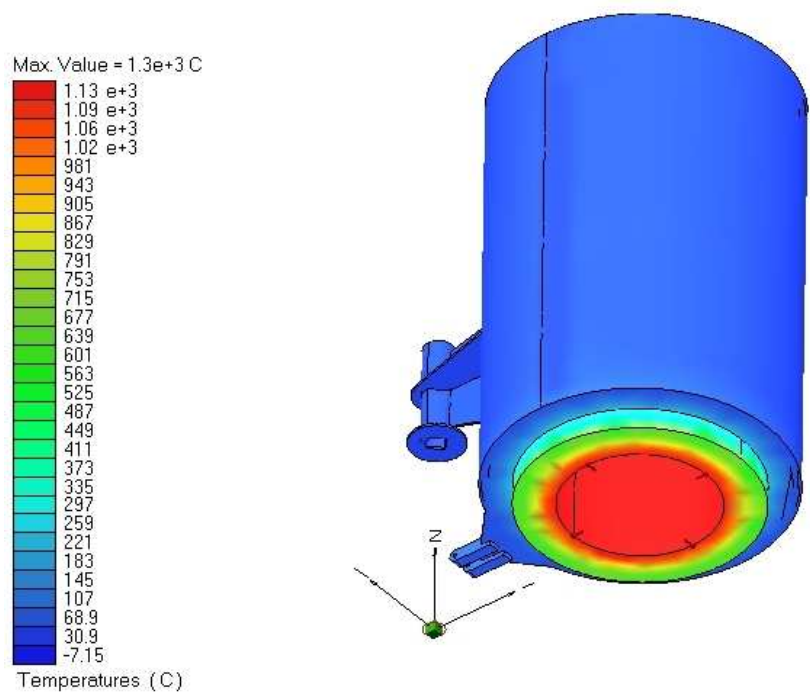
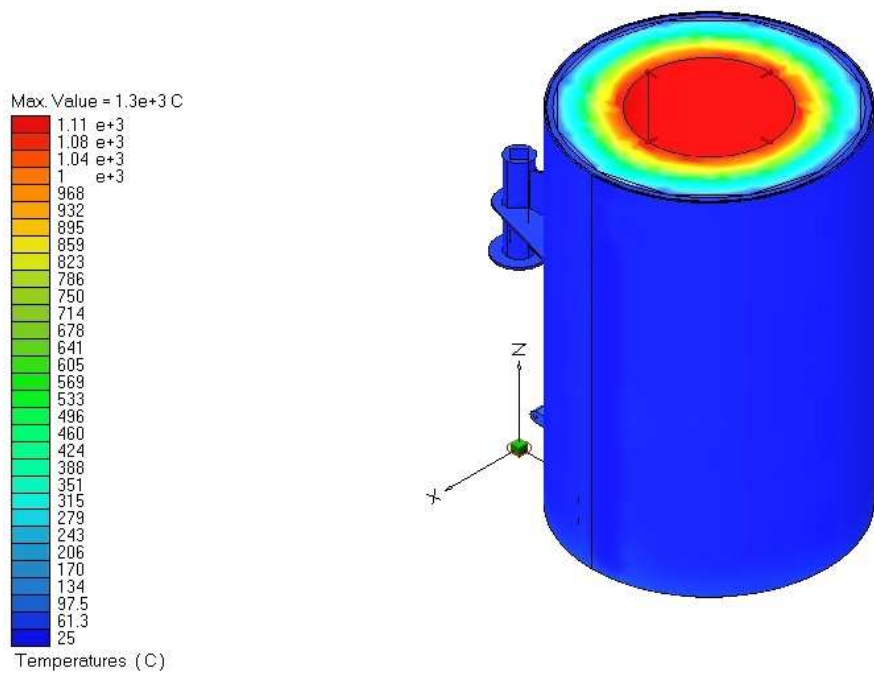
E4: COEFICIENTE DEL COMBUSTIBLE PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CALOR EN LA CHIMENEA

Combustible	Coeficiente	Corrección
Gasoleo	0.495	+0.00693*CO ₂
Gas natural, Propano y Butano	0.379	+0.0097*CO ₂
Hulla y antracita	0.68	
Gas ciudad	0.50	
Coque	0.57	

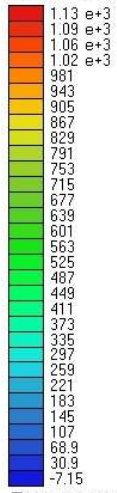
E5: PROPIEDADES DE LOS COMBUSTIBLES PROPANO Y BUTANO COMERCIAL

Propiedades	Propano Comercial	Butano Comercial
Densidad a 15°C como líquido (kg/m ³)	500 - 510	570 - 580
Densidad a 15°C & 1 bar como vapor (kg/m ³)	1.86	2.46
Relación volumétrica de gas a líquido a 15 grados C y 1016 mbar	274	233
Punto de Ebullición grados C	- 45	- 2
Presión de vapor a 20 deg C, barg	9	2.5
Presión de vapor a 50 deg C, barg	19.6	7
Relación gas/aire normal requerida para combustión	1:24	1:30
Valor calorífico bruto (MJ/kg) @ a 0 °C & 1 bar	49.83	49.41
Valor calorífico bruto (MJ/m ³) @ a 0 °C & 1 bar (gas)	97.98	128.5

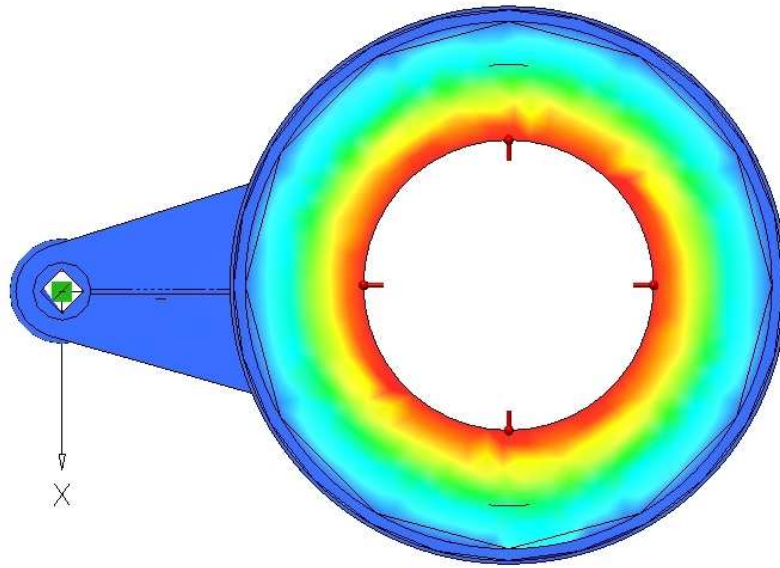
ANEXO G
ANALISIS TERMICO DEL HORNO



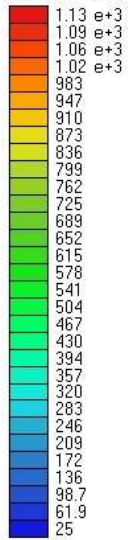
Max. Value = 1.3e+3 C



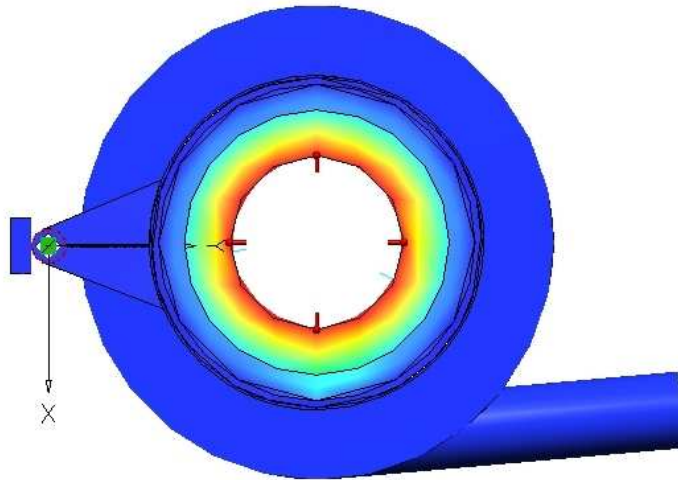
Temperatures (C)



Max. Value = 1.3e+3 C

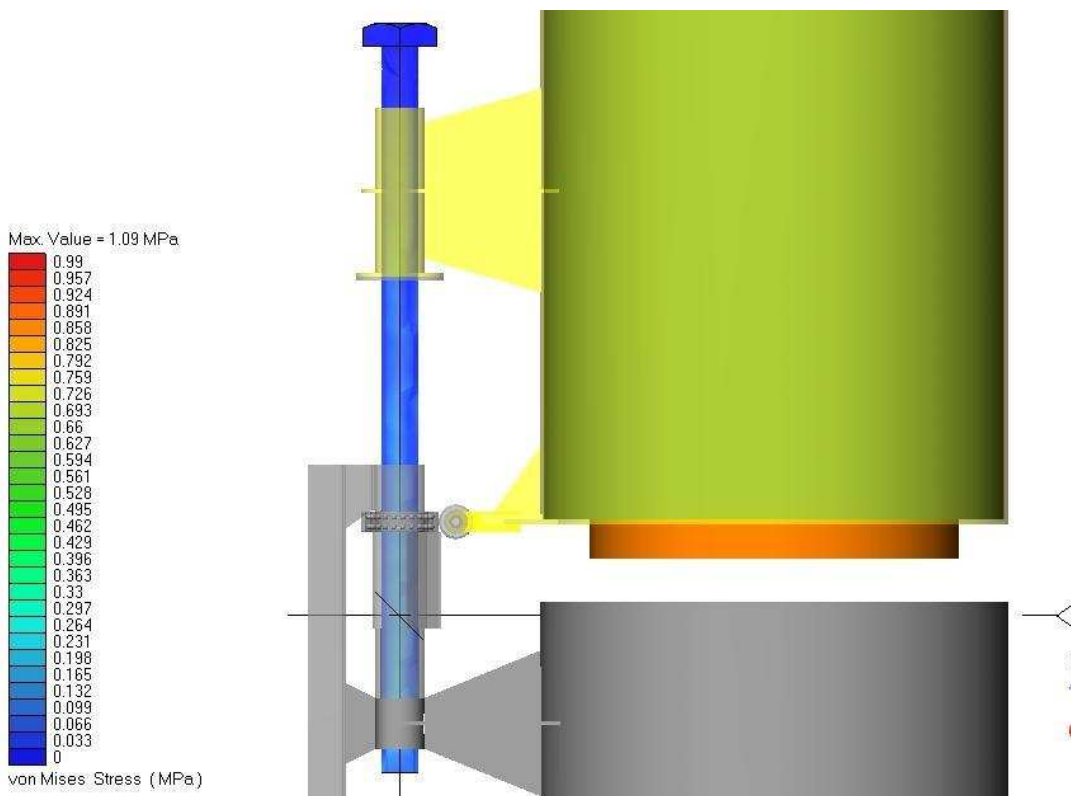
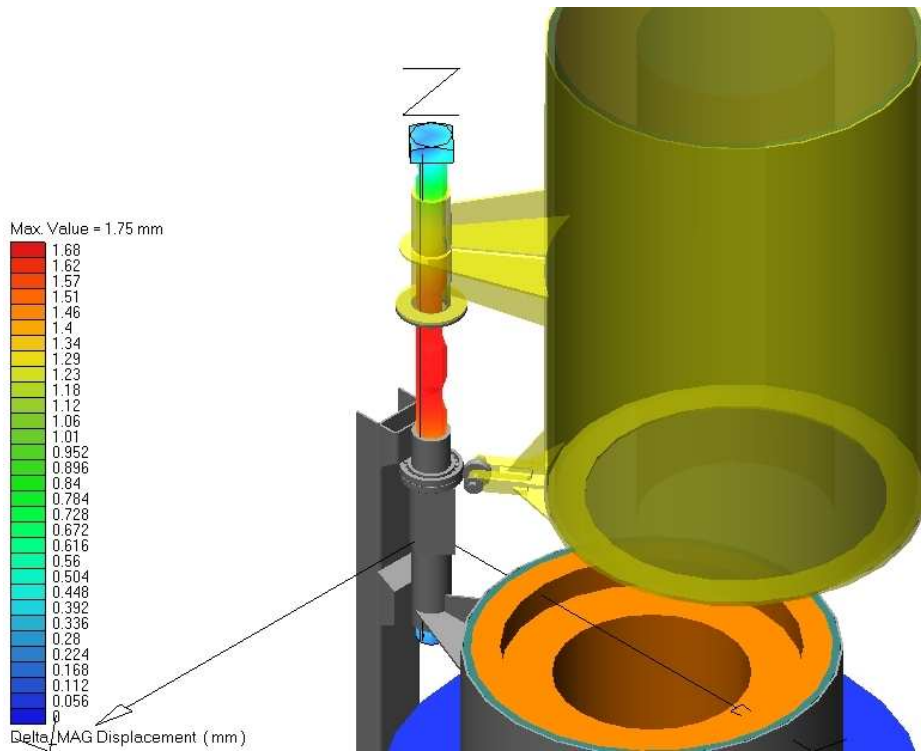


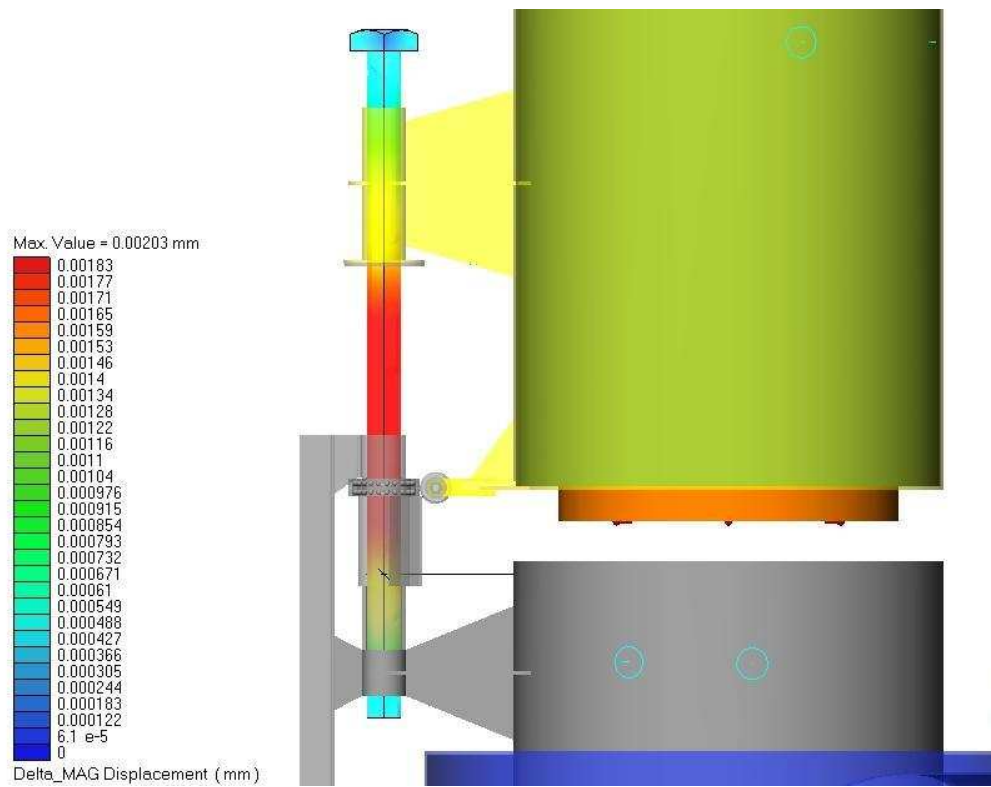
Temperatures (C)



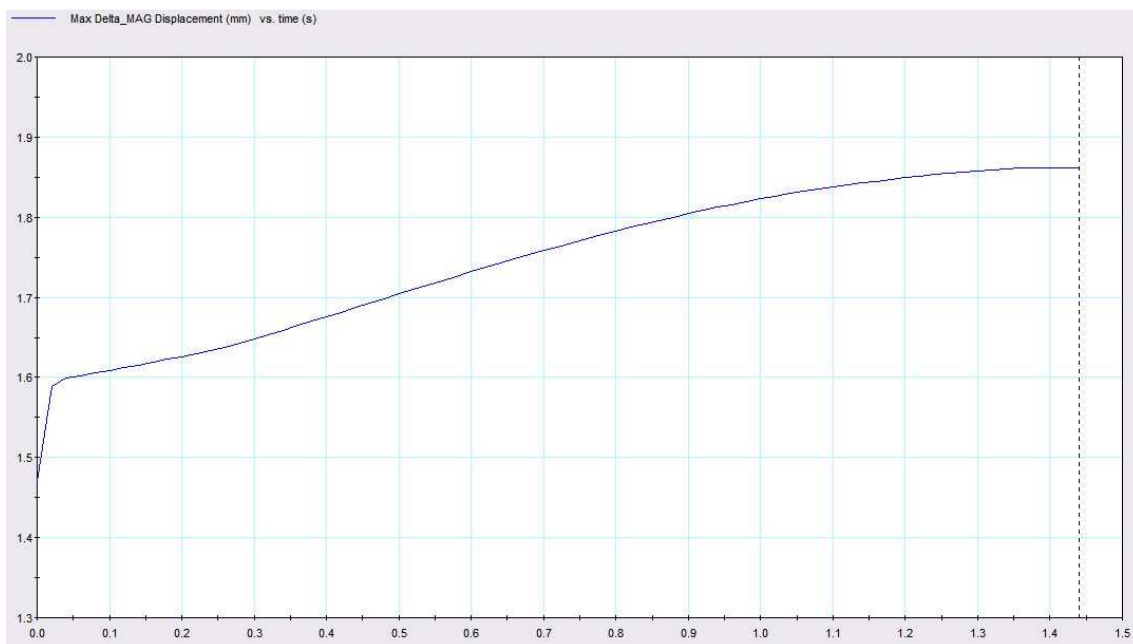
ANEXO H
ANALISIS DEL SOPORTE DE ELEVACION

H1: ESFUERZOS A LOS QUE ESTA SOMETIDO EL TORNILLO DE POTENCIA

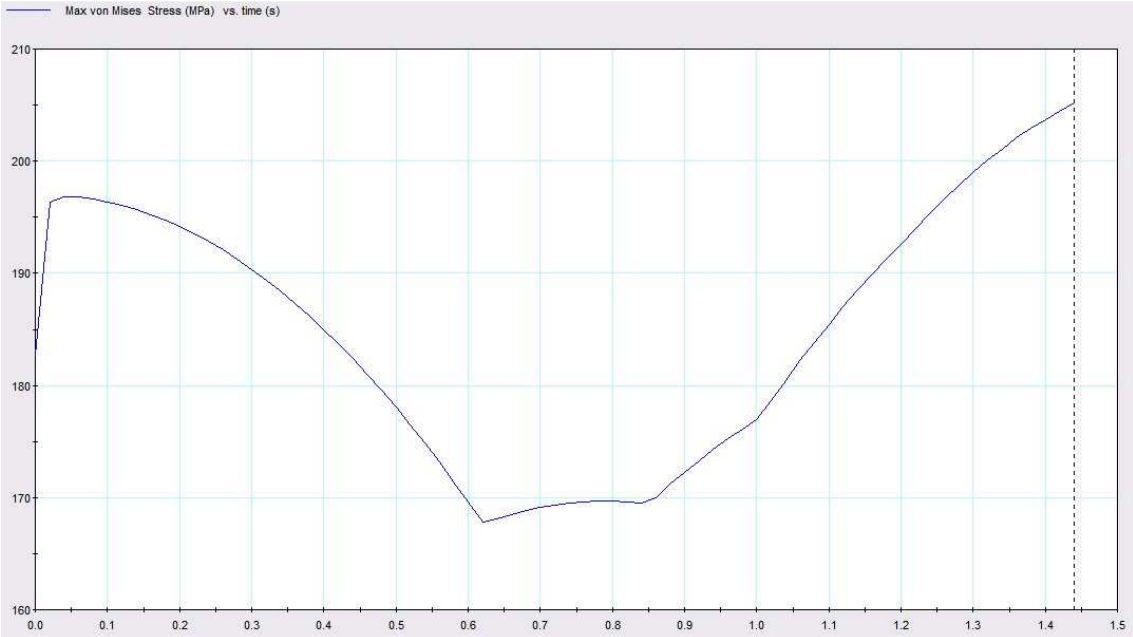




H2: DESPLAZAMIENTO MAXIMO EL TIEMPO



H3: ESFUERZO MAXIMO DE VON MISES



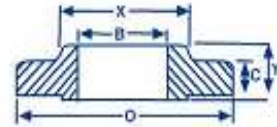
ANEXO I
BRIDAS Y EMPAQUES PARA BRIDAS



Brida Deslizable

Slip On

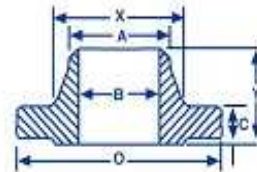
**300 lb.
Acero forjado**



Brida con Cuello Soldable

Welding neck

**300 lb.
Acero forjado**



MEDIDA	DIÁMETRO EXTERIOR O	ESPESOR MIN. C	DIÁMETRO DEL TUBO X	DIÁMETRO DEL TUBO MIDIENDO DESDE EL CHAFLAN A	LONGITUD A TRAVÉS DEL CUBO		BORE B
					DESLIZABLE Y	CUELLO SOLDABLE Y	
1/2	3.75	0.56	1.50	0.84	0.88	2.06	0.88
3/4	4.62	0.62	1.88	1.05	1.00	2.25	1.09
1	4.88	0.69	2.12	1.32	1.06	2.44	1.36
1 1/4	5.25	0.75	2.50	1.88	1.06	2.56	1.70
1 1/2	6.12	0.81	2.75	1.90	1.19	2.69	1.95
2	6.50	0.88	3.31	2.38	1.31	2.75	2.44
2 1/2	7.50	1.00	3.94	2.88	1.50	3.00	2.94
3	8.25	1.12	4.62	3.50	1.69	3.12	3.57
3 1/2	9.00	1.19	5.25	4.00	1.75	3.19	4.07
4	10.00	1.25	5.75	4.50	1.88	3.38	4.57
5	11.00	1.38	7.00	5.58	2.00	3.88	5.66
6	12.50	1.44	8.12	6.63	2.06	3.88	6.72
8	15.00	1.62	10.25	8.63	2.44	4.38	8.72
10	17.50	1.88	12.62	10.75	2.62	4.62	10.88
12	20.50	2.00	14.75	12.75	2.88	5.12	12.88
14	23.00	2.12	16.75	14.00	3.00	5.62	14.14
16	25.50	2.25	19.00	16.00	3.25	5.75	16.16
18	28.00	2.38	21.00	18.00	3.50	6.25	18.18
20	30.50	2.50	23.12	20.00	3.75	6.38	20.20
24	36.00	2.75	27.62	24.00	4.19	6.62	24.25

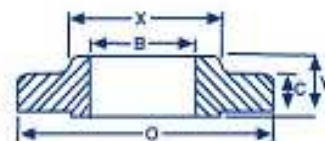
Notas generales: Todas las dimensiones están en pulgadas.
*Será especificado por el comprador.



Brida Deslizable

Slip On

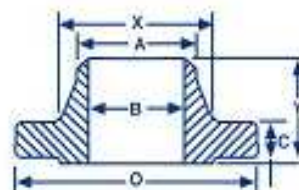
**600 lbs.
Acero forjado**



Brida con Cuello Soldable

Welding neck

**600 lbs.
Acero forjado**



MEDIDA	DIÁMETRO EXTERIOR O	ESPESOR MIN. C	DIÁMETRO DEL TUBO X	DIÁMETRO DEL TUBO MIDIENDO DESDE EL CHAFLÁN A	LONGITUD A TRAVÉS DEL CUBO		BORE B
					DESLIZABLE Y	CUELLO SOLDABLE Y	
1/2	3.75	0.56	1.50	0.84	0.88	2.06	0.88
3/4	4.62	0.62	1.88	1.05	1.00	2.25	1.09
1	4.88	0.69	2.12	1.32	1.06	2.44	1.36
1 1/4	5.25	0.81	2.50	1.66	1.12	2.62	1.70
1 1/2	6.12	0.88	2.75	1.90	1.25	2.75	1.95
2	6.50	1.00	3.31	2.38	1.44	2.88	2.44
2 1/2	7.50	1.12	3.94	2.88	1.62	3.12	2.94
3	8.25	1.25	4.62	3.50	1.81	3.25	3.57
3 1/2	9.00	1.38	5.25	4.00	1.94	3.38	4.07
4	10.75	1.50	6.00	4.50	2.12	4.00	4.57
5	13.00	1.75	7.44	5.56	2.38	4.50	5.66
6	14.00	1.88	8.75	6.63	2.62	4.62	6.72
8	16.50	2.19	10.75	8.63	3.00	5.25	8.72
10	20.00	2.50	13.50	10.75	3.36	6.00	10.88
12	22.00	2.62	15.75	12.75	3.62	6.12	12.88
14	23.75	2.75	17.00	14.00	3.69	6.50	14.14
16	27.00	3.00	19.50	16.00	4.19	7.00	16.16
18	29.25	3.25	21.50	18.00	4.62	7.25	18.18
20	32.00	3.50	24.00	20.00	5.00	7.50	20.20
24	37.00	4.00	28.25	24.00	5.50	8.00	24.25

Notas generales: Todas las dimensiones están en pulgadas.
*Será especificado por el comprador.

No. FFG - FULL FACE PIPE FLANGE GASKET

Standard thickness is 1/8", also available in 1/16" please specify when ordering.
Additional ring gasket materials are available, but not listed on this page.



** Note: Chrysolite Gaskets are Non-Stock, Special Order.

Nominal Pipe Size	150# full face gasket ID	150# full face gasket OD	Non-Asbestos Part #:	Compressed Chrysolite Part #:	PTFE Part #:
1/2"	27/32"	3-1/2"	FFG-150NA-050	FFG-150A-050	FFG-150T-050
3/4"	1-1/16"	3-7/8"	FFG-150NA-075	FFG-150A-075	FFG-150T-075
1"	1-5/16"	4-1/4"	FFG-150NA-100	FFG-150A-100	FFG-150T-100
1-1/4"	1-21/32"	4-5/8"	FFG-150NA-125	FFG-150A-125	FFG-150T-125
1-1/2"	1-29/32"	5"	FFG-150NA-150	FFG-150A-150	FFG-150T-150
2"	2-3/8"	6"	FFG-150NA-200	FFG-150A-200	FFG-150T-200
2-1/2"	2-7/8"	7"	FFG-150NA-250	FFG-150A-250	FFG-150T-250
3"	3-1/2"	7-1/2"	FFG-150NA-300	FFG-150A-300	FFG-150T-300
3-1/2"	4"	8-1/2"	FFG-150NA-350	FFG-150A-350	FFG-150T-350
4"	4-1/2"	9"	FFG-150NA-400	FFG-150A-400	FFG-150T-400
4-1/2"	5"	9-1/4"	FFG-150NA-450	FFG-150A-450	FFG-150T-450
5"	5-9/16"	10"	FFG-150NA-500	FFG-150A-500	FFG-150T-500
6"	6-5/8"	11"	FFG-150NA-600	FFG-150A-600	FFG-150T-600
7"	7-5/8"	12-1/2"	FFG-150NA-700	FFG-150A-700	FFG-150T-700
8"	8-5/8"	13-1/2"	FFG-150NA-800	FFG-150A-800	FFG-150T-800
9"	9-5/8"	15"	FFG-150NA-900	FFG-150A-900	FFG-150T-900
10"	10-3/4"	18"	FFG-150NA-1000	FFG-150A-1000	FFG-150T-1000
12"	12-3/4"	19"	FFG-150NA-1200	FFG-150A-1200	FFG-150T-1200
14"	14"	21"	FFG-150NA-1400	FFG-150A-1400	FFG-150T-1400
16"	16"	23-1/2"	FFG-150NA-1600	FFG-150A-1600	FFG-150T-1600
18"	18"	25"	FFG-150NA-1800	FFG-150A-1800	FFG-150T-1800
20"	20"	27-1/2"	FFG-150NA-2000	FFG-150A-2000	FFG-150T-2000
22"	22"	29-1/2"	FFG-150NA-2200	FFG-150A-2200	FFG-150T-2200
24"	24"	32"	FFG-150NA-2400	FFG-150A-2400	FFG-150T-2400

ANEXO J
FOTOS DEL HORNO DE CUBILOTE





ANEXO K
HOJAS DE PROCESOS

ANEXO L
PLANOS