



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO
TIPO CUBILOTE DEL TALLER DE FUNDICIÓN, J.A. RAMÍREZ**

Mynor Geovanni Golón Valenzuela

Asesorado por el Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortíz

Guatemala, agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO
TIPO CUBILOTE DEL TALLER DE FUNDICIÓN, J.A. RAMÍREZ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

MYNOR GEOVANNI GOLÓN VALENZUELA
ASESORADO POR EL ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTÍZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, AGOSTO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paíz
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortíz
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Figueroa Vásquez
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO TIPO CUBILOTE DEL TALLER DE FUNDICIÓN, J.A. RAMÍREZ,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha doce de abril del año dos mil cinco.



Mynor Geovanni Golón Valenzuela

Guatemala, 24 de junio del 2009

Ingeniero
Julio César Campos Paiz
Coordinador de la Carrera de Ingeniería Mecánica
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Presente

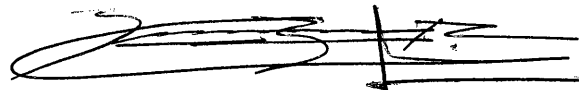
Ingeniero Campos Paiz:

Por medio de la presente quiero informarle que el trabajo, estudios e investigaciones del trabajo de graduación DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO TIPO CUBILOTE DEL TALLER DE FUNDICIÓN, J.A. RAMÍREZ, del estudiante Mynor Giovanni Golón Valenzuela ha sido concluido satisfactoriamente.

Considero que el presente trabajo, reúne todos los requisitos exigidos por esta facultad, por lo que me permito recomendarlo para continuar con los trámites de aprobación.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
Colegiado No. 5545
ASESOR

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO TIPO CUBILOTE DEL TALLER DE FUNDICIÓN, J.A. RAMÍREZ, del estudiante Mynor Geovanni Golón Valenzuela, procede a la autorización del mismo, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Molina Zaldaña
Coordinador de Área

Guatemala, julio de 2009.

/behdei

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del coordinador del Área Térmica, al Trabajo de Graduación titulado DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO TIPO CUBILOTE DEL TALLER DE FUNDICIÓN, J.A. RAMÍREZ, del estudiante Mynor Geovanni Golón Valenzuela, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, agosto de 2009

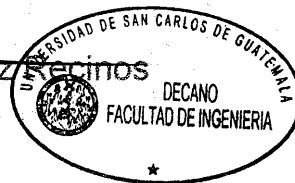
JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO TIPÓ CUBILOTE DEL TALLER DE FUNDICIÓN, J. A. RAMÍREZ**, presentado por el estudiante universitario **Mynor Geovanni Golón Valenzuela**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, agosto de 2009

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS Y LA VIRGEN MARÍA	Por guiarme en mi camino hasta llegar a este punto de mi vida.
MIS PADRES	José Raúl Golón Silva Edna Enriqueta Valenzuela Urizar de Golón Por ser mi soporte y mi impulso a superarme, los quiero, por todo su esfuerzo y paciencia de muchos años.
MI ESPOSA	Janethe Elvira López de Golón Por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional en todo momento.
MIS HIJOS	Mynor Rodrigo Golón López Mi bebe que esta por nacer La razón de mis esfuerzos.
MIS HERMANOS	Delmer Raúl, Francisco Roberto y Francisco Leonel Golón Valenzuela, por su apoyo y con especial cariño.
MIS ABUELOS	Alejandro Golón Mendoza (q.e.p.d.) María Antonia Silva Rosales José Raúl Valenzuela Vela (q.e.p.d.) María Cristina Urizar Aguilar (q.e.p.d.) Gracias por su cariño y por sus consejos.
MIS SUEGROS	Rosaura Arreaga (q.e.p.d.) Marta Jacinta Socobal Sapon Con especial cariño.
MIS TÍOS Y PRIMOS	Con mucho afecto

AGRADECIMIENTOS A:

La empresa Talleres de Fundición, J.A. Ramírez, por la oportunidad de realizar el presente trabajo de graduación.

Ingeniero Hugo Leonel Ramírez Ortiz, por el apoyo brindado en el asesoramiento de este trabajo de graduación.

Ingeniero Luis Arce, Gerente de Planta de la empresa Refractarios Nacionales, S.A., Thermal Ceramics, km. 34.5 Palín, Escuintla, por su valiosa información para este trabajo de graduación.

Ingeniero Mario Sandoval, Gerente de Planta de la empresa Meticsa, Escuintla, por su excelente ayuda e información proporcionada para la elaboración de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA TALLERES DE FUNDICIÓN J.A. RAMÍREZ	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Proceso de producción	1
1.3 Costo de la producción	2
1.4 Planteamiento del problema	3
1.5 Solución del problema	3
2. PARTES PRINCIPALES DE LOS HORNOS	
2.1 Cimientos	5
2.2 Plataforma	5
2.3 Solera	6
2.4 Paredes	6
2.5 Bóveda	7
2.6 Canales	10
2.7 Mampostería de ladrillos	11
2.8 Juntas térmicas	11
2.9 Esqueleto metálico	12

2.10 Ventanas de trabajo	13
2.11 Puertas	13
3. HORNOS DE CUBILOTE	
3.1 Definición	17
3.2 Principales elementos del cubilote	18
3.2.1 Cimentación	18
3.2.2 La coraza	20
3.2.3 Sección del cuerpo	20
3.2.4 Puerta de fondo de bisagras	21
3.2.5 Revestimiento	22
3.2.6 Cinturón de toberas	22
3.3 Descripción del cubilote	23
3.3.1 Puesta en marcha del cubilote	26
3.3.2 Carga del cubilote	26
3.3.3 Funcionamiento del cubilote	28
3.4 Rendimiento del cubilote	29
3.4.1 Altura del cubilote	31
3.4.2 Tubos portavientos	33
3.4.3 Caja de aire o viento	33
3.5 Cubilotes con insuflación de aire caliente	34
4. EQUIPO DE SOPLADO Y SU CONTROL	
4.1 Equipo de soplado	41
4.2 Análisis de los requerimientos	41
4.2.1 Factores que determinan el volumen y presión de aire	41
4.2.2 Factores que definen la selección de la máquina soplante	42

4.3	Tipos de sopladores para cubilotes	42
4.3.1	Sopladores de desplazamiento positivo	42
4.3.2	Sopladores centrífugos	46
4.3.3	Sopladores del tipo ventilador	49
4.4	Ductos de aire	50
4.5	Medidores de volumen	52
4.5.1	Elementos primarios	53
4.5.1.1	Placas con orificio	54
4.5.1.2	Tubo pitot	57
4.5.1.3	Tubo venturi	59
5.	INTERCAMBIADOR DE CALOR	
5.1	Tipos de tubería	63
5.2	Aislantes de calor	64
5.3	Tipos de ladrillo refractario	66
5.3.1	Características del ladrillo	69
5.4	Accesorios	70
5.5	Colector de polvo de alta eficiencia	71
5.6	Parte experimental	71
6.	EQUIPO A UTILIZAR EN EL RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO TIPO CUBILOTE	
6.1	Ventilador	87
6.2	Tubería	87
6.3	Ladrillo refractario	87
6.4	Aislante de calor	88
6.5	Dimensiones del intercambiador de calor	88
6.6	Espacio	89

6.7 Esquema de la implementación del intercambiador de calor	90
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXOS	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Corte transversal de una bóveda de arco.	8
2.	Mampostería de la bóveda a y b.	9
3.	Esqueleto móvil.	12
4.	Esqueleto fijo.	13
5.	Mecanismos elevadores de puertas a, b, c y d.	14
6.	Cubilote convencional.	17
7.	Esquema de cimentaciones a y b.	18
8.	Sección del cuerpo de un cubilote.	21
9.	Cubilote con chimenea y cámara de chispas.	25
10.	Esquema de un cubilote con montacargas inclinado, fijo.	27
11.	Dispositivo elevador con vagoneta.	28
12.	Diagrama de rendimiento específico del cubilote, Consumo de combustible, de aire y temperatura del metal.	30
13.	Esquema de una planta de cubilotes con inyección de aire soplado caliente.	36
14.	Diagrama esquemático de un equipo de calentamiento de aire soplado, de dos etapas, tipo Griffin.	38
15.	Vista interior de un soplador de desplazamiento positivo.	43
16.	Instalación de un soplador de desplazamiento positivo.	43

17.	Curvas características de sopladores de desplazamiento positivo.	44
18.	Soplador de una sola etapa, con paletas a la entrada, controladas automáticamente.	46
19.	Curvas de funcionamiento de un soplador centrífugo de una sola etapa.	48
20.	Válvula del tipo de mariposa.	48
21.	Soplador del tipo ventilador.	49
22.	Curvas de operación características de sopladores ventiladores.	50
23.	Válvula de no-retorno a y b.	51
24.	Conexión de brida empleada como unión en un orificio.	54
25.	Conexión de vena contracta con bridas gemelas.	55
26.	Principio del tubo Pitot.	58
27.	Tubo Pitot del tipo combinado.	59
28.	Tubo Venturi.	60
29.	Carta de eficiencias de los medidores Venturi.	61
30.	Ladrillo refractario.	67
31.	Mortero refractario.	68
32.	Ladrillo refractario.	69
33.	Dimensiones del ladrillo refractario.	70
34.	Dimensiones del intercambiador de calor.	88
35.	Esquema de la implementación del intercambiador de calor.	90

TABLAS

I.	Coeficiente K.	8
II.	Medidas de distintas cimentaciones.	19
III.	Datos técnicos del cubilote de la figura 9.	24
IV.	Dimensiones de la válvula de no-retorno.	52
V.	Valores de E para conexiones con bridas.	56
VI.	Factor de corrección F_t .	57
VII.	Diámetros de tubos.	64
VIII.	Datos de un horno cubilote.	73
IX.	Régimen de fusión, ton/hr.	97
X.	Calores de formación.	98
XI.	Calores de reacción.	99
XII.	Combustión del coque.	99

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Consumo específico de aire, $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ min.}$
a₁	Consumo de aire, m^3/kg de combustible.
A_t	Área total del tubo.
°C	Grados centígrados.
C_c	Calor específico a presión constante del aire que sale del recuperador al horno de cubilote.
C_h	Calor específico a presión constante del aire que sale del horno de cubilote al recuperador.
cm	Centímetros.
d	Diámetro del orificio, cm.
D	Diámetro interior del ducto en el punto de medición, mts.
E	Eficiencia.
E_r	Eficiencia del recuperador.
F_t	Factor de corrección por temperatura.
g	Gravedad, 9.8 mts/seg.
G_e	Cantidad de escoria, ton.
G_m	Cantidad máxima de hierro fundido, ton.
h	Presión diferencial.
H	Altura total del cubilote.
H_p	Altura desde el fondo del crisol hasta el piso del establecimiento.
H_{tob}	Altura de toberas, desde el fondo del crisol.
H_{ut}	Altura útil, desde el eje de las toberas inferiores hasta el umbral del tragante.
K	Coefficiente de la resistencia del lecho de fusión.
K_{cal}	Kilocalorías.

kg	Kilogramos.
L	Longitud.
mm	Milímetros.
mts	Metros.
N_p	Número de pasos.
P	Presión del viento.
plg	Pulgadas.
q	Consumo de combustible en las cargas de trabajo, %.
Q	Rendimiento del cubilote, ton/hora.
r	Radio del tubo.
S	Área de la sección transversal del cubilote, mts ² .
seg	Segundos.
T_{centrada}	Temperatura de entrada al recuperador que viene del ventilador, °C.
T_{csalida}	Temperatura de salida del recuperador al horno cubilote, °C.
ton	Toneladas.
T_{hentrada}	Temperatura de entrada al recuperador que viene del horno, °C.
T_{hsalida}	Temperatura de salida del recuperador al medio ambiente, °C.
V	Velocidad convencional del movimiento de los gases, mts/seg.
δ_e	Peso específico de escoria líquida, 2 ton/mts ³ .
δ_m	Peso específico de hierro líquido, 6.9 a 7 ton/mts ³ .

GLOSARIO

Aislante	Cuerpo mal conductor del calor y la electricidad.
Alúmina	Óxido de aluminio que se halla en la naturaleza, ya puro y cristalizado, ya formado con otros cuerpos los feldespatos y las arcillas.
Arcilla	Silicato aluminico hidratado natural, puro o impurificado por óxidos de hierro, que empapado con agua se hace muy plástico y que por la calcinación se contrae y endurece.
Bauxita	Roca blanda formada por hidróxidos de aluminio. Es el mineral más importante de este metal, y se utiliza también como abrasivo.
Brida	Anillo que une dos tubos.
Calor	Es la energía que fluye en virtud de una diferencia de temperatura.
Calor específico	Cantidad de calor absorbido para conseguir un aumento de temperatura de un grado (considerado la unidad de masa).

Calor latente	Calor que existe sin manifestarse al exterior.
Caolines	Silicato de alúmina hidratado que se presenta en cristales monoclinicos y se emplea en cerámica.
Chamota	Clorita de la serie de las ferroferricloritas de color verde grisáceo o negro.
Chimenea	Conducto para dar salida al humo (producto gas gaseoso).
Conducción	Forma de transmisión del calor sin que se produzca ningún desplazamiento de materia.
Conductividad	Propiedad natural de los cuerpos que consiste en transmitir el calor o la electricidad.
Conductor	Cuerpo que deja pasar fácilmente a través de su masa el calor o la electricidad.
Convección	Transmisión de calor en un fluido por movimiento de capas desigualmente calientes.

Densidad	Relación entre la masa y el volumen de una sustancia; o entre la masa de una sustancia y la masa de un volumen igual de otra sustancia tomada como patrón.
Eficiencia	Virtud y facultad para obtener un efecto determinado.
Energía	Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etcétera.
Escoria	Residuo esponjoso que queda tras la combustión del carbón.
Fluido	Cuerpo cuyas moléculas cambian con facilidad su posición relativa; como los líquidos y los gases.
Gas	Fluido sin forma ni volumen propio, cuyas moléculas tienden a separarse unas de otras.
Imposta	Hilada de sillares algo voladiza, a veces con moldura, sobre la cual va sentado un arco.
Ladrillo	Masa de arcilla cocida en forma de prisma, usada en calderas.

Magnesita	Relativo al magnesio.
Presión	Fuerza normal por unidad de área.
Radiación	Emisión de partículas de energía. Elemento de una onda electromagnética o luminosa.
Revestimiento	Capa o cubierta con que se resguarda o adorna una superficie.
Temperatura	Grado de calor en los cuerpos, relacionado con la energía cinética de las moléculas de los mismos.
Transferencia	Efecto de transferir.
Transferencia de calor	Estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre fuentes de calor y receptores.

RESUMEN

El constante uso de las piezas o componentes mecánicos de las distintas máquinas en las líneas de producción de cualquier empresa, determinan la vida útil de dichas piezas o componentes, dando como resultado que estas empresas se avoquen a las empresas que se dedican a la fundición de hierro y que les proporcionen piezas fundidas de buena calidad.

Los antecedentes históricos de la empresa Talleres de Fundición J.A. Ramírez, demuestran que es una empresa sólida y que tiene 34 años de haberse constituido, los cuales demuestran que es una empresa con mucha experiencia en el proceso de fundición de hierro, para dicho procedimiento es necesario contar con una administración adecuada al proceso, maquinaria y equipo en perfectas condiciones de funcionamiento; así también el personal que labora en dicha empresa tiene que tener el equipo de protección necesario, debido a la alta temperatura a la que se labora en el área de fundición. Esta empresa cuenta con un horno de fundición de hierro tipo Cubilote, construido con ladrillo refractario, utilizando como combustible para su funcionamiento carbón coque; para dicho horno es recomendable, tener un buen plan de mantenimiento, porque esto proporcionaría un promedio de 15 años de vida útil del ladrillo refractario y así obtener un buen rendimiento del mismo, con esto se minimizarían las pérdidas de calor por radiación y convección en el horno tipo Cubilote.

Con la constante demanda de producción, la competitividad en la industria de la fundición y para optimizar el proceso de fundición, se creo la propuesta de “Diseño de un Recuperador de Calor para el Horno tipo Cubilote del Taller de Fundición, J.A. Ramírez”; utilizando los gases de escape del horno, previo a una minimización de las pérdidas de calor en el horno y en los ductos de escape, obteniendo como resultado una mejor eficiencia del horno y beneficios económicos en el ahorro de combustible.

OBJETIVOS

GENERAL:

Diseñar un recuperador de calor para un horno tipo cubilote, aprovechando los gases de escape del horno y con ello aumentar la eficiencia y al mismo tiempo disminuir el consumo de combustible.

ESPECÍFICOS:

1. Conocer los diferentes tipos de refractarios que existen para el diseño de un recuperador de calor.
2. Conocer los diferentes aislantes de calor que se pueden utilizar en los ductos para evitar las pérdidas de calor por radiación y convección.
3. Dar a conocer los beneficios económicos y productivos que se obtienen al aumentar la eficiencia del horno tipo cubilote.
4. Servir como base para la elaboración de recuperadores de calor orientados a este tipo de industrias.

INTRODUCCIÓN

Desde que inició la Revolución Industrial los países a nivel mundial han desarrollado y optimizado los hornos de distintos tipos de fundición para acoplarse a la gran demanda del mercado y así competir con calidad, producción, tipo de material, etc; con otras compañías.

Talleres de Fundición J.A. Ramírez es una empresa que contribuye al desarrollo industrial del país, y por lo tanto, necesita fuentes de energía (electricidad, calor, etc.), que sean de bajo costo, ya que utilizando estas fuentes de energía se ha observado que el ahorro de combustible en el horno tipo cubilote se ha convertido en parte esencial para el desarrollo económico de esta Industria Nacional de la Fundición, porque de esta depende en gran medida la generación de la energía para realizar los procesos de fabricación de distintos productos. Por lo tanto uno de los factores para aumentar la eficiencia del horno, es el evitar las pérdidas de calor por radiación y convección, para luego utilizar los gases de escape en el recuperador de calor. Consiguientemente, el principal factor para aumentar la eficiencia del horno tipo cubilote, es el diseño de un recuperador de calor, minimizando las pérdidas de calor por radiación y convección en el horno y en los ductos de escape, para luego utilizar el poder calorífico de los gases de escape en el recuperador de calor.

El objetivo del presente trabajo es proporcionar a la empresa Talleres de Fundición J.A. Ramírez, los lineamientos para el diseño de un recuperador de calor para el horno tipo cubilote.

1. BREVE RESEÑA HISTORICA DE LA EMPRESA TALLERES DE FUNDICIÓN J.A. RAMÍREZ

1.1 Antecedentes

El veintitrés de abril del año mil novecientos setenta y cinco se estableció como empresa Taller de Fundición J.A. Ramírez, con el fin de utilizar principalmente como materia prima el hierro reciclado, fundiéndolo y produciendo toda clase de piezas para la pequeña, mediana y grandes empresas de la industria guatemalteca, además, no solo coopera con la industria guatemalteca, si no, que también, desde que se fundo como empresa creo oportunidades de trabajo para la población guatemalteca.

Talleres de Fundición J.A. Ramírez esta ubicado en la 2da. calle "B" 7-14 Colonia La Brigada zona 7 de Mixco, Guatemala, C.A. es una empresa con más de 30 años de experiencia dedicados a la fundición y fabricación de piezas de maquinaria agrícola e industrial. Esta empresa cuenta con oficinas administrativas, un taller para la creación de modelos en madera de las piezas que se van a fundir, área de sarandas eléctricas que es donde se prepara la arena a utilizar, área de preparación de los moldes de las cajas para fundir, bodega de materia prima e insumos, y por último lo más importante un horno de fundición tipo Cubilote con capacidad interna de 2,500 libras.

1.2 Proceso de producción

El cliente llega a la Empresa con la pieza que desea que se le fabrique, a partir de esta pieza se elabora un modelo en madera con la cual se va a trabajar. Se utiliza arena silica previamente cernida la cual es mezclada con bentonita (arcilla) y agua, luego se prepara la caja de madera o metal con arena, se coloca el modelo de la pieza encima de

la arena para realizar el moldeo de la pieza con arena previamente preparada, se compacta bien la arena en las dos partes de la caja y se dejan respiraderos dependiendo del tipo pieza que se va a fundir y el agujero donde se va a introducir el hierro fundido, luego de repetir este proceso de moldeo de piezas durante unos 20 días o menos, dependiendo de la demanda de producción, ya que esta empresa tiene un día determinado de fundición porque tiene un mínimo y un máximo de piezas limpias para poner en marcha el horno, el mínimo es de 17,000 libras de piezas limpias, agregándole 5,000 libras más; y el máximo es de 23,000 libras de piezas limpias, agregándole 7,000 libras más; el margen de 5,000 a 7,000 libras de material que se le ingresan al horno son el margen que se pierden en el momento de la fundición a causa de la escoria, evaporación, derrames, medida extra de las piezas debido a que están producidas en bruto y respiradero de las cajas. Cuando las piezas son pedidas en bruto después de fundirlas son entregadas y cuando las piezas son pedidas con acabados y medidas exactas, entonces, Talleres de Fundición J.A. Ramírez utiliza un anexo llamado Talleres Aroche, que tiene en su haber tornos, taladros, barrenos, cepillos, pulidoras, soldadura eléctrica y autógena, esmeriles, cortadoras, prensas, etc. a donde son trasladadas todas las piezas en bruto en el cual se le van a dar las medidas y acabados que la pieza necesita para luego ser entregados con las características que el cliente pidió.

1.3 Costo de la producción

El horno tipo cubilote que utiliza Talleres de Fundición J.A. Ramírez, funciona con carbón coque y el motor que utiliza el ventilador que ingresa aire para la combustión funciona con energía eléctrica.

Cuando se funden 17000 libras de piezas limpias, se utiliza mas o menos 2000 libras de carbón coque, se utiliza recurso humano, electricidad, diesel, toda la preparación que se utilizo antes de llegar el día de fundición, etc; todo esto tiene un costo aproximado de 40,000 quetzales, pero los costos de producción bajarían considerablemente si se utilizaran los gases de escape emanados por el mismo horno, se utilizaría mejor el recurso humano, se aumentaría la temperatura en la cámara de fundición, etc; con el fin de que la empresa sea mas productiva y obtenga mejores ingresos.

1.4 Planteamiento del problema

Para Talleres de Fundición J.A. Ramírez que tiene en la Industria guatemalteca su fuente importante de trabajo y que cada día los costos de producción son más elevados, agregándole a esto el alto costo de la vida que repercute no solo en la empresa sino también en sus empleados, entonces, la empresa vio la necesidad de crear alguna alternativa en donde se encuentre no solo economizar gastos, sino que también, aprovechar el recurso humanos, ahorro de combustible, mejorar la producción, etc.

1.5 Solución del problema

Aprovechando los gases de escape emanados por el mismo horno, con el fin de dar una solución a lo descrito con anterioridad se plantea el siguiente diseño: “DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO TIPO CUBILOTE DEL TALLER DE FUNDICIÓN, J.A. RAMÍREZ”.

2. PARTES PRINCIPALES DE LOS HORNOS

Todos los hornos tales como los de fundición, los térmicos, los caloríferos, los secadores, etc., de acuerdo a los fines con que fueron ideados tienen sus estructuras apropiadas para cada caso, pero comprenden una serie de elementos constructivos comunes en los distintos diseños.

2.1 Cimientos

Los cimientos son la parte del horno que se apoyan directamente en el suelo reconocido como apto para ese fin y que sostienen todas las demás partes. El fin de los cimientos es distribuir las cargas concentradas sobre cierta área del suelo de manera que la presión unitaria caiga dentro de límites admisibles.

Según el caso dado lo requiere, los cimientos se hacen de piedra de ladrillo, de hormigón armado o vigas de acero cruzadas. Las bases de las grúas o tornos para mover los carritos de los secadores y otros mecanismos, van construidas de hormigón armado, para soportar mejor los esfuerzos horizontales.

2.2 Plataforma

La plataforma es el plano inmediatamente superior a los cimientos del horno y el inferior de la mampostería. Para su construcción se emplean distintos materiales: ladrillos refractarios y termoaislantes, el asbesto, etc. El tipo de construcción y el espesor de la plataforma se dictan por la estructura del horno. Su fin principal es dar una superficie sobre la cual pueden ser dispuestas todas las partes inferiores del horno.

2.3 Solera

La solera es la parte del horno sobre la cual se dispone el metal fundido o los artículos a caldearse, esta a su vez soporta la carga del material y debe ser suficientemente sólida, impermeable para el metal líquido, material vítreo y escorias, y químicamente estable respecto a éstas últimas. En la mayoría de los casos tiene una forma de bañera bajo los hornos de reverbero o los eléctricos de fundición.

La solera y la plataforma en los hornos de altas temperaturas deben ser montadas sobre las chapas de hierro de caldera, las cuales a su vez se apoyan en los perfiles de hierro. Tal estructura protege los cimientos de excesivo recalentamiento.

2.4 Paredes

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

En los hornos con altas temperaturas la cara interior se hace de ladrillos refractarios; la exterior de ladrillos termoaislantes o de arcilla. El grosor de la parte refractaria de la pared se hace calculando que el calentamiento de la parte menos refractaria de ella no sobrepase la temperatura admisible. Cuando se construyen las paredes verticales hay que tener cuidado de que los ladrillos sean colocados horizontalmente. La mampostería de las paredes se hace después de instalada la armadura. Una especial atención debe

prestarse a las terminaciones y las uniones en las esquinas, donde se colocan dos planes de mampostería.

2.5 Bóveda

La bóveda soporta temperaturas muy altas y en consecuencia se calienta mucho. Como los gases calientes en la parte superior de la zona de trabajo se encuentra bajo la presión superior a la normal, la bóveda debe ser impermeable para con los mismos. Existen cuatro tipos de bóvedas:

2.5.1 Planas, de ladrillos de grandes dimensiones

2.5.2 De arco

2.5.3 Arco de medio punto

2.5.4 Suspendidas

2.5.1 Planas, de ladrillos de grandes dimensiones

Las bóvedas planas de placas de chamota se emplean en los hornos térmicos y los eléctricos de fundición que trabajan con temperaturas de la zona de trabajo vecinas a 900 °C. La mampostería de tales bóvedas no difiere en nada de la mampostería común, pero, como los ladrillos que se emplean no son de tipo Standard, estas bóvedas son raras y presentan problemas de estabilidad.

2.5.2 De arco

Las bóvedas de arco son las más frecuentes. El corte transversal de una de tales bóvedas está representado en la figura 1, donde se muestra la imposta (parte rayada), el ángulo al centro (α), la flecha de la bóveda (f) y el radio constante (R). La flecha, por regla general, es 12-15% de la cuerda (L).

Un valor aproximado de la reacción provocada por la carga del arco en la imposta se calcula por la fórmula:

$$P = \frac{G \times L}{8 \times f} \times k$$

donde:

P = La componente horizontal de la reacción.

G = Peso del sector de la bóveda en kg. por un metro lineal del largo.

L = Cuerda, en mts.

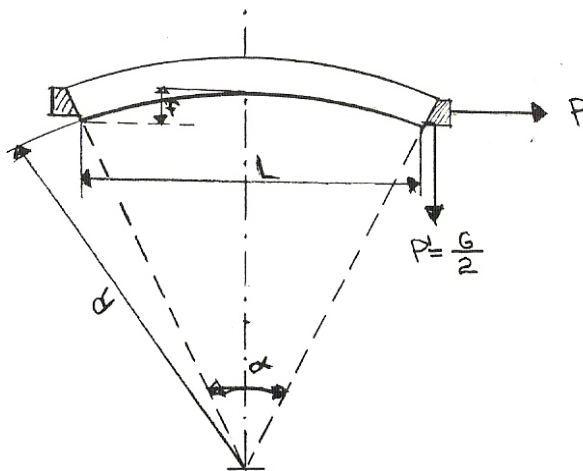
f = Flecha, en mts.

k = Coeficiente que comprende la dilatación del ladrillo por el calor y que depende de la temperatura del horno. Sus valores son:

Tabla I. Coeficiente K.

Temperatura horno °C :	900	1000	1300	1500	1750
Coeficiente k :	2	2.5	3	3.5	4

Figura 1. Corte transversal de una bóveda de arco.



Fuente: José Arturo Ruano Pérez; Hornos industriales, 7.

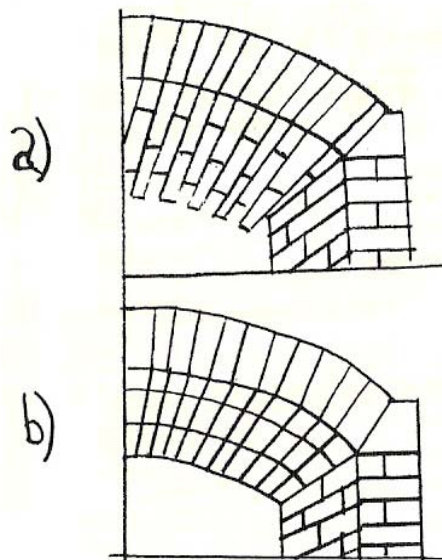
La tabla I muestra la temperatura del horno y el coeficiente K.

Las bóvedas se hacen con ladrillos acuñaados o en combinación de éstos con los derechos, hay dos modos de construirla: la mampostería con trabazón y la mampostería anular, como se indica en la figura 2 a y b, respectivamente.

La ventaja de la mampostería con trabazón está en la mayor densidad de la obra; en cambio, se dificulta la expansión de ladrillos, porque se encuentran firmemente ligados entre sí. Por eso en la bóveda de éste tipo las grietas y los desplazamientos pueden extenderse mucho; también resulta más dificultosa cualquier reparación.

Figura 2. Mampostería de la bóveda.

a) Con trabazón; b) Anular.



Fuente: José Arturo Ruano Pérez; Hornos industriales, 8.

El sistema anular proporciona una bóveda de menor densidad. Entre los anillos se forman grietas, a través de las cuales los gases se abren el camino con relativa facilidad. En cambio, se facilita la reparación, porque, generalmente, suelen caer ladrillos enteros y los huecos formados tienen la forma rectangular. Las bóvedas de éste tipo son más frecuentes.

2.5.3 Arco de medio punto

Las bóvedas de éste tipo se caracterizan por los esfuerzos mínimos en las impostas. Pero, como debido a su estructura resulta excesivamente grande el espacio inmediatamente por debajo de la bóveda, la construcción de éste tipo no es frecuente.

2.5.4 Bóvedas suspendidas

Estas bóvedas se construyen con ladrillos perfilados que fijan en las estructuras metálicas suspendidas en estribos especiales. El uso de las bóvedas de éste tipo resultan ser fáciles para las reparaciones. Sus inconvenientes estriban en la construcción más complicada que la de otras bóvedas. A veces se emplea un tipo combinado de arco y de suspensión simultáneamente.

2.6 Canales

Los canales para conducir los gases y humos hasta la chimenea son de sección rectangular de techo plano y abovedado.

El material de construcción de los canales debe ser adecuado a la temperatura de los gases para que sirvan. Si los canales se encuentran en la vecindad de los cimientos de columnas u otras partes, deben llevar el aislamiento de ladrillo de diatomita para evitar el

recalentamiento de aquéllos. Si los canales se encuentran a gran profundidad, deben ser protegidos por un aislante contra la humedad.

2.7 Mampostería de ladrillos

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

Las juntas entre los ladrillos son los lugares más débiles de la mampostería. La calidad de la mampostería depende del espesor de las juntas y según el espesor de la junta, se distinguen los siguientes tipos de mamposterías:

Rústica	espesor de la junta es 3-5 mm.
Común	espesor de la junta es 2-3 mm.
Fina	espesor de la junta es 1-2 mm.
Esmerada	espesor de la junta menos de 1 mm.

Para obtener las juntas finas es necesario seleccionar con sumo cuidado los ladrillos y pulirlos en bancos especiales. Algunas mamposterías requieren el uso de ladrillos perfilados.

2.8 Juntas térmicas

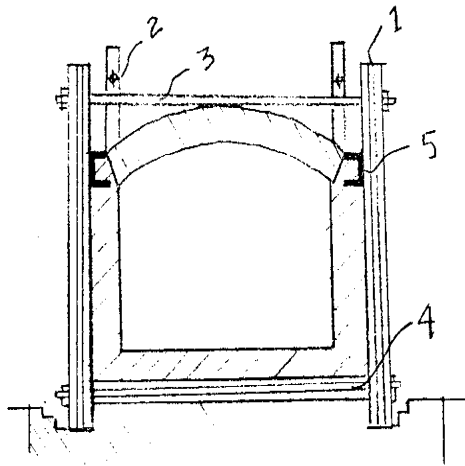
Las juntas térmicas deben compensar la dilatación volumétrica de la mampostería por el calor. Asegurando la integridad de la mampostería, las juntas a la vez no deben rebajar la solidez de la misma y ser causa de escape de gases, de metales o escorias. El ancho y disposición de las juntas se determinan en concordancia con el calentamiento de una parte del horno, una parte determinada, y de los coeficientes de dilatación de los materiales por el calor.

2.9 Esqueleto metálico

Se llama esqueleto a la estructura metálica que sujeta todas las partes del horno y absorbe los esfuerzos que se originan en la mampostería tanto durante su ejercicio, como posteriormente en los procesos de su trabajo. El esqueleto transmite estos esfuerzos a los cimientos. Las partes del esqueleto se aprovechan también para montar sobre ellas los accesorios del horno, como: marcos, tapas, puertas, ventanas, mecheros, toberas, etc.

La figura 3 representa un esqueleto armado de vigas: (2), longitudinales; (5), de imposta; los parales (1) unidos entre si por los tensores (3 y 4) por encima de la bóveda y por debajo de la solera, respectivamente.

Figura 3. Esqueleto móvil.

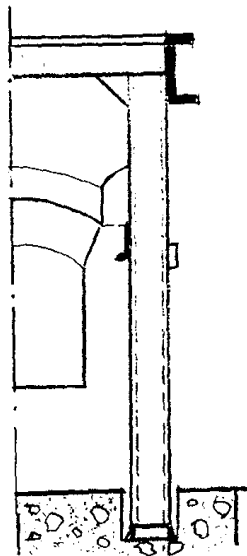


Fuente: José Arturo Ruano Pérez; Hornos industriales, 12.

El esqueleto de la figura 3 se llama móvil. En tales esqueletos es difícil aflojar los tensores en correcta correspondencia con la dilatación térmica de la mampostería.

En la práctica de construcción de hornos se emplean los esqueletos fijos, tal como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Esqueleto fijo.



Fuente: José Arturo Ruano Pérez; Hornos industriales, 13.

2.10 Ventanas de trabajo

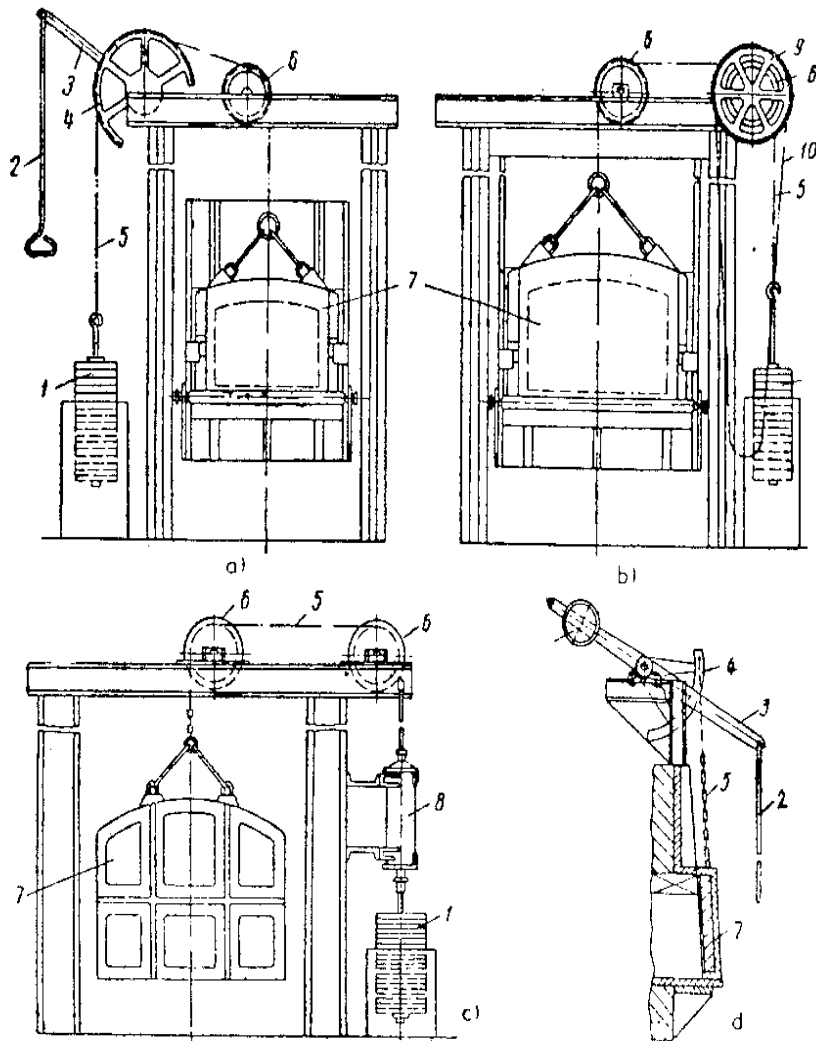
Para cargar y descargar los materiales y objetos, para vigilar el proceso a que se someten y para reglarlo, en las paredes del horno se practican diversas aberturas, llamadas ventanas de trabajo.

2.11 Las puertas

Las puertas a guillotina penden de cables o cadenas que llegan de los mecanismos elevadores, como se muestra en la figura 5, donde: a) mecanismo elevador es manual a palanca, b) también manual pero con la cadena sinfín, c) semimecánico, con neumo-hidrocilindro, d) manual a cadenas o cables.

Figura 5. Mecanismos elevadores de puertas.

- a) Manual a palanca;
- b) Manual con cadena sinfín;
- c) Semimecánico;
- d) Manual a cadenas o cables.



Fuente: José Arturo Ruano Pérez; Hornos industriales, 16.

Los demás detalles que se muestran y que están numerados son:

1. Contrapeso.
2. Vara de tiro.
3. Palanca.
4. Rueda directriz.
5. Cable o cadena.
6. Rodillo director.
7. Puerta.
8. Neumocilindro.
9. Polea para cadena.
10. Cadena sinfín.

La puerta puede ponerse en movimiento mediante el cambio manual de la palanca, cuando se trata de pequeña altura de recorrido, o el sistema de cadenas o cables y poleas con sus ruedas directrices, cuando se trata de elevar la puerta a un nivel apreciable. El mecanismo manual puede ser reemplazado por un semimecánico por aplicación de electromotores o fuerza neumohidráulica.

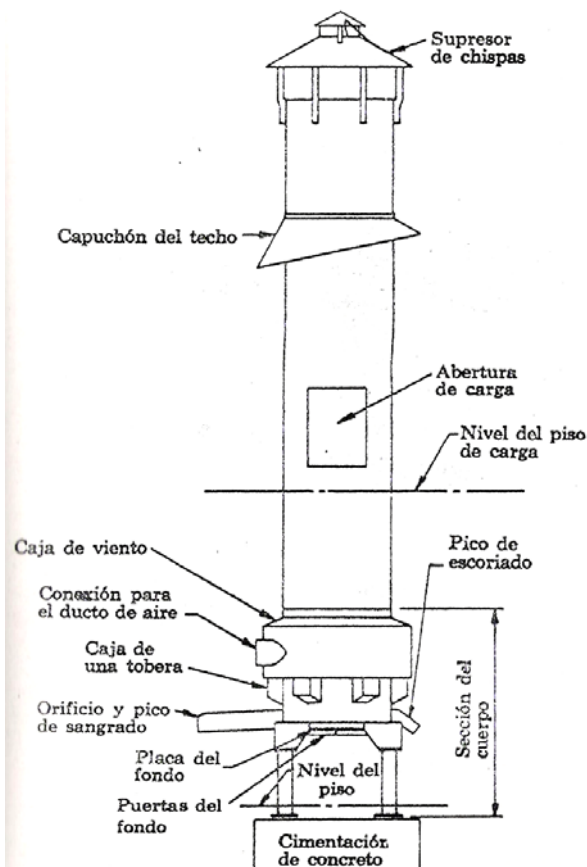
El mecanismo elevador de las puertas en los hornos grandes está montado en las columnas levantadas sobre las fundaciones especiales; los mecanismos para las puertas pequeñas, se fijan directamente a algunas partes reforzadas del esqueleto.

3. HORNOS DE CUBILOTE

3.1 Definición

El cubilote es el horno más difundido entre los existentes para obtener el hierro fundido. Es un tipo de horno de torre vertical, que consiste de una coraza cilíndrica de acero revestida con material refractario y equipado con una caja de viento y tubería para la admisión de aire. En un nivel superior tiene una puerta de carga para la introducción de los materiales de hierro y de combustible. Cerca del fondo tiene orificios y canalillas para sacar el metal fundido y la escoria. En la figura 6 se muestra un cubilote convencional.

Figura 6. Cubilote convencional.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 300.

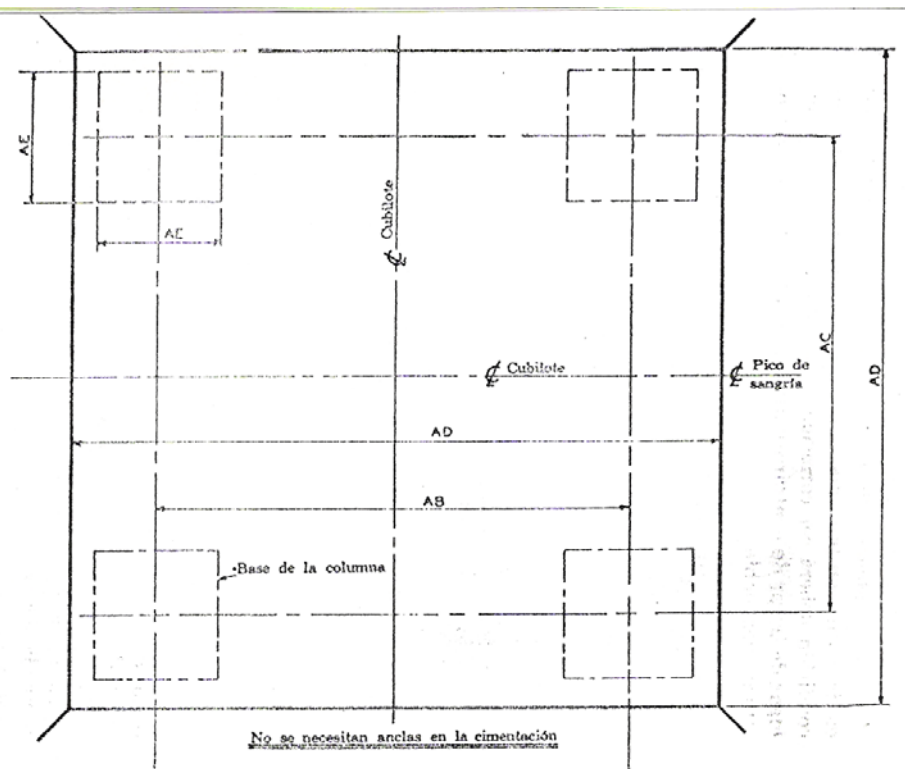
3.2 Principales elementos del cubilote

3.2.1 Cimentación

Deberá construirse una cimentación conveniente para el cubilote y el peso de la carga, la zapata o la profundidad dependerá de las condiciones del suelo.

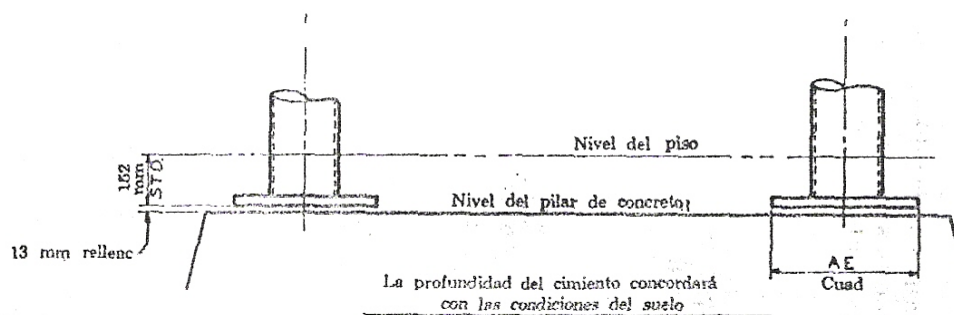
La parte superior de la cimentación deberá quedar unos 15 cms abajo del nivel del piso de la fundición, de manera que se pueda llenar con arena u otro material aislante del calor, para protección de la zapata de concreto. En la figura 7 a y b, se muestra un esquema para cimentaciones y en la tabla II se muestra las medidas para distintas cimentaciones.

Figura 7. a) Esquema de cimentaciones.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 302.

Figura 7. b) Esquema de cimentaciones.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 303.

Tabla II. Medidas de distintas cimentaciones.

Tamaño del cubilote	Diámetro coraza	AB	AC	AD	AE	Peso por metro	Peso total
1	813	914	908	1372	305	395	10000
2	914	914	952	1473	406	505	12250
2 ½	1041	1041	1067	1626	406	590	16800
3	1168	1168	1194	1753	406	650	19550
3 ½	1295	1295	1270	1880	406	710	22250
4	1422	1422	1321	2032	457	780	25900
5	1600	1549	1549	2159	457	1430	35000
6	1676	1651	1539	2261	483	1515	38600
7	1829	1778	1778	2438	483	1650	43500
8	1981	1981	1924	2642	508	1795	50000
9	2134	2134	2102	2794	508	1905	55300
9 ½	2286	2286	2203	2946	508	2065	61600
10	2438	2438	2356	3099	508	2120	64800
11	2591	2591	2591	3251	508	2270	95200
12	2743	2743	2743	3658	610	2460	10500

Los pesos totales están basados en cubilotes de 13.72 m de alto. Por cada metro adicional de chimenea superior añádase el peso por metro que indica la tabla. Los pesos están basados en niveles de carga recomendados y espesores de revestimientos normales.

3.2.2 La coraza

La torre o coraza del cubilote es, fundamentalmente una caja de acero que contiene y soporta el revestimiento del ladrillo refractario, cajas de viento y de toberas, campana en el tejado y supresor de chispas.

La coraza consiste de placas de acero gruesas, roladas en forma de secciones cilíndricas y remachadas, atornilladas o soldadas unas a otras, con juntas de traslape hacia abajo, para protección contra el clima.

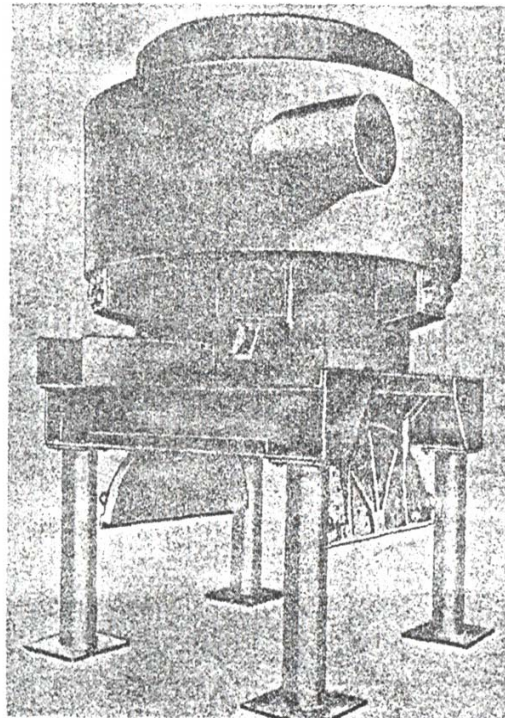
La parte baja, o cuerpo, está construida substancialmente para soportar la carga de las secciones superiores. En el interior de la coraza, y a intervalos regularmente espaciados, están atornillados unos segmentos en forma de repisa, para soportar el revestimiento. La torre del cubilote se extiende a través del techo con la altura suficiente para cumplir con los reglamentos de incendio locales, normalmente un mínimo de 3.28 m arriba del techo o alturas adyacentes.

3.2.3 Sección del cuerpo

La sección del cuerpo consiste de las columnas o patas de soporte, estructura de la base y placa de fondo, puertas del fondo y sección de caja de viento de la torre. La placa del fondo es de acero grueso, con una abertura circular de un tamaño que está de acuerdo con las dimensiones del revestimiento. La placa del fondo está substancialmente reforzada con viguetas pesadas, ángulos y placas

esquineras de ensamble. También incluye unos ángulos para embisagrar las puertas del fondo. Las patas del cubilote están hechas a modo de columnas de acero y deben ser rellenas con concreto reforzado. En la figura 8 se muestra la sección del cuerpo de un horno de cubilote.

Figura 8. Sección del cuerpo de un cubilote.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 304.

3.2.4 Puerta de fondo de bisagras

Este fondo sirve para vaciar el cubilote, al terminarse la fundición. La operación de abrirse debe ser rápida e instantánea, desde cierta distancia para no quemar a los obreros con material recalentado que se vuelca. Los cubilotes grandes se hacen provistos de mecanismos de cierre especiales.

3.2.5 Revestimiento

Los materiales más comúnmente empleados para el revestimiento original del cubilote, son ladrillos de arcilla refractaria especialmente fabricados para este objeto. Los revestimientos monolíticos son mezclas de arcilla refractaria y de grog (pedacería de material refractario cocido) en proporciones convenientes, apropiadamente mezclada con agua, y apisonada contra la coraza o contra un fondo de ladrillo refractario.

Generalmente puede emplearse una sola clase de refractario de arcilla para revestir el cubilote desde el fondo hasta la puerta de carga, siempre que el tipo seleccionado pueda cumplir los severos requerimientos de la zona de fusión. Los refractarios se originan en el interior de la coraza del cubilote para formar un recipiente de espesor amplio y uniforme para las cargas de combustible y metal. El revestimiento constituye el horno en sí, y la coraza de acero simplemente cumple las funciones de mantenerlo en su lugar.

3.2.6 Cinturón de toberas

La parte principal de éste cinturón está formada por la caja de aire, de sección rectangular. La distribución más pareja de aire a lo largo de la circunferencia del cubilote se obtiene, cuando el aire ingresa desde arriba a través de dos ramales, situados en los dos extremos diametralmente opuestos. La caja de aire remachada al blindaje dificulta vigilar su estado y más aún efectuar reparaciones cuando llega a quemarse el revestimiento. Por eso es preciso dejar entre el blindaje y la caja de aire una luz de 100-200 mm. También es recomendable hacer inclinada la pared superior de la caja para evitar que se acumulen el polvo y la basura en general. Los orificios de las toberas pueden comunicarse directamente con la caja o alimentarse con aire

través de los codos de las toberas, que arrancan en su parte inferior. Debe ser previsto la regulación de la cantidad de aire que ingresa en cada tobera, así como debe existir la posibilidad de cortar del todo la inyección de aire, mediante las válvulas tipo mariposa o bien mediante el desplazamiento de pasadores.

3.3 Descripción del cubilote

Los hornos de cuba o cubilotes son utilizados en la mayoría de las fundiciones de hierro. En la figura 9 se ve esquemáticamente un cubilote con su chimenea, y en la tabla III hemos indicado las dimensiones principales de diversos modelos de este horno.

En la parte superior de la cuba se encuentra la plataforma de carga y sobre un costado del horno, a la misma altura, se halla practicada una abertura, el tragante o cargadero, por el cual se alimenta el horno. La forma del tragante depende del tipo de horno, o del modo de su carga. A continuación se encuentra la chimenea, con un revestimiento refractario más liviano y provista de parachispas, o de cámara de chispas.

A una altura, que varía según el tamaño del horno, se encuentra colocado un anillo de hierro forjado que corre todo alrededor del horno y sobre el cual está fijada una tubería de aire. Un ventilador, accionado eléctricamente, insufla el aire en esta caja de hierro, con una presión manométrica que oscila entre 400 y 1000 mm de columna de agua, o sea de 0.04 a 0.1 kg por cm², la presión depende del diámetro del horno y debe ser tan alta que el viento llegue al centro de la carga venciendo las resistencias del rozamiento y de los remolinos; por otro lado, la presión no debe ser demasiado forzada para no resultar excesiva en la periferia del horno.

La cuba está cerrada en su parte inferior por una placa horizontal, la cual está afirmada en esta posición por criques o por otro sistema, el que debe ser de tal construcción que permita un abrir rápido. Esta placa está cubierta con una capa de arena, generalmente para su mayor consistencia, mezclada con ligantes arcillosos, con el fin de protegerla del calor y del hierro líquido. Al mismo nivel del piso de arena se prevé un agujero, la piquera, destinada a la extracción del hierro, y la cual, entre sangría y sangría, se mantiene cerrada con un tapón de arcilla. A continuación está instalada una canaleta de chapa, protegida de un revestimiento refractario, por la cual se conduce el hierro en estado líquido a las cucharas o a los calderos.

Tabla III. Datos técnicos principales del cubilote de la figura 9.

Producción en kg/h	Diámetro interno		Altura del horno H ₁ Mm	Chimenea		Cámara de chispas	
	del crisol mm	del horno mm		Diámetro mm	Altura H ₃ Mm	Diámetro mm	Altura junto con la chimenea H ₂ mm
1000	500	900	4550	900	5000	1800	7900
3000	700	1100	5100	1100	6000	2100	9000
5000	900	1400	6000	1400	7000	2400	10000
8000	1100	1800	7000	1800	7000	2800	10500
12000	1400	2100	7500	2100	7000	3200	10500

La parte desde el nivel de las toberas, que inyectan el aire a través de la carga, hasta el fondo del horno, se llama crisol; en el crisol se reúnen el hierro fundido y las escorias; éstas, por su menor peso específico, flotan en la superficie del hierro líquido y salen por un agujero, el escoriador, que se encuentra en un nivel entre la piquera y el umbral de las toberas de aire. El escoriador debe quedar siempre

Y por último se encuentra cámara de chispas, que sirven para evitar el peligro de incendios producidos por la propagación de chispas; en este sentido es necesario acudir a la instalación de cámara de chispas, las cuales producen una variación en la sección de pasaje de los gases, permitiendo una disminución de la velocidad de los mismos, con la consiguiente precipitación de las partículas de arrastre, que pueden así ser recuperadas.

3.3.1 Puesta en marcha del cubilote

Para poner en marcha el horno debe calentársele cuidadosamente, a fin de eliminar paulatinamente la humedad y evitar que las paredes se agrieten. Este caldeo preliminar se obtiene quemando leña en el interior del crisol. Después se empieza a echar el coque, cuya columna ha de llegar por encima de las toberas.

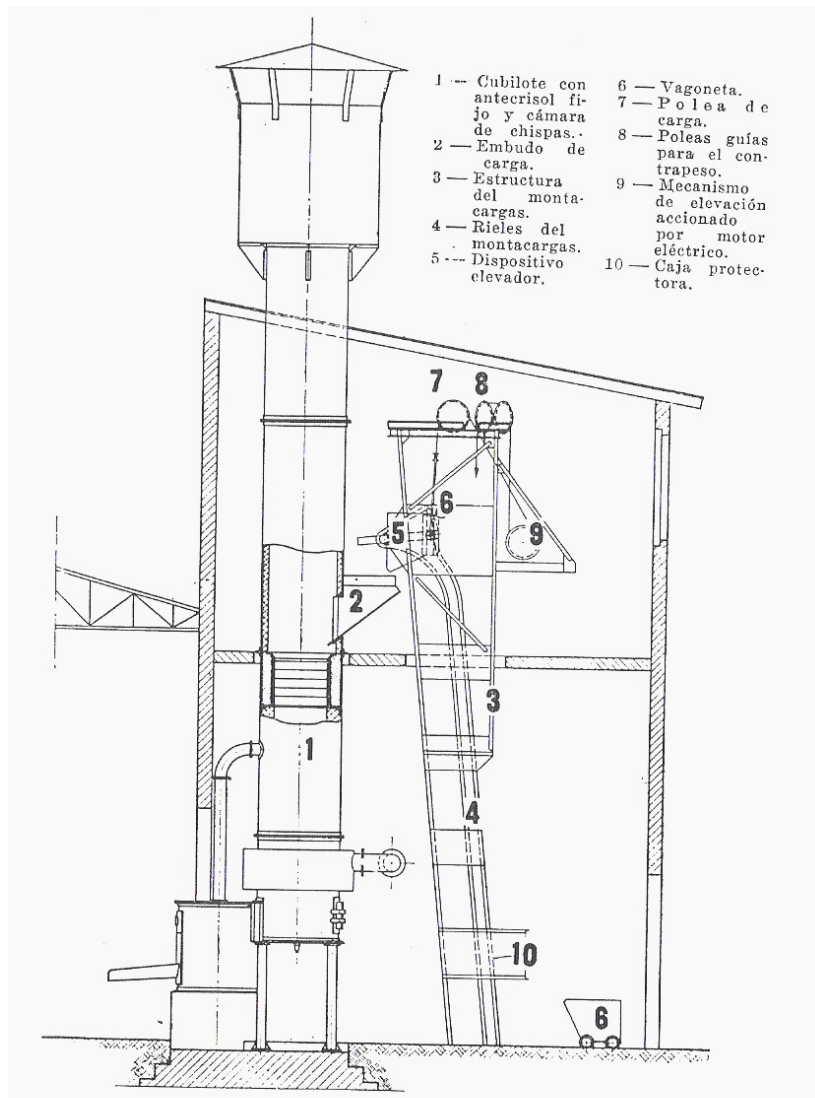
Una vez calentado el horno se empieza a introducir el hierro, manteniéndose durante esta operación la piquera abierta para calentar bien el fondo del crisol. Se tapará recién cuando aparezca el hierro fundido. Al principio el fuego marcha por tiro natural y luego se da viento a las toberas. La puesta en marcha del horno debe efectuarse despacio y requiere a veces -de acuerdo con el tamaño de los hornos-, varias horas; es preferible efectuarla con paciencia para obtener un hierro bien caliente.

3.3.2 Carga del cubilote

La carga de los cubilotes puede hacerse a mano o mecánicamente. Cuando se trata de cubilotes pequeños, se efectúa a mano desde una plataforma de carga, donde además a menudo, se almacena material de reserva, la carga se hace por capas horizontales de hierro y de combustible, en forma alternada.

En talleres de fundición de cierta importancia, se utilizan para la carga dispositivos mecánicos exclusivamente; estos dispositivos son de construcción muy variada. Lo más corriente es el uso de montacargas verticales o inclinados, accionados eléctricamente y con descarga automática. Sin embargo, para elevar la carga hasta la plataforma

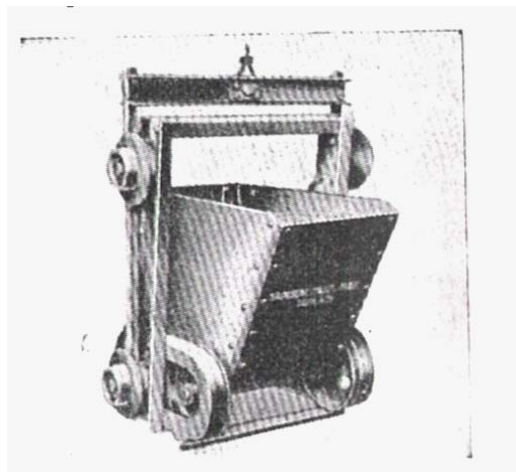
Figura 10. Esquema de un cubilote con montacargas inclinado, fijo.



Fuente: Biedermann-Hassekieff; Fundición del hierro y del acero, 350.

puede recurrirse también a puentes-grúas eléctricos. En la figura 10 se representa esquemáticamente un montacargas inclinado, fijo. Su funcionamiento es el siguiente: La carga es transportada desde el lugar de apilamiento, con una vagoneta (marcada con 6 en la figura) hasta el montacargas. Allí, la vagoneta es fijada sobre un dispositivo elevador, que, mediante un mecanismo eléctrico, la sube junto con la carga, hasta el tragante del cubilote. En la figura 11 se muestra un dispositivo elevador con vagoneta.

Figura 11. Dispositivo elevador con vagoneta.



Fuente: Biedermann-Hassekieff; Fundición del hierro y del acero, 351.

3.3.3 Funcionamiento del cubilote

La carga debe llenar completamente el horno y estar compuesta por estratos horizontales sucesivos de coque, de hierro y, si es necesario, de fundentes, los cuales tienen como objeto permitir la formación de escorias fluidas y fácilmente fusibles. Como los cubilotes trabajan según el sistema de contracorriente, es decir, descenso de la carga desde arriba en dirección hacia abajo, alcanzando así

sucesivamente lugares de más y más calor, y ascenso de los gases que produce la combustión, encontrando materias cada vez menos calientes, su rendimiento es bastantes elevado.

El coque se quema con el aire inyectado y produce temperaturas altas, las cuales provocan la fusión del hierro que cae en gotas, para juntarse en el fondo de la cuba, es decir, en el crisol. Una vez lleno el crisol, se abre la piquera, la cual está cerrada con un tapón de arcilla, y se extrae el hierro líquido. El agregado de fundentes tienen la propiedad de que, al combinarse con ciertos elementos, forman silicatos de un punto de fusión más bajo.

Además de la castina, se emplea como fundente espato-flúor o fluorina; estos agregados poseen además la ventaja de mejorar la calidad de hierro al favorecer la desulfuración. Un indicio de que el crisol está lleno y de que el hierro debe ser extraído, lo constituye el hecho de que por el escoriador empieza a salir hierro fundido. Sin embargo, siempre se puede determinar según las cantidades de cargas y del tiempo pasado (25 a 35 minutos) después de las cargas, cuánto hierro líquido se ha acumulado en el crisol.

3.4 Rendimiento del cubilote

Se toma el diámetro del cubilote en el plano de las toberas para efectuar los cálculos. El rendimiento del cubilote de un diámetro dado depende de la cantidad de aire que se entrega, en m^3 , por cada m^2 de la sección del cubilote. La relación entre el rendimiento específico del cubilote (ton/m^2 hora), el consumo de combustible y de aire, y la temperatura del metal entregado por el cubilote, se muestra en la figura 12, donde:

Abscisas : Rendimiento específico, ton/m^2 hora;

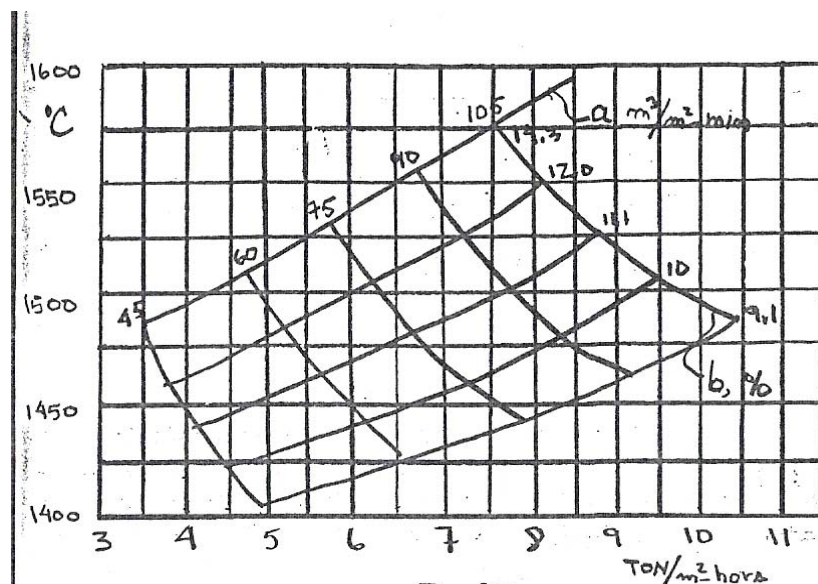
Ordenadas : Temperatura, $^{\circ}C$;

- a : Consumo específico de aire, $m^3/m^2 \text{ min}$;
- b : Consumo de coque, %;

Designado con:

- S = Área de la sección transversal del cubilote, m^2 .
- a = Consumo específico de aire, $m^3/m^2 \text{ min}$.
- q = Consumo de combustible en las cargas de trabajo, en % a la carga metálica.
- a_1 = Consumo de aire, m^3/kg de combustible.
- Q = Rendimiento del cubilote, ton/hora.

Figura 12. Diagrama de la relación entre el rendimiento específico del cubilote, el consumo de combustible y de aire y la temperatura del metal



Fuente: José Arturo Ruano Pérez; Hornos industriales, 69.

Entonces, la cantidad de aire entregado al cubilote = $S \times a_1$ m/min. La cantidad de combustible quemado en el cubilote en 1 minuto es:

$$\frac{S \times a}{a_1} \text{ (kg/min)}$$

La cantidad de metal fundido en 1 minuto es:

$$\frac{S \times a}{a_1 \times q} \text{ (kg/min)}$$

Es decir que el rendimiento del cubilote será:

$$Q = \frac{S \times a \times 100 \times 60}{a_1 \times q \times 1000} \approx \frac{6 \times S \times a}{a_1 \times q} \approx \frac{6 \times \pi \times D^2 \times a}{a_1 \times q \times 4}$$

Despejando el diámetro (D):

$$D = \sqrt{\frac{Q \times a_1 \times q}{4.71 \times a}} \text{ (mts)}$$

Por término medio al consumo de coque a 10% del peso de la carga metálica de trabajo le debe corresponder el consumo específico de aire de $100 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ min}$; al incrementar el consumo de coque, debe elevarse el consumo específico de aire. Aproximadamente, el consumo de aire por 1 kg de coque quemado es de 6.5 a $6.8 \text{ m}^3 / \text{kg}$.

3.4.1 Altura del cubilote

H = Altura total del cubilote.

H_{ut} = Altura útil, desde el eje de las toberas inferiores hasta el umbral del tragante.

H_{tob} = Altura de toberas, desde el fondo del crisol.

H_p = Altura desde el fondo del crisol hasta el piso del establecimiento.

La primera altura se obtiene por la relación obtenida en la práctica:

$$\frac{H_{ut}}{D} = 4 - 6 \quad \text{donde D es el diámetro}$$

La altura de toberas se obtiene por la fórmula:

$$H_{tob} = \frac{2}{S} \left(\frac{G_m}{\delta_m} + \frac{G_e}{\delta_e} \right) \quad (\text{mts})$$

Donde:

G_m = Cantidad máxima de hierro fundido almacenada en el cubilote; en toneladas.

G_e = La cantidad de escorias correspondiente a esa cantidad de hierro fundido, en toneladas.

δ_m = Peso específico de hierro fundido líquido, con valor de 6.9 a 7 ton/m³.

δ_e = Peso específico de escoria líquida, igual a 2 ton/m³.

La distancia del fondo del crisol hasta el piso del establecimiento se determina según las dimensiones del cubilote; partiendo de las comodidades para la atención de la marcha y las reparaciones en su inferior.

$$\text{La altura total: } H = H_{ut} + H_{tob} + H_p \quad (\text{mts}).$$

Las dimensiones de las toberas y la disposición de ellas se ha establecido experimentalmente que el trabajo más efectivo es el del cubilote que tiene hileras de toberas, cuya suma de superficies representa de 1/5 a 1/3 de la sección del cubilote. La segunda y la tercera hilera de las toberas son destinadas para distribuir

uniformemente el aire en el cubilote y producir la combustión complementaria del óxido de carbono. La cantidad de toberas se toma igual para cada hilera, según el diámetro interior del cubilote, expresado en mm., como puede apreciarse:

Diámetro en mm.	No. toberas/hilera
600-800	4
900-1000	6
1200 y más	8

La relación entre la altura y la anchura en las toberas de primera fila es de 1/2 a 1/3; para las hileras superiores entre 1/1.5 hasta 1/1.6. Las toberas se ensanchan en dirección del movimiento del aire y se inclinan 5° en la primera fila, 10° en la segunda y 15° en la tercera. La inclinación se hace para compensar en algo la tendencia del aire de doblar enseguida hacia arriba, al chocar contra las paredes.

3.4.2 Tubos portavientos

La sección de los tubos cortavientos se elige basándose en los cálculos de la velocidad media del movimiento del aire en ellos. En los cubilotes de la URSS, por ejemplo, se toman velocidades de 12 a 18 m/seg.

3.4.3 Caja de aire o viento

Análogamente, la sección se toma a partir de la velocidad del movimiento del aire, que oscila entre 2.5 y 4 m/seg.

La fórmula más sencilla para calcular la presión del viento y más utilizada es la siguiente:

$$p = k \times H_{ut} \times v$$

donde:

p = Presión del viento.

k = Coeficiente de la resistencia del lecho de fusión:

para uno muy grueso 35

para uno grueso 40

para uno mediano 45

para un fino 50

H_{ut} = Altura útil del cubilote, en mts.

v = Velocidad convencional del movimiento de los gases en m/seg, que se toma igual a la relación del volumen de aire/seg (a 0° y 760 mm) a la superficie total de la sección del cubilote.

3.5 Cubilotes con insuflación de aire caliente

En los últimos años se ha introducido una mejora importante en la construcción de los cubilotes; se inyecta aire de soplado caliente en el horno, aprovechando los gases de escape del cubilote para el calentamiento de dicho aire, de manera similar a lo efectuado en los altos hornos.

La introducción de este sistema permite el ahorro de considerable cantidad de coque, obteniéndose un hierro más caliente. Debido a este sobrecalentamiento, obtenido durante el proceso de fusión, se aumenta la calidad del hierro fundido.

Estos gases de escape, con una proporción elevada de óxido de carbono, son quemados en un recuperador y el calor desarrollado se utiliza para calentar el aire de soplado.

Existen diversos sistemas para la realización de este procedimiento. En el esquema de la figura 13 se ve la disposición de una planta moderna de cubilotes, con aire de soplado caliente y

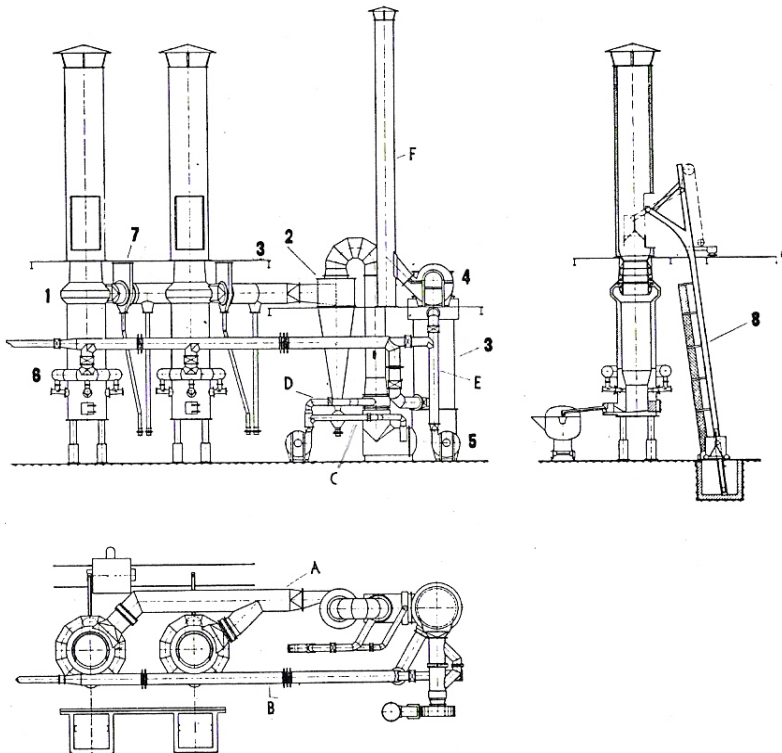
recuperación de los gases de escape; esta planta fue desarrollada por la firma alemana Gesellschaft fur Huttenwerksanlagen m. b. H. Se explicara brevemente, en base al esquema mencionado, el funcionamiento de este sistema:

Los gases de escape se aspiran a través de las cámaras de aspiración en forma de anillo (1), desde el cubilote que se encuentra en servicio. Estos gases son conducidos a un separador (2), para eliminar el polvo arrastrado. Luego, pasan los gases, libres de polvo, a los quemadores del recuperador de calor (3), donde son mezclados íntimamente con aire fresco de combustión (D) y se queman. Los gases quemados son expulsados al aire libre mediante un ventilador (4), el cual los aspira a través de los tubos verticales del recuperador. Por otra parte, el aire frío (E) se introduce en el recuperador según el principio de contracorriente, mediante el ventilador (5); este aire, una vez precalentado, penetra en las cajas de viento (caliente) (6) de los cubilotes.

La empresa Griffin Wheel Co., Chicago, creó un sistema de recuperador de calor llamado Sistema Griffin, es el método más ampliamente empleado, y generalmente con éxito, que utiliza tanto el calor sensible como el latente de los gases del cubilote. En este sistema una gran porción de todos los gases del cubilote se extraen de él a través de salidas o “tomas” situadas en el revestimiento y localizadas ya sea arriba o abajo de la puerta de carga.

En aquellas instalaciones en que los gases se extraen por debajo de la puerta de carga, se construyen alrededor del cubilote varias tomas abiertas hacia un ducto revestido con refractario, y están conectadas con la cámara de combustión del equipo de precalentamiento. Según pasan los gases calientes a la cámara de combustión, son mezclados con aire suministrado desde una derivación

Figura 13. Esquema de una planta de cubilotes con inyección de aire soplado caliente.

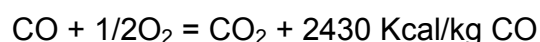


Fuente: Biedermann-Hassekieff; Fundición del hierro y del acero, 363.

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1.- Cámara de aspiración. | A.- Gas de escape del cubilote. |
| 2.- Separador de polvo. | B.- Aire caliente. |
| 3.- Recuperador de calor. | C.- Aire fresco. |
| 4.- Ventilador para gases de escape. | D.- Aire de combustión. |
| 5.- Ventilador para el aire fresco. | E.- Aire frío. |
| 6.- Caja de viento. (caliente). | F.- Gas de escape del recuperador de calor. |
| 7.- Registro. | |
| 8.- Montacargas inclinado, corredizo. | |
| 9.- Plataforma de carga. | |

de los ductos principales de soplado de aire. En las instalaciones en que los gases son extraídos por arriba de la puerta de carga, un ducto sencillo conecta el cubilote a la cámara de combustión del equipo de precalentamiento. En el ducto se introduce aire procedente de la puerta de carga junto con los gases.

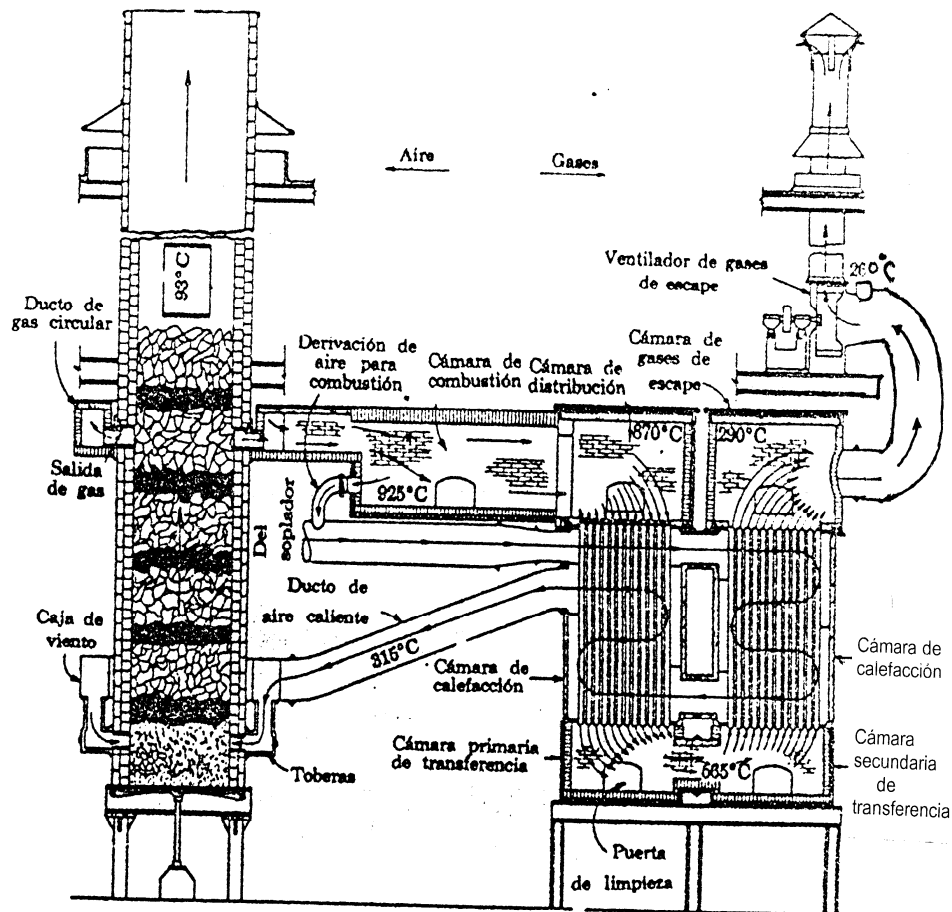
En ambos tipos de instalaciones, el oxígeno del aire se junta con el monóxido de carbono de los gases de descarga del cubilote, y se quema para formar bióxido de carbono con una liberación de calor. La reacción es:



En la figura 14 se aprecia una vista esquemática de un equipo Griffin de soplado caliente de dos etapas. La quema de los gases calientes en la cámara de combustión causa que los ductos de combustión adquieran una temperatura de unos 925 °C. La temperatura de los gases al pasar a la cámara distribuidora baja algo, y se mantiene a unos 870 °C admitiendo exceso de aire a la cámara de combustión, si es necesario.

El fondo de la cámara de distribución está formado por una placa de acero que soporta los extremos superiores de un banco de tubos de hierro colado, cambiadores de calor, que sobresalen unos 25 mm arriba de la placa. El espacio entre los tubos se llena con arcilla refractaria plástica para prevenir su ataque por los gases calientes, para impedir fugas de aire, y para permitir la dilatación y la contracción. Los gases calientes pasan hacia abajo a través de los tubos cambiadores de calor hasta la cámara primaria de transferencia, y de allí a la cámara secundaria. La temperatura de los gases en este lugar es de unos

Figura 14. Diagrama esquemático de un equipo de calentamiento de aire soplado, de dos etapas, tipo Griffin.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 425.

565 °C, al haber sido cedido calor a la aire de soplado por medio de los tubos cambiadores de calor. Los gases pasan hacia arriba a través de un banco similar de tubos, en donde se transmite un calor adicional, hasta el extractor de gases de escape, y a la atmósfera. La temperatura de los gases al llegar a la cámara de escape es de unos 290 °C, y se reduce a 260 °C cuando llegan a la atmósfera.

El aire frío que entra, para primeramente alrededor de las secciones superiores del cambiador primario de calor, el que previene el sobrecalentamiento de los extremos de los tubos y de su placa de soporte, y luego alrededor de las secciones superiores de los tubos del cambiador secundario de calor. Después de esto, el aire de soplado es desviado por medio de placas deflectoras de manera que fluya alrededor de los tubos en una dirección opuesta al flujo de los gases calientes de combustión que van por el interior de los tubos, hacia abajo a través del cambiador secundario y hacia arriba a través del cambiador primario a la caja de viento y las toberas, a través del ducto de aire caliente para el soplado.

Se registran continuamente las temperaturas de todos los lugares principales e importantes del sistema. Se emplean dispositivos de seguridad adecuados para asegurarse contra sobrecalentamiento y explosiones. Los principales problemas de mantenimiento consisten en la limpieza de los tubos cambiadores de calor y sus placas de soporte.

4. EQUIPO DE SOPLADO Y SU CONTROL

4.1 Equipo de soplado

La selección del equipo apropiado para suministrar el “soplo” de aire a un cubilote de fundición es de la mayor importancia para cualquier fundidor. A causa que su abastecimiento es ilimitado, hay una tendencia a creer que el aire no es un factor de importancia en el costo. No obstante, si se piensa que el peso de aire necesario en la operación del cubilote es del mismo orden que el peso de las cargas de hierro, es aparente que debe dársele una muy cuidadosa consideración, no sólo a la cantidad de aire, sino también a los medios de entrega al cubilote y al método de controlar el abastecimiento.

4.2 Análisis de los requerimientos

Cada instalación de cubilote tiene sus propias características distintas, y, por lo tanto, éstas deberán ser analizadas independientemente para llegar a la mejor selección en cuanto al tipo y tamaño del equipo. En diferentes casos, la selección puede quizás ser diferente, aun cuando el tamaño del cubilote y el régimen de fusión sean los mismos. Además, al hacer el análisis deberán tenerse en cuenta los siguientes factores:

4.2.1 Factores que determinan el volumen y presión del aire

- 1.- Tipo y tamaño del cubilote.
- 2.- Régimen de fusión (normal y máximo).
- 3.- Relación del hierro al coque en las cargas (afectado apreciablemente por el precalentamiento del aire y por su contenido en humedad).

- 4.- Tipo de hierro deseado.
- 5.- Temperatura del hierro en el pico.
- 6.- Altura de la cama de coque y de las cargas arriba de las toberas.
- 7.- Tamaño y calidad del coque.

4.2.2 Factores que definen la selección de la máquina soplante

- 1.- Volumen y presión máximos para condiciones de fusión máximas.
- 2.- Costo inicial y de operación.
- 3.- Localización del soplador con referencia al cubilote.
- 4.- Temperatura máxima del aire a la entrada del soplador.
- 5.- Método de impulsión.
- 6.- Altitud de la instalación.

4.3 Tipos de sopladores para cubilotes

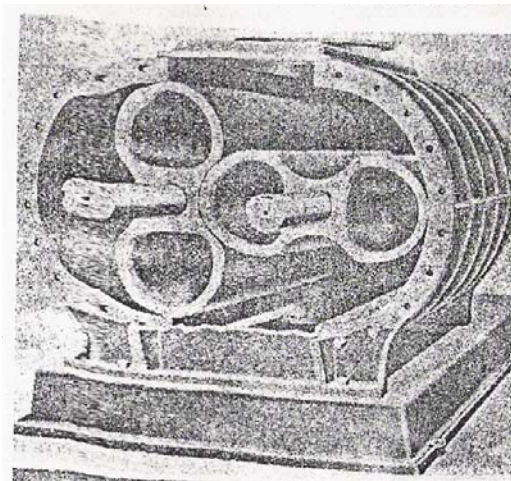
Los sopladores empleados generalmente en servicio de cubilotes de función son de tres tipos: 1) desplazamiento positivo o soplador “lobular”; 2) soplador centrífugo o “turbosoplador”; y 3) el soplador ventilador, similarmente diseñado, para condiciones de baja presión y hornadas cortas.

4.3.1 Sopladores de desplazamiento positivo

El soplador de desplazamiento positivo entrega un volumen definido de aire en cada revolución de sus paletas o “lóbulos”, a cualquier presión requerida, y contra cualquier resistencia que hubiese en el interior del cubilote, dentro de las limitaciones del diseño del soplador y de su motor. A velocidad constante, entrega un volumen

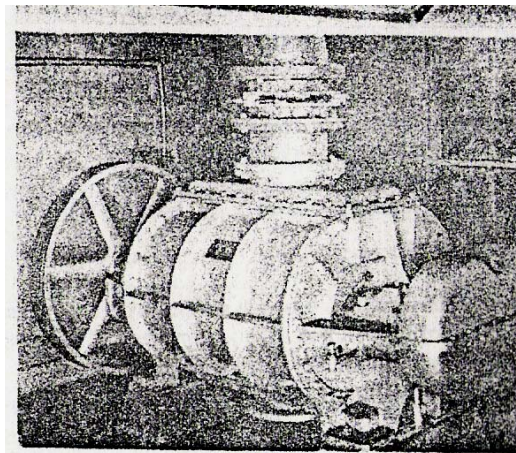
esencialmente constante a presiones variables. El consumo de fuerza, cuando el soplador está operando a velocidad constante, varía directamente con la presión de descarga del soplador, independientemente del volumen de aire realmente entregado al cubilote.

Figura 15. Vista interior de un soplador de desplazamiento positivo.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 390.

Figura 16. Instalación de un soplador de desplazamiento positivo.

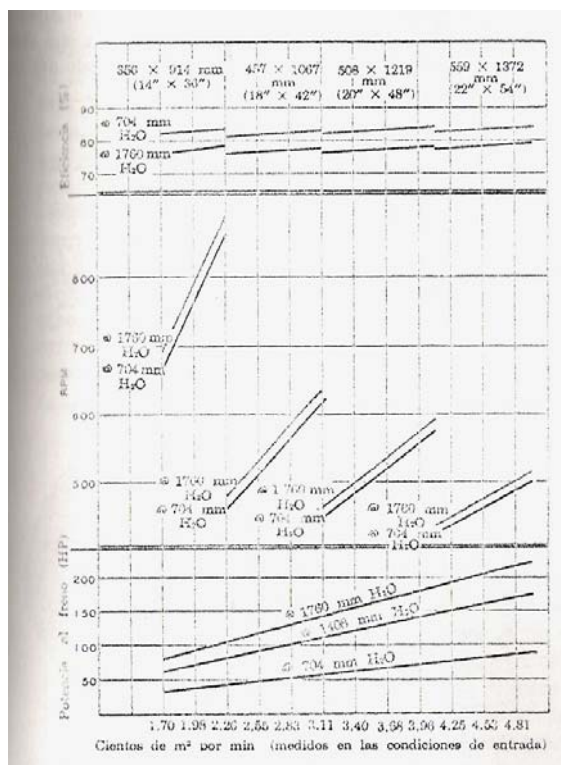


Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 390.

El soplador de desplazamiento positivo, ilustrado en la figura 15 y figura 16, consiste de dos impulsores en forma de l6bulo, montados en flechas (o ejes) paralelos, que giran en direcciones opuestas dentro de un envolvente apropiado. La relaci6n rotativa de los impulsores no se tocan uno al otro, ni al envolvente, y, por lo tanto, no se necesita lubricaci6n interior. Los impulsores giran a velocidades moderadas generalmente de 200 a 500 rpm en los sopladores grandes, y hasta 800 rpm en los m1s peque1os.

En la figura 17 se pueden apreciar las curvas de funcionamiento t6picas de diversos sopladores de desplazamiento positivo operando a diversas velocidades.

Figura 17. Curvas caracter6sticas de sopladores de desplazamiento positivo.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operaci6n, 392.

Es importante observar que en cada revolución es desplazado un volumen definido de aire y que el volumen de aire será entregado positivamente contra cualquier resistencia, dentro de los límites de resistencia estructural del soplador y de la potencia del motor impulsor. A velocidad constante, por lo tanto, entregará un volumen esencialmente constante, cualquiera que sea la presión variable de operación. Además, la velocidad que se ha de seleccionar es la que se necesita para entregar el volumen de aire calculado para el régimen de fusión máximo deseado, teniendo presente el hecho de que la cantidad real de aire, en metros cúbicos normales, será inversamente proporcional a la temperatura absoluta del aire a la entrada del soplador. Con ciertos tipos de equipos para control de humedad, la temperatura del aire de entrada puede ser 43 °C.

Cuando la operación del cubilote requiere una menor cantidad de aire, el exceso es extraído del sistema de soplado a través de una válvula variable del tipo mariposa, situada en el ducto, entre el soplador y el cubilote. Esta válvula puede ser operada manualmente, pero generalmente lo es automáticamente.

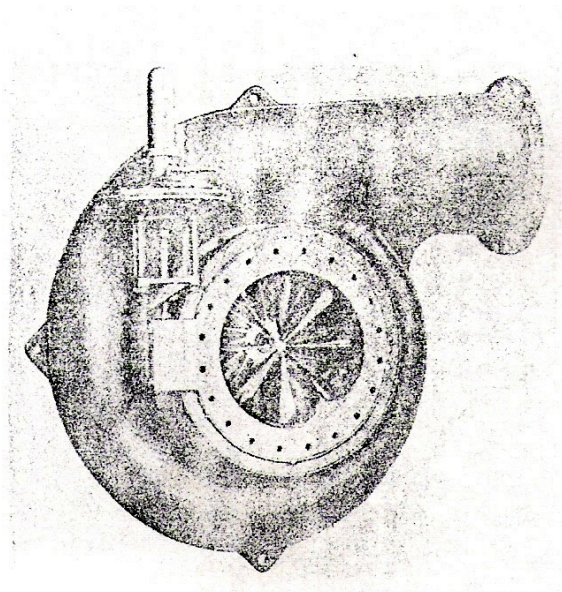
Si se desea puede obtenerse la mínima cantidad de aire y la eficiencia del soplador en sí puede ser mejorada por medio del empleo de una unidad motriz de velocidad variable en combinación con (o reemplazándola) la polea de múltiple bandas tipo V, para reducir las rpm hasta corresponder con las mínimas necesidades de soplado. Sin embargo, en muchos casos las economías efectuadas en el soplador se pierden prácticamente con las pérdidas de una impulsión de velocidad variable.

4.3.2 Sopladores centrífugos

El soplador centrífugo entrega aire a la presión de diseño por la acción centrífuga de uno o más impulsores de velocidad relativamente alta, actuando de una manera muy parecida a una bomba centrífuga. La acción no es “positiva”, puesto que en cada momento hay una trayectoria abierta desde la descarga hasta la succión. A velocidad constante, el soplador centrífugo entregará su presión de diseño esencialmente constante con volúmenes variables, y el consumo de fuerza variará directamente con el volumen Standard de aire entregado.

El soplador centrífugo puede ser del tipo de un solo paso o del tipo de pasos múltiples. En la figura 18 se observa un soplador centrífugo de un solo paso, con paletas a la entrada, controladas automáticamente.

Figura 18. Soplador de una sola etapa, con paletas a la entrada, controladas automáticamente.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 393.

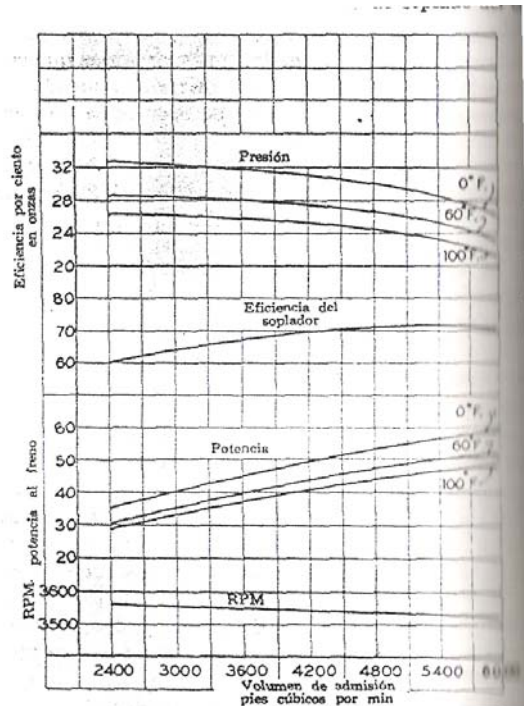
Los sopladores de un solo paso (o etapa) consisten esencialmente de un impulsor simple, que puede ser del tipo semicerrado o totalmente cerrado, rodeado por una caja en forma de caracol o de voluta. El impulsor es, por lo general, de una sola pieza fundida en aleación de aluminio, y la caja puede estar hecha de hierro colado o fabricada con placas de acero. Este tipo de soplador está impulsado, generalmente, por un motor eléctrico de alta velocidad (3600 rpm), y puede ser del tipo colgante, con el impulsor montado en una extensión de la flecha del motor, o del tipo de pedestal, con su propia flecha y cojinetes y directamente acoplado a su motor.

Los sopladores de pasos (o etapas) múltiples consisten de dos o más impulsores, generalmente del tipo cerrado, dispuestos en una caja apropiada. Generalmente están impulsados por un motor eléctrico de 1800 rpm, o bien el soplador puede tener su propia flecha y cojinetes, con los ejes del motor y del soplador conectados por medio de un cople flexible.

El funcionamiento de un soplador centrífugo girando a 3600 rpm, de tamaño mediano y de un solo paso, se muestra en la figura 19 por procedimientos gráficos. De las curvas de la figura 19 se deduce que, con una velocidad prácticamente constante en el motor, la presión de descarga del soplador es mínima cuando entrega la máxima cantidad de aire a la máxima temperatura del aire en la entrada.

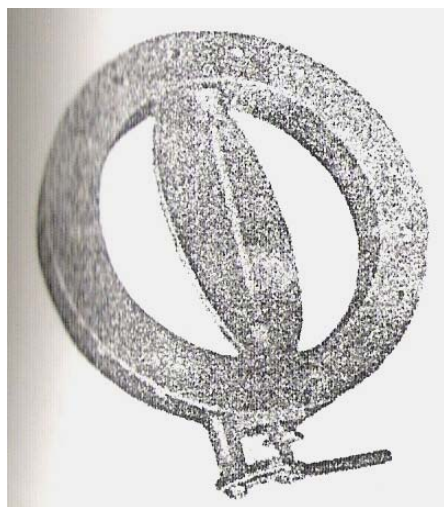
Cuando la operación del cubilote requiere menor presión de descarga que la desarrollada por el soplador centrífugo, se instala en la descarga o en la entrada del soplador una válvula de mariposa o del tipo de diafragma con objeto de reducir la presión en la caja de viento a la requerida para la operación del cubilote en particular. La figura 20 muestra una válvula de mariposa típica de operación a mano.

Figura 19. Curvas de funcionamiento de un soplador centrífugo de una sola etapa.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 395.

Figura 20. Válvula del tipo de mariposa.



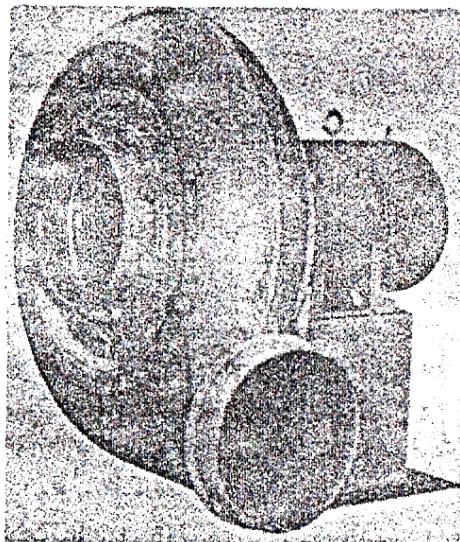
Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 396.

4.3.3 Sopladores del tipo ventilador

El soplador ventilador opera de acuerdo con el mismo principio que el soplador centrífugo, pero es de un diseño menos complicado, y su eficiencia es más baja. La figura 21 muestra un soplador del tipo ventilador.

El soplador ventilador se emplea ampliamente para suministrar el aire de soplado en cubilotes pequeños, en que la operación no es continua y en los que el bajo costo inicial es de primera consideración. Pueden ser movidos por bandas o directamente acoplados al motor.

Figura 21. Soplador del tipo ventilador.

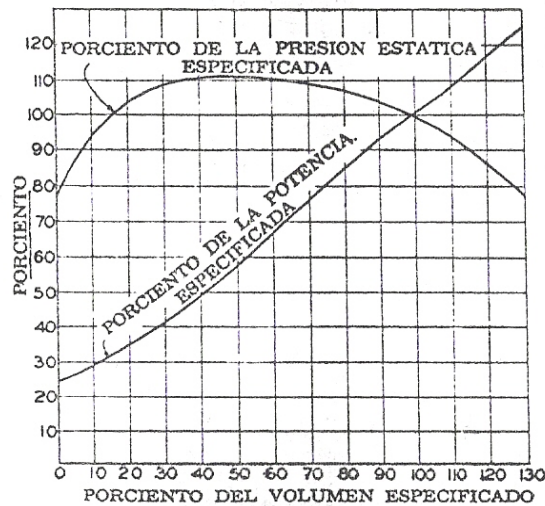


Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 397.

Las características de operación son esencialmente las mismas que las del soplador centrífugo, excepto que la presión alcanzada por el ventilador es considerablemente más baja. La presión varía con la densidad del aire y, por lo tanto, el soplador ventilador seleccionado deberá ser capaz de proporcionar la máxima presión necesaria para el

cubilote en un día caluroso, cuando la densidad del aire es baja. Cuando el cubilote no necesita toda la presión, o en días fríos, en que la densidad del aire es más alta y se obtiene mayor presión, la descarga del ventilador es estrangulada a una capacidad dada. La figura 22 muestra las características de operación de un soplador ventilador.

Figura 22. Curvas de operación características de sopladores ventiladores.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 398.

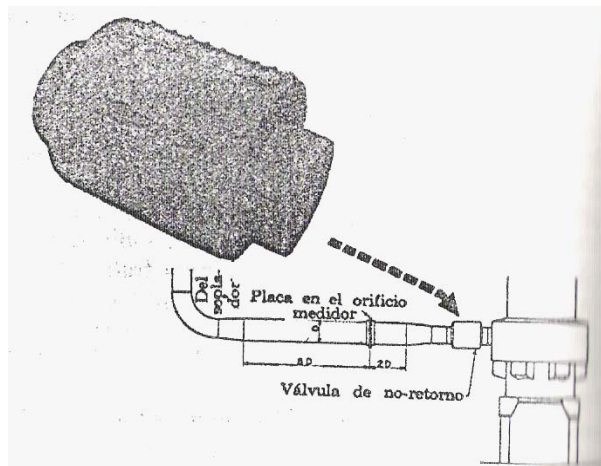
4.4 Ductos de aire

Para obtener las mejores características en cuanto a flujo, y para mantener la fricción dentro de un mínimo, la tubería de aire debe ser tan derecha y corta como sea posible entre el soplador y el cubilote, y contener un número mínimo de codos o vueltas

Los ductos redondos son preferibles a los cuadrados o rectangulares, especialmente con sopladores de desplazamiento positivo, ya que las pulsaciones tienden a causar la rotura o hendimiento en las esquinas, lo cual resultará en fugas.

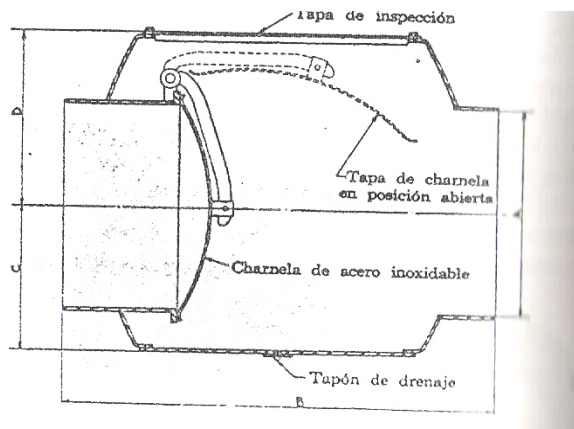
Para evitar cualquier peligro de entrada de monóxido de carbono en el ducto y formación de una mezcla explosiva, especialmente cuando se emplea aire caliente o control de humedad, se deberá instalar en los ductos una válvula de apertura por gravedad en la unión con la caja de viento del cubilote. La figura 23a muestra un diagrama de localización de la válvula de no-retorno y la figura 23b muestra la válvula de no-retorno.

Figura 23. a) Diagrama de localización de la válvula de no-retorno.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 399.

Figura 23. b) Válvula de no-retorno.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 399.

La tabla IV muestra las dimensiones para la instalación de la válvula de no-retorno.

Tabla IV. Dimensiones de la válvula de no-retorno.

Tamaño del ducto, en mm.				Peso aproximado en
A	B	C	D	Kg
152.4	546.1	101.6	139.7	22.7
203.2	596.9	133.3	184.1	34.0
254.0	647.7	177.8	228.6	45.4
304.8	762.0	203.2	254.0	56.8
406.4	901.7	279.4	330.2	75.0
508.0	1041.4	330.2	381.0	97.7

4.5 Medidores de volumen

Hay varios métodos estándar para medir el volumen de aire entregado a la caja de viento. Antes de que se desarrollase el equipo para el control automático del abastecimiento de aire al cubilote, era una práctica común colocar en el ducto de aire un medidor de volumen del tipo diferencial consistente de dos partes, un elemento primario y un instrumento para medir la presión diferencial creada por él. Esta última está relacionada con la velocidad y volumen del aire que fluye en el punto de medición. Las fórmulas más sencillas para expresar estas relaciones son:

1)
$$v = \sqrt{2 \times g \times h}$$

en donde

v = Velocidad en metros por segundo.

g = Aceleración debida a la gravedad (9.8 m por seg).

h = Presión diferencial.

y

$$2) \quad V = v \times 0.7854 \times D^2 \times 60$$

en donde

V = Volumen en metros cúbicos por minuto.

v = Velocidad en metros por segundos.

D = Diámetro interior del ducto en el punto de medición, en metros.

4.5.1 Elementos primarios

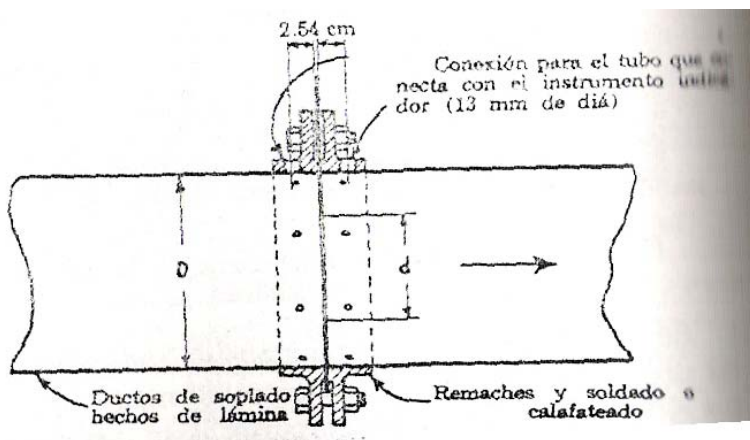
Se emplean tres tipos de elementos primarios: el orificio practicado en una placa o membrana, el tubo Pitot y el tubo Venturi. En todos los casos el elemento primario deberá ser insertado en una porción recta del ducto de conducción del aire soplado y tan lejos como sea posible de cualquier posibilidad o fuente de disturbio del flujo, tal como codos o compuertas. Es indiferente que el ducto esté horizontal, vertical o inclinado. Cuando sea posible, el tramo recto de tubo seleccionado deberá tener una longitud de diez diámetros corriente arriba y cinco diámetros corriente abajo (cuando menos) separado del elemento primario, para tener mediciones correctas. Sin embargo, debido al tamaño de ducto empleado en los cubilotes, estas condiciones ideales rara vez pueden conseguirse. Si no se dispone de un tramo recto de una longitud equivalente a 15 diámetros, se recomienda dejar solamente uno o dos diámetros de longitud corriente abajo del elemento primario con objeto de disponer del máximo de longitud recta corriente arriba.

4.5.1.1 Placas con orificio

La placa con orificio, o simplemente orificio, es el tipo de elemento primario más generalmente usado. Consiste simplemente de una placa lisa y plana, con un agujero circular de bordes agudos y sostenida entre dos bridas que se instalan en el ducto de soplado en el punto de medición deseado. Puesto que el agujero de la placa es más pequeño que el diámetro interior del ducto de soplado, la velocidad de la corriente de aire aumenta en este punto. La presión diferencial resultante (en ambos lados de la placa) está relacionada con el flujo en el ducto y sirve a manera de medida. El orificio tiene una presión constante y puede ser inspeccionado sin dificultad.

Las conexiones para medir la presión diferencial creada por el orificio pueden hacerse directamente a las bridas que sostienen la placa o diafragma, o al ducto, en puntos especificados, como sigue: (1) conexiones en las bridas, los orificios de conexión para la recepción de presión están hechos directamente en las bridas, a distancias iguales de 25.4 mm (1") a un lado y otro de las caras de la placa que tiene el orificio, como se muestra en la figura 24.

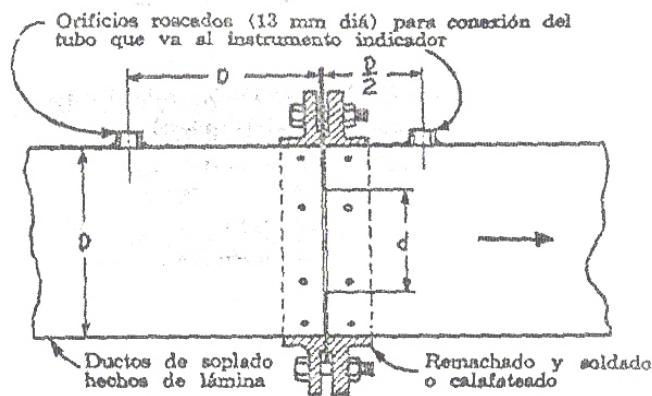
Figura 24. Conexión de brida empleada como unión en un orificio.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 403.

(2) conexiones de vena contracta, la conexión anterior está localizada a un diámetro de distancia de la placa y la posterior (en el sentido de la corriente) a medio diámetro de ducto de distancia de la cara correspondiente de la placa, como se muestra en la figura 25. Estas conexiones se emplean cuando no se dispone de orificios en las bridas. En ambos casos se ha comprobado experimentalmente una correspondencia en las lecturas obtenidas, dentro de los límites comerciales, y en casi todas las instalaciones.

Figura 25. Conexión de vena contracta con bridas gemelas.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 407.

Cálculos del orificio

$$Q = 0.0585 \times E \times d^2 \times F_t \times \sqrt{h \times P}$$

en donde

Q = Metros cúbicos por minuto (pres. atm. 1.033 kg/cm² y 15 °C).

E = Eficiencia del orificio, (Tabla V).

d = Diámetro del orificio, en centímetros.

F_t = Factor de corrección por temperatura, (Tabla VI).

h = Presión diferencial, en centímetros de agua.

P = Presión, en kg/cm² abs. (presión indicada + 1.033 kg/cm²).

0.0585 = Coeficiente básico para orificios a los que se puede aplicar el factor de corrección para cualquier grupo de condiciones.

Tabla V. Valores de E para conexiones con bridas.

d/D *	E *	d/D	E	d/D	E
0.05	0.5985	0.30	0.6035	0.55	0.6403
0.06	0.5986	0.31	0.6040	0.56	0.6434
0.07	0.5987	0.32	0.6045	0.57	0.6468
0.08	0.5988	0.33	0.6051	0.58	0.6503
0.09	0.5989	0.34	0.6058	0.59	0.6541
0.10	0.5990	0.35	0.6065	0.60	0.6580
0.11	0.5991	0.36	0.6072	0.61	0.6622
0.12	0.5992	0.37	0.6081	0.62	0.6667
0.13	0.5994	0.38	0.6090	0.63	0.6714
0.14	0.5995	0.39	0.6099	0.64	0.6763
0.15	0.5996	0.40	0.6110	0.65	0.6815
0.16	0.5998	0.41	0.6121	0.66	0.6869
0.17	0.5999	0.42	0.6133	0.67	0.6928
0.18	0.6001	0.43	0.6147	0.68	0.6988
0.19	0.6002	0.44	0.6161	0.69	0.7052
0.20	0.6004	0.45	0.6176	0.70	0.7119
0.21	0.6006	0.46	0.6193	0.71	0.7189
0.22	0.6008	0.47	0.6210	0.72	0.7263
0.23	0.6010	0.48	0.6229	0.73	0.7340
0.24	0.6013	0.49	0.6250	0.74	0.7421
0.25	0.6016	0.50	0.6271	0.75	0.7505
0.26	0.6019	0.51	0.6294	0.76	0.7594
0.27	0.6023	0.52	0.6319	0.77	0.7687
0.28	0.6027	0.53	0.6345	0.78	0.7783
0.29	0.6031	0.54	0.6373	0.79	0.7884

* d = Diámetro del orificio, en centímetros; D = diámetro interior del ducto, en centímetros; E = eficiencia.

Tabla VI. Factor de corrección por temperatura de la vena de aire (F_t).

C	F_t	C	F_t	C	F_t	C	F_t
-15	1.0575	5	1.0188	25	0.9840	45	0.9526
-10	1.0474	10	1.0098	30	0.9759	50	0.9452
-5	1.0376	15	1.0010	35	0.9679	55	0.9380
0	1.0281	20	0.9924	40	0.9602	60	0.9309
						65	0.9240
(Para valores intermedios se obtendrá suficiente aproximación mediante interpolación).							

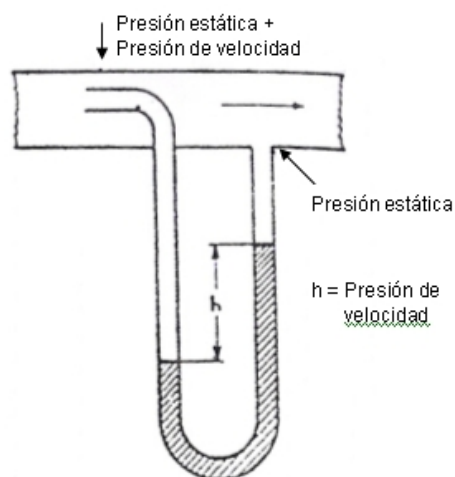
4.5.1.2 Tubo Pitot

El tubo Pitot fue el primer elemento primario empleado en medidores de volumen aplicados a la operación del cubilote. En general, un tubo Pitot para la indicación o el registro de flujo, consiste de dos miembros, uno para indicar la suma de la presión estática y la cinética o de impacto en un punto 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 el otro para indicar solamente la presión estática, (Figura 26). 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 lo tanto, comercialmente adecuados.

Hay muchos tipos de tubos Pitot, pero el tipo combinado es el más conveniente y más generalmente usado. Consiste de un tubo

dentro de otro, como se muestra en la figura 27. La abertura que recibe el impacto se enfrenta a la corriente, y deberá estar colocada en el centro del ducto. La ilustración muestra un tipo de tubo Pitot con diferentes instalaciones. En un caso, la posición del tubo se fija por medio de una tuerca de presión, y en el otro, se emplea una combinación de llave de paso y tuerca de empaque. La última de estas disposiciones permite un fácil ajuste de la posición del tubo así como su remoción para inspección y limpieza.

Figura 26. Principio del tubo Pitot.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 407.

Cálculos en tubos Pitot

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

en donde

Q = Metros cúbicos por minuto (1.033 kg/cm² pres. atm. y 15 °C).

D = Diámetro interior del ducto, en centímetros.

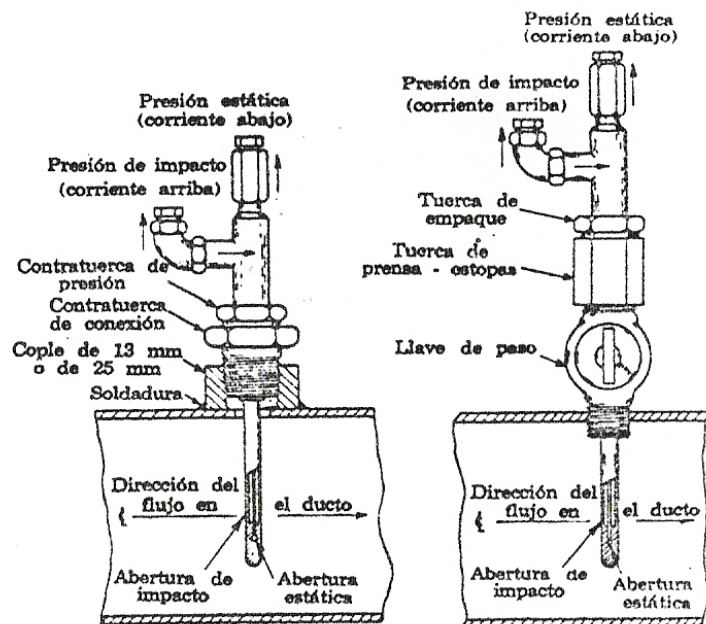
F_t = Factor de corrección por temperatura, (Tabla VI).

h = Presión diferencial, en centímetros de columna de agua.

P = Presión en kg/cm^2 abs.

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

Figura 27. Tubo Pitot del tipo combinado. Se muestran dos métodos de instalación.



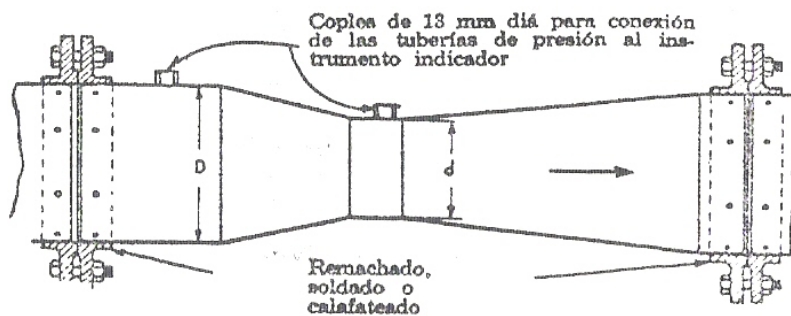
Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 409.

4.5.1.3 Tubo Venturi

El tubo Venturi se emplea como un elemento primario cuando se necesita una gran capacidad o cuando se desea un alto recobro de presión. Combina en una sola unidad una parte corta y estrangulada entre dos secciones convergentes, y, generalmente se encuentra insertado en el ducto entre dos bridas. Su objeto es acelerar la velocidad del aire y reducir temporalmente su presión estática, creando

así una presión diferencial con la cual puede determinarse el régimen de flujo. Para observar la diferencia de presión entre la entrada y la porción estrangulada se disponen conexiones convenientes, como se muestra en la figura 28. La sección estrangulada es llamada "garganta". El tubo Venturi, en su aplicación como elemento medidor del aire suministrado al cubilote, está hecho de lámina de metal.

Figura 28. Tubo Venturi para medición del aire suministrado al cubilote.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 409.

Cálculos en el tubo Venturi

$$Q = 0.0585 \times E \times \frac{d^2}{F_t} \times \sqrt{h \times P}$$

en donde

Q = Metros cúbicos por minuto (presión atm. de 1.033 kg/cm² y 15 °C).

E = Eficiencia (Figura 29).

d = Diámetro interior de la garganta, en centímetros.

F_t = Factor de corrección por temperatura (Tabla VI).

h = Presión diferencial en centímetros de columna de agua.

P = Presión absoluta, en kg/cm² abs.

y el cálculo de la eficiencia es

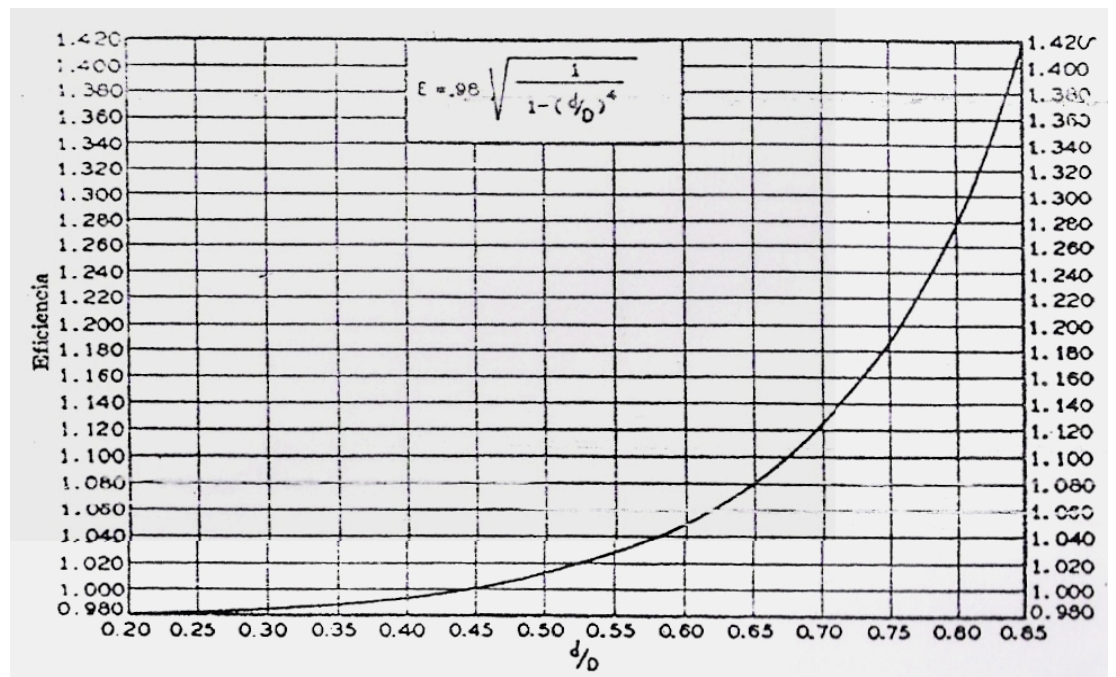
$$E = 98 \times \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4}}$$

en donde

d = Diámetro de la garganta.

D = Diámetro interior del ducto de conducción.

Figura 29. Carta de eficiencias de los medidores Venturi.



Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 410.

5. INTERCAMBIADOR DE CALOR

5.1 Tipos de tubería

Para el transporte y por las condiciones de espacio en el campo de montaje, los tubos son embarcados de una sola pieza.

Los tubos se van montando en un orden requerido, y se hace necesario se puntean muchas secciones entre sí, para su alineamiento provisional, soldándose debidamente una vez que todos los tubos están en su lugar. Una vez colocados todos los tubos, se procede a su alineamiento. Se utilizan al principio bloques y espaciadores de madera, o bien se instalan los separadores definitivos. El alineamiento de los tubos constituye una fase crítica de la instalación, debido a los requisitos correlacionados con (1) el espaciamiento para la expansión; (2) el lugar para la obra de material refractario, para el aislamiento y para la caja envolvente; (3) la posición de los espaciadores, soportes y otros dispositivos.

Todos los tubos tienen que entrar en los agujeros libremente, sin forzamientos. Una vez alineados correctamente con los extremos en hilera, son rolados o soldados en su posición final.

Una tubería sobredimensionada da gastos innecesarios de accesorios, aislantes y mano de obra.

La tabla VII muestra las especificaciones estándar para tubos de acero, acero inoxidable, hierro negro y galvanizado.

Los tubos negros están protegidos contra el óxido con una capa de barniz, el cual aparte de protegerlo mejora su apariencia.

Los pesos están basados en los tubos negros. Los tubos galvanizados son un poco más pesados.

La plancha de lámina negra de 1/16 de 4x8 se usa para diferentes proyectos en la industria.

Tabla VII. Diámetros de tubos.

Tamaño	Diámetro Exterior		Grosor de la pared		Número de cedula No.	Peso nominal				Pruebas de presión en grado A			Pruebas de presión en grado B		
						Terminado Fino		Terminado con unión							
	plg	mm	Plg	mm		lb/ft	Kg/m	lb/ft	Kg/m	psi	Kg/cm ²	Kpa	psi	Kg/cm ²	Kpa
1/2	0.840	21.3	0.109	2.77	40	0.85	1.27	0.85	1.27	700	49	4830	700	49	4830
			0.147	3.73	80	1.09	1.62	1.09	1.62	850	60	5860	850	60	5860
3/4	1.050	26.7	0.113	2.87	40	1.13	1.69	1.13	1.69	700	49	4830	700	49	4830
			0.154	3.91	80	1.47	2.20	1.48	2.21	850	60	5860	850	60	5860
1	1.315	33.4	0.133	3.38	40	1.68	2.50	1.68	2.50	700	49	4830	700	49	4830
			0.179	4.55	80	2.17	3.24	2.18	3.25	850	60	5860	850	60	5860
1 1/4	1.660	42.2	0.140	3.56	40	2.27	3.39	2.28	3.40	1200	84	8270	1300	91	8960
			0.191	4.85	80	3.00	4.47	3.02	4.49	1800	127	12410	1900	134	13100
1 1/2	1.900	48.3	0.145	3.68	40	2.72	4.06	2.73	4.04	1200	84	8270	1300	91	8960
			0.200	5.08	80	3.63	5.41	3.66	5.39	1800	127	12410	1900	134	13100
2	2.375	60.3	0.154	3.91	40	3.65	5.44	3.68	5.46	2300	162	15860	2500	176	17240
			0.218	5.54	80	5.02	7.48	5.07	7.55	2500	176	17240	2500	176	17240
2 1/2	2.875	73.0	0.203	5.16	40	5.79	8.63	5.82	8.67	2500	176	17240	2500	176	17240
			0.216	5.49	40	7.58	11.29	7.62	11.35	2220	156	15310	2500	176	17240
3	3.500	88.9	0.216	5.49	40	7.58	11.29	7.62	11.35	2220	156	15310	2500	176	17240
4	4.500	114.3	0.237	6.02	40	10.79	16.07	10.89	16.23	1900	134	13100	2210	155	15240
6	6.625	168.3	0.188	4.78	---	12.92	19.27			1020	72	7030			
			0.250	6.35	---	17.02	25.36			1360	96	9380			
			0.280	7.11	40	18.97	28.26			1520	107	10480			

5.2 Aislantes de calor

El objeto de aislar las tuberías es evitar en lo posible las fugas de calor, que nos proporcionan gastos innecesarios de combustible en el sistema. El aislamiento puede ser aplicado internamente y/o externamente en la tubería o ducto y debe estar libre de asbesto. Hoy en día, un aislante aplicado externamente cubierto con revestimiento es lo que más se utiliza. Los materiales más comúnmente utilizados son los siguientes:

Fibra de vidrio inorgánica: Es un aislante externo que normalmente es utilizado para temperaturas arriba de 850 °F (450 °C). Su rango de temperatura es dependiente en su cubierta resinosa. El

material es suplido en varios tamaños en tablas semi-rígidas o paneles de 1 a 4 pulgadas (25 a 100 mm) de espesor.

Fibra de no-combustión: Es producida por fibra mineral. Es un aislante externo que puede ser utilizado para temperaturas arriba de 1,000 °F (540 °C). Es proporcionado en diferentes medidas desde 1 a 4 pulgadas (25 a 100 mm) de espesor.

Mortero aislante: Instalaciones de sistemas de ductos de 25 años o más fueron comúnmente aislados internamente. Este proceso involucra el aplicar el mortero o el aislante de concreto de agregado de arena por el método comúnmente conocido como “shotcrete” o “mortero lanzado” a la parte interna de la lámina del ducto. La práctica estándar es aplicar de 2 a 6 pulgadas (50 a 150 mm) de espesor de capa sobre electromalla. Este mortero reforzado es anclado al ducto por studs o pernos soldados a la lámina. Este método de aislamiento se usaría hoy en día por solicitud del cliente para coincidir una condición existente o para proteger una lámina de acero del ducto contra un gas de combustión áspero. Existen varias razones de porque este método no es muy utilizado comúnmente. Es más pesado que la fibra mineral o que la fibra de vidrio y más caro en instalación. El aislamiento con mortero también puede contribuir con la corrosión atrapando humedad y ácido entre el mortero y la lámina del ducto cuando el agrietamiento del mortero ocurra.

Las pruebas han mostrado que el mortero interno tiene la tendencia de agrietarse o quebrarse y no siempre protegerá adecuadamente la lámina del ducto luego de pocos años de servicio. Sin embargo, los fabricantes han desarrollado recientemente membranas protectoras las cuales son aplicadas con spray a la

lámina del ducto y luego se le aplica impermeabilizante con mortero por medio de concreto lanzado. Este método provee protección contra la corrosión al acero además del valor de aislamiento y protege la membrana protectora de la abrasión.

Fibra cerámica: El aislante de fibra cerámica es a menudo aplicado internamente, típicamente en ductos de descarga de turbinas de gas de altas temperaturas. Ésta es suplida en varios espesores desde 6 pulgadas (150 mm). La fibra cerámica usualmente es cubierta internamente por un forro de acero inoxidable de calibre liviano para protegerlo del gas de combustión. El recubrimiento o revestimiento de acero inoxidable es unido de tal manera que se pueda expandir con el incremento de la temperatura. Un recubrimiento rigidizante es disponible para resistir la erosión de la fibra cerámica.

Forro refractario: Es un forro interno de alta temperatura el cual está disponible para uso en ductos con temperaturas operantes sobre los 1,000 °F (540 °C). Esto puede también ser utilizado donde un quemador de aceite o de gas es instalado dentro de un ducto. El forro refractario no es comúnmente utilizado en sistemas de ductos de menor temperatura.

5.3 Tipos de ladrillo refractario

El proceso básico para la elaboración del ladrillo refractario es el siguiente: la piedra caolín primero se quiebra, se muele, es cernida, se hidrata, se prensa para darle la forma deseada del ladrillo y por último se lleva a un horno a 1200 °C para secar el ladrillo.

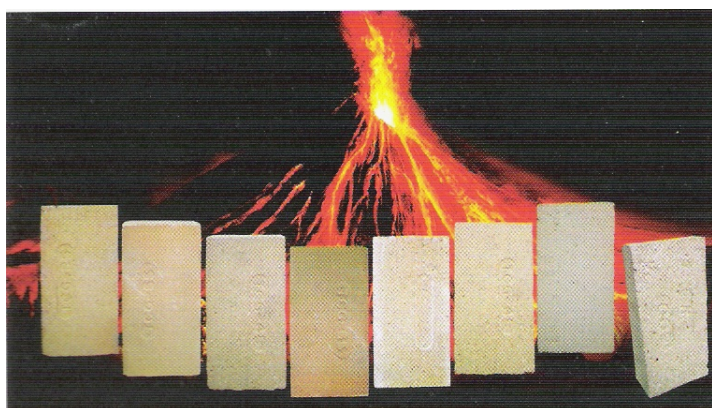
Los ladrillos refractarios son materiales de construcción compuestos de minerales no metálicos, desarrollados para soportar

temperaturas, condiciones severas de operación, como: golpes, cargas continuas, abrasión, ataques químicos de sólidos, líquidos y gases, así como choque térmico (cambios bruscos de temperatura).

Los ladrillos refractarios tienen distintas aplicaciones, una de las trascendentales es la que sirven para mantener la temperatura dentro del equipo donde estén instalados, en algunas industrias los refractarios son utilizados frecuentemente para el revestimiento de calderas, hornos y chimeneas, otras industrias los utilizan en intercambiadores de calor y calderas de recuperación.

Además del ladrillo refractario, se cuenta con materiales que tienen una mejor maniobrabilidad, como la fibra de vidrio y la fibra cerámica, pues estas pueden colocarse en lugares donde el ladrillo podría ser un poco inadecuado para brindar el requerido aislamiento.

Figura 30. Ladrillo refractario.



Fuente: Termal Ceramics. Catálogo de Productos, 2.

Ladrillo refractario TCG-25: Ladrillo refractario para trabajar a temperaturas de hasta 1300 °C, en donde se utilice combustibles sólidos. Con un nivel de alúmina del 25 % y además una excelente resistencia mecánica superior a los 4000 lbs/p².

Ladrillo refractario TCG-45: Ladrillo refractario para trabajar a temperaturas de hasta 1430 °C, con un nivel de alúmina superior al 30 %, superior a los 4000 lbs/p².

Ladrillo refractario TCG-65: Excelente ladrillo refractario, el mismo esta preparado para trabajar a temperaturas de hasta 1560 °C, con un nivel de alúmina del 40 %.

Ladrillo refractario TCG-75: Ladrillo refractario para operar a temperaturas sumamente extremas (1650 °C), con un nivel de alúmina del 60 %.

Figura 31. Mortero refractario.



Fuente: Termal Ceramics. Catálogo de Productos, 2.

Mortero Supersil: Mortero refractario de fraguado al aire, para pegar ladrillo refractario (TCG-25) y aislantes de uso regular, hasta temperaturas de 1250 °C.

Mortero Altalum: Mortero refractario de fraguado al aire para pegar ladrillos refractarios (TCG-45) y aislantes de uso mediano, recomendado para temperaturas de hasta 1450 °C.

Mortero Superalum: Mortero refractario para altas temperaturas (1150 °C), utilizado primordialmente para ladrillos refractarios de mas de 37 % de alúmina (TCG-65) y aislantes con alta resistencia térmica.

5.3.1 Características del ladrillo

Los ladrillos están formados básicamente por óxido alúmina y óxido de sílice. Dentro de las materias primas de estos compuestos están: los caolines, la bauxita, alúminas calcinadas, arcillas plásticas, magnesita calcinada. Estos materiales, tienen diferentes modelos de exhibirse en el mercado, entre las cuales están: los ladrillos básicos, ladrillos de alto contenido de alúmina, ladrillos de chamota, ladrillos aislantes, materiales aislantes, cemento refractario, masas refractarias de fraguado hidráulico, aislante térmico de fibra de vidrio, fibra de cerámica, etc.

Los ladrillos vienen en diferentes formas y tamaños, ya que se adaptan a cualquier tipo de forma geométrica, pues los fabricantes consideran todos los inconvenientes que pueden surgir.

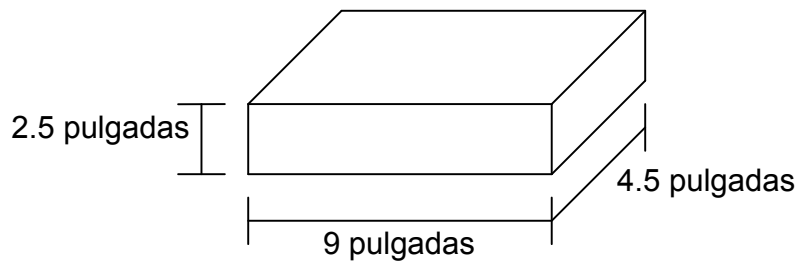
Figura 32. Ladrillo refractario.



Fuente: Termal Ceramics. Catálogo de Productos, 2.

La figura 33 muestra las dimensiones del ladrillo refractario.

Figura 33. Dimensiones del ladrillo refractario.



Fuente: Termal Ceramics. Catálogo de Productos, 8.

5.4 Accesorios

Los acoplamientos o accesorios para conexión se clasifican en: de derivación, reducción, ampliación y desviación. Los accesorios como tes, cruces, codos con salida lateral, etc., pueden agruparse como accesorios de derivación.

Los conectores de reducción o ampliación son aquellos que cambian la superficie de paso del fluido. En esta clase están las reducciones y los manguitos. Los accesorios de desvío, curvas, codos, curvas en U, etc., son los que cambian la dirección de flujo.

Válvulas: La variedad en diseños de válvulas dificulta una clasificación completa. Si las válvulas se clasificaran según su resistencia que ofrecen al flujo, las que presentan un paso directo del flujo, como las válvulas de compuerta, bola, macho y de mariposa pertenecen al grupo de baja resistencia; las que tienen un cambio en la dirección del flujo, como las válvulas de globo y angulares, están en el grupo de alta resistencia.

5.5 Colector de polvo de alta eficiencia

Existen dos diseños muy similares de colectores de polvo que han tenido éxito en la producción de una descarga de apariencia clara en los gases del cubilote. Uno de los diseños hace uso de tubos filtradores de gran diámetro, hechos de tela de vidrio, dispuestos verticalmente. El segundo diseño emplea tubos de fibra sintética de orlon, de menor diámetro, dispuestos también verticalmente. La tela de vidrio puede soportar temperaturas de operación hasta de 260 °C, y la tela de orlon puede soportar temperaturas hasta de 135 °C.

Para controlar la temperatura del gas que llega al colector se emplean en los ductos rociadores de agua, con objeto de proteger los tubos de tela. Delante de estos colectores se emplea una cámara separadora primaria, para remover las partículas grandes de polvo.

En tiempo frío puede formarse un vapor de agua visible, al mezclarse los gases de descarga del colector, altamente humidificados, con el aire exterior frío.

5.6 Parte experimental

El cálculo de un balance térmico para una operación de cubilote requiere conocimiento de las fuentes y disposición de calor. La entrada y salida de calor pueden resumirse como sigue:

Entrada de calor (o calor absorbido):

- 1.- Calor potencial en el coque (poder calorífico del coque).
- 2.- Oxidación del hierro, silicio y manganeso.
- 3.- Calor sensible en el aire de soplado.

Salida de calor (o calor desprendido):

- 1.- Calentamiento, fusión y sobrecalentamiento del hierro.

- 2.- Calcinación de la piedra caliza.
- 3.- Formación, fusión y sobrecalentamiento de escoria.
- 4.- Descomposición de humedad en el aire de soplado.
- 5.- Calor sensible en los gases de escape.
- 6.- Calor latente en los gases de escape.
- 7.- Pérdidas de radiación del cubilote.

Se usan dos relaciones para expresar la eficiencia térmica de un cubilote. La primera es llamada “eficiencia de fusión”, y está basada en la cantidad de calor potencial total de entrada que es recuperado en la forma de hierro caliente.

$$\text{Eficiencia de fusión (\%)} = \frac{\text{Calor presente en el hierro}}{(\text{calor potencial en el coque}) + (\text{calor de la oxidación de hierro, silicio y manganeso}) + (\text{calor sensible en el aire de soplado})} \times 100$$

La segunda relación que expresa la eficiencia térmica es llamada “eficiencia de combustión”, y se refiere solamente a la eficiencia con que es quemado el coque. El calor latente en los gases de escape nunca es generado como calor útil, y siempre representa una pérdida térmica en el cubilote.

$$\text{Eficiencia de combustión (\%)} = \frac{(\text{Calor pot. en el coque}) - (\text{Calor latente en el gas de derrame})}{\text{Calor potencial en el coque}} \times 100$$

La eficiencia de fusión de un cubilote está usualmente entre 30 y 50 %, comparada con 20-30 %, en hornos regenerativos de hogar

abierto, en los que el metal es fundido fuera del contacto directo con el combustible.

Por otra parte, la eficiencia de combustión de un cubilote está entre 60 y 70 %.

La tabla VIII indica la información básica necesaria para calcular el balance térmico en el cubilote.

Tabla VIII. Datos de un horno cubilote.

1.- Peso de la carga de metal, kg	9,090 kg
2.- Peso de la carga de coque, kg	818 kg
3.- Peso de la carga de caliza, kg	105 kg
4.- Régimen de fusión, toneladas de hierro cargadas por hora	19.88
5.- Régimen de consumo del coque, kg por hora	2,068
6.- Caliza cargada, kg por hora	300
7.- Contenido de CaCO ₂ de la caliza, %	97.15
8.- Régimen de soplado, m ³ /minuto	220.87
9.- Volumen de soplado, m ³ por hora	13,253
10.- Temperatura del aire de soplado, °C	315
11.- Temperatura de bulbo seco, °C	30
12.- Temperatura de bulbo húmedo, °C	23
13.- Presión barométrica, mm.Hg	755
14.- Temperatura promedio de sangría, °C	1513
15.- Contenido de carbono fijo en el coque (por análisis), %	91.0
16.- Contenido de carbono en el hierro cargado, %	2.50
17.- Contenido de carbono en el hierro sangrado, %	3.10
18.- Contenido de silicio en la carga, %	0.66
19.- Contenido de silicio en el hierro sangrado, %	0.58
20.- Contenido de manganeso en la carga, %	0.75
21.- Contenido de manganeso en el hierro sangrado, %	0.52
22.- Contenido de CO ₂ en el gas de derrame (por análisis), %	13.0
23.- Temperatura de los gases de derrame (antes de su incendio), °C	563
24.- Contenido de CaO en la escoria, %	20.52
25.- Contenido de FeO en la escoria, %	2.0

$$262.96 + 161.80 = 424.76 \text{ lb}$$

Carbono potencial de este carbono (424.76 lb = 192.67 kg)

$$192.67 \times 8028.9 = 1,546,928.16 \text{ Kcal}$$

Calor potencial neto = 15,109,426.33 – 1,546,928.16 = 13,562,498.17 Kcal

2) Oxidación de hierro, silicio y manganeso:

a) Oxidación de hierro:

Peso de la escoria formada por hora 796.78 kg

(véase más adelante)

FeO contenido en la escoria 2 %

o sea, $796.78 \times 0.020 = 15.94 \text{ kg}$

Calor de formación de FeO, por kg (Anexo 2) 887 Kcal

Calor producido por oxidación de hierro =

$$887 \times 15.94 = 14,138.78 \text{ Kcal}$$

b) Oxidación de silicio:

Silicio en la carga 0.66 %

Silicio en el hierro fundido 0.58 %

Silicio oxidado 0.08 %

Hierro cargado por hora 19,880 kg

Silicio oxidado $19,880 \times 0.0008 = 16 \text{ kg}$

Calor de formación de SiO₂, por molkg (Anexo 2) 205100 Kcal

Calor de formación de SiO₂, por kg de silicio

$$205100 / 28.0855 = 7,302.70 \text{ Kcal}$$

Calor producido por oxidación de silicio =

$$16 \times 7302.70 = 116,843.2 \text{ Kcal}$$

c) Oxidación de manganeso:

Manganeso en la carga		0.75 %
Manganeso en el hierro fundido		0.52 %
Manganeso oxidado	0.75 - 0.52	0.23 %
Hierro cargado por hora		19,880 kg
Manganeso oxidado	19880 x 0.0023 =	46 kg
Calor de formación de MnO, por molkg (Anexo 2)		92,000 Kcal
Calor de formación de MnO, por kg Mn:		
	92000 / 54.93 =	1,674.85 Kcal
Calor producido por oxidación de Manganeso =		
	46 x 1674.85 =	77,043.1 Kcal

3) Calor sensible en el aire de soplado:

Análisis de los gases de escape:

CO ₂ (Tabla VIII)	13 %
CO (Anexo 4)	13.2 %
N ₂ (Anexo 4)	73.8 %

Puesto que volúmenes iguales de gas contienen el mismo número de moléculas, 1 mol de gas de escape contiene:

CO ₂	0.130 moles
CO	0.132 moles
N ₂	0.738 moles

1 mol de gas de escape es producido por

$$0.130 + 0.132 = 0.262 \text{ moles de C}$$

$$\text{o sea, } 0.262 \times 12 = 3.14 \text{ kg de carbono}$$

Coque cargado por hora,	2068 kg
Carbono cargado por hora	1,881.88 kg
Carbono perdido en la descomposición de humedad	192.67 kg
Carbono quemado por hora	1881.88 - 192.67 = 1,689.21 kg
Moles de gas de escape producido por hora	

		$1689.21 / 3.14 =$	537.96 moles
El gas de escape contiene:			
CO ₂		$537.96 \times 0.130 =$	69.94 moles
		$\text{ó } 69.94 \times 44 =$	3,077.36 kg
CO		$537.96 \times 0.132 =$	71.01 moles
		$\text{ó } 71.01 \times 28 =$	1,988.28 kg
N ₂		$537.96 \times 0.738 =$	397.01 moles
		$\text{ó } 397.01 \times 28 =$	11,116.28 kg
Oxigeno necesario			
	para CO ₂		69.94 moles
	para CO	$69.94 / 2 =$	34.97 moles
		total	= 104.91 moles
Aire necesario		$104.91 / 0.21 =$	499.57 moles
que contiene			
O ₂	104.91 moles,	$\text{o } 104.91 \times 32 =$	3,357.12 kg
N ₂	397.01 moles,	$\text{o } 397.01 \times 28 =$	11,116.28 kg
		Peso total de aire empleado =	14,473.40 kg
Peso de la humedad en el aire de soplado 108.80 kg			
(véase más adelante)			
Calores específicos medios de 25° a 315 °C (Anexo 1)			
O ₂			0.2270 Kcal/kg °C
N ₂			0.2505 Kcal/kg °C
H ₂ O			0.4581 Kcal/kg °C
Calor contenido (calor sensible) del aire soplado a 315 °C			
O ₂		$3357.12 \times 0.2270 \times 152 =$	115,834.07 Kcal
N ₂		$11116.28 \times 0.2505 \times 152 =$	423,263.48 Kcal
H ₂ O		$108.80 \times 0.4581 \times 152 =$	7,575.87 Kcal

Total = **546,673.42 Kcal**

4) Entrada total de calor por hora:

Potencial neto en el coque 13,562,498.17 Kcal

Oxidación de los elementos:

Fe 14,138.78 Kcal

Si 116,843.2 Kcal

Mn 77,043.1 Kcal

Total = 208,025.08 Kcal

Calor sensible en el aire de soplado 546,673.42 Kcal

Entrada total de calor por hora = 14,317,196.67 Kcal

Calor gastado

1) Calentamiento, fusión y sobrecalentamiento del hierro:

Hierro cargado por hora 19,880 kg

Peso de FeO en la escoria 15.94 kg

Peso de Fe oxidado a FeO = $15.94 \times 55.8 / 71.8 = 12.39$ kg

Hierro sangrado = $19880 - 12.39 = 19,867.61$ kg

Temperatura del hierro cargado (Tabla VIII) 30 °C

Temperatura del hierro sangrado (Tabla VIII) 1,513 °C

Contenido de carbono del hierro sangrado 3.10 %

Calor específico medio de 30° a 1513 °C (Anexo 1) 0.2089
Kcal/kg °C

Contenido de calor del hierro a la temperatura

de sangría: $1483 \times 0.2089 \times 19867.61 = 6,154,959.75$ Kcal

2) Calcinación de la piedra caliza:

Peso de piedra caliza cargada por hora 300 kg

Contenido de CaCO₃ de la piedra caliza 97.15 %

Peso de CaCO ₃ cargado	291.45 kg
Calor de descomposición del CaCO ₃ (Anexo 3) por kg CaCO ₃	424.4 Kcal
Calor para calcinar la caliza, por hora	123,691.38 Kcal

3) Formación, fusión y sobrecalentamiento de la escoria:

a) Peso de CaCO ₃ en la caliza	291.45 kg
Peso de CaCO ₃ cargado (iguales moles de CaO formados)	$291.45 / 100 = 2.9145$ moles
Peso de CaO en la escoria	$2.9145 \times 56.1 = 163.50$ kg
CaO contenido en la escoria	20.52 %
Peso de escoria formada por hora	$163.50 \times 0.2052 = 796.78$ kg

b) Calor de las reacciones en la escoria

Las reacciones de la escoria pueden estar representadas por:

Calores de formación (Anexo 2)

CaO	SiO ₂	CaO SiO ₂
151900 Kcal	+ 205100 Kcal	= 378,000 Kcal
Calor de reacción =	$378000 - 357000$	= 21,000 Kcal

Peso de CaCO₃ necesario para formar un

mol de CaO SiO ₂ (Anexo 2)	100.9 kg
Calor de las reacciones de escoriado por kg CaCO ₃	210 Kcal

Calor de las reacciones de la escoria =

$$210 \times 291.45 = 61,204.5 \text{ Kcal}$$

C) Calor contenido en la escoria a 1,513 °C

Calor medio específico de la escoria de (Anexo 1)

$$30^\circ \text{ a } 1513^\circ \text{ C} = 0.3210 \text{ Kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

Peso de la escoria formada por hora	796.78 kg
-------------------------------------	-----------

Contenido de calor de la escoria fundida:

$$796.78 \times 0.3210 \times 1483 = 379,301.54 \text{ Kcal}$$

Calor disponible de las reacciones de la escoria 61,204.50 Kcal

Calor neto necesario para la escoria 318,097.04 Kcal

4) Descomposición de la humedad en el aire de soplado:

Peso de aire seco empleado	14,473.40 kg
Temperatura de bulbo seco	30 °C
Temperatura de bulbo húmedo	23 °C
Presión barométrica	755 mm Hg
Humedad por lb de aire seco = $53 \times 755 / 760$	= 52.65 granos
Granos por libra	7,000

Humedad total en el aire soplado por hora

$$14,473.40 \text{ kg} \times 2.2046 = 31,908.06 \text{ lb}$$

$$(31908.06 \times 52.65) / 7000 = 240 \text{ lb}$$

Puesto que se necesita un mol de carbono (12 lb) para descomponer un mol de agua (18 lb), el carbono necesario es:

$$(240 \times 12) / 18 = 160 \text{ lb}$$

Calor necesario por lb H₂O (Anexo 3) 2,898 Btu

Calor necesario para descomposición del agua en el

aire de = $240 \times 2898 = 695,520 \text{ Btu} = 175,193.95 \text{ Kcal}$

5) Calor sensible en los gases de escape:

El gas de escape contiene

CO ₂	3,077.36 kg
CO	1,988.28 kg
N ₂	11,116.28 kg
N ₂	$(240 \times 2) / 18 = 26.67 \text{ lb} = 12.10 \text{ kg}$

Temperatura de los gases de escape 563 °C

Calor específico medio de los gases de 25 ° a 563 °C (Anexo 1)

CO ₂	0.2465 Kcal / kg °C
CO	0.2580 Kcal / kg °C
N ₂	0.2558 Kcal / kg °C
H ₂	3.470 Kcal / kg °C

Contenido de calor de los gases de escape

CO ₂	3,077.36 x 0.2465 x 429 =	325,426.20 Kcal
CO	1,988.28 x 0.2580 x 429 =	220,066.81 Kcal
N ₂	11,116.28 x 0.2558 x 429 =	1,219,880.56 Kcal
H ₂	12.10 x 3.470 x 429 =	18,012.42 Kcal
	Total =	1,783,385.99 Kcal

6) Calor latente en los gases de escape:

El CO deberá ser quemado a CO₂ como en el sistema Griffin de soplado con aire caliente, y parte del calor recuperado.

Peso de CO en los gases de escape	1,988.28 kg
Calor de combustión por kg CO (Anexo 3)	2,414.20 Kcal
Calor de combustión de CO =	
	1988.28 x 2414.20 = 4,800,105.58 Kcal

7) Radiación del cubilote:

Desprendimiento total de calor por causa de:

Calentamiento, fusión y sobrecalentamiento

del hierro 6,154,959.75 Kcal

Calcinación de la piedra caliza 123,691.38 Kcal

Formación, fusión y sobrecalentamiento de

la escoria 318,097.04 Kcal

Descomposición de la humedad del aire

de soplado		175,193.95 Kcal
Calor sensible en los gases de escape		1,783,385.99 Kcal
Calor latente en los gases de escape		4,800,105.58 Kcal
Total	=	13,355,433.69 Kcal
Entrada de calor, total por hora		14,317,196.67 Kcal
Pérdidas de radiación del cubilote (por diferencia)		961,762.98 Kcal

Resumen

Entrada de calor (calor suministrado)

Calor potencial neto en el coque		13,562,498.17 Kcal
Oxidación de elementos:		
Fe	14,138.78 Kcal	
Si	116,843.20 Kcal	
Mn	77,043.1 Kcal	
Total	=	208,025.08 Kcal
Calor sensible en el aire de soplado:		
O ₂	115,834.07 Kcal	
N ₂	423,263.48 Kcal	
H ₂ O	7,575.87 Kcal	
Total	=	546,673.42 Kcal
Total de calor suministrado	=	14,317,196.67 Kcal

Salida de calor (Calor gastado)

Calentamiento, fusión y sobrecalentamiento del hierro:		6,154,959.75 Kcal
Calcinación de la piedra caliza		123,691.38 Kcal
Formación, fusión y sobrecalentamiento de la escoria		318,097.04 Kcal

Descomposición de la humedad del		
aire de soplado		175,193.95 Kcal
Calor sensible de los gases de escape		
CO ₂	325,426.20 Kcal	
CO	220,066.81 Kcal	
N ₂	1,219,880.56 Kcal	
H ₂	18,012.42 Kcal	
Total	=	1,783,385.99 Kcal
Calor latente en los gases de escape		4,800,105.58 Kcal
Radiación de calor gastado		961,762.98 Kcal
Total de calor gastado	=	14,317,196.67 Kcal

Se pone en evidencia teóricamente que el horno de Cubilote trabajando con aire de admisión a una temperatura de 315 °C revela un balance térmico normal en donde se observa “de dónde viene el calor y a dónde va”. Ya realizado el balance térmico, procedemos a encontrar la eficiencia de fusión y la eficiencia de combustión para verificar que la eficiencia del cubilote se encuentre entre los rangos óptimos de trabajo y así producir unas excelentes características de transferencia de calor que se podrán de manifiesto en el recuperador de calor.

$$\text{Eficiencia de fusión (\%)} = \frac{\text{Calor presente en el hierro}}{(\text{calor potencial en el coque}) + (\text{calor de la oxidación de hierro, silicio y manganeso}) + (\text{calor sensible en el aire de soplado})} \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fusión} = \frac{6,154,959.75}{13,562,498.17 + 208,025.08 + 546,673.42} \times 100$$

$$\text{Eficiencia de fusión} = \frac{6,154,959.75}{14,317,196.67} \times 100$$

Eficiencia de fusión = 42.99 %

$$\text{Eficiencia de combustión (\%)} = \frac{\text{(Calor pot. en el coque) - en el gas de derrame}}{\text{Calor potencial en el coque}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia de combustión} = \frac{13,562,498.17 - 4,800,105.58}{13,562,498.17} \times 100$$

$$\text{Eficiencia de combustión} = \frac{8,762,392.59}{13,562,498.17} \times 100$$

Eficiencia de combustión = 64.60 %

Con esto se determina que trabajando con aire de admisión a 315 °C, tanto la eficiencia de fusión como la de combustión se encuentran en los rangos óptimos para un buen nivel de trabajo del cubilote, se procede al diseño del recuperador de calor.

Cálculo del área total de transferencia de calor del tubo de hierro negro:

longitud del tubo: 4 metros

diámetro exterior: 2.875 pulgadas = 0.0733125 metros

$$A_t = \pi r L$$

en donde:

A_t = Área total del tubo

r = Radio del tubo

L = Longitud del tubo

$$A_t = \pi (0.0733125/2) (4)$$

$$A_t = 0.4606 \text{ m}^2$$

Cálculo del número de pasos o etapas del recuperador:

En cada uno de los pasos o etapas del recuperador de calor podemos colocar 2 metros de tubo de hierro negro.

$$N_p = 4 / 2$$

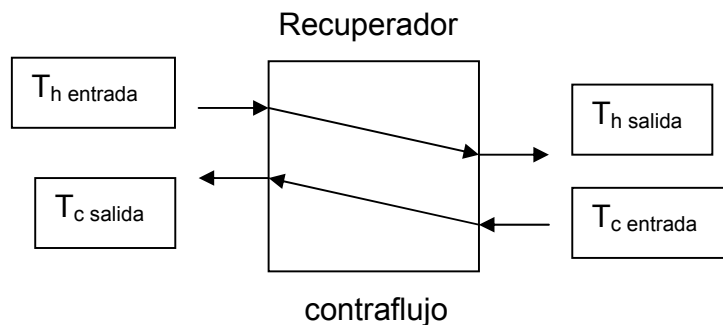
$$N_p = 2$$

en donde:

N_p = número de pasos o etapas

Cálculo de la eficiencia del recuperador:

En el recuperador de calor los gases calientes van a ceder el calor a los gases de admisión con el sistema de contraflujo.



en donde:

$T_{h \text{ entrada}}$ = Temperatura de entrada al recuperador que viene del horno.

$T_{h \text{ salida}}$ = Temperatura de salida del recuperador al medio ambiente.

$T_{c \text{ salida}}$ = Temperatura de salida del recuperador al horno cubilote.

$T_{c \text{ entrada}}$ = Temperatura de entrada al recuperador que viene del ventilador.

C_c = Calor específico a presión constante del aire que sale del recuperador al horno de cubilote.

C_h = Calor específico a presión constante del aire que sale del horno de cubilote al recuperador.

E_r = Eficiencia del recuperador.

$$T_{h \text{ entrada}} = 563 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{h \text{ salida}} = 175 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{c \text{ salida}} = 315 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{c \text{ entrada}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$C_h = 0.9703 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$$

$$C_c = 0.9385 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$$

$$E_r = \frac{C_c (T_{c \text{ salida}} - T_{c \text{ entrada}})}{C_h (T_{h \text{ entrada}} - T_{h \text{ salida}})} \times 100$$

$$E_r = \frac{0.9385(315 - 25)}{0.9703(563 - 175)} \times 100$$

$$E_r = 72.29 \%$$

6. EQUIPO A UTILIZAR EN EL RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO TIPO CUBILOTE

6.1 Ventilador

Se utilizará el ventilador que la empresa tiene acoplado en la línea de producción y que satisface las necesidades del recuperador de calor, el mismo es un ventilador de tiro forzado con paletas rectas con capacidad de entregar un volumen de 200 metros cúbicos por minuto. También se utilizará un ventilador de tiro inducido con paletas rectas que estará acoplado en la tubería que lleva los gases de escape del recuperador de calor a la chimenea, el trabajo de este ventilador es hacer que los gases de escape pasen por los dos pasos de tubería del recuperador de calor hasta la salida al ambiente.

6.2 Tubería

Se va a utilizar tubo de hierro negro con las siguientes características:

diámetro 2 ½ pulgada; cedula 40; grosor de pared 0.203 pulgadas; diámetro exterior 2.875 pulgadas y largo 2 metros.

6.3 Ladrillo refractario

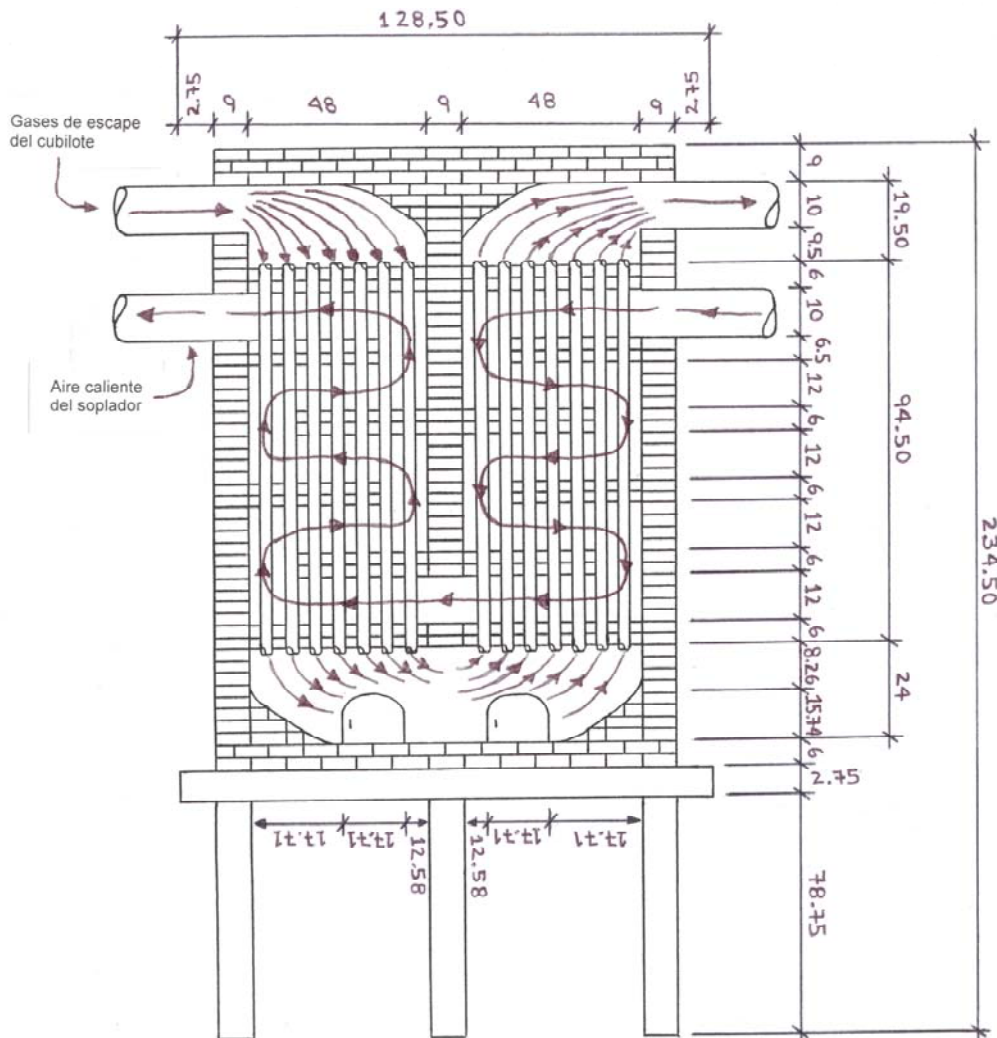
Se va a utilizar ladrillo refractario TCG-25 de una temperatura máxima de aplicación de 1320 °C/2408 °F. Para pegar el ladrillo se utilizará mortero Supersil con una temperatura máxima de servicio de 1250 °C/2282 °F.

6.4 Aislante de calor

Para aislar los ductos de las posibles fugas de calor se utilizara fibra mineral de no-combustión, que es un aislante externo que puede ser utilizado a temperaturas arriba de 540 °C/1000 °F.

6.5 Dimensiones del intercambiador de calor

Figura 34. Dimensiones del intercambiador de calor, en pulgadas.



6.6 Espacio a utilizar

El espacio que se va a utilizar para instalar el intercambiador de calor es el siguiente:

Largo: 128.50 pulgadas

ancho: 30 pulgadas

alto: 234.50 pulgadas

$$\text{Área} : 2 (ab + ac + bc)$$

$$\text{Área} : 2 [(30)(128.50) + (30)(234.50) + (128.50)(234.50)]$$

$$\text{Área} : 2 (3855 + 7035 + 30133.25)$$

Área : 82,046.50 pulgadas cuadradas

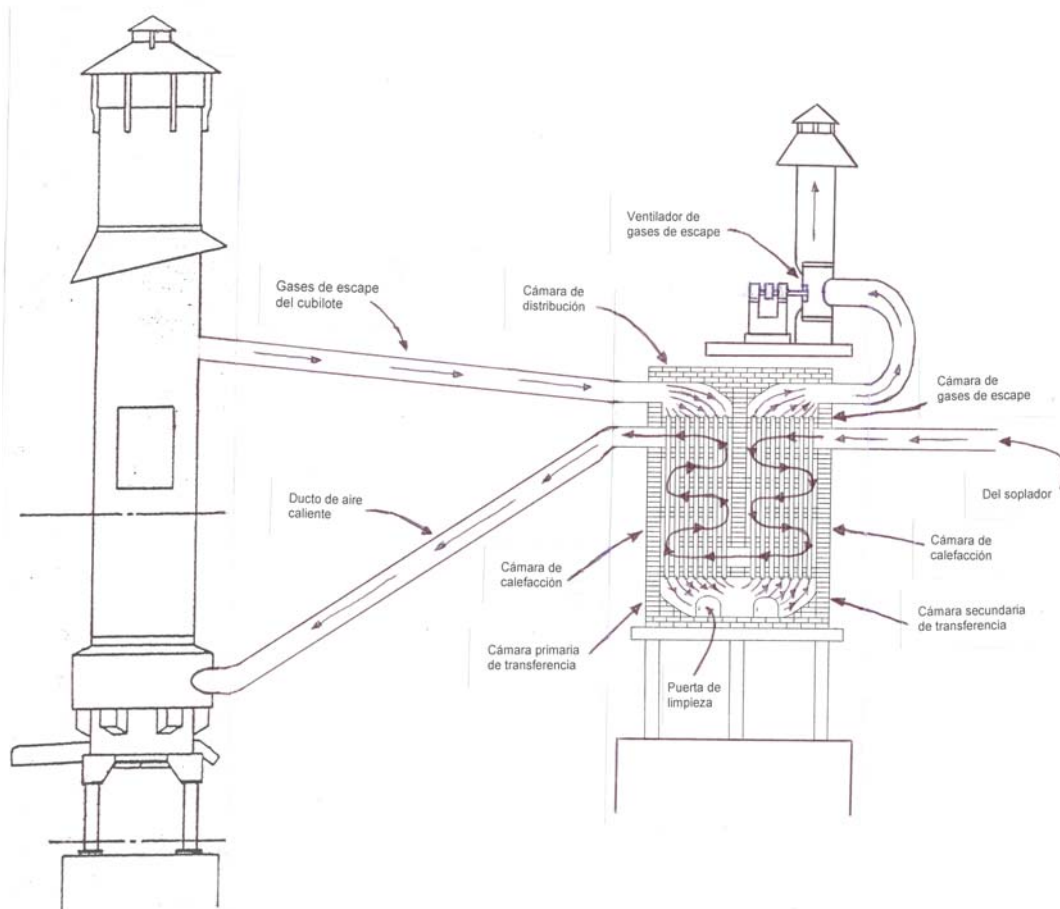
$$\text{Volumen} : a b c$$

$$\text{Volumen} : (30) (128.50) (234.50)$$

Volumen : 903,997.50 pulgadas cúbicas

6.7 Esquema de la implementación del intercambiador de calor

Figura 35. Esquema de la implementación del intercambiador de calor.



CONCLUSIONES

1. La eficiencia del recuperador de calor va a depender que no existan pérdidas de calor en el ladrillo refractario y que exista un buen intercambio de temperatura entre los gases de escape y el aire de admisión, por consiguiente se va a reflejar en el aumento de la eficiencia del horno de cubilote y el ahorro de combustible.
2. Dentro de los diferentes tipos de aislamientos que existen para los hornos de cubilote, recuperadores de calor y ductos, se mencionan, la fibra cerámica, la fibra de vidrio, cemento refractario, ladrillo refractario, entre otros, estos se presentan en diferentes formas.
3. Muchas veces las pérdidas de calor dentro de un horno de cubilote y un recuperador de calor se dan por el deterioro de las partes expuestas al calor y los ataques químicos que reciben, por los compuestos químicos del combustible.
4. Las pérdidas de calor en los ductos van a existir siempre, pero se pueden minimizar utilizando el aislante de calor adecuado para los diferentes requerimientos de trabajo.
5. Dentro de los beneficios económicos que se obtienen al aumentar la eficiencia del horno de cubilote a través del recuperador de calor está el ahorro de combustible, una mejor producción de hierro fundido y la importancia de tener un horno de cubilote funcionando sin muchas pérdidas de calor.

RECOMENDACIONES

1. Se aconseja que por lo menos una vez, cada seis meses se le dé una limpieza a todo el refractario visible o que está expuesto en el recuperador de calor.
2. Si la eficiencia del recuperador empieza a disminuir, que sirva de alerta para observar de cerca, si existen posibles pérdidas de calor, esta eficiencia disminuirá y el consumo del combustible en el horno aumentará.
3. Se aconseja cambiar el refractario a los 15 años de vida útil, porque después de ese tiempo se corre el riesgo que existan pérdidas de calor por fugas en el refractario.
4. Llevar un record diario del comportamiento de la eficiencia del recuperador de calor, porque se verá reflejado en el consumo de combustible del horno de cubilote, que servirá de diagnóstico para posibles fallas.
5. Por la cantidad de partículas emanadas al ambiente, se sugiere utilizar un sistema de colector de polvo.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Foundrymen's Society. El Horno de Cubilote y su Operación. México: Editorial Continental. 1977. pp. 297- 305, 423-427, 387-410.
2. A. Biedermann y L. M. Hassekief. Fundición del Hierro y del Acero. Argentina: Editorial Macagno, Landa y Cía. 1957. pp. 339-357, 362, 363.
3. Colman, J.P. Transferencia de Calor. México: Editorial Continental. 1987. pp. 502-509.
4. Escobar Ochoa, Ronald Orlando. Diseño de un Intercambiador de Calor para calentar agua aprovechando el calor de los gases de chimenea de una caldera Cleaver Brooks de 74,600 w. Guatemala. Trabajo de graduación USAC. 1985. pp. 35, 36.
5. Ruano Pérez, José Arturo. Hornos Industriales. Guatemala. Trabajo de graduación USAC. 1975. pp. 3-17, 32-35, 68-73.
6. Thermal Ceramics Centroamérica, S.A. Kaowool Ceramic Fiber Products. Catálogo de productos. Refractarios Nacionales. Guatemala. 1989. pp. 3-19.
7. Welty, James R. Transferencia de calor aplicada a la Ingeniería. México: Editorial Limusa. 1981. pp. 402-421.

Tabla X. Calores de formación.

Compuesto	Peso Molecular	Kcal por mol g ^a	BTU por lb ^b	Kcal por kg	BTU por mol-lb ^b
Al ₂ O ₃	101.96	399.09	718,360	3914	7045.5
Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	162.05	644.6	1,160,300	3978	7160
CaO	56.08	151.9	273,400	2709	4876
CaCO ₃	100.09	288.45	519,210	2882	5187.4
CaCO ₃ MgO ₃	184.42	556	1,001,000	3015	5430
CaC ₂	64.10	15	27,000	234	420
CaO·SiO ₂	116.17	378.0	680,400	3254	5857
2CaO·SiO ₂	172.25	538.5	969,300	3126	5627
3CaO·SiO ₂	228.33	688.4	1,239,100	3015	5427
CaO·Al ₂ O ₃	158.04	551 ^c	992,000 ^c	3486	6280 ^c
2CaO·Al ₂ O ₃	214.12	704	1,267,000	3289	5920
3CaO·Al ₂ O ₃	270.20	861	1,550,000	3186	5740
4CaO·Al ₂ O ₃	326.28	1026	1,847,000	3144	5660
12CaO·7Al ₂ O ₃	1386.68	4617	8,311,000	3329	5993
3CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	390.38	1303	2,345,000	3338	6008
CaO·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	518.58	1828	3,290,000	3523	6345
4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	485.98	1211	2,180,000	2492	4485
CaS	72.15	115.3	207,500	1598	2877
CO ₂	44.01	94.052	169,294	2137	3846.7
CO	28.01	26.416	47,549	943	1697.6
C _{este}	12.01	-2.384	-4,280 ^d	-198	-356 ^d
H ₂ O (g)	18.016	57.798	104,036	3208	5774.7
H ₂ O (l)	18.016	68.317	122,971	3792	6825.6
FeO	71.85	63.7	114,700	887	1596
Fe ₃ O ₄	231.55	267.0	480,600	1153	2076
Fe ₂ O ₃	159.70	196.5	353,700	1230	2215
FeO·SiO ₂	131.94	276	497,000	2092	3760
2FeO·SiO ₂	203.79	343.7	618,700	1687	3036
Fe ₃ C	179.56	-5.0	-9,000	-27	-50
FeSi	83.91	19.2	34,600	229	412
FeS	87.92	22.72	40,900	258	465.2
MgO	40.32	145.34	258,910	3567	6421
MgCO ₃	84.33	266	479,000	3154	5680
MgO·SiO ₂	100.41	357.9	644,200	3564	6416
2MgO·SiO ₂	140.73	488.2	878,800	3469	6244
MnO	70.93	92.0	165,600	1297	2335
Mn ₃ O ₄	228.79	331.4	596,500	1448	2607
Mn ₂ O ₃	157.86	232.1	417,800	1470	2646
MnO ₂	86.93	124.5	224,100	1432	2578
MnS	87.00	48.2	86,800	554	997
MnO·SiO ₂	151.02	302.5	544,500	2309	4156
SiO ₂	60.09	205.1	369,200	3413	6144
Na ₂ CO ₃	106.00	270.3	486,500	2550	4590
SO ₂	64.07	70.96	127,730	1107	1993.6
TiO ₂	79.90	218.0	392,400	2728	4911

Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 853.

Tabla XI. Calores de reacción.

Reacción	Kcal ^a	Btu ^b	Btu/lb ^c	Kcal/kg
$C_{\text{coque}} + O_2 = CO_2$	96.43 ^d	173 570 ^d	14 452 /lbC ^d	8 028.9/kgC
$C_{\text{coque}} + \frac{1}{2}O_2 = CO$	28.79 ^d	51 820 ^d	4 315 /lbC ^d	2 397.2/kgC
$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$	67.636	121 745	4 346.5/lbCO	2 414.2/kgCO
$\frac{1}{2}CO_2 + \frac{1}{2}C_{\text{coque}} = CO$	-19.42 ^d	-34 960 ^d	-2 910 /lbC ^d	-1 616.7/kgC
$H_2O_{(g)} + C_{\text{coque}} = CO + H_2$	-29.00 ^d	-52 210 ^d	-2 898 /lbH ₂ O ^d	-1 610.0/kgH ₂ O
$CaCO_3 = CaO + CO_2$	-42.5	-76 500	-764 /lbCaCO ₃	-424.4/kgCaCO ₃
$CaCO_3 \cdot MgCO_3 = CaO + MgO + 2CO_2$	-72	-130 000	-700 /lbCaMg(CO ₃) ₂	-388.9/kgCaMg(CO ₃) ₂
$MgCO_3 = MgO + CO_2$	-28	-50 000	-600 /lbMgCO ₃	-333.3/kgCO ₂

a. A 25°C
b. A 60°F
c. Estimado.
d. Basado en P. H. Dewey y D. R. Harper: Journal of Research., National Bureau of Standards., 21 457 (1938).

Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 854.

Tabla XII. Combustión del coque.

CO ₂ %	Calor desarrollado, Kcal por kg de carbono			Eficiencia de combustión %
	CO ₂	CO	Total	
0	000	2 400	2 400	29.9
1	233	2 328	2 561	31.9
2	478	2 256	2 734	34.0
3	733	2 178	2 911	36.3
4	1 000	2 100	3 100	38.6
5	1 278	2 017	3 295	41.0
6	1 567	1 928	3 495	43.5
7	1 867	1 839	3 706	46.1
8	2 183	1 745	3 928	48.9
9	2 506	1 650	4 156	51.8
10	2 845	1 550	4 395	54.7
11	3 211	1 439	4 650	57.9
12	3 589	1 328	4 917	61.2
13	3 984	1 206	5 190	64.6
14	4 389	1 083	5 472	68.2
15	4 823	956	5 779	72.0
16	5 284	822	6 106	76.0
17	5 778	672	6 450	80.3
18	6 289	522	6 811	84.8
19	6 834	355	7 189	89.5
20	7 400	189	7 589	94.5
21	8 028	000	8 028	100.0

Fuente: American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y su operación, 859.

