

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y

METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL BASCULANTE

A GAS NATURAL PARA FUSIÓN DE ALUMINIO

PRESENTADO POR:

Br. AQUIMA PPACCO WILBER

Br. CARLOS YUCRA DANITZA DANIELA

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO

ASESOR: DR. ABEL FRANKLIN CANAL CESPEDES.

CUSCO-PERÚ

2022

Presentación

Señor decano de la facultad de ingeniería geológica, minas y metalúrgica, señores
catedráticos miembros del jurado:

Cumpliendo con las disposiciones del reglamento de grados y títulos vigentes en la
facultad, y con objetivo de optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico,
ponemos a vuestra disposición la tesis, colectiva, intitulada:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO DE CRISOL BASCULANTE A GAS
NATURAL PARA FUSIÓN DE ALUMINIO”**

El cual representa el deseo de aportar con el diseño y construcción de un horno
de crisol basculante para la futura implementación del mismo en el taller de
fundición de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad
Nacional San Antonio Abad del Cusco.

Danitza Carlos y Wilber Aquima

Dedicatoria

Llena de felicidad, es para mí un gran placer dedicar la presente tesis:

A Dios, mi padre celestial por ser mi fortaleza, por cuidarme y ser la roca a la cual me aferre en el transcurso de esta carrera.

A mi querida y abnegada madre Lucila Yucra Ccosaña, le debo este logro. Por ser ejemplo de trabajo y perseverancia, por enseñarme y formarme de tal manera que tengo la sincera certeza y confianza, que el esfuerzo es recompensado.

A la memoria de mi padre Nemesio Carlos Perez, por haberme enseñado buenos valores, ser un ejemplo de buena actitud ante la vida, por su infinita fe en mí. Aún recuerdo cuando de niña parados frente a la puerta de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, le expresé mi deseo de estudiar en esta casa de estudios, hoy por fin veo realizado mi sueño, y cuanto me gustaría que pudiera estar a mi lado.

A la memoria de mi abuela Martina Ccosaña, por su ayuda idónea, por estar presente en los momentos más importantes de mi vida, su apoyo emocional constante ha sido de gran valor.

A mi hermana Bridseida por ser mi fiel motivadora, a mi hermano Abraham por llenar mis días de alegría con sus ocurrencias. A mi familia por todo el cariño, animo, impulso y apoyo que me brindaron durante mi vida, este logro es en gran parte gracias a ustedes.

A mis docentes que me brindaron conocimientos con paciencia y dedicación, formándome en esta carrera tan bella. A mis compañeros y amigos, por ser parte de mi vida universitaria, por el apoyo, amistad que me dieron, los momentos alegres que pasamos son gratos recuerdos.

A todas aquellas personas que me apoyaron y ayudaron en este proceso de formación, lograron que este sueño se haga realidad.

Danitza Daniela Carlos Yucra

Dedicatoria

La presente tesis se la dedico primeramente a Dios por haberme guiado y permitirme tener vida, salud y poder realizar uno más de mis propósitos que es ser ingeniero metalúrgico.

A mi compañera de vida Karen por brindarme su apoyo y comprensión durante el proceso de esta larga y hermosa carrera. A mi adorable y amada hija Itzel Briana por quien ningún sacrificio es suficiente, que con su luz ha iluminado mi vida y hace mi camino más claro; por ser mi fuente de inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor, ser para ella un ejemplo a seguir.

A mis queridos padres Gregorio y Paulina, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ellos. Me formaron con reglas y con algunas libertades que no me dejaban decaer para que siguiera adelante y siempre sea perseverante, ejemplo para mis hermanas, y cumpla con mis ideales. A mis queridas y adoradas hermanas Vilma, Sonia y Yesi por sus palabras y apoyo incondicional, quienes me enseñaron que con esfuerzo y perseverancia se logra el éxito profesional.

A mi distinguido asesor de tesis Dr. Abel Canal por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento, así como también haberme tenido toda la paciencia del mundo para guiarme durante todo el desarrollo de la tesis.

A mis queridos docentes de carrera por haberme aceptado y abierto las puertas de sus aulas; que me brindaron sus conocimientos y su apoyo para seguir adelante día a día.

Finalmente dedico esta tesis a todos los que fueron mis amigos y compañeros de clase durante todos los niveles de la universidad, ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado en un alto porcentaje a mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

Wilber Aquima Ppacco.

Agradecimiento

A Dios por darme vida, brindarme la capacidad, paciencia y la oportunidad de elaborar la presente tesis. A mi madre la sra Lucila Yucra Ccosaña, por sus enormes sacrificios para que yo pudiera culminar mi carrera, su incondicional apoyo en el transcurso de elaboración de esta tesis, así mismo por depositar en mí su confianza para que sus esfuerzos no fueran en vano.

A mis hermanos Bridseida Carlos y Abraham Carlos, por compartir conmigo las alegrías y tristezas de esta carrera, por ser un soporte constante y llenar mis días de gotas de sabiduría.

A mi abuela Martina Ccosaña por su apoyo emocional y moral permanente, a mis tíos Margareth, Darwin, Zenaida y Rosmery por sus palabras de aliento y ánimo, por estar pendientes de mí en el tiempo que me tomo culminar mis estudios y elaborar este trabajo de tesis.

Mi gratitud a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por ser la institución en la cual pude formarme profesionalmente. A la escuela profesional de Ingeniera Metalúrgica por albergarme en sus aulas y laboratorios, durante el transcurso de mi formación profesional.

Un sincero agradecimiento a los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica por su esmerada dedicación, empeño, esfuerzo y paciencia en trasmitirme sus conocimientos y sabiduría. A ustedes queridos docentes les debo mi formación académica.

Agradecer de manera especial al Dr. Abel Franklin Canal Cespedes por brindarnos la oportunidad de asesorar esta tesis y compartirme parte de sus conocimientos y experiencia, direccionando mis conocimientos en la adecuada elaboración de este trabajo.

A todas las personas que de uno u otro modo contribuyeron en la ejecución de este trabajo.

Con cariño, admiración y respeto.

Danitza Daniela Carlos Yucra

Agradecimiento

A mi madre Paulina, por sus inmensos sacrificios para que pudiera terminar mi carrera, por inculcarme los valores que siempre fueron importantes para ella.

A mi padre Gregorio, por enseñarme que con esfuerzo todo es posible.

A mi hermana Vilma, por enseñarme lo importante de la paciencia, a mi hermana Sonia, por mostrarme que todo es mejor con un poco de locura, a mi hermanita yesy, por acompañarme en cada etapa de mi vida, compartir caídas y logros, el que ella me vea como ejemplo a seguir, me da la fuerza para ser mejor cada día.

Un sincero agradecimiento a Valeria, mi compañera de vida, por ser mi soporte y apoyo en todo lo que emprendo. Y como olvidarme de mi adorada hija Briana, quien es la luz de esperanza para que siga adelante.

A mi compañera de tesis Danitza Carlos, por su compromiso permanente y trabajo diligente en el desarrollo de esta tesis.

Un sincero agradecimiento al Dr. Abel Franklin Canal Cespedes, por haberme guiado en la elaboración de este trabajo de tesis. Su constante apoyo y dirección, en base a su sabiduría y experiencia.

Agradezco mucho a la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional De San Antonio Abad Del Cusco y a mis docentes de las distintas materias, por sus palabras sabias, su perseverancia, dedicación, tolerancia y paciencia en transmitirme sus conocimientos profesionales e invaluable.

Con cariño, admiración y respeto.

Wilber Aquima Ppacco

Índice General

Índice General.....	vi
Lista de Notaciones.....	xii
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tablas.....	xvi
Resumen.....	xviii
Abstract.....	xix
1. Capítulo I: Generalidades.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Formulación del Problema.....	1
1.3. Justificación.....	2
1.3.1. Tecnológica.....	2
1.3.2. Económica.....	2
1.3.3. Ambiental.....	2
1.4. Objetivos.....	2
1.4.1. General.....	2
1.4.2. Específicos.....	2
1.5. Antecedentes.....	3
1.5.1. Nacionales.....	3
1.5.2. Internacionales.....	5
1.6. Hipótesis.....	8
1.7. Variables.....	8
1.7.1. Independientes.....	8
1.7.2. Dependiente.....	8
1.8. Matriz de Operacionalización de Variables.....	9
2. Capítulo II: Marco Teórico.....	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Aluminio.....	10
2.2.1. Propiedades del Aluminio.....	11
2.2.2. Importancia Industrial.....	11

2.2.3.	Fundición del Aluminio.	11
2.2.4.	Fundición a Partir de Chatarra de Aluminio.....	13
2.3.	Hornos.....	15
2.4.	Tipos de Hornos	15
2.4.1.	Hornos de Crisol.....	16
2.5.	Refractarios.....	18
2.5.1.	Clasificación de Refractarios	19
2.5.2.	Tipos de Refractarios	21
2.6.	Combustión.....	29
2.6.1.	Completa.....	30
2.6.2.	Incompleta.....	31
2.6.3.	Estequiometrica.....	31
2.6.4.	Con exceso de Aire.....	31
2.6.5.	Con deficiencia de Aire.....	32
2.7.	Combustibles.....	32
2.7.1.	Poder Calorífico.....	32
2.7.2.	Clasificación de los Combustibles.....	34
2.8.	Gas Natural.....	37
2.8.1.	Características termodinámicas.....	38
2.8.2.	Ventajas y desventajas del uso del gas natural.....	39
2.8.3.	El Gas Natural Frente al GLP	40
2.8.4.	Gas Natural para la Industria.....	41
2.8.5.	Combustión del Gas Natural.....	43
2.8.6.	Temperatura Máxima de los Productos de Combustión	44
2.9.	Calor Disponible y Eficiencia del Proceso.....	44
2.10.	Quemadores.....	45
2.10.1.	Clasificación de Quemadores.....	45
2.11.	Transferencia de Calor	48
2.11.1.	Conducción.....	49
2.11.2.	Convección.....	52
2.11.3.	Radiación.....	53
2.12.	Calentamiento Térmico en Hornos de Fundición	54

2.12.1.	Flujo Térmico en Hornos Industriales.	54
2.12.2.	Interacción Térmica en los Hornos.	55
2.13.	Capacidad de Calentamiento de los Hornos.....	57
2.14.	Efecto de la Cantidad de Calor Liberado.....	57
2.15.	Efecto de la Cantidad de Calor Absorbido por la Carga.....	61
2.16.	Rendimiento del Horno.....	62
2.17.	Distribución de Calor en los Hornos.....	63
2.18.	Calor Perdido a Través las Paredes del Horno	64
2.18.1.	Funcionamiento Continuo	64
2.18.2.	Funcionamiento Discontinuo	65
2.19.	Calor Perdido por Radiación a Través de las Aberturas.....	68
2.20.	Calor Perdido por el Escape de Gases a Través de las Puertas.....	71
2.21.	Calor Sensible Expulsado del Horno en los Gases de Combustión.....	71
2.22.	Calor Perdido por Combustión Incompleta.....	73
2.23.	Reducción de las Pérdidas de Calor por las Paredes.....	73
2.24.	Utilización del Calor de los Gases Productos de Combustión.....	74
2.24.1.	Pre calentamiento de la Carga.....	74
2.24.2.	Pre calentamiento del Aire de Combustión.....	74
2.25.	Movimiento de Gases en los Hornos	76
2.25.1.	Presión en los Hornos, Tamaño y Ubicación de los Orificios de Salida de Gases.....	76
2.25.2.	Canal de Gases Productos de Combustión	77
2.25.3.	Flujo de Gases Productos de Combustión en los Hornos.....	78
2.25.4.	Circulación de los Gases de Combustión en los Hornos.....	79
2.26.	Elementos para la Construcción de Hornos.....	84
2.26.1.	Paredes y Solera del Horno.....	85
2.26.2.	Puertas de los Hornos.....	87
2.26.3.	Propiedades de los Materiales Utilizados en los Hornos.....	88
2.27.	Decretos Legales Ambientales	89
3.	Capitulo III: Diseño y Construcción del Horno	92
3.1.	Consideraciones de Diseño del Horno	92
3.2.	Determinación Teórica de Dimensiones del Equipo.....	92
3.2.1.	Generalidades	92

3.2.2.	Dimensionamiento del Horno de Crisol.....	93
3.3.	Diámetro Interno del Horno	98
3.4.	Diámetro Externo del Horno.....	99
3.5.	Altura del Horno.....	101
3.6.	Área de Base y Tapa del Horno	103
3.6.1.	Base del Horno	103
3.6.2.	Tapa del Horno.....	103
3.7.	Cálculos de Combustión.....	103
3.7.1.	Determinación de Aire Teórico – Coeficiente de Exceso de Aire.....	103
3.7.2.	Flujo de Combustible	104
3.7.3.	Balance de Masa y Energía.	106
3.7.4.	Determinación del Calor Útil.....	107
3.7.5.	Calor Absorbido por el Crisol.	110
3.7.6.	Calor Útil para la Fusión de Aluminio.....	111
3.7.7.	Pérdidas de Calor en el Horno.	112
3.7.8.	Perfil de Temperaturas.	112
3.7.9.	Conducción.....	115
3.7.10.	Convección.....	116
3.7.11.	Radiación.....	117
3.7.12.	Determinación de Perdidas de Calor	118
3.7.12.3.	Perdida de Calor en la Tapa Superior del Horno.....	123
3.8.	Selección de Materiales para la Construcción del Horno	126
3.8.1.	Crisol.....	126
3.8.2.	Ladrillo Refractario.....	126
3.8.3.	Concreto Refractario.....	128
3.8.4.	Capa Aislante.....	128
3.8.5.	Chapa Metálica	129
3.8.6.	Material de Aporte.....	130
3.8.7.	Chumaceras.....	131
3.8.8.	Ruedas Dentadas y Cadena.....	132
3.8.9.	Quemador	134
3.8.9.1.	Velocidad de Suministro de Aire.....	134

3.8.9.2.	Velocidad de Suministro del Combustible	135
3.9.	Construcción y Ensamble del Horno	136
3.9.1.	Cilindro Metálico.....	138
3.9.2.	Tapa del Horno.....	139
3.9.3.	Construcción de Quemador	140
3.9.4.	Soporte del Horno.....	141
3.9.5.	Sistema Basculante	142
3.9.6.	Montaje del Refractario	146
3.9.7.	Equipos de Protección Personal.....	147
3.10.	Procedimiento de Fusión de Aluminio en el Horno de Crisol Basculante.....	147
3.11.	Datos Experimentales Obtenidos en la Fusión de Aluminio	151
3.12.	Recursos Materiales y Humanos.....	155
3.13.	Costo de Operación del Horno de Fusión de Aluminio.....	157
3.14.	Control Ambiental.....	157
3.15.	Recurso Humano.....	158
3.16.	Recurso Energético	159
3.17.	Comparación de Costo Producción – Precio de Venta	159
4.	Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones.....	161
4.1.	Conclusiones	161
4.2.	Recomendaciones	162
5.	Matriz de Consistencia.....	162
6.	Bibliografía	163
	ANEXO 01: Matriz de consistencia.....	168
	ANEXO 02: Dimensiones del crisol.....	169
	ANEXO 03: Ficha técnica del crisol.....	170
	ANEXO 04: Ficha técnica del ladrillo refractario.....	171
	ANEXO 05: Ficha técnica del cemento refractario.....	172
	ANEXO 06: Dimensiones del aislante.....	173
	ANEXO 07: Estandares nacionales de calidad ambiental para ruido	173
	ANEXO 08: Ficha técnica E-6011.....	174
	ANEXO 09: Ficha técnica del acero ASTM A36	175
	ANEXO 10: Porcentaje de exceso de aire según aplicación.....	177

ANEXO 11: Ficha técnica del tubo de Acero A500	178
ANEXO 12: Carcasa del horno	180
ANEXO 13: Tapa del horno	181
ANEXO 14: Tapa de alimentación	182
ANEXO 15: Bancada del horno.....	183
ANEXO 16: Turbina	184
ANEXO 17: Cadena de transmisión.....	185
ANEXO 18: Soporte de cadena	186
ANEXO 19: Manivela	187
ANEXO 20: Ensamble del horno.....	188
ANEXO 21: Evidencia fotográfica	189
ANEXO 22: Tabla de emisividad térmica-metales	190
ANEXO 23: Tabla de emisividad térmica-no metales	191
ANEXO 24: Emisividades de algunos materiales 300K.....	192
ANEXO 25: Difusividades térmicas a temperatura ambiente.....	192
ANEXO 26: Coeficiente de transferencia de calor por convección.....	193
ANEXO 27: Valores típicos de coeficientes de transferencia de calor por convección	194
ANEXO 28: Conductividad térmica a temperatura ambiente.....	194

Lista de Notaciones

A	Área
ASTM	Asociación americana de ensayo de materiales
ASM	Sociedad internacional de información de materiales
C_p	Calor específico
GN	Gas natural
GLP	Gas licuado de petróleo
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección
k	Coefficiente de transferencia de calor por conducción
Q_{CO}	Calor liberado por el combustible
Q_P	Calor total perdido en el horno
Q_U	Calor útil para la fusión de metales
M	Momento
m	Peso
λ	Calor latente de fusión
r	Radio
RT	Relación de transmisión
e	Espesor
T_0	Temperatura inicial
T_f	Temperatura final

Lista de Figuras

Figura 2. 1: Horno de crisol fijo	17
Figura 2. 2: Horno de crisol basculante	18
Figura 2. 3: Composición del ladrillo refractario	22
Figura 2. 4: Diagrama ternario de compuestos del cemento ternario	27
Figura 2. 5: Triangulo de combustion.....	30
Figura 2. 6: Quemador con mezcla previa	46
Figura 2. 7: Quemador sin mezcla previa	48
Figura 2. 8: Tubo cilindrico con temperaturas de superficie interior y exterior	51
Figura 2. 9: Flujo de calor a travez de secciones cilindricas multiples.....	52
Figura 2. 10: Diagrama de transmision de calor en el interior de la camara	56
Figura 2. 11: Ineficiencia del espacio de combustión.....	58
Figura 2. 12: Optimización del espacio de combustión.....	59
Figura 2. 13: Flujo de calor en los hornos	63
Figura 2. 14: Gradiente de temperatura en un horno	66
Figura 2. 15: Representación de un esquema de dos paredes cilíndricas	67
Figura 2. 16: Esquema de radiación a través de una abertura	69
Figura 2. 17: Radiación del cuerpo negro en función de la temperatura °C.....	70
Figura 2. 18: Radiación a través de aberturas de formas diversas.....	70
Figura 2. 19: Temperaturas adiabáticas de llama del gas natural	72
Figura 2. 20: Horno con cámara superior de precalentamiento	75
Figura 2. 21: Horno de recuperación	75

Figura 2. 22: Flujo de corriente subdividida de gas.....	78
Figura 2. 23: Circulación mantenida por un pequeño chorro	81
Figura 2. 24: Corrientes inducidas por resistencias calientes	82
Figura 2. 25: Circulación de gases a lo largo de la pared refractaria del horno.....	83
Figura 2. 26: Horno con conveccion forzada.....	84
Figura 2. 27: Tabique refractario	86
Figura 3.1: Contenido calórico de los metales.....	96
Figura 3.2: Esquema interno del horno.....	98
Figura 3.3: Corte transversal del horno	101
Figura 3.4: Esquema del balance de energía.....	107
Figura 3.5: Perfil de temperaturas en el interior del horno.....	113
Figura 3.6: Esquema de resistencias para el horno	113
Figura 3.7: Dimensiones UCP 2010	131
Figura 3.8: Dimesiones de cadena	132
Figura 3.9: Longitud de cadena	133
Figura 3.10: Carcasa metálica.....	138
Figura 3.11: Tapa del horno de crisol basculante	139
Figura 3.12: Quemador del horno.....	140
Figura 3.13: Condiciones del soporte de horno	142
Figura 3.14: Bancada del horno de crisol basculante	143
Figura 3.15: Sistema de basculación.....	143
Figura 3.16: Fuerzas presentes en el horno.....	144
Figura 3.17: Fuerzas presentes en los engranes	145

Figura 3.18: Refractario en el horno	147
Figura 3.19: Calentamiento del horno de crisol basculante.....	152
Figura 3.20: Perdida de calor a través de las paredes	154
Figura 3.21: Pirómetro electrónico	155
Figura 3.22: Comparación de productos.....	156

Lista de Tablas

Tabla 1. 1: Operacionalización de variables	9
Tabla 2. 1: Propiedades del aluminio	12
Tabla 2. 2: Chatarra de aluminio.....	14
Tabla 2. 3: Composición química de ladrillos refractarios	23
Tabla 2. 4: Clasificación de los combustibles.....	36
Tabla 2. 5: Composición de gas natural en el Perú.....	38
Tabla 2. 6: Propiedades del gas natural.....	39
Tabla 2. 7: Características del gas natural frente al GLP	40
Tabla 2. 8: Principales usos del gas natural por sector productivo	42
Tabla 2. 9: Calor liberado en diferentes condiciones de combustión	60
Tabla 2.10: Requisitos legales ambientales	90
Tabla 3.1: Características del crisol	93
Tabla 3.2: Reducción de pérdidas de calor a través de las paredes del horno	100
Tabla 3. 3: Porcentaje de alumina y temperatura.....	127
Tabla 3. 4: Grado de resistencia del cemento refractario.....	128
Tabla 3. 5: Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio.....	129
Tabla 3. 6: Propiedades mecánicas del acero A36.....	129
Tabla 3. 7: Composición química E-6011	130
Tabla 3. 8: Propiedades mecánicas del E-6011.....	130
Tabla 3. 9: Dimensiones de UCP-2010 chumaceras tipo puente.....	132
Tabla 3.10: Dimensiones y propiedades de cadena nro 25-1.....	133
Tabla 3.11: Materiales requeridos en la construcción del horno	137

Tabla 3.12: Propiedades mecánicas del tubo de acero A500	141
Tabla 3.13: Equipos de protección personal	146
Tabla 3.14: Procedimiento de fusión del aluminio	148
Tabla 3.15: Datos experimentales-temperatura interna del horno	151
Tabla 3.16: Datos experimentales-temperatura externa del horno	153
Tabla 3.17: Productos de fusión del aluminio.....	154
Tabla 3.18: Consumo de combustible.....	156
Tabla 3.19: Costo de construcción del horno.....	157
Tabla 3.20: Costo de operación del horno	157
Tabla 3.21: Controles ambientales.....	158
Tabla 3.22: Talento humano	159
Tabla 3.23: Energía eléctrica requerida en la construcción	160
Tabla 3.24: Cuadro comparativo de costos	160

Resumen

El diseño y construcción de un horno de crisol basculante para fusión de chatarra de aluminio, que use gas natural como combustible se realizó con el propósito de la futura implementación del mismo en el taller de fundición de ingeniería metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Como punto de partida se consideraron aspectos fundamentales para el diseño de hornos, tales como la clasificación y descripción de componentes de hornos metalúrgicos de crisol, igualmente se abarcó la clasificación de combustibles, principios de combustión, descripción de propiedades y beneficios del combustible seleccionado para el funcionamiento del horno. De igual modo se detallaron clases de refractarios, tipos de quemadores, así como la distribución y transferencia de calor a través de los materiales que componen el horno. Considerando estos puntos se logró la selección adecuada de materiales para la construcción del horno.

El dimensionamiento del horno se logró tomando como base las medidas del crisol, se determinaron las extensiones del diámetro interno y externo del horno, 32.76 cm y 68.92 cm respectivamente, así como la altura 67.53 cm y el espesor de materiales que componen las paredes del horno, Así mismo el soporte para la basculación del horno se determinó tomando en cuenta los esfuerzos a los cuales estará expuesta la estructura. Con base en los datos obtenidos y haciendo uso del programa auxiliar inventor se elaboraron planos, siendo estos de apoyo para la construcción del horno. Culminado el ensamble del horno, se procedió a la realización del proceso de fundición de aluminio el cual se llevó a cabo para evidenciar el buen funcionamiento del equipo.

Finalmente se concluyó que el horno diseñado y construido funciona adecuadamente y cumple con los aspectos inicialmente planteados, el mismo que tuvo como costo de construcción 5075 S/.

Palabras clave: Horno de fusión, diseño, construcción, gas natural, aluminio.

Abstract

The design and construction of a tilting crucible furnace for melting aluminum scrap, which uses natural gas as fuel, was carried out with the purpose of its future implementation in the metallurgical engineering foundry workshop of the National University of San Antonio Abad. from Cuzco.

As a starting point, fundamental aspects for the design of furnaces were considered, such as the classification and description of components of crucible metallurgical furnaces, as well as the classification of fuels, combustion principles, description of properties and benefits of the fuel selected for the furnace. oven operation. In the same way, classes of refractories, types of burners, as well as the distribution and transfer of heat through the materials that make up the furnace were detailed. Considering these points, the adequate selection of materials for the construction of the oven was achieved.

The dimensioning of the furnace was achieved based on the measurements of the crucible, the extensions of the internal and external diameter of the furnace were determined, 32.76 cm and 68.92 cm respectively, as well as the height 67.53 cm and the thickness of materials that make up the walls of the furnace. Likewise, the support for tilting the furnace was determined taking into account the stresses to which the structure will be exposed. Based on the data obtained and using the inventor auxiliary program, plans were prepared, these being support for the construction of the furnace. Once the assembly of the furnace was completed, the aluminum casting process was carried out, which was carried out to demonstrate the proper functioning of the equipment.

Finally, it was concluded that the designed and built oven works properly and complies with the aspects initially raised, the same one that had a construction cost of 5075 S/.

Keywords: Melting furnace, design, construction, natural gas, aluminum.

1. Capítulo I: Generalidades

1.1.Planteamiento del Problema

La escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco forma profesionales altamente calificados, con amplio dominio en el campo de la metalurgia extractiva y transformativa, capaces de contribuir con investigación y diseño de tecnologías, según los requerimientos de la sociedad, comprometidos con colaborar en el desarrollo de la región y país.

Como egresados de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica y con el conocimiento sobre la importancia que implica poner en práctica los fundamentos teóricos adquiridos, con el propósito de lograr una formación integral teórico-práctico en las diferentes materias.

El laboratorio de fundición de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica cuenta con un horno de fosa que posee desventajas en su funcionamiento, así como la exposición innecesaria del crisol a cambios bruscos de temperatura en la etapa de colado del metal reduciendo la vida útil del mismo.

Por ello, se ve la necesidad de contribuir con el diseño y construcción de un horno de fundición de crisol basculante de fácil operación, que responda a las necesidades académicas de la escuela y los estudiantes, el cual toma en consideración las condiciones existentes en el lugar de instalación.

1.2.Formulación del Problema

¿En qué medida será posible la mejora de condiciones en la realización de fusión de aluminio en el taller de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica mediante el diseño y construcción de un horno de crisol basculante?

1.3. Justificación

1.3.1. Tecnológica

La educación no solo se basa en los conocimientos teóricos adquiridos, el diseño propuesto contribuye con la aplicación de estos conocimientos tanto en el desarrollo del diseño del horno de crisol basculante, como también en la realización de pruebas del proceso de fundición de aluminio.

Este horno promete comodidad, facilidad y seguridad en su operación, beneficiando así a los alumnos de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica.

1.3.2. Económica

El diseño propuesto permitirá la ampliación de la vida útil del crisol, mediante la no exposición del mismo a cambios bruscos de temperatura reduciendo así el costo que implicaría una renovación de crisol, así mismo considerando el gas natural como combustible se posibilita el ahorro económico en el proceso de fundición de aluminio, debido al costo de este combustible.

1.3.3. Ambiental

Con el gas natural sugerido como combustible en el diseño propuesto, se pretende la reducción de emisión de gases productos de combustión al medio ambiente, debido a la naturaleza del combustible que experimenta una combustión total.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Diseñar y construir un horno de crisol basculante para fusión de aluminio.

1.4.2. Específicos

- Establecer el dimensionamiento adecuado del horno.
- Realizar el proceso de fundición del aluminio a nivel laboratorio.
- Selección de materiales para la construcción del horno.

1.5. Antecedentes

1.5.1. Nacionales

- **“Diseño y construcción de un horno de crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre”**, desarrollado por Daniel, C. & Jose, M.(2019), trabajo realizado en Cajamarca – Perú. El cual abarca la importancia del reciclaje de cobre en la conservación y protección del medio ambiente, por lo cual se plantea como objetivo general el diseño y construcción de un horno de crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre considerando GLP como combustible, y como objetivos específicos la determinación de parámetros que influyen en el diseño y construcción, descripción de materiales a usar en la construcción del horno y cálculo de la rentabilidad económica que representa la producción de barras de chatarra de cobre reciclado en el horno, al finalizar el trabajo se concluye que el diseño, construcción y puesta en marcha del horno de crisol estacionario, mejora de manera significativa el reciclaje de chatarra de cobre, los principales parámetros para el diseño del horno son el tipo de material a fundir, temperatura máxima de operación, el tipo del horno, las dimensiones del horno, tipo y tamaño del crisol, el reciclaje de cobre genera una rentabilidad de la inversión del 52.22% al mes, considerando un capital de 7326,10 mensual.
- **“Diseño de un horno de crisol para fundición de 600 kg de aluminio reciclado utilizando gas natural”**. Realizado por Ricardo, B.(2016). Desarrollado en Arequipa – Perú, el cual tiene como objetivo principal la construcción de un horno que crisol que use gas natural como combustible, el mismo que proviene de la red de distribución pública de Lima metropolitana, y como objetivos específicos la determinación de parámetros básicos

de diseño, para la realización de este trabajo se consideran las propiedades del aluminio, flujos de calor, fenómenos de transferencia de calor, lugar de trabajo, etc., logrando así la construcción satisfactoria del horno que tiene una capacidad de 600kg, un diámetro interior de 1083mm, el espesor de la pared de aislamiento es de 127mm, finalmente se obtuvo un costo final de producción es \$ 57 712.93, considerando el costo de la compra de equipos , materiales, mano de obra y el costo que representan los servicios requeridos para realizar la construcción del equipo.

- **“Diseño y construcción de un horno de crisol fijo a GLP”**. El primer antecedente corresponde a Danny, B., & Cesar, L.(2012). Trabajo desarrollado en la ciudad de Cusco - Perú, trata la problemática de poseer un horno de fosa que presenta dificultades técnicas en el funcionamiento, lo que no permite realizar adecuadas practicas complementarias a los conocimientos teóricos para la correcta formación del profesional, en tal sentido se plantea como objetivo principal el diseño y posterior construcción de un horno de crisol fijo para la fundición de metales a nivel laboratorio utilizando GLP como combustible, y dando como conclusión que el costo de esta construcción es de S/. 3 582.94 en total.
- **“Diseño de un horno de crisol basculante aplicado en artesanía utilizando gas natural”**, desarrollado por Yuri, A. & Jose, F.(2010). Desarrollado en Cusco – Perú. el cual pretende dar a conocer las bondades del gas natural, al usarlo como combustible, siendo el objetivo principal de este trabajo diseñar un horno de crisol que reúna los requisitos técnicos y térmicos que posibilite fundir metales en el menor tiempo posible utilizando un combustible que produzca una mínima contaminación ambiental, y como objetivos específicos determinar las variables adecuadas de diseño y rendimiento del horno

de crisol utilizando gas natural, como conclusión de este trabajo se tubo que el uso del gas natural es técnica y económicamente posible en la industria de la fundición. Debido a que disminuye considerablemente la contaminación y finalmente el costo de construcción del horno de crisol basculante es de S/. 3 949.00 en total.

1.5.2. Internacionales

- **“Diseño y construcción de horno basculante a gas, para fundición de metales blandos”**, realizado por Edison,V.(2021), desarrollado en Santo Tomas – Colombia, el cual trata la problemática que representa la falta de hornos de fundición en la región de Santo Tomas, lo cual dificulta el aprovechamiento adecuado de la chatarra de aluminio, por lo mismo que se propone el diseño y fabricación de un horno de crisol basculante, con capacidad de hasta 5 kg, para fundir metales blandos, como objetivos específicos se plantean la definición de materiales y construcción del dispositivo, evaluar el funcionamiento del equipo, al concluir este trabajo se logró diseñar y construir un horno basculante para la fundición de metales blandos, el mismo que considera el GLP como combustible, en la selección de materiales y elementos del horno, se tomó en cuenta la resistencia que deben de tener y las condiciones a las cuales estarán expuestos, finalmente el puesta en marcha y resultados obtenidos comprueban el buen funcionamiento del horno.
- **“Implementar un horno de crisol basculante para el laboratorio de fundición de la universidad francisco de paula santander Ocaña”** .Corresponde a Fornaria, V.,& Juan,M (2014), trabajo realizado en la ciudad de Ocaña – Colombia, tiene como problema la no existencia de un laboratorio metalúrgico en la carrera profesional de ingeniería mecánica de la Universidad de Francisco de Paula Santander Ocaña, teniendo como

propósito la realización de cálculos de los distintos elementos de un horno de crisol basculante y la implementación del mismo en el laboratorio de fundición, al finalizar este trabajo se concluye que los cálculos realizados para el diseño permitieron la selección de materiales adecuados para garantizar un larga vida, todo a fin de que la combustión sea optima, y cause la igualdad de temperatura en el horno, logrando finalmente la construcción de un horno de crisol basculante para el laboratorio de fundición de la Universidad de Paula Santander Ocaña, el mismo que al ser funcional ofrece seguridad al operario.

- **“Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas”**, realizado por Evelin, F. & Roberto, O. (2014), trabajo desarrollado en el Salvador, que tiene como finalidad el diseño y construcción de un horno de crisol didáctico y funcional, para la fundición de materiales no ferrosos, el cual servirá como cimiento para una futura edificación de una planta piloto de fundición en escuela profesional de ingeniería mecánica de la universidad de El Salvador. Con tal fin se realizó una investigación exhaustiva para un entendimiento adecuado del funcionamiento, procedimiento para la construcción, parámetros a tomar en cuenta en el diseño de los distintos componentes que constituyen un horno y así determinar adecuadamente las dimensiones de este. Finalmente se diseñó un horno compacto de 500 mm de altura y 500 mm de diámetro, que opera con un quemador atmosférico, y que requiere como potencia mínima para su funcionamiento 12.50 KW (42.550 BTU/h).
- **“Diseño y construcción de un horno de combustión industrial para fundir aluminio”**, Realizado por Diego, M.& Viviana, L (2012), trabajo desarrollado en Riobamba- Ecuador, trata la carencia que posee el laboratorio de la facultad de ciencias, escuela superior

politécnica de Chimborazo de no poseer un horno de combustión que permita realizar prácticas de reacciones de combustión, así lograr obtener un producto terminado, por lo cual se tiene como objetivo principal diseñar y construir un horno de combustión industrial para fundir aluminio, y como objetivos específicos la simulación del proceso de fundición, determinación de la capacidad o tamaño del horno, seleccionar el tipo de materiales y establecer controles en el horno, este objetivo fue alcanzado mediante el uso de criterios de diseño como: diámetro de crisol, cámara de combustión y diámetro del horno, obteniendo así el espesor del material aislante, altura, tapa y base del horno, logrando la construcción un horno de combustión industrial para fundir aluminio de 16 kg de capacidad, el cual tuvo un costo total de \$ 3189,22 considerando la investigación, diseño y fabricación y montaje del horno.

- **“Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición de aluminio con una capacidad de 15kg a una temperatura de 800 °C utilizando GLP”**. Realizado por Edison, S. & Carlos, T. (2014), trabajo desarrollado en Quito – Ecuador, el cual trata la alta demanda en fundiciones de aluminio que presenta la microempresa mecánica de precisión “Guerrero S.A.”, por lo cual se tiene como objetivo principal la mejora en tecnología en la microempresa, mediante el diseño y construcción de un horno de crisol para fundir aluminio el cual permita responder a la demanda, y como objetivos específicos la realización de planos de diseño, fabricación, selección de materiales, montaje y pruebas del horno, al finalizar el trabajo se concluye que se logró el diseño y construcción de un horno para fundir 15 kg de aluminio, el mismo que permite la fundición de esta carga en un tiempo no mayor a 1 hr, la selección de materiales se realizó en base a las existentes en

el medio que cumplan con los parámetros de ingeniería, y finalmente al llevarse a cabo el funcionamiento del horno se evidencio que este es de fácil operación, alto rendimiento, eficiente y de bajo costo, en relación a los existentes en el mercado.

1.6.Hipótesis

El diseño y construcción del horno de crisol basculante mejorara las condiciones en la realización de fusión de aluminio en el taller de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica.

1.7.Variables

1.7.1. Independientes

- Capacidad del horno.
- Temperatura.
- Tiempo de colado.

1.7.2. Dependiente

- Dimensiones del horno.

1.8. Matriz de Operacionalización de Variables

Tabla 1. 1

Operacionalización de variables

Variables	Clase de variable	Definición	Definición operacionalización	Dimensiones	Sub dimensiones	Operacionalización		
						Indicadores	Tipo de variable	Instrumento
Capacidad del horno	Independiente	Propiedad de poder contener cierta cantidad de alguna cosa (Oxford languages, 2022)	Cantidad de aluminio que puede fundir el horno en un ciclo	Peso del Aluminio	---	Cantidad de Kg de Aluminio	Continua	Balanza
Temperatura	Independiente	Grado o nivel térmico de un cuerpo o ambiente (Bruño, 2013, p 447)	Cantidad de calor necesaria para alcanzar la temperatura de fusión de aluminio. Para la ocurrencia de su fusión.	Temperatura de colado del aluminio	---	Temperatura en °C a la cual se encuentra el horno	Continua	Pirómetro
Tiempo de colado	Independiente	Periodo determinado durante el que se realiza o se desarrolla el colado del metal (Oxford languages, 2022)	Tiempo el cual requiere el horno en alcanzar la temperatura de colado del aluminio.	Periodo de tiempo que tarda en fundirse al aluminio	---	Cantidad de horas que dura el proceso de fundición	Continua	Cronometro
Dimensiones del horno	Dependiente	Medida y extensión de las cosas o los fenómenos (Bruño, 2013, p 447)	Medidas que poseen los componentes del horno, los mismos que se hallan mediante cálculos de ingeniería.	Valores de longitud de los componentes del horno.	Altura	Longitud mm de altura de componentes del horno	Continua	Cinta métrica
					Diámetro	Valor en mm de componentes.	Continua	
					Espesor	Valor en mm de componentes.	Continua	

Elaboración propia

2. Capítulo II: Marco Teórico

2.1.Introducción

El marco teórico que se desarrolla seguidamente, proporciona información con conceptos fundamentales requeridos para el adecuado entendimiento del desarrollo de este trabajo.

2.2.Aluminio

El aluminio es un metal no ferromagnético que es el más abundante sobre la corteza terrestre, y es el tercer elemento más copioso después del oxígeno y el silicio.

“Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas. En estado natural se encuentra en muchos silicatos como son feldespatos, plagioclasas y micas“ (Hurlbut y Klein,2003,p 440).

Puesto que posee alta reactividad química, el aluminio no se encuentra en la naturaleza como metal puro, siempre se presenta en su forma oxidada y más comúnmente como aluminatos y aluminosilicatos en arcillas y lutitas. Dentro de estos materiales, se presenta como óxido libre de alúmina, combinado con agua o como derivados de este óxido (Downs .1998,p 83).

La más importante fuente comercial actual de aluminio es la bauxita, que es el nombre que se le da a los minerales que suelen contener del 40 al 60 % de alúmina hidratada junto con compuestos como óxidos de hierro, sílice y titanio así como una gama de impurezas menores, incluido el galio (Downs .1998,p 83) .

El aluminio es atractivo para las distintas industrias, por su alta capacidad de soportar la corrosión, así mismo su baja densidad ha hecho de este metal uno de los más destacados, debido a la gran diversidad de usos que ofrece (Rodríguez .et al,2006,p 28).

2.2.1. Propiedades del Aluminio

El aluminio posee una serie de propiedades beneficiosas lo cual hace que tenga muchas aplicaciones convirtiéndolo así en uno de los metales más idóneos y ventajosos en las industrias eléctrica, construcción, aérea y automovilista (Hatch,1984.p 39).

Las propiedades físicas y químicas del Aluminio se muestran en la tabla 2.1.

2.2.2. Importancia Industrial.

El aluminio posee propiedades beneficiosas tales como su baja densidad, optima resistencia a la corrosión, buena conductividad eléctrica y calórica, facilidad en el mecanizado, los mismos que hacen de este metal uno de los más usados en las diferentes industrias. Así mismo al ser relativamente económica, es el metal más usado después del acero (Vazquez,.2018, p 12).

Por otra parte, una gran limitante para el uso de metales férreos es su alta capacidad de oxidación; caso contrario se presenta en el aluminio, donde la oxidación es mínima, debido a que se forma una ligera capa de óxido de aluminio (Al_2O_3), la cual puede ser retirada de las piezas de aluminio mediante el pulido, puesto que no se integra a la matriz (Vargel,2004,p 12).

2.2.3. Fundición del Aluminio.

Para fundir el aluminio se recomienda que el metal no tenga contacto con los gases de combustión, asimismo es necesario que el proceso sea de manera breve, debido que el material es sensible a la absorción de oxígeno e hidrógeno del medio ambiente causando que la fundición exhiba deficiencias (Duponchelle,1952,p 242).

Tabla 2. 1*Propiedades del Aluminio*

Propiedades del Al	Valores
Cambio de volumen al congelar (%)	-6.5
Calor de fusión (KJ/Kg)	395.4
Calor especifico a 25°C (J/K Kg)	903
Conductividad térmica a 0°C (W/m K)	237
Densidad a 20 °C (g/cm ³)	2.698
Entalpia a 25°C (J/mol)	4540
Entropía a 25°C (J/Kmol)	28.30
Estructura cristalina	f.c.c
Expansión térmica, coeficiente lineal a 20°C (x 10 ⁶ /K)	23.6
Modulo elástico a 20 °C (Gpa)	69
Numero atómico	13
Punto de ebullición (°C)	2520
Punto de fusión (°C)	660.10
Resistividad eléctrica a 20°C (nΩ.m)	26.5
Susceptibilidad magnética (volumétrica)(m.k.s)	7.88 x 10 ⁻⁹
Volumen atómico (cm ³ /mol)	9.995

Nota. Recuperado de “*Química del Aluminio, Galio, Indio y Talio* “, de Downs,A.,1998,p 82,Ohio,Estados unidos:Blackie academic & professional.

2.2.4. Fundición a Partir de Chatarra de Aluminio.

El aluminio es un metal altamente reciclable, debido a que no sufre una variación en sus características químicas durante este proceso, por tal motivo se puede realizar el reciclaje indefinidamente. Así mismo se pueden fabricar objetos de aluminio en su totalidad con material reciclado (Foremex, 2022).

Obtener aluminio a partir del reciclado representa un ahorro de energía de casi el 95% en relación al consumo de energía que se requiere al obtenerlo directamente de la bauxita. “Un residuo de aluminio de fácil manejo, es ligero, no se rompe, no arde y no se oxida”.

En la tabla 2.2 se muestra los materiales más comunes encontrados en chatarra de aluminio, así como su composición y posibles impurezas. Los metales que con frecuencia están presentes en cantidades mínimas en estos materiales son el Cu, Fe, Mg y Si, los mismos que en la etapa de fundición se presentan en la escoria.

Para la fundición de chatarra de aluminio se recomienda realizar una limpieza adecuada, para poder retirar restos de aceites, pintura y otras impurezas, debido a que estas forman un residuo que se presenta en la escoria. Se recomienda la adición de sales en la etapa de fundición para mejorar la fluidez del metal, de modo que no sea necesario elevar la temperatura del horno, y por consiguiente se minimiza la oxidación del material. La adición de sales tales como la mezcla binaria de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl), son ampliamente aplicados en el reciclaje de aluminio. Ya que los cloruros son de gran importancia en la recuperación de aluminio debido a que evitan la oxidación del metal, estas sales poseen la capacidad de solubilizar los óxidos, por lo que permite mayor disolución de la capa superficial de óxido. Por otra parte, la adición de sales de flúor genera un ataque a las capas de óxido formadas y un

decremento de la densidad de la mezcla de sales fundidas, lo cual posibilita un incremento en la recuperación de aluminio metálico (Totten.G.2003, p 148).

Tabla 2. 2

Chatarra de aluminio

Chatarra	Descripción	Composición
Perfiles lacado/anodizado	Metal aplicado en carpintería de aluminio.	(Al- Mg-Si)- laca ó capa anódica
Perfil obra o demolición	Material procedente de desmontaje en obras (puertas, ventanas)	(Al-Mg-Si)- Fe
Offset de imprenta	Metal aplicado en litografía (industria de artes gráficas).	(Al – Si , Fe)
Radiador AL	Material usado en la industria automovilística. Chatarra de aluminio de condensadores	(Al – Cu-Sn)
Cacharro	Metal usado en utensilios de uso cotidiano: cacerolas y sartenes.	(Al - Mg –Si)
Carter	Metal procedente de automoción, fontanería, maquinaria.	Al – aceite

Nota. Recuperado de “Chatarra de aluminio “, de Recemsa, (09 de febrero 2022). <https://www.elchatarro.com/chatarra/aluminio/#recorte-de-chapa-anodizado-natural>.

2.3.Hornos

Se denominan como hornos industriales a aquellos que imparten calor a la carga para incrementar la temperatura en la misma, pretendiéndose tenga lugar reacciones químicas o cambios de estado tal como la fusión (Trinks,1975,p 13).

2.4.Tipos de Hornos

“Los hornos usados para fundir metales y sus aleaciones varían mucho en capacidad y diseño. Estos van desde pequeños hornos de crisol de reducida capacidad en kilogramos de metal a hornos de hogar abierto de hasta varios centenares de toneladas de capacidad” (ASM International,1998, p 828).

La elección del horno adecuado para realizar un proceso de fundición de metales se establece considerando los siguientes factores:

- El costo de operación.
- Interacción entre la carga, el combustible y los productos de la combustión.
- El menester de conservar la pureza de la carga, tanto como la precisión de su composición.
- Necesidad de fundir la aleación tan rápidamente como sea posible.
- Capacidad requerida del horno.

Los hornos usados en un proceso de fundición de metales son de tipo:

- Crisol (estacionario y basculante).
- Eléctrico.
- Rotativo
- Reverbero

En este caso nos enfocaremos en los hornos de crisol.

2.4.1. Hornos de Crisol.

Un horno de crisol es un espacio al cual se le abastece energía, esta reserva el calor y fomentan la transferencia del mismo a un recipiente conductor de calor, resistente a altas temperaturas y a la acción del metal, el cual es denominado crisol que usualmente está conformado de grafito con cierto contenido de arcilla, el mismo que posibilita fundir el metal en su interior para posteriormente ser vaciado a un molde dispuesto preliminarmente (ASM International,1998, p 829).

Para obtener que el calor este concentrado alrededor del crisol, el mismo se ubica dentro de paredes refractarias las cuales producen una cavidad para la circulación de los gases productos de combustión.

Actualmente los hornos de crisol brindan a la industria de la fundición una gran cantidad de alternativas con relación al metal a fundir, los mismos que pueden ser: aluminio, bronce, acero, magnesio, cobre, níquel y latón.

“La capacidad del crisol puede variar de unas cuantas onzas para fundiciones de laboratorio hasta 1400 kg para la fundición de aleaciones de aluminio. Entre las opciones para el combustible figuran carbón, coque, gases comerciales y combustibles oleosos” (ASM International,1998, p 829).

Tenemos dos clases de horno de crisol: El de crisol fijo y el de crisol basculante.

2.4.1.1.Horno de crisol fijo.

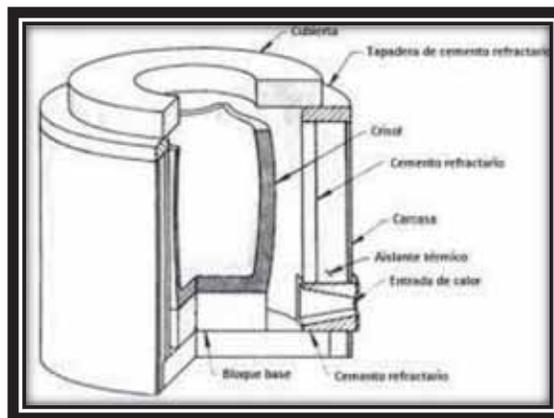
Los hornos de crisol fijo utilizan un crisol colocado dentro de una carcasa recubierta de material refractario, la característica de esta clase de hornos es que el crisol puede ser retirado del

horno para vaciar el material fundido o en su defecto se extrae de este haciendo uso de cucharones (ASM International,1998, p 829).

En caso de un crisol removible este se transporta hasta los moldes mediante el uso de pinzas, para realizar el colado, evitando de esta forma el traslado del metal fundido a otro recipiente ver Figura 2.1.

Figura 2. 1

Horno de crisol fijo



Nota. Tomado de *ASM handbook:Materials Park* (p 830), por ASM International.(2008):ASM International

2.4.1.2.Horno de crisol basculante.

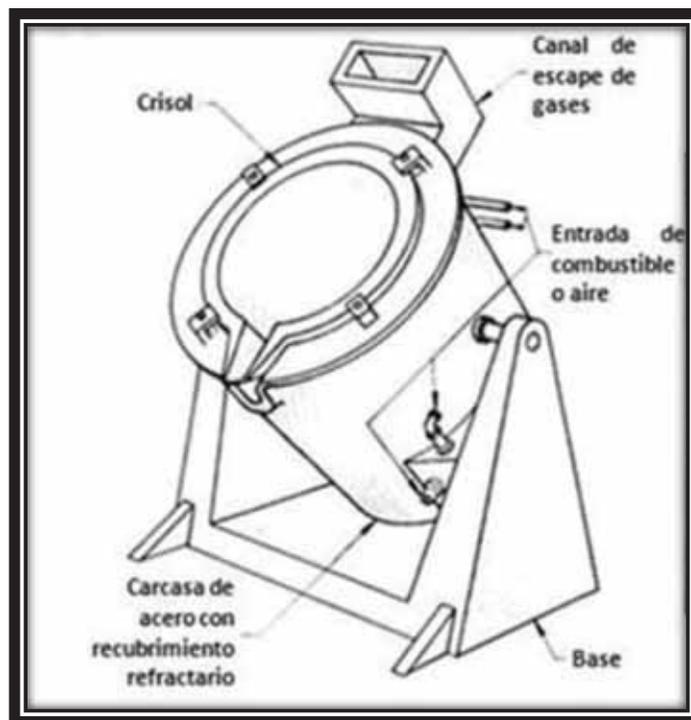
Son hornos que poseen un sistema de basculación. Este tipo de horno ofrece la posibilidad de retirar el metal fundido con mayor facilidad sin el menester de exponer a operadores al calor procedente de la cámara del horno. No obstante, se necesita la fabricación de una base especial, lo bastante fuerte para resistir el peso del crisol y así mismo se requiere un sistema que permita el control de giro del horno (ASM International,1998, p 832).

Los hornos de crisol basculante son apropiados cuando las piezas fundidas requieren más metal del que pueden manipular fácilmente los hornos de crisol estacionarios.

El horno de crisol basculante se muestra en la figura 2.2.

Figura 2. 2

Horno de crisol basculante



Nota. Tomado de *ASM handbook:Materials Park* (p 832), por ASM International.(2008):ASM International

2.5.Refractarios

Los refractarios son minerales oxidados y no oxidados, simples o compuestos que pueden obtenerse natural o artificialmente, cuya principal característica es soportar temperaturas muy altas, superiores a las que resisten los metales, sin fundirse y resistir esta condición, así mismo estos materiales soportan cualquier deformación o ataque que provenga del entorno al que están

expuestos, siempre y cuando se encuentren dentro de los límites de temperatura establecidos (Calle,2005,p 1).

Los refractarios son conocidos en el mundo como “el soldado desconocido de la industria” debido a que nadie les presta mayor atención en el desarrollo de procesos industriales, ni en la operación de procesos a altas temperaturas, Sin embargo, su importancia radica en que los hornos que se emplean para fundir los metales tienen impensablemente que ser revestidos con los materiales refractarios para llevar a cabo su debida protección.

En el pasado los refractarios fueron considerados como materiales crudos y tradicionales, hoy en día, estos son considerados como productos altamente complejos y extremadamente sofisticados, cuya microestructura es muy dinámica debido a que se va modificando constantemente a altas temperaturas durante todo su tiempo de vida en operación (Calle,2005, p 31).

2.5.1. Clasificación de Refractarios

Los refractarios se clasifican en base a su composición química, métodos de fabricación o forma física.

2.5.1.1. Clasificación basada en la composición química

Los refractarios se clasifican en base a su comportamiento químico, es decir su reacción al tipo de escorias, los refractarios son de tres clases: ácido, básico y neutro (Bhatia,2011, p 9).

2.5.1.1.1. Refractarios ácidos

Son aquellos que son atacados por escorias básicas (álcalis), estos se usan en áreas donde la escoria y la atmosfera son ácidas, algunos ejemplos son:

- Sílice (SiO_2)
- Circonita (ZrO_2)

2.5.1.1.2. *Refractarios básicos*

Son aquellas que son atacadas por escorias acidas, pero permaneces estables a escorias alcalinas, polvos, humos y a temperaturas elevadas, esto debido a que no reaccionan con las escorias alcalinas (Bhatia,2011, p 10).

Estos refractarios son de considerable importancia para los revestimientos de hornos, donde el medio ambiente es alcalino, por ejemplo, operaciones metalúrgicas no ferrosas.

Entre los refractarios básicos más importantes tenemos:

- Magnesita (MgO)-magnesita caustica, sinterizada y fundida
- Dolomita (CaO* MgO) – dolomita sinterizada y fundida
- Cromita

2.5.1.1.3. *Refractarios neutrales*

Son químicamente estables tanto en ambientes ácidos como básicos, estos se utilizan en áreas donde la escoria puede ser acida o básica, algunos ejemplos de estos materiales son:

- Grafito de carbono (mas inerte)
- Cromitas (Cr_2O_3)
- Alúmina

El grafito es el menos reactivo y se usa ampliamente en hornos metalúrgicos donde se puede controlar el proceso de oxidación (Bhatia,2011, p 9).

2.5.1.2. *Clasificación basada en el método de fabricación*

Los refractarios se pueden fabricar en cualquiera de los siguientes métodos.

- Proceso de prensado en seco
- Fusionada
- Mano moldeada
- Formado (normal, cocido o unido químicamente)
- Sin forma (monolítica; plásticos, masa de apisonamiento, moldeable, pulverización)

2.5.1.3. Clasificación basada en la forma física

Según su forma física se clasifican en refractarios con forma y sin forma, el primero se conoce como ladrillos refractarios y el segundo como refractarios monolíticos.

2.5.1.3.1. Refractarios con forma

Son aquellos que tienen una forma fija cuando se entregan al usuario, estos son los llamados ladrillos refractarios, los mismos que se pueden dividir en dos: forma estándar y forma especial.

Los ladrillos de forma estándar tienen dimensiones que se ajustan a la mayoría de los fabricantes de los refractarios y generalmente son aplicables a hornos del mismo tipo, usualmente se prensan a máquina por lo cual poseen una alta uniformidad en sus propiedades (Bhatia,2011, p 10).

Los ladrillos de formas especiales están hechos específicamente para hornos particulares y hornos, este puede no ser aplicable a otros hornos, se moldean a mano por lo que se espera una ligera variación en sus propiedades.

2.5.1.3.2. Refractarios sin forma

Estos refractarios no tienen forma definida, solo se les puede dar forma después de la aplicación, lo cual forma un revestimiento sin juntas, son más conocidos como refractarios monolíticos, entre ellos tenemos: refractarios plásticos, mezcla de apisonamiento, moldeables, mezcla de pistola (Bhatia,2011, p 11).

2.5.2. Tipos de Refractarios

Los refractarios se clasifican en tipos densos o aislantes (Bhatia,2011, p 13).

2.5.2.1.Refractarios densos

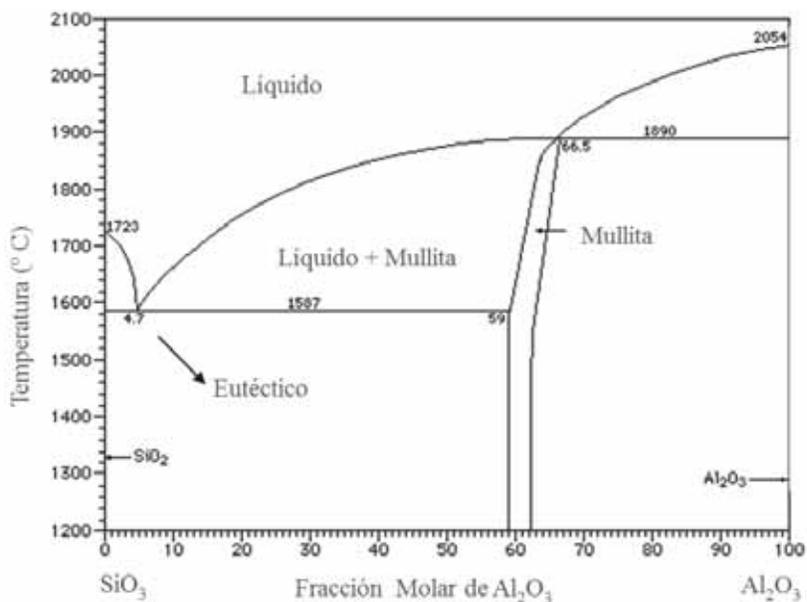
Son de alta densidad y excelente resistencia en entornos operativos desafiantes, como escorias con diferentes composiciones químicas humos, polvos y gases. Dentro de esta categoría se encuentran.

- **Ladrillos de Arcilla Refractaria**

Estos ladrillos están compuestos en mayor parte por silicatos de aluminio hidratados y otros minerales en menor porción, las composiciones usuales varían entre $SiO_2 < 78\%$ y $Al_2O_3 < 44\%$, estos materiales comprenden aproximadamente un 75% de la producción de refractarios, este tipo de ladrillos es el menos costoso de todos y posee una gran variedad de aplicaciones, por lo cual suele utilizarse en la industria ferrosa y no ferrosa (Bhatia,2011, p 12).

Figura 2. 3

Composición del ladrillo refractario de arcilla



Nota. Recuperado “*Materiales Refractarios y Cerámicos*”, de Verdeja.L.F, Sancho.J.S, Ballester. A . P 178

Considerando lo descrito con anterioridad estos ladrillos fueron seleccionados para el presente trabajo, cuyos principales beneficios son: su alto punto de fusión y refractariedad, buena resistencia al choque térmico y descascarillado, alta resistencia al ataque de los gases productos de combustión y fundentes, capacidad de expansión térmica para soportar acciones mecánicas a las cuales estará sometido en la operación, en la figura 2.3 se muestra un diagrama binario, el cual representa el porcentaje en peso de cada sustancia $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, en función a la temperatura, a la cual este expuesta el material.

Tabla 2. 3

Composición Química de Ladrillos Refractarios

Ladrillos	% SiO_2	% Al_2O_3	Otros const.	PCE °C
Super Duty	49-53	40-44	5-7	1750-1760
High Duty	50-80	35-40	5-9	1690-1750
Medium Duty	60-70	26-36	5-9	1635-1690
Low Duty	60-70	23-33	6-10	1520-1595
Semi- silica	65-80	18-30	3-8	1620-1680

Nota. Recuperado de “Resumen de materiales refractarios”, de Bhatia.A,2011,p 14,PDHonline

“Según la ASTM las categorías estándar de ladrillos de arcilla refractaria son: superduty, high-duty,médium-duty, low-duty y semi-silica , el intervalo de sus composiciones químicas se presentan en la tabla 2.3. estas categorías representan las temperaturas que pueden soportar sin perder sus propiedades de acuerdo a la prueba del cono pirómetro equivalente (PCE)” (Bhatia,2011, p 12).

- **Refractarios con alto contenido de alúmina**

Estos refractarios están constituidos por óxido de aluminio y trazas de otros materiales, la alúmina posee una excelente dureza y es uno de los óxidos químicamente más estables, así mismo ofrece un alto soporte al descascarillado y resistencia mecánica. Este compuesto es insoluble en sustancias como el agua, vapor sobrecalentado, en la mayoría de ácidos y álcalis inorgánicos (Bhatia,2011, p 14).

Son más refractarios que los materiales de arcilla y sus propiedades cambian en base a su contenido de alúmina (Al_2O_3), pudiendo resistir entre $1500^{\circ}C$ y $1850^{\circ}C$ (Calle,2005, p 32).

La ASTM clasifica a estos ladrillos en función a la cantidad de alúmina que estos contienen.

- Ladrillos de mullita

Estos ladrillos ofrecen una gran estabilidad volumétrica y resistencia a altas temperaturas, están compuestas por alúmina y sílice, en un porcentaje de 72% y 28% respectivamente, la utilización de estos materiales es recomendado para techos de altos hornos y hornos eléctricos (Bhatia,2011, p 14).

- Ladrillos de corindón

Estos refractarios están constituidos por 99% de alúmina y constan de una sola fase policristalina, se justifica su uso, cuando se requiere una gran estabilidad y resistencia a temperaturas muy altas ($1850 - 1900^{\circ}C$).

- **Ladrillos de sílice**

Es un material refractario que posee 93% de sílice, la singular propiedad que la sílice le proporciona a este ladrillo es su gran resistencia mecánica, cuando este está sometido a temperaturas próximas a su punto de fusión, no obstante, posee un punto en contra, el cual es su predisposición a descascararse cuando es sometido al enfriamiento por debajo de los $650^{\circ}C$, por

tanto, no son recomendados para procesos en los que se requiere que el horno llegue a la temperatura ambiente luego de haber alcanzado altas temperaturas en operación normal (Bhatia,2011, p 15).

La tecnología de elaboración de estos ladrillos es muy especial y costosa, se tiene mucho cuidado en el control de su fabricación para mantener su calidad, la temperatura máxima de operación es de 1700°C (Calle,2005, p 31).

- **Magnesita**

Estos materiales son químicamente básicos, están constituidos por al menos 85% de óxido de magnesio, estos refractarios están elaborados de magnesita ($MgCO_3$) y sílice (SiO_2), los mismos que se encuentran en la naturaleza.

Su principal beneficio consiste en la capacidad de soportar escorias básicas, estos materiales conforman el grupo más considerable de refractarios usados en la fabricación de acero en condiciones básicas (Bhatia,2011, p 15).

- **Dolomita**

La dolomita refractaria (CaO-MgO) se puede obtener al someter a altas temperaturas a la dolomita natural de doble carbono ($CaCO_3 - MgCO_3$), es posible que la dolomita de alta pureza supere el 97% de CaO + MgO.

Estos refractarios poseen gran resistencia al ataque químico con álcalis y al choque térmico, por lo que son materiales recomendados para hornos klin de cementeras (Bhatia,2011, p 15).

- **Refractarios de cromita**

Se debe hacer una comparación entre refractarios de cromo-magnesita y refractarios magnesita-cromo.

La composición de los refractarios cromo-magnesita generalmente varían entre 15-35% de ($Cr_2 O_3$) y 42-50% (MgO). Se utilizan para construir rutas críticas de hornos de alta temperatura, estos materiales pueden soportar escorias, gases corrosivos y tienen alta refractariedad.

Mientras que la composición de los refractarios magnesita-cromo contienen al menos 60% de (MgO) y entre 8-18% de ($Cr_2 O_3$). Son adecuados para el servicio a temperaturas muy altas y en contacto con escorias muy básicas se utilizan en la fundición de acero, generalmente tienen una mejor resistencia al descascaramiento que el refractario de cromo – magnesita (Bhatia,2011, p 16).

- **Refractarios de circonio**

El dióxido de circonio (ZrO_2) es un material polimórfico. Es fundamental estabilizarlo antes de su aplicación como material refractario, este se logra incorporando pequeñas cantidades de calcio, magnesio y óxido de cerio.

La conductividad térmica de los refractarios de circonio es mucho menor que la de los demás materiales por lo cual se usan como aislantes ya que presenta pérdidas térmicas muy bajas y no reacciona fácilmente con los metales líquidos, es particularmente útil para hacer crisoles refractarios (Bhatia,2011, p 17).

- **Refractarios monolíticos**

Estos refractarios poseen el beneficio de ser usados directamente en el estado que se abastecen, como es el caso de las masas plásticas, o bien posterior al aditamento de un líquido adecuado como es el caso de cementos refractarios u hormigones,

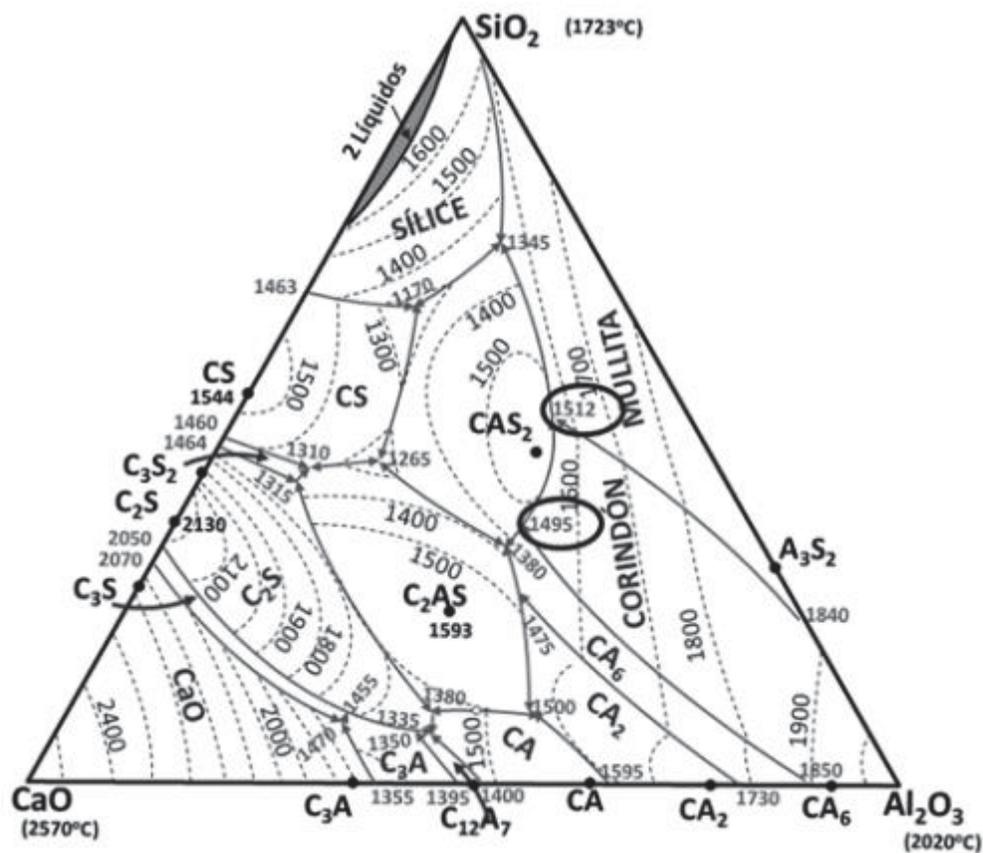
La constitución de un refractario monolítico varía según su uso final, pero siempre están presentes en mayor o menor proporción los óxidos de (Al_2O_3), (CaO) y (SiO_2), con otros

constituyentes como impurezas de (TiO_2), (Fe_2O_3), (Cr_2O_3) y otros aditivos que pueden cambiar las propiedades físicas del refractario dependiendo de su uso.

La cantidad de cemento usado, así como el tipo de agregado y matriz determinan las propiedades de estos refractarios así mismo estas variables definen la cantidad de agua necesaria (Bhatia,2011, p 18).

Figura 2. 4

Diagrama ternario de compuestos del cemento refractario



Nota. Recuperado de "boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio", de Pena.P, De Aza.A, Caballero.A, De Aza.S (2011) Madrid, España: p 24

Algunos tipos refractarios monolíticos son:

- Arcillas refractarias
- Refractarios plásticos
- Mezclas para compactado
- Recubrimientos refractarios
- Mortero refractario
- Cemento refractario

El cemento refractario usado en el presente trabajo está considerado dentro del grupo de refractarios monolíticos compuesto por Al_2O_3 - SiO_2 - CaO , el cual posee como características principales: su fácil instalación, buena resistencia a la abrasión, resistente a la acción de escorias básicas y reducido tiempo de fraguado. En la figura 3.4, se muestra el diagrama ternario del cemento refractario el cual expresa el porcentaje relativo de los tres componentes que conforman el refractario.

- **Refractarios aislantes**

Estos materiales de baja conductividad térmica disminuyen en gran manera la pérdida de calor a través de las paredes de los hornos, al instalar capas de refractarios aislantes entre la superficie interna caliente de un horno y la superficie externa, logrando que esta última se mantenga a baja temperatura.

La considerable presencia de aire dentro de los poros del material refractario impide una alta transferencia de calor, siendo esta la razón de su baja conductividad térmica, usualmente estos refractarios son muy ligeros.

Los refractarios aislantes poseen baja resistencia mecánica, debido al alto contenido de poros que poseen, por lo cual deben manejarse con sumo cuidado, así mismo estos materiales pueden

ser penetrados fácilmente por gases, humos y líquidos por lo que no es recomendado el empleo de estos en hornos en donde es posible que tengan contacto directo con ellos.

Entre los refractarios aislantes se pueden encontrar

- Ladrillos aislantes
- Cementos aislantes
- Fibra cerámica
- Silicatos de calcio
- Recubrimientos cerámicos

Debe tomarse en consideración que estar expuesto a temperaturas muy altas afecta al material aislante de manera negativa; sin embargo, la temperatura a la cual el refractario aislante comienza a deteriorarse cambia considerablemente en base al tipo del material seleccionado, por tanto, al seleccionar un material aislante se requiere tener en cuenta la temperatura de operación (Bhatia,2011, p 18).

2.6.Combustión

La combustión es la reacción química exotérmica de una sustancia llamada combustible, con el oxígeno que se define como comburente. Como resultado de la reacción de combustión se forma una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor, la cual se conoce como llama (Brizuela, 2010, p 12).

Para que la combustión suceda deben de coexistir tres factores: combustible, comburente y energía de activación, estos tres factores se representan en la figura 2.5, la combustión no puede tener lugar si falta alguno de los vértices del triángulo de combustión (San Jose,2001, p 3).

Los procesos de combustión se pueden clasificar en:

- Completa.
- Incompleta.
- Teórica o estequiometria.

- Con exceso de aire.
- Con deficiencia de aire.

Figura 2. 5

Triángulo de Combustión

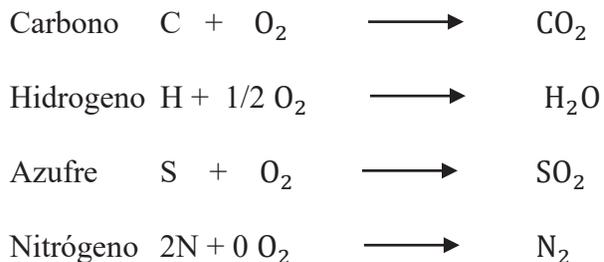


Nota. Tomado de *teoría de la combustión y combustibles* (p 3), San Jose,R,G.(2011).trabajo de grado de maestría.

2.6.1. Completa.

Combustión completa es cuando las sustancias que constituyen el combustible se consumen hasta el máximo grado de oxidación. Por consiguiente, no se hallarán sustancias combustibles en los humos.

En los productos de combustión es posible encontrar:



En este tipo de combustión el nitrógeno es considerado como masa inerte, si bien cuando los humos se encuentran a altas temperaturas se puede formar óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones, del orden de 0,01% (San Jose,2001, p 4).

2.6.2. Incompleta.

Es cuando las sustancias que constituyen el combustible no se oxidan por completo, por lo que se forman sustancias que aún pueden continuar oxidándose los llamados “inquemados”.

La presencia de estos advierte que la combustión se está realizando de manera incompleta, las más importantes son monóxido de carbono e hidrógeno. Otras pueden ser C_mH_m , H_2S y Carbono, estas sustancias son los contaminantes usuales que escapan al ambiente en los gases de combustión (San Jose, 2001, p 4).

2.6.3. Estequiometrica.

Es la combustión completa realizada con la porción exacta de oxígeno requerido teóricamente para lograr la oxidación total del combustible sin la producción de inquemados. Por consiguiente, no se encuentra oxígeno en los gases que escapan al ambiente, ya que se consumió totalmente en la combustión.

Esta combustión se llama teórica, ya que en la práctica continuamente se producen inquemados, aunque sea en mínima cantidad.

La combustión estequiometrica permite determinar los parámetros representativos de los combustibles (San Jose, 2001, p 4).

2.6.4. Con exceso de Aire.

Combustión que se realiza con una cantidad de aire superior a la correspondiente en la estequiometrica. En esta combustión se da la existencia de oxígeno en los gases que se escapan al ambiente.

Si bien la integración de aire en exceso permite asegurar la combustión completa y así evitar la formación de inquemados, trae consigo la pérdida de calor en los productos de combustión, aminorando la temperatura de combustión, la longitud y eficiencia de llama (San Jose,2001, p 6).

2.6.5. Con deficiencia de Aire.

En este tipo de combustión el oxígeno disponible es menor que el requerido para que se lleve a cabo la oxidación del combustible, por lo tanto, esto provoca la producción de inquemados como el monóxido de carbono (San Jose,2001, p 5).

2.7.Combustibles

El combustible es una sustancia utilizada para producir calor, conforme sea el estado físico de esas sustancias, los combustibles se pueden presentar en estado sólido, líquido y gaseoso.

El poder calorífico es la propiedad elemental de las sustancias combustibles, es decir la cantidad de calor que puede producirse por la combustión de la unidad de combustible (1 Kg, 1 m^3 , etc.).

Para iniciar la combustión de un combustible es imperioso que alcance una temperatura determinada, conocida como temperatura de ignición (Marquez,2005, p 1).

Tenemos como propiedades de los combustibles:

2.7.1. Poder Calorífico.

Es la cantidad de calor generado por la combustión completa de una unidad de masa del material considerado como combustible (San Jose,2001, p 7).

Existen dos tipos de poder calorífico: el poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior (PCS).

En caso que el combustible contenga Hidrogeno, los poderes caloríficos serian:

Poder calorífico inferior: es el poder calorífico neto. Es el calor desprendido en la combustión de 1 kg de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión no condensa.

Poder calorífico superior: es el poder calorífico total. Es la cantidad de calor desprendido en la combustión de 1kg de combustible cuando se incluye el calor de condensación del agua que se desprende en la combustión (San Jose,2001, p 7).

Cuando el combustible no contiene Hidrogeno, entonces no es posible la formación de agua y esto supone que $PCS=PCI$

Es posible definir el poder calorífico en base al porcentaje de agua e hidrogeno presente en la composición del combustible, mediante la ecuación 2.1:

$$PCI=PCS - (6a + 54H) \quad \text{(Ecuación 2.1)}$$

Donde:

a = % H_2O en el combustible

H = % de H_2 en el combustible

Ambos porcentajes expresados en peso

Para definir el poder calorífico de una sustancia es posible hacerlo de manera directa o teóricamente, normalmente se expresa en las siguientes unidades: Kcal/Kg, Kcal/m³, Kcal/mol, Kcal/l (textos científicos,2020).

- **Directamente:** mediante el uso del calorímetro y la utilización de una bomba calorimétrica, tomando en consideración que el calor cedido va a ser igual al calor absorbido.
- **Teóricamente:** aplicando la ley de HESS (calores de reacción en una reacción química) Ecuación 2.2.

$$Q_{react} = \Delta H_{react} - \Delta H_{productos} \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

Donde:

Q_{react} = Calor de reacción

ΔH_{react} = Variación de entalpia de reactivos

$\Delta H_{productos}$ = Variación de entalpia de productos

2.7.1.1. Temperatura de combustión.

“La temperatura de combustión va a aumentar con el poder calorífico y con la cantidad de residuos y productos que se originen en la combustión” (Vera,2020,p 1).

2.7.1.2. Residuos de combustión.

Es la sustancia que no se consume en un combustible, existen dos clases según el estado en la que se encuentren.

- **Gaseosos:** Son los gases que se desprenden en la combustión de los combustibles.
- **Sólidos:** Son escorias o cenizas que son dañinas por su cantidad como por su naturaleza, están constituidas por la fracción orgánica de un combustible.
 - **Por su naturaleza:** debido a que pueden contaminar o atacar el producto de fusión.
 - **Por su cantidad:** porque dificulta el normal desarrollo de la combustión, se necesita limpiar con mayor frecuencia la cámara de combustión.

2.7.2. Clasificación de los Combustibles.

Los combustibles convencionales pueden clasificarse según su grado de preparación o dependiendo de la fase química en la que se presentan, ver tabla 2.4.

Según su grado de preparación se clasifican en combustibles naturales o manufacturados, los combustibles naturales se usan directamente tal y como se encuentran en la naturaleza, en cambio los combustibles manufacturados tienen que ser sometidos a complicados tratamientos o hasta preparación química especial.

Según la fase física en la que se presentan los combustibles se clasifican en:

- Sólidos
- Líquidos
- Gaseosos

El estado físico en el cual se encuentra el combustible es un factor elemental en el diseño de dispositivos de combustión, así como en el de las instalaciones de preparación y manejo del combustible. (San Jose,2001, p 12).

En este caso nos enfocaremos en los combustibles clasificados según su estado físico:

2.7.2.1. Combustibles sólidos.

Estos están formados por C, H_2, O_2, S, H_2O y cenizas, siendo solo combustibles el C, O_2, H_2 y el S , así mismo entre combustibles sólidos se tienen al carbón (con sus variantes), la leña (biomasa), los residuos sólidos, etc (Marquez,2005, p 2).

2.7.2.2. Combustibles líquidos.

Los combustibles líquidos pueden ser minerales o no minerales. Los minerales son conseguidos mediante nuevas tecnologías como la hidrogenación o refinación del petróleo. Estos combustibles son constituidos por hidrocarburos, siendo el gasoil C_8H_{17} y la gasolina C_8H_{18} los más usados.

Tabla 2. 4*Clasificación de los Combustibles*

Tipo	Combustibles naturales	Combustibles artificiales
Sólido	Antracitas	Alquitran de carbón
	Biomasa (madera, residuos vegetales)	Briquetas y aglomerados
	Hullas	Carbón molido/pulverizado
	Lignios	Carbón vegetal
	Turbas	Coque y menudos de coque Corteza, aserrín
Líquido	Crudo de petróleo	Fueloleos n°1, n°2, y BIA
		Gasolina
		Gasoleos A, B y C
		Keroseno
Gaseoso	Gas natural	Gas de horno de coque y alto
		Gas pobre, gas de agua
		Gas de refinería
		Gas de gasógeno
		Gas de regenerados
		G.L.P (butano, propano)

Nota.: Recuperado de "Generación de calor", de Vicente.P,(2011),p 3.
http://Salvadorcobo.files.Wordpress.com/2011/03/lección_gc_combustion.pdf.

Los alcoholes y los aceites vegetales son combustibles líquidos no minerales. Entre los alcoholes tenemos el metílico, etílico, etc. Mientras que los aceites vegetales están constituidos de C, H_2 , O_2 y N_2 (Monzales,2020).

2.7.2.3. Combustibles gaseosos.

Son los combustibles que se encuentra en estado gaseoso, los mismos que forman una mezcla homogénea con el aire, usualmente son gases obtenidos como subproductos o mediante la tecnología de gasificación que permite obtener combustibles gaseosos a partir del carbón en su forma sólida (Marquez,2005, p 3-4).

Según el proceso de fabricación, los combustibles gaseosos pueden ser: gas natural, gas de gasógeno, gas de subproducto (Monzales,2020).

2.8. Gas Natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos gaseosos formados por metano (CH_4) en proporción superior al 70% , y otros hidrocarburos en menores proporciones, esta mezcla usualmente contiene impurezas tales como vapor de agua, sulfuro de hidrogeno, dióxido de carbono, nitrógeno y helio, ver tabla 2.4 (Castillo,2020,p 29).

El gas se localiza en el subsuelo, encerrado en cavidades porosas de ciertas rocas, en estructuras geológicas conocidas como yacimientos, los mismos pueden ser de tres clases:

- a) **Yacimientos de gas asociado:** el principal producto es el petróleo. El gas asociado es sencillamente gas encontrado con el petróleo.
- b) **Yacimientos de gas seco o libre:** el principal producto o único es el gas mismo. El gas no está asociado al petróleo.

- c) **Yacimientos de gas húmedo:** el gas se encuentra mezclado con hidrocarburos líquidos a los que se denominan condensados. Estos acompañantes del metano se encuentran en distintas proporciones, pudiendo llegar a tener tanta importancia en el yacimiento como el propio gas (Castillo,2020,p 30).

Tabla 2. 5

Composición del Gas Natural en el Perú

Componente	Formula	Composición (%)	Estado natural
Metano	CH_4	95.08	Gas
Etano	C_2H_6	2.14	Gas
Propano	C_3H_8	0.29	Gas licuable
Butano	C_4H_{10}	0.11	Gas licuable
Pentano	C_5H_{12}	0.04	Líquido
Hexano	C_6H_{14}	0.01	Líquido
Nitrógeno	N_2	1.94	Gas
Gas carbónico	CO_2	0.39	Gas

Nota. Recuperado de *ministerio de energía y minas (17 de diciembre de 2020). El gas natural.*
http://www.minen.gob.pe/minem/archivos/gas_natural.pdf

2.8.1. Características termodinámicas.

Las propiedades del gas natural en base a la composición de la tabla 2.5 se muestran en la tabla 2.6..

Tabla 2. 6*Propiedades del gas natural*

Propiedad	Valor
Densidad relativa	0.65 g/cm ³
Poder calorífico	9,032 kcal/m ³
C_p (presión cte)	8,57 cal/mol °C
C_v (volumen cte)	6,56 cal/mol °C

Nota. Recuperado de *ministerio de energía y minas (17 de diciembre de 2020). El gas natural.*
http://www.minen.gob.pe/minem/archivos/gas_natural.pdf

2.8.2. Ventajas y desventajas del uso del gas natural.***2.8.2.1. Ventajas del uso del gas natural.***

- a) **Limpieza.** – Es el combustible gaseoso más limpio y es menos contaminante que los combustibles sólidos y líquidos, debido a que no emite partículas sólidas en los gases de la combustión, generando menos impurezas, menos CO_2 por lo que aporta en la reducción del efecto invernadero (minem,2020,p 7).
- b) **Seguridad.** – En comparación a otros gases combustibles, es menos denso que el aire, por lo que de generarse alguna fuga se evapora rápidamente en el medio ambiente, solo es necesario contar con una buena ventilación.
- c) **Economía.** – Es el combustible gaseoso de suministro continuo más económico (minem,2020,p 7).

2.8.2.2. Desventajas del uso del gas natural.

- a) El gas natural es un combustible no renovable.
- b) No tiene olor, por lo que en el supuesto de una fuga no se puede detectar con facilidad (Sat ferroli,2020).

Tabla 2. 7*Características del gas natural frente al GLP*

Gas natural (GN)	Gas licuado de petróleo (GLP)
Se suministra de manera continua a través de tuberías o redes de ductos, debido a que ofrece seguridad y ahorro económico en el transporte de este hidrocarburo.	Se emplea de forma discontinua, por lo cual es reservado en estado líquido a presión en balones, para su posterior abastecimiento a los consumidores.
En caso de fuga se dispersa rápidamente a el medio ambiente, debido a que es menos denso que el aire.	Es casi tres veces más denso que el aire por lo que ante cualquier fuga tiende a acumularse en las partes bajas de los ambientes cerrados y no se dispersa más que en grandes cantidades de aire.
Disminuye la contaminación, ya que experimenta una combustión total por lo cual no existe gas expulsado al ambiente.	Contiene mayor porcentaje de azufre, por lo cual es más contaminante.
Este hidrocarburo es el más seguro debido a que para estallar requiere llegar a una temperatura de 537 °C.	Requiere alcanzar los 458 °C de temperatura, para estallar, lo cual hace que posea peligro de explosión mayor.

Nota. Recuperado de osinergmin.(22 de diciembre de 2020).diferencias entre el gas natural y el GLP.<http://www2.osinerg.gob.pe/pagina%20osinergmin/gas%20natural>.

2.8.3. El Gas Natural Frente al GLP

El gas natural frente al GLP, ofrece las ventajas y desventajas que se presentan en la tabla 2.7.

2.8.4. Gas Natural para la Industria.

El gas natural es usado en las industrias debido a la diversidad de sus usos, además de sus beneficios económicos y ecológicos, por lo cual reemplaza aventajadamente a combustibles convencionales como: diésel, gas licuado de petróleo, carbón, kerosene y leña. Como se muestra en la tabla 2.8 (portafolio,2020).

El requerimiento básico de todo proceso industrial usando gas natural consiste en alcanzar el nivel de temperatura deseado en el tiempo más corto posible y con el mínimo consumo de gas natural, obteniendo así las transformaciones físico-químicas deseadas del material procesado (Borrás,1982, p 43).

Los procesos de producción que utilizan hornos, calderos, crisoles, autoclaves, secadoras y turbinas pueden usar el gas natural como combustible, las industrias en las que usualmente se usa este combustible son las siguientes (osinergmin,2015, p 22):

- Cerámica
- Metalurgia
- Vidrio
- Textil
- Química
- Cemento
- Alimentos
- Petroquímica
- Generación de calor

2.8.4.1. Gas natural en la industria metalúrgica.

El gas natural posee una gran variedad de utilidades en este sector de la industria, sus propiedades lo hacen recomendable para todos los procesos de calentamiento de metales, tanto en la fusión así como en el recalentamiento y tratamientos térmicos (osinergmin,2015, p 25).

Tabla 2. 8*Principales usos del gas natural por sector productivo*

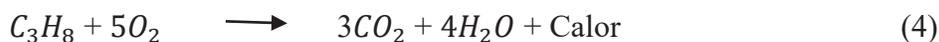
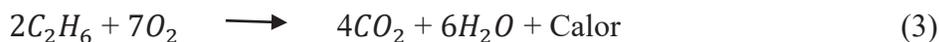
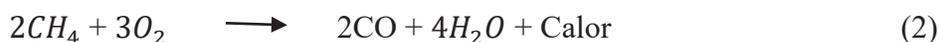
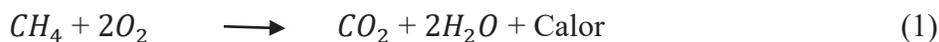
Sector	combustible que puede sustituir	aplicación / proceso
Industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Carbón • Fuel oil • Gas licuado • Kerosene • Leña 	<ul style="list-style-type: none"> • Fundición de metales • Hornos de fusión • Secado • Industria del cemento • Industria de alimentos • Generación de vapor • Tratamientos térmicos • Temple y recocido de metales • Cogeneración • Cámaras de combustión • Producción petroquímicos • Sistema de calefacción
Generación eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Carbón • Fuel oil 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrales térmicas • Cogeneración eléctrica
Comercial	<ul style="list-style-type: none"> • Carbón • Gas licuado 	<ul style="list-style-type: none"> • Aire acondicionado • Cocción/preparación de alimentos • Agua caliente • Aire acondicionado
Residencial	<ul style="list-style-type: none"> • Gas ciudad • Gas licuado • Kerosene • Leña 	<ul style="list-style-type: none"> • Cocina • Calefacción • Agua caliente • Aire acondicionado
Transporte	<ul style="list-style-type: none"> • Gasolina • Diésel 	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículos de transporte

Nota. Recuperado de ministerio de energía y minas. (27 de diciembre de 2020). *Usos del gas natural*. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/gasnatural.pdf>

2.8.5. Combustión del Gas Natural.

Para que esta combustión ocurra, es imprescindible que el gas natural y el oxígeno del aire entren en contacto en proporciones adecuadas. Asimismo, esta mezcla debe alcanzar la temperatura de ignición del gas natural 650 -750 °C (Gas Extremadura,2020).

Es una reacción de oxidación que viene acompañada de desprendimiento de calor, en base a la composición del gas natural presentada en la tabla 2.5. Se llevan a cabo las siguientes reacciones lineales



El nitrógeno presente en el gas natural actúa como inerte en el proceso de combustión, ya que la producción de óxidos de nitrógeno no afecta la cantidad de aire requerido para la combustión ni la cantidad de gases de combustión producidos. (villafior et al,2008,p 58).

No obstante, desde la perspectiva ambiental es primordial estimar la producción de estos óxidos por la contaminación que provocan los mismos (villafior et al,2008,p 62).

Las variables de operación más significativas para el proceso de combustión del gas natural son:

- Temperatura del aire.
- Temperatura de gases de combustión.
- Exceso de aire usado en la combustión.

2.8.6. Temperatura Máxima de los Productos de Combustión

El componente principal para el estudio de esta combustión es el metano, principal constituyente del gas natural, y como oxidante el aire, constituido por oxígeno y nitrógeno como se muestra en la tabla 2.5.

La temperatura máxima a la que pueden llegar los productos de combustión es la denominada temperatura adiabática de llama del combustible. La que se logra si el total del calor generado durante el proceso se emplea íntegramente para calentar los productos, en el caso del gas natural es 1960°C. Para el cálculo de temperatura de llama adiabática, se debe cumplir la ecuación 2.3:

$$H_{\text{reactantes}} = H_{\text{productos}} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 2.3)$$

En la ecuación 2.3, $H_{\text{reactantes}}$ expresa la entalpía del combustible y del aire que forman parte del proceso de combustión. Cuando toda esta energía es utilizada para aumentar la temperatura de los gases productos de combustión, sin pérdidas de calor hacia el medio ambiente, los productos obtienen una entalpía $H_{\text{productos}}$ equivalente a la de los reactantes, de modo que, obtienen su máxima temperatura.

2.9. Calor Disponible y Eficiencia del Proceso

Los productos de combustión tienen una energía térmica acorde a su temperatura. Esta energía o calor disponible se expresa por Q_{disp} , que representa la porción de energía que puede ser transformada en energía útil, mientras más fríos salen los gases de combustión del proceso de calentamiento de una carga, más notable es el aprovechamiento de la energía térmica. El calor disponible se determina mediante la ecuación 2.4:

$$Q_{\text{disp}} = PCS - Q_{\text{gases}} \quad (\text{Ecuación N}^\circ 2.4)$$

Donde:

PCS : Poder calorífico superior del combustible

Qgases : Energía contenida en los gases de combustión

2.10. Quemadores

El quemador representa el núcleo de todo sistema de combustión industrial, por lo cual su diseño, montaje y funcionamiento son factores elementales para obtener el buen aprovechamiento del potencial calorífico del combustible (Miranda, 2002, p 110).

Todo quemador necesita cumplir 5 funciones en el proceso de combustión; estudiemos su conducta para el caso del gas natural:

- Agregar combustible en las condiciones adecuadas para su correcto encendido y combustión.
- Agregar parcial o totalmente, el aire con el oxígeno requerido para la combustión.
- Mezclar aire y combustible, proporcionando la energía cinética para conformar la llama que resulte adecuada a la cámara de combustión y el proceso.
- Encender y quemar la mezcla.
- Desplazar los productos de la combustión, cuando se trabaja con tiro forzado.

2.10.1. Clasificación de Quemadores.

Los quemadores se clasifican en:

- o Mezcla previa (aire y gas)
- o Alimentación separada aire y gas (sin mezcla previa)

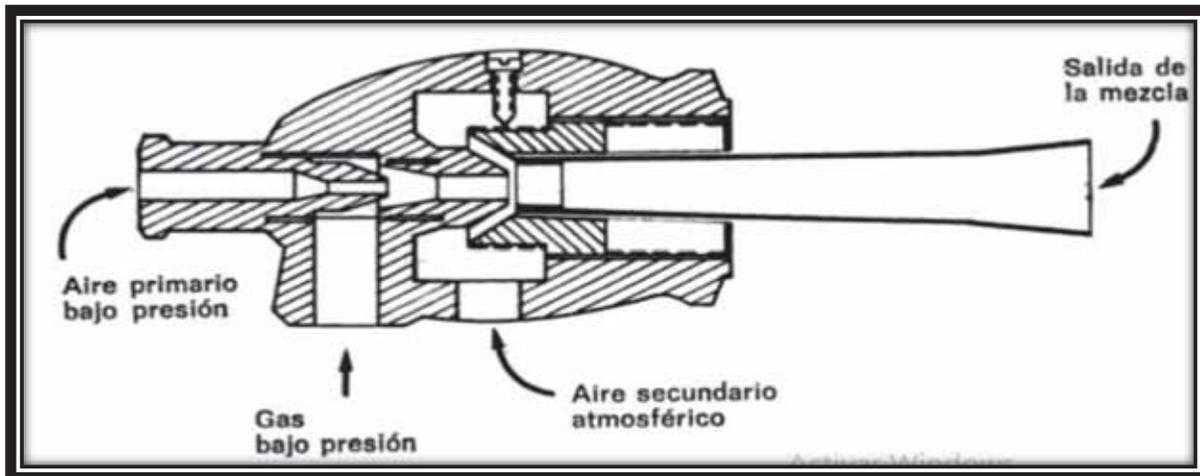
2.10.1.1. Quemadores de mezcla previa

Estos quemadores se caracterizan, por qué una porción (aire primario) o el total del aire requerido para la combustión completa, se combina con el gas a la entrada del quemador o antes del mismo (Borrás, 1982, p 135).

En caso sea necesario, se incorpora parte del aire (aire secundario), para que se dé lugar a una combustión completa, como se muestra en la figura 2.6.

Figura 2. 6

Quemador con mezcla previa



Nota. Tomado de *Gas natural características, distribución y aplicaciones industriales* (p 139), por E.Borrás, 1982, Editores técnicos asociados, S.A.

En los quemadores de pre mezcla la combustión se produce más rápidamente, necesiándose menos volumen de combustión que en los hornos que usan quemadores sin mezcla previa (Trinks, 1975, p 65).

Un quemador de mezcla previa se caracteriza por:

- Su potencia específica unitaria (relación de la potencia térmica a la sección del orificio de salida).
- El factor de aire de la pre mezcla (relación de aire primario respecto al aire teórico).

La estabilidad de la llama se ve afectada por dos fenómenos que se manifiestan de manera contraria.

- El retorno de la llama.
- El desprendimiento de la llama.

Como tipos de quemadores de mezcla previa se dividen en.

2.10.1.1.1. Quemadores de mezcla por inducción atmosférica

Estos quemadores son usados en aplicaciones domésticas, este tipo de quemadores son no recomendados para la combustión del gas natural, esto debido a que se requiere un arrastre 10 a 12 m^3 de aire por m^3 de gas para que se dé lugar a una combustión completa, este quemador solo ofrece 3 m^3 lo que lo hace insuficiente (Borrás,1982, p 139).

2.10.1.1.2. Quemadores de mezcla previa por aire inductor

En este tipo de quemadores la mezcla se realiza con un inyector de aire despresurizado a la presión atmosférica, La regulación de las cantidades de aire y gas se hace separadamente. Estos quemadores facilitan conseguir una proporción de aire bastante alta y una presión de la mezcla suprema al caso de quemadores de inducción atmosférica (Borrás,1982, p 141).

2.10.1.2. Quemadores de alimentación separada aire y gas

Son conocidos como quemadores sin mezcla previa, representan la gran mayoría de quemadores industriales como se muestra en la figura 2.7, pueden ser de dos tipos:

- Quemadores de llama blanca.
- Quemadores de llama de difusión en régimen turbulento.

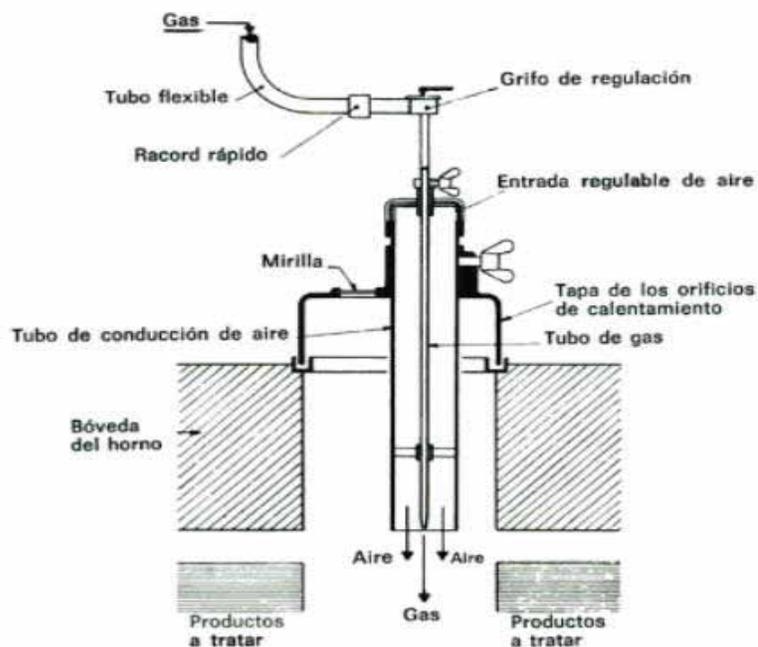
Los quemadores de llama blanca solían ser altamente usados en aplicaciones domésticas. A pesar de ello, se han ido reemplazando paulatinamente por boquillas aireadas, que son pequeños quemadores de inducción atmosférico (Borrás,1982, p 151).

Los quemadores de llama de difusión, son muy usados en los hornos industriales, están formados de un tubo de inyección de gas puro, con entrada parcial de aire frío en los contornos

del tubo, pero la mayor parte del aire de combustión es aire caliente que recorre el túnel del horno.

Figura 2. 7

Quemador sin mezcla previa



Nota. Tomado de *Gas natural características, distribución y aplicaciones industriales* (p 151), por E.Borrás, 1982, Editores técnicos asociados, S.A.

2.11. Transferencia de Calor

La transferencia de calor es una ciencia que busca explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica entre cuerpos que posean una diferencia de temperatura entre ellos, así mismo busca pronosticar la celeridad a la que se efectúa este intercambio bajo ciertas condiciones especiales (Holman, 1999, p 17).

Esta transferencia de calor se produce del cuerpo que posee la mayor temperatura hacia el de menor temperatura, este proceso para cuando ambos cuerpos poseen la misma temperatura.

Todas las formas de transferencia de calor necesitan la existencia de una desigualdad de temperatura y todos ellos se tienen lugar del cuerpo que posee la temperatura más alta hacia una el cuerpo que tiene la temperatura más baja (Cengel, 2007, p 17).

En seguida se da una breve descripción de los modos de transferencia de calor.

2.11.1. Conducción.

La conducción es la transferencia de calor de las partículas de mayor temperatura de una sustancia o cuerpo hacia las contiguas de menor temperatura como consecuencia de interacciones de esas partículas. La conducción puede suceder en sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción es debido a las colisiones y a la propagación de las moléculas durante su movimiento aleatorio y en los sólidos es debido a la combinación de los movimientos de las moléculas y a la conducción de energía por parte de los electrones libres (Cengel, 2007, p 17).

La velocidad de la conducción de calor por medio de un cuerpo depende de la forma geométrica de este, su espesor y el material del que esté formado, así como de la desigualdad de temperaturas a través de él (Cengel, 2007, p 18).

La transmisión de calor por conducción en los hornos industriales tiene lugar al dejar un material frío sobre una solera o crisol caliente. Si están en contacto dos piezas de un material sólido (no separados por una capa de aire u otro fluido), las superficies de contacto logran instantáneamente la misma temperatura, el cual se encuentra en el rango de temperaturas de los dos materiales en contacto.

La rapidez de conducción de calor a través de una pared o capa plana es equitativa a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, sin embargo, es

inversamente proporcional al espesor de capa (Cengel, 2007, p 18), se determina usando la ecuación 2.5:

$$Q = K \cdot A \frac{(t_1 - t_2)}{\Delta x} = - K \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

Donde:

Q : Rapidez de transferencia de calor

K : Conductividad térmica del material

A : Área de transferencia de calor

$t_1 - t_2$: Diferencia de temperatura uno a otro lado de la pared

El signo negativo de la ecuación 2.5 asegura que el cumplimiento del segundo principio de la termodinámica, es decir que el calor tendrá que fluir hacia abajo en la jerarquía de la temperatura (Holman, 1999, p 18).

“La conducción de calor a través de un cuerpo cilíndrico, de radio interior r_1 , radio exterior r_2 , longitud L y conductividad térmica K se muestra en la Figura 2.8 .Las dos superficies de la capa cilíndrica se conservan a las temperaturas constantes t_1 y t_2 . No hay producción de calor en la capa y la conductividad térmica se mantiene” (Cengel, 2007, p 150). Entonces la transferencia por conducción a través de cuerpos cilíndricos se puede determinar mediante la ecuación 2.6:

$$Q = 2\pi L K \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (\text{Ecuación 2.6})$$

La resistencia térmica de la capa cilíndrica en oposición a la conducción de calor o, sencillamente la resistencia a la conducción se determina mediante la ecuación 2.7 (Cengel, 2007, p 151).

$$R_{ter} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi \cdot k \cdot L} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde:

R_{ter} : Resistencia térmica

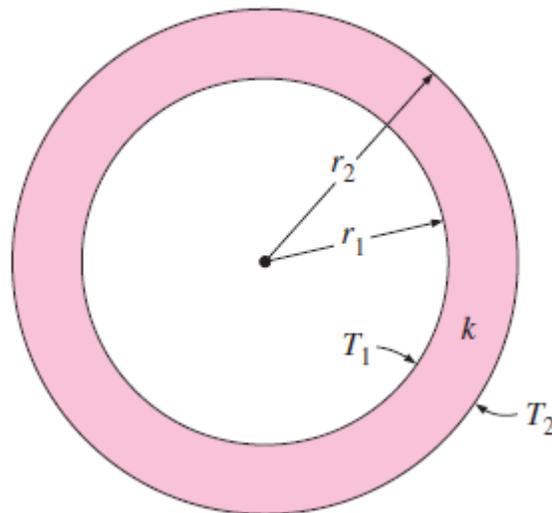
K : Conductividad térmica del material

L : Longitud de la capa cilíndrica

r_1 y r_2 : Radios interior y exterior de la capa cilíndrica

Figura 2. 8

Tubo cilíndrico con temperaturas de superficie interior y exterior



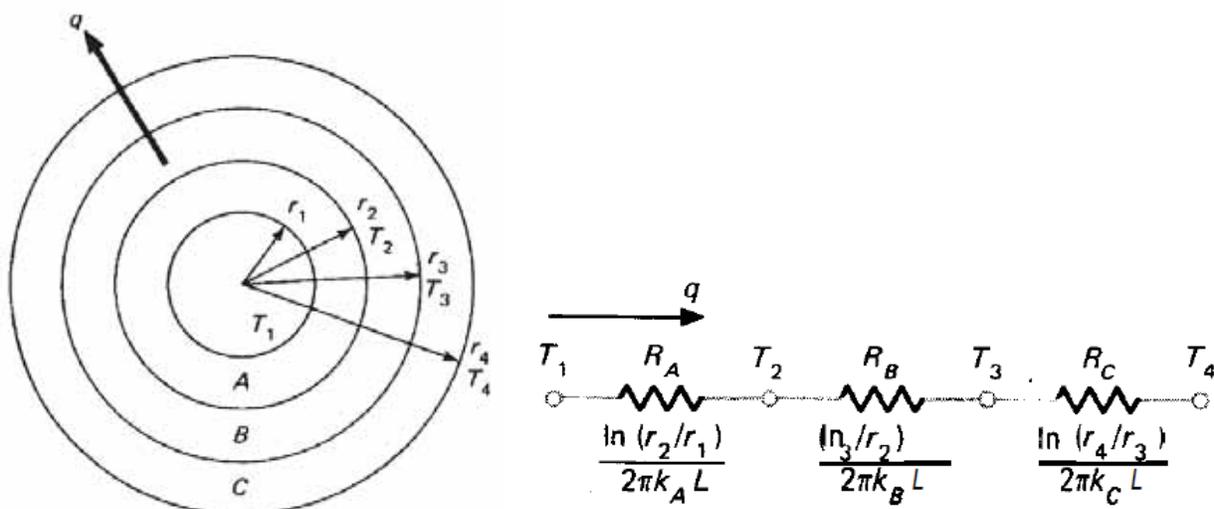
Nota. Tomado de *transferencia de calor*, (p 150), por Y.Cengel,(2007),McGraw-Hill interamericana

“El concepto de resistencia térmica puede emplearse con paredes cilíndricas multicapa de del mismo modo que en las paredes planas” (Holman, 1999, p 46). Para el sistema de tres capas que se muestra en la figura 2.9 la resistencia térmica, se determina mediante el uso de la ecuación 2.8.

$$Q = \frac{2\pi.L(t_1 - t_4)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_A} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_B} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_C}} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Figura 2. 9

Flujo de calor a través de secciones cilíndricas múltiples



Nota. Se incluye su análogo eléctrico, Tomado de *Trasferencia de calor* (p 46); por J.P. Holman; 1998, McGraw Hill Book Company, INC.

2.11.2. Convección.

“La convección es la forma de transferencia de energía que tiene lugar entre una superficie sólida y el líquido o gas contiguo que están en movimiento y abarca los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más veloz sea el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección” (Cengel, 2007, p 25).

Cuando no existe algún movimiento masivo de fluido la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido contiguo es por conducción pura.

La existencia del movimiento masivo del fluido aumenta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, aunque entorpece la determinación de la rapidez de transferencia.

Pese a la dificultad de la convección, se contempla que la rapidez de transferencia de calor por convección es igual a la diferencia de temperatura y se expresa por la ley de Enfriamiento de Newton como se muestra en la ecuación 2.9:

$$Q_{conv} = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (\text{Ecuación 2.9})$$

Dónde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección, $W/m^2\text{°C}$

A_s : Área superficial a través de la cual tiene lugar la convección, m^2 .

T_s : Temperatura de la superficie, °C

T_∞ : Temperatura del fluido, °C

2.11.3. Radiación

A diferencia de la conducción y convección, la transferencia de energía por radiación no necesita la existencia de un medio interpuesto, ya que la materia emite radiación en forma de ondas electromagnéticas o fotones, como consecuencia de los cambios en la configuración electrónica de los átomos. De hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida y no sufre mitigación en el vacío.

“En el estudio de transferencia de calor por radiación térmica es importante resaltar que todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica” (Cengel, 2007, p 27).

Todos los sólidos, líquidos y gases generan, absorben o transmiten radiación en distintos grados “Cuando una superficie de emisividad ε y área superficial A_s que se halla a una temperatura superficial T_s que está completamente contenida por una superficie mucho mayor que se encuentra

a la temperatura absoluta T_{alred} , y separada por un gas (como el aire) que no participa en la radiación” (Cengel, 2007, p 29), La rapidez de la transferencia de calor por radiación es igual a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, cuando dos superficies intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es equivalente a las diferencias de T^4 como se expresa en la ecuación 2.10.

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Dónde:

σ : La constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2 \text{ k}^4$)

ε : Superficie de emisividad

A_s : Área superficial

T_s : Temperatura de la superficie

T_{alred} : Temperatura de superficie circundante

2.12. Calentamiento Térmico en Hornos de Fundición

2.12.1. Flujo Térmico en Hornos Industriales.

2.12.1.1. Cantidad de calor a impartir a la carga

Si se han de calentar o fundir sólidos en un horno, es principal que se libere o desprenda calor en el mismo. A continuación, debe transmitirse el calor al material que se ha de calentar y finalmente distribuirse en el total de la carga satisfaciendo las especificaciones de la ingeniería metalúrgica o cerámica. Estas especificaciones abarcan la temperatura final de la carga, la uniformidad de la temperatura en la misma y el tiempo que transcurre hasta esta temperatura. Igualmente se especifica, en algunos casos, la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento (Trinks, 1975, p 30).

Para la comprensión del proceso de fundición se recomienda comenzar por las características físicas del material que se ha de calentar o fundir.

El calor a transmitirse a la carga es equivalente al producto del peso de la carga por el aumento de temperatura y por el calor específico de la carga, el cual se expresa mediante la ecuación 2.11.

$$Q = M C_p \Delta t \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Donde:

Q : Calor a impartirse a la carga

M : Peso de la carga

C_p : Calor específico de la carga

Δt : Elevación de temperatura de la carga

Si se emplea el horno para el calentamiento de materiales, en los que las temperaturas elevadas producen reacciones químicas, deberán tenerse en cuenta los calores específicos y de reacción de la carga.

2.12.2. Interacción Térmica en los Hornos.

En la figura 2.10 se muestra en forma de diagrama el flujo de calor en un horno, representando un horno que se calienta por los productos de combustión.

Los elementos superficiales de las paredes y de la carga, como 3 y 6, se calientan por convección por los gases calientes que fluyen a lo largo de las paredes y de la carga. Una molécula de estos gases, tal como la que se indica por 9, radia en todas direcciones, por ejemplo, a 2 y a 8.

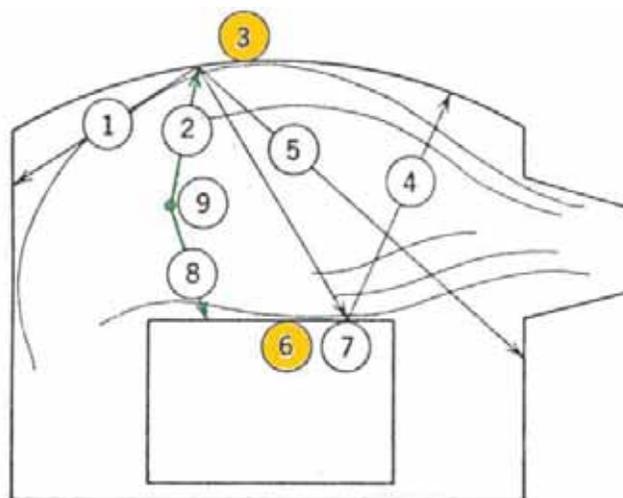
Estos elementos superficiales radian en todas las direcciones posibles, por ejemplo, a 1, 5 y 7 desde 3 y a 4 desde 7, Etc.

De la figura 2.10 se desprende que cada partícula de los productos de la combustión, así como cada elemento de las superficies de las paredes y de la carga, radian en todas direcciones posibles. Este hecho hace extremadamente dificultoso el cálculo exacto de la transmisión de calor en un horno que se calienta por medio de un combustible. La prueba de la exactitud de esta afirmación está proporcionada por variables como (Trinks, 1975,p 58):

- Temperatura, composición y velocidad de los productos de combustión
- Espesor de gases entre las paredes y la carga
- Relación entre la superficie de la pared y la superficie expuesta de la carga
- La radiación térmica de las paredes y la carga

Figura 2. 10

Diagrama de transmisión de calor en el interior de la cámara de un horno



Nota. Tomado de *Hornos industriales* (p 58), por Trinks, W y Mawhinney, M. H.; 1975,Urmo, S.A. de ediciones

2.13. Capacidad de Calentamiento de los Hornos

La capacidad de calentamiento de un horno se expresa usualmente por el peso del metal que puede fundir en la unidad de tiempo a una temperatura definida, sin que se produzca un sobrecalentamiento de la carga. Así mismo es importante la capacidad de calentamiento por unidad de volumen. La capacidad de calentamiento específico se expresa de las dos formas siguientes como se muestran en las ecuaciones 2.12 y 2.13 (Trinks, 1975,p 63):

$$\frac{\text{Peso calentado (Kg)}}{\text{hora (h) X volumen del horno (m}^3\text{)}} \quad \text{(Ecuación 2.12)}$$

$$\frac{\text{Peso calentado (kg)}}{\text{hora (h) X superficie de la solera (m}^2\text{)}} \quad \text{(Ecuación 2.13)}$$

Ninguna de estas relaciones constituye una medida perfecta de la capacidad de calentamiento, en el recocido de grandes cargas, el volumen del horno debe ser suficientemente amplio para recibir la carga y dejar espacio para la circulación de los gases de combustión. En conclusión, la capacidad de calentamiento por unidad de volumen es pequeña.

La capacidad de calentamiento depende de varios factores, como son la cantidad de calor liberado, la cantidad de calor transmitido a la carga y la cantidad de calor conducido al punto más frío de la carga (Trinks, 1975,p 63).

2.14. Efecto de la Cantidad de Calor Liberado

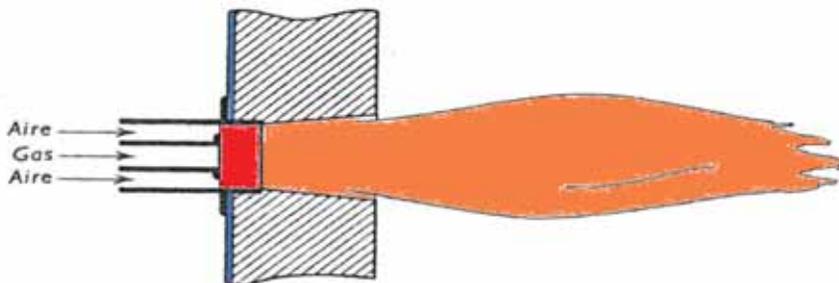
La cantidad de calor liberado varía dependiendo del tipo de equipo de generación de calor. En los hornos de combustión el calor liberado se expresa, generalmente, en unidades de calor liberado por unidad de volumen y por unidad de tiempo. En la práctica, el calor liberado se expresa Kcal/m³ /s. El término “longitud de llama” se encuentra estrechamente relacionado con la cantidad de calor liberado. Para hornos de solera abierta e industriales, la longitud de la llama significa la

distancia entre el quemador y el punto donde se extingue la llama o el punto en el que ha completado la combustión, al menos en un 95% (Trinks, 1975, p 64).

En condiciones normales del horno, si no se suministra un exceso de aire, la combustión no es completa y los hornos de fusión de metales raramente están provistos de cantidades apreciables de exceso de aire. La norma de considerar el final de la combustión cuando se ha realizado el 95% de ella aplica también al volumen de combustión, el cual representa el espacio necesario para que se complete la combustión (Trinks, 1975, p 65). La longitud de llama depende del tipo de combustible y tipo de dispositivo de combustión empleados y va de 25,4 mm. a 12 m (Trinks, 1975, p 64).

Figura 2. 11

Ineficiencia del espacio de combustión



Nota. Mal aprovechamiento del espacio de combustión por un quemador excesivamente grande por *Hornos industriales*, (p 65), por Trinks, W.; Mawhinney, M. H, 1975, Urmo, S.A. de ediciones

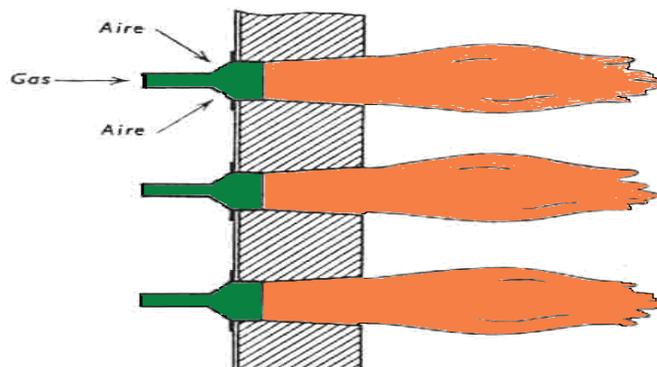
El volumen de combustión y la longitud de llama se muestran en las figuras 2.9 y 2.10. Los croquis muestran quemadores de gas geoméricamente semejantes. El quemador más amplio (fig. 2.11) produce una llama larga. Si se coloca un solo quemador grande en el centro de una pared de horno, se estropea el espacio que rodea al quemador, en lo que se refiere a espacio de combustión. Por el contrario, muchos quemadores pequeños (fig. 2.12) utilizan la superficie de

pared completa, trabajando con llamas más cortas. Asimismo, en estas figuras se muestra el aire al mezclarse con el combustible en la entrada del quemador. Si se mezcla el aire y el combustible antes del quemador (premezcla), se produce la combustión más rápidamente, necesiándose menos volumen de combustión que en los hornos con mezcla de aire y combustible. Finalmente, si se precalienta el aire de combustión, la combustión se realiza aún más rápidamente (Trinks, 1975,p 65).

El término “condición de combustión” representa las combinaciones de diversos elementos y requiere cierto conocimiento para su empleo apropiado. Pueden servir como guía las siguientes explicaciones (Trinks, 1975,p 66):

Figura 2. 12

Optimización del espacio de combustión



Nota. Buen aprovechamiento del espacio de combustión por medio de cuatro quemadores pequeños de igual capacidad que la figura 2.9, tomado de *Hornos industriales*, (P 65), por Trinks, W.; Mawhinney, M. H, 1975, Urmo, S.A. de ediciones

Condición de combustión 1. Mezcla muy mala del aire frío y del combustible no pulverizado, inadecuado aprovechamiento del volumen de la cámara de combustión.

Condición de combustión 2. Mezcla mala de combustible no pulverizado y aire frío, regular utilización del volumen de la cámara de combustión. condiciones iguales a la 1, excepto que el aire que está en la cámara de combustión está a 260° C.

Condición de combustión 3. Buena combinación de combustible atomizado muy finamente y de aire frío, adecuado empleo de la cámara de combustión, el aire que está en la cámara de combustión está a 260° C.

Condición de combustión 4. Mezcla completa (o premezcla) de aire a 260°C y de combustible atomizado muy finamente, utilización perfecta de la cámara de combustión. Condiciones idénticas a la 3, pero el aire que está en la cámara de combustión está a 538° C.

Condición de combustión 5. Mezcla completa (o premezcla) de aire a 538°C y de combustible atomizado muy finamente, utilización perfecta del espacio de combustión, con la utilización de muchos quemadores pequeños.

Condición de combustión 6. El combustible premezclado y el aire que emerge de quemadores pequeños poco separados se proyectan contra las superficies refractarias, que trabajan como catalizadores y aceleran la combustión (Trinks, 1975,p 66).

En la tabla 2.10 se muestra la cantidad de calor liberado en cada condición de combustión.

Tabla 2. 9

Calor liberado en diferentes condiciones de combustión

Condiciones de combustión.	1	2	3	4	5	6
Kcal/(s × m ³ de espacio de combustión)	13,34	53,39	88,97	160,11	293,66	444,95

Nota. Recuperado de *Hornos industriales*, por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.66, Urmo,S.A. de ediciones

2.15. Efecto de la Cantidad de Calor Absorbido por la Carga

La cantidad de calor que puede liberarse a temperaturas suficientemente elevadas es amplia en los hornos industriales, el problema de calcular la capacidad del horno puede estudiarse sobre el fundamento de la transmisión de calor a la carga y de la igualdad de temperatura dentro de la misma (Trinks, 1975,p 68).

Con una cantidad adecuada de calor liberado, y a una temperatura lo suficientemente elevada, la capacidad del horno está afectada por las siguientes variables:

1. La temperatura de las paredes del horno cuando se introduce la carga fría.
2. La temperatura a la que se ha de calentar la carga.
3. La temperatura de productos de combustión.
4. La emisividad de productos de combustión.
5. La emisividad de las paredes.
6. La emisividad de la carga.
7. La relación de la superficie de las paredes a la superficie de la carga.
8. El espesor de la capa de gases productos de combustión.
9. La conductividad térmica de la carga (incluyendo los espacios vacíos).
10. La uniformidad de la temperatura deseada en el producto.
11. El volumen de la carga.
12. Las dimensiones del horno (superficie y volumen de la solera).
13. Velocidad de los gases en el horno.

Puede decirse, en líneas generales, que la transmisión del calor a la carga define la capacidad de calentamiento de una carga pequeña, en tanto que la igualdad de temperaturas dentro de la carga determina la capacidad de calentamiento para cargas mayores, que posean baja conductividad térmica (Trinks, 1975, p 68).

2.16. Rendimiento del Horno

El término “rendimiento” de un horno industrial, es el costo de calentamiento por unidad de peso de producto acabado o listo para el siguiente proceso u operación.

“El costo de calentamiento incluye el costo del combustible, el costo de fabricación del horno, los costos de mantenimiento y reparación. finalmente incluye el costo de la manipulación del material dentro y fuera del horno” (Trinks, 1975, p 122).

El rendimiento térmico del horno se expresa por la siguiente relación, ecuación 2.14:

$$\frac{\text{Calor aportado a la carga}}{\text{combustible consumido para calentar la carga}} \times 100\% \quad (\text{Ecuación 2.14})$$

En los hornos eléctricos, el denominador de esta relación es reemplazado por el valor térmico de la energía eléctrica consumida.

El rendimiento en las calderas varia del 60 al 90%, e incluso superiores, en caso del rendimiento de hornos industriales en ocasiones son tan bajos como 5% en los hornos de combustión, y mayor aun en los eléctricos en caso se incluya el rendimiento térmico de la energía eléctrica.

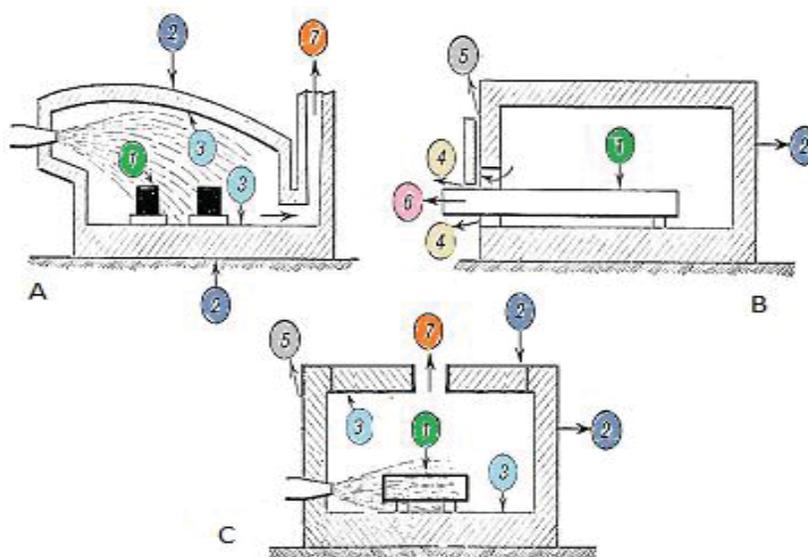
La diferencia existente entre el rendimiento de las calderas y los hornos industriales, se debe a la temperatura final del material a calentar o fundir. En condiciones favorables, con un adecuado funcionamiento del horno industrial se pueden obtener rendimientos de hasta 68%, basándonos en que los gases productos de combustión, salen de un horno industrial a una temperatura que excede en 28°C la temperatura de la carga. Bajo la premisa de que los gases son capaces de dar calor a la carga únicamente si están más calientes que ella (Trinks, 1975, p 123).

2.17. Distribución de Calor en los Hornos.

La mayor porción de calor se libera en la zona de combustión a la izquierda y se desplaza, de allí, a la derecha. El paso de calor a la carga se indica por las flechas, 1. Pero el calor se moviliza en distintas direcciones; pasa a través de las paredes del horno y a través de la solera, como se indica por las flechas 3, incrementando la temperatura de estas partes, como se muestra en la figura 2.13 (A). Otra porción se disipa en el ambiente por radiación y convección desde la superficie exterior de las paredes o por conducción al suelo como se muestra en las flechas 2. Se transmite calor por radiación a través de grietas u otras aberturas, flechas 4 como se muestra en la figura 2.13(B); los gases del horno abandonan este por la puerta 5, frecuentemente, disipándose al aire libre y transportando calor como se muestra en la figura 2.13(C). Se pierde calor cada vez que se abre la puerta.

Figura 2. 13

Flujo de calor en los hornos



Nota. Adaptado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.125; Urmo, S.A. de ediciones

Además, existen pérdidas especiales que son características de diversos tipos de hornos; por ejemplo, en la figura 2.13 (B), en un horno que calienta solo una parte de una pieza larga de metal, el calor pasa a lo largo del metal desde la parte que está en el horno a la parte que esta fuera, disipándose en el ambiente 6, finalmente sale calor con los productos de combustión en dirección de la flecha 7.

Para conseguir que la fracción de calor total que es transferida a la carga sea tan grande como sea posible con un calentamiento correcto, se necesita la resolución de dos dificultades: primero, determinación de las pérdidas de calor y los métodos de reducir esta, y segundo, determinación de energía eléctrica o cantidad de combustible que se requiere para calentar y/o fundir una cantidad determinada de metal a una determinada temperatura y en un horno dado (Trinks, 1975, p 121).

2.18. Calor Perdido a Través las Paredes del Horno

El calor perdido por las paredes del horno constituye uno de los problemas sobresalientes que afectan a la economía de los hornos y que deben examinarse ampliamente. Las pérdidas por las paredes, durante el funcionamiento continuo de un horno, son diferentes de las pérdidas a través de las paredes del mismo horno, si éste funciona de manera intermitente. Se examinan primeramente las pérdidas por las paredes durante el funcionamiento continuo (Trinks, 1975, p 125).

2.18.1. Funcionamiento Continuo

La temperatura de los productos de combustión es raramente conocida a causa de las dificultades que se presentan en la medida de la temperatura de los gases. Así mismo la temperatura de los productos de combustión excede la temperatura interior de la pared. La temperatura de la

cara interior de la pared puede medirse fácilmente y generalmente es conocida. La temperatura de la pared desciende rápidamente al aproximarse a su superficie exterior, donde la temperatura excede ligeramente la temperatura del aire ambiente. La pérdida de calor a través de una superficie de pared determinada y a una temperatura dada del horno es menor si la pared es de mayor espesor, si está constituida de un material muy aislante o si la superficie externa de la pared es de tal naturaleza que no cede calor con celeridad al medio ambiente (Trinks, 1975, p 126).

En la figura 2.14 se observa la gradiente de temperatura durante el flujo de calor continuo a través de la pared de un horno, existiendo igual presión en ambos lados de la cara.

2.18.2. Funcionamiento Discontinuo

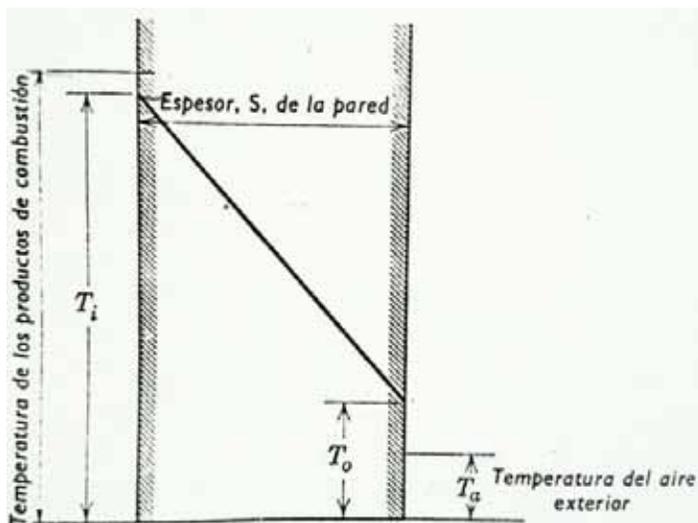
La pérdida de calor por las paredes del horno en periodos discontinuos se debe a que los periodos de funcionamiento del horno se alternan con tiempos de parada del mismo. Cuando el horno se encuentra parado el calor guardado en los refractarios durante el tiempo de funcionamiento de este se dispersa gradualmente, especialmente por convección y radiación desde la pared exterior. Además, cierta porción de calor es extraída por el aire que circula a través del horno por medio de aberturas de los quemadores y rendijas de las puertas cerradas incompletamente.

La disipación del calor guardado significa una pérdida, debido a que este debe transmitirse mínimamente a los refractarios en el siguiente periodo de funcionamiento (Trinks, 1975, p 142).

Es extremadamente difícil estimar las pérdidas de calor por la circulación de aire. Sin embargo, es posible estimar las pérdidas de calor que se produce por radiación y convección desde la cara fría mientras está parado el horno caliente.

Figura 2. 14

Gradiente de temperatura en un horno



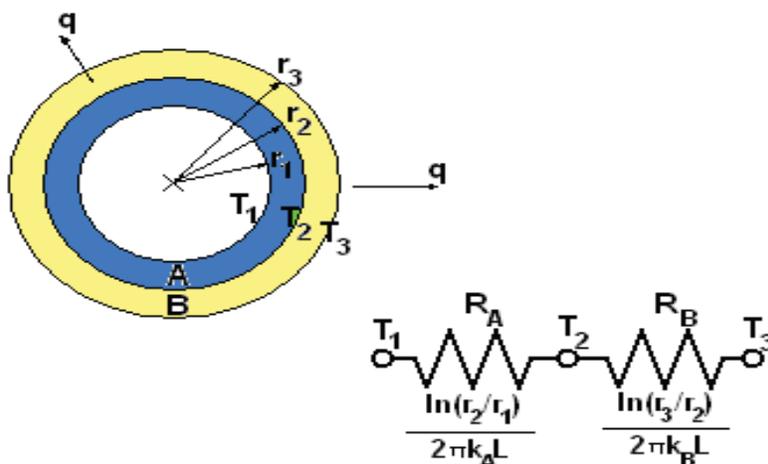
Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.126; Urmo, S.A. de ediciones

Resulta evidente que, cuando existen cortos periodos de funcionamiento y grandes periodos de parada, es preferible utilizar paredes delgadas de refractarios aislantes, porque se almacena en ellos poco calor. La pérdida de calor por disipación del calor almacenado en los refractarios se determina por la relación de tiempo de funcionamiento a tiempo de parada y por la longitud del ciclo (Trinks, 1975, p 142).

En la figura 2.15, observamos la pérdida de calor a través de dos paredes A y B, las mismas que poseen temperaturas distintas, temperatura T_1 de cara interior de la pared A, temperatura exterior T_2 de la pared A o temperatura de la cara interior de la pared B y temperatura T_3 de la cara exterior de la pared B. Así mismo se observa la representación de resistencias de ambas paredes R_A y R_B , el calor perdido se representa por "q".

Figura 2. 15

Representación de un esquema de dos paredes cilíndricas



Nota. Elaboración Propia.

De la representación de resistencias de las paredes A y B de la figura 2.15, se obtiene que la resistencia de la pared A es:

$$R_A = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_A L} \quad (\text{Ecuación 2.15})$$

Para determinar la pérdida de calor mediante las paredes de un horno de crisol, el cual consta de dos paredes (ladrillo refractario y cubierta metálica), apoyándonos en la figura 2.15 y en la ecuación 2.15, obtenemos la ecuación 2.16:

$$Q = \frac{(T_1 - T_3)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_A L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_B L}}$$

$$Q = \frac{2\pi(T_1 - T_3)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{K_A L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{K_B L}} \quad (\text{Ecuación 2.16})$$

Donde:

Q : Pérdida calorífica a través de las paredes.

L : Longitud del horno con forma cilíndrica.

K_A : Conductividad térmica de la pared de ladrillo refractario.

k_B : Conductividad térmica de la pared de cubierta metálica.

T_1 : Temperatura en la cara interna del ladrillo refractario.

T_2 : Temperatura en la cara externa del ladrillo refractario (o interior de la Cubierta metálica).

T_3 : Temperatura en la cara externa de la cubierta metálica.

r_1 : Radio interno de la pared de ladrillo refractario.

r_2 : Radio externo de la pared de ladrillo refractario (o interior de la cubierta metálica).

r_3 : Radio externo de la pared de cubierta metálica.

2.19. Calor Perdido por Radiación a Través de las Aberturas

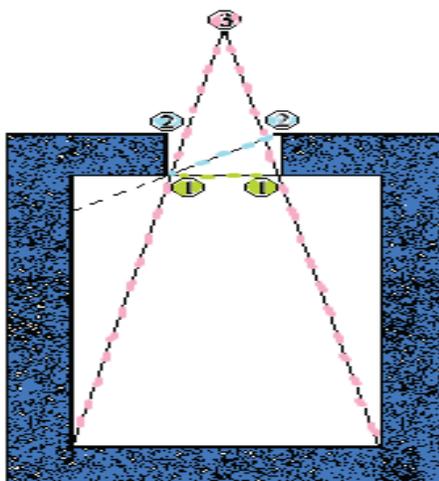
Las pérdidas de calor por radiación directa a través de las aberturas del horno se indican en las flechas 4 de la figura 2.13 (B).

En la figura 2.16 podemos observar la representación esquemática de la radiación de calor a través de una abertura en la pared que va de 1-1, La radiación directa 3 depende de la relación del espesor de la pared y el ancho de la abertura, a mayor espesor de pared menor será la radiación directa y a mayor abertura mayor será la radiación directa (Trinks, 1975, p 149).

Por otro lado, los bordes de la abertura 1-2 de figura 2.16, se calientan por la radiación que reciben y vuelven a radiar una parte de este calor al exterior, lo cual se conoce como rerradiación y este compensa la reducción de la radiación directa (Trinks, 1975, p 149).

Figura 2. 16

Esquema de radiación a través de una abertura



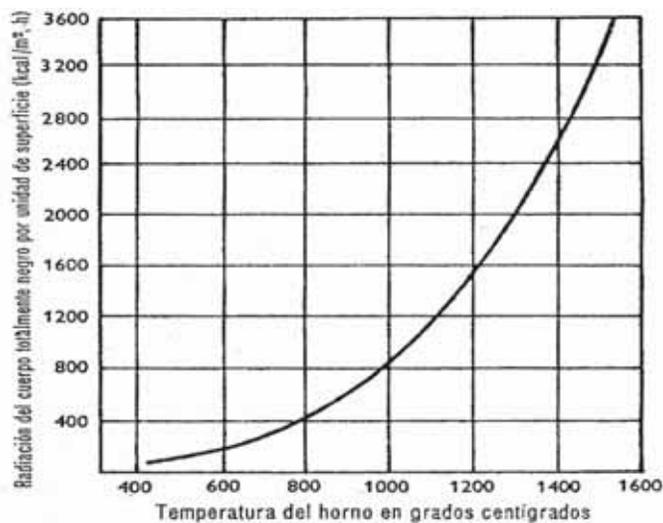
Nota. Adaptado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.149; Urmo, S.A. de ediciones

Usando de referencia la radiación de cuerpos negros según la temperatura del horno la que podemos deducir de la figura 2.17, J.D.Keller construyó un gráfico para calcular la radiación a través de aberturas de forma diversa figura 2.18, el cual relaciona la fracción diámetro-espesor de la abertura, para obtener el factor de radiación total (Trinks, 1975, p 150).

En los hornos de elevada temperatura con paredes gruesas, si el enlace no es muy resistente se pueden observar semiaberturas. los ladrillos del interior del horno se dilatan de manera considerable, mientras que las capas exteriores se dilatan muy poco. A través de las rendijas que se producen por esta causa, pueden observarse los ladrillos interiores al rojo. Los ladrillos interiores al rojo radian una considerable cantidad de calor a través de las rendijas más o menos anchas, si se conoce la temperatura de los ladrillos interiores, el ancho de las rendijas y el espesor de los ladrillos exteriores se puede calcular la perdida de calor por radiación a través de las rendijas.

Figura 2. 17

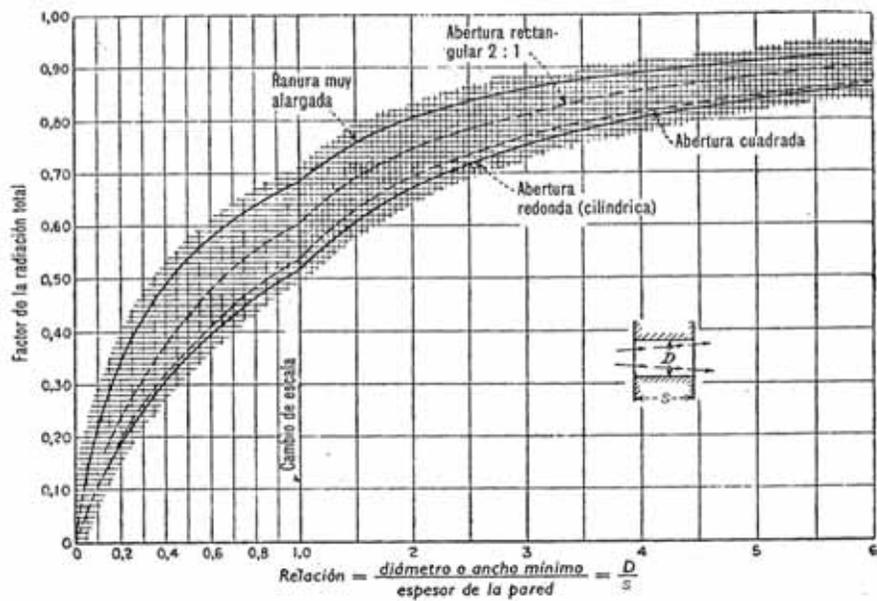
Radiación del cuerpo negro en función de la temperatura °C



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.149; Urmo, S.A. de ediciones

Figura 2. 18

Radiación a través de aberturas de formas diversas



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.150; Urmo, S.A. de ediciones

2.20. Calor Perdido por el Escape de Gases a Través de las Puertas.

Las pérdidas de calor que se producen por los gases que salen por la tapa del horno, como se indican en las flechas 5 de la figura 2.13 A y B, se producen por radiación y convección. Una pequeña pérdida de los gases, que salen al exterior, es menos perjudicial que la oxidación (y enfriamiento) que se produce por la infiltración del aire al interior del horno.

En los hornos con combustible si las puertas están herméticamente cerradas la pérdida no supera el 2% del calor aportado al horno, En caso que la puerta no esté cerrada herméticamente y con los chorros de gases proyectándose contra las mismas, la pérdida puede alcanzar el 8% e incluso superar este valor (Trinks, 1975, p 151).

En hornos discontinuos, si la combustión se ha completado en el interior del horno no existe prácticamente pérdida si los gases escapan por la puerta. Por otro lado, si la combustión no se ha completado, existe una pérdida de calor debido a que estos gases completan su combustión fuera del horno, en lugar de culminar su combustión dentro de él.

En hornos continuos las condiciones son diferentes, si los gases (incluso si la combustión es completa) salen a través de la puerta, se produce una pérdida de calor, debido a que estos mismos gases elevarían la temperatura de la carga y abandonarían el horno a una temperatura más baja (Trinks, 1975, p 152).

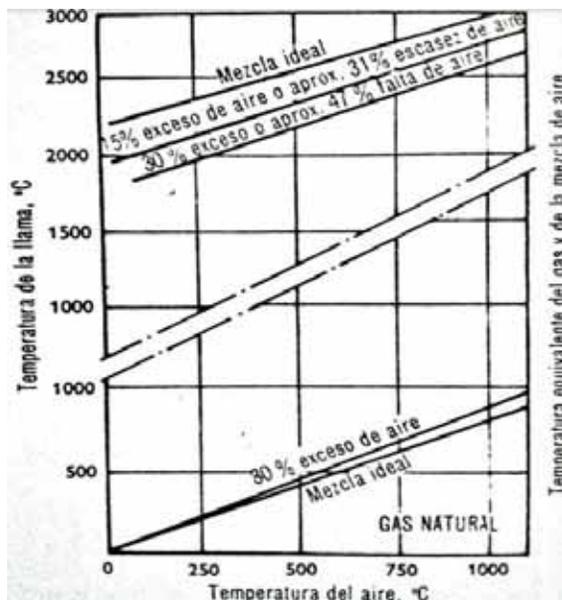
2.21. Calor Sensible Expulsado del Horno en los Gases de Combustión.

Una de las causas de pérdidas de calor, es mediante la eliminación de gases productos de combustión, la cual se indica por la flecha 7 en la figura 2.13 A y C. Estas pérdidas se producen debido a que los productos de combustión retiran energía calorífica del horno al ser expulsados,

ya sea en forma potencial, como combustible sin culminar su combustión, o en forma cinética, como calor sensible y calor latente del vapor de agua (Trinks, 1975, p 157).

Figura 2. 19

Temperaturas adiabáticas de llama del gas natural



Nota. Temperaturas adiabáticas, con aire precalentado a diversas temperaturas. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.158; Urmo, S.A. de ediciones

La constitución química del combustible posee influencia sobre la pérdida de calor a través de los gases que se evacuan por la chimenea. En los hornos de temperatura baja como 538°C, la naturaleza del combustible afecta poco a la pérdida de calor extraído por los gases productos de combustión. Por otro lado, a temperaturas más altas como 1 315°C, la diferencia en el ahorro del combustible es visible. La diferencia se produce por el cambio de temperaturas que pueden lograr las llamas de distintos combustibles. Esta temperatura está constituida por la temperatura adiabática de la llama ideal o teórica. La cual se define como la temperatura que logra tener si la combustión es a presión constante con temperatura del aire ambiente y en un recipiente aislado

térmicamente. En los hornos jamás se logra la temperatura ideal de la llama, debido a que el calor se disocia mediante la radiación durante la combustión. (Trinks, 1975, p 158).

La temperatura adiabática de la llama del gas natural, calculada sin tener en cuenta la disociación permanente se indica en la figura 2.19.

2.22. Calor Perdido por Combustión Incompleta.

En muchos hornos industriales los combustibles son evacuados sin que se haya realizado la combustión completa. La cantidad de calor perdido por combustión incompleta, no solo depende del tipo de quemadores y horno, sino también de la relación de combustible a aire teórico correcto y que estos estén completamente mezclados (Trinks, 1975, p 170).

Los combustibles industriales, a excepción del coque y gas de horno alto, contienen hidrocarburos. En las etapas iniciales de la combustión se forman compuestos, tales como CH_nOH . Con exceso de aire, estos compuestos se oxidan a CO_2 y H_2O . Con un suministro de aire insuficiente, los productos finales son CO_2 , CO , H_2O , H_2 y metano. Si los productos de combustión se enfrían parcialmente se forma hollín (Trinks, 1975, p 171).

2.23. Reducción de las Pérdidas de Calor por las Paredes.

Cuando durante una combustión las puertas están cerradas no herméticamente, estas pérdidas de calor constituyen una parte de las pérdidas a través de las paredes del horno.

La reducción del flujo de calor a través de las paredes del horno al medio ambiente, se logra mediante paredes construidas con ladrillo refractario aislante y cubierta de una cascara de acero, las pérdidas se reducen aún más por la inserción de bloques de fibra entre el refractario aislante y la cubierta de acero.

La reducción en la pérdida de calor no significa necesariamente un ahorro de combustible, puesto que los gastos del aislamiento térmico pueden exceder el costo de combustible que se ahorra; aunque es un caso muy raro, debe de tenerse en cuenta (Trinks, 1975, p 220).

2.24. Utilización del Calor de los Gases Productos de Combustión

Los productos de combustión salen a una temperatura elevada, llevando en si mismos una gran cantidad de calor, el menester de aminorar las pérdidas de calor mediante los gases de combustión nos lleva a los siguientes metodos de aprovechamiento del calor (Trinks, 1975, p 222):

- a) Precalentamiento de la carga fría por los gases quemados.
- b) Precalentamiento del aire de combustión (y de algunos combustibles).

2.24.1. Precalentamiento de la Carga

El precalentamiento de la carga por los gases productos de combustión se aplica ampliamente en la forja y temple de herramientas, se recupera parte del calor de los productos de combustión, practicando el precalentamiento de las piezas frías o del aire de combustión, en la figura 2.20 podemos observar un horno que sirve para para el recalentamiento de piezas frías (Trinks, 1975, p 223).

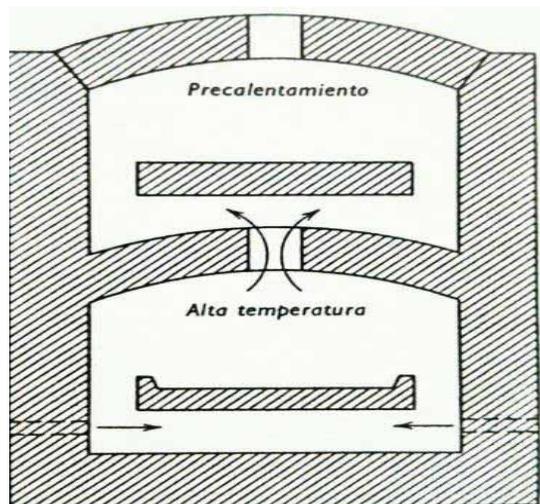
2.24.2. Precalentamiento del Aire de Combustión

Consiste en el empleo del calor de los gases productos de combustión, para precalentar el aire de combustión, el combustible o ambos (Trinks, 1975, p 123).

En la figura 2.21 se muestra un horno de recuperación en el cual los gases de combustión salientes traspasan una porción de su calor al aire que ingresa en un flujo uniforme a través de una pared, aprovechando así los gases productos de combustión (Trinks, 1975, p 24).

Figura 2. 20

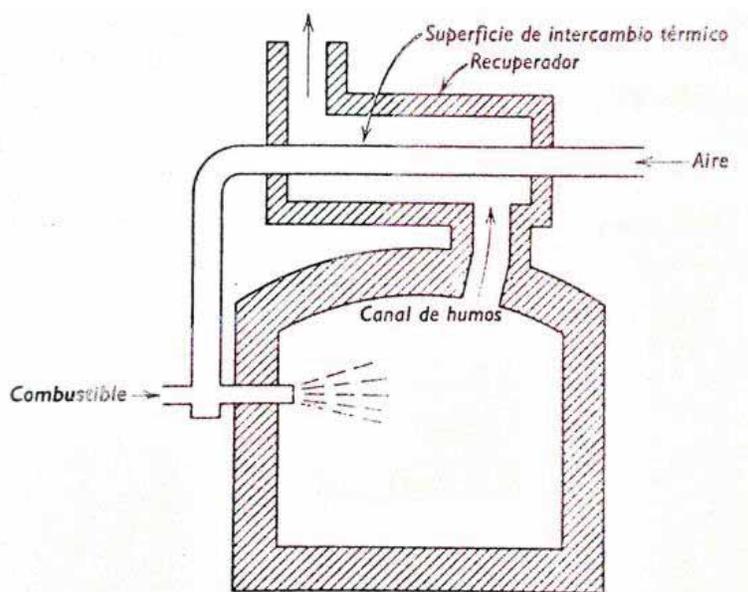
Horno con cámara superior de precalentamiento



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.23; Urmo, S.A. de ediciones

Figura 2. 21

Horno de recuperación



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.24; Urmo, S.A. de ediciones

2.25. Movimiento de Gases en los Hornos

2.25.1. Presión en los Hornos, Tamaño y Ubicación de los Orificios de Salida de Gases.

En relación con las condiciones de presión en los hornos debe contemplar dos reglas fundamentales:

- a) La presión en la cámara de calentamiento tiene que ser la atmosférica o superior a esta, durante el proceso de calentamiento de metales.
- b) Mientras menor sea la temperatura de calentamiento del material mayor será el requerimiento de un tránsito completo de gases de combustión en la cámara de calentamiento.

Para conseguir un funcionamiento correcto del horno, es importante la existencia de presión atmosférica en la cámara de calentamiento, si la presión fuera mayor que la atmosférica, se expulsarían llamas o gases calientes por las rendijas y, si en caso fuese menor, ingresaría aire por las puertas y la carga sería oxidada.

En hornos de cierta altura es imposible tener presión atmosférica en todos los niveles, porque el horno forma una chimenea (columna de gases calientes). Es evidente que debe existir una diferencia entre la presión de la atmósfera y la presión del horno en algún nivel del horno, presentándose una diferencia de presión en el horno.

Si los productos de combustión se evacúan a través de un respiro a nivel de la solera, se mantiene fácilmente el exceso de presión de la solera, esta disposición tiene la ventaja de que el recorrido de los productos de combustión da tiempo para que estos cedan su calor a la carga y salgan con un exceso de temperatura pequeño (Trinks, 1975, p 399).

Cada ducto de gases productos de combustión es una chimenea que introduce aire frío en el horno cada vez que se abre una puerta del horno, el aire frío que ingresa no es perjudicial en caso se disponga un respiro cerca de la puerta, en este caso el aire entra en el canal de productos de combustión en a través del respiro.

Existen dos métodos para lograr un control semiautomático de la presión. Uno consiste en disponer un pequeño orificio ajustable en la parte inferior de cada canal de gases productos de combustión, fuera del horno. El otro medio consiste en construir canales de productos de combustión con ladrillos refractarios muy delgados. El propósito de cada medio es el mismo, producir menos presión con calentamiento mínimo, que el que se produce en el horno cuando está calentado a máxima potencia (Trinks, 1975, p 400).

Con el fin de sobredimensionar ligeramente los respiros y canales de gases productos de combustión, deben determinarse las dimensiones que se necesitan para el máximo consumo de calefacción. Las dimensiones requeridas son en función del volumen y temperatura de los productos de combustión que fluyen en una unidad de tiempo, y de la pérdida aceptable de la carga.

En consecuencia, el volumen de gases que pasan a través de los respiros y canales de gases productos de combustión por unidad de tiempo se conoce con exactitud suficiente, si se conocen el calor liberado en la unidad de tiempo y la temperatura de los gases de combustión. Un canal de gases productos de combustión muy corto puede considerarse como un respiro (Trinks, 1975, p 401).

2.25.2. Canal de Gases Productos de Combustión

Los hornos calentados por gas o aceite no requieren chimeneas o conductos de gases, sino solamente canales cortos de evacuación de gases, si no se desea la presencia de los productos de

combustión, es posible disponer una campana con una salida a través del tejado. Es menester la instalación de chimeneas en hornos de optimización de gases productos de combustión (hornos con regeneración o con recuperación) cualquiera sea el combustible (Trinks, 1975, p 406).

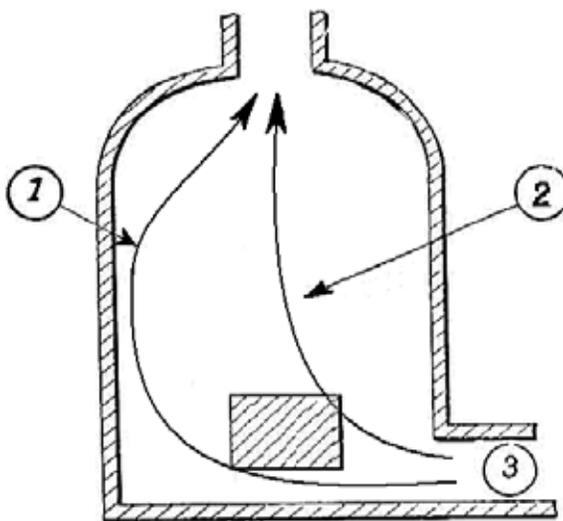
En los hornos de calentamiento debe existir una ligera presión y la función de la chimenea o canal de gases, es la de evacuar los productos de combustión (Trinks, 1975, p 406).

2.25.3. Flujo de Gases Productos de Combustión en los Hornos.

Es adecuado examinar la circulación de las corrientes que entregan calor. La norma es que un gas caliente, mientras mayor sea su corrido cederá mayor calor dentro del horno. Para comprender esta regla véase la figura 2.22.

Figura 2. 22

Flujo de una corriente subdividida de gas



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.412; Urmo, S.A. de ediciones

Considerando que los ladrillos están fríos, y que los gases calientes que suben desde el quemador (3) ceden calor a los ladrillos y a la carga. Así mismo supongamos que la corriente (1),

tiene un recorrido mayor que el resto; por consecuencia, cederá más calor y calentará más las zonas adyacentes. Si la corriente (2), tiene un menor recorrido, entonces cederá menos calor que la corriente (1) y calentará el horno deficientemente (Trinks, 1975, p 412).

2.25.4. Circulación de los Gases de Combustión en los Hornos.

Existe cierta diferencia entre el flujo de gases y la circulación de gases. Los productos de combustión pueden fluir directamente desde el quemador al respiro o pueden ser obligados a pasar por el mismo sector dos o más veces sucesivamente, siendo este último caso cuando verdaderamente circulan (Trinks, 1975, p 430).

Existen cuatro causas principales para que tenga lugar la circulación de gases en los hornos:

- Variación de volumen de los gases por efecto de un cambio de temperatura.
- Diferencia del peso específico de los gases calientes y fríos.
- Energía cinética de los gases circulantes debida a la presión de combustible y de aire de entrada.
- Presión en el horno, en relación con la capacidad de evacuación de los canales de gases productos de combustión.

Los medios para dar dirección a la circulación de los gases productos de combustión son los siguientes:

- Colocación de los dispositivos de combustión.
- Dirección de los gases calientes o llama.
- Ubicación de los respiros de salida.
- Ventiladores.

2.25.4.1. Cambio de Volumen de los Gases a Causa del Cambio de Temperatura.

El volumen del peso determinado de un gas es equivalente a la temperatura absoluta, si la presión en el horno se mantiene constante. Este factor en sí mismo tiene un efecto mínimo en la circulación de gases productos de combustión en el horno, pero incrementa e intensifica sin duda alguna la acción de la energía cinética de los gases circulantes, esto debido a la presión del combustible y aire de entrada.

El aumento de volumen de gases durante la combustión apoya en gran manera a la saturación de los espacios de combustión y conductos de gases con calor y llama, así mismo ayuda a provocar un flujo uniforme de gases a través de la cámara de calefacción, aun cuando la mezcla de aire y combustible pueda ingresar en el horno en chorros independientes (Trinks, 1975, p 431).

2.25.4.2. Diferencia del Peso Específico de Gases Calientes y Fríos.

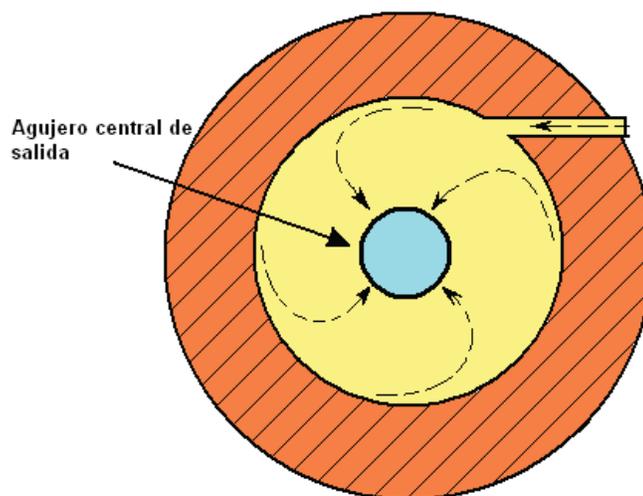
Esta diferencia provoca el efecto chimenea, el aire frío ejerce presión bajo el aire caliente forzándolo a subir y salir. Si se usa de forma apropiada este efecto es beneficioso, debido a que ingresa aire frío al horno a través de regeneradores o recuperadores ubicados en la parte baja, llevando los productos de combustión a la cámara de calentamiento y obligando al calor y a la llama a ubicar la bóveda del horno y pasar sobre la carga a fundir, la cual se encuentra en una atmósfera más fría. Este efecto constituye el único agente que provoca la circulación de los gases en el interior de las muflas y hornos calentados eléctricamente (Trinks, 1975, p 432).

2.25.4.3. Energía Cinética de los Gases Circulantes Debido a la Presión del Combustible y Aire de Entrada.

Es necesario que el aire, el gas o el aceite entren al horno con una velocidad considerable para originar la mezcla y presión a nivel de la solera.

Figura 2. 23

Circulación mantenida por un pequeño chorro



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.434; Urmo, S.A. de ediciones

Así mismo otorga uno de los medios más preciados para realizar una rápida circulación de gases en el horno, suponiendo que éste tiene la forma adecuada para dirigir los gases y mantener la circulación. En la figura 2.23 se muestra la circulación continua de los gases en una cámara circular con un agujero central. (Trinks, 1975, p 434).

2.25.4.4. La Presión de Gases en el Horno en Relación con el Tiro de los Canales.

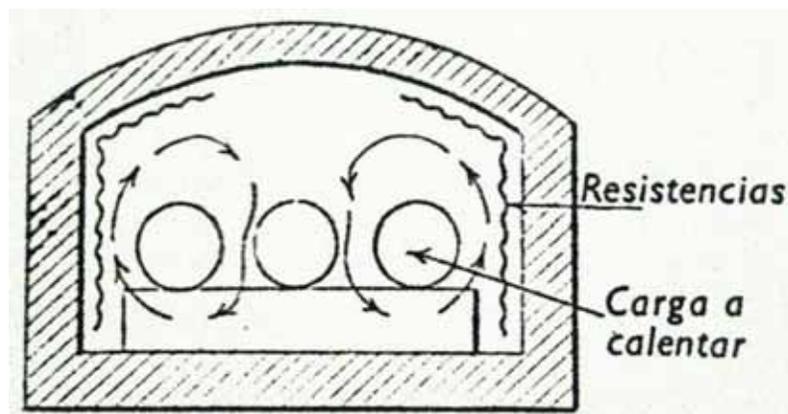
Los fluidos siempre se trasladan de las regiones de alta presión a las de baja, a no ser que la diferencia de presión tenga lugar debido al peso de una columna sobrepuesta de fluido. Para una densidad dada de fluido, cuanto mayor sea la diferencia de presión, el flujo de gas será más rápido. (Trinks, 1975, p 436).

2.25.4.5. *Ubicación de los Dispositivos de Calentamiento y de Combustión.*

Los hornos pueden tener calefacción lateral, según la dirección y recorrido que se desee dar a la llama. Las resistencias, tubos radiantes y quemadores pueden colocarse encima o debajo de la carga, la variedad de distribuciones es muy elevada, así mismo se puede variar el número de quemadores.

Figura 2. 24

Corrientes inducidas por resistencias calientes



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.437; Urmo, S.A. de ediciones

En algunos hornos que se calientan por electricidad, se obtiene la circulación por medios mecánicos. En caso de no existir estos medios se genera una circulación débil de gases en estos hornos como se indica por las flechas en la figura 2.24 (Trinks, 1975, p 437).

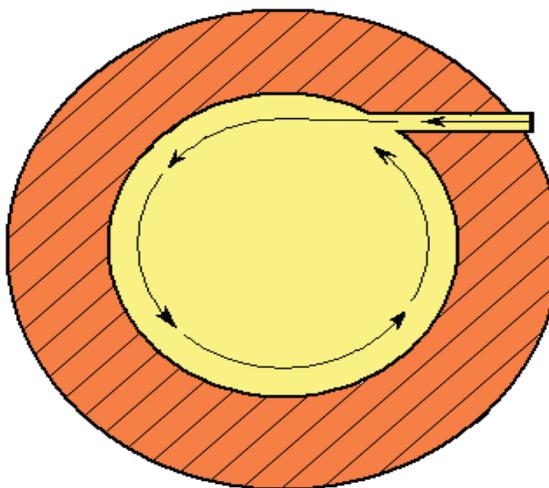
2.25.4.6. *Dirección de Chorro de Gases Calientes o de la Llama.*

En escasos casos se alcanzará un funcionamiento óptimo al dirigir las llamas entre la carga que se ha de fundir. Esto debido a que existe el peligro de que la llama alcance la carga y se produzca oxidación, la llama es signo de una combustión incompleta. Usualmente, la solución apropiada es direccionar los gases calientes a lo largo de una pared refractaria como se muestra en

la figura 2.25 y desviarlos de tal manera que vuelvan detrás de la carga o alrededor de ésta (Trinks, 1975, p 437).

Figura 2. 25

Circulación de gases a lo largo de la pared refractaria del horno



Nota. *Elaboración Propia*)

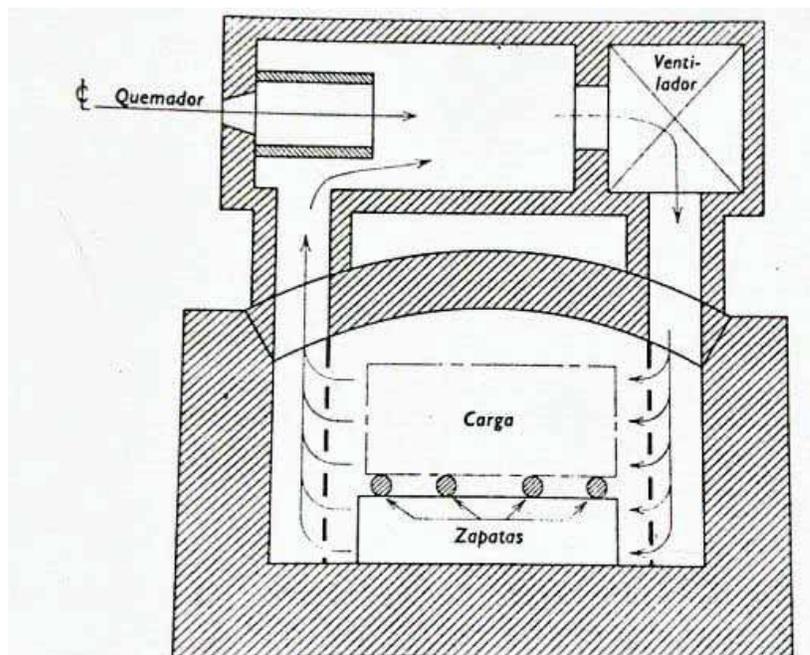
2.25.4.7. Circulación de Gases por Medios Mecánicos (Ventiladores).

La circulación de gases mediante ventiladores mecánicos constituye una necesidad indispensable en hornos con temperaturas menores a 760°C, los hornos que incorporan el principio de recirculación mecánica de gases se ilustran en la figura 2.26. los medios mecánicos pueden producir la circulación de los gases productos de combustión o de la atmósfera en el horno, los mismos que se calientan por resistencias eléctricas o por tubos radiantes (Trinks, 1975, p 445).

“Si se invierte periódicamente la dirección del flujo del gas o aire se incrementa la uniformidad de temperatura para un tiempo de calentamiento determinado, y se acorta el tiempo de calentamiento para una uniformidad dada“(Trinks, 1975, p 445).

Figura 2. 26

Horno con convección forzada



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.89; Urmo, S.A. de ediciones

2.26. Elementos para la Construcción de Hornos.

Los elementos con que se construyen los hornos son simples y bien conocidos. En la mayoría de los hornos, la carga que se ha de calentar o fundir está en la solera. Para proteger la cimentación de las tensiones de dilatación y evitar que la solera se ablande, se dispone de espacios abiertos debajo de esta para la ventilación por circulación de aire; se dice en este caso que la solera esta ventilada. El combustible y el aire ingresan al horno mediante quemadores u orificios, la combustión tiene lugar en la cámara de combustión. Los productos de combustión salen del horno a través de conductos de ventilación, transitando a través de conductos de gases o chimeneas. La cámara de calefacción está rodeada por paredes laterales, que soportan la tapa, que está apoyada sobre las paredes laterales o sobre la estructura de acero. (Trinks, 1975, p 28).

El material utilizado, más comúnmente, en la construcción de hornos es el ladrillo refractario, que se fabrica con arcilla refractaria. Los ladrillos refractarios se clasifican en ladrillos refractarios para grandes temperaturas (temperaturas de fusión mayor que 1744°C), ladrillos medianamente refractarios (temperatura de fusión mayor que 1615°C) y ladrillos ligeramente refractarios. Estos últimos contienen minerales que bajan su punto de fusión (Trinks, 1975, p 28).

Se dispone de ladrillos de diversas formas. Los hornos se construyen con una multiplicidad de dimensiones de ladrillos para evitar un trabajo excesivo en el corte de ladrillos. Para reducir las pérdidas de calor en los hornos, estos se construyen frecuentemente con ladrillo refractario aislante o se recubren con material aislante, que es un material refractario finamente dividido. Raramente se colocan los ladrillos en seco; generalmente se colocan con una capa delgada de mortero entre ellos. Los ladrillos se protegen, ocasionalmente, de la temperatura y atmósfera del horno por un lavado, que se realiza por cepillado o por pulverizado con pistola (Trinks, 1975, p 28).

2.26.1. Paredes y Solera del Horno.

La resistencia y duración de estos elementos tiene considerable importancia.

2.26.1.1. Paredes del Horno.

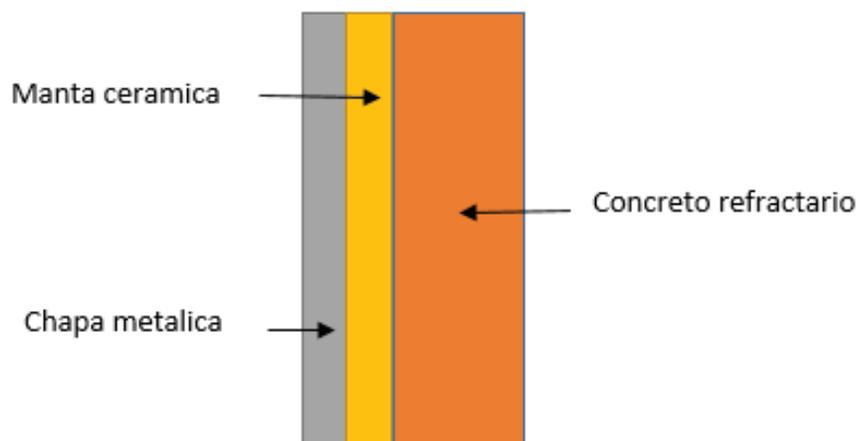
Los materiales constructivos de las paredes del horno constan de concreto refractario como capa refractaria, manta cerámica que constituye la capa aislante y la chapa metálica de acuerdo a la figura 2.27. Las paredes se pueden agrietar, ceder, quemar o derrumbar (Trinks, 1975, p 344).

Las paredes planas, sin orificios, resisten excelentemente en hornos pequeños, incluso cuando la temperatura alcanza los 1260°C. En los hornos grandes existe una serie de causas que crean diversos problemas. En paredes muy largas o muy altas de hornos de alta temperatura, la

dilatación lineal de la pared interna es notablemente diferente de la dilatación de la pared externa. Por la acción de la dilatación de las capas internas, las externas se agrietan. Este agrietamiento incrementa las pérdidas de calor, pero no produce ningún daño estructural, aunque se pueda creer que está cercano al derrumbamiento total del horno. Si, por el contrario, el horno es lo suficientemente resistente para contrarrestar la dilatación, pueden ocurrir diversos fenómenos. Si los ladrillos refractarios son de calidad media, sufrirán deformaciones plásticas en la cara caliente. En caso los ladrillos están colocados muy próximos, sin juntas de dilatación, y si son de tipo aluminosos, se producen roturas en la cara caliente. Si los ladrillos de gran calidad no se sujetan rígidamente, y no hay juntas de dilatación, las paredes pueden torcerse (Trinks, 1975, p 344).

Figura 2. 27

Tabique refractario



Nota. Elaboración propia

2.26.1.2. Solera del Horno.

La solera al ser la base del horno debe ser bastante resistente y aislante al calor. Los ladrillos refractarios utilizados en las paredes son excelentes para la construcción de la solera, pero es

recomendable que estos sean, de mayor espesor, debido a que soportarán el crisol conteniendo la carga a fundir. Para un horno de crisol la solera debe estar sobre una capa de hormigón (Trinks, 1975, p 328).

La solera puede construirse con losas planas que descansan entre pilares, o con arcos normales entre estos, es necesario hacer una solera maciza construida con un material buen conductor del calor. Si la solera es gruesa la temperatura se iguala por sí misma en el interior de los refractarios y la cimentación no sufre ningún daño, pero cuando la solera es delgada el centro de la cimentación se pone más caliente que los bordes del mismo, por lo cual se vence la resistencia a la tracción de la cimentación y produce que este se parta en trozos (Trinks, 1975, p 329).

2.26.2. Puertas de los Hornos.

Las puertas de los hornos deben ser sólidas, ligeras, tener resistencia mecánica, resistencia al calor, y duración.

Los cuerpos metálicos de las puertas deben ser fuertes y suficientemente rígidos para soportar el revestimiento refractario, sin correr el peligro de que se resquebraje, y resistir la tendencia a la deformación debida a la dilatación térmica, para reducir las pérdidas térmicas, el revestimiento debe ser grueso y aislante, pero la tapa no debe tener excesivo peso, con el fin de ofrecer poca resistencia al roce y tener escasa inercia en los movimientos de apertura y cierre. Además, la tapa debe resistir la acción del calor que se escapa del horno.

Las puertas tienen como finalidad el ser abiertas y cerradas. En el momento en el cual se abre la puerta, el revestimiento se enfría y cuando se cierra se calienta, este cambio de temperatura produce que muchas clases de ladrillo refractario se descascaren, el cemento refractario resiste dichos cambios (Trinks, 1975, p 364).

Los hornos de crisol no cuentan con puertas, sino más bien con una tapa superior, la cual cuenta con un orificio o canal que sirve para la expulsión de gases producidos en la combustión, el refractario utilizado en la tapa es un cemento refractario.

“Los cementos refractarios son concretos u hormigones de fragua hidráulica compuestos por un agregado granular refractario y ligantes hidráulicos especiales que se confieren, después de fraguado, todas las propiedades físico-químicas requeridas para resistir un trabajo térmico prolongado. Son muy fáciles de preparar y usar, y se pueden colocar dentro del horno por vaciado, vertiéndolos en un encofrado como cualquier concreto, o manualmente, usando un badilejo, o proyectándolos con pistola neumática” (Calle, 2005, p 35).

2.26.3. Propiedades de los Materiales Utilizados en los Hornos

La construcción de hornos considera materiales como metales, refractarios y hormigon. Los factores externos que afectan la resistencia y la duración de los hornos son:

- Temperaturas altas.
- Variación de temperaturas.
- Acción química de óxidos, compuestos a base de azufre y escoria.
- Oxígeno y otros gases o vapores a alta temperatura.
- Explosiones.
- Desgaste mecánico por desplazamiento de piezas metálicas.
- Vapor de agua.
- Carga excesiva en bóvedas y paredes laterales.
- Asentamiento de cimentaciones.
- Vibraciones.

En general, en un horno los metales se emplean para la resistencia eléctrica, vigas móviles, emparrillados, barras de solera, muflas, rodillos, bandas, cadenas, frentes de horno, cuadros y umbrales de puertas (Trinks, 1975, p 277).

Los metales más económicos son el acero al carbono y el hierro fundido, por lo cual, se emplean dentro de lo posible. Si se exponen a temperaturas altas disminuye su resistencia mecánica y se oxidan.

Los metales a utilizar en la construcción de hornos deben satisfacer dos condiciones:

1. No deben oxidarse rápidamente.
2. No deben sufrir deformaciones permanentes notables por la influencia de tensiones o solo necesitar recuperar su forma inicial después de una amplia utilización.

El horno propiamente dicho (paredes, solera y tapa), debe ser construido con refractarios, que sean poco sensibles al efecto de la atmosfera del horno y las escorias (Trinks, 1975, p 277).

2.27. Decretos Legales Ambientales

Las normas técnicas y decretos legales ambientales, se encuentran en la tabla 2.11, donde se evidencian la información que debe tomarse en cuenta para el adecuado control ambiental y reducción de impacto al medio ambiente que pueda producirse durante la ejecución de construcción y ensamble del horno de crisol basculante.

Tabla 2. 10

Requisitos legales ambientales

IDENTIFICACION DE REQUISITOS LEGALES				
Código	Norma	Fecha de publicación	Artículo aplicable	Texto
Ley N° 28611	Ley General del Ambiente	10/15/2005	32	Del Límite Máximo Permisible – LMP, es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos". (Artículo 32, 32.1)
Ley N° 28611	Ley General del Ambiente	10/15/2005	74	De la responsabilidad general: "Todo titular de operaciones es responsable por las emisiones, efluentes, descargas y demás impactos negativos que se generen sobre el ambiente, la salud y los recursos naturales, como consecuencia de sus actividades. Esta responsabilidad incluye los riesgos y daños ambientales que se generen por acción u omisión". (Artículo 74)
Decreto Supremo 085-2003-PCM	Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Ruido	30.10.2003	4	Los Estándares Primarios de Calidad Ambiental (ECA) "para Ruido disponen los niveles máximos de ruido que no deben excederse en el ambiente para proteger la salud humana. Dichos ECA's toman en consideración parámetros como el nivel de presión sonora continuo equivalente con ponderación. A (LAeqT) y toman en cuenta las zonas de aplicación y horarios, que se establecen en el anexo 07 de este trabajo".
D.S. 085-2003 PCM	Reglamento de estándares de	31/01/2003	Artículo 3	"Contaminación Sonora: Presencia en el ambiente exterior o interior de las edificaciones, de niveles de ruido que genere riesgos a la salud y al bienestar humano".

	Calidad Ambiental para ruido	31/01/2003	Artículo 5	De las zonas de aplicación de las ECA para el Ruido: zona industrial
		31/01/2003	Artículo 9	"De los instrumentos de gestión: Normas técnicas para equipos, maquinarias; vigilancia y monitoreo ambiental de ruido".
Norma Técnica Peruana NTP 900.058	Clasificación de Colores de Contenedores de Residuos	18.05.2005	5.2	"Los residuos desde su generación deben ser segregados de manera que faciliten su identificación, para que puedan ser reaprovechados por el mismo generador o en su defecto ser dispuestos adecuadamente".
	Clasificación de Colores de Contenedores de Residuos	20.06.2020	5	"Aplicación del código de colores El código de colores deberá ser utilizado en los recipientes para el almacenamiento de residuos sólidos, o en las etiquetas que identifiquen el residuo sólido a almacenar".
Decreto Supremo Nro. 019 - 2009 - MINAM	Reglamento de la Ley del Sistema Nacional de Impacto Ambiental	25/09/2009	Artículo 2	Ámbito del Sistema nacional de impacto ambiental: "Asimismo, los proyectos de inversión pública, privada o de capital mixto propuestos por personas naturales o jurídicas, de derecho público o privado, nacionales o extranjeras, que comprendan obras, construcciones y actividades extractivas, productivas, comerciales, de servicios, entre otros, que sean susceptibles de causar impactos ambientales significativos de carácter negativo y que vayan a ejecutarse dentro del territorio nacional, incluyendo las áreas de dominio marítimo e insulares, de conformidad con lo dispuesto en el Título II del presente Reglamento. Toda referencia a actividades, obras, construcciones, edificaciones, comercio, servicios u otros dentro del ámbito del SEIA, entiéndase efectuada a los que forman parte del proyecto de inversión que está sujeto a evaluación de impacto ambiental".
DS 011-2017-MINAN	Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo	2/12/2017	2	"Los ECA para Suelo constituyen un referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, y son aplicables para aquellos parámetros asociados a las actividades productivas, extractivas y de servicios".

3. Capítulo III: Diseño y Construcción del Horno

3.1. Consideraciones de Diseño del Horno

Para iniciar el diseño de horno se parte de variables verídicas de trabajo, que se obtienen durante la realización del proceso de fundición en equipos similares, seguidamente, se indican estas variables:

- Temperatura de fusión
- Tiempo de fusión
- Carga metálica

Con esta información se podrá determinar:

- Requerimiento de calor
- Dimensiones del equipo
- Materiales de construcción

3.2. Determinación Teórica de Dimensiones del Equipo.

3.2.1. Generalidades

Para fundir metales no ferrosos es imperioso un horno que soporte altas temperaturas, Duponchelle (1952), “afirma que en el caso del aluminio se requiere mantener el metal protegido de la contaminación de la combustión” (p 242). El horno de crisol es recomendado para fundir desde unos cuantos gramos para fundiciones de laboratorio, hasta 1400kg de aluminio, el mismo tiene que estar diseñado y construido para resistir las condiciones del proceso de fundición (ASM International, 1998, p 829).

3.2.2. Dimensionamiento del Horno de Crisol.

El dimensionamiento del horno se realiza tomando en consideración las dimensiones del crisol seleccionado (Metal casting,2012, p 9).

En el título 3.8 selección de materiales del presente trabajo se describe el proceso para la elección del crisol apropiado para este horno, se determina que el tamaño de crisol adecuado para 15 kg de aluminio es el crisol de grafito A-30, cuyas características se expresan en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1

Características del crisol

Descripción	Dimensiones			
	Altura	Diámetro	Diámetro	Peso
	(cm)	superior (cm)	inferior (cm)	(kg)
Crisol de grafito – Morgan A-30	29	23	16	6

Nota. Recuperado de *Cot 18-0493 metal/insumos* (Anexo 2)

3.2.2.1.Determinación del espesor de la cámara de combustión

Para el cálculo del espesor de cámara de combustión se necesitan tres parámetros:

- Capacidad de calentamiento kg / mm²
- Contenido calórico del metal kcal/Kg
- Espacio de combustión Kg / s. m³

Para determinar el espesor de la cámara de combustión del horno se parte de la ecuación 3.1:

$$e = \frac{CC \times \text{contenido calórico}}{\text{espacio de combustion}} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde:

CC = capacidad de calentamiento del horno

Contenido calórico = se considera el contenido calórico del aluminio

Espacio de combustión = se estima una combustión completa

3.2.2.2. Capacidad de Calentamiento.

Para hornos de carga discontinua como es el de crisol, la capacidad de calentamiento se representa por el peso del metal que puede calentar en una unidad de tiempo a una temperatura dada y sin que se produzca sobrecalentamiento en la carga. En la ecuación 3.2 se muestra como determinar este valor (Trinks, 1975, p 63).

$$CC = \frac{m}{t \times \text{superficie calentada}} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde:

m = peso calentado 15 kg

t = tiempo de fusión 1 h

Se considera 1h de tiempo, con el objetivo de determinar la capacidad de calentamiento en una unidad de tiempo expresado en horas.

La superficie calentada se determina mediante la suma del área lateral y el área de la base del crisol, se expresa en la ecuación 3.3 (Trinks, 1975, p 63).

$$\text{Superficie calentada} = \text{área lateral} + \text{área de la base} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Para determinar el área lateral, nos apoyamos en las ecuaciones 3.4 (Galdós, 2005.p 242):

$$\text{Área lateral} = \pi g (r + r') \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Donde:

r = radio inferior del crisol

r' = radio superior del crisol

g = generatriz

La generatriz del crisol se determina haciendo uso de la ecuación 3.5 (Galdós, 2005.p 242).

$$g = \sqrt{h^2 + (r' - r)^2} \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

Donde:

h = altura del horno

Para determinar la generatriz, se considera los datos de la tabla 3.1.

$$g = \sqrt{29^2 + (11.5 - 8)^2}$$

$$g = 29.21 \text{ cm}$$

Aplicando la ecuación 3.4 y los datos que se muestran en la tabla 3.1, se halla el valor del área lateral del crisol.

$$\text{Área lateral} = 3.1415 \times 29.21 \text{ cm} (11.5 \text{ cm} + 8 \text{ cm})$$

$$\text{Área lateral} = 1789.38 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área lateral} = 0.17 \text{ m}^2$$

El área de la base del crisol se determina mediante el uso de la ecuación 3.6 (Galdós, 2005.p 245)

$$\text{Área de la base} = \pi r^2 \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

Aplicando la ecuación 3.6, y considerando los datos de la tabla 3.1, determinamos el área de la base del crisol.

$$\text{Área de la base} = \pi (8 \text{ cm})^2$$

$$\text{Área de la base} = 201.06 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área de la base} = 0.02 \text{ m}^2$$

Para determinar el valor de la superficie calentada reemplazamos los valores del área lateral y área de base del crisol en la ecuación 3.3.

$$\text{Superficie calentada} = 0.17 \text{ m}^2 + 0.02 \text{ m}^2$$

$$\text{Superficie calentada} = 0.19 \text{ m}^2$$

Finalmente, para determinar la capacidad de calentamiento aplicamos el valor de la superficie calentada en la ecuación 3.2.

$$CC = \frac{15 \text{ Kg}}{1 \text{ h} \times 0.19 \text{ m}^2}$$

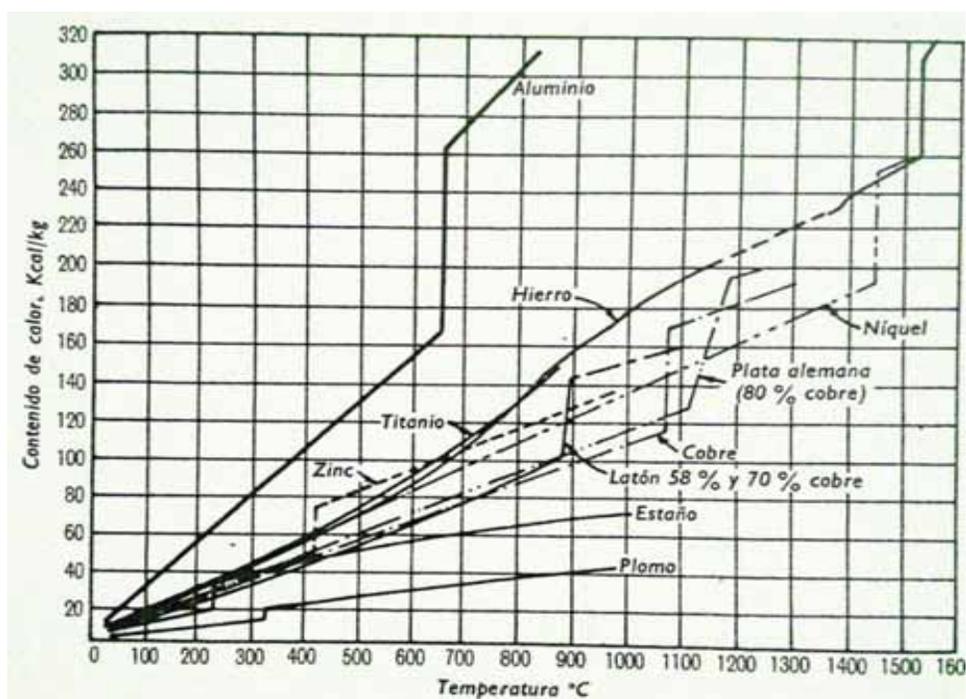
$$CC = 78.95 \frac{\text{Kg}}{\text{hm}^2}$$

3.2.2.3. Contenido Calórico.

Para determinar el valor del contenido calórico del aluminio, nos apoyamos en la figura 3.1, en la cual se observa el contenido calórico de diferentes metales a distintas temperaturas.

Figura 3.1

Contenido calórico de los metales



Nota. Tomado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.31; Urmo, S.A. de ediciones

En la figura 3.1 se observa la curva del aluminio, en base a la cual se determina que a una temperatura de 800°C la cantidad de calor que absorbe el aluminio es 320 kcal/kg (Trinks, 1975, p 31).

Se considera 800 °C debido a que es la temperatura optima de colado del aluminio, y se estima que sea la temperatura máxima a la cual este expuesta el aluminio en el proceso de fundición.

3.2.2.4.Espacio de Combustión.

Es el volumen necesario para que se lleve a cabo una combustión total. En la tabla 2.9 se observa la cantidad de calor liberado en cada condición de combustión (Trinks, 1975, p 66).

En este caso se estima una mezcla completa entre combustible y aire, en la tabla 2.9 se expresa que el valor para esta condición de combustión es 160.11 Kcal/s.m³, es decir que para la utilización perfecta del espacio de combustión se requiere 160.11 kcal por metro cubico de aire en un segundo.

Conocidos los siguientes datos es posible determinar el espesor de la cámara de combustión, mediante el uso de la ecuación 3.1.

Datos:

$$\text{CC} = 78.95 \text{ kg/hm}^2$$

$$\text{Contenido calórico} = 320 \text{ kcal/kg}$$

$$\text{Espacio de combustión} = 160.11 \text{ kcal/s. m}^3$$

$$e = \frac{78.95 \frac{\text{Kg}}{\text{hm}^2} \times 320 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}}{160.11 \frac{\text{Kcal}}{\text{s. m}^3}}$$

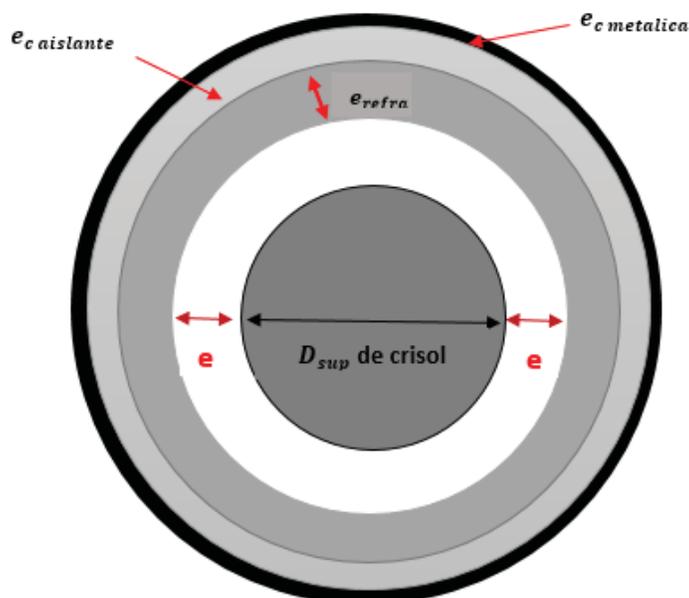
$$e = 4.38 \text{ cm}$$

3.3. Diámetro Interno del Horno

Con el fin de determinar el diámetro interno del horno se toma como referencia la figura 3.2, en donde se muestra los diámetros del crisol, la cámara de combustión, concreto refractario, capa aislante y chapa metálica.

Figura 3. 2

Esquema interno del horno



Nota. elaboración propia

En base a la figura 3.2, se resuelve que el diámetro interior del horno es la suma del doble del espesor de la cámara de combustión más el diámetro superior del crisol, como se expresa en la ecuación 3.7.

$$D_{\text{interior}} = 2e + D_{\text{sup crisol}} \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

Donde:

e = espesor de la cámara de combustión

$D_{\text{sup crisol}}$ = Diámetro superior del crisol

Se toman los datos de la tabla 3.1 y el valor del espesor de la cámara de combustión hallado anteriormente y se reemplazan en la ecuación 3.7.

$$D_{\text{interior}} = 2 (4.38\text{cm}) + 24 \text{ cm}$$

$$D_{\text{interior}} = 32.76 \text{ cm}$$

$$r_{\text{interior}} = 16.38 \text{ cm}$$

3.4. Diámetro Externo del Horno

Para determinar el diámetro externo del horno se requiere conocer los espesores de la capa refractaria, capa aislante y espesor de la chapa metálica.

Para definir los espesores de la capa refractaria y capa aislante se considera la tabla 3.2, que expresa el porcentaje de pérdida de calor en relación al espesor de la capa refractaria y la capa aislante usado en el horno (Trinks, 1975, p 220).

Para hornos que trabajan a temperaturas de 870 a 1000 °C, se recomienda la utilización de ladrillos que van de 4,5" hasta 39,37" de espesor (Trinks, 1975, p 345).

Tomando en cuenta que el punto de colado óptimo para el aluminio es de 800°C, considerando la tabla 3.2, y teniendo en mente la recomendación anterior se resuelve que el espesor apropiado de refractario es de 4,5", debido a que este valor se asemeja más a la temperatura de funcionamiento del horno, en base a este dato, y considerando un ciclo aproximado de 1h a 8h de funcionamiento, según el cuadro 3.2 se recomienda un espesor de 2,5" de aislante, lo que da como resultado solo 25 % de calor perdido por las paredes.

El objetivo principal de la chapa metálica, constituye formar una estructura de soporte para resguardar y sostener los componentes internos del horno, considerando el peso total de los

componentes del horno, se decide usar un acero estructural ASTM A36 de 0.3 cm de espesor, cuyas características se muestran en el anexo 7.

Tabla 3. 2

Reducción de pérdidas de calor a través de las paredes del horno

Espesor de la pared de ladrillo refractario	Funcionamiento continuo		Ciclo 1 semana, aislante 63,5 mm(2,5")	Ciclo 1 día, 6 días por semana, aislante 63,5 mm(2,5")
	Aislante 63,5 mm (2,5")	Aislante 127 mm(5")		
114,30 (4,5")	62	76	58	25
228,60 (9")	46	65	36	18
342,90 (13,5")	38	57	20	14
457,20 (18")	35	53	15	12

Nota. Recuperado de *Hornos industriales*, por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.220, Urmo,S.A. de ediciones

Los espesores necesarios para hallar el diámetro externo del horno son:

- capa refractaria = 11.43 cm
- capa aislante = 6.35 cm
- chapa metálica = 0.3 cm

El diámetro externo del horno se determina haciendo uso de la ecuación 3.8 y 3.9.

$$D_{\text{externo}} = 2 \cdot r_{\text{externo}} \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

$$r_{\text{externo}} = r_{\text{interno}} + e_{\text{refra}} + e_{\text{c aislante}} + e_{\text{c metalica}} \quad (\text{Ecuación 3.9})$$

Con los datos obtenidos, se determina el r_{externo} mediante el uso de la ecuación 3.9.

$$r_{\text{externo}} = 16.38\text{cm} + 11.43\text{cm} + 6.35\text{cm} + 0.3\text{cm}$$

$$r_{\text{externo}} = 34.46\text{cm}$$

Aplicando el valor de r_{externo} en la ecuación 3.8 se determina el valor del diámetro externo.

$$D_{\text{exterior}} = 34.46\text{cm} * 2$$

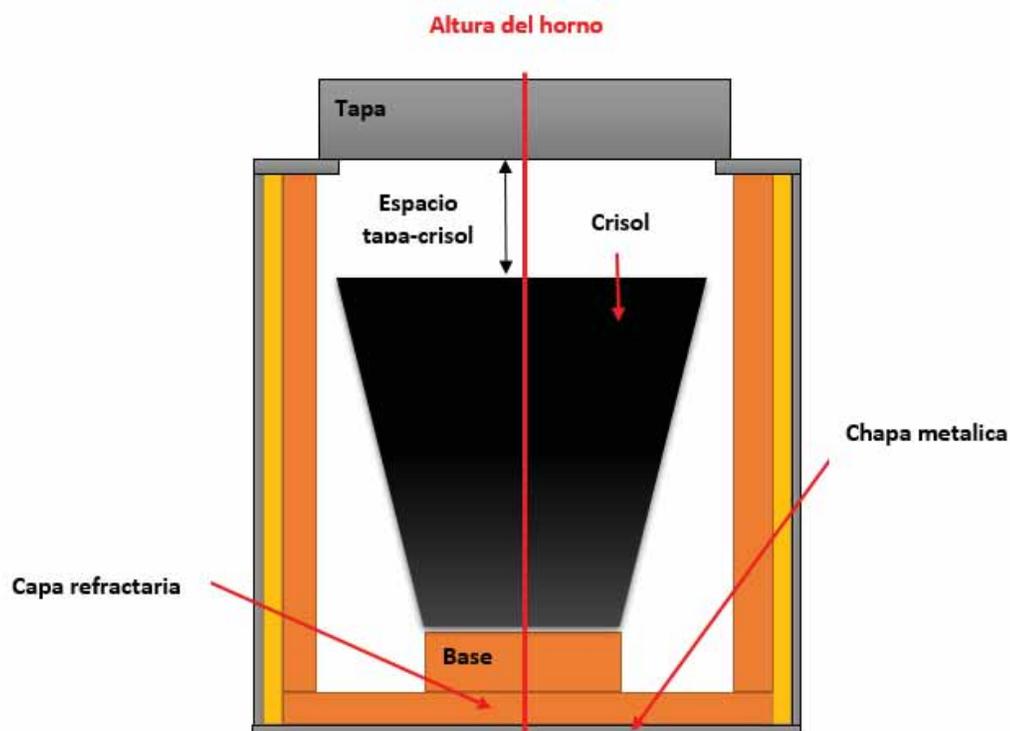
$$D_{\text{exterior}} = 68.92\text{cm}$$

3.5. Altura del Horno

A fin de conocer la altura del horno se parte de la figura 3.3, de la cual se determina que la altura del horno es la suma de alturas de los componentes del horno tal como se expresa en la ecuación 3.10.

Figura 3.3

Corte transversal del horno



Nota. Elaboración propia

$$\text{Altura del horno} = L_{\text{c metalica}} + L_{\text{refra}} + L_{\text{base h}} + L_{\text{crisol}} + L_{\text{e tapa-crisol}} + L_{\text{tapa h}} \quad (\text{Ecuacion 3.10})$$

Donde:

L_c metalica = altura de chapa metálica

L_{refra} = altura del refractario

$L_{base h}$ = altura de base del crisol

L_{crisol} = altura de crisol

L_e tapa-crisol = altura del espacio entre el diámetro superior del crisol y la tapa

$L_{tapa h}$ = altura de la tapa del horno

La altura de base del horno depende de la ubicación del quemador, el mismo que debe ubicarse de 6 a 12 cm de la base refractaria del horno, tomando en cuenta que el quemador debe estar situado entre el crisol y su base (Metal casting,2012, p 9).

Considerando un promedio del rango de ubicación del quemador, se decide que la altura adecuada de base del crisol es de 10 cm, con este dato y con el conocimiento que el diámetro de la base es igual al diámetro inferior del crisol el mismo valor que se encuentra en la tabla 3.1, por tanto, determinamos el área de la base que es 502.64 cm^2 (Metal casting,2012, p 9).

Teniendo en cuenta que el espacio entre el borde superior del crisol y la tapa del horno va de 2.54 cm a 5.08 cm. Por consiguiente, según las dimensiones del horno se opta que la separación entre el crisol y la tapa del horno es 5 cm, (Metal casting,2012, p 9).

Por razones de ligereza, el revestimiento refractario de la tapa debe tener un espesor máximo de 11.5cm. La altura de la tapa del horno es la suma de espesores de capa refractaria más la chapa metálica, siendo esta suma 11.8 cm que expresa el espesor de la tapa del horno (Trinks, 1975, p 363).

Reemplazando los datos anteriormente obtenidos en la ecuación 3.10, se determina la altura del horno.

$$\text{Altura del horno} = 0.3\text{cm} + 11.43\text{cm} + 10\text{ cm} + 29\text{cm} + 5\text{ cm} + 11.8\text{ cm}$$

$$\text{Altura del horno} = 67.53\text{cm}$$

3.6.Área de Base y Tapa del Horno

3.6.1. Base del Horno

El área de la base del horno de crisol basculante se determina mediante el uso de la ecuación 3.6, considerando el diámetro externo del horno, 68.92cm, dando así un área de 0.37m².

3.6.2. Tapa del Horno

A fin de determinar el área de la tapa del horno se considera como diámetro 38.77 cm, que representa la suma del diámetro interno del horno 32.76 cm, la mitad del espesor del refractario 5.715 cm y el espesor de la chapa metálica 0.3 cm, dando así un área de 0.118 m²

3.7.Cálculos de Combustión.

3.7.1. Determinación de Aire Teórico – Coeficiente de Exceso de Aire.

La medida mínima de aire requerida para la combustión de los reactivos es conocida como aire teórico. En caso la combustión se lleve a cabo con el aire teórico esta tendría que efectuarse completamente, usualmente en la práctica esto es poco probable. Se requiere más oxígeno del teóricamente requerido para alcanzar la combustión total de los reactivos, se necesita por tanto un exceso de aire. Este exceso de aire usualmente se expresa como un porcentaje del aire teórico y se conoce como coeficiente de exceso de aire.

En base al anexo 8, se considera un valor medio del 20%, de exceso de aire. Debido a las condiciones ambientales del lugar donde se instalará el equipo, la composición del gas natural

según información del Ministerio de Energía y Minas el cual se muestra en la tabla 2.4, contiene 95.08% de metano y 2.14% de etano.

3.7.2. Flujo de Combustible

Para determinar el flujo de combustible para la fusión de aluminio se parte de datos obtenidos experimentalmente, los mismos que se expresan en la tabla 3.5, 3.6 y 3.9.

Para la fusión de 15 kg de aluminio se emplearon 3.390 Kg de Gas natural cuya composición según el ministerio de energía y minas es CH₄; 95.08% y C₂H₆; 4.92 %, considerando un tiempo de 40 min en el cual se tarda en realizar el calentamiento y poder llevarse a cabo el proceso de fusión.

Tomando en consideración el porcentaje de los constituyentes del Gas natural, Se determina el flujo másico del propano y butano, en base a la cantidad de combustible usado.

$$\text{Metano} \quad m = \frac{3223.212 \text{ gr}}{40 \text{ min}} = 80.580 \text{ gr/min}$$

$$\text{Etano} \quad m = \frac{166.788 \text{ gr}}{40 \text{ min}} = 4.169 \text{ gr/min}$$

Las reacciones químicas de combustión total del Gas natural, en base a la composición del combustible son las siguientes.



Asimismo, reaccionan el aluminio y el cloruro de sodio que se usa como escorificante:



El O₂ requerido para que ocurra la combustión se determina teniendo en cuenta las reacciones químicas a, b, c y d:

$$- 3223.212 \text{ gr CH}_4 \times \frac{2(32 \text{ gr O}_2)}{16 \text{ gr CH}_4} = 12892.848 \text{ gr O}_2.$$

$$- 166.788 \text{ gr C}_2\text{H}_6 \times \frac{2(32 \text{ gr O}_2)}{2(30 \text{ gr C}_2\text{H}_6)} = 622.67 \text{ gr O}_2.$$

Sub total: 13515.518 gr O₂ = 13.515 Kg O₂.

Considerando que la combustión necesita un 20% de exceso de O₂, por lo cual el oxígeno total requerido para la combustión se determina mediante la suma del oxígeno requerido teóricamente y el 20 % de oxígeno en exceso, dando un total de 16.218 kg de O₂:

$$(13515.518)0.20 = 2705.10 \text{ gr O}_2 \text{ en exceso.}$$

$$\text{Total: } 16218.627 \text{ gr O}_2 = 16.218 \text{ Kg O}_2$$

Para determinar la cantidad de aire necesaria para la combustión se requiere conocer el porcentaje en peso del O₂ y N₂ presentes en el aire, el cual es:

$$\text{O}_2 : 23.2\%$$

$$\text{N}_2 : 76.8\%$$

En base a esta composición y considerando el O₂ total requerido para la combustión, se determina el N₂ presente en el aire.

$$15309.763 \text{ gr O}_2 \times \frac{76.8 \text{ gr N}_2}{23.2 \text{ gr O}_2} = 50680.595 \text{ gr N}_2.$$

La cantidad de aire necesario para hacer posible la combustión es 65990.35 gr = 65.990 Kg aire.

3.7.3. Balance de Masa y Energía.

3.7.3.1. Balance de Masa.

Tiene como base la ley de conservación de la materia, la cual dispone que la masa de un sistema se mantiene siempre constante. Por consiguiente, la ecuación 3.11 expresa el cálculo de ingresos y salidas de masa en un proceso (Granados, 2018, p 2):

$$\text{Entrada} = \text{salida} + \text{acumulación} \quad (\text{Ecuación 3.11})$$

Donde:

Entrada = Masa del metal a ser fundido

Salida = Masa del metal fundido

Acumulación = Masa de la escoria

3.7.3.2. Balance de Energía.

“La ley de conservación de energía, afirma que la energía total del proceso no se crea, ni se destruye, solo se transforma” (Elenanolasco27, 2021). El calor liberado por el combustible en un horno es equivalente a la suma del calor requerido para el proceso de calentamiento tenga lugar, más las pérdidas de calor, en la figura 3.4 se muestra un esquema de balance de energía en el horno.

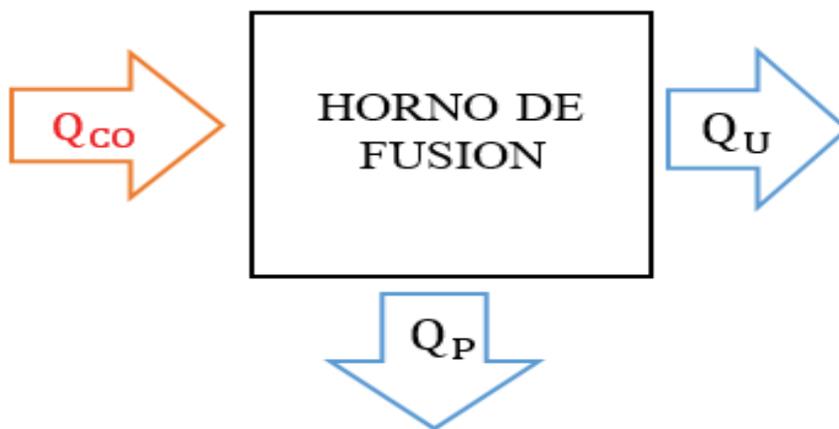
En base al esquema de la figura 3.4, se obtiene la ecuación 3.12, el balance de calor en un horno.

Donde:

Q_{CO} = Calor liberado por el combustible (Kcal/h)

Q_P = Calor total perdido por el horno (Kcal/h)

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

Figura 3. 4*Esquema de balance de energía*

Nota. Elaboración propia

$$Q_{CO} = Q_U + Q_P \quad (\text{Ecuación 3.12})$$

3.7.4. Determinación del Calor Útil.

El calor útil se determina tomando en consideración el calor entregado a la carga metálica y el calor absorbido por el crisol, mediante la ecuación 3.13.

$$Q_U = Q_{\text{carga metálica}} + Q_{\text{absorbido crisol}} \quad (\text{Ecuación 3.13})$$

Donde:

Q_U = Calor útil para la fusión (Kcal/hr)

$Q_{\text{carga metálica}}$ = Calor que se entrega a la carga metálica (Kcal/hr)

$Q_{\text{absorbido crisol}}$ = Calor que es absorbido por el crisol (Kcal/hr)

3.7.4.1. Determinación del Calor a Entregarse a la Carga Metálica.

En este caso se tiene que tener en cuenta las consideraciones siguientes:

Q₁: Conocer el calor necesario para elevar la carga metálica de la temperatura ambiente 25°C, hasta la temperatura de fusión del aluminio 660°C.

Q₂: Conocer el calor requerido por una cantidad de carga, para provocar un cambio de fase, conocido como el calor latente de fusión.

Q₃: Conocer la cantidad de calor requerida para elevar la carga metálica de la temperatura de fusión a la temperatura de colado, La temperatura óptima para el colado del metal es alrededor de 760 °C.

Por tanto, el calor ha de entregarse a la carga metálica es la suma de Q_1 , Q_2 y Q_3 , se determina mediante la ecuación 3.14.

$$Q_{\text{carga metalica}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (\text{Ecuación 3.14})$$

Para determinar el valor de Q_1 , Q_2 y Q_3 , Partiremos de la ecuación 3.15, la cantidad de calor que puede ganar o perder un cuerpo depende de su masa, de su calor específico y la diferencia de temperaturas (Cengel, 2007, p 12).

$$Q = mC_p(T_f - T_0) \quad (\text{Ecuación 3.15})$$

Donde:

Q = Calor (Kcal)

m = Masa de la carga (Kg)

C_p = Calor específico de la carga (Kcal/Kg°C)

T_f = Temperatura final (°C)

T_0 = Temperatura inicial (°C)

Se establece como base de cálculo 15 kg de aluminio, para hallar el valor de Q_1 , Q_2 y Q_3 .

Determinando Q_1 :

Para determinar Q_1 , el calor requerido para aumentar la temperatura de 25 °C a 660 °C, se aplica la ecuación 3.5.

Datos:

m = Masa del aluminio (15 Kg)

C_p = Calor específico del aluminio (0.23 Kcal/Kg°C)

T_f = Temperatura de fusión del aluminio (660°C)

T_0 = Temperatura ambiente (25°C)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.5:

$$Q_1 = 15 \text{ Kg}(0.23 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C})(660^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$Q_1 = 2190.75 \text{ KCal}$$

Determinando Q_2 :

Para determinar Q_2 , cantidad de calor requerido para provocar una variación de fase, se utiliza la ecuación 3.16, que es el producto de la masa del metal por el calor latente de fusión del metal.

$$Q_2 = m\lambda \quad (\text{Ecuación 3.16})$$

Datos:

m = Masa del aluminio 15Kg

λ = Calor latente de fusión del aluminio 94 Kcal/Kg

Reemplazando los datos en la ecuación 3.16:

$$Q_2 = 15\text{Kg}\left(94 \frac{\text{KCal}}{\text{Kg}}\right)$$

$$Q_2 = 1410 \text{ KCal}$$

Determinando Q_3 :

Para determinar Q_3 , el calor requerido para alcanzar la temperatura de colado, se emplea la ecuación 3.15.

Datos

m = Masa del aluminio (15 Kg)

C_p = Calor específico del aluminio (0.23 Kcal/Kg°C)

T_f = Temperatura de colado del aluminio (760°C)

T_0 = Temperatura de fusión del aluminio (660°C)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.15:

$$Q_3 = 15 \text{ Kg}(0.23 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C})(760^\circ\text{C} - 660^\circ\text{C})$$

$$Q_3 = 345 \text{ Kcal}$$

Por consiguiente, la cantidad total de calor necesaria que ha de transmitirse a la carga metálica será la suma de los calores individuales obtenidos con anterioridad, se reemplazan los valores de Q_1 , Q_2 y Q_3 , en la ecuación 3.14.

$$Q_{\text{carga metálica}} = 2190.75 + 1410 + 345$$

$$Q_{\text{carga metálica}} = 3945.75 \text{ KCal}$$

3.7.5. Calor Absorbido por el Crisol.

El calor absorbido por el crisol durante el funcionamiento del horno, se determina mediante la aplicación de la ecuación 3.15:

$$Q_{\text{Absorbido crisol}} = mc_p(T_f - T_0) \quad (\text{Ecuación 3.15})$$

Se toma los datos de la tabla 3.1, características del crisol

Donde:

$$Q_{\text{Absorve crisol}} = \text{Calor que absorve el crisol}$$

- m = Masa del crisol 6Kg
 C_p = Calor específico del crisol 0,31 Kcal/Kg °C
 T_0 = Temperatura ambiente 25°C.
 T_f = Temperatura del crisol 760°C

Cabe mencionar que T_f es la temperatura del crisol cuando el aluminio está a la temperatura de colado, es decir 760°C.

Reemplazando datos en la ecuación 3.15.

$$Q_{\text{Absorvido crisol}} = 6\text{Kg}(0.31\text{Kcal/Kg}^\circ\text{C})(760^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$

$$Q_{\text{Absorvido crisol}} = 1562.4 \text{ Kcal}$$

3.7.6. Calor Útil para la Fusión de Aluminio

Por lo tanto, el calor requerido para la fusión de aluminio, será la suma del calor que ha de transmitirse a la carga metálica, más el calor que el crisol absorbe, como lo expresa la ecuación 3.13.

Donde:

$$Q_U = \text{Calor util para la fusion del aluminio Kcal}$$

$$Q_{\text{carga metalica}} = \text{Calor que ha de entrega a la carga metalica } 3945.75 \text{ KCal}$$

$$Q_{\text{Absorvido crisol}} = \text{Calor absorbido por el crisol } 1562.4 \text{ Kcal}$$

Reemplazando datos en la ecuación 3.13:

$$Q_U = 3945.75\text{Kcal} + 1562.4 \text{ Kcal}$$

$$Q_U = 5508.15\text{Kcal}$$

El valor resultante se divide entre 0.6 hr que representa 40 min, siendo este el tiempo requerido para llegar a la temperatura de fusión, el mismo que se encuentra en la tabla 3.5.

$$Q_U = 9180.250 \text{ Kcal/hr}$$

Se requiere 9189.250 kcal de calor útil para lograr que el horno de crisol llegue a la temperatura de fusión en 40 min.

3.7.7. Pérdidas de Calor en el Horno.

Es fundamental que la cantidad de calor que se transmite a la carga metálica sea de gran medida, para ahorrar en combustible, es posible conseguirlo estudiando las pérdidas de calor que se provocan por las paredes cilíndricas y planas del horno, tanto por conducción como por convección.

A fin de desarrollar el cálculo de las pérdidas de calor a través de las paredes del horno, se tomará en cuenta las dimensiones de este.

3.7.8. Perfil de Temperaturas.

En la figura 3.5 se muestra una gradiente de temperaturas, correspondiente a la transferencia de calor a través de las paredes del horno de crisol.

La simbología respectiva a la figura 3.5 es:

T_1 = Temperatura en la pared interna del horno ($^{\circ}$ C).

T_2 = Temperatura en la intercara del refractario con la capa aislante ($^{\circ}$ C).

T_3 = Temperatura en la pared aislante y la chapa metálica del horno ($^{\circ}$ C).

T_4 = Temperatura externa del horno ($^{\circ}$ C).

T_a = Temperatura del medio ambiente ($^{\circ}$ C).

r_1 = Radio interno del horno (cm)

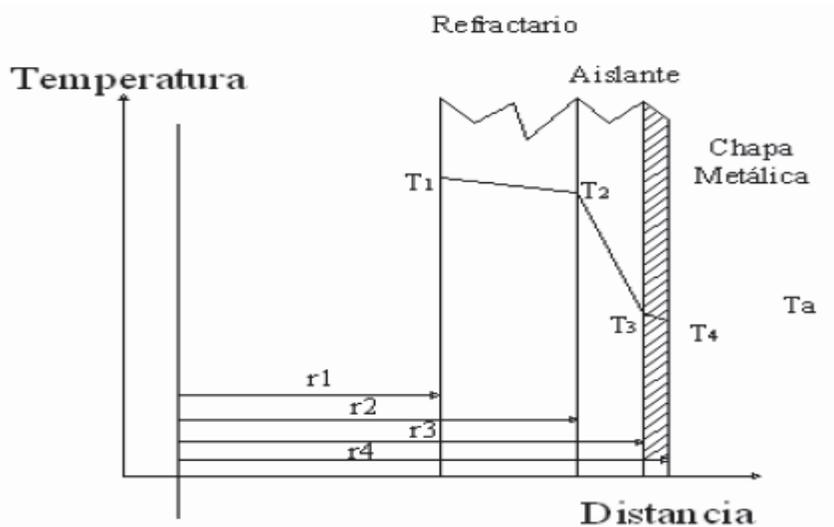
r_2 = Radio del horno hasta la intercara del refractario y la capa aislante del horno (cm)

r_3 = Radio del horno hasta la cara aislante y chapa metálica del horno (cm)

r_4 = Radio externo del horno (cm)

Figura 3. 5

Perfil de temperaturas al interior del horno

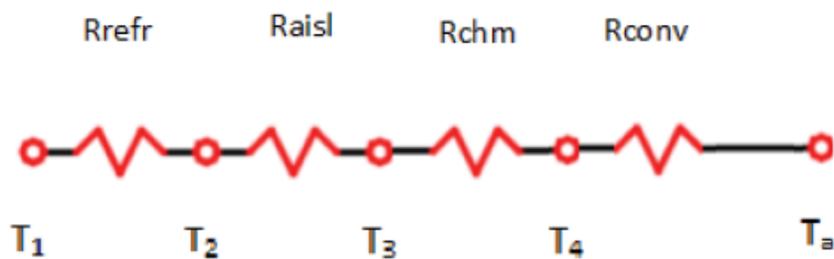


Nota. Adaptado de *Hornos industriales*; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.131; Urmo, S.A. de ediciones

En la figura 3.6 se muestran las resistencias térmicas correspondientes a los materiales que se encuentran en la figura 3.5.

Figura 3. 6

Esquema de resistencias para el horno



Nota. Elaboración propia

La simbología correspondiente a la figura 3.6 es:

R_{refr} = Resistencia en ladrillo refractario

R_{aisl} = Resistencia en capa aislante

$R_{\text{ch m}}$ = Resistencia en chapa metálica

R_{conv} = Resistencia en aire debido al proceso de transferencia de calor por convección

Para escribir las resistencias térmicas para cada material presente en la figura 3.5, se considera datos que se encuentran en las pag 108 y 109 del presente trabajo. De igual manera cabe mencionar que la resistencia térmica para el medio ambiente esta simbolizado por R_{conv} .

$$R_{\text{refr}} = \frac{\ln\left(\frac{0.278}{0.163}\right)}{2\pi(0.44)0.650} \quad (\text{a})$$

$$R_{\text{aisl}} = \frac{\ln\left(\frac{0.341}{0.278}\right)}{2\pi(0.44)0.160} \quad (\text{b})$$

$$R_{\text{ch m}} = \frac{\ln\left(\frac{0.344}{0.341}\right)}{2\pi(0.44)44.6} \quad (\text{c})$$

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{(3.85)2\pi(0.344)} \quad (\text{d})$$

Usualmente el calor conducido a través de un cuerpo se debe eliminar o transferir mediante algún proceso de convección. En este caso, el calor que se pierde por conducción a través de la pared del horno que se muestra en la figura 3.5, posteriormente se disipa hacia al medio ambiente por medio de convección, llegando hasta la temperatura ambiente (Holman, 1999, p 56).

Para la determinación de la transferencia de calor en un caso práctico, es recomendable un análisis combinado de conducción-convección. Comenzamos con un balance de energía en las paredes del horno, tomando en consideración el espesor de este. En base a este fundamento se tiene: Energía producida en la cámara de combustión es igual a la energía que sale por la cara externa de la pared más la energía disipada por convección (Holman, 1999, p 56).

Así mismo, tomando como base la figura 3.5, las siguientes ecuaciones son las que rigen la transferencia de calor por las paredes del horno.

3.7.9. Conducción.

3.7.9.1. Paredes planas.

La pérdida de calor a través de una capa plana es equivalente a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de la capa, se muestra en la ecuación 3.17, (Cengel, 2007, p 18).

$$Q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{e} \quad \text{(Ecuación 3.17)}$$

Esta ecuación se reacomoda como se muestra en la ecuación 3.18:

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{e}{kA}} \quad \text{(Ecuación 3.18)}$$

Donde:

A = Área de transferencia de calor

e = Espesor de la pared

k = Coeficiente de transferencia de calor por conducción

$T_1 - T_2$ = Diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared

3.7.9.2. Paredes Cilíndricas.

La pérdida de calor a través de capas cilíndricas se expresa en la ecuación 3.19, donde el área depende del radio, longitud y conductividad térmica del cuerpo cilíndrico (Cengel, 2007, p 150).

$$Q = \frac{A K (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad \text{(Ecuación 3.19)}$$

Al sustituir $A = 2\pi rL$ en la ecuación 3.19 y realizar la integración, se obtiene la ecuación 3.20.

$$Q = \frac{2\pi r L K (T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{2\pi L} \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k} \right)} \quad (\text{Ecuación 3.20})$$

Donde:

k = Coeficiente de conductividad termica del material

L = Longitud de pared cilindrica

$T_1 - T_2$ = Diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared

r_1 = Radio interno de la pared

r_2 = Radio externo de la pared

3.7.10. Convección.

3.7.10.1. Paredes Planas.

La pérdida de calor por convección a través de paredes planas se expresa en la ecuación 3.21, es proporcional al producto del área a través de la cual se lleva a cabo la transferencia de calor, por el coeficiente de transferencia de calor por convección y a la diferencia de temperaturas de las paredes (Cengel, 2007, p 26).

$$Q = Ah(T_s - T_\infty) \quad (\text{Ecuación 3.21})$$

Donde:

A = Area de la pared

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección del material

T_s = Temperatura de la superficie

T_∞ = Temperatura del medio ambiente

3.7.10.2. Paredes Cilíndricas.

La pérdida de calor por convección a través de paredes cilíndricas es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas de las paredes e inversamente proporcional al producto del coeficiente de transferencia de calor por el área de la superficie cilíndrica, se determina mediante la ecuación 3.22. (Cengel, 2007, p 151).

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{hA}} \quad (\text{Ecuación 3.22})$$

Al sustituir $A = 2\pi rL$, en la ecuación 3.22, se obtiene la ecuación 3.23.

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{2\pi rLh}} \quad (\text{Ecuación 3.23})$$

Donde:

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección

$T_1 - T_2$ = Diferencia de temperaturas de uno a otro lado de la pared

r = Radio de la superficie cilíndrica

L = Longitud de pared cilíndrica

3.7.11. Radiación

Las pérdidas de calor por radiación a través de las paredes, tapa y base del horno se determinan mediante la ecuación 3.24, la cual varía en función al área a través de la cual se lleva a cabo la transferencia de calor (Cengel, 2007, p 28).

$$Q_{radiacion} = \varepsilon\sigma A_S(T_S^4 - T_{atrd}^4) \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

Donde:

ε = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

σ = Emisividad

A_S = Área superficial

T_s^4 =Temperatura del alrededor

T_{alrd}^4 =Temperatura superficial

3.7.12. Determinación de Perdidas de Calor

3.7.12.1. Perdidas de Calor a Través de las Paredes Cilíndricas

3.7.12.1.1. Por Conducción

Para calcular la pérdida de calor por conducción a través de las paredes cilíndricas, se asume la figura 3.5 como representación de las paredes presentes en el horno de crisol y partiendo de la ecuación 3.20, considerando distintos los materiales de las paredes se realiza la suma de conductividades de estas, por tanto, se obtiene la ecuación 3.25.

$$Q_{\text{conduccion}} = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{1}{2\pi L} \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_{\text{refra}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_{c \text{ aislante}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{k_{\text{chapa}}} \right)} \quad (\text{Ecuación 3.25})$$

Donde:

T_1 = Temperatura de cámara de combustión (765° C)

T_4 = Temperatura de chapa metálica (35° C)

L = Altura del horno (0.44m)

k_{refra} = Conductividad térmica del ladrillo refractario (0.650 Kcal/hrm°C)

$k_{c \text{ aislante}}$ = Conductividad térmica de capa aislante (0.160 K cal/hrm°C)

k_{chapa} = Conductividad térmica de chapa metálica (44.6Kcal/hrm°C)

r_1 = Radio interno del horno (0.163 m)

r_2 = Radio de intercara del refractario y la capa aislante del horno (0.278 m)

r_3 = Radio de intercara aislante y capa metálica del horno (0.341 m)

r_4 = Radio externo del horno (0.344 m)

Cabe resaltar que los datos se obtienen de las tablas 3.4 y 3.5.

Reemplazando los datos en la Ecuación 3.25, se tiene:

$$Q_{\text{conduccion}} = \frac{(765 - 35)}{\frac{1}{2\pi(0.44)} \left(\frac{\ln\left(\frac{0.278}{0.163}\right)}{0.650} + \frac{\ln\left(\frac{0.341}{0.278}\right)}{0.160} + \frac{\ln\left(\frac{0.344}{0.341}\right)}{44.6} \right)}$$

$$Q_{\text{conduccion}} = 922.412 \text{ kcal/hr}$$

3.7.12.1.2. Por Convección

Para determinar la pérdida de calor por convección a través de las paredes del horno, se toma como referencia la simbología de la figura 3.5, aplicando la ecuación 3.23 se tiene:

$$Q_{\text{conveccion}} = \frac{(T_4 - T_A)}{\frac{1}{2\pi r_4 L h}} \quad (\text{Ecuación 3.23})$$

Donde:

T_A = Temperatura ambiente (25°C)

T_4 = Temperatura en la chapa metálica (35°C)

L = Altura del horno (0.44 m)

h_c = Coeficiente de calor por convección (3.85 kcal/hr m^2 °C)

r_4 = Radio exterior del horno (0.344 m)

Reemplazando los datos en la Ecuación 3.23, se tiene:

$$Q_{\text{conveccion}} = \frac{(35 - 25)}{\frac{1}{2\pi(0.344)(0.44)(3.85)}}$$

$$Q_{\text{conveccion}} = 36.614 \text{ kcal/hr}$$

3.7.12.1.3. Por Radiación

Para determinar la transferencia de calor por radiación a través de las paredes del horno, se considera la simbología de la figura 3.5, aplicando la ecuación 3.24 se tiene:

$$Q_{radiacion} = \varepsilon\sigma A_S(T_S^4 - T_{alrd}^4) \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

Donde:

ε =Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$)

σ =Emisividad (0.20)

A_S =Área superficial (0.95 m²)

T_S^4 =Temperatura del alrededor (308 K)

T_{alrd}^4 =Temperatura superficial (298 K)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.24.

$$Q_{radiacion} = 5,67 \times 10^{-8} (0.20)(0.95)(308^4 - 298^4)$$

$$Q_{radiacion} = 11.99 \text{W} \times 0.857 \frac{\text{KCal/hr}}{\text{W}}$$

$$Q_{radiacion} = 10.276 \frac{\text{KCal}}{\text{hr}}$$

La pérdida de calor total por las paredes del cilindro es la suma de la perdida por conducción, convección y radiación, como se expresa en la ecuación 3.26.

$$Q_{T \text{ cilindro}} = Q_{conduccion} + Q_{conveccion} + Q_{Radiacion} \quad (\text{Ecuación 3.26})$$

$$Q_{T \text{ cilindro}} = 922.412 + 36.614 + 10.276$$

$$Q_{T \text{ cilindro}} = 969.302 \text{ kcal/hr}$$

3.7.12.2. *Perdidas de Calor en la Base del Horno.*

3.7.12.2.1. *Por Conducción*

La pérdida de calor por conducción a través de la base del horno se determina a partir de la ecuación 3.18, considerando que la base del horno consta de las capas refractaria y chapa metálica, por tanto, se tiene la ecuación 3.27.

$$Q_{conduccion} = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{e_{refra}}{k_{refra} * A} + \frac{e_{chapa}}{k_{chapa} * A}} \quad (\text{Ecuación 3.27})$$

Donde:

T_1 = Temperatura de la cámara de combustión (765° C).

T_4 = Temperatura en la chapa metálica (35° C).

A = Área de la base del cilindro (0.373 m²)

r_1 = Radio interno del horno (0.163 m)

k_{refra} = Conductividad térmica del ladrillo refractario (0.650 Kcal/hrm°C)

k_{chapa} = Conductividad térmica de la chapa metálica (44.6Kcal/hrm°C)

e_{refra} = Espesor del ladrillo refractario (0.114 m)

e_{chapa} = Espesor de chapa metálica (0.003 m)

Los datos se obtienen de las tablas 3.4 y 3.5

Reemplazando los datos en la ecuación 3.27, se tiene:

$$Q_{conduccion} = \frac{(765 - 35)}{\frac{0.114}{0.650(0.373)} + \frac{0.003}{(44.6)(0.373)}}$$

$$Q_{conduccion} = 1543.340 \text{ kcal/hr}$$

3.7.12.2.2. Por Convección

Para determinar la pérdida de calor por convección a través de la base del horno se halla mediante el uso de la ecuación 3.21, de la figura 3.5 se considera T_4 como la temperatura de la capa metálica externa de la base plana del horno.

$$Q_{\text{conveccion}} = Ah(T_4 - T_A) \quad (\text{Ecuación 3.21})$$

Donde:

T_A = Temperatura ambiente (25°C)

T_4 = Temperatura en la chapa metálica (35°C)

A = Área de la base del horno (0.373 m²)

h_c = Coeficiente de calor por convección (3.85 kcal/hr m²°C)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.21

$$Q_{\text{conveccion}} = (0.373)(3.85)(35 - 25)$$

$$Q_{\text{conveccion}} = 14.386 \text{ kcal/hr}$$

3.7.12.2.3. Por Radiación

Las pérdidas de calor por radiación a través de la base del horno se determinan haciendo uso de la ecuación 3.24.

$$Q_{\text{radiacion}} = \varepsilon\sigma A_S(T_S^4 - T_{\text{alrd}}^4) \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

Donde:

ε = Constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10⁻⁸W/m²K⁴)

σ = Emisividad (0.75)

A_S = Área superficial (0373 m²)

T_S^4 = Temperatura del alrededor (308 K)

T_{alrd}^4 =Temperatura superficial (298 K)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.24 se tiene:

$$Q_{radiacion} = 5,67 \times 10^{-8} (0.75)(0.373)(308^4 - 298^4)$$

$$Q_{radiacion} = 17.654W \times 0.857 \frac{KCal/hr}{W}$$

$$Q_{radiacion} = 15.13 \frac{KCal}{hr}$$

La pérdida de calor a través de la base del horno, se determina usando la ecuación 3.26.

$$Q_{T\ base} = Q_{conducción} + Q_{convección} + Q_{Radiación} \quad (\text{Ecuación 3.26})$$

$$Q_{T\ base} = 1543.340 + 14.386 + 15.13$$

$$Q_{T\ base} = 1572.856 \text{ kcal/hr}$$

3.7.12.3. Perdida de Calor en la Tapa Superior del Horno

3.7.12.3.1. Por Conducción

La pérdida de calor a través de la tapa se determina mediante el uso de la ecuación 3.27, debido a que la tapa del horno consta de dos capas una refractaria y otra metálica, de acuerdo a la figura 3.5, se tiene T_4 como la temperatura de capa metálica externa de la tapa del horno.

$$Q = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{e_{refra}}{k_{refra} * A} + \frac{e_{chapa}}{k_{chapa} * A}} \quad (\text{Ecuación 3.27})$$

Donde:

T_1 = Temperatura de la cámara de combustión (765°C)

T_4 = Temperatura en la chapa metálica (35°C)

A = Área de la tapa superior del horno (0.118m²)

r_1 = Radio interior del horno (0.163 m)

k_{refra} = Conductividad térmica del ladrillo refractario (0.650 Kcal/hrm°C)

k_{chapa} = Conductividad térmica de la chapa metálica (44.6 Kcal/hrm°C)

e_{refra} = Espesor del ladrillo refractario (0.114m)

e_{chapa} = Espesor de la chapa metálica (0.003m)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.27 se tiene:

$$Q = \frac{(765 - 35)}{\frac{0.114}{(0.650)(0.118)} + \frac{0.003}{(44.6)(0.118)}}$$

$$Q = 490.960 \text{ kcal/hr}$$

3.7.12.3.2. Por Convección:

Para determinar la pérdida de calor por convección a través de la tapa del horno se toma en consideración la simbología de la figura 3.5, así mismo se hace uso la ecuación 3.21.

$$Q_{\text{conveccion}} = Ah(T_4 - T_A) \quad (\text{Ecuación 3.21})$$

Donde:

T_A = Temperatura ambiente (25°C)

T_4 = Temperatura en la chapa metálica (35°C)

A = Área de la tapa superior del horno (0.118m²)

h_c = Coeficiente de calor por convección (3.85kcal/hr m²°C)

Se reemplazan los datos en la ecuación 3.21.

$$Q_{\text{conveccion}} = (0.118)(3.85)(35 - 25)$$

$$Q_{\text{conveccion}} = 4.543 \text{ kcal/hr}$$

3.7.12.3.3. Por Radiación

La determinación de las pérdidas de calor por radiación a través de la tapa del horno se halla mediante el uso de la ecuación 3.24.

$$Q_{radiacion} = \varepsilon \sigma A_S (T_S^4 - T_{alrd}^4) \quad (\text{Ecuación 3.24})$$

Donde:

ε = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$)

σ = Emisividad (0.20)

A_S = Área superficial (0.118 m^2)

T_S^4 = Temperatura del alrededor (308 K)

T_{alrd}^4 = Temperatura superficial (298 K)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.24 se tiene:

$$Q_{radiacion} = 5,67 \times 10^{-8} (0.20) (0.118) (308^4 - 298^4)$$

$$Q_{radiacion} = 1.48 \text{W} \times 0.857 \frac{\text{KCal/hr}}{\text{W}}$$

$$Q_{radiacion} = 1.27 \frac{\text{KCal}}{\text{hr}}$$

La pérdida de calor total por la tapa del horno es la suma de la pérdida por conducción, convección, y radiación como se expresa en la ecuación 3.26.

$$Q_{T \text{ tapa}} = Q_{conduccion} + Q_{conveccion} + Q_{Radiación} \quad (\text{Ecuación 3.26})$$

$$Q_{T \text{ tapa}} = 490.960 + 4.543 + 1.27$$

$$Q_{T \text{ tapa}} = 496.773 \text{ Kcal/hr}$$

Por consiguiente, para determinar la pérdida de calor total en el horno se usa la ecuación 3.28, que expresa la suma de pérdidas de calor por las paredes cilíndricas, la tapa y base del horno.

$$Q_{Perdida \text{ total}} = Q_{Tcilindro} + Q_{Tbase} + Q_{Ttapa} \quad (\text{Ecuación 3.28})$$

$$Q_{Perdida \text{ total}} = 969.302 + 1572.856 + 496.773$$

$$Q_{Perdida \text{ total}} = 3038.931 \text{ kcal/hr}$$

Finalmente determinamos el calor liberado por el combustible haciendo uso de la ecuación 3.12.

$$Q_{CO} = 9180.25 + 3038.931$$

$$Q_{CO} = 12219.181 \text{ Kcal/hr}$$

3.8. Selección de Materiales para la Construcción del Horno

3.8.1. Crisol

Para la elección apropiada de crisol se debe poseer conocimiento del tipo de metal a fundir, el combustible a emplear, la clase de horno a usar, las propiedades térmicas del material de fabricación del crisol y su resistencia a la acción de escorias (Metal casting, 2012, p 9).

Para la selección de crisol en este caso consideramos lo siguiente:

- Metal a fundir : aluminio
- Combustible : gas natural
- Horno a usar : crisol basculante
- Capacidad : 15 kg de aluminio

Por consiguiente, según los datos considerados se concluye que el crisol adecuado para la fundición de aluminio es un crisol de grafito debido a las propiedades que ofrece este material. El grafito posee alta conductividad térmica y eléctrica, resistente al choque térmico, posee alta resistencia al ataque de los metales y escorias fundidas (Calle, 2005, p 9).

Se determina que el tamaño de crisol adecuado para 15kg de aluminio es el crisol de grafito A-30, cuyas dimensiones se expresan en la tabla 3.1. Así mismo en el anexo 3 se muestra las propiedades físicas, composición química y datos técnicos.

3.8.2. Ladrillo Refractario.

La selección de refractarios debe realizarse sobre la base del conocimiento de disponibilidad de materiales refractarios, espesor requerido, condiciones de funcionamiento como temperatura,

presión, ataque químico, composición del combustible, movimiento mecánico (Bhatia,2011, p 31).

En base a estos criterios se inicia la determinación del ladrillo adecuado para un horno de fundición de aluminio, que trabaja a una temperatura máxima de 800° C, teniendo en cuenta que el espesor de manta refractaria requerida es de 11.43 cm, siendo esta medida la suma del espesor trabajo.

Con el conocimiento de estas características y tomando en cuenta los ladrillos refractarios disponibles en el mercado peruano, se selecciona un ladrillo refractario de 3.2 cm de espesor, 11.3 cm de ancho y 22.5 cm de largo, cuyas características técnicas se muestra en el anexo 4. Este ladrillo es formado a base de óxidos naturales no metálicos de alto punto de fusión, se caracteriza por tener alta, resistencia al choque térmico y estructuralmente estables a altas temperaturas, lo que lo hace compatible para soportar acciones mecánicas (Promart, s.f).

En la tabla 3.3, se muestra el porcentaje de alúmina que contienen estos ladrillos, así como las temperaturas de trabajo que pueden resistir estos materiales.

Tabla 3. 3

Porcentaje de alúmina y temperatura

% Alúmina	Temperatura de servicio (°C)	Temperatura máxima (°C)
37% - 42%	1450	1500

Nota. Recuperado de Schemin Perú S.A,(2022).*Catalogo industrial-refractarios*, Lima –Perú, p 06.

3.8.3. Concreto Refractario.

El concreto refractario se usa para saturar las cavidades presentes entre ladrillo y ladrillo, el cemento refractario seleccionado para este horno es el cemento refractario 1000 BBQ marca schemin 12884 de alto contenido de alúmina, el cual que posee muy buena resistencia mecánica a temperaturas altas, mínima contracción por secamiento. Alta resistencia a la descomposición por choques térmicos a elevadas temperaturas, las características de este concreto se muestran en el anexo 5 (Promart, s.f).

En la tabla 3.4, se muestra las temperaturas las cuales resiste el material refractario, durante su tiempo se servicio.

Tabla 3. 4

Grado de resistencia del cemento refractario

	Temperatura de servicio (°C)	Temperatura máxima (°C)
Cemento Schemin-alta alúmina	1370	1500

Nota. Recuperado de Schemin Perú S.A,(2022).*Catalogo industrial-refractarios*, Lima –Perú, p 13.

3.8.4. Capa Aislante

Se requiere una capa aislante de 6.35 cm de espesor para el horno, considerando los materiales aislantes disponibles en el mercado peruano se selecciona una manta de lana de vidrio de 5 cm de espesor, cuyas especificaciones se muestran en el anexo 6, este material es un refractario aislante, el cual está fabricado con millones de filamentos de vidrio, la característica más importante que lo define es su conductividad térmica baja, ideal para resistir la transmisión de calor, así como su bajo almacenamiento de calor, buena resistencia al choque térmico, alta

resistencia a la tensión, resistencia a ambientes agresivos, la temperatura máxima a la cual este material resiste es de 1260 °C , en la tabla 3.5 se observan las propiedades mecánicas de la manta de fibra de vidrio(Schemin,2022,p 20).

Tabla 3. 5

Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio

Propiedades	Valor
Resistencia a la tracción	81.4 (Mpa)
Resistencia a la flexión	137.9 (Mpa)
Módulo de deformación	3.7 (Gpa)
Deformación de rotura	5 (%)

Nota. Recuperado de “*Propuesta técnica del proceso de laminado manual en plástico reforzado con fibra de vidrio*” Rodrigez. N.;2005, Loja, Ecuador, p 37.

3.8.5. Chapa Metálica

La selección de plancha metálica adecuada para la estructura del horno depende del peso que este tiene que soportar, mecanizado sencillo y disponibilidad en el mercado peruano.

Tabla 3. 6

Propiedades mecánicas del Acero A36

Calidad	Norma	Límite de fluencia (Mpa) Kg/ mm²	Resistencia a la tracción (Mpa) Kg/ mm²	Alargamiento en 200 mm (%)	Doblado a 180°
Estructural	ASTMA36	250 min (25.50 min)	400-500 (40.80-56.10)	20 min	Sin fisura

Nota. Recuperado de https://www.acerosarequipa.com/sites/default/files/fichas/2020-10/7.%20AF_HOJA%20TECNICA-PLANCHA-BOBINA_LAC.pdf?fv=oLy1QoIW

tomando en cuenta estos requisitos se decide que la plancha de acero apropiada es la ASTM A36 de 0.3 cm de espesor cuyas características se muestran en el anexo 09. debido a que el acero posee uniformidad en sus propiedades, durabilidad, ductilidad, tenacidad, facilidad de mecanizado y rapidez de montaje, en la tabla 3.6 se muestran las propiedades mecánicas de la plancha de acero ASTM A36.

3.8.6. Material de Aporte

El material de aporte seleccionado para realizar las soldaduras necesarias fue el E6011, este electrodo tiene un revestimiento de tipo celulósico, el arco puede ser dirigido en cualquier dirección, diseñado para ser utilizado con corriente alterna y continua, las especificaciones del uso de E-6011 se encuentran en el anexo 08, en la tabla 3.7 se muestra la composición química de este electrodo y en la tabla 3.8 se encuentran las propiedades mecánicas que posee (Indura,2022).

Tabla 3. 7

Composición química E-6011

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)
0.11	0.41	0.23	0.010	0.017

Nota, recuperado de Indura “indura 6011” (17 de febrero 2022), https://www.indura.com.ar/content/storage/ar/producto/ID3318_file_1115_6011.pdf

Tabla 3. 8

Propiedades mecánicas del E-6011

Resistencia a la tracción	Limite a la fluencia	Alargamiento en 50 mm
4950 Mpa	424 Mpa	27%

Nota, recuperado de Indura “indura 6011” (17 de febrero 2022), https://www.indura.com.ar/content/storage/ar/producto/ID3318_file_1115_6011.pdf

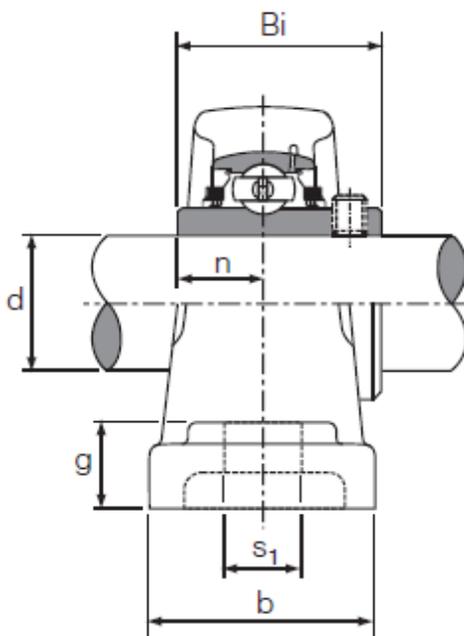
3.8.7. Chumaceras

La selección de chumaceras adecuadas se realiza tomando en consideración el peso que tendrá que soportar, así como el diámetro del eje de basculación, lugar de instalación y vida útil que se espera. Como diámetro del eje de basculación se tiene 5 cm, el lugar donde se pretende instalar la chumacera es la estructura de soporte del horno.

Por tanto, considerando 5 cm de diámetro del eje de basculación se determina que la chumacera apropiada para este caso es UCP 2010, una chumacera tipo puente que posee como características su baja fricción, buena resistencia al desgaste y requerimiento de lubricación mínima, en la figura 3,7 y tabla 3,9 se muestran las dimensiones del mismo.

Figura 3. 7

Dimensiones UCP 2010



Nota. Recuperado de <https://www.bulnesmba.com/wp-content/uploads/2019/10/soportes-rodamientos-bulnes-mba.pdf>, pp 4.5

Tabla 3. 9

Dimensiones de UCP 2010 –chumacera tipo puente

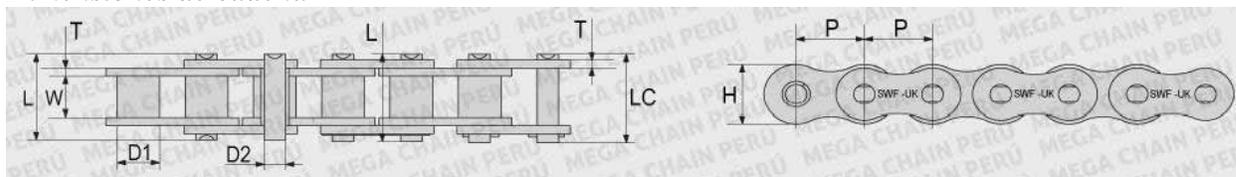
SopORTE	d (mm)	n(mm)	Bi(mm)	g(mm)	b(mm)	s(mm)	Tamaño del tornillo (mm)	Peso (kg)
UCP 2010	50	19	51.6	22	60	25	M16	2.80

Nota. Recuperado de <https://www.bulnesmba.com/wp-content/uploads/2019/10/soportes-rodmientos-bulnes-mba.pdf>. pp 4.5

3.8.8. Ruedas Dentadas y Cadena

En la selección de ruedas dentadas y cadena de transmisión debemos tener en cuenta que deseamos un sistema de transmisión de fuerza y velocidad, Por lo cual se requiere dos ruedas de distinto diámetro de cabeza y una cadena de transmisión sinfín. Para el diámetro de la rueda motriz se toma en cuenta que el número de dientes recomendado es no menor de 15 dientes, por tanto, se selecciona una rueda de 15 dientes dando así un diámetro de cabeza de la rueda motriz 5cm y el diámetro de cabeza de la rueda conducida es de 20 cm (Odetto, 2022,p 6).

Para este tipo de ruedas dentadas se recomienda una cadena de transmisión de rodillos, debido a que no presenta deslizamiento, es poco sensibles al medio en el que trabajan, ante la rotura de un eslabón o varios es de fácil mantenimiento. Las dimensiones y propiedades de la cadena de transmisión elegida se muestran en la tabla 3.10, la cual considera la simbología de la figura 3.8.

Figura 3. 8*Dimensiones de cadena*

Nota. Recuperado de <https://www.megachainperu.com/img/catalogos/cadenas-asa.pdf> p1.

Para determinar la longitud de la cadena se considera la suma de los sectores verde, azul y naranja de la figura 3.9, tomando en consideración que se recomienda que la separación entre los centros de las ruedas dentadas, sea no menor a 40 veces el paso de la cadena de mayor diámetro de cabeza, de la tabla 3.10 se obtiene el paso de la cadena simbolizado como (t).

Tabla 3. 10

Dimensiones y propiedades de cadena nro. 25-1

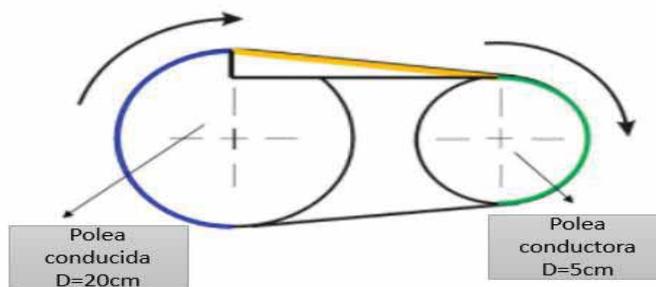
Paso P	Interi or W	Rod illo D1	Placa			Pin		Carga admi sible Kg/m	Carga de rotura Kg/m	Peso aproxi mado Kg/m
			Altura H(mm)	Espesor T(mm)	Diámet ro D(mm)	Long. L(m)	Long Max LC(m)			
6.35	3.18	3.30	6.00	0.80	2.31	7.90	8.40	357	510	0.15

Nota. Recuperado de <https://www.megachainperu.com/img/catalogos/cadenas-asa.pdf>. p1

considerando este dato se resuelve que el tramo naranja de la figura 3.9 es 39.5 cm, y para hallar los valores de los semicírculos de la región azul y verde de la figura 3.9 los cuales son 31.41cm y 7.85cm, dando un total de 118.36 cm de longitud de cadena.

Figura 3. 9

Longitud de cadena



Nota. Adaptado de https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/42_sistemas_de_polea_y_correa.html

3.8.9. Quemador

Se conoce que el horno requiere una temperatura de 800°C, para alcanzar la temperatura óptima de colado del aluminio, por lo cual se necesita un quemador que pueda proveer el calor necesario para llegar a la temperatura requerida.

Para la selección adecuada del quemador se debe tomar en consideración lo siguiente:

- Caudal de combustible (gas natural)
- Velocidad de suministro de aire
- Caudal de aire requerido

La determinación de estos valores se describe a continuación.

3.8.9.1. Velocidad de Suministro de Aire

Considerando que para que 3.390 Kg de GN se necesita 65.990 Kg de aire para que se lleve a cabo la combustión, los mismos que se consumen en un tiempo de 40min, para determinar la velocidad de suministro de aire se usa la ecuación 3.29.

$$V = \frac{C}{A} \quad (\text{Ecuación 3.29})$$

Donde:

V = Velocidad de suministro de aire. (m/min)

C = Caudal de aire requerido (m³/min)

A = Área de sección de alimentación (0.002038m²)

Considerando que el aire requerido para que se lleve a cabo la combustión es 65.990 Kg , se procede a convertir el mismo en volumen.

$$65.990 \text{ Kg aire} \times \frac{1 \text{ mol de aire}}{29 \text{ Kg aire}} \times \frac{22.4 \text{ m}^3 \text{ aire}}{1 \text{ mol aire}} = 50.971 \text{ m}^3 \text{ aire}$$

Para determinar el caudal, se utiliza la ecuación 3.30:

$$Q = \frac{V}{T} \quad (\text{Ecuación 3.30})$$

Donde:

V = Volumen (50.971 m³aire)

T = Tiempo (40 min)

Reemplazando los datos en la ecuación 3.30 se tiene:

$$C = \frac{50.971 \text{ m}^3 \text{ aire}}{40 \text{ min}} = 1.29 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{min}}$$

Conociendo este valor, se procede a reemplazar el mismo en la ecuación 3.29. Para conocer la velocidad del suministro del aire.

$$V = \frac{1.29 \text{ m}^3 / \text{min}}{0.00203 \text{ m}^2}$$

$$V = 627.72 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$V = 10.46 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3.8.9.2. Velocidad de Suministro del Combustible

Para determinar la velocidad de suministro del gas natural al horno, se parte del valor el caudal del mismo, el cual se obtiene mediante la aplicación de la ecuación 3.30.

$$C = \frac{3.390 \text{ Kg}}{40 \text{ min}}$$

Posteriormente se determina el flujo másico de los componentes del gas natural.

- Metano: CH₄

$$m = \frac{3.22 \text{ Kg}}{40 \text{ min}} = 0.0805 \frac{\text{Kg}}{\text{min}}$$

Obteniendo estos valores en Kg se procede a convertirlos en unidades de volumen.

$$0.0805 \frac{\text{Kg}}{\text{min}} \text{ CH}_4 \times \frac{1 \text{ mol CH}_4}{16 \text{ Kg CH}_4} \times \frac{22.4 \text{ m}^3 \text{ CH}_4}{1 \text{ mol CH}_4} = 0.1127 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \text{ CH}_4$$

- Etano: C_2H_4

$$m = \frac{0.166Kg}{40min} = 0.00415 \frac{Kg}{min}$$

$$0.00415 \frac{Kg}{min} C_2H_6 \times \frac{1molC_2H_6}{30KgC_2H_6} \times \frac{22.4m^3C_2H_6}{1molC_2H_6} = 0.0030 \frac{m^3}{min} C_2H_6$$

Para la determinación del suministro del gas natural, se requiere conocer la sección por la cual se suministrará, por tanto, se aplica la ecuación 3.31.

$$\text{Sección de suministro de GN} = \pi r^2 \quad (\text{Ecuación 3.31})$$

Donde:

r = radio del inyector de gas (0.00075 m)

Reemplazando en la ecuación 3.31, se tiene:

$$\text{Sección de suministro de GN} = 1.767 \times 10^{-6} m^2$$

$$V_{\text{metano}} = \frac{0.1127m^3/min}{1.767 \times 10^{-6} m^2} = 63.780 \frac{m}{min} = 1.063 \frac{m}{seg}$$

$$V_{\text{Etano}} = \frac{0.0030m^3/min}{1.767 \times 10^{-6} m^2} = 1.697 \frac{m}{min} = 0.028 \frac{m}{seg}$$

Con el conocimiento de estos valores el quemador seleccionado consta de un sistema integrado de alimentación separada aire y gas, para la inyección de aire se usa un ventilador de inyección con un motor de 0.5 Hp, que impulsa el aire a través de un tubo de 5cm de diámetro. el mismo que suministra la cantidad de aire necesario para la combustión, Para la introducción del combustible se usa un inyector de gas de 1.5mm de diámetro. Este quemador hace posible un mejor control de la relación aire combustible.

3.9.Construcción y Ensamble del Horno

Una vez determinado el diseño del horno, y habiendo elegido los materiales se procede a la construcción y ensamble del horno en base a los planos, los mismos que se muestran en los

anexos del presente documento. Los materiales a usar en la construcción y ensamble del horno de crisol basculante se expresan en la tabla 3.11.

Tabla 3. 11

Materiales requeridos en la construcción del horno

Material	Cantidad	Unidad	Costo (S/.)
Cadena mecánica de 94 cm	1	und	20
Cemento refractario yellow bolsa x 5kg	10	und	189
Chumaceras tipo puente de 5 cm de diámetro	2	und	100
Crisol de grafito-Morgan A-30 de 6kg	1	und	456
Discos de desbaste	5	und	32
Discos de corte	5	und	25
Electrodos 6011	3	kg	51
Engrane de 20 cm de diámetro	1	und	30
Engrane de 5 cm de diámetro	1	und	20
Ladrillo refractario recto de 1 ¼"	147	und	867
Lana de fibra de vidrio	3.60	m	55
Motor eléctrico 0.5 hp de potencia	1	und	250
Pintura base para metal (anticorrosivo)	1/2	gal	35
Pintura latex para metal	1/2	gal	30
Pistola de pulverización de gas	1	und	100
Plancha laminada de acero A36 de 0.3cm de espesor	1	und	220

Material	Cantidad	Unidad	Costo (S/.)
Thinner acrílico	3	gal	48
Tisa de calderero	1	kg	8.90
Tornillo M16	4	und	20
Tubo cuadrado de acero ASTM A500 de 2.54 cm de espesor	1	und	95
Tubo redondo de acero de 1"	1	und	20
Total			2671.9

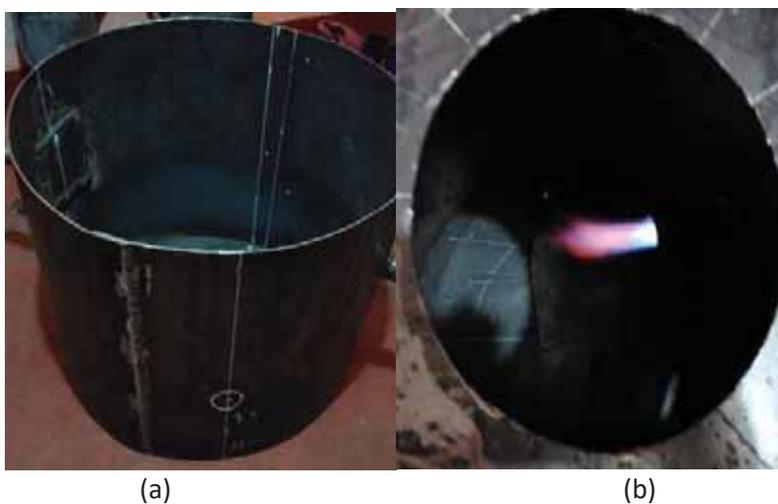
Elaboración propia

3.9.1. Cilindro Metálico

La construcción del cilindro metálico se realiza en base al plano que se encuentra en el anexo 12 del presente documento.

Figura 3. 10

Carcasa metálica



(a)

(b)

Elaboración propia

Inicialmente se corta la plancha metálica de acuerdo a las medidas de diámetro exterior y altura del horno consideradas en el plano, posteriormente se procede al rolado de la plancha para darle una forma cilíndrica como se muestra en la figura 3.10 (a). Así mismo debe poseer un orificio de 5 cm de diámetro para la colocación del quemador, cuya posición es a 19.25 cm de la base del horno como se evidencia en la figura 3.10 (b), de igual forma se incorpora un pico de horno de 10 cm de longitud, 5 cm de ancho y 5 cm de alto, el cual está ubicado a una distancia de 45.73 cm de la base del horno.

3.9.2. Tapa del Horno

La construcción de la tapa del horno se hace en base a las medidas que se muestran en el plano que se encuentra en el anexo 13.

Figura 3. 11

Tapa del horno de crisol basculante



Elaboración propia

la tapa del horno posee 4 agarraderas de 10 cm de largo, y 5 cm de ancho, que se encuentran distribuidas a los 4 lados cartesianos de la tapa como se evidencia en la figura 3.11(a), así mismo

posee una pequeña tapa acoplable de 20 cm de diámetro, el cual sirve como alimentador y se muestra en la figura 3.11(b), el plano se encuentra en el anexo 14, la tapa consta de una estructura metálica en forma de red que permite que el refractario quede fuertemente fijado y no corra el riesgo de desprenderse de la lámina metálica.

3.9.3. Construcción de Quemador

La construcción del quemador se realiza en base al plano que se muestra en el anexo 16, el quemador consta de una pistola de pulverización que funciona como inyector de gas y un motor eléctrico de 0.5 hp de potencia el cual realiza la función de inyector de aire el cual se muestra en la figura 3.12 (b), el mismo que posee un alabe de 9 cm de diámetro, que está cubierto de una voluta de acero de 25 cm, que es un armazón metálico en forma de espiral, el cual está unido a un tubo metálico de 5 cm de diámetro y 41 cm de longitud, a 28 cm de distancia de la voluta, se encuentra un orificio de ingreso de 1cm, al cual se acopla el inyector de aire. como se muestra en la figura 3.12(a).

Figura 3. 12

Quemador de horno



(a)

(b)

Elaboración propia

3.9.4. Soporte del Horno

El soporte del horno es la estructura que sustenta el peso de la cámara de fundición, el sistema de basculación y el quemador. Considerando este peso, se diseña una estructura compacta y resistente, por lo cual se opta la utilización de un tubo de acero rectangular A500, cuyas propiedades mecánicas se muestran en la tabla 3.12, así como sus dimensiones y características técnicas se pueden revisar en el anexo 15. este tubo es de fácil soldabilidad y es el indicado para instalación de chumaceras.

Tabla 3. 12

Propiedades mecánicas del tubo de acero A500

Sección	Norma técnica		Grado	Límite de fluencia	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación mínima
	Del tubo	Del acero				
rectangular	ASTM A500/A500M	ASTM A500 grado A	B	269	310	25
	ASTM A500/A500M	ASTM CS tipo B			290	25

Nota. Recuperado de “ ficha técnica acero ASTM A500, https://www.acerosarequipa.com/sites/default/files/fichas/202110/HOJA_TECNICA_TUBO_LAC-GALV.pdf?fv=pgyTLBGp

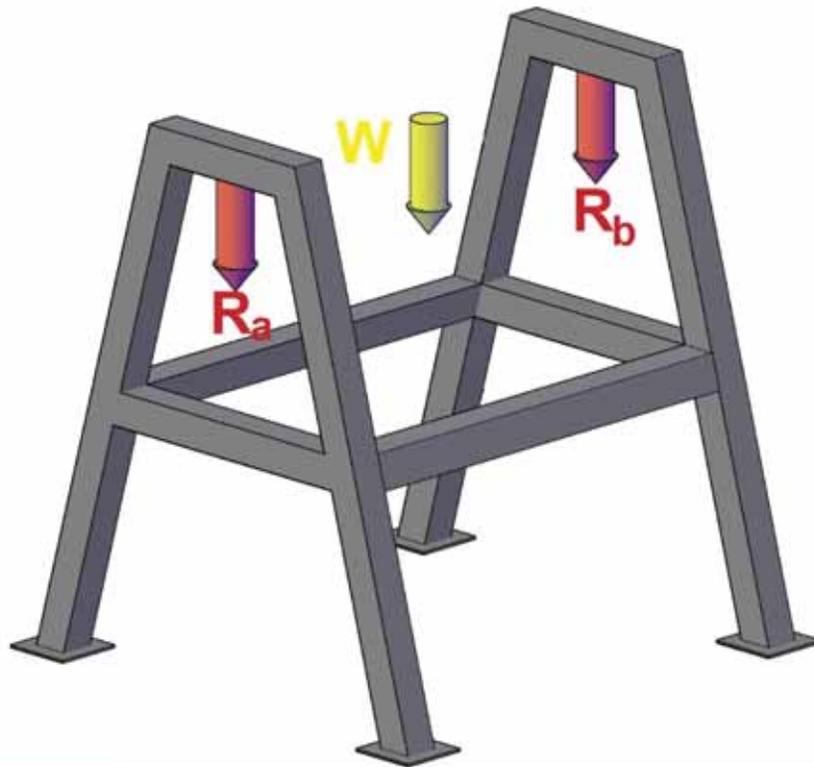
En la figura 3.13 se muestra el comportamiento de la estructura con respecto al peso que reposa sobre ella, como las chumaceras. La flecha R_a y R_b representan las fuerzas que se ejercen en la estructura debido al peso del horno y la fecha W la fuerza de la gravedad presente.

La construcción del soporte del horno se inicia seccionando un tubo rectangular de acero ASTM A500 de acuerdo a las medidas especificadas en el plano que se encuentra en el anexo 15, así mismo se realiza la colocación de chumaceras tipo puente en ambos lados del soporte, dejando así el horno a una distancia de 55 cm del piso como se muestra en la figura 3.14, de

igual modo se ubica un tubo metálico en la viga inferior del soporte, el cual sirve de apoyo para que el horno pueda mantener su estabilidad.

Figura 3. 13

Condiciones del soporte de horno



Elaboración Propia

3.9.5. Sistema Basculante

El sistema basculante consta de un volante de 39 cm de diámetro, que está unido a 2 ruedas dentadas de 5cm y 20 cm de diámetro respectivamente, los cuales están conectados a una de las chumaceras mediante el eje de basculación, haciendo posible la basculación del horno de crisol basculante, así mismo permite ajustar el grado de inclinación deseado, pudiendo fijar posiciones diferentes, con la ayuda de un seguro.

El sistema basculante funciona por la aplicación de movimiento en el timón, el cual al girar activa el engranaje de 5 cm de diámetro, el mismo que conduce el movimiento a través de una cadena mecánica, la misma que logra mover el engranaje de 20cm de diámetro, así mismo este sistema se encuentra cubierto por una placa metálica como se muestra en la figura 3.15.

Figura 3. 14

Bancada del horno de crisol basculante



Elaboración propia

Figura 3. 15

Sistema de basculación



(a)

(b)

Elaboracion propia

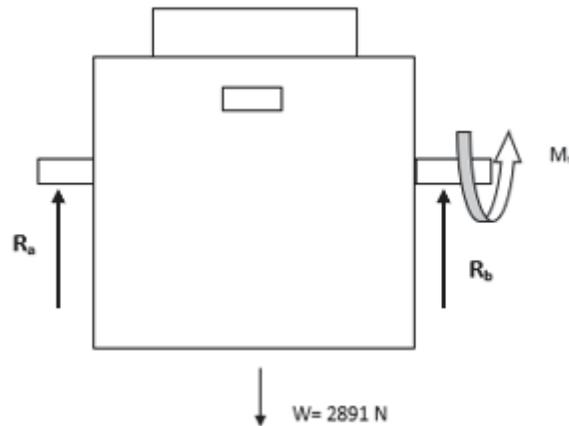
En la figura 3.16 se muestra las fuerzas que actúan en el eje de basculación, y por tanto nos indican el peso que soporta cada chumacera. Para este cálculo se requiere conocer el peso de la cámara de combustión y el valor de la gravedad.

Masa del horno = 295 Kg

Gravedad = 9.8 m/s²

Figura 3. 16

Fuerzas presentes en el horno



Elaboración propia

Determinando las fuerzas resultantes en cada apoyo:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_a + R_b - W = 0$$

$$R_a + R_b - 2891N = 0$$

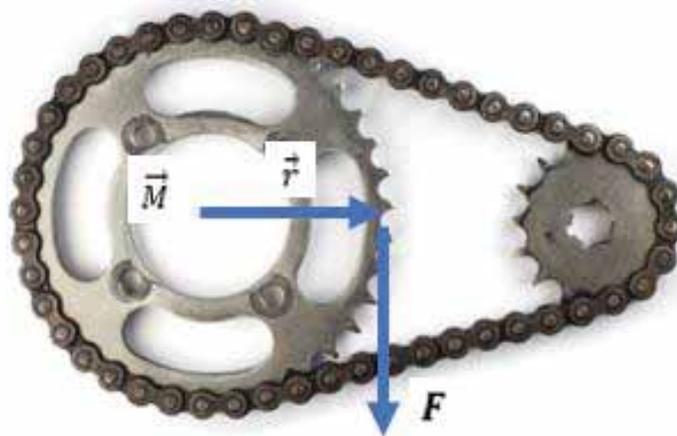
$$R_a + R_b = 2891N$$

$$R_a = 1445.5N$$

$$R_b = 1445.5N$$

Figura 3. 17

Fuerzas presentes en los engranes



Elaboración propia

Considerando la figura 3,17, se determina el momento en el punto \vec{M}

$$\vec{M} = F \times \vec{r}$$

$$\vec{M} = 1445.5N \times 0.2m$$

$$\vec{M} = 289.1Nm$$

Determinando la relación de transmisión en los engranes

$$RT = \frac{N^{\circ} \text{ dientes de engrane motriz}}{N^{\circ} \text{ dientes de engrane arrastrado}}$$

$$RT = \frac{15}{35}$$

$$RT = 0.42$$

3.9.6. Montaje del Refractario

El montaje de refractario en el horno de crisol basculante se realiza con 147 piezas de ladrillo refractario recto de 1 ¼”, la colocación de los ladrillos se realiza en forma vertical, y se unen mediante cemento refractario, hasta terminar de cubrir el total de la altura del cilindro, así mismo el ladrillo refractario se recubre por completo con cemento refractario. La tapa del horno presenta un par de apoyos metálicos los cuales sirven como fijadores del cemento refractario.

Tabla 3. 13

Equipos de protección personal usados en la construcción

Equipo de protección personal	Cantidad	Unidad	Costo(\$/.)
Careta de alto impacto	1	Und	14
Careta de soldadura	1	Und	20
Capucha soldador de cuero soldador	1	Und	50
Conjunto de cuero de res para soldador	1	Und	170
Delantal de cuero	1	Und	45
Guantes de cuero ¾	1	Par	8.50
Guantes de seguridad	4	Par	16
Lentes de seguridad	4	Und	31.6
Mascarilla respiratoria filtro 2097 3m, contra material particulado y humos metálicos p100	4	Und	136
Tapones auditivos	1	Paq	11.90
Zapatos de seguridad	4	Par	280
Total			783.00

Elaboración propia

En la figura 3.18 se muestran los tres soportes para el crisol, los mismos que están hechos a base de refractarios.

Figura 3. 18

Refractario en el horno



Elaboración propia

3.9.7. Equipos de Protección Personal

En el proceso de construcción y montaje del horno de crisol basculante se requiere el uso de ciertos equipos de protección personal, los mismos que se detallan en la tabla 3.13.

3.10. Procedimiento de Fusión de Aluminio en el Horno de Crisol Basculante

Este procedimiento se muestra en la tabla 3.14 y tiene como propósito explicar los pasos a seguir para realizar la fusión de 15 kg de aluminio en un horno de crisol basculante.

Tabla 3. 14

Procedimiento de fusión de aluminio

Título: fundición de aluminio en horno de crisol basculante.

FECHA DE ELABORACIÓN: 01-05-2021

ACTIVIDAD DE ALTO RIESGO ASOCIADA:

- Trabajos en caliente

EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL (ESPECÍFICO):

Bloqueador solar, Pantalón y casaca de cuero, escarpín, zapatos de seguridad, guantes de cuero caña larga, mandil de plomo, tapón auditivo, lentes de seguridad, careta de alto impacto, casco.

CONSIDERACIONES

GENERALES/RESTRICCIONES:

Esta Prohibido:

Prohibido trabajar sin equipo de protección personal específico.

Es Obligatorio:

- Contar con extintor PQS de 6kg.
- Retirar material inflamable a mas 10m.
- Personal Capacitado en trabajos de fundicion.

EQUIPOS	MATERIALES	HERRAMIENTAS
Horno de crisol basculante	Perfiles de aluminio	Cuchara para cargar el metal
Balanza	Escorificante	Cuchara para retirar la escoria
	Arena de sílice	Cuchara para descargar el metal
		Cajas de moldeo
		Apisonador de metal

Etapas de la tarea

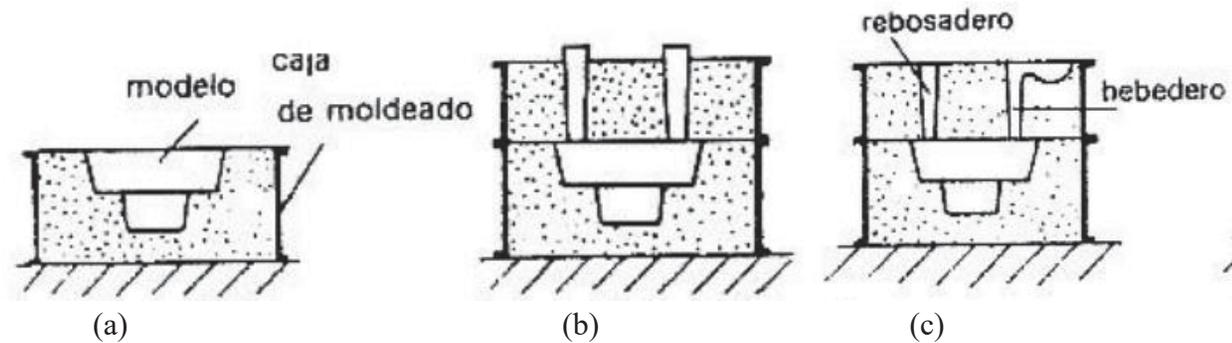
Procedimiento

1. Preparativos previos

Pesar 15 kg de trozos de aluminio.

Colocar un modelo en arena con base de sílice y aglomerante.

2. Moldeo en arena



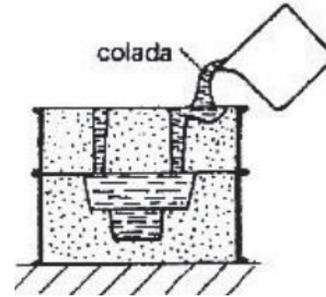
- Proporcionarle a la arena la forma de la pieza a fundir como se muestra en la imagen (a).
- Incorporando los canales y aberturas para el colado del metal como se ve en la imagen (b).
- Finalmente se retiran los canales para formar el rebosadero y el bebedero como se muestra en la figura (c).

3. Fusión de aluminio en horno de crisol basculante

- Calentar el horno durante 20 min.
 - Vigilar y registrar la temperatura cada 5 min, con apoyo de un pirometro.
 - Al llegar a 600 °C añadir el aluminio y proseguir con el carguío del metal a medida que este se va fundiendo.
 - Con una tenaza empujar el metal hacia el fondo del crisol durante el proceso de fundición.
 - Al finalizar la carga de los 10 Kg de aluminio, se agrega el escorificante.
 - Calentar la cuchara de colado ubicándola encima de la chimenea por un lapso de 10 minutos.
 - Si el aluminio posee una tonalidad rosada proceder al colado.
 - Verificar si el metal alcanza la temperatura de colado.
 - Apagar el horno de crisol basculante.
-

-
- Localizar la cuchara en la zona de descarga.
 - Proceder cuidadosamente a la descarga manipulando el horno basculante.
 - Quitar la escoria con una cuchara escorificante.
 - Con la ayuda de sujetadores transportar la cuchara de colado y proceder con el vertido del metal fundido en las cajas de moldeo.

4. Colado del aluminio



- Realizar la limpieza del crisol haciendo uso de arena de sílice para retirar los residuos.

3.11. Datos Experimentales Obtenidos en la Fusión de Aluminio

Con base en el procedimiento expresado en la tabla 3.14 se realiza la fundición de 15 kg de aluminio en un horno de crisol basculante, se llevan a cabo tres simulaciones con la misma cantidad de kg de metal, obteniéndose así los datos que se expresan en la tabla 3.15 y 3.16, los mismos que fueron medidos usando un pirómetro digital como se muestra en la figura 3.21.

Tabla 3. 15

Datos experimentales-temperatura interna del horno

Temperatura de cámara de combustión °C				
Tiempo (min)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
0	27	25	26	26
5	463	460	466	463
10	649	650	649	649.3
15	717	716	715	716
20	729	728.5	729	728.8
25	744	743	742	743
30	744	744.5	745	744.5
35	752	746	743	747
40	760	766	770	765.3

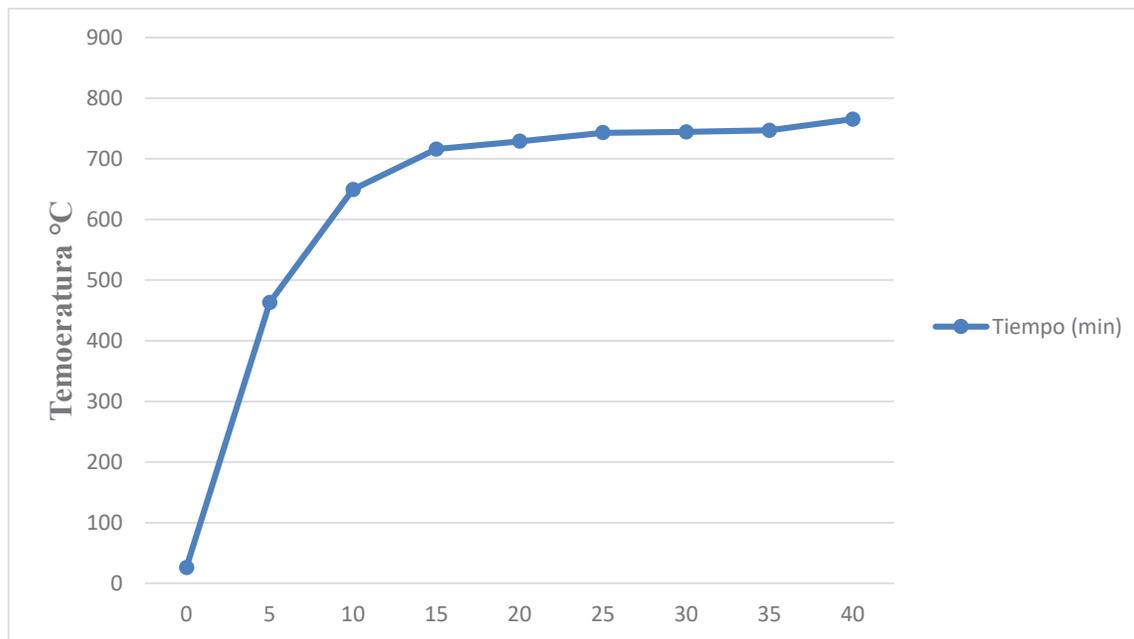
Elaboración propia

En la tabla 3.15 se muestra la temperatura a la cual se encuentra la cámara de combustión en función del transcurso del tiempo, así mismo se presenta un promedio de temperaturas de las tres pruebas realizadas.

Con datos de la tabla 3.15 se realiza el gráfico que se muestra en la figura 3.19 el cual expresa el aumento de temperatura de la cámara de combustión en función del tiempo, también se entiende que el horno de crisol basculante tarda un aproximado de 11 min en llegar a la temperatura de fusión y 40 min en llegar al punto de colado óptimo del aluminio.

Figura 3. 19

Calentamiento del horno de crisol basculante



Elaboración propia

La tabla 3.16 expresa datos de la temperatura externa del horno la misma que fue controlada cada 5 min de iniciado el proceso, con ayuda de un pirómetro electrónico.

Considerando los datos de la tabla 3.16 se obtiene la figura 3.20 el cual muestra que la capa metálica sufre un aumento de temperatura uniforme en función al transcurso del tiempo, lo que evidencia una pérdida de calor a través de las paredes.

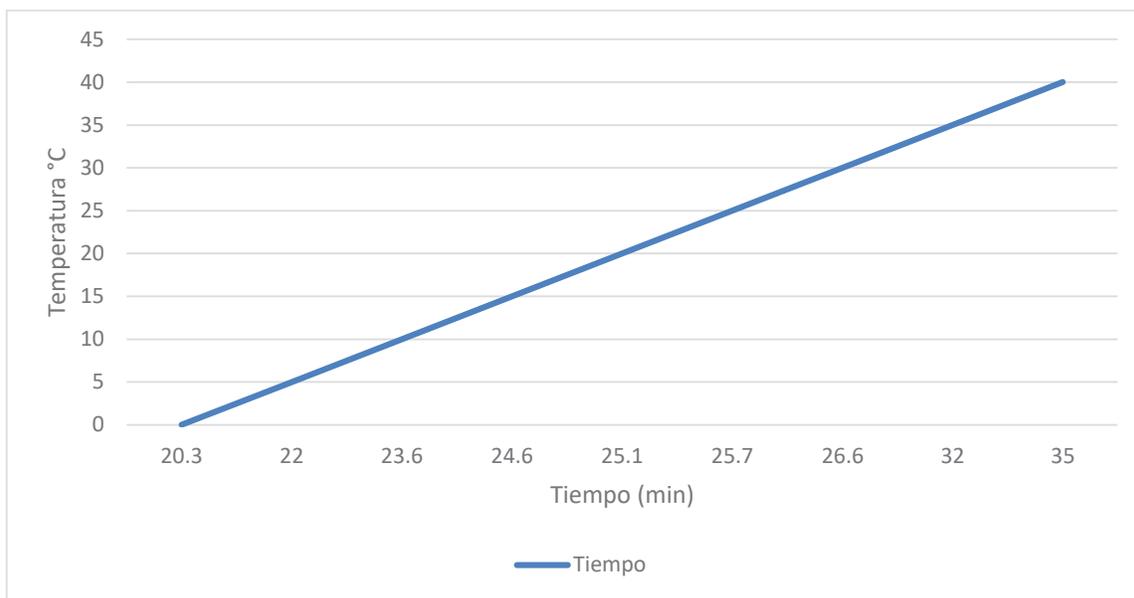
Tabla 3. 16

Datos experimentales – temperatura externa del horno

Temperatura externa del horno °C				
Tiempo (min)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio
0	21	20	20	20.3
5	22	21	23	22
10	23	24	24	23.6
15	24	25	25	24.6
20	25.5	25	25	25.1
25	26	25.2	26	25.7
30	27	26	27	26.6
35	31	32	33	32
40	36	35	34	35

Elaboración propia

En la tabla 3.18 se expresa la cantidad de kg de aluminio reciclado que ingresa al horno de crisol basculante. Así mismo la cantidad de kg de aluminio fundido y escoria que da como resultado la fusión de este metal. Se realizaron tres pruebas cada uno con una carga de 15kg de aluminio reciclado, finalmente se determina un promedio de los valores obtenidos.

Figura 3. 20*Perdida de calor a través de las paredes*

Elaboración propia

Tabla 3. 17*Productos de fusión del aluminio*

Prueba	Suministro de material		Producto	
	Aluminio reciclado (kg)	Aluminio (kg)	Aluminio (kg)	Escoria (kg)
1	15	12.1	12.1	2.9
2	15	12.4	12.4	2.6
3	15	12	12	3
Promedio	15	12.2	12.2	2.8

Elaboración propia

Figura 3. 21*Pirómetro electrónico*

(a)

(b)

Elaboración propia

En la figura 3.20 se muestra un diagrama de barras, en el cual se representa que en promedio del total de aluminio reciclado que ingresa, se obtiene un aproximado de 12.2 kg de aluminio fundido y 2.8 kg de escoria que representan el 80% y 20% respectivamente.

De acuerdo a los datos de la tabla 3.19, el consumo de combustible durante el proceso de fundición de 15 kg de aluminio, es 3.4 kg.

3.12. Recursos Materiales y Humanos

En la tabla 3.19 se muestra el costo total de recursos materiales y humanos usados en cada etapa de construcción y ensamble del horno de crisol basculante, el quemador y todos sus

componentes, el mismo que asciende a un costo total de 5075.9 soles, cabe mencionar que para determinar este valor se consideró datos de las tablas 3.11, 3.13 y 3.24.

Figura 3. 19

Comparación de productos



Elaboración propia

Tabla 3. 18

Consumo de combustible

N° de prueba	Consumo de combustible (Kg)	Tiempo (min)
Prueba 1	3.3	39
Prueba 2	3.5	41
Prueba 3	3.4	40
Promedio	3.4	40

Elaboración propia

Tabla 3. 19*Costo de construcción del horno*

Tipo de recurso	Denominación	Costo S/.
Humano	Construcción del horno	1360.0
Material	Materiales para la construcción, ensamble del quemador y horno	2671.9
Material	Varios	261
Seguridad	Equipos de protección personal	783
Total		5075.9

Elaboración propia

3.13. Costo de Operación del Horno de Fusión de Aluminio

La puesta en marcha del horno de crisol basculante requiere un costo de operación, el cual se muestra en la tabla 3.20, cabe resaltar que considera únicamente el costo de fusión del Aluminio.

Tabla 3. 20*Costo de operación del horno*

Denominación	Cantidad	Unidad	Precio unitario (S/.)	Precio total (S/.)
Aluminio	15	Kg	3.50	52.5
Gas	3.4	Kg	3	10.2
Total				62.7

Elaboración propia

3.14. Control Ambiental

El control ambiental aplicable a la construcción del horno de crisol basculante se encuentra en la tabla 3.21.

Tabla 3. 10

Controles ambientales

Actividad	Peligro Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Consecuencia	Control
CONSTRUCCION DE UN HORNO DE CRISOL BASCULANTE	Generación de residuos sólidos no peligrosos (metales)	Potencial contaminación del suelo	Acumulación de metales Variación en los constituyentes del suelo Impacto sobre la microfauna del suelo	Uso de contenedores para residuos metálicos.
	Generación de residuos sólidos peligrosos (discos de corte y desbaste, escoria, lunas para soldar)	Potencial contaminación del suelo	Cambio en composición del suelo. Impacto sobre la microfauna del suelo	Uso de bandejas metálicas para contención de escoria metálica.
	Emisiones / generación a la atmosfera	Potencial contaminación del aire, calentamiento global	Cambio climático	Realizar el mantenimiento preventivo de equipos
	Consumo de energía eléctrica	Agotamiento de recursos naturales, calentamiento Global	Afectación de generaciones futuras, afección de ecosistemas	Desconectar equipos al finalizar el trabajo

Elaboración propia

3.15. Recurso Humano

El recurso humano requerido para la construcción y ensamble del horno de crisol basculante se muestra en la tabla 3.22.

Tabla 3. 11

Talento humano

Recurso humano	Cantidad	Funciones	Días		Costo (S/.)	
			1	2	c/u	Total
Ingeniero Metalurgista	1	Encargado de la producción	X	X	200	400
Ingeniero de seguridad	1	Responsable de la seguridad de los trabajadores y adecuado manejo ambiental	X	X	200	400
Operario soldador	1	Encargado de soldar planchas metálicas	X	X	100	200
Oficial mecánico	1	Encargado de corte, desbaste, etc de planchas metálicas.	X	X	80	160
Cadista	1	Elaboración de planos	x	X	100	200
Total						1360.00

Elaboración propia

3.16. Recurso Energético

El recurso energético usado en la construcción y ensamble del horno se muestra en la tabla 3.24, el mismo costo que se considera en la tabla 3.19, bajo la denominación de varios.

3.17. Comparación de Costo Producción – Precio de Venta

En la tabla 3.24 se muestra la diferencia que existe entre el costo total de construcción del horno de crisol basculante en comparación al costo del mismo en el mercado internacional, cabe mencionar que también se tiene en consideración el costo que representa la importación del equipo al país.

Tabla 3. 12

Energía eléctrica requerida en la construcción

Equipo	Cantidad	Energía (hr)	Costo (S/.)
Amoladora	1	16	12.48
Maquina soldadora	1	24	17.28
Compresora	1	3	2.34
Taladro neumático	1	5	3.9
Total			36

Elaboración propia

Tabla 3. 24

Cuadro comparativo de costos

Costo de construcción (S/.)	Costo de compra (S/.)
5075.9	15452.00 – 20093.50
Ahorro	10376.1

Elaboración propia

4. Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

Al concluir el presente trabajo se infiere lo siguiente:

- Se diseñó un horno de crisol basculante de 15 kg de capacidad, el mismo que es de fácil operación y facilita el colado del metal, permitiendo así la prolongación de vida útil del crisol, el costo total de la construcción fue de 5075.9 soles.
- Como principales dimensiones se tiene el diámetro externo e interno del horno 68.92 cm y 32.76 cm respectivamente, el horno posee una altura total de 67.53 cm, las mismas que se determinaron en base a las dimensiones del crisol elegido.
- La puesta en marcha del horno de crisol basculante se realiza con el propósito de verificar y evaluar el desempeño del mismo, así mismo evidenciar posibles fallas.
 - o La cantidad de combustible necesario para la fusión de 15kg de aluminio es 3.4 kg de gas natural.
 - o El tiempo requerido para la fusión de aluminio es de 40 min.
 - o La cantidad de Aluminio fundido obtenido es 12.2 kg.
 - o La cantidad de escoria obtenida es 2.8 Kg.
 - o El costo de operación es 62.7 soles.
- El tipo de materiales se eligió tomando en consideración los requerimientos del horno diseñado, el crisol escogido para 15 kg de capacidad fue un crisol de grafito A-30, los ladrillos refractarios elegidos son ladrillos Schemin 12883 de 1.1/4", los mismos que son compuestos a base de óxidos naturales no metálicos de alto punto de fusión, como concreto refractario se optó por schemin 12880, cuya composición química resiste las condiciones del proceso, como material aislante se usó lana de fibra de vidrio, y para

la construcción del cilindro metálico se elige una placa de acero A-36, y los soportes están hechos de un tubo de acero ASTM A 500.

4.2.Recomendaciones

- Se recomienda situar el horno en un lugar amplio, esto debido a que el ambiente aumenta de temperatura durante el proceso de fundición.
- Realizar una verificación completa del buen estado del horno y sus elementos antes del inicio de cada encendido.
- Al iniciar el trabajo de fundición se deberá verificar que se cuenta con las medidas de seguridad necesarias.
- Al finalizar el trabajo no es necesario retirar el crisol del interior del horno, es recomendable dejar que el crisol y horno, enfríen paulatinamente a temperatura ambiente, esto permitirá que no se presente un cambio brusco de temperatura ampliando así la vida útil de estos.

5. Matriz de Consistencia

Se encuentra en el anexo 01

6. Bibliografía

Libros y Tesis

1. ASM International. (2008). *ASM handbook:Materials Park*, Ohio:Estados unidos ASM International.
2. Avila,R.(1997).*Introducción a la metodología de la investigación*.Lima,Peru:copyright.
3. Borrás,E.(1982).*Gas natural, característica, distribución y aplicaciones industriales*.Barcelona, España :Técnicos asociados S.A
4. Bruño.(2003). *Temperatura. Diccionario Bruño ilustrado*; Lima, Perú: Asociación editorial Bruño(4ta edición)
5. Calle,C.(2005).*Refractarios: El soldado desconocido de la industria*.Lima,Perú:Repsa
6. Castillo,P(2002). *Combustión industrial del gas natural*; Lima, Perú
7. Çengel, Y.A. (2007). *Transferencia de calor*, DF,México: Mc Graw-Hill interamericana editores, S.A de C.V.
8. Decreto supremo 085-2003-PMC, *estándares nacionales de calidad ambiental para el ruido* (24 de octubre del 2003), normas legales Nro 8530, diario el peruano.
9. Decreto supremo 011-2017, *estándares de calidad ambiental* (2 de diciembre del 2017), normas legales Nro 20171202, diario el peruano.
10. Decreto supremo 019-2009-MINAM, *reglamento de la ley 27446 ley del sistema nacional de evaluación de impacto ambiental* (25 de septiembre del 2009), normas legales Nro 493208, diario el peruano.
11. Downs,A.J.(1998).*Química del aluminio,Galio,Indio y Talio*,Ohio,Estados unidos:Blackie academic & profesional.
12. Duponchelle, J.(1952). *Manual del fundidor*.Barcelona,España:Gustavo Gili.
13. Galdos,L.(2005).*Dominando las matemáticas geometría III*.Lima,Perú:Quebecor World Perú S,A.
14. Hatch,J.E.(1984). *Aluminio: propiedades y metalurgia física*.Ohio,Estados unidos:ASM International.

15. Holman,J.P.(1999).*Transferencia de calor*,Mexico:Compañía editorial continental S.A. de C.V Mexico.
16. Hurbut,C.S. , & Klein,C. (2003). *Manual de mineralogía*. Barcelona,España:Reverte
17. Marquez,M.(2005).*Combustión y quemadores*. Barcelona,España:marcombo
18. Ley N° 28611, *ley general del ambiente* (13 de octubre del 2005), normas legales Nro 20051015, diario oficial el peruano.
19. Pena.P, De Aza.A, Caballero.A, De Aza.S (2011). *boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*”, Madrid, España.
20. Rodriguez,J.et al. (2006).*procesos industriales para materiales metálicos*.Madrid,España: Vision net.
21. Rodrigez. N.(2005). *Propuesta técnica del proceso de laminado manual en plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en la fabricación de elementos utilitarios*, Loja, Ecuador.
22. San José, R. G. (2001). *Combustión y Combustibles*. Trabajo de grado de Maestría
23. Totten G. E., y MacKenzie D. S. (2003) *Handbook of Aluminum*, Nueva York,Estados Unidos: Marcel Dekker, Volumen 2.
24. Trinks,W.(1975). *Hornos industriales*. (Vol I).Bilbao,España:Urmo, s.a. de ediciones
25. Vargel,C,(2004).*Corrosión del aluminio*.Kidlington,Oxford:El evier Ltd
26. Vasquez,M.(2018). *La corrosión*. Argentina, Buenos aires,Mar de la plata:eudem

Páginas web y Documentos Electrónicos

1. Bhatia,A.(2011).*Resumen de materiales refractarios*, de PDHonline: <https://pdfslide.net/documents/refractory-materials-55844f7e8eb34.html>
2. Brizuela,E. y Romano, S.(2011).*Combustión*. <http://materias.fi.uba.ar/6730/Tomo1Unidad1.pdf>
3. Elenanolasco27. (9 de marzo de 2021). *Balance de energía*.<https://sites.google.com/site/elenanolasco27/mis-trabajos/tema5balancedeenergia>
4. Foremex.(9 de Febrero de 2022). *Reciclaje de aluminio*. [https://www.foremex.com.mx/aluminio.html#:~:text=Un%20residuo%20de%20aluminio%20es,Cable%20\(AAC\)](https://www.foremex.com.mx/aluminio.html#:~:text=Un%20residuo%20de%20aluminio%20es,Cable%20(AAC))
5. Gas Extremadura. (29 de diciembre de 2020). *Uso del gas natural. Producción de energía*. Gas Extremadura.<https://www.dcgasextremadura.es/el-gas-natural/uso-del-gas-natural-produccion-de-energia/#:~:text=La%20combusti%C3%B3n%20es%20la%20reacci%C3%B3n,normalmente%20en%20forma%20de%20llama>.
6. Granados,D.et al (2018). *Balance de masa*, universidad nacional de san juan. <http://www.fi.unsj.edu.ar/asignaturas/introing/BalanceDeMasa.pdf>
7. Ingmecanica (21 de febrero de 2022). *Sistemas de cadenas y poleas*. https://www.eduxunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/42_sistemas_de_polea_y_correa.html
8. Megachain (21 de febrero de 2022). *Cadenas de rodillos norma asa*, www.megachainperu.com/img/catalogos/cadenas-asa.pdf
9. Metal casting theory and desingn. (2012). *Crucibles and their furnances*. <http://me401metalcasting.files.wordpress.com/2012/07/401-crucible-furnaces.pdf>
10. Metrogas. (05 de mayo de 2021). *Combustión: Eficiencia de la combustión*. http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1

11. Ministerio de energía y minas. (17 de diciembre de 2020). *El gas natural*. http://www.minen.gob.pe/minem/archivos/gas_natural.pdf
12. Monzales.M.(16 de diciembre de 2020). *Clasificación de los combustibles*. La guía química. <https://quimica.laguia2000.com/general/clasificacion-de-los-combustibles>
13. Norma técnica peruana 900-058-2019, *gestión de residuos: código de colores para almacenamiento de residuos sólidos* (28 de marzo del 2019).
14. Osinergmin.(2015).*masificación del uso del gas natural*. <https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/OficinaComunicaciones/EventosRealizados/ForoMoquegua/2/Gas-Natural-Us-Residencial-Comercial-Industrial.pdf>
15. Odetto.A (21 de febrero 2022). *Cadenas de transmisión*. https://www.firo.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/3_anio/mecanica_electrica/cadenas_de_transmision.pdf
16. Osinergmin.(22 de diciembre de 2020).*diferencias entre el gas natural y el GLP*.<http://www2.osinerg.gob.pe/pagina%20osinergmin/gas%20natural/contenido/Faq.html#:~:text=Osinergmin&text=%C2%BFQu%C3%A9%20diferencia%20existe%20entre%20gas%20natural%20y%20GLP%3F&text=Es%20m%C3%A1s%20liviano%20que%20el,r%C3%A1pidamente%20sin%20formar%20acumulaciones%20peligrosas.&text=Su%20empleo%20no%20es%20continuo,tiene%20que%20comprar%20otro%20bal%C3%B3n>
17. Oxford lenguajes (09 de marzo 2022), *Diccionario, Oxford languages*. <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>
18. Portafolio. (21 de diciembre de 2020). *Gas natural pieza clave en el engrane de la industria*. <https://www.portafolio.co/economia/gas-natural-pieza-clave-en-el-engranaje-de-la-industria-523874>
19. Promart home center. (22 abril de 2021). *Ladrillos y bloques: ladrillos para pared*. <https://www.promart.pe/>
20. Recemsa.(09 febrero de 2022).*Chatarra de aluminio*. <https://www.elchatarrero.com/chatarra/aluminio>

21. Sanchez, C. (08 de febrero de 2020). Normas APA – 7ma (séptima) edición. *Normas APA (7ma edición)*. <https://normas-apa.org/>
22. Sat ferroli. (18 de diciembre de 2020). *ventajas y desventajas del gas natural*. <https://satferroli.com/noticias/ventajas-y-desventajas-del-gas-natural/>
23. Schemin Perú S.A,(16 de Febrero de 2022).*Catalogo industrial-refractarios*, Lima –Perú
24. Textos científicos. (15 de diciembre de 2020). *tecnología de combustión: los combustibles, origen y clasificación*. <https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/origen-clasificacion>
25. Vera,E.(11 de diciembre de 2020),*maquinas térmicas*. Combustible y combustión. <https://sites.google.com/site/maquinastermicasveraalias/home/combustible-y-combustion>
26. Villafior, G. et al (2008). *Variables significativas del proceso de combustión del gas natural*. *Información tecnológica*. <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v19n4/art08.pdf>
27. Vicente,P.(2011).*Generación de calor*, Combustión. https://salvadorcobo.files.wordpress.com/2011/03/leccion_gc_combustion.pdf

ANEXO 01: Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p>El taller de fundición de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica cuenta con un horno de fosa que posee desventajas en su funcionamiento, así como la exposición innecesaria del crisol a cambios bruscos de temperatura en la etapa de colado del metal reduciendo la vida útil del mismo.</p> <p>Por ello, se ve la necesidad de contribuir con el diseño y construcción de un horno de fundición de crisol basculante de fácil operación, el cual toma en consideración las condiciones existentes en el lugar de instalación.</p> <p>¿En qué medida será posible la mejora de condiciones en la realización de fusión de aluminio en el taller de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica mediante el diseño y construcción de un horno de crisol basculante?</p>	<p>Objetivo general del problema: Diseñar y construir un horno de crisol basculante para fusión de aluminio.</p> <p>Objetivos específicos del problema:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Establecer el dimensionamiento adecuado del horno. • Realizar el proceso de fundición del aluminio a nivel laboratorio. • Selección de materiales para la construcción del horno. 	<p>El diseño y construcción del horno de crisol basculante mejorara las condiciones en la realización de fusión de aluminio en el taller de la escuela profesional de ingeniería metalúrgica.</p>	<p>Variables independientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Capacidad del horno. • Temperatura. • Tiempo de colado. <p>Variables dependientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dimensiones del horno. 	<p>Alcance: El alcance de este trabajo es correlacional. Debido a que mediante el grado de asociación que existe entre variables sabremos cómo se comporta una variable al conocer el comportamiento de otras variables vinculadas a ella.</p> <p>El tipo de investigación: Para este trabajo es experimental.</p>

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 02: Dimensiones del crisol



R.U.C.: 20525198961

DIRECCION: JR. RODOLFO RUTTE 180 URB. OYAGUE | MAGDALENA DEL MAR | LIMA | PERÚ

TELEFONO: 511 2615975

EMAIL: VENTAS@METALINSUMOS.COM

COT 18-0492

Lima, 19 de Noviembre de 2018

Señorita:

Mariela Suca

Arequipa

De nuestra consideración:

En atención a su amable solicitud nos es grato cotizarle lo siguiente:

Ítem	Cant	Descripción	Dimensiones (mm)			Precio Unitario US\$	Precio de Venta US\$
			h	Øsup.	Øinf.		
01	1	CRISOL MORGAN SALAMANDER GRAFINOX MOD. A30 DE GRAFITO. Fabricado por Morganite Brasil Ltda.	290	230	160	96,76	96,76
02	1	CRISOL MORGAN SALAMANDER GRAFINOX MOD. A50 DE GRAFITO. Fabricado por Morganite Brasil Ltda.	330	270	195	127,44	127,44

PRECIOS INCLUYEN EL I.G.V. (18%)**ENTREGA:** Inmediata.**FORMA DE PAGO:** Contado.

Depósito en Cuenta Corriente BCP M.E. N° 193-2055841-1-79.

Depósito en Cuenta Corriente BCP M.N. N° 191-1844043-0-96.

NOTA: ¹ Envío pago destino.

Agradeciendo su atención y en espera de su apreciable orden de compra.

Atentamente,

Carla Estrada T.

Representante Comercial

METALINSUMOS S.A.C.

www.metalinsumos.com

ANEXO 03: Datos tecnicos del crisol



MOLTEN METAL SYSTEMS

Global Technical Data Sheet

09/11/2017

Purchaser :	METALINSUMOS SAC	Morganite Brasil Ltda.
Order No :		Av. do Taboão, 3265
Product :		São B. Campo - São Paulo
Despatch Date :	31/10/2017	Brazil
		Tel: +55 11 4075 0400, 11 4178 1999

SALAMANDER GRAFINOX

Manufacturing Site	Morganite, Brazil	
Product Group	Crucible	
Brand acronym	GRAG	

Physical Properties

Density	1.6-1.8	g/cm ³
Porosity (in Water)	28-30	%
Transverse Bending Strength	10-15	MPa
Thermal Conductivity at 750°C	4-7	W/m.K
Linear Expansion Coefficient	3.0-3.5	x 10 ⁻⁶ /°C
Electrical Resistivity at RT	50-70	x 10 ⁻⁸ Ω.cm
Max. Operating Temperature	1600	°C

Chemical Composition

C	41-46	%
SiC	20-23	%
SiO ₂	17-19	%
Si	0	%
Al ₂ O ₃	14-16	%
Na ₂ O, K ₂ O, Fe ₂ O ₃ , B ₂ O ₃ & others	1-3	%

jul/17

For technical questions on the data, please contact :-
Mr. Gustavo Antunes on gustavo.antunes@morganplc.com

Morganite Brasil Ltda.
Av. do Taboão, 3265
São B. Campo - São Paulo
Brazil
Tel: +55 11 4075 0400, 11 4178 1999
www.morganmms.com

Molten Metal Systems' products are manufactured from premium grade raw materials under an ISO 9001:2008 quality management system.



For additional information on Molten Metal Systems' products & services or to find a location nearest to you, please visit:
www.morganmms.com

Molten Metal Systems reserves the right to change specifications at any time. Not responsible for any typographic errors.

ANEXO 04: Ficha técnica del ladrillo refractario



Catálogo Ladrillos para pared

Ladrillo Refractario 1.1/4"

Schemin 12883



FICHA TÉCNICA

Características Productos refractarios preformados, a base de óxidos naturales no metálicos de alto punto de fusión, que brindan alta performance de refractariedad y expansión térmica, que los hacen compatibles para soportar acciones mecánicas presentes en la operación. Fuerte. Resistente. Almacenable.	Garantía 1 Año
Observaciones Fabricado con material generador de calor.	Profundidad Del Producto 22.5 cm
Recomendaciones De Uso Colocar el ladrillo seco de 3 a 4 mm de junta entre ladrillos. Cuidar en la instalación el nivel y la adherencia necesaria. Realizar la instalación adecuada, si no recibir asesoría.	Altura Del Producto 3.2 cm
Modelo Refractario 1 1/4"	Tipo de Producto Ladrillo
Ancho Del Producto 11.3 cm	Sub Tipo de Producto Refractario
Material Óxidos Naturales	Color Beige
Número de piezas 1	Marca Schemin
Rendimiento 42 u/m ²	Peso Del Producto 1.86 kg
Advertencia de uso Utilizar los implementos de seguridad al momento de manipular el producto. Utilizar el equipo y herramientas adecuadas para instalar el producto. Mantener alejado de los niños.	Diseño Rectangular
Medida 1.1/4"	Norma NTP

Fuente. Recuperado de <https://www.promart.pe/ladrillo-refractario-1-1-4--12883/p>

ANEXO 05: Ficha técnica de cemento refractario 1000 BBQ- Schemin 12884



Catálogo Preparados


Cemento refractario 1000 BBQ x 5 kg
 Schemin 12884


FICHA TÉCNICA

Despacho 24 horas Sí	Características Instalación en paredes, enchapes de parrillas, chimeneas, barbiquier, hornos de pollerías, hornos de panificación fijos y hornos rodantes, etc. En el fraguado de juntas, después del enchape. Para asentar o instalar ladrillo refractario Schemin en hornos de usos diversos. En la industria petrolera de explotación, fabricación de piezas y/o accesorios refractarios o ceramistas.
Garantía Por defecto de fabricación	Observaciones Utilizar para el revestimiento en zonas donde la temperatura no exceda los 1000C.
Profundidad Del Producto 5 cm	Recomendaciones De Uso Calcular correctamente dosificación, la cantidad de cemento y agua a utilizar. Trabajar con cuidado para evitar accidentes. Revisar las instrucciones de uso.
Altura Del Producto 25 cm	Modelo Refractario 1000 BBQ Bolsa
Tipo de Producto Cemento	Ancho Del Producto 20 cm
Material Cemento	Número de piezas 1
Marca Schemin	Rendimiento 01 Bolsa de 5kg. Rinde Aprox. 2.5mt2
Peso Del Producto 5 kg	Advertencia de uso Utilizar los implementos de seguridad al momento de manipular el producto. Utilizar el equipo y herramientas adecuadas para instalar el producto. Mantener alejado de los niños. Almacenar los Cementos Protegiendo de la humedad y el calor. Después de 48 horas de instalado el refractario, poner en servicio el horno o chimenea.
Presentación Bolsa	Resistencia 1000 kg

Fuente. Recuperado de <https://www.promart.pe/cemento-refractario-yellow-bolsa-x-5-kg/p>

ANEXO 06: Dimensiones del aislante

PROMART
HOMECENTER

Catálogo Lana de vidrio

Lana de vidrio R7 50 mm x 1.20 x 24 m - 28.8 m²
Romerol 102051





FICHA TÉCNICA

Fuente. Recuperado de <https://www.promart.pe/lana-de-vidrio-r7-50-mm-x-1-20-x-24-m---28-8-m2/p>

ANEXO 07: Estándares nacionales de calidad ambiental para ruido

Zonas de aplicación	Valores presentados en L_{AeqT}	
	Horario diurno	Horario nocturno
Protección especial	50	40
Residencial	60	50
Comercial	70	60
Industrial	80	70

Fuente. Recuperado de D.S. N° 085-2003-PMC

ANEXO 08: Ficha técnica del E-6011

INDURA 6011	<i>Clasificación AWS: E-6011 / E-4311</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Electrodo para acero al carbono • Revestimiento celulósico potásico. Color canela • Corriente continua, electrodo positivo o corriente alterna 	<ul style="list-style-type: none"> • Toda posición • Certificado por Canadian Welding Bureau y anualmente por American Bureau of Shipping y Lloyd's Register of Shipping

Descripción

El electrodo 6011 posee un revestimiento de tipo celulósico diseñado para ser usado con corriente alterna, pero también se le puede usar con corriente continua, electrodo positivo.

La rápida solidificación del metal depositado facilita la soldadura en posición vertical y sobrecabeza.

El arco puede ser dirigido fácilmente en cualquier posición, permitiendo altas velocidades de deposición (soldadura).

Usos

Este electrodo es apto para ser utilizado en todas las aplicaciones de soldadura en acero dulce, especialmente en trabajos donde se requiera alta penetración.

Aplicaciones típicas

- • Cordón de raíz en cañerías
- • Cañerías de oleoductos
- • Reparaciones generales
- • Estructuras
- • Planchas galvanizadas

Procedimiento para soldar

- Debe seguirse el mismo procedimiento utilizado para soldar con un electrodo E-6010.

Composición química (típica) del metal depositado:				
C 0,11%; Mn 0,41%; Si 0,23%; P 0,010%; S 0,017%				
Características típicas del metal depositado (según norma AWS: A5.1/A5.1M-04):				
Resultados de pruebas de tracción con probetas de metal de aporte		Requerimientos	Energía Absorbida Ch-v	Requerimientos
Resistencia a la tracción	: 495 MPa	430 MPa	34J a -30°C	27J a -30°C
Límite de fluencia	: 424 MPa	330 MPa		
Alargamiento en 50 mm	: 27%	22%		
Amperajes recomendados:				
Diámetro mm	Longitud mm	Amperaje		Electrodos x kg aprox.
		mín.	máx.	
2,4	300	50	90	74
3,2	350	80	120	34
4,0	350	120	160	24
4,8	350	160	220	17

Fuente. Recuperado de https://www.indura.com.ar/content/storage/ar/producto/ID3318_file_1115_6011.pdf

ANEXO 09: Ficha técnica del acero ASMT A36

Laminados en Caliente

BOBINAS Y PLANCHAS LAC

DENOMINACIÓN:
BLAC A36, PLAC A36.

DESCRIPCIÓN:
Bobinas y Planchas de acero laminadas en caliente con bordes de laminación.

USOS:
Se usa en la fabricación de tubos, perfiles plegados, asimismo luego de su corte en planchas, se emplea en la construcción de silos, carrocerías y construcción en general.

NORMAS TÉCNICAS:

DESIGNACIÓN	NORMAS TÉCNICAS
Estructural	ASTM A36 y Dimensiones según JIS G3193-2008

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%):

CALIDAD ASTM	%C	%Mn MÁX.	%P MÁX.	%S MÁX.	SI MÁX.
A36	0.25 máx.	-	0.040	0.050	0.40

DIMENSIONES NOMINALES:

BOBINAS LAMINADAS EN CALIENTE (BLAC A36)
1.5 x 1200 mm
1.8 x 1200 mm
1.9 x 1200 mm
2.0 x 1200 mm
2.2 x 1200 mm
2.3 x 1200 mm
2.4 x 1200 mm
2.5 x 1200 mm
2.9 x 1200 mm
4.4 x 1200 mm
5.9 x 1200 mm

PLANCHAS LAMINADAS EN CALIENTE (PLAC A36):

DIMENSIONES (mm)	PESO TEÓRICO EN kg/plancha				TOLERANCIA EN EL ESPESOR (mm)	ESPESOR EQUIVALENTE O APROXIMADO
	1,200 x 2,400 (mm)	1,200 x 6,000 (mm)	1,500 x 6,000 (mm)	2,400 x 6,000 (mm)		
1.5"	33.91				±0.18	1/16"
1.8"	40.69				±0.19	9/128"
1.9"	42.96				±0.19	9/128"
2.0"	45.22	113.04			±0.20	5/64"
2.2"	49.74	124.34			±0.20	2/23"
2.3"	52	130			±0.20	1/11"
2.4"	54.26	135.65			±0.20	3/32"
2.5"	56.52	141.3			±0.22	3/32"
2.9"	65.56	163.91			±0.22	1/8"
3.0"			211.95		±0.22	1/8"
3.9"	88.17	220.43			±0.24	5/32"
4.0"			282.6		±0.45	5/32"
4.4"	99.48	248.69			±0.45	3/16"
4.5"			317.93		±0.45	3/16"
4.8"			339.12		±0.45	3/16"
5.0"				565.20	±0.50	3/16"
5.9"	133.39	333.47			±0.50	1/4"
6	135.65	339.12	423.9		0.8/0.3	1/4"
6.35	143.56	358.9			0.8/0.3	1/4"
6.4			452.16	723.46	0.8/0.3	1/4"
8	180.86	452.16	565.2	904.32	0.8/0.3	5/16"
9	203.47		635.85	1,017.36	0.8/0.3	3/8"
9.5			671.18	1,073.88	0.8/0.3	3/8"
12	271.3		847.8	1,356.48	0.8/0.3	1/2"
12.5			883.13	1,413.00	0.8/0.3	1/2"
16	361.73		1,130.40	1,808.64	0.8/0.3	5/8"
19			1,342.35	2,147.76	0.8/0.3	3/4"
20	452.16			2,260.80	0.9/0.3	3/4"
22			1,554.30	2,486.88	0.9/0.3	7/8"
25	565.2		1,766.25	2,826.00	1.0/0.3	1"
32	723.46		2,260.80	3,617.28	1.3/0.3	1 1/4"
38	859.1		2,684.70	4,295.52	1.5/0.3	1 1/2"
50	1,130.40		3,532.50	5,652.00	1.8/0.3	2"
63	1,424.30		4,450.95	7,121.52	2.4/0.3	2 1/2"
75	1,695.60		5,298.75	8,478.00	2.8/0.3	3"
100	2,260.80		7,065.00	11,304.00	3.5/0.3	4"
125			8,831.25	14,130.00	3.5/0.3	5"
150	3,391.20		10,997.50	16,956.00	3.5/0.3	6"

(*) Dimensiones bajo norma JIS G3193

QCQA01-F202/03/JUN 18 - QCQA01-F201/03/JUN 18

Previo acuerdo se comercializa en otras medidas.

Laminados en Caliente

BOBINAS Y PLANCHAS LAC

PROPIEDADES MECÁNICAS:

CALIDAD	NORMA	LÍMITE DE FLUENCIA MPa (kg/mm ²)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN MPa (kg/mm ²)	ALARGAMIENTO EN 200 mm (%)	DOBLADO A 180°
Estructural	ASTMA36	250 mín. (25.50 mín.)	400 - 550 (40.80 - 56.10)	20 mín.	Sin fisura (°)
Estructural	ASTM A1011/A1011M 5536 Tipo 2	250 mín. (25.50 mín.)	400 - 550 (40.80 - 56.10)	16 mín.	Sin fisura (°)
Estructural	ASTM A1011/A1011M Grado 36 Tipo 2	250 mín. (25.50 mín.)	400 - 550 (40.80 - 56.10)	18 mín.	Sin fisura (°)

TOLERANCIAS DIMENSIONALES:

Según JIS G3193-80.

Según ASTM A6 para espesores mayores o iguales a 6mm.



QCOA01-F202/03/JUN 18 - QCOA01-F201/03/JUN 18

Fuente. Recuperado de https://www.acerosarequipa.com/sites/default/files/fichas/2020-10/7.%20AF_HOJA%20TECNICA-PLANCHA-BOBINA_LAC.pdf?fv=oLy1QoIW

ANEXO 10: Porcentaje de exceso de aire según la aplicación.

Tipo de Aplicación	% Exceso de Aire(a)	% CO (b)	Observaciones
Calderas de Vapor: Igneotubulares, Acuatubulares y de Agua Caliente	10-30%		La resonancia puede ser un problema.
Hornos muflas	5-25%		
Hornos para fundición de cobre, hierro y sus aleaciones		<1%	Generalmente necesitan atmósfera reductora.
Hornos para fundición de Aluminio	<20		Generalmente atmósfera oxidante.
Horno de crisol para metales		0-1%	Generalmente necesitan atmósfera reductora.
Hornos de crisol para materiales cerámicos	10-25%		
Generadores Exotérmicos (c)		0,5%-3%	La combustión rica produce un gas reductor que inhibe la oxidación.
Hornos a fuego directo, sin recirculación	20-100%		Depende del tipo de proceso.
Hornos a fuego directo, con recirculación	> 250%		Si hay solventes en el horno, pueden requerirse valores aún más altos.
Hornos a fuego indirecto y Calentadores	10-30%		
Tubos de inmersión y radiación	15-50%		El objetivo es obtener una distribución del calor uniforme a lo largo del tubo.

Fuente. Recuperado de http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1

ANEXO 11: Ficha técnica del tubo de Acero A500

Tubo ASTM A500 LAC y GALV PARA ESTRUCTURAS

DENOMINACIÓN:

TNM RED ND A500, TNM RED OD A500, TNM CUA A500, TNM REC A500, TGM RED OD A500, TGM RED ND A500, TGM CUA A500, TGM REC A500.

DESCRIPCIÓN:

Tubo fabricado con acero al carbono laminado en caliente o con superficie galvanizada, utilizando el sistema de soldadura de resistencia eléctrica por inducción de alta frecuencia longitudinal (ERW). Las secciones de fabricación son redondas, cuadradas y rectangulares.

USOS:

Diversas estructuras livianas y pesadas, correderías, tijerales, postes, etc.

NORMAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN:

Las propiedades mecánicas, dimensiones, pesos y espesores se fabrican según la norma ASTM A500 - Grados A y B según lo solicitado.

PRESENTACIÓN:

- 1.- Longitud:
 - Redondos: 6.40 m y 6 m.
 - Cuadrados y rectangulares: 6 m.
 - Otras longitudes a pedido.
- 2.- Acabado de extremos: Refrentado (plano), limpios de rebordes.

DIMENSIONES Y PESOS NOMINALES en Kg/m:

DESIGNACIÓN NOMINAL	DIMENSIÓN EXTERIOR (mm)	ESPESORES (mm)							
		1.5	2.0	2.3	2.5	3.0	3.3	4.0	
REDONDO NOMINAL	1/4"	13.70	0.53	0.56	0.65				
	3/8"	17.10	0.68	0.75	0.84				
	1/2"	21.30	0.87	0.95	1.08	1.16	1.35		
	3/4"	26.70	1.11	1.22	1.38	1.49	1.75		
	1"	33.40	1.40	1.55	1.76	1.91	2.25		
	1 1/4"	42.20	1.79	1.96	2.26	2.45	2.90		
	1 1/2"	48.30	2.06	2.28	2.61	2.82	3.35	3.66	4.37
	2"	60.30	2.60	2.88	3.29	3.56	4.24	4.64	5.56
	2 1/2"	73.00		3.50		4.35	5.18	5.67	6.81
	3"	88.90		4.29		5.33	6.36	6.97	8.38
4"	114.30		5.54		6.90	8.24	9.04	10.88	

■ Negro y Galvanizado.
(*) Dimensiones y Tolerancias.

DESIGNACIÓN NOMINAL	DIMENSIÓN EXTERIOR (mm)	ESPESORES (mm)								
		1.5	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	4.5	6.0	
CUADRADO L.E.	-	25x25	1.06		1.46					
	-	30x30	1.30		1.70					
	-	40x40	1.78		2.24		3.32			
	-	50x50	2.25		3.12	3.87	4.32			
	-	75x75			4.50	5.56	6.81			
	-	100x100			6.17	7.68	9.17	12.13	13.59	16.98

■ Negro y Galvanizado.

SISTEMA INGLÉS:

DESIGNACIÓN NOMINAL	DIMENSIÓN EXTERIOR (mm)	ESPESORES (mm)								
		1.5	1.8	2.0	2.3	2.5	3.0	4.0	4.5	6.0
CUADRADO L.E.	1"	-	1.36	1.50	1.70	1.84	2.17			
	1 1/4"	-	1.71	1.90	2.16	2.34	2.77			
	1 1/2"	-	2.07	2.29	2.62	2.84	3.37			
	2"	-	2.79	3.09	3.54	3.83	4.56	5.99		
	3"	-		4.69	5.37	5.83	6.96	9.18		
	4"	-		6.28		7.82	9.35	12.37	13.86	
RECT. L.E.	1"x2"	-	2.10	2.32						
	2"x3"	-	3.54	3.92		4.87	5.81			
	2"x4"	-		4.71		5.85	6.98	9.21	10.31	
	2"x6"	-		6.34		7.89	9.43	12.48	13.98	
	4"x10"	-								34.60

■ Negro y Galvanizado.

SISTEMA MÉTRICO:

DESIGNACIÓN NOMINAL	DIMENSIÓN EXTERIOR (mm)	ESPESORES (mm)												
		1.5	1.8	2.0	2.3	2.5	3.0	4.0	4.5	6.0	8.0	10.0	12.0	
CUADRADO L.E.	25mm	1.12	1.33	1.47	1.81									
	30mm		1.62	1.79										
	38mm		2.07	2.29	2.83	3.36								
	40mm		2.18	2.41	2.99	3.55								
	50mm		2.75	3.04	3.77	4.49		6.57	8.53					
	75mm			4.61	5.73	6.84	9.03	10.10	13.24					
	80mm			4.93	6.13	7.31	9.65	10.81						
	100mm			6.18	7.70	9.20	12.17	13.65	17.95					
	125mm					11.55		17.16	22.66					
	150mm					13.91		20.70	27.37	36.10	44.64			
	200mm					18.62		27.76	36.79	48.66	60.34			
	250mm							34.83	46.21	61.22	76.04			
	300mm									73.79	91.74	109.49		
	400mm											123.14	147.18	

■ Negro y Galvanizado.

Tubo ASTM A500 LAC y GALV

PARA ESTRUCTURAS

DIMENSIÓN EXTERIOR (mm)	ESPEORES (mm)											
	1.5	1.8	2.0	2.3	2.5	3.0	4.0	4.5	6.0	8.0	10.0	12.0
RECTANGULO LE	20 x 40	1.35		1.70								
	25 x 50	1.65	2.04	2.26								
	40 x 50		2.46	2.73								
	40 x 60	2.26	2.75	3.03		3.60	4.25					
	40 x 80		2.71	3.66		4.39	5.19					
	50 x 70			3.67		4.56	5.43					
	50 x 75						5.42					
	50 x 100	4.16	4.50		5.56	6.60	8.59	10.10	13.24			
	50 x 150		6.17		7.68	9.17	11.73	13.63	17.95			
	150 x 100				9.66	11.55	15.31	17.16	22.66			
	200 x 100					13.91	18.45	20.70	27.37	36.10	44.64	
	200 x 150					16.26	21.59	24.23	32.08	42.38	52.49	
250 x 100							24.23	32.08	42.38	52.49		
250 x 150							27.76	36.79	48.66	60.34		
300 x 200								46.21	61.22	76.04	90.65	
400 x 200									91.74	109.49		
500 x 300										123.14	147.18	

■ Negro y Galvanizado.

MATERIA PRIMA:

Acero laminado en caliente calidad estructural.

TOLERANCIAS DIMENSIONALES

(Referidas a los valores nominales):

Espesor : + / - 10%

Longitud : +127 / -64

Sección:

1.- Redondo:

DIAMETRO NOMINAL (pulg)	TOLERANCIA DIMENSIONAL + / - (pulg)
Menores 1 1/2" incl.	0.5 %
Mayores 2"	0.75 %

2.- Cuadrados y Rectangulares:

LADO EXTERIOR DEL TUBO (pulg)	VARIACIÓN MÁXIMA + / - (pulg)
Menores 1 1/2" incl.	0.020
2 1/2" a 3 1/2" incl.	0.025
3 1/2" a 4 incl.	0.030

3.- Cuadrados y Rectangulares:

LADO EXTERIOR DEL TUBO (pulg)	VARIACIÓN MÁXIMA + / - (pulg)
Menores a 63.5 incl.	0.31
63.5 a 88.9 incl.	0.64
88.9 a 139.7 incl.	0.76
Mayores a 139.7	0.01 veces el largo de la dimensión plana

PROPIEDADES MECÁNICAS (ASTM A500/A500M GRADOS A y B)

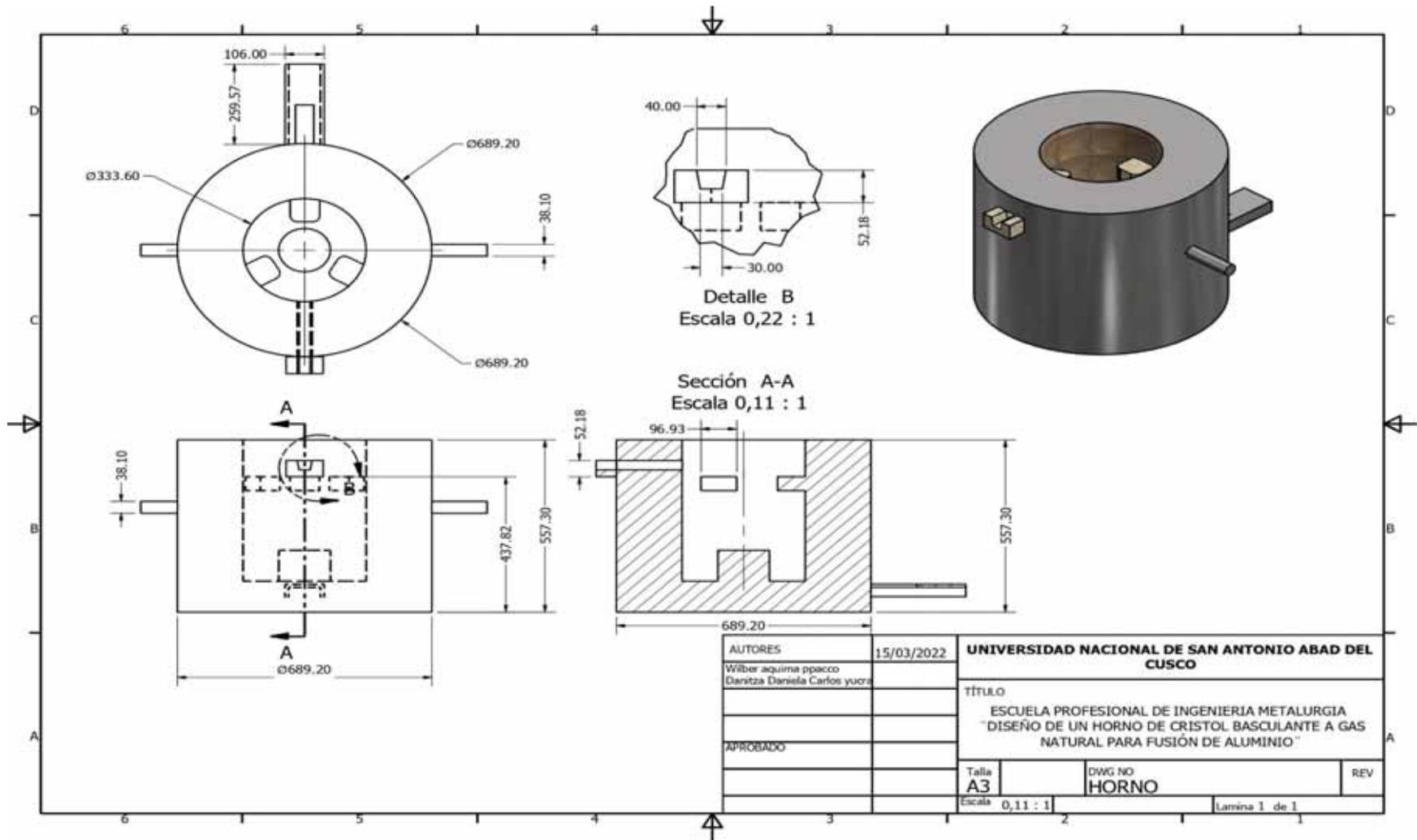
SECCIÓN	NORMA TÉCNICA		GRADO	LÍMITE DE FLUENCIA (MPa)	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN (MPa)	ELONGACIÓN MÍNIMO
	DEL TUBO	DEL ACERO				
REDONDO	ASTM A 500/ A500M	ASTM A 500 GRADO A	A	228	310	25
		ASTM A1011 CS TPO B				
CUADRADO	ASTM A 500/A 500M	ASTM A500 GRADO A	A	269	310	25
		ASTM A1011 CS TPO B				
RECTANGULO	ASTM A 500/A500M	ASTM A500 GRADO A	B	269	310	25
		ASTM A1011 CS TPO B				

(=) Dimensiones y Tolerancias.

QC QA01-F219/05/JUL 20

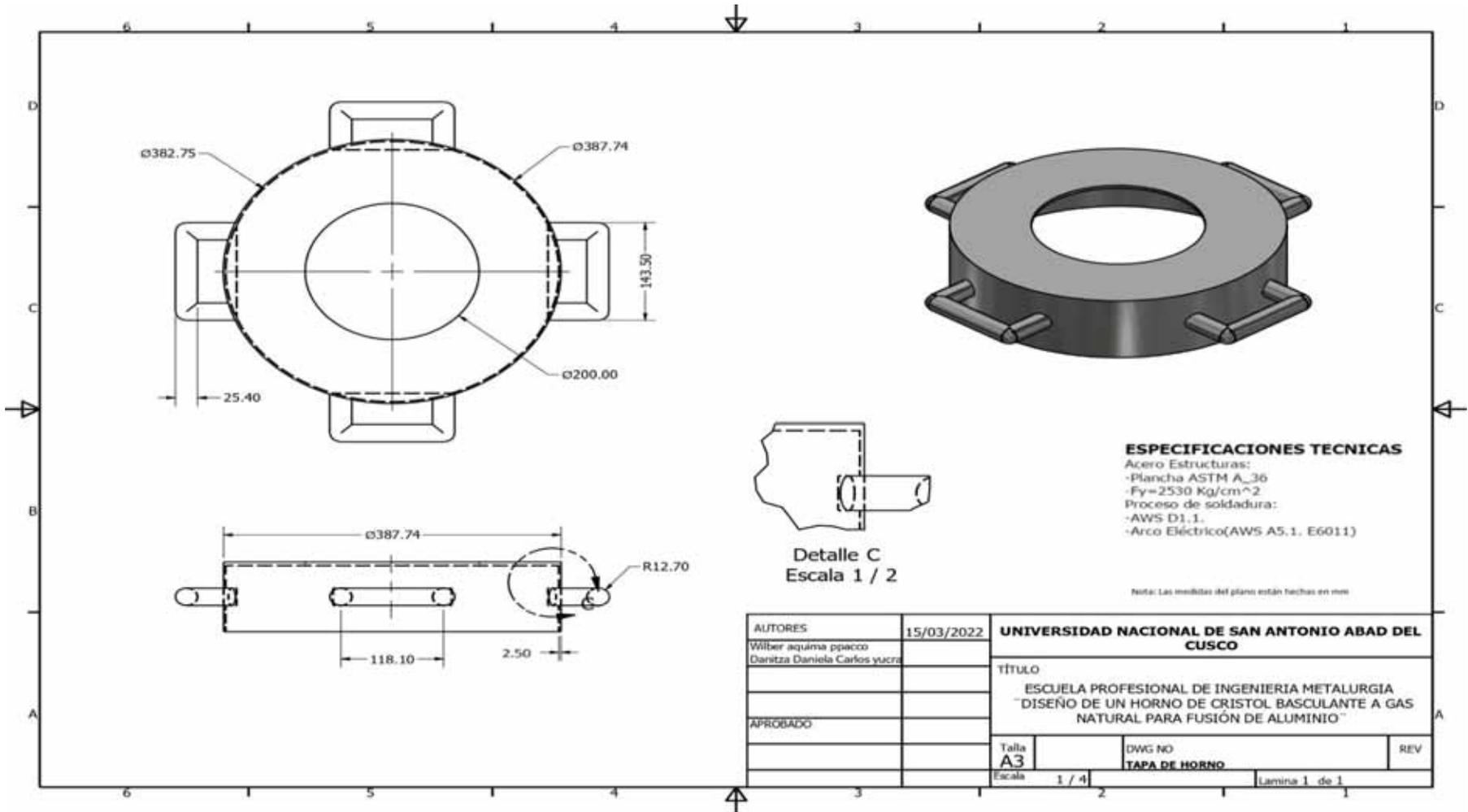
Fuente. Recuperado de https://www.acerosarequipa.com/sites/default/files/fichas/2021-10/HOJA_TECNICA_TUBO_LAC-GALV.pdf?fv=pgyTLBGp

ANEXO 12: Carcasa del horno



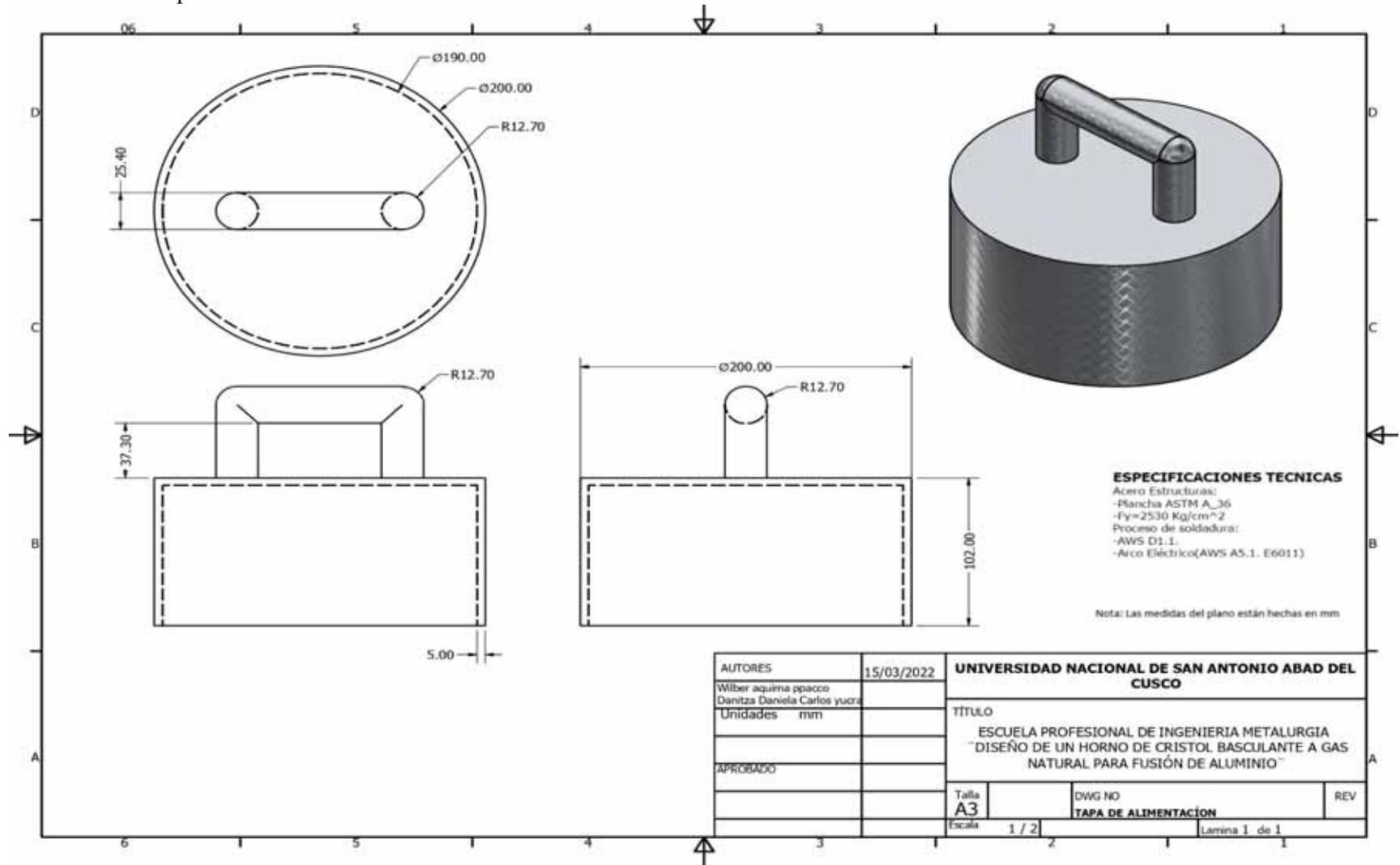
Elaboración propia

ANEXO 13: Tapa del horno



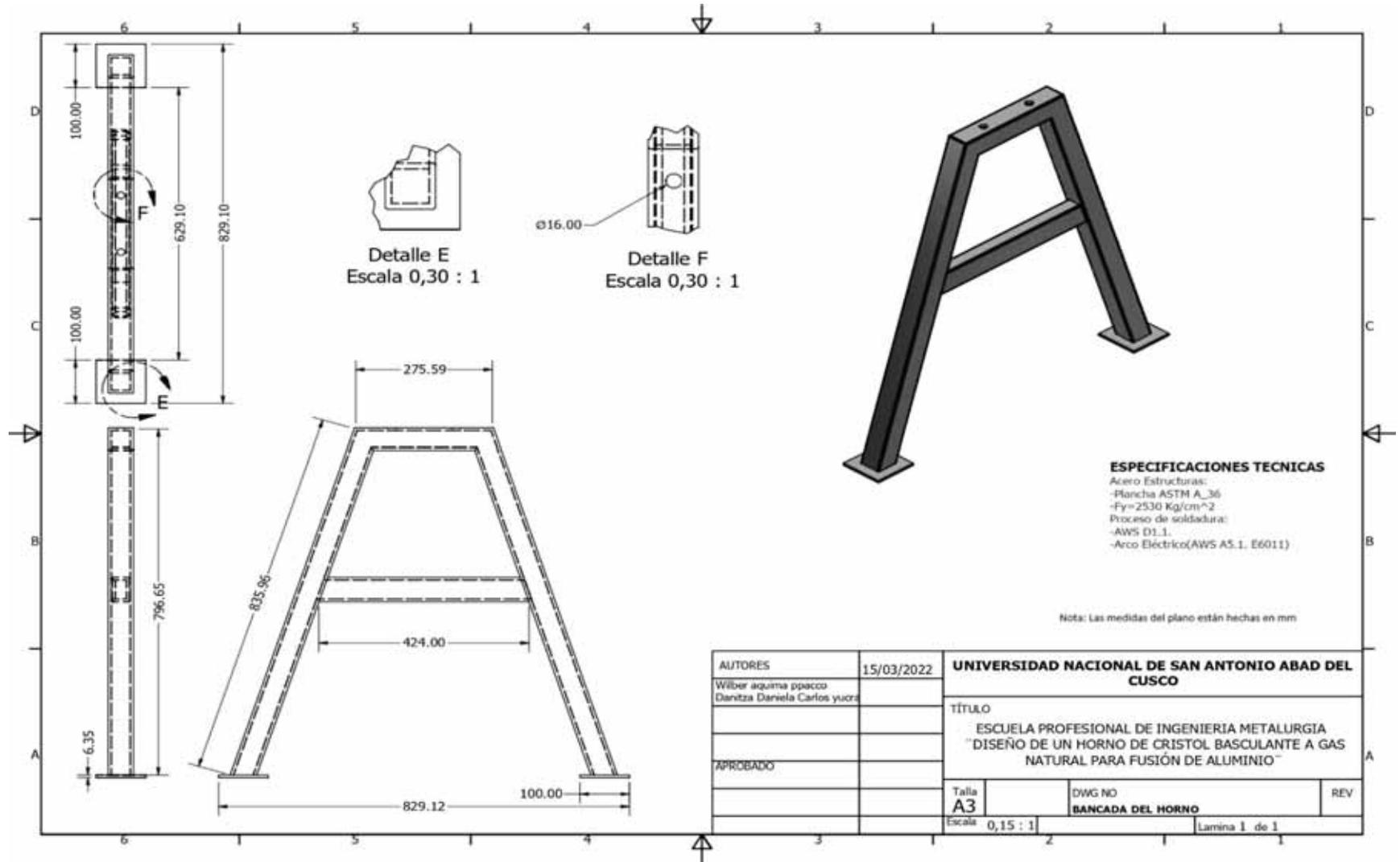
Elaboración propia

ANEXO 14: Tapa de alimentación



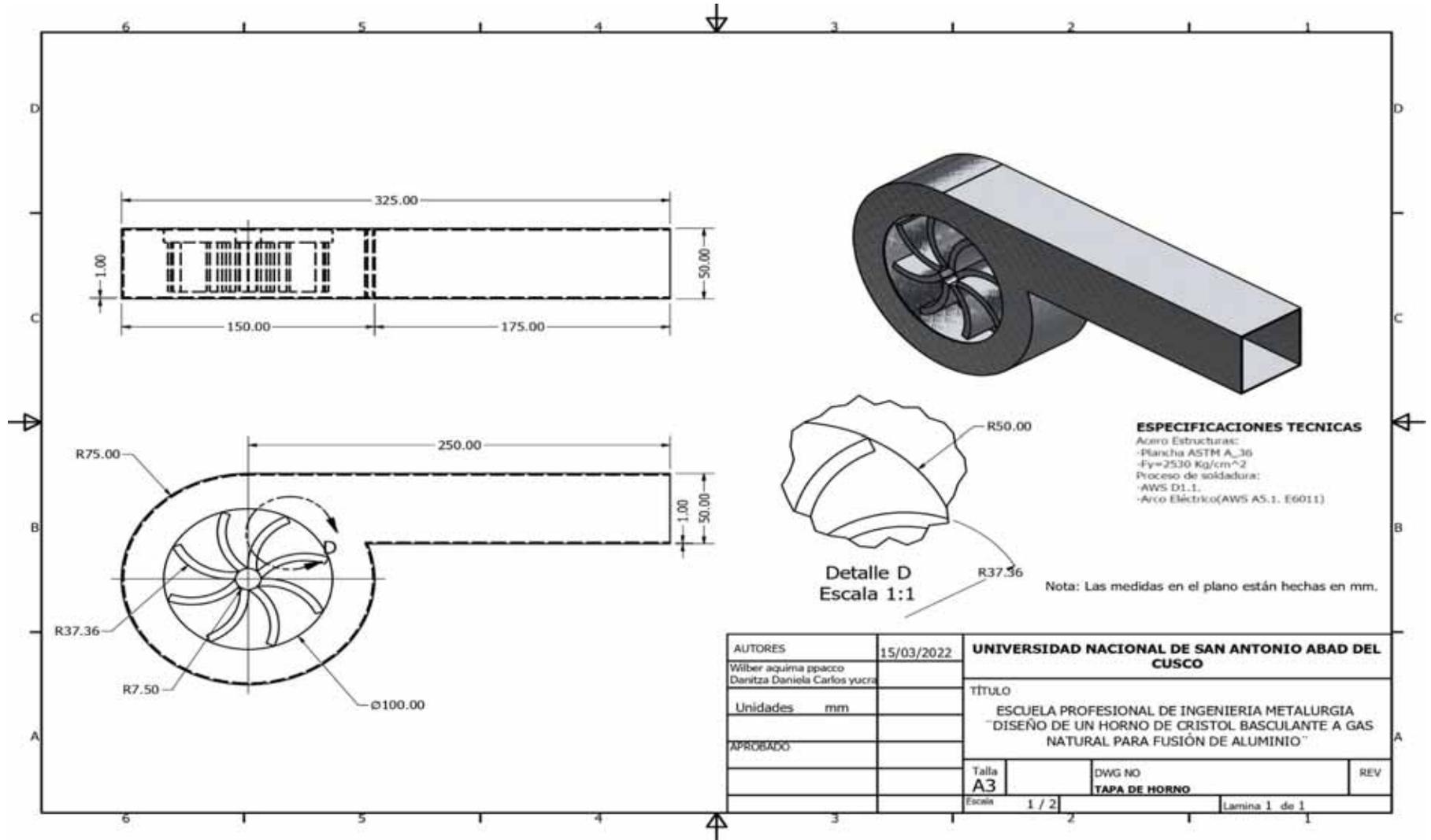
Elaboración propia

ANEXO 15: Bancada del horno



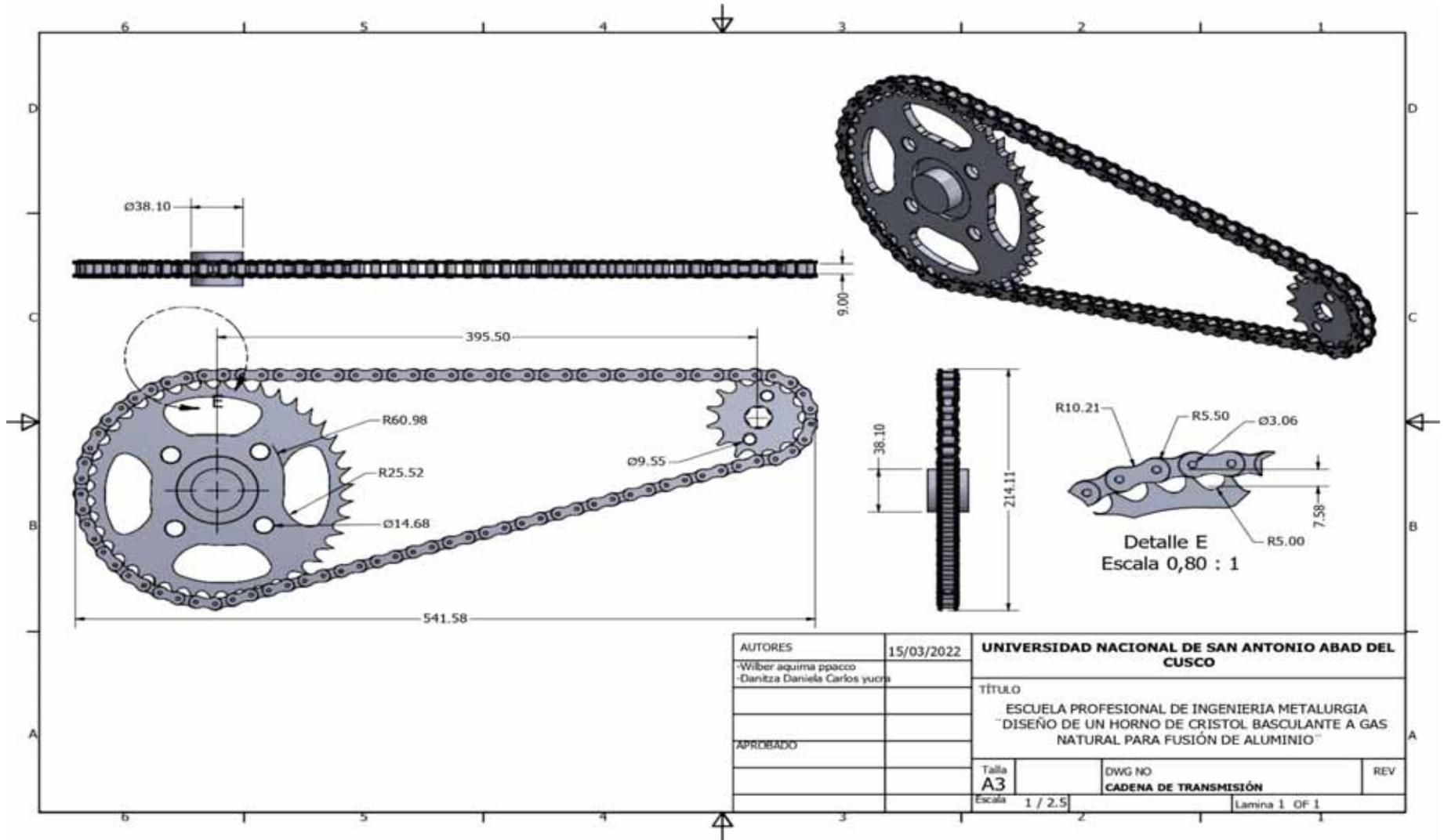
Elaboración propia

ANEXO 16: Turbina



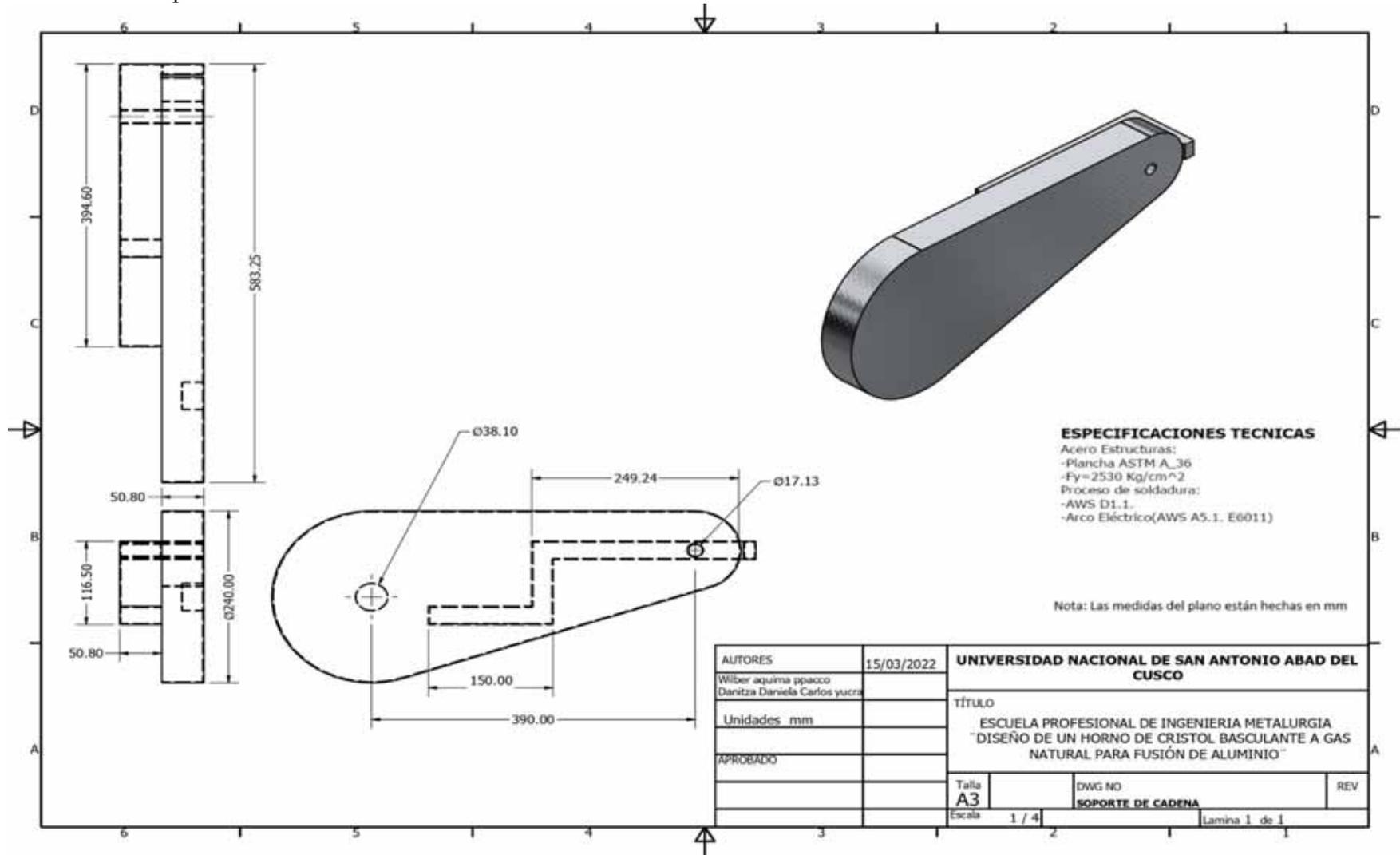
Elaboración propia

ANEXO 17: Cadena de transmisión



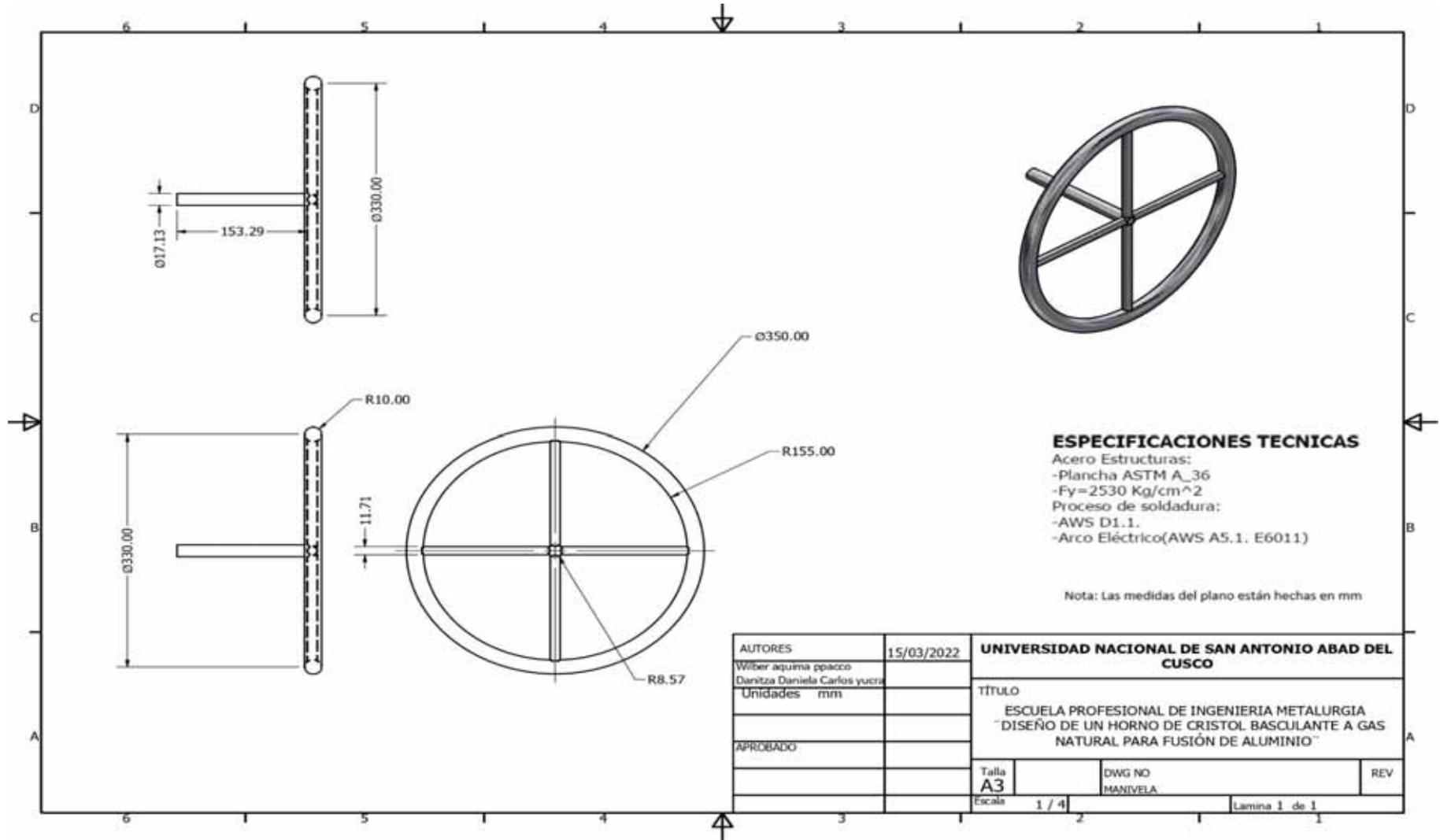
Elaboración propia

ANEXO 18: Soporte de cadena



Elaboración propia

ANEXO 19: Manivela



ESPECIFICACIONES TECNICAS

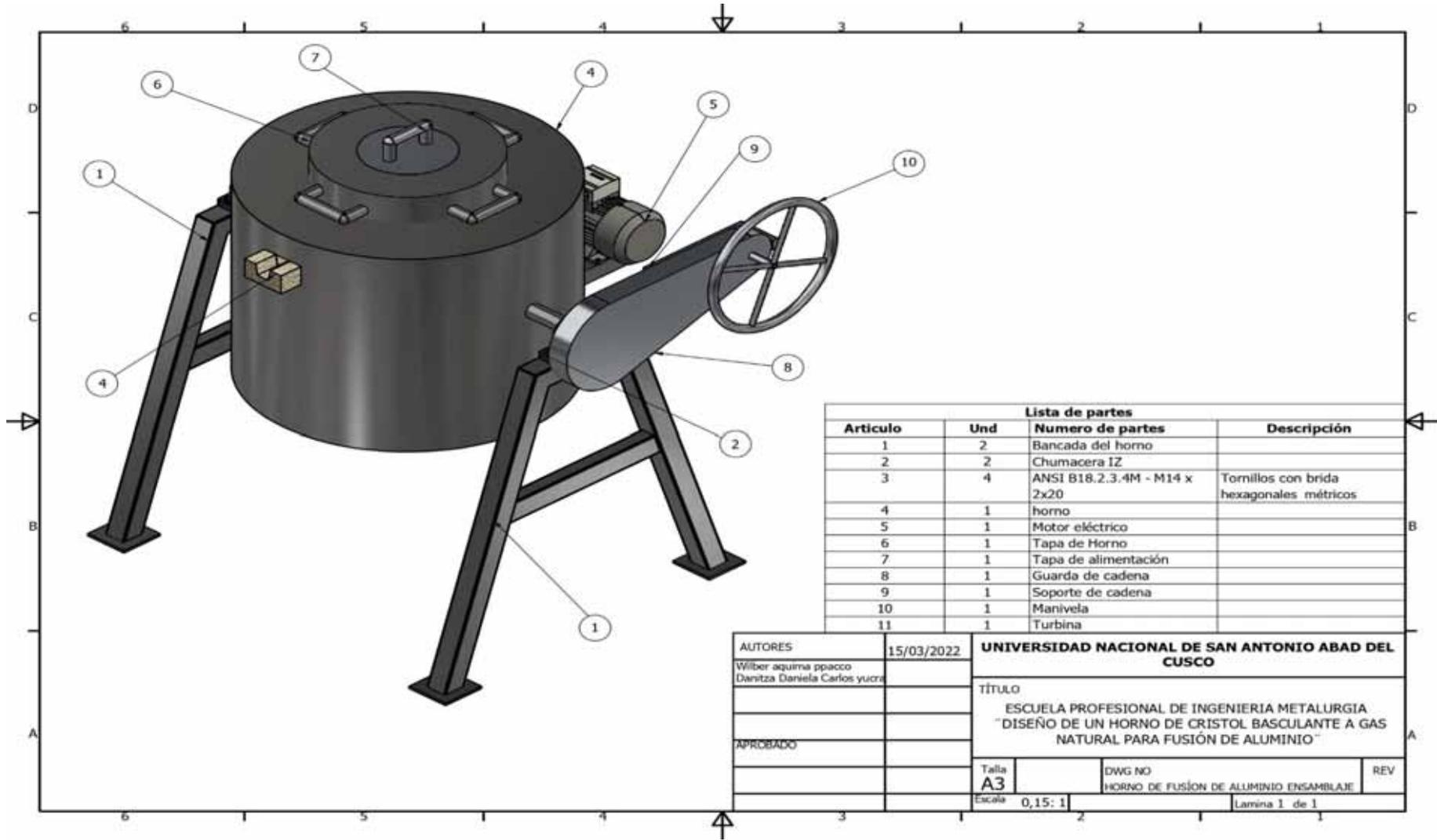
- Acero Estructuras:
- Plancha ASTM A_36
- Fy=2530 Kg/cm²
- Proceso de soldadura:
- AWS D1.1.
- Arco Eléctrico(AWS A5.1. E6011)

Nota: Las medidas del plano están hechas en mm

AUTORES	15/03/2022	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO	
Wiber aquina ppacco		TÍTULO	
Daritzza Daniela Carlos yucra		ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGIA	
Unidades mm		"DISEÑO DE UN HORNO DE CRISTOL BASCULANTE A GAS NATURAL PARA FUSIÓN DE ALUMINIO"	
APROBADO		Talla	REV
		A3	
		DWG NO	
		MANIVELA	
		Escala	Lamina 1 de 1
		1 / 4	

Elaboración propia

ANEXO 20: Ensamble del horno



Elaboración propia

ANEXO 21: Evidencia fotográfica



Aluminio fundido



Caja de moldeo



Producto

Elaboración propia

ANEXO 22: Tabla de emisidad termica -metales

Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ	Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ
Aluminio			Magnesio pulido	300-500	0.07-0.13
Pulido	300-900	0.04-0.06	Mercurio	300-400	0.09-0.12
Lámina comercial	400	0.09	Molibdeno		
Intensamente oxidado	400-800	0.20-0.33	Pulido	300-2 000	0.05-0.21
Anodizado	300	0.8	Oxidado	600-800	0.80-0.82
Bismuto brillante	350	0.34	Níquel		
Latón			Pulido	500-1 200	0.07-0.17
Intensamente pulido	500-650	0.03-0.04	Oxidado	450-1 000	0.37-0.57
Pulido	350	0.09	Platino pulido	500-1 500	0.06-0.18
Placa mate	300-600	0.22	Plata pulida	300-1 000	0.02-0.07
Oxidado	450-800	0.6	Acero inoxidable		
Cromo pulido	300-1 400	0.08-0.40	Pulido	300-1 000	0.17-0.30
Cobre			Ligeramente oxidado	600-1 000	0.30-0.40
Intensamente pulido	300	0.02	Intensamente oxidado	600-1 000	0.70-0.80
Pulido	300-500	0.04-0.05	Acero		
Lámina comercial	300	0.15	Lámina pulida	300-500	0.08-0.14
Oxidado	600-1 000	0.5-0.8	Lámina comercial	500-1 200	0.20-0.32
Oxidado en negro	300	0.78	Intensamente oxidado	300	0.81
Oro			Estaño pulido	300	0.05
Intensamente pulido	300-1 000	0.03-0.06	Tungsteno		
Hoja brillante	300	0.07	Pulido	300-2 500	0.03-0.29
Hierro			Filamento	3500	0.39
Intensamente pulido	300-500	0.05-0.07	Zinc		
Hierro fundido	300	0.44	Pulido	300-800	0.02-0.05
Hierro forjado	300-500	0.28	Oxidado	300	0.25
Aherrumbrado	300	0.61			
Oxidado	500-900	0.64-0.78			
Plomo					
Pulido	300-500	0.06-0.08			
No oxidado, áspero	300	0.43			
Oxidado	300	0.63			

Fuente. Recuperado de Çengel, Y.A. (2007). *Transferencia de calor*, DF, México: Mc Graw-Hill interamericana editores, S.A de C.V. pp 864.

ANEXO 23: Tabla de emisividad termica – no metales

Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ	Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ
Alúmina	800-1 400	0.65-0.45	Papel blanco	300	0.90
Aluminio, óxido de	600-1 500	0.69-0.41	Revoque blanco	300	0.93
Asbesto	300	0.96	Porcelana vidriada	300	0.92
Asfalto, pavimento de	300	0.85-0.93	Cuarzo, áspero, vidrio	300	0.93
Ladrillo			Caucho		
Común	300	0.93-0.96	Duro	300	0.93
De arcilla refractaria	1 200	0.75	Suave	300	0.86
Carbono, filamento de	2 000	0.53	Arena	300	0.90
Tela	300	0.75-0.90	Silicio, carburo de	600-1 500	0.87-0.85
Concreto	300	0.88-0.94	Piel humana	300	0.95
Vidrio			Nieve	273	0.80-0.90
De ventana	300	0.90-0.95	Suelo, tierra	300	0.93-0.96
Pyrex	300-1 200	0.82-0.62	Hollín	300-500	0.95
Pyroceram	300-1 500	0.85-0.57	Teflón	300-500	0.85-0.92
Hielo	273	0.95-0.99	Agua profunda	273-373	0.95-0.96
Magnesio, óxido de	400-800	0.69-0.55	Madera		
Mampostería	300	0.80	Haya	300	0.94
Pinturas			Roble	300	0.90
De aluminio	300	0.40-0.50			
Negra, laca, lustrosa	300	0.88			
De aceite, todos					
los colores	300	0.92-0.96			
De base (primer) roja	300	0.93			
Acrílica blanca	300	0.90			
Esmalte blanco	300	0.90			

Fuente. Recuperado de Çengel, Y.A. (2007). *Transferencia de calor*, DF, México: Mc Graw-Hill interamericana editores, S.A de C.V. pp 865.

ANEXO 24: Emisividades de algunos materiales a 300K

Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92–0.97
Pavimento de asfalto	0.85–0.93
Ladrillo rojo	0.93–0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82–0.92
Suelo	0.93–0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92–0.96

Fuente. Recuperado de Çengel, Y.A. (2007). *Transferencia de calor*, DF, México: Mc Graw-Hill interamericana editores, S.A de C.V. pp 28.

ANEXO 25: Difusividades termicas a temperatura ambiente

Material	α , m ² /s*
Plata	149×10^{-6}
Oro	127×10^{-6}
Cobre	113×10^{-6}
Aluminio	97.5×10^{-6}
Hierro	22.8×10^{-6}
Mercurio (l)	4.7×10^{-6}
Mármol	1.2×10^{-6}
Hielo	1.2×10^{-6}
Concreto	0.75×10^{-6}
Ladrillo	0.52×10^{-6}
Suelo macizo (seco)	0.52×10^{-6}
Vidrio	0.34×10^{-6}
Lana de vidrio	0.23×10^{-6}
Agua (l)	0.14×10^{-6}
Carne de res	0.14×10^{-6}
Madera (roble)	0.13×10^{-6}

Fuente. Recuperado de Çengel, Y.A. (2007). *Transferencia de calor*, DF, México: Mc Graw-Hill interamericana editores, S.A de C.V. pp 23.

ANEXO 26: Coeficientes de transferencia de calor por convección

Modo	<i>h</i>	
	W/m ² °C	Btu/h · pie ² · °F
Convección libre, <i>AT</i> = 30 °C		
Placa vertical 0.9 m [1 pie] de altura en el aire	4.5	0.79
Cilindro horizontal, 5 cm de diámetro. en el aire	6.5	1.14
Cilindro horizontal, 2 cm de diámetro. en agua	890	157,
Convección forzada		
Flujo de aire a 2 m/s sobre placa cuadrada de 0.2 m	12	2.1
Flujo de aire a 35 m/s sobre placa cuadrada a 0.75 m	75	13.2
Aire a 2 atm soplando en tubo de 2.5 cm de diámetro a 10 m/s	65	11.4
Agua a 0.5 kg/s fluyendo en tubo de 2.5 cm de diámetro	3500	616
Flujo de aire a través de un cilindro de 5 cm de diámetro con velocidad de 50 m/s	180	32
Agua hirviendo		
En una piscina o recipiente	2500-35 000	440-6200
Fluyendo en un tubo	5000-100000	880-17600
Condensación de vapor de agua, 1 atm		
Superficies verticales	4000- 11300	700-2000
Tubos horizontales al exterior	9500-25 000	1700-4400

Holman, J.P. (1999). *Transferencia de calor*, México: Compañía editorial continental S.A. de C.V
México, pp 29.

ANEXO 27: Valores típicos de coeficientes de transferencia de calor por convección

Tipo de convección	$h, \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^*$
Convección libre de gases	2–25
Convección libre de líquidos	10–1 000
Convección forzada de gases	25–250
Convección forzada de líquidos	50–20 000
Ebullición y condensación	2 500–100 000

Fuente. Recuperado de Çengel, Y.A. (2007). *Transferencia de calor*, DF, México: Mc Graw-Hill interamericana editores, S.A de C.V. pp 26.

ANEXO 28: Conductividad térmica a temperatura ambiente

Material	$k, \text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}^*$
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (l)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (l)	0.607
Piel humana	0.37
Madera (roble)	0.17
Helio (g)	0.152
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043
Aire (g)	0.026
Uretano, espuma rígida	0.026

Fuente. Recuperado de Çengel, Y.A. (2007). *Transferencia de calor*, DF, México: Mc Graw-Hill interamericana editores, S.A de C.V. pp 20.