



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO CRISOL
CALEFACCIONADO POR GLP SEMIAUTOMATIZADO PARA LA
OBTENCIÓN DE BRONCE PARA EL TALLER GRANITO DE
MOSTAZA DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTORES:

JONNATHAN SAÚL AMAGUAYA SISA

HENRY EDUARDO SEFLA CHÁVEZ

Riobamba - Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO CRISOL
CALEFACCIONADO POR GLP SEMIAUTOMATIZADO PARA LA
OBTENCIÓN DE BRONCE PARA EL TALLER GRANITO DE
MOSTAZA DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA”**

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO INDUSTRIAL

AUTORES: JONNATHAN SAÚL AMAGUAYA SISA

HENRY EDUARDO SEFLA CHÁVEZ

DIRECTOR: Ing. JOSÉ FRANCISCO PÉREZ FIALLOS

Riobamba - Ecuador

2022

©2022, Jonnathan Saúl Amaguaya Sisa; & Henry Eduardo Sefla Chávez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, JONNATHAN SAÚL AMAGUAYA SISA y HENRY EDUARDO SEFLA CHÁVEZ, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 14 de enero de 2022



Jonnathan Saúl Amaguaya Sisa
060556676-9



Henry Eduardo Sefla Chávez
060449507-7

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA INGENIERÍA INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto técnico, **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO CRISOL CALEFACCIONADO POR GLP SEMIAUTOMATIZADO PARA LA OBTENCIÓN DE BRONCE PARA EL TALLER GRANITO DE MOSTAZA DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA**, realizado por los señores: **JONNATHAN SAÚL AMAGUAYA SISA** y **HENRY EDUARDO SEFLA CHÁVEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Eugenia Mercedes Naranjo Vargas PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2022-01-14
Ing. José Francisco Pérez Fiallos DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	_____	2022-01-14
Ing. Ángel Geovanny Guamán Lozano MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2022-01-14

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación a mis padres, por su infinito amor, sacrificio y por enseñarme que a pesar de los problemas siempre la unión y el amor lo soluciona todo, han sido la mayor motivación que he tenido para conseguir todo lo que me he propuesto en la vida. A mi hermana, por cuidarme siempre, por sus consejos y ayudarme en momentos de mayor necesidad. A mi familia y amigos quienes confiaron en mí y me apoyaron incondicionalmente a lo largo de mi vida universitaria. A todas las personas que me apoyaron y contribuyeron a que este trabajo se desarrolle con éxito.

Henry

AGRADECIMIENTO

Agradezco infinitamente a Dios y a San Pedrito por bendecirnos la vida y por regalarme una familia tan maravillosa con quienes anhelo compartir muchos momentos más de triunfos y alegrías. A mi madre y a mi padre que son mi fuente de inspiración para ser mejor cada día, aportan en mí esas ganas de luchar y continuar a pesar de las dificultades. A mi hermana por su infinito cariño y por sus palabras que me hacían sentir orgulloso de lo que soy. Un agradecimiento sincero y afectuoso a la ESPOCH por haberme brindado la oportunidad de estar dentro de sus aulas, a la carrera de Ingeniería Industrial por permitirme cumplir mi sueño, a mis docentes que me ayudaron a crecer como profesional, gracias por su paciencia, dedicación y amistad. De manera especial un agradecimiento al Ing. José Pérez, Ing. Ángel Guamán y al Ing. Jhonny Orozco; por sus enseñanzas y valioso aporte para el desarrollo y culminación de este proyecto.

Henry

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xviii
RESUMEN.....	xix
SUMMARY.....	xx
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1.	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1.	Antecedentes.....	3
1.2.	Planteamiento del problema.....	4
1.3.	Justificación.....	5
1.4.	Objetivos.....	5
1.4.1.	<i>Objetivo General</i>	5
1.4.2.	<i>Objetivos Específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2.	REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	7
2.1.	Fundición.....	7
2.1.1.	<i>Ventajas y desventajas de la fundición</i>	7
2.2.	Hornos de fundición.....	8
2.2.1.	<i>Horno cubilotes</i>	8
2.2.2.	<i>Hornos de combustible directo</i>	9
2.2.3.	<i>Hornos de inducción</i>	9
2.2.3.1.	<i>Hornos de inducción sin núcleo</i>	10
2.2.3.2.	<i>Hornos de inducción de canal o de núcleo</i>	10
2.2.4.	<i>Hornos de arco eléctrico</i>	11
2.2.5.	<i>Hornos de hogar abierto (Hornos Siemens-Martin)</i>	11
2.2.6.	<i>Convertidores</i>	12
2.2.7.	<i>Hornos de crisol</i>	13

2.2.7.1.	<i>Horno de crisol no basculante</i>	13
2.2.7.2.	<i>Horno de crisol basculante</i>	14
2.3.	Combustibles	14
2.3.1.	<i>Clasificación de los combustibles</i>	14
2.3.2.	<i>Combustibles gaseosos</i>	15
2.3.2.1.	<i>Clasificación de los combustibles gaseosos</i>	16
2.4.	GLP (gas licuado de petróleo) o Gas envasado	16
2.4.1.	<i>Características del GLP</i>	17
2.5.	Combustión	17
2.5.1.	<i>Tipos de combustión</i>	18
2.5.1.1.	<i>Combustión estequiométrica (o neutra)</i>	18
2.5.1.2.	<i>Combustión completa con exceso de aire (o combustión limpia)</i>	19
2.5.1.3.	<i>Combustión incompleta con defecto de aire</i>	19
2.5.1.4.	<i>Combustión incompleta con mezclado insuficiente</i>	19
2.6.	Transferencia de calor	19
2.6.1.	<i>Conducción</i>	20
2.6.2.	<i>Convección</i>	21
2.6.3.	<i>Radiación</i>	22
2.7.	Principales materiales utilizados en el diseño	24
2.7.1.	<i>Acero</i>	24
2.7.2.	<i>Cerámicos refractarios</i>	24
2.7.2.1.	<i>Ladrillo refractario</i>	25
2.7.3.	<i>Cemento refractario</i>	27
2.7.4.	<i>Concreto refractario</i>	27
2.7.5.	<i>Mortero refractario</i>	27
2.7.6.	<i>Aislantes refractarios</i>	27
2.7.6.1.	<i>Manta refractaria aislante o fibra cerámica</i>	28
2.8.	Automatización de un proceso	28
2.8.1.	<i>Fases para la automatización de un proceso</i>	29
2.9.	Contactador	30
2.10.	Interruptores automáticos	30
2.11.	Pulsadores y luces pilotos	31
2.12.	Termocuplas	31
2.13.	Controlador de temperatura	32
2.14.	Quemadores industriales	33
2.15.	Controlador de flama	33

2.16.	Tablero de control eléctrico	34
--------------	---	----

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	35
3.1.	Selección de la mejor alternativa de horno	35
3.1.1.	<i>Criterios de valorización</i>	35
3.2.	Selección del tipo de horno crisol	37
3.2.1.	<i>Criterios de valorización</i>	37
3.3.	Selección de la mejor alternativa de combustible	38
3.3.1.	<i>Criterios de valorización</i>	39
3.4.	Selección del crisol	40
3.5.	Diseño del horno crisol	41
3.5.1.	<i>Parámetros de diseño</i>	41
3.5.2.	<i>Consideraciones de diseño</i>	41
3.5.2.1.	<i>Consideraciones para el dimensionamiento de la cámara de combustión</i>	41
3.5.2.2.	<i>Consideraciones para la instalación del quemador</i>	43
3.5.3.	<i>Materiales empleados para la construcción del horno</i>	43
3.5.3.1.	<i>Ladrillo refractario</i>	43
3.5.3.2.	<i>Manta fibra cerámica</i>	44
3.5.3.3.	<i>Concreto refractario</i>	45
3.5.3.4.	<i>Chapa metálica</i>	46
3.5.4.	<i>Dimensionamiento del horno de fundición</i>	47
3.5.4.1.	<i>Diámetro interno del cuerpo del horno</i>	47
3.5.4.2.	<i>Espesores de las paredes refractarias que componen el cuerpo del horno</i>	48
3.5.4.3.	<i>Altura del cuerpo del horno</i>	50
3.5.4.4.	<i>Espesores de las paredes refractarias de la tapa</i>	51
3.6.	Análisis térmico	51
3.6.1.	<i>Pérdidas de calor a través de las paredes cilíndricas</i>	52
3.6.1.1.	<i>Pérdidas de calor por conducción en las paredes cilíndricas</i>	53
3.6.1.2.	<i>Pérdidas de calor por convección y radiación</i>	55
3.6.2.	<i>Pérdidas de calor a través de la base</i>	62
3.6.2.1.	<i>Pérdidas de calor por conducción en la base</i>	63
3.6.2.2.	<i>Pérdidas de calor por convección y radiación en la base</i>	64
3.6.3.	<i>Pérdidas de calor a través de la tapa del horno</i>	69
3.6.3.1.	<i>Pérdidas de calor por conducción</i>	72

3.6.3.2.	<i>Pérdidas de calor por convección y radiación en la tapa</i>	73
3.6.3.3.	<i>Pérdidas de calor por radiación en la abertura de tapa</i>	78
3.7.	Energía total que se debe suministrar para fundir el metal	79
3.7.1.	<i>Calor útil para el proceso de fundición</i>	80
3.7.1.1.	<i>Calor que se entrega a la carga metálica</i>	80
3.7.1.2.	<i>Calor absorbido por el crisol</i>	82
3.7.2.	<i>Calor total perdido en el horno</i>	82
3.8.	Cálculo del rendimiento del horno	83
3.9.	Potencia	84
3.10.	Consumo de combustible	84
3.11.	Relación aire-combustible	85
3.12.	Cantidad de aire para la combustión	87
3.13.	Cálculo del diámetro de la tubería de combustible	88
3.14.	Cálculo del diámetro del inyector	89
3.15.	Diseño de la estructura de soporte	89
3.15.1.	<i>Análisis por flexión viga</i>	89
3.16.	Modelado CAD	92
3.16.1.	<i>Validación del diseño</i>	94
3.16.1.1.	<i>Análisis térmico del cuerpo del horno</i>	94
3.16.1.2.	<i>Análisis estático de la estructura de soporte</i>	98
3.17.	Diagrama del circuito de control eléctrico del sistema de combustión	102
3.17.1.	<i>Diagrama de conexión eléctrica de control para el encendido y apagado</i>	102
3.17.2.	<i>Control de fallo del sistema de combustión</i>	105
3.17.3.	<i>Diagrama de conexión del controlador de temperatura</i>	106
3.17.4.	<i>Esquema de conexión del controlador de ignición</i>	107
3.17.5.	<i>Circuito de potencia del blower</i>	108

CAPÍTULO IV

4.	CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL HORNO DE FUNDICIÓN	110
4.1.	Procedimiento de construcción	110
4.1.1.	<i>Construcción del cuerpo del horno y estructura de soporte</i>	110
4.1.2.	<i>Construcción de la tapa del horno</i>	116
4.1.3.	<i>Construcción del quemador</i>	118
4.2.	Pruebas de funcionamiento	119
4.3.	Análisis de costos	122

4.3.1.	Costos directos	122
4.3.1.1.	Costos de elementos mecánicos.....	123
4.3.1.2.	Costos de elementos eléctricos	123
4.3.1.3.	Costo de mano de obra.....	124
4.3.1.4.	Costo de transporte	125
4.3.1.5.	Costo directo total	125
4.3.2.	Costos indirectos	125
4.4.	Manual de operaciones	126
4.4.1.	Componentes del horno de fundición semiautomatizado	126
4.4.2.	Instrucciones de seguridad	128
4.4.3.	Instrucciones de operación.....	130
4.4.4.	Plan de mantenimiento	133
CONCLUSIONES		135
RECOMENDACIONES		138
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Poder calorífico de combustibles usados en hornos de fundición tipo crisol.....	15
Tabla 2-2:	Clasificación de los combustibles gaseosos	16
Tabla 3-2:	Propiedades del butano y propano	17
Tabla 4-2:	Composición de materiales refractarios comerciales.....	25
Tabla 5-2:	Colores de los indicadores luminosos y sus significados	31
Tabla 1-3:	Alternativas para la selección del horno.....	35
Tabla 2-3:	Evaluación de los criterios de selección.....	36
Tabla 3-3:	Alternativas para la selección del horno tipo crisol.....	37
Tabla 4-3:	Evaluación de los criterios de selección.....	38
Tabla 5-3:	Alternativas para la selección del combustible.....	39
Tabla 6-3:	Evaluación de los criterios de selección.....	39
Tabla 7-3:	Propiedades del bronce	41
Tabla 8-3:	Características del crisol	41
Tabla 9-3:	Propiedades y composición del ladrillo denso refractario	44
Tabla 10-3:	Propiedades y composición de la manta fibra cerámica	45
Tabla 11-3:	Propiedades y composición química del concreto refractario	46
Tabla 12-3:	Propiedades y composición química del acero ASTM A36	47
Tabla 13-3:	Dimensiones y tolerancias del ladrillo normal según la norma INEN 607	48
Tabla 14-3:	Resultado de las resistencias térmicas.....	54
Tabla 15-3:	Propiedades del aire a la presión de 1 atmósfera.....	55
Tabla 16-3:	Iteraciones para hallar la temperatura teórica en la superficie del cuerpo	60
Tabla 17-3:	Configuraciones de espesores para paredes cilíndricas	61
Tabla 18-3:	Resultado de las resistencias térmicas.....	63
Tabla 19-3:	Iteraciones para hallar la temperatura teórica en la superficie de la base	69
Tabla 20-3:	Configuraciones de espesores para la base.....	69
Tabla 21-3:	Resultado de las resistencias térmicas.....	72
Tabla 22-3:	Iteraciones para hallar la temperatura teórica en la superficie de la tapa.....	77
Tabla 23-3:	Configuraciones de espesores para la tapa	78
Tabla 24-3:	Configuraciones para la abertura de la tapa	79
Tabla 25-3:	Resultado del cálculo de los calores.....	81
Tabla 26-3:	Pérdidas de calor en el horno	83
Tabla 27-3:	Peso a considerar en el diseño.....	90
Tabla 28-3:	Elementos del horno de fundición.....	93

Tabla 1-4:	Elementos que conforman el cuerpo del horno	110
Tabla 2-4:	Estructura de soporte	111
Tabla 3-4:	Costo de los materiales mecánicos.....	123
Tabla 4-4:	Costo de los componentes eléctricos.....	123
Tabla 5-4:	Costo de mano de obra.....	124
Tabla 6-4:	Costo directo total.....	125
Tabla 7-4:	Costos indirectos.....	125
Tabla 8-4:	Costo total de la construcción del equipo.....	126
Tabla 9-4:	Instrucciones de operación del equipo	130
Tabla 10-4:	Plan de mantenimiento.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Horno crisol utilizado en el taller de fundición Granito de Mostaza.....	4
Figura 1-2:	Componentes de un horno cubilote	9
Figura 3-2:	Horno de arco eléctrico	11
Figura 4-2:	Esquema de un horno de hogar abierto	12
Figura 5-2:	Antiguo convertidor Bessemer	13
Figura 6-2:	Horno de crisol no basculante	13
Figura 7-2:	Horno de crisol basculante	14
Figura 8-2:	Triángulo de la combustión	18
Figura 9-2:	Conducción de calor a través de una pared.....	20
Figura 10-2:	Transferencia de calor por convección	21
Figura 11-2:	Transferencia de calor por radiación	23
Figura 12-2:	Ladrillo normal o fundamental	26
Figura 13-2:	Ladrillo prismáticos-rectangulares tipo tejuela.....	26
Figura 14-2:	Ladrillo especial tipo bisel de borde.....	26
Figura 15-2:	Contactores.....	30
Figura 16-2:	Interruptor automático	30
Figura 17-2:	Pulsadores y luces piloto	31
Figura 18-2:	Controlador de temperatura Camsco REX-C100.....	32
Figura 19-2:	Controlador de llama para quemadores de gas	33
Figura 20-2:	Tablero de control eléctrico.....	34
Figura 1-3:	Especificaciones técnicas del crisol AGF 60	40
Figura 2-3:	Distribución del calor en un horno cilíndrico	42
Figura 3-3:	Diámetro de la base de soporte.....	42
Figura 4-3:	Cargador del crisol	42
Figura 5-3:	Correcto centrado del crisol en la base	43
Figura 6-3:	Centrado del quemador dentro del horno.....	43
Figura 7-3:	Ladrillo denso refractario	44
Figura 8-3:	Manta fibra cerámica.....	44
Figura 9-3:	Concreto refractario.....	45
Figura 10-3:	Acero ASTM A36	46
Figura 11-3:	Diámetro interno del horno	47
Figura 12-3:	Ladrillo recto normal.....	48
Figura 13-3:	Diámetro exterior del cuerpo del horno	49

Figura 14-3:	Altura del cuerpo del horno	50
Figura 15-3:	Espesores y diámetros de la tapa	51
Figura 16-3:	Transferencia de calor a través de un cilindro compuesto de tres capas	52
Figura 17-3:	Transferencia de calor a través de una pared plana compuesta de tres capas	62
Figura 18-3:	Recorrido de los gases de combustión al abandonar el horno	70
Figura 19-3:	Transferencia de calor a través de una pared plana compuesta de tres capas	70
Figura 20-3:	Balance de energía en un horno de fundición	79
Figura 21-3:	Tubería galvanizada especificaciones generales	88
Figura 22-3:	Diagrama de cuerpo libre del tubo cuadrado	90
Figura 23-3:	Diagrama de esfuerzo cortante	91
Figura 24-3:	Diagrama de momento flector	91
Figura 25-3:	Tubo estructural cuadrado especificaciones generales.....	92
Figura 26-3:	Modelado CAD del horno de fundición.....	93
Figura 27-3:	Mallado del cuerpo del horno	95
Figura 28-3:	Modelo de la estructura de soporte	98
Figura 1-4:	Corte de la carcasa del cuerpo del horno y carcasa de la tapa.....	111
Figura 2-4:	Corte láser de la base, tapadera y parte superior de la tapa.....	111
Figura 3-4:	Cilindros para el cuerpo del horno y la tapa	112
Figura 4-4:	Carcasa del cuerpo del horno y tapa	112
Figura 5-4:	Soldadura de la carcasa del cuerpo del horno	113
Figura 6-4:	Soldadura de la estructura de soporte a la carcasa del horno	113
Figura 7-4:	Corte e instalación de manta fibra cerámica	114
Figura 8-4:	a) Corte de manta cerámica para el interior del cuerpo, b) Base de ladrillos ...	114
Figura 9-4:	Dimensión del ladrillo refractario requerido.....	115
Figura 10-4:	Ladrillos refractarios que forman la pared cilíndrica del horno	115
Figura 11-4:	Unión de los ladrillos refractarios para formar la cámara de combustión	115
Figura 12-4:	Soldadura de la tapadera a la carcasa del cuerpo del horno	116
Figura 13-4:	Carcasa de la tapa del horno	116
Figura 14-4:	Soldado de varilla recta	117
Figura 15-4:	Montaje de manta fibra cerámica en el interior de la tapa	117
Figura 16-4:	Secado de la mezcla refractaria	117
Figura 17-4:	Prueba del quemador de aire forzado	118
Figura 18-4:	Instalación del quemador en el horno	119
Figura 19-4:	Prueba del quemador en la cámara de combustión	119
Figura 20-4:	a) Bronce en estado sólido, b) bronce líquido listo para su colado	121
Figura 21-4:	Componentes del horno de fundición	126

Figura 22-4: Componentes eléctricos del tablero de control	127
Figura 23-4: Interfaz de control	128

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2:	Fases de la automatización del proceso.....	29
Gráfico 1-3:	Perfil de temperaturas en las paredes cilíndricas del horno.....	61
Gráfico 2-3:	Módulo Steady-State Thermal de Ansys.....	94
Gráfico 3-3:	Creación de materiales en el Engineering Data.....	95
Gráfico 4-3:	Configuración de parámetros de transferencia de calor.....	96
Gráfico 5-3:	Resultados de la simulación térmica.....	97
Gráfico 6-3:	Distribución de temperaturas a través del horno.....	97
Gráfico 7-3:	Información del modelo.....	98
Gráfico 8-3:	Propiedades del material.....	99
Gráfico 9-3:	Sujeciones.....	99
Gráfico 10-3:	Cargas establecidas.....	99
Gráfico 11-3:	Análisis de fallo de la estructura del horno mediante Von Mises.....	100
Gráfico 12-3:	Deformación en la estructura.....	101
Gráfico 13-3:	Análisis del factor de seguridad.....	101
Gráfico 14-3:	Diagrama general de conexiones eléctricas del sistema de combustión.....	102
Gráfico 15-3:	Diagrama segmentado de las conexiones eléctricas on/off.....	103
Gráfico 16-3:	Simulación del funcionamiento del primer ciclo de encendido.....	104
Gráfico 17-3:	Simulación del funcionamiento del segundo ciclo de encendido.....	105
Gráfico 18-3:	Simulación de fallo del sistema.....	106
Gráfico 19-3:	Diagrama de conexión del controlador de temperatura.....	106
Gráfico 20-3:	Simulación de apagado automático con la temperatura final de 1200 °C.....	107
Gráfico 21-3:	Esquema de conexión de controlador de ignición.....	108
Gráfico 22-3:	Circuito de potencia del blower.....	109
Gráfico 1-4:	Curva de precalentamiento de la cámara del horno.....	120
Gráfico 2-4:	Curva de operación del horno con arranque en caliente.....	121
Gráfico 3-4:	Curva del consumo de GLP durante el tiempo de operación.....	122

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: INEN 607 MATERIALES REFRACTARIOS

ANEXO B: DATA SHEET DEL CONCRETO REFRACTARIO

ANEXO C: PROPIEDADES DEL AIRE A LA PRESIÓN DE 1 ATM

ANEXO D: CALOR ESPECÍFICO DEL GRAFITO

ANEXO E: PLANOS DEL HORNO CRISOL Y SUS COMPONENTES

RESUMEN

El presente proyecto técnico tuvo como objetivo diseñar y construir un horno crisol calefaccionado por GLP semiautomatizado para la obtención de bronce para el taller Granito de Mostaza de la ciudad de Riobamba. Para lo cual se realizó una investigación bibliográfica para conocer tipos de hornos utilizados en la fundición de metales y aleaciones con lo que se determinó que los hornos para capacidades bajas eran los más apropiados, con los criterios de selección y parámetros de operación establecidos se pudo seleccionar para el diseño, el horno crisol estacionario y como combustible para su funcionamiento el GLP. Se desarrolló cálculos de transferencia de calor lo que ayudó a seleccionar los espesores de las paredes refractarias y dimensiones para la construcción del horno. Para el diseño y modelado se empleó el software SolidWorks en el cual además se realizó un análisis estático de la estructura de soporte y para validar el comportamiento del horno se realizó una simulación térmica mediante ANSYS. Validado el diseño se construyó y ensambló el horno de fundición cuya capacidad es de 60 kg de aleación de bronce, cuenta con un sistema semiautomatizado de combustión y puede operar a una temperatura máxima de 1200 °C, su uso se extiende a otros metales cuyas temperaturas de fusión se encuentren por debajo de los 1200 °C. Se comprobó el funcionamiento del equipo efectuando pruebas de precalentamiento y operación con arranque en caliente, con lo que se pudo establecer que para fundir 60 kg de aleación de bronce que es la máxima capacidad del crisol fue necesario de 50 minutos de operación y aproximadamente 5 kg de combustible GLP. Finalmente, el horno tuvo un diseño acorde a las necesidades y requerimientos del usuario. Para su mejoramiento se recomienda implementar un sistema mecánico o automatizado para el levantamiento de la tapa.

Palabras clave: <FUNDICIÓN DE BRONCE> <HORNO CRISOL ESTACIONARIO> <CONTROL ELÉCTRICO > <ANÁLISIS TÉRMICO> <TRANSFERENCIA DE CALOR> <ANÁLISIS ESTÁTICO>.



Firmado electrónicamente por:
**HOLGER GERMAN
RAMOS UVIDIA**

0255-DBRA-UPT-2022

2022-02-11

SUMMARY

The objective of this technical project was to design and build a semi-automated GLP-heated crucible furnace to obtain bronze for the workshop Granito de Mostaza of Riobamba city. For which bibliographic research was carried out to know the types of furnaces used in the smelting of metals and alloys with which it was determined that the furnaces for low capacities were the most appropriate, with the selection criteria and established operating parameters could be selected for the design, the stationary crucible furnace, and LPG as fuel for its operation. Heat transfer calculations were developed, which helped to select the refractory wall thicknesses and dimensions for the furnace construction. For the design and modeling, SolidWorks software was used, in which a static analysis of the support structure was performed, and to validate the behavior of the furnace, a thermal simulation was carried out using ANSYS. Once the design was validated, the melting furnace was built and assembled with a capacity of 60 kg of bronze alloy, it has a semi-automated combustion system and can operate at a maximum temperature of 1200 °C; its use is extended to other metals whose melting temperatures are below 1200 °C. The operation of the equipment was tested by performing preheating and hot start operation tests, with which it was possible to establish that to melt 60 kg of bronze alloy, which is the maximum capacity of the crucible, 50 minutes of operation, and approximately 5 kg of LPG fuel were necessary. Finally, the furnace was designed according to mechanical or automated system for the lid lifting.

Keywords: <BRONZE CASTING> <STATIONARY CRISOL FURNACE> <ELECTRIC CONTROL> <THERMAL ANALYSIS> <HEAT TRANSFER> <STATIC ANALYSIS>.

**ALEXANDRA
ELIZABETH
OROZCO
HERNANDEZ** Firmado
digitalmente por
ALEXANDRA
ELIZABETH
OROZCO
HERNANDEZ
Fecha: 2022.02.12
07:58:09 -05'00'

INTRODUCCIÓN

La fundición es uno de los procesos de conformación más antiguos conocidos por la humanidad, hoy en día este proceso se ha posicionado como uno de los más útiles para la producción de piezas a partir de cualquier metal. Con el creciente uso de los metales debido a sus excelentes propiedades mecánicas, la operación de fundición sigue creciendo tanto en el sector artesanal como en el industrial.

Los hornos son la forma más común y ventajosa de fundir metales o aleaciones. El horno es un equipo en donde se libera energía térmica y se transfiere de manera directa o indirecta a una masa sólida o fluida para provocar una modificación física o química en ella (Soto y Pérez, 2009, p.14). Estos equipos han sido parte fundamental en el desarrollo de los procesos de fundición y no únicamente en este campo, ya que también han contribuido a la investigación científica y a la industria en general. Básicamente todos los metales ferrosos y gran parte de los no ferrosos se obtienen mediante el uso de hornos metalúrgicos de construcciones variadas y que emplean diversas fuentes energéticas como el combustible carbónico, la energía eléctrica o el calor de los procesos tecnológicos exotérmicos.

La industria metalúrgica en Ecuador es uno de los motores esenciales para el crecimiento económico, por lo que el mercado nacional e internacional exige continuos cambios en las estrategias de mejora tecnológica (Jami, 2018, p.16). En el Ecuador uno de los problemas del sector artesanal dedicado a la fundición, es la carencia de crecimiento tecnológico hacia su parte productiva y el control de sus procesos a favor del medio ambiente; es el caso del taller de fundición “GRANITO DE MOSTAZA” ubicado en la provincia de Chimborazo, cantón Riobamba, dedicado principalmente a la fabricación y comercialización de artículos elaborados en bronce, el cual no cuenta con un equipo tecnológico eficiente y con un alto rendimiento para la fundición de metales.

El avance tecnológico proporciona oportunidades de mejora en el ámbito industrial, es así que se plantea el diseño y construcción de un horno crisol calefaccionado por GLP semiautomatizado, que ayudará al taller de fundición Granito de Mostaza a incrementar su producción de manera que logre satisfacer la demanda del mercado actual y aumente su rentabilidad. El trabajo a efectuar en este proyecto incluye una serie de actividades como la búsqueda de información bibliográfica, el diseño y la construcción del horno, el análisis estático

y térmico por medio de software CAD especializados para validar el diseño y las respectivas pruebas de operación.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

La fundición del bronce en el Ecuador se ha desarrollado a través de los años a nivel artesanal e industrial, razón por la cual existen varios talleres dedicados a la producción de piezas con esta aleación. El bronce siendo un metal no ferroso presenta un amplio espectro de propiedades y composiciones tales como resistencia a la corrosión, excelente conductor de la electricidad, presenta menos rigidez en comparación de otros metales, no genera chispa, son fácil de mecanizar; por eso son muy utilizados en la ingeniería.

El taller de fundición “GRANITO DE MOSTAZA”, ubicado en la ciudad de Riobamba, se dedica principalmente a la fabricación y comercialización de artículos elaborados en bronce como: campanas, juegos de funeraria, floreros, apliques, lingotes para mecanizado y toda pieza a pedido y gusto del cliente. Tiene una producción mensual fija de 15 pares de floreros para lapidas de 15 cm de alto. El bronce que se funde es limalla reciclada procedente de talleres de mecanizado que se lo adquiere a un costo de \$180 USD por quintal y radiadores de automóviles desechados que tiene un costo de \$150 USD por quintal.

El horno crisol que se utiliza para el proceso de fundición del bronce tiene como combustible el carbón vegetal, según datos proporcionados por el taller el consumo de este combustible oscila entre los 20 y 25 quintales al mes, esto varía dependiendo de la cantidad de piezas fundidas que se va a producir. Para poder alcanzar la temperatura necesaria para que el bronce se funda el horno cuenta con una entrada de aire en la parte inferior el cual está conectado a la salida de flujo de aire de un blower eléctrico. Es necesario cargar el carbón vegetal en el horno cuantas veces sea necesario hasta que el bronce se encuentre totalmente líquido y listo para el proceso de vaciado. El proceso de vaciado se realiza de forma manual con cucharones de acero para el traslado del líquido hacia los moldes previamente preparados y calentados para que al entrar en contacto con la arena no genere una reacción de turbulencia riesgosa para la salud de los trabajadores.

Se utiliza un crisol de grafito A-60 Salamander cuya capacidad es de 60 kg de material líquido. La vida útil del crisol en el taller generalmente es de un año y medio, después se lo utiliza para

fundir aluminio. En muchos casos el crisol ha llegado a romperse generando así el desfogue del material líquido en el horno el cual hay que desarmar para poder retirar el material ya solidificado.

En la Figura 1-1 se muestra el horno utilizado actualmente en el taller de función, tiene una vida útil aproximada de 3 años debido a que su diseño es ineficiente y además presenta un alto consumo de combustible lo que incide negativamente en los costos de producción.



Figura 1-1: Horno crisol utilizado en el taller de fundición Granito de Mostaza
Fuente: (Taller de fundición Granito de Mostaza, 2021)

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente en el taller de fundición “GRANITO DE MOSTAZA” es evidente la carencia de crecimiento tecnológico hacia su parte productiva y el control de sus procesos a favor del medio ambiente, es así que el horno crisol que se emplea para la fundición de metales posee un diseño ineficiente, presenta un alto consumo de combustible lo que incide negativamente en los costos de producción y además, el horno carece de un sistema automatizado de ignición, por esta razón se pone en riesgo la integridad física de los operarios que realizan la operación de encendido del horno de forma manual.

El combustible que se utiliza es el carbón vegetal que debe ser cargado en la cámara de combustión del horno cada 10 a 15 minutos dependiendo de la cantidad de flujo de aire que proporcione el blower a la cámara, para realizar el proceso de cargado del carbón se debe apagar el blower y retirar la tapa; teniendo como consecuencia, la pérdida de calor cada vez que se realiza esta operación y el aumento en el tiempo para obtener los 60 kg de aleación de bronce que oscila de 2 a 3 horas. El carbón vegetal tiene un poder calorífico de 6500 a 7000 Kcal/kg y tiene un costo de \$10 USD por quintal, para mantener encendido el horno se necesita de 3 a 4

quintales. Por tanto, el presente proyecto plantea el diseño y construcción de un horno crisol calefaccionado por GLP con un sistema semiautomatizado de control.

1.3. Justificación

El presente proyecto se desarrolla ya que se ha detectado que el equipo utilizado para el proceso de fundición del bronce en el taller “GRANITO DE MOSTAZA” es muy artesanal, por lo que hay la necesidad de diseñar y construir un equipo tecnológico eficiente y con un alto rendimiento térmico para la fundición de esta aleación, ya que en un futuro el taller tiene como objetivos incrementar su producción, reducir costos, satisfacer toda la demanda del mercado actual y abrirse a otros mercados en la industria metalmecánica.

Con la realización de este proyecto se superará todos los inconvenientes detectados, dado que se optimizará el tiempo de fundición del bronce al evitar en su mayoría las pérdidas de calor, se reducirá los costos de producción debido a que se cambiará el combustible empleado actualmente por el GLP que tiene un poder calorífico de 11015,8 kcal/kg y un costo mucho menor en comparación al carbón vegetal, además se reducirá la contaminación hacia el medio ambiente y mediante el sistema semiautomatizado de ignición y control de temperatura se precautelara la integridad de los operarios; así el taller aumentará su rentabilidad y logrará ser más competitivo en el sector dedicado a la fundición. Adicionalmente, el uso del equipo puede ser extendido para la fundición de otro tipo de aleaciones no ferrosas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar y construir un horno crisol calefaccionado por GPL semiautomatizado para la obtención de bronce para el taller Granito de Mostaza de la ciudad de Riobamba.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Realizar una investigación bibliográfica sobre los tipos de hornos utilizados para la fundición de metales y aleaciones a fin de establecer sus diferencias y factores a considerar para su uso dentro de un proceso de fundición.

- Determinar los parámetros de operación y criterios de selección que influyen en el diseño del horno con la finalidad de obtener un equipo que cumpla con los requerimientos y necesidades del taller de fundición.
- Realizar el diseño y modelado del horno crisol empleando software CAD especializado para verificar y validar su comportamiento.
- Construir y ensamblar el horno de fundición en base al diseño propuesto y semiautomatizar el sistema de combustión con el fin de evitar tareas manuales que afecten la salud e integridad física del operario.
- Determinar los resultados de las pruebas de funcionamiento del equipo y verificar su correcto desempeño.
- Elaborar un manual de operación y mantenimiento para el equipo de fundición que contenga la información necesaria para su correcto uso.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Fundición

De acuerdo con Ríos y Vargas (2018, p.263), la fundición es uno de los procesos más antiguos de conformación; radica en calentar el material hasta que se funda por completo, para posteriormente verterlo en un molde donde se enfriará hasta que la pieza se solidifique.

Considera Ríos y Vargas (2018, p.263), que la forma más básica de dividir a los procesos de fundiciones es la siguiente:

- Fundición de lingotes: es la fundición común acompañada de procedimientos de forja y laminación, por ejemplo: el acero.
- Fundición de formas: implica la creación de piezas de gran complejidad que se acercan más a la apariencia final requerida del producto.

Según Ríos y Vargas (2018, p.264), otras maneras de clasificar los procesos de fundición son las siguientes:

- De acuerdo al material del molde: se presentan procesos de fundición en yeso, arena, metal y cerámica.
- De acuerdo a la cavidad del molde: los procesos pueden ser con molde abierto y cerrado.
- De acuerdo al tipo de molde: se tiene fundición en molde desechable (no permanente) y fundición en molde permanente.

2.1.1. *Ventajas y desventajas de la fundición*

Desde el punto de vista de Ríos y Vargas (2018, p.263), las ventajas de la fundición son:

- Es ideal para la producción de piezas de geometría compleja tanto externas como internas.

- Es viable para elaborar piezas de gran tamaño, como por ejemplo las esculturas.
- Puede aplicarse a cualquier material que logre fundirse.
- Ciertos procesos de fundición no necesitan procesos posteriores de acabado de las piezas.

Desde el punto de vista de Ríos y Vargas (2018, pp.263-264), las desventajas de la fundición son:

- Pueden aparecer porosidades que inciden en las propiedades mecánicas de las piezas elaboradas.
- De acuerdo al proceso de fundición, existe la posibilidad de que las piezas fabricadas presenten un mal acabado superficial y una precisión dimensional baja.
- Hay riesgos para los operarios y medioambientales a consecuencia de las altas temperaturas y los gases de combustión.

2.2. Hornos de fundición

En un proceso de fundición es necesario que el metal alcance el estado de fusión por lo que este debe ser calentado para en lo posterior poder verterlo en el molde. El calentamiento y la fusión del metal se producen en un horno, para seleccionar el tipo de horno más adecuado a un proceso productivo se debe tener en cuenta factores como: el tipo de material a fundir; su temperatura de fusión y vertido; capacidad del horno; sus costos de inversión, funcionamiento y mantenimiento; y consideraciones respecto a la contaminación ambiental (Groover, 2020, p.218).

2.2.1. Horno cubilotes

Los cubilotes son recipientes de acero verticales revestidos con refractarios, funcionan continuamente, tienen una gran capacidad de fusión y producen grandes cantidades de hierro colado. Un cubilote consta de un tubo de longitud mayor a 4 metros por un diámetro que oscila entre 0,8 y 1,4 m. Se cargan por la parte superior con camas de chatarra de metal, coque y piedra caliza. El coque es el combustible utilizado para calentar el horno y para su combustión se emplea ventiladores de alta presión que inyectan el aire al interior del horno a través de toberas situadas en la parte inferior. Se sabe que un horno cubilote procesa de 8 a 10 kg de hierro por cada kilogramo de coque consumido, además por cada tonelada de hierro fundido se necesita 40 kg de piedra caliza y 5,78 m³ de aire (Zárate et al., 2016, p.80).

El principal problema de un horno cubilote es que sus equipos destinados al control de las emisiones contaminantes son más caros que el propio horno, razón por la cual no es posible llevar un control de sus emisiones de polvo, por lo tanto, no están autorizados a operar dentro del perímetro urbano (Zárate et al., 2016, p.81).

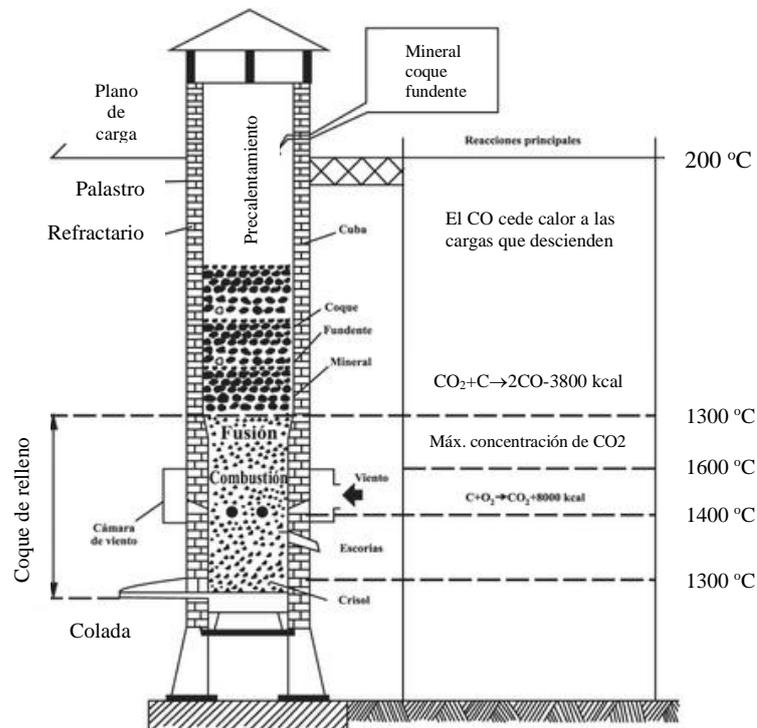


Figura 1-2: Componentes de un horno cubilote
Fuente: (Zárate et al., 2016, p.81)

2.2.2. Hornos de combustible directo

Los hornos de combustible directo se utilizan frecuentemente en la fundición de metales no ferrosos tales como aleaciones a base de aluminio y cobre. Este tipo de horno se caracteriza por tener un pequeño hogar abierto en donde la carga metálica es calentada mediante quemadores de combustible situados en uno de los lados del horno. El combustible típico utilizado en estos quemadores es el gas natural. Poseen además una chimenea para evacuar los gases de combustión del horno y un orificio de salida ubicado en el fondo del hogar que sirve para extraer el material fundido (Groover, 2020, p.219).

2.2.3. Hornos de inducción

Menciona Groover (2020, p.220), que los hornos de inducción son útiles en talleres de fundición pequeños, comúnmente utilizados para fundir aleaciones de acero, hierro y aluminio.

Estos hornos utilizan corriente alterna que al atravesar una bobina genera un campo magnético en el metal, y la corriente inducida resultante provoca calentamiento rápido y la fusión del metal. El campo de fuerza electromagnético crea una acción de mezcla en el metal líquido. Además, como el metal no entra en contacto directo con los elementos calefactores, el entorno en el que se produce la fusión puede controlarse estrechamente; todo esto da lugar a metales fundidos de alta calidad y pureza (Groover, 2020, p.220).

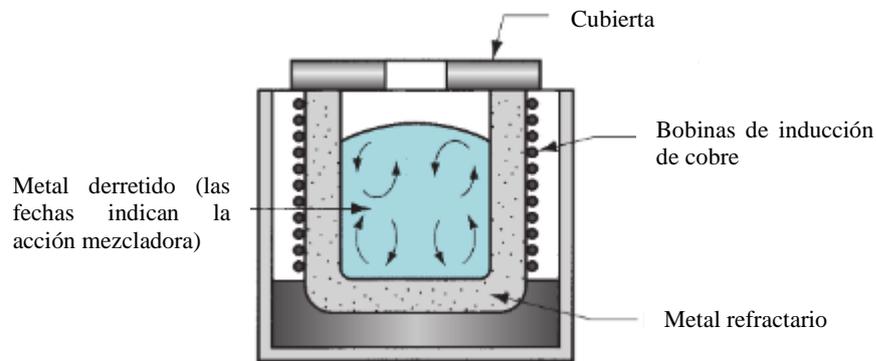


Figura 2-2: Características de un horno de inducción
Fuente: (Groover, 2020, p.221)

2.2.3.1. Hornos de inducción sin núcleo

El horno de inducción sin núcleo se compone de un crisol completamente envuelto por una bobina de cobre refrigerado por agua, a través de la cual circula una corriente de alta frecuencia. Dado que durante el calentamiento por inducción se produce una fuerte acción de agitación electromagnética, esta clase de horno posee muy buenas características de mezclado para alear y añadir una carga de metal nueva (Kalpakjian y Schmid, 2008, pp.315-316).

2.2.3.2. Hornos de inducción de canal o de núcleo

El horno de canal o de núcleo utiliza corriente de frecuencia baja y tiene una bobina que envuelve únicamente una reducida fracción de la unidad. Se suele utilizar en fundiciones no ferrosas y es conveniente para fundir el metal en un horno y transferirlo a otro, para calentamientos por arriba de la temperatura habitual de fusión y para aplicaciones de fundición a presión en matriz (Kalpakjian y Schmid, 2008, p.316).

2.2.4. Hornos de arco eléctrico

Son los más usados en las industrias de pequeño y mediano tamaño, donde la producción de acero tiene una finalidad específica. El horno de arco eléctrico o arco voltaico consta una vasija revestida de materiales refractarios en donde se coloca mediante una grúa viajera productos sólidos como chatarra o hierro esponja, que se funden con el paso de una corriente eléctrica introducida por tres electrodos de grafito que pueden llegar a tener un diámetro de 760 mm y una longitud de hasta 12 m. En este horno se generan temperaturas de hasta 3500 °C entre un electrodo de grafito y la chatarra o la esponja lo que además posibilita fundir productos con un punto de fusión bastante elevado. Los hornos modernos poseen una capacidad de hasta 300 toneladas de acero y cada colada dura alrededor de 90 minutos (Zárate et al., 2016, pp.78-79).

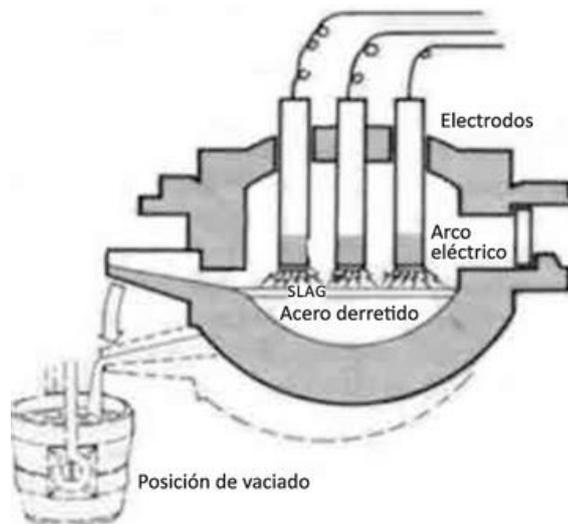


Figura 3-2: Horno de arco eléctrico
Fuente: (Zárate et al., 2016, p.79)

2.2.5. Hornos de hogar abierto (Hornos Siemens-Martin)

Un horno Siemens-Martin tiene una capacidad que oscila de 25 a 100 toneladas de metal, es considerado como un horno de reverbero debido a que tiene un fondo poco profundo y la llama se encuentra de manera directa sobre la carga, es decir, que el material a fundir no estará en contacto directo con el combustible sea este gas, breá o petróleo. También se consideran hornos regenerativos porque tienen chimeneas laterales que, además de evacuar los gases, sirven para calentar el combustible y el aire (Zárate et al., 2016, p.76).

El revestimiento de este tipo de horno generalmente puede ser de línea básica o línea ácida. Una línea básica de refractario tiene un costo más elevado porque puede controlar o suprimir el fósforo, silicio, azufre, carbono y magnesio, mientras que una línea ácida es menos costosa pues sólo puede controlar al carbono. El horno se carga con piedra caliza y chatarra en un porcentaje de 40% a 30%, el porcentaje restante se carga con arrabio que puede estar sólido o fundido. En este horno la primera carga tarda aproximadamente diez horas en fundirse y estar lista para su vertido, pero con la adición de oxígeno se consigue una fundición en menos de siete horas y un ahorro del 25% en combustible (Zárate et al., 2016, pp.76-77).

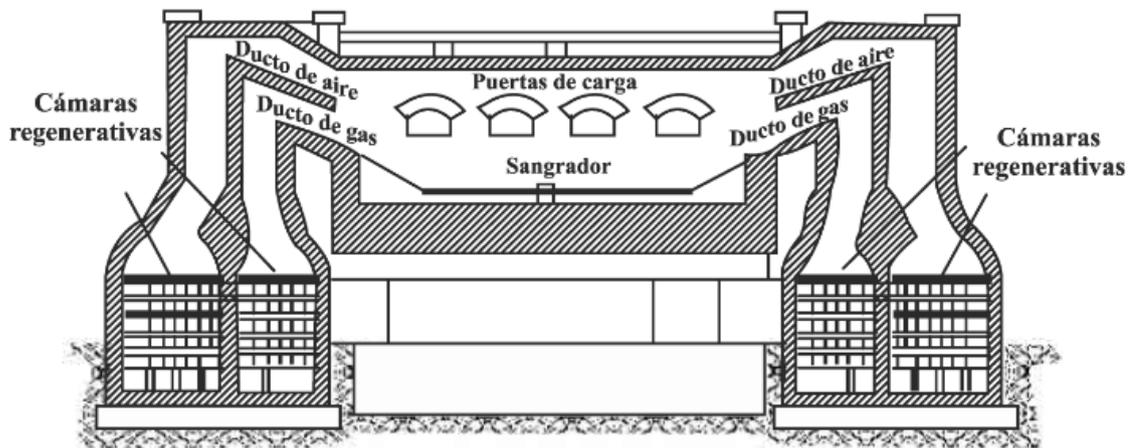


Figura 4-2: Esquema de un horno de hogar abierto
Fuente: (Zárate et al., 2016, p.77)

2.2.6. Convertidores

El convertidor puede transformar en escasos minutos y de forma prácticamente automática un elevado volumen de arrabio en acero. Se puede encontrar convertidores cilíndricos horizontales y convertidores verticales. El principio del convertidor es el siguiente: al conducir un flujo de aire a través del arrabio fundido, el carbono del arrabio se une con el oxígeno para crear dióxido de carbono, disminuyendo así el contenido en carbono del metal. Se agrega una combinación de manganeso, carbono y hierro al arrabio para evitar que el flujo de aire elimine totalmente el contenido en carbono del metal. El proceso de combinación química del carbono con el oxígeno también sobrecalienta la mezcla y el metal permanece fundido sin necesidad de combustible extra (Moro, 2016, pp.138-139).



Figura 5-2: Antiguo convertidor Bessemer
Fuente: (Moro, 2016, p.138)

2.2.7. Hornos de crisol

El horno crisol es el más antiguo utilizado para la fundición de metales específicamente no ferrosos como el bronce, el aluminio, el latón, etc. El material a fundir se ubica al interior de un crisol y se calienta con combustible que puede ser coque, gas o aceite. Los crisoles generalmente están fabricados con una mezcla de grafito y arcilla por lo que poseen una resistencia mayor al calentarse. Las capacidades de los hornos de crisol suelen limitarse a centenares de libras (Shanmugam y Palanichamy, 2018, pp.56-57).

2.2.7.1. Horno de crisol no basculante

El horno de crisol no basculante o también conocido como horno de crisol estacionario, es un horno utilizado para fundir pequeñas cantidades de metal. Se caracteriza por que el horno es estacionario y el metal fundido debe extraerse del interior del crisol con la ayuda de un cucharón que no requiere estar precalentado. En el horno de crisol se maneja un blower que es el encargado de proporcionar aire primario para la combustión lo que permite alcanzar temperaturas superiores a los 900 °C (Shanmugam y Palanichamy, 2018, p.57).

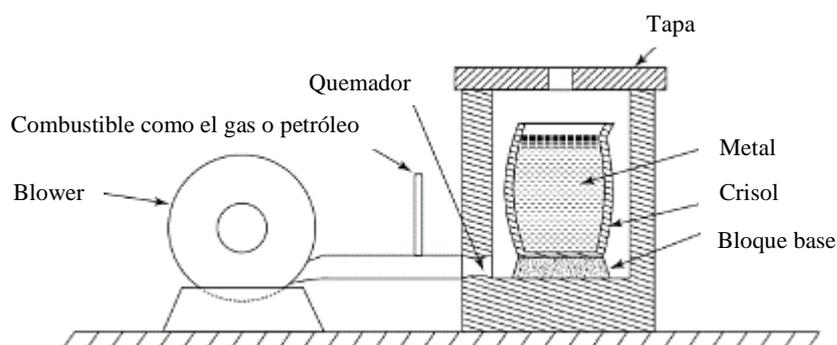


Figura 6-2: Horno de crisol no basculante
Fuente: (Shanmugam y Palanichamy, 2018, p.57)

2.2.7.2. *Horno de crisol basculante*

El horno de crisol basculante se utiliza para fundir cantidades grandes de metal. Una vez que el metal esté fundido y listo para ser colado, todo el horno se reclina para trasladar el metal líquido a una cuchara precalentada, este precalentamiento ayuda a disminuir el indeseable decrecimiento de la temperatura del metal (Shanmugam y Palanichamy, 2018, p.57).

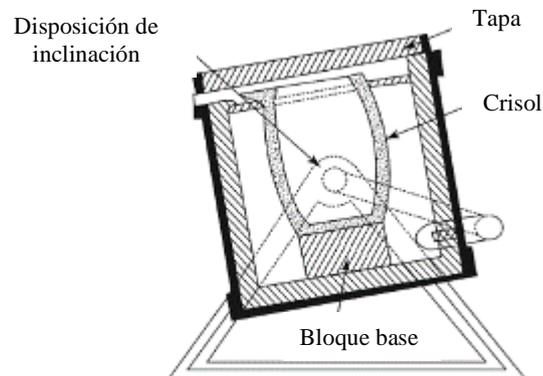


Figura 7-2: Horno de crisol basculante
Fuente: (Shanmugam y Palanichamy, 2018, p.57)

2.3. Combustibles

Los combustibles se utilizan en los hornos metalúrgicos para cubrir necesidades de energía química y térmica. Las sustancias que tienen hidrógeno, carbón, hidrocarburos, etc., y que pueden reaccionar con el oxígeno para dar energía en forma de calor y luz, se utilizan normalmente como combustible. Sin embargo, no se puede denominar combustible a todas las sustancias que tienen hidrocarburos. Existen tres condiciones necesarias para que una sustancia combustible sea designada como tal. La primera condición se refiere a su utilidad; la energía liberada por la combustión debe ser suficiente para ser utilizada. Por ende, los materiales que entregan bajos valores caloríficos no pueden ser considerados como combustible. La segunda condición es la eficiencia de la combustión del material y la recuperación de su energía térmica para determinada aplicación. En tercer lugar, la cantidad de energía conseguida debe ser económica; en algunos casos, el costo del combustible puede ser superior al valor de la energía térmica obtenida, lo que lo descalificaría como combustible (Gupta, 2016, p.18).

2.3.1. *Clasificación de los combustibles*

Desde el punto de vista de Gupta (2016, pp.18-19), los combustibles pueden clasificarse comúnmente de la siguiente manera:

- Por el estado físico del combustible: en sólido (carbón, coque, carbón vegetal, etc.), líquido (gasolina, gasóleo, etc.) y gaseoso (metano, hidrógeno, etc.).
- Según la naturaleza del combustible: pueden ser combustibles no renovables como el petróleo crudo, el carbón, el gas natural o combustibles renovables como el hidrógeno, la biomasa, etc.
- De acuerdo al proceso de producción: puede ser combustible fabricado a propósito, como el coque metalúrgico o combustible derivado, como el gas de alto horno.
- Por la fuente del combustible: hay fuentes primarias como el carbón, petróleo crudo y gas natural que se localizan en la naturaleza o fuentes secundarias como el coque, el gasóleo, el hidrógeno, etc. que se elaboran mediante algunos procesos industriales.

Tabla 1-2: Poder calorífico de combustibles usados en hornos de fundición tipo crisol

Combustible	Tipo	Poder Calorífico (Kcal/Kg)
Sólido	Leña	3800
	Carbón mineral	4000 a 6000
	Coque de fundición	6200 a 7500
	Coque de petróleo	8000
	Carbón vegetal	6500 a 7000
Líquido	Gasolina	10200
	Petróleo diésel	11000 kcal/litro
	Alcohol etílico	7300
	Querosene	11600
	Petróleo - Fuel - Oil	9820
	OC4	10000
Gaseoso	Gas licuado	10900
	Gas de coque	4500
	Gas natural	10000
	Metano	8500

Fuente: (Suntaxi y Torres, 2014, p.27)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

2.3.2. *Combustibles gaseosos*

Los combustibles de tipo gaseoso son un conjunto de gases que por medio de un proceso de combustión, pueden ser aprovechados para obtener energía. Estos gases pueden ser subproductos de diversos procesos que permiten su utilización como combustibles o productos conseguidos naturalmente (Diez et al., 2015, p.62).

Los combustibles gaseosos ofrecen ventajas sobre los combustibles sólidos y líquidos por su facilidad de almacenamiento y transporte. Tienen además un alto poder calorífico, ya que se mezclan más fácilmente con el comburente. Adicionalmente, es importante saber que proporcionan un mayor brillo en la llama durante la combustión, lo que puede ser interesante en determinados procedimientos. En los procesos de combustión que emplean combustibles gaseosos se suele utilizar directamente el aire como comburente, aunque en ocasiones se utilizan directamente partículas de oxígeno cuando es necesario un mayor control de la reacción (Navas, 2015, p.105).

2.3.2.1. Clasificación de los combustibles gaseosos

En la Tabla 2-2 se muestra la clasificación de los combustibles gaseosos.

Tabla 2-2: Clasificación de los combustibles gaseosos

Combustibles comerciales	Naturales	Gas natural	
		Gas licuado de petróleo (GLP)	Propano Butano
	Artificiales o elaborados	Destilados de madera	
		Destilados de la hulla	
		Destilados de natas de petróleo	
Otros: Gas de agua, gas de aire			
Combustibles especiales	Biogás	Fermentación aerobia	
		Fermentación anaerobia	

Fuente: (Navas, 2015, p.106)

2.4. GLP (gas licuado de petróleo) o Gas envasado

El gas licuado de petróleo es el término que se aplica a ciertos hidrocarburos específicos y a sus mezclas que existen en estado gaseoso en condiciones ambientales atmosféricas pero que pueden cambiar al estado líquido en condiciones de presión moderada a temperatura ambiente. El gas GLP se usa como combustible en vehículos y aparatos de calefacción. Procede casi en su totalidad de fuentes de combustible fósil o se extrae de las corrientes de petróleo o gas natural al salir del suelo. Su elaboración requiere de refinerías de petróleo crudo o de plantas de procesamiento de gas (Speight, 2018, p.390).

Indica Gupta (2016, p.189), que el gas licuado de petróleo es una mezcla de propano y butano, estos dos se licúan con facilidad a temperatura ambiente con la aplicación de una muy baja presión. En la Tabla 3-2 se exponen las propiedades del butano y propano.

Tabla 1-2: Propiedades del butano y propano

Propiedades	Butano	Propano
Composición	C ₄ H ₁₀ - 100%	C ₃ H ₈ - 100%
Valor calórico, kcal/m ³	30680	23670
MJ/m ³	128,45	99,10
Peso específico		
Como gas (gravidad específica con respecto al aire)	2	1,52
Como líquido (gravidad específica con respecto al agua)	0,584	0,508
Azufre, % en peso	0,02	0,02
Punto de inflamación del líquido, °C	-60	-105
Temperatura máxima de la llama, °C	1925	2000

Fuente: (Gupta, 2016, p.189)

2.4.1. Características del GLP

De acuerdo con Gupta (2016, p.189), el GLP presenta las siguientes características:

- Tiene un alto poder calorífico, elevado peso específico y no tiene olor.
- Debido a que el GLP es muy inflamable se agregan líquidos de olor penetrante como mercaptanos (50 ppm) o sulfuros para ayudar a identificar fugas de este combustible.
- Es un gas más pesado que el aire, por lo tanto, el gas filtrado no se difunde fácilmente en el aire.

De acuerdo con Speight (2018, p.390), el GLP presenta las siguientes características:

- Es más pesado que el aire y a diferencia del metano, fluye por el suelo y tiende a depositarse en sitios bajos como sótanos o depresiones en la tierra, esto puede ocasionar una explosión si la mezcla de GLP y aire está dentro de los límites de explosividad y existe una fuente de ignición.
- Como su punto de ebullición está por debajo de la temperatura ambiente, el GLP se evapora con rapidez a temperatura y presión normales.
- Suele distribuirse en recipientes de acero presurizados.
- Provoca asfixia cuando desplaza al aire, ocasionando un descenso de la concentración de oxígeno.

2.5. Combustión

La combustión es un proceso de reacción exotérmico de liberación de energía en forma de calor a partir de un combustible, durante este proceso el combustible se consume generando desechos

sólidos o gaseosos. La combustión se genera gracias a un conjunto de reacciones de oxidación entre el combustible y el comburente, por lo que el combustible debe ser fácilmente oxidable para que se produzca una reacción de combustión. La combustión es diferente a otros procesos químicos por la existencia de una llama que genera la oxidación acelerada del combustible (Entrena, 2013, p.43).

Deben estar presentes tres elementos fundamentales para que se produzca una reacción de combustión. El combustible sea sólido, líquido o gaseoso, el comburente que es el medio en el que se genera la combustión; el oxígeno es un buen comburente y la energía de activación que es la cantidad que se debe aportar de energía para empezar una reacción de combustión. Es imposible que se produzca la combustión sin la participación de uno de estos tres elementos o sin las proporciones ideales entre ellos. El vínculo entre estos tres elementos se suele representar en lo que se conoce como el triángulo de la combustión (Illán, 2015, p.22).



Figura 8-2: Triángulo de la combustión
Fuente: (Illán, 2015, p.22)

2.5.1. Tipos de combustión

Sostiene Illán (2015, p.23), que la combustión puede clasificarse según su velocidad en detonante, estacionaria y explosiva; pero la manera más común de clasificarla es según la cantidad de aire utilizada, lo que posibilita diferenciar entre diversos tipos de combustión.

2.5.1.1. Combustión estequiométrica (o neutra)

De acuerdo con Illán (2015, p.23), una combustión estequiométrica es aquella en la que la cantidad de aire utilizada es estrictamente la necesaria para que la cantidad de oxígeno aportada sea suficiente para garantizar la combustión completa del combustible.

2.5.1.2. *Combustión completa con exceso de aire (o combustión limpia)*

El objetivo de este tipo de combustión es evitar la manifestación de inquemados que podrían producirse en caso de desajustes de la cantidad de aire inyectado. Por lo que, para garantizar la combustión total del combustible se utiliza una cantidad de aire superior a la requerida. Una de sus ventajas es que permite adaptar las emisiones de gases contaminantes a las exigencias medioambientales, pero al tener mayor cantidad de gases en movimiento, aumenta el calor que se libera al ambiente por medio de los gases de escape y reduce la temperatura máxima alcanzada (Illán, 2015, p.23).

2.5.1.3. *Combustión incompleta con defecto de aire*

Según Illán (2015, p.23), en una combustión incompleta con defecto de aire se utiliza menos aire del necesario para quemar completamente el combustible, esto provoca la formación de inquemados altamente contaminantes, disminución del rendimiento y mayor consumo de combustible.

2.5.1.4. *Combustión incompleta con mezclado insuficiente*

En esta clase de combustión pese a utilizar una cantidad de aire superior o igual a la necesaria para garantizar la combustión, presenta en los productos de combustión oxígeno que no ha reaccionado con el combustible e inquemados, esto provoca una combustión de bajo rendimiento. El origen del problema puede tener numerosas causas, como por una deficiente mezcla de combustible y comburente, el que aún no se haya conseguido una temperatura apropiada en el hogar, la existencia de puntos fríos, etc. (Illán, 2015, pp.23-24).

2.6. Transferencia de calor

El calor en su definición es la forma de energía que se transfiere de un elemento a otro, este fenómeno sucede por la existencia de diferencia de temperaturas. Para entender este fenómeno se requiere de un análisis termodinámico en el cual se llega a determinar la cantidad de calor que se transfiere cuando un elemento sufre un cambio de temperatura en su estado natural.

Una rama de la termodinámica es la ciencia de transferencia de calor, que estudia el comportamiento de dichas transferencias de energía en forma de calor en un sistema, la cual se

produce desde el elemento que tiene mayor temperatura hacia el de menor temperatura hasta que los dos elementos alcancen la misma temperatura, es ahí donde la transferencia de calor se detiene y se llega a un punto de equilibrio (Çengel y Ghajar, 2020, pp.16-17).

Plantea Çengel y Ghajar (2020, p.17), que la transferencia de calor se produce de tres diferentes formas: conducción, convección y radiación, y para que pueda existir la transferencia en cualquiera de estas formas se necesita de un diferencial de temperatura entre los elementos.

2.6.1. *Conducción*

La transferencia de calor por conducción se produce cuando las partículas de dos elementos interactúan entre sí, transfiriendo la energía de mayor a menor. La velocidad de conducción de energía dependerá de la forma, espesor, tipo de material y la diferencia de temperaturas de los elementos.

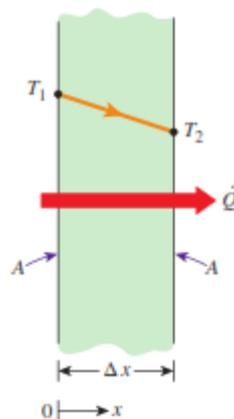


Figura 9-2: Conducción de calor a través de una pared
Fuente: (Çengel y Ghajar, 2020, p.17)

Una de las propiedades físicas de los materiales es la conductividad térmica, esta propiedad es única en cada tipo de material, ya que cada material acumula y transfiere su energía térmica de forma muy distinta. Un alto valor de conductividad térmica nos indica que es un buen conductor de calor y con un valor bajo de conductividad térmica indica que el material es un mal conductor de calor a estos se los conoce como materiales aislantes. La conductividad térmica en su definición es la tasa de transferencia de calor a través de una unidad de espesor del material por unidad de superficie por unidad de la variación de temperaturas (Çengel y Ghajar, 2020, p.19).

Para el cálculo de la tasa de conducción de la transferencia de calor se puede hacer uso de “la ley de Fourier de la conducción de calor”. Con esta ley se puede calcular la cantidad de calor que recorre un elemento de determinado espesor por el área perpendicular al calor por un gradiente de temperatura. La cual se describe en la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Al separar la variable en la ecuación anterior e integrar se tiene.

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2)$$

Donde:

\dot{Q}_{cond} : transferencia de calor por conducción [W].

k : conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m K}\right]$.

A : superficie perpendicular al flujo de calor [m^2].

T_1 : temperatura en el interior [K].

T_2 : temperatura de la superficie del sólido [K].

L : espesor de la pared [m].

2.6.2. Convección

La transferencia de calor por convección es una forma en la cual se transfiere la energía entre una superficie sólida y un fluido ya sea líquido o gas que está en movimiento. Existe transferencia de calor por convección al estar en movimiento el fluido, cuanto más rápido es el movimiento del fluido la transferencia de calor es más rápida. En caso de no existir movimiento del fluido con la superficie sólida esta transferencia de calor se daría por conducción (Çengel y Ghajar, 2020, p.25).

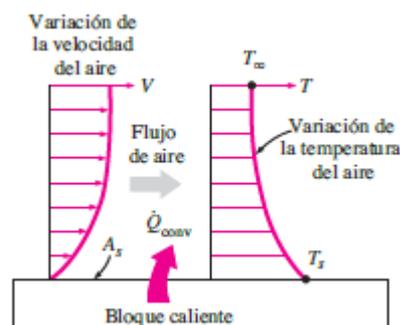


Figura 10-2: Transferencia de calor por convección

Fuente: (Çengel y Ghajar, 2020, p.25)

La transferencia de calor por convección puede ser forzada y natural. Cuando se utiliza un mecanismo extra como un ventilador o una bomba la cual hace circular el fluido por la superficie se puede decir que es convección forzada y cuando el movimiento del fluido se produce por la diferencia de densidades provocado por un diferencial de temperatura se le llama convección natural o libre (Çengel y Ghajar, 2020, p.25).

Para el cálculo de la tasa de transferencia de calor por convección se puede hacer uso de la “ley de Newton de enfriamiento” que está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

La ecuación anterior se puede reordenar para obtener.

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{conv}} \quad (4)$$

Donde:

\dot{Q}_{conv} : transferencia de calor por convección [W].

T_s : temperatura de la superficie del sólido [K].

T_∞ : temperatura del fluido suficientemente alejado de la superficie del sólido [K].

R_{conv} : resistencia a la convección de la superficie $\left[\frac{K}{W}\right]$.

Debido a que el área de la superficie del sólido es proporcional a la transferencia de calor por convección, se puede decir que mientras más grande sea el área de la superficie del sólido en contacto con el fluido mayor será la transferencia de calor (Çengel y Ghajar, 2020, pp.25-26).

2.6.3. Radiación

Todo cuerpo que tenga una temperatura por encima del cero absoluto produce radiación térmica, por consiguiente, existe una transferencia de energía a la que se conoce como transferencia de calor por radiación. Este tipo de transferencia de calor es el más rápido ya que se transfiere a la velocidad de la luz y no sufre de pérdidas de energía en el vacío. Un ejemplo claro de esto es la forma en como llegan los rayos del sol al planeta tierra (Çengel y Ghajar, 2020, p.27).

Para calcular la tasa máxima de la radiación producida por un cuerpo se hace uso de la “ley de Stefan-Boltzmann” que está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma A_s T_s^4 \quad (5)$$

Donde:

\dot{Q}_{rad} : transferencia de calor por radiación [W].

σ : $5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ (constante de Stefan-Boltzmann).

A_s : área superficial del cuerpo [m^2].

T_s : temperatura superficial del cuerpo [K].

Se conoce como cuerpo negro a la superficie en donde se concentra la emisión de radiación, la radiación emitida por cuerpos reales es menor a un cuerpo negro y esta viene afectada por una emisividad. Entonces la ecuación sería:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (6)$$

Donde:

ε : emisividad de la superficie se encuentra en el rango de $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Se dice que un cuerpo está en equilibrio con el ambiente cuando este emite y absorbe la misma radiación, por lo tanto, su temperatura permanece constante, pero, si la temperatura del cuerpo es mayor a la del ambiente existe una variación en la temperatura.

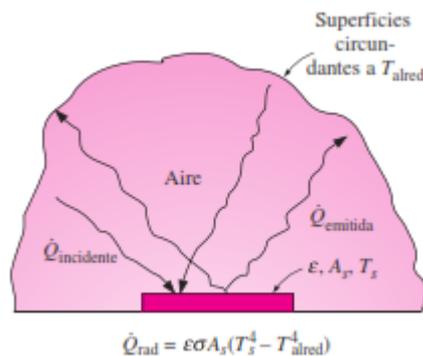


Figura 11-2: Transferencia de calor por radiación

Fuente: (Çengel y Ghajar, 2020, p.28)

La ecuación para el cálculo de transferencia de energía por radiación sería la siguiente:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (7)$$

Donde:

T_{alred} : temperatura del ambiente [K].

2.7. Principales materiales utilizados en el diseño

2.7.1. Acero

Los aceros son aleaciones de hierro, carbono, manganeso y concentraciones de otros elementos de aleación; hay una cantidad enorme de aceros con diferentes composiciones o tratamientos térmicos. Las propiedades mecánicas como la resistencia, dureza y ductilidad dependen del contenido de carbono, que frecuentemente es inferior al 1,0% en peso. A medida que aumenta el contenido de carbono aumenta también la resistencia y la dureza, pero disminuye la ductilidad. Algunos de los aceros más frecuentes se agrupan según la concentración de carbono en aceros de alto, medio y bajo carbono, existiendo subclases dentro de cada grupo en función de la concentración de otros elementos de aleación (Callister y Reithwisch, 2018, p.434).

Uno de los aceros de bajo contenido de carbono es el ASTM A36, que tiene un punto de fluencia mínimo de 248 MPa, es muy dúctil y está laminado en caliente. Se encuentra existente en láminas, tubería, varillas, canales, ángulos, etc. (Mott, 2006, p.54). El acero ASTM A36 en el país es de gran comercialización y muy utilizado en el campo estructural, por lo que es un gran candidato a emplearse para construir la estructura de soporte y el recubrimiento superficial del cuerpo del horno.

2.7.2. Cerámicos refractarios

Son materiales muy utilizados debido a sus propiedades de resistencia a las altas temperaturas sin deformarse ni fundirse, por su gran capacidad de no reaccionar y mantenerse inertes a la exposición en ambientes severos. De igual forma, una característica muy importante a considerar es que es un aislante térmico (Callister y Reithwisch, 2018, p.478).

Las aplicaciones más comunes de los cerámicos refractarios son el revestimiento de hornos industriales para fundición de metales, tratamientos térmicos de metales, fabricación de vidrio, fabricación de cal, fabricación de cemento y generación de energía (Callister y Reithwisch, 2018, p.478). Estos materiales se fabrican y se comercializan en diferentes formas, la más común son los ladrillos refractarios. Para que un material refractario sea eficaz en su utilidad dependerá de su composición, en la Tabla 4-2 se muestra la composición de varios materiales refractarios comerciales.

Tabla 4-2: Composición de materiales refractarios comerciales

Tipo refractario	Composición (% en peso)							Porosidad aparente (%)
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	
Arcilla Refractaria	25-45	70-50	0-1		0-1	0-1	1-2	10-25
Arcilla refractaria de alta contenido de alúmina	90-50	10-45	0-1		0-1	0-1	1-4	18-25
Sílice	0,2	96,3	0,6			2,2		25
Periclasa	1,0	3,0	90,0	0,3	3,0	2,5		22
Mineral de periclasa y óxido de cromo	9,0	5,0	73,0	8,2	2,0	2,2		21

Fuente: (Callister y Reithwisch, 2018, p.479)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

La porosidad en la fabricación de ladrillos refractarios es una variable muy importante a considerar, ya que a menor porosidad aumenta su resistencia mecánica, la capacidad de carga, la resistencia a la corrosión, el aislamiento térmico, pero disminuye la resistencia al choque térmico (Callister y Reithwisch, 2018, p.479).

2.7.2.1. Ladrillo refractario

Los ladrillos refractarios son los utilizados en la construcción de hornos que requieren mantener temperaturas en un lugar cerrado y aislar estructuras de temperaturas sumamente altas. En los ladrillos refractarios no es un factor importante la resistencia ya que no son empleados para soporte de cargas estructurales. Más bien, se utiliza como revestimiento (Callister y Reithwisch, 2018, p.479).

La Norma INEN 608 define al ladrillo refractario como un producto previamente moldeado en una fábrica con geometrías determinadas, y de composición y propiedades variadas.

Menciona la Norma INEN 607 (ANEXO A), que existen tres tipos de ladrillos refractarios que son:

- Ladrillo normal o fundamental: son aquellos que tienen medidas estándar. Largo 229 ± 5 mm, ancho 114 ± 3 mm y espesor 63 ± 2 mm.

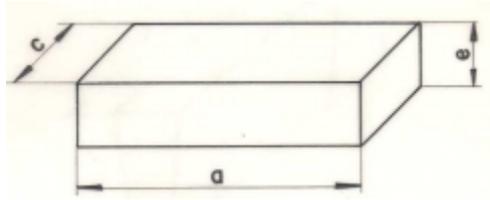


Figura 12-2: Ladrillo normal o fundamental
Fuente: (NTE INEN 607, 1981, p.7)

- Ladrillos prismáticos-rectangulares: es aquel que tiene una o más de sus dimensiones distintas a las que posee un ladrillo normal.

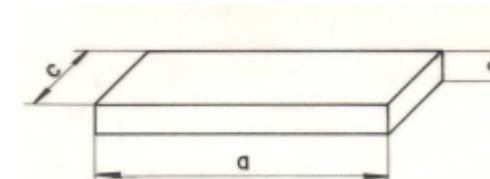


Figura 13-2: Ladrillo prismáticos-rectangulares tipo teja
Fuente: (NTE INEN 607, 1981, p.7)

- Ladrillos o piezas prismáticas especiales: aquellos en los que una o varias de sus caras no son paralelas. Se utilizan particularmente para la construcción de bóvedas, arcos y cúpulas de distintos tipos de hornos industriales.

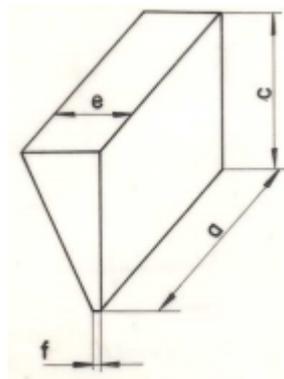


Figura 14-2: Ladrillo especial tipo bisel de borde
Fuente: (NTE INEN 607, 1981, p.7)

2.7.3. *Cemento refractario*

Describe la Norma INEN 608 al cemento refractario como un material fabricado que tiene como elemento principal al aluminato de calcio, que, al realizar la mezcla con agua, adquiere la propiedad de tornarse duro por fraguado hidráulico y la capacidad de pegar otros materiales. Su uso es comúnmente para la elaboración de hormigones y morteros refractarios.

2.7.4. *Concreto refractario*

Define la NTE INEN 608 al concreto u hormigón refractario como un producto conformado por la combinación de elementos refractarios crudos y/o calcinados, con apropiada granulometría, y combinado principalmente con cemento refractario alúmino-cálcico para que al momento de realizar la mezcla con agua se pueda dar un fraguado hidráulico adecuado.

2.7.5. *Mortero refractario*

Es un tipo de mortero muy resistente al ataque de los gases generados durante la combustión y a las elevadas temperaturas. Generalmente son una mezcla entre cemento de aluminato de calcio y arena refractaria. Este material es muy utilizado en el recubrimiento de paredes de hornos, chimeneas, etc., con el fin de conservar sus propiedades. También se utiliza como material de unión entre filas de ladrillos refractarios (García, 2018, p.29).

Según la NTE INEN 608 existen morteros refractarios de composición variada tales como los síliceos, aluminosos, de minerales y sílico aluminosos. De acuerdo a su composición serán utilizados en diferentes tipos de trabajos, ajustándose a las necesidades requeridas.

2.7.6. *Aislantes refractarios*

Son aquellos fabricados con materiales refractarios, pero con una característica primordial, que, se deben fabricar con un alto porcentaje de porosidad, esto debido a que el aire en reposo es un excelente aislante térmico. Sin embargo, los poros deben estar separados uno de otro, de lo contrario se produciría con gran facilidad la transferencia de calor por convección. La efectividad de aislar el calor disminuye progresivamente con la temperatura, pues al elevarse ésta, resalta la radiación de las paredes de los poros. Los aislantes refractarios principalmente

están compuestos por: alúmina, magnesita, harina fósil, mica expandida, lana de vidrio, etc. (Morales, 2012, p.205).

Desde el punto de vista de Morales (2012, p.205), los aislantes se clasifican de acuerdo a su resistencia térmica y baja conductividad en:

- *Aislantes extra-refractarios*: soportan temperaturas muy elevadas (1700 °C), están compuestos por alúmina fundida en horno eléctrico. No son muy utilizados debido a su alto costo.
- *Aislantes refractarios*: son materiales a base de diatomita con una mezcla artificial que contiene de 25 a 38% de alúmina. Poseen una porosidad de 70 a 80%.
- *Aislantes semi-refractarios*: aquellos materiales aislantes que no pueden ser utilizados por arriba de los 850 a 900 °C, están fabricados a base de harina fósil y de otros materiales como asbesto, fibra de vidrio y amianto.

2.7.6.1. *Manta refractaria aislante o fibra cerámica*

La manta refractaria es fabricada a partir de sílice y alúmina de alto grado de pureza, se caracteriza por tener excelente resistencia a los choques térmicos y a las temperaturas elevadas. Al ser un material aislante presenta una baja conductibilidad térmica, es decir, el calor generado en el lado de trabajo se refleja en casi un 70 % disminuyendo así el calor en el lado frío. Según la Directiva Europea 97/69/CE la manta refractaria aislante es un cancerígeno de segundo orden. El riesgo se debe a la liberación de partículas muy finas de silicato que se incrustan en el sistema respiratorio, por lo que es recomendable utilizar guantes y mascarilla al manejar este material (Zanón et al., 2019, p.29). Se emplea generalmente para el revestimiento de hornos industriales, el sellado y recubrimiento de puertas de hornos, tratamientos térmicos, turbinas a gas, estufas y hornos de laboratorio, etc.

2.8. **Automatización de un proceso**

La automatización de un proceso es el reemplazo de operaciones que comúnmente se realizan de forma manual por la realización de las mismas operaciones, pero de forma automática. Esto es realizado por máquinas, equipos robóticos o cualquier otro equipo automático. De esta

manera se puede alcanzar ventajas incuestionables en la mejoría de los procesos industriales (Iñiguez, 2011).

Las ventajas de un proceso automatizado es que se optimiza costes en la producción, mejora la calidad del trabajo, reduce la cantidad de operarios, optimiza tiempos del proceso y brinda una mayor seguridad a los trabajadores. En otros casos se incrementa la producción y reduce el gasto energético (Iñiguez, 2011). Una de las principales desventajas de la automatización es el costo elevado para su implementación, por esta razón se debe realizar antes un estudio económico.

2.8.1. Fases para la automatización de un proceso

Sostiene Iñiguez (2011), que las fases que se deben seguir para la automatización de un proceso son las que se muestran en el siguiente flujograma.



Gráfico 1-2: Fases de la automatización del proceso
Fuente: (Iñiguez, 2011)

2.9. Contactor

Se trata de un dispositivo electromecánico con la función principal de conectar y desconectar receptores de potencia eléctrica. El contactor está compuesto de un circuito electromagnético que, al ser energizado por corriente eléctrica permite el cierre o la apertura de los contactos. Estos regresan a su posición original cuando el contactor deja de ser energizado (Cerdá, 2018, p.98).

El contactor cuenta con dos tipos de contactos que son los NO (normalmente abiertos) y NC (normalmente cerrado) estos pueden ser utilizados de acuerdo con las necesidades del proceso.



Figura 15-2: Contactores

Fuente: (Cerdá, 2018, p.98)

2.10. Interruptores automáticos

Estos interruptores tienen la misma función que un fusible, son utilizados principalmente como protección de las instalaciones eléctricas, abriendo el circuito si se suscitan cortocircuitos y sobrecargas en cualquier punto de la instalación. Una vez solucionado el problema no es necesario cambiarlo por uno nuevo, basta con volver a accionar el interruptor para restablecer nuevamente el suministro de corriente (Rodríguez, 2012, p.20).



Figura 16-2: Interruptor automático

Fuente: (Siemens, 2020)

2.11. Pulsadores y luces pilotos

Estos dispositivos se encargan de permitir o no el paso de la corriente según la funcionalidad del sistema. Los pulsadores se utilizan en los controles principales de inicio y paro, y en los circuitos de seguridad o de paro de emergencia (Rodríguez, 2012, p.12).

Las luces pilotos tienen como finalidad informar al operario el correcto funcionamiento de una máquina o sistema y en otros casos informar el fallo en el mismo.



Figura 17-2: Pulsadores y luces piloto
Fuente: (Rodríguez, 2012, p.12)

La Norma Internacional IEC 60204-1 establece los colores de los indicadores luminosos y sus significados con respecto a la condición de la máquina como se muestra en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2: Colores de los indicadores luminosos y sus significados

Color	Significado	Explicación	Acción por el operador
ROJO	Emergencia	Condiciones peligrosas	Acción inmediata a realizar en condiciones peligrosas
AMARILLO	Anomalía	Condiciones anormales; Condiciones críticas amenazantes	Control y/o intervención
VERDE	Normal	Condiciones normales	Opcional
AZUL	Obligatorio	Indicación de una condición que requiere la acción por el operador.	Acción obligatoria
BLANCO	Neutro	Otras condiciones; Puede utilizarse cada vez que exista duda sobre la aplicación del ROJO AMARILLO, VERDE o AZUL	Control

Fuente: (Norma Internacional IEC 60204-1)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

2.12. Termocuplas

La termocupla es un sensor de temperatura eléctrico muy utilizado en el sector industrial porque puede soportar y leer altas temperaturas. Este tipo de sensor cuenta con dos alambres de

diferente material conectados en un extremo, este al entrar en contacto con el calor genera un voltaje mínimo conocido como milivolts, este voltaje aumenta a medida que se incrementa la temperatura. Para proteger la termocupla de condiciones extremas de trabajo es encapsulada con un material cerámico y para asegurar que la señal no se modifique hasta llegar a su indicador se utilizan cables compensados (Gutiérrez y Iturralde, 2017, p.29).

Existen varios tipos de termocuplas dependiendo de su rango de temperatura y tipo de material. Las más comunes son las tipo K (Cromo/Aluminio), tienen un rango de temperatura que va desde los -200 °C a los 1200 °C. Las termocuplas tipo J (Hierro/Constantán) con un rango de temperatura desde -40 °C a 750 °C. Existen además las termocuplas tipo B (Platino/Rodio), son ideales para trabajos a temperaturas superiores a los 1800 °C y las tipo E (Cromo/Constantán) que son eficientes para trabajos a temperaturas frías (Gutiérrez y Iturralde, 2017, pp.29-30).

2.13. Controlador de temperatura

Este dispositivo es muy utilizado en cualquier tipo de horno industrial. Su función es fijar un valor de temperatura necesario con un margen de error mínimo, recibir la señal que envía la termocupla y proyectar en su pantalla la temperatura a la que se encuentra operando un horno. Además, tiene señales de salida que permiten cortar el suministro de energía del circuito una vez alcanzada su temperatura programada y así detener todo el sistema (Mejía y Villalobos, 2019, p.75).

Para seleccionar un controlador de temperatura se debe considerar el tipo de horno y lo más importante tener en cuenta los rangos de temperatura en que va a operar.



Figura 18-2: Controlador de temperatura Camsco REX-C100
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

2.14. Quemadores industriales

El quemador es un elemento primordial en calderas y hornos industriales, ya que es el encargado de generar la llama con la cual se alcanzarán las temperaturas requeridas. En él se lleva a cabo un proceso de mezcla entre aire y combustible para generar la combustión (Palacios, 2016, p.7).

Da a conocer Palacios (2016, pp.8-13), que los quemadores industriales pueden ser de dos clases como se menciona a continuación:

- *Quemadores atmosféricos:* en este tipo de quemador el aire para la combustión es tomado de manera natural del ambiente que rodea el sistema.
- *Quemadores con aire presurizado o quemador de tiro forzado:* son los que disponen de un ventilador para generar el aire de forma forzada. Para su correcto funcionamiento cuentan con válvulas de regulación, seguridad y control del encendido, ductos de combustible y el paro automático según parámetros predeterminados.

2.15. Controlador de flama

Un controlador de flama es un dispositivo que se encarga del correcto funcionamiento del quemador. Este dispositivo controla el encendido de la llama mediante un generador de chispa, por seguridad controla la existencia de flama mediante un sensor de llama, activa y desactiva el ventilador, las electroválvulas de flujo de combustible y bombas en función de parámetros determinados (García, 2013, p.62).



Figura 19-2: Controlador de flama para quemadores de gas
Fuente: (Siemens, 2019)

2.16. Tablero de control eléctrico

Se trata de un cajetín o gabinete en donde se encuentra instalado los dispositivos de maniobra, mando, conexión, seguridad, alarma y señalización, los cuales cumplen con el control eléctrico de un sistema. La fabricación e instalación de los tableros eléctricos debe cumplir con ciertas normas y criterios con la finalidad que su funcionamiento sea óptimo. Una vez que el tablero esté energizado debe garantizar la seguridad de quien lo manipula y del ambiente en donde se encuentra instalado (Rodríguez, 2012, pp.3-4).



Figura 20-2: Tablero de control eléctrico
Fuente: (Rodríguez, 2012, pp.10-13)

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Selección de la mejor alternativa de horno

En el capítulo II se investigó los distintos tipos de hornos que se emplean para la fundición de metales tales como: hornos de crisol, horno cubilotes y hornos eléctricos. En la Tabla 1-3 se muestran las alternativas para la evaluación y posterior selección.

Tabla 1-3: Alternativas para la selección del horno

Alternativa	Tipo de horno	Imagen
A	Hornos de crisol	
B	Hornos cubilote	
C	Hornos eléctricos	

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.1.1. Criterios de valorización

- **Inversión inicial para la construcción.** - Uno de los principales criterios para la evaluación es tener el menor costo de adquisición e instalación de los componentes que conforman el horno y que cumplan con los parámetros de diseño.
- **Bajo consumo de energía.** - En la industria metalúrgica para generar calor se emplea energía eléctrica o combustibles como la gasolina, diésel, carbón vegetal o gas licuado de petróleo. Para realizar un trabajo se requiere el menor consumo de energía; o bien, realizar más trabajo con la misma energía.

- **Costo de mantenimiento.** - Mientras menor sea la complejidad del horno se tendrá mayor facilidad de reparación y rapidez en el cambio de elementos defectuosos; en consecuencia, el costo de mantenimiento y las paras por mantenimiento se verán reducidas.
- **Capacidad de carga.** - La capacidad considera la cantidad de material que se puede fundir en cada tipo de horno dependiendo de su tamaño. La capacidad del horno no debe ser elevada, se requiere una capacidad promedio de 60 kg de fundición.
- **Impacto ambiental.** - Las cuestiones ambientales relacionadas con este criterio incluyen principalmente: contaminación atmosférica, residuos sólidos, contaminación acústica y aguas residuales.
- **Operatividad.** - Se considera la facilidad con la que cualquier persona puede operar el horno de manera eficiente.
- **Facilidad de colado.** - El colado o vaciado del material fundido es uno de los parámetros primordiales de un proceso de fundición, por lo que debe ser sencillo, preciso y sin afectar a la seguridad de los operarios.

Mediante una matriz de ponderación se selecciona el tipo de horno que posea el puntaje más alto en función de los criterios de valorización mencionados anteriormente. Para esto se dará una calificación de 1 a 10 puntos; indicando que los valores altos corresponden a que es viable, accesible y tiene muchas facilidades y los valores bajos, que no es viable, es poco accesible y tiene un grado de facilidades bajo.

Tabla 2-3: Evaluación de los criterios de selección

Criterios	Peso Asignado	A		B		C	
		Calificación	Calificación Ponderada	Calificación	Calificación Ponderada	Calificación	Calificación Ponderada
Inversión inicial para la construcción	0,23	8,00	1,84	2,00	0,46	6,00	1,38
Bajo consumo de energía	0,14	7,00	0,98	3,00	0,42	5,00	0,70
Costo de mantenimiento	0,15	8,00	1,20	2,00	0,30	5,00	0,75
Capacidad de carga	0,20	8,00	1,60	1,00	0,20	8,00	1,60
Impacto ambiental	0,05	6,00	0,30	2,00	0,10	7,00	0,35
Operatividad	0,13	8,00	1,04	2,00	0,26	6,00	0,78
Facilidad de colado	0,10	7,00	0,70	4,00	0,40	7,00	0,70
TOTAL	1,00		7,66		2,14		6,26

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Con la evaluación efectuada en la Tabla 2-3 se evidencia que la alternativa de solución que obtuvo la calificación más alta fue la A con un puntaje de 7,66 que pertenece al tipo de horno de

crisol. Por lo tanto, se concluye que este tipo de horno cubre las necesidades requeridas por el taller de fundición Granito de Mostaza y se continúa con la selección de la mejor opción de tipo de horno crisol para la fundición de bronce.

3.2. Selección del tipo de horno crisol

En el capítulo II se investigó los distintos tipos de hornos de crisol que se emplean para la fundición de metales como los: hornos de crisol no basculante o estacionarios y hornos de crisol basculante o horno de crisol de volteo. En la Tabla 3-3 se muestran las alternativas para la evaluación y posterior selección.

Tabla 3-3: Alternativas para la selección del horno tipo crisol

Alternativa	Tipo de horno crisol	Imagen
A	Hornos de crisol no basculante o estacionarios	
B	Hornos de crisol basculante o horno de crisol de volteo	

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.2.1. Criterios de valorización

- **Costo de fabricación.** - Está relacionado con el costo de adquirir e instalar los componentes que conforman el horno y que cumplan con los parámetros de diseño.
- **Mantenimiento.** - Mientras menor sea la complejidad del horno crisol se tendrá tiempos de mantenimiento más rápidos, facilidad en su reparación y mayor rapidez para el cambio de elementos defectuosos.
- **Facilidad de operación.** - Se considera la facilidad con la que el operario puede manipular el horno y realizar el proceso de vaciado en el molde de una manera eficiente evitando salpicaduras y perturbaciones.
- **Facilidad de diseño y construcción.** – Hay que tener en cuenta el nivel de dificultad que se tiene para encontrar el dimensionamiento adecuado de los componentes del horno, lograr un desempeño óptimo y que sobre todo se cumpla con los parámetros requeridos de diseño.

- **Desperdicio de metal fundido.** - Se relaciona con la posibilidad de que no se presenten derrames de metal líquido durante el proceso de colado en el interior de la cámara de combustión del horno.

Mediante la matriz de ponderación se selecciona el tipo de horno crisol que posea el puntaje más alto en función de los criterios de valorización mencionados. El resultado de la ponderación se detalla en la tabla a continuación.

Tabla 4-3: Evaluación de los criterios de selección

Criterios	Peso Asignado	A		B	
		Calificación	Calificación Ponderada	Calificación	Calificación Ponderada
Costo de fabricación	0,25	8,00	2,00	6,00	1,50
Mantenimiento	0,25	7,00	1,75	6,00	1,50
Facilidad de operación	0,15	7,00	1,05	6,00	0,90
Facilidad de diseño y construcción	0,25	6,00	1,50	5,00	1,25
Desperdicio de metal fundido	0,10	5,00	0,50	8,00	0,80
TOTAL	1,00		6,80		5,95

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Para la evaluación de la Tabla 4-3 se consideró una calificación de 1 a 10 puntos; indicando que los valores altos corresponden a que es viable, accesible y presenta facilidades; mientras que los valores bajos indican que no es viable, es poco accesible y tiene un grado de facilidades bajo.

La alternativa de solución que obtuvo la calificación más alta fue la A con un puntaje de 6,8 que pertenece al horno de crisol no basculante o estacionario; por lo tanto, se concluye que este tipo de horno satisface las necesidades requeridas y se procede a encontrar cual es la mejor alternativa de combustible para emplear en este tipo de horno.

3.3. Selección de la mejor alternativa de combustible

Se propone tres alternativas de solución debido a que estas son las más utilizadas en los hornos de fundición por sus propiedades, precio y accesibilidad en el país. En consecuencia, nuestro análisis se centrará en las alternativas que se exponen en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3: Alternativas para la selección del combustible

Alternativa	Combustible
A	Carbón vegetal
B	Gas licuado del petróleo (GLP)
C	Diésel

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.3.1. Criterios de valorización

Para establecer el combustible más adecuado para el taller de fundición es necesario establecer los siguientes criterios:

- **Contaminación.** - Se considera el impacto del combustible en el medio ambiente.
- **Accesibilidad.** – Hace referencia a cuan accesible es el combustible en el país.
- **Poder calorífico.** - Se refiere al poder calorífico que tiene el combustible para llegar a temperaturas altas en poco tiempo.
- **Aspecto económico.** - Considera el costo de instalación y el costo del combustible.
- **Abastecimiento.** – Examina la facilidad con la que se puede comprar y transportar el combustible al taller de fundición.
- **Eficiencia.** - Se compara si el combustible es eficiente para generar energía útil que ayude a una mejor combustión.

Mediante la matriz de ponderación se selecciona el tipo de combustible que posea el puntaje más alto en función de los criterios de valorización mencionados. El resultado de la ponderación se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 6-3: Evaluación de los criterios de selección

Criterios	Peso Asignado	A		B		C	
		Calificación	Calificación Ponderada	Calificación	Calificación Ponderada	Calificación	Calificación Ponderada
Contaminación	0,25	3,00	0,75	7,00	1,75	4,00	1,00
Accesibilidad	0,10	8,00	0,80	8,00	0,80	8,00	0,80
Poder calorífico	0,20	5,00	1,00	8,00	1,60	7,00	1,40
Aspecto económico	0,10	4,00	0,40	6,00	0,60	7,00	0,70
Abastecimiento	0,10	6,00	0,60	8,00	0,80	7,00	0,70
Eficiencia	0,25	4,00	1,00	7,00	1,75	6,00	1,50
TOTAL	1,00		4,55		7,30		6,10

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Para la evaluación de la Tabla 6-3 se consideró una calificación de 1 a 10 puntos; indicando que los valores altos corresponden a que es viable, accesible y presenta facilidades; mientras que los valores bajos indican, que no es viable, es poco accesible y tiene un grado de facilidades bajo.

La alternativa de solución que obtuvo la calificación más alta fue la B con un puntaje de 7,3 que pertenece al gas licuado de petróleo (GLP). Un aspecto importante para la selección de esta alternativa fue que el taller de fundición había decidido cambiar el carbón vegetal empleado actualmente por el GLP, no es una evaluación técnica, pero explica el porqué de la elección y los equipos que se utilizaron para implementar en el proyecto, además de que el GLP es un tipo de combustible menos contaminante por su composición química, quemándose en su totalidad en el proceso de combustión, disminuyendo la emisión atmosférica del CO₂ logrando así una mejor combustión; por lo tanto, se concluye que este tipo de combustible satisface las necesidades requeridas por el taller de fundición.

3.4. Selección del crisol

De acuerdo a las necesidades de producción del taller de fundición se selecciona un crisol de grafito SALAMANDER AGF 60 de la compañía Morgan, en este crisol se puede obtener 60 kg de bronce fundido y 24 kg de aluminio el mismo que es adquirido en la Importadora Cruz y Asociados S.A “IMPORTCRUZ” de la ciudad de Guayaquil; esta selección es la más viable a utilizar durante el desarrollo del proyecto. En la Figura 1-3 se muestra las especificaciones técnicas del crisol seleccionado.

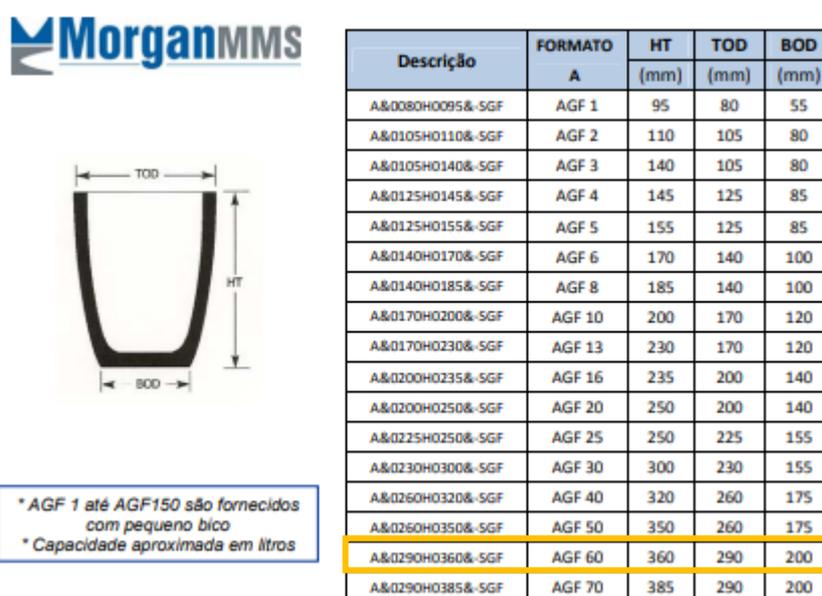


Figura 1-3: Especificaciones técnicas del crisol AGF 60
Fuente: (Morgan MMS)

3.5. Diseño del horno crisol

3.5.1. Parámetros de diseño

Los parámetros a considerar para el diseño del horno crisol de fundición serán los relacionados con el material a fundir, en este caso bronce, y el tipo de crisol a utilizar. Las propiedades y características se especifican en las Tablas 7-3 y 8-3 respectivamente.

Tabla 7-3: Propiedades del bronce

Metal a fundir	Bronce
Calor específico C_p	0,09 kcal/kg °C
Calor latente de fusión h_{if}	57,36 kcal/kg
Temperatura de fusión T_f	960 °C
Temperatura de vertido T_v	1100 °C
Temperatura ambiente T_∞	19 °C
Tiempo de fundición t	Se asume 90 min como tiempo necesario para obtener el metal fundido a una temperatura de 1100 °C

Fuente: (Çengel y Ghajar, 2020)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Tabla 8-3: Características del crisol

Material del crisol	Grafito
Masa del crisol	20 kg
Capacidad	60 kg de aleación de bronce
Calor específico del grafito $C_{p_{crisol}}$	0,1699 kcal/kg K
Dimensiones	$D_{m\acute{a}x} = 290mm$; $d_{min} = 200 mm$; $h = 360 mm$

Fuente: (Çengel et al., 2019, p.887)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.5.2. Consideraciones de diseño

3.5.2.1. Consideraciones para el dimensionamiento de la cámara de combustión

- El dimensionamiento del horno se hace en base a las dimensiones del crisol a utilizar.
- La distancia desde el diámetro máximo del crisol hacia las paredes refractarias y la distancia entre el borde superior del crisol y la tapa no deben ser inferiores a 40 mm; así lo recomiendan fabricantes de crisoles para alargar su vida útil y lograr máximos rendimientos.
- La forma cilíndrica de un horno proporciona una mejor distribución del calor alrededor del crisol, por lo que lo hace más eficiente que un horno cuadrado.

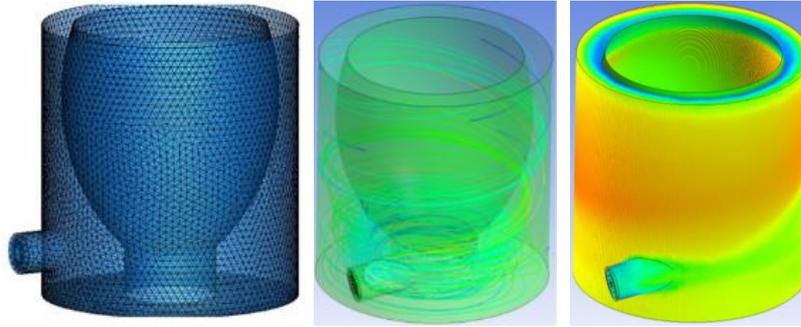


Figura 2-3: Distribución del calor en un horno cilíndrico
Fuente: (Murrieta et al., 2019)

- La base de soporte debe tener un diámetro mayor o igual al diámetro de la base del crisol.

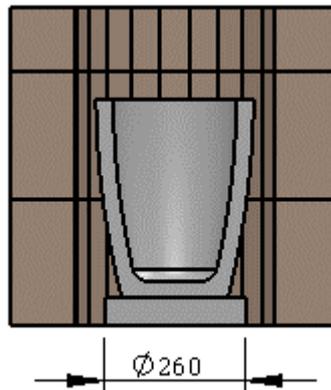


Figura 3-3: Diámetro de la base de soporte
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

- Minimizar las pérdidas de temperatura del horno.
- Se instalará un cargador o acople del crisol que servirá para que el material sólido a fundir entre en mayor cantidad y la fundición sea más rápida; se aprovechará además para que la escoria se eleve hacia la sección del cargador y el material líquido fundido quede al ras del crisol utilizando así su capacidad máxima.

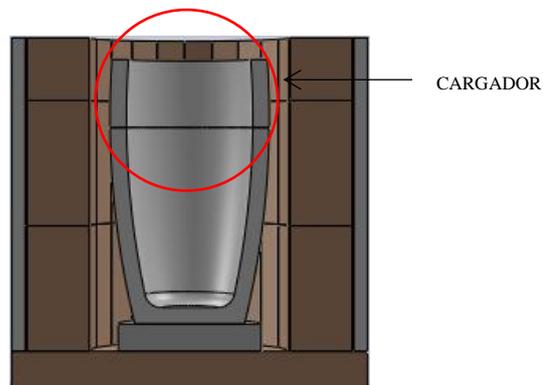


Figura 4-3: Cargador del crisol
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.5.2.2. Consideraciones para la instalación del quemador

- Los crisoles deben estar centrados en la base de soporte dentro del horno de manera que se garantice un buen espacio alrededor y una combustión uniforme.

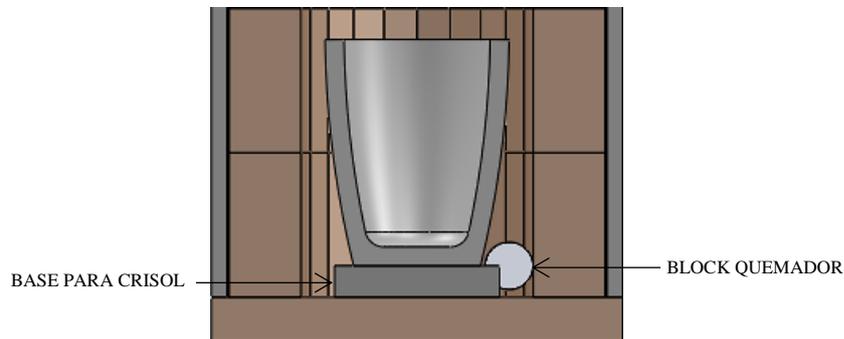


Figura 5-3: Correcto centrado del crisol en la base
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

- Verifique que la flama sea levemente oxidante y que no tenga contacto directo con el crisol.
- La salida del quemador debe centrarse dentro de la cámara de combustión del horno asegurándose de que la flama quede dirigida entre el crisol y la base que lo soporta procurando además ser tangente al lado del revestimiento del horno para así aprovechar de mejor manera la distribución de la flama hacia la parte superior del crisol como se muestra en la Figura 6-3.

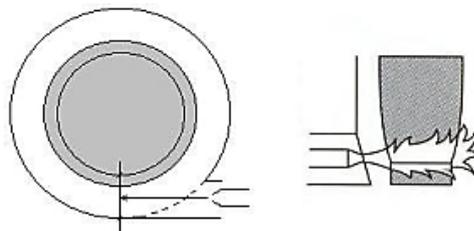


Figura 6-3: Centrado del quemador dentro del horno
Fuente: (Metalinsumos, 2014)

3.5.3. Materiales empleados para la construcción del horno

3.5.3.1. Ladrillo refractario

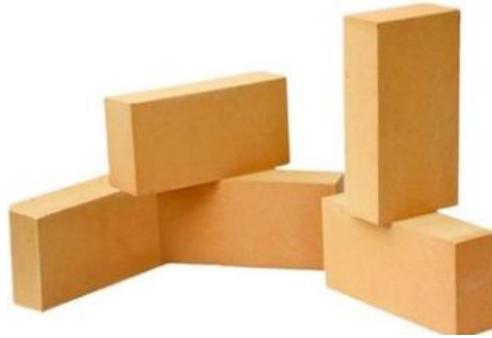


Figura 7-3: Ladrillo denso refractario
Fuente: (REEI S.A)

La Tabla 9-3 muestra las propiedades y composición química de este material que fueron otorgadas por REEI S.A la empresa proveedora.

Tabla 9-3: Propiedades y composición del ladrillo denso refractario

Producto básico	Ladrillo de alta alúmina
Tamaño estándar, mm	230x114x65
Peso, Kg	3,75
Densidad aparente, g/cm ³	≥ 2,20
Resistencia al aplastamiento en frío, Mpa	≥ 45
Refractariedad, °C	≥ 1770
Porosidad aparente, %.	≤ 27
Refractariedad bajo carga 0,2MPa, °C	≥ 1470
Conductividad térmica, W/mK	0,582
Al ₂ O ₃ , %	≥ 55

Fuente: (REEI S.A)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.5.3.2. *Manta fibra cerámica*



Figura 8-3: Manta fibra cerámica
Fuente: (REEI S.A)

En la Tabla 10-3 se muestra las propiedades y composición química de este material según la empresa proveedora REEI S.A.

Tabla 10-3: Propiedades y composición de la manta fibra cerámica

Clasificación de la temperatura, °C		1260
Densidad aparente, kg/m ³		128
Cambio lineal permanente, % (24h, 128kg/m ³)		-3 / 100 °C
Resistencia a la compresión, MPa		0,08 – 0,12
Conductividad térmica (W/mk)	400 °C	0,086
	800 °C	0,120
Composición química, %	Al ₂ O ₃	46
	Al ₂ O ₃ + SiO ₂	97
	Fe ₂ O ₃	< 1,0
	Na ₂ O + K ₂ O	≤ 0,5
Tamaño		7620x610x25 mm

Fuente: (REEI S.A)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.5.3.3. Concreto refractario



Figura 9-3: Concreto refractario

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H. 2021

Para la construcción del horno se ha decidido emplear concreto refractario VESUVIUS CERCAST™ 2900 (ANEXO B), pues presenta las mejores características de refractariedad. En la Tabla 11-3 se muestra las propiedades y composición química de este material otorgadas por Maquinarias Henriques C.A la empresa proveedora.

Tabla 11-3: Propiedades y composición química del concreto refractario

Densidad aparente, (lb/ft ³)	230 °F	135
	1500 °F	130
Resistencia al aplastamiento en frío, (psi)	230 °F	2250
	1500 °F	1550
Cambio lineal permanente, (%)	230 °F	0,0
	1500 °F	-0,2
Conductividad térmica (Btu.in/h.ft ² .°F)	500 °F	6,8
	1000 °F	4,8
	1500 °F	4,5
	2000 °F	4,4
Análisis químico	SiO ₃	41,5
	TiO ₃	1,7
	Al ₂ O ₃	50,3
	Fe ₂ O ₃	1,0
	CaO	5,1
	MgO	0,2
	Na ₂ O + K ₂ O	0,2

Fuente: (Maquinarias Henriques C.A)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.5.3.4. *Chapa metálica*



Figura 10-3: Acero ASTM A36

Fuente: (NOVACERO)

Para la construcción del horno se eligió acero ASTM A36 debido a su gran comercialización y uso en la industria. En la Tabla 12-3 se describe las propiedades físicas y mecánicas que tienen mayor influencia en la selección del acero ASTM A36 conocido también como hierro negro.

Tabla 12-3: Propiedades y composición química del acero ASTM A36

Composición química, (% en peso)	C	0,29
	Mn	1,0
	Otros	0,20 Cu (mínimo)
Resistencia a tracción, (MPa)		400
Límite de fluencia (cortante), (MPa)		145
Límite elástico, (MPa)		220
Ductilidad (%A, en 50 mm)		23
Coefficiente de expansión térmica, ($10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)		11,7
% de elongación mínimo		20 (8'')
Módulo de elasticidad, (GPa)		200
Resistencia a punto cedente, (MPa)		248
Módulo de rigidez, (GPa)		77

Fuente: (Callister y Reithwisch, 2018, p.435)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.5.4. Dimensionamiento del horno de fundición

3.5.4.1. Diámetro interno del cuerpo del horno

Cuando se trabaja a elevadas temperaturas el crisol tiende a expandirse; por lo tanto, se debe dejar un espacio de al menos 40 mm entre el diámetro máximo del crisol y la parte superior y pared refractaria del horno para permitir la expansión. Un espacio de expansión insuficiente resultará en el agrietamiento del crisol.

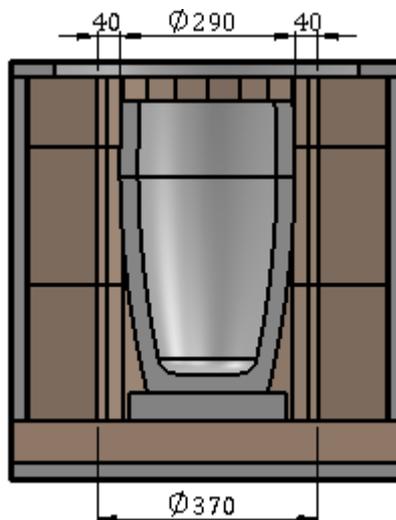


Figura 11-3: Diámetro interno del horno

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

$$D_i = D_{m\acute{a}x} + 2e \quad (8)$$

Donde:

D_i : diámetro interno del cuerpo del horno [mm].

$D_{m\acute{a}x}$: diámetro máximo del crisol [290 mm].

e : espacio libre sugerido [40 mm].

$$D_i = 290 + 2(40)$$

$$D_i = 370 \text{ mm}$$

3.5.4.2. Espesores de las paredes refractarias que componen el cuerpo del horno

Para establecer los espesores de las paredes refractarias del horno se tomó en cuenta principalmente los criterios establecidos de diseño y el uso de la menor cantidad posible de materiales con la finalidad de tener ahorros significativos.

La norma INEN 607 (ANEXO A), establece las formas y dimensiones de los ladrillos refractarios frecuentemente utilizados en la construcción de las diferentes partes estructurales de hornos industriales. Tomando como referencia la Tabla 13-3 que muestra las dimensiones y tolerancias establecidas por la norma para el ladrillo normal o fundamental, se eligió el ladrillo refractario de la empresa REEI S.A que cumple con lo establecido por la norma INEN 607 cuyas propiedades y dimensiones se indica en la Tabla 9-3.

Tabla 13-3: Dimensiones y tolerancias del ladrillo normal según la norma INEN 607

Formato normal o fundamental (mm)	Dimensiones y tolerancias (mm)		
	a (largo)	c (ancho)	e (espesor)
229 x 114 x 63	229 ± 5	114 ± 3	63 ± 2

Fuente: (NTE INEN 607)

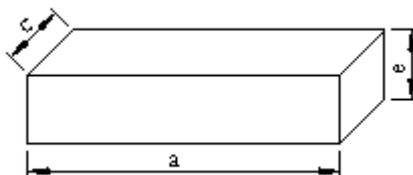


Figura 12-3: Ladrillo recto normal

Fuente: (NTE INEN 607)

El horno está formado de tres paredes refractarias que ayudan a minimizar las pérdidas de calor. La pared de ladrillos refractarios que se coloca de forma longitudinal utilizando el ancho del ladrillo de 114 mm. Para un mayor aislamiento del calor se utiliza manta fibra cerámica de 25 mm de espesor y por último una chapa metálica de acero negro de 2 mm de espesor.

$$r_e = r_i + e_{\text{ladrillo refractario}} + e_{\text{manta cerámica}} + e_{\text{chapa metálica}} \quad (9)$$

Donde:

r_e : radio exterior del cuerpo del horno [mm].

r_i : radio interior del cuerpo del horno [185 mm].

$e_{\text{ladrillo refractario}}$: espesor del ladrillo refractario [114 mm].

$e_{\text{manta cerámica}}$: espesor de la manta cerámica [25 mm].

$e_{\text{chapa metálica}}$: espesor de la chapa metálica [2 mm].

$$r_e = 185 + 114 + 25 + 2$$

$$r_e = 326 \text{ mm}$$

$$D_e = 2r_e$$

$$D_e = 2(326)$$

$$D_e = 652 \text{ mm}$$

(10)

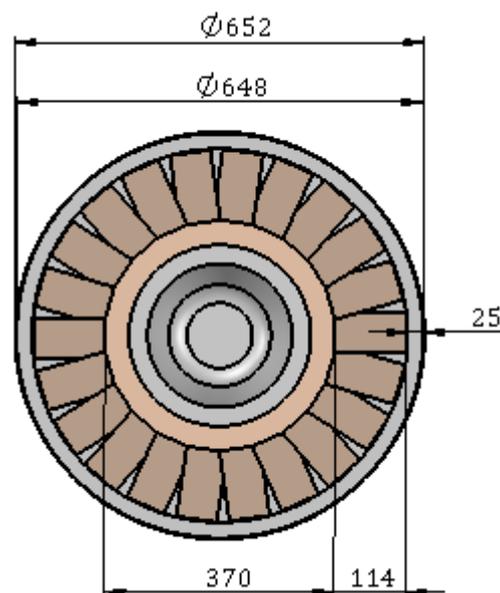


Figura 13-3: Diámetro exterior del cuerpo del horno

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.5.4.3. Altura del cuerpo del horno

La altura se determina tomando en consideración los siguientes parámetros:

$$H_C = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6 + h_7 + h_8 + h_9 \quad (11)$$

Donde:

H_C : altura del cuerpo del horno [mm].

h_1 : espesor de la chapa metálica en la base [2 mm].

h_2 : espesor de la manta fibra cerámica en la base [25 mm].

h_3 : espesor del ladrillo refractario en la base [65 mm].

h_4 : altura de la base de soporte del crisol [50 mm].

h_5 : altura del crisol [360 mm].

h_6 : Altura del cargador [130 mm].

h_7 : Espacio libre sugerido para la expansión en la parte superior del crisol [40 mm].

h_8 : Espesor de la manta fibra cerámica en la tapadera [25 mm].

h_9 : Espesor de la chapa metálica en la tapadera [2 mm].

$$H_C = 2 + 25 + 65 + 50 + 360 + 130 + 40 + 25 + 2$$

$$H_C = 699 \text{ mm}$$

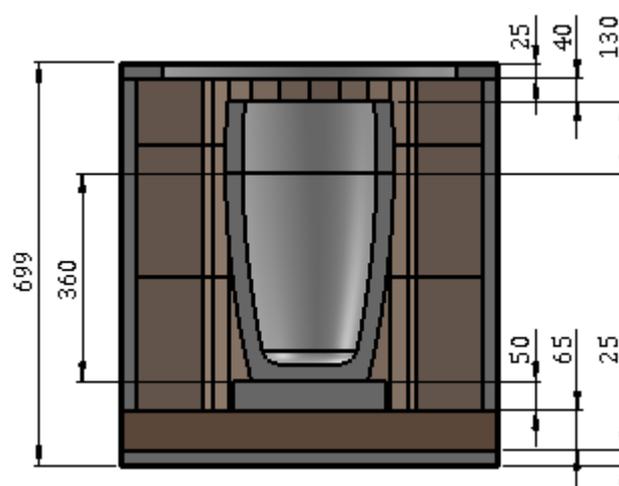


Figura 14-3: Altura del cuerpo del horno

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.5.4.4. Espesores de las paredes refractarias de la tapa

Para determinar los espesores se considera los siguientes parámetros:

$$H_t = h_{10} + h_{11} + h_{12} \quad (12)$$

Donde:

H_t : altura de la tapa [mm].

h_{10} : espesor del concreto refractario [25 mm].

h_{11} : espesor de la manta fibra cerámica [75 mm].

h_{12} : espesor de la chapa metálica [2 mm].

$$H_t = 25 + 75 + 2$$

$$H_t = 102 \text{ mm}$$

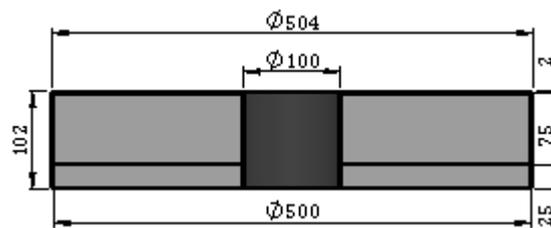


Figura 15-3: Espesores y diámetros de la tapa
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.6. Análisis térmico

Para el análisis térmico se partió asumiendo que la temperatura superficial en la chapa metálica estaría a 100 °C cuando el horno en su interior alcance la temperatura de vertido estipulada en 1100 °C, se consideró también una transferencia de calor en estado estacionario y un flujo de calor unidireccional en la dirección radial.

Según (Çengel y Ghajar, 2020, p.152), la razón de la transferencia de calor a través de las paredes del horno debe ser igual a la razón de la transferencia de calor hacia afuera de ellas; por lo tanto, el balance de calor se puede expresar como:

$$\dot{Q}_{ent} = \dot{Q}_{sal} \quad (13)$$

Sabiendo además que la transferencia de calor a través de las paredes se dará principalmente por conducción y que hacia afuera de ellas se tendrá transferencia de calor por convección y radiación de manera simultánea debido a la superficie expuesta al aire circundante se plantea la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{conducción} = \dot{Q}_{convección} + \dot{Q}_{radiación} \quad (14)$$

Si se establece que la transferencia de calor por convección y radiación se encuentran en paralelo se tiene.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv rad} \quad (15)$$

3.6.1. Pérdidas de calor a través de las paredes cilíndricas

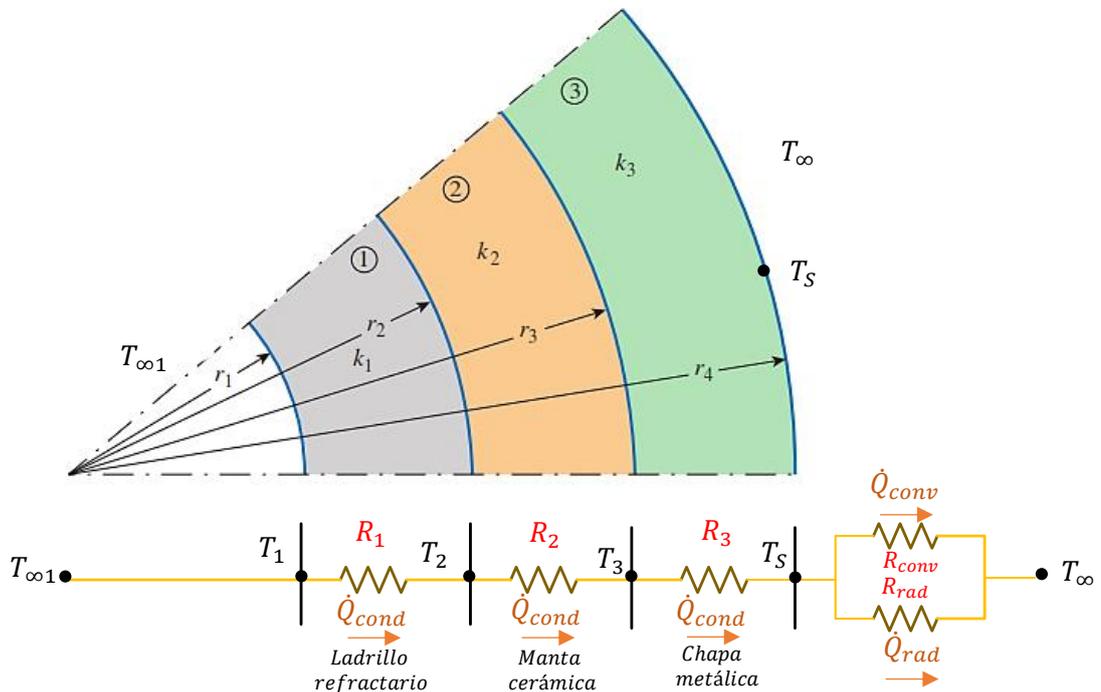


Figura 16-3: Transferencia de calor a través de un cilindro compuesto de tres capas
Fuente: (Çengel y Ghajar, 2020, p.172)

Simbología correspondiente a la Figura 16-3.

$T_{\infty 1}$: 1100 [°C] (temperatura dentro de la cámara de combustión).

T_1 : 1100 [°C] (temperatura en la pared interna de ladrillo refractario).

T_2 : temperatura entre la pared externa de ladrillo refractario y la pared interna de manta cerámica.

T_3 : temperatura entre la pared externa de manta cerámica y la pared interna de chapa metálica.

T_5 : 100 [°C] (temperatura asumida en la superficie de la chapa metálica (acero negro)).

T_∞ : 19 [°C] (temperatura ambiente de la ciudad de Riobamba).

r_1 : 185 [mm] (radio medido desde el centro de la cámara hasta la pared interior de ladrillos).

r_2 : 299 [mm] (radio medido desde el centro de la cámara hasta la pared interior de manta cerámica).

r_3 : 324 [mm] (radio medido desde el centro de la cámara hasta la pared interior de chapa metálica).

r_4 : 326 [mm] (radio medido desde el centro de la cámara hasta la pared superficial de la chapa metálica).

R_1 : resistencia térmica de la pared de ladrillo refractario $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_2 : resistencia térmica de la pared de manta cerámica $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_3 : resistencia térmica de la chapa metálica $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_{conv} : resistencia en el aire debido a la transferencia de calor por convección $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_{rad} : resistencia en el aire debido a la transferencia de calor por radiación $\left[\frac{K}{W}\right]$.

k_1 : 0,582 $\left[\frac{W}{m K}\right]$ (conductividad térmica del ladrillo refractario)

k_2 : 0,086 $\left[\frac{W}{m K}\right]$ (conductividad térmica de la manta cerámica)

k_3 : 58,7 $\left[\frac{W}{m K}\right]$ (conductividad térmica de la chapa metálica (acero negro)) (Cueva y Chiluisa, 2019, p.74).

3.6.1.1. Pérdidas de calor por conducción en las paredes cilíndricas

Aplicando el método de analogías eléctricas se procede a realizar el cálculo de la transferencia de calor por conducción en las paredes cilíndricas del horno.

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L k_1} \quad (16)$$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi L k_2} \quad (17)$$

$$R_3 = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi L k_3} \quad (18)$$

Donde:

R_i : resistencia térmica debido a cada pared.

L : altura del horno.

Resistencia térmica total de conducción.

$$R_{cond\ total} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (19)$$

Aplicando las ecuaciones, se determinó la resistencia térmica de cada una de las paredes cilíndricas del horno y la resistencia térmica total de conducción; los resultados se resumen en la Tabla 14-3.

Tabla 14-3: Resultado de las resistencias térmicas

Parámetro	Valor	Unidad
R_1	0,226	$\frac{K}{W}$
R_2	0,256	$\frac{K}{W}$
R_3	$2,877 \times 10^{-5}$	$\frac{K}{W}$
$R_{cond\ total}$	0,482	$\frac{K}{W}$

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Establecido el valor de la resistencia térmica total se puede determinar la pérdida de calor por conducción a través de las paredes hasta la superficie.

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_{\infty 1} - T_S}{R_{cond\ total}} \quad (20)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{1373 - 373}{0,482}$$

$$\dot{Q}_{cond} = 2072,104\ W$$

3.6.1.2. Pérdidas de calor por convección y radiación

- **Coefficiente de transferencia de calor por convección (h_{conv})**

La transferencia de calor por convección se determina conociendo el coeficiente de transferencia de calor por convección, parámetro que se determina experimentalmente. Para su cálculo se consideran los siguientes supuestos:

- Se supone una temperatura de 100 °C en la superficie de la chapa metálica.
- Aire exterior quieto a la temperatura ambiente de 19 °C.
- Se supone una presión externa igual a 1 atmósfera.

En primer lugar, se determina la temperatura de película entre la superficie de la chapa metálica y el aire circundante a temperatura ambiente.

$$T_f = \frac{1}{2}(T_s + T_\infty) \quad (21)$$

$$T_f = \frac{1}{2}(100 + 19)$$

$$T_f = 59,5 \text{ °C}$$

Mediante un proceso de interpolación se puede establecer las propiedades del aire (ANEXO C) a la temperatura de película calculada como se muestra en la Tabla 15-3.

Tabla 15-3: Propiedades del aire a la presión de 1 atmósfera

Temperatura		Conductividad Térmica (K) $\frac{W}{mK}$	Difusividad Térmica (α) $\frac{m^2}{s^2}$	Viscosidad Cinemática (ν) $\frac{m^2}{s}$	Número de Prandtl (Pr)
°C	K				
59,5	332,5	0,028044	$2,624 \times 10^{-5}$	$1,891 \times 10^{-5}$	0,72033

Fuente: Çengel y Ghajar, 2020, p.964)

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Si suponemos que el horno es un cilindro vertical de 580 mm de altura que puede tratarse como una placa vertical podemos determinar el número de Grashof.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (22)$$

Donde:

Gr_L : número de Grashof [Adimensional].

g : $9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ (aceleración gravitacional).

β : coeficiente de expansión volumétrica $\left[\frac{1}{K} \right]$.

L_C : $0,58 [m]$ (longitud característica de la configuración geométrica).

ν : $1,891 \times 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ (viscosidad cinemática del fluido).

$$Gr_L = \frac{9,81 \left(\frac{1}{332,5} \right) (373 - 292) (0,58)^3}{(1,891 \times 10^{-5})^2}$$

$$Gr_L = 1,304 \times 10^9$$

Como $Gr_L > 1 \times 10^9$ se establece que se tiene un flujo turbulento sobre la placa vertical.

Comprobamos si el cilindro puede analizarse como una placa plana vertical.

$$D \geq \frac{35 L}{Gr_L^{1/4}} \quad (23)$$

$$D \geq \frac{35 (0,58)}{(1,304 \times 10^9)^{1/4}}$$

$$D \geq 0,107 \text{ m}$$

Se tiene que $D = 0,652 \text{ m}$ por lo tanto se cumple que $0,652 \geq 0,107$ así que es válida la suposición de analizar el cilindro vertical como una placa plana vertical. En consecuencia, se procede a calcular el número de Rayleigh.

$$Ra_L = Gr_L * Pr \quad (24)$$

Donde:

Ra_L : número de Rayleigh [Adimensional].

Pr : número de Prandtl [Adimensional].

$$Ra_L = 1,304 \times 10^9 (0,72033)$$

$$Ra_L = 9,39 \times 10^8$$

Cálculo del número promedio de Nusselt para una placa plana vertical.

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (25)$$

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 (9,39 \times 10^8)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{0,72033} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 120,75$$

El número promedio de Nusselt se puede expresar como:

$$Nu = \frac{h_{conv} L_C}{K} \quad (26)$$

Despejando se obtiene el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$h_{conv} = \frac{K Nu}{L_C} \quad (27)$$

Donde:

h_{conv} : coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$.

K : $0,028044 \left[\frac{W}{m K} \right]$ (conductividad térmica del aire).

$$h_{conv} = \frac{0,028044 (120,75)}{0,58}$$

$$h_{conv} = 5,84 \frac{W}{m^2 K}$$

Con el valor del coeficiente h_{conv} se puede determinar la resistencia por convección debido a la superficie expuesta al aire circundante.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} A_S} \quad (28)$$

Donde:

R_{conv} : resistencia por convección $\left[\frac{K}{W}\right]$.

A_S : área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección $[m^2]$.

$$R_{conv} = \frac{1}{5,84 (\pi * 0,652 * 0,58)}$$

$$R_{conv} = 0,144 \frac{K}{W}$$

- **Coefficiente de transferencia de calor por radiación (h_{rad})**

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_S^2 + T_{atred}^2) (T_S + T_{atred}) \quad (29)$$

Donde:

h_{rad} : coeficiente de transferencia de calor por radiación $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$.

ε : 0,52 (emisividad de la superficie externa del acero negro) (Cueva y Chiluisa, 2019, p.74).

σ : $5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$ (constante de Stefan-Boltzmann) (Çengel y Ghajar, 2020, p.27).

T_S : 373 [K] (temperatura asumida en la superficie de la chapa metálica).

T_{atred} : 292 [K] (temperatura ambiente de la ciudad de Riobamba).

$$h_{rad} = 0,52 (5,67 \times 10^{-8}) (373^2 + 292^2) (373 + 292)$$

$$h_{rad} = 4,40 \frac{W}{m^2 K}$$

Con el valor del coeficiente h_{rad} se puede determinar la resistencia por radiación debido a la superficie expuesta al aire circundante.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_S} \quad (30)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{4,40 (\pi * 0,652 * 0,58 m)}$$

$$R_{rad} = 0,191 \frac{K}{W}$$

Sabiendo que R_{conv} y R_{rad} están en paralelo es necesario primeramente establecer una resistencia equivalente para en lo posterior proceder a encontrar el calor total perdido por convección y radiación.

$$R_{equivalente} = \frac{R_{conv} * R_{rad}}{R_{conv} + R_{rad}} \quad (31)$$

$$R_{equivalente} = \frac{0,144 * 0,191}{0,144 + 0,191}$$

$$R_{equivalente} = 0,082 \frac{K}{W}$$

Calor total perdido por convección y radiación.

$$\dot{Q}_{conv rad} = \frac{T_S - T_\infty}{R_{equivalente}} \quad (32)$$

$$\dot{Q}_{conv rad} = \frac{(373 - 292)}{0,082}$$

$$\dot{Q}_{conv rad} = 985,206 W$$

Para alcanzar el estado estacionario y encontrar el equilibrio térmico debe cumplirse lo siguiente:

$$\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad} = 0 \quad (33)$$

Una vez que se ha obtenido las pérdidas totales de calor por conducción a través de las paredes y las pérdidas totales de calor por convección y radiación hacia afuera de ellas se procede a comprobar si se cumple con lo mencionado.

$$2072,104 W - 985,206 W = 0$$

$$1086,898 W \neq 0$$

Como no se cumple lo anterior, se debe establecer una nueva temperatura en la superficie de la chapa metálica T'_S que sustituya a la temperatura T_S que asumimos inicialmente, para lo cual se lleva a cabo el siguiente procedimiento.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv rad} \quad (34)$$

$$\frac{T_{\infty 1} - T'_S}{R_{cond total}} = \frac{T'_S - T_{\infty}}{R_{equivalente}} \quad (35)$$

Despejando T'_S de la igualdad se tiene:

$$T'_S = \frac{T_{\infty} R_{cond total} + T_{\infty 1} R_{equivalente}}{R_{equivalente} + R_{cond total}} \quad (36)$$

$$T'_S = 449,353 \text{ K}$$

Con esta nueva temperatura superficial se debe obligatoriamente volver a realizar todo el proceso hasta que $\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad}$ sea cero o se aproxime.

Realizando iteraciones se determina la temperatura superficial a la que se encontrará la chapa metálica de las paredes cilíndricas cuando el horno alcance la temperatura de vertido. En la Tabla 16-3 se muestran los resultados de las iteraciones realizadas solo para el caso de la configuración seleccionada para la construcción.

Tabla 16-3: Iteraciones para hallar la temperatura teórica en la superficie del cuerpo

Iteración	T_S (K)	\dot{Q}_{cond} (W)	$\dot{Q}_{conv rad}$ (W)	$\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad}$	T'_S (°C)
1	373,000	2072,104	985,206	1086,898	176,353
2	449,353	1913,893	2432,996	519,103	146,748
3	419,748	1975,237	1814,047	161,190	156,654
4	429,654	1954,711	2012,553	57,842	153,189
5	426,189	1961,891	1942,147	19,744	154,382
6	427,382	1959,419	1966,269	6,850	153,969
7	426,969	1960,275	1957,904	2,370	154,112
8	427,112	1959,978	1960,799	0,821	154,063
9	427,063	1960,080	1959,807	0,273	154,079
10	427,079	1960,047	1960,131	0,084	154,074
11	427,074	1960,057	1960,029	0,027	154,076
12	427,076	1960,053	1960,070	0,017	154,075

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

La Tabla 17-3 muestra distintas configuraciones de espesores de paredes refractarias para construir el cuerpo del horno y las temperaturas teóricas que se esperan obtener en la superficie de cada pared con el fin de poder encontrar el mejor equilibrio entre el aislamiento conseguido y su costo.

Tabla 17-3: Configuraciones de espesores para paredes cilíndricas

Esesor ladrillo refractario (mm)	Esesor manta cerámica (mm)	Esesor chapa metálica (mm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_5 (°C)	Pérdidas de calor (W)	Estimación de costo
100,00	13,00	2,00	1100,00	566,76	194,27	194,19	2617,21	BAJO
114,00	25,00	2,00	1100,00	656,33	154,13	154,07	1960,05	MEDIO
124,00	51,00	3,00	1100,00	773,00	114,00	113,94	1351,99	ALTO

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

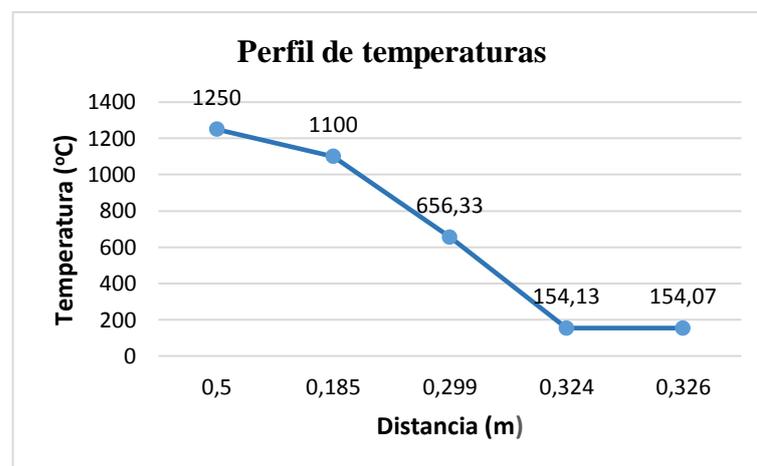


Gráfico 1-3: Perfil de temperaturas en las paredes cilíndricas del horno

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En la Tabla 17-3 se observa que a medida que el espesor de las paredes refractarias aumenta, las pérdidas de calor se reducen y el costo del recubrimiento aumenta, por lo que debe evitarse elevarlo innecesariamente si se quiere tener ahorros significativos. Tomando en cuenta esta observación se establece que es aceptable seleccionar los espesores de la opción dos para construir el cuerpo cilíndrico del horno.

Esesor de ladrillo refractario: 114 mm

Esesor de manta cerámica: 25 mm

Esesor de chapa metálica: 2 mm

3.6.2. Pérdidas de calor a través de la base

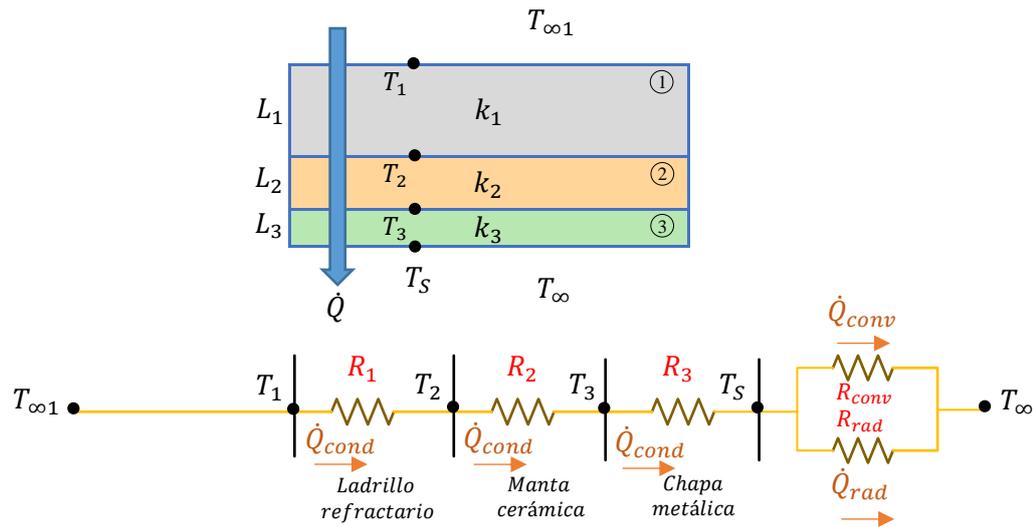


Figura 17-3: Transferencia de calor a través de una pared plana compuesta de tres capas
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Simbología correspondiente a la Figura 17-3.

$T_{\infty 1}$: 1100 [°C] (temperatura dentro de la cámara de combustión).

T_1 : 1100 [°C] (temperatura en la pared interna de ladrillo refractario).

T_2 : temperatura entre la pared externa de ladrillo refractario y la pared interna de manta cerámica.

T_3 : temperatura entre la pared externa de manta cerámica y la pared interna de chapa metálica.

T_S : 100 [°C] (temperatura asumida en la superficie de la chapa metálica (acero negro)).

T_{∞} : 19 [°C] (temperatura ambiente de la ciudad de Riobamba).

L_1 : 0,065 [m] (espesor de la pared compuesta de ladrillo refractario).

L_2 : 0,025 [m] (espesor de la pared compuesta de manta cerámica).

L_3 : 0,002 [m] (espesor de la de chapa metálica).

R_1 : resistencia térmica de la pared de ladrillo refractario $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_2 : resistencia térmica de la pared de manta cerámica $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_3 : resistencia térmica de la chapa metálica $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_{conv} : resistencia en el aire debido a la transferencia de calor por convección $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_{rad} : resistencia en el aire debido a la transferencia de calor por radiación $\left[\frac{K}{W}\right]$.

k_1 : 0,582 $\left[\frac{W}{m K}\right]$ (conductividad térmica del ladrillo refractario).

$k_2: 0,086 \left[\frac{W}{m K} \right]$ (conductividad térmica de la manta cerámica).

$k_3: 58,7 \left[\frac{W}{m K} \right]$ (conductividad térmica de la chapa metálica (acero negro)) (Cueva y Chiluisa, 2019, p.74).

3.6.2.1. Pérdidas de calor por conducción en la base

$$R_1 = \frac{L_1}{k_1 A} \quad (37)$$

$$R_2 = \frac{L_2}{k_2 A} \quad (38)$$

$$R_3 = \frac{L_3}{k_3 A} \quad (39)$$

Donde:

R_i : resistencia térmica debido a cada pared.

A : área de la pared.

Resistencia térmica total de conducción.

$$R_{cond total} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (40)$$

Aplicando las ecuaciones, se determina la resistencia térmica de cada una de las paredes de la base del horno y la resistencia térmica total de conducción; los resultados se resumen en la Tabla 18-3.

Tabla 18-3: Resultado de las resistencias térmicas

Parámetro	Valor	Unidad
R_1	1,039	$\frac{K}{W}$
R_2	2,704	$\frac{K}{W}$
R_3	$3,169 \times 10^{-4}$	$\frac{K}{W}$
$R_{cond total}$	3,743	$\frac{K}{W}$

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Establecido el valor de la resistencia térmica total se puede determinar la pérdida de calor por conducción a través de la base hasta la superficie.

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_{\infty 1} - T_S}{R_{cond\ total}} \quad (41)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{1373 - 373}{3,743}$$

$$\dot{Q}_{cond} = 267,189 \text{ W}$$

3.6.2.2. Pérdidas de calor por convección y radiación en la base

- **Coefficiente de transferencia de calor por convección (h_{conv})**

Temperatura de película entre la superficie de la chapa metálica y el aire circundante a temperatura ambiente.

$$T_f = \frac{1}{2} (T_S + T_{\infty}) \quad (42)$$

$$T_f = \frac{1}{2} (100 + 19) \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_f = 59,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En la Tabla 15-3 se observa las propiedades del aire a la presión de 1 atmósfera para la temperatura de película calculada.

Longitud característica de la configuración geométrica caliente.

$$L_C = \frac{A_S}{P} \quad (43)$$

Donde:

L_C : longitud característica de la configuración geométrica caliente [m].

A_S : área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección [m²].

P : perímetro [m].

$$L_c = \frac{\frac{\pi}{4}(0,37 \text{ m})^2}{\pi(0,37 \text{ m})}$$

$$L_c = 0,0925 \text{ m}$$

Con la longitud característica se puede determinar el número de Rayleigh.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad (44)$$

Donde:

Ra_L : número de Rayleigh [Adimensional].

g : $9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ (aceleración gravitacional).

β : coeficiente de expansión volumétrica $\left[\frac{1}{K} \right]$.

ν : $1,891 \times 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ (viscosidad cinemática del fluido).

α : $2,624 \times 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$ (difusividad térmica del fluido).

$$Ra_L = \frac{9,81 \left(\frac{1}{332,5} \right) (373 - 292) (0,0925)^3}{1,891 \times 10^{-5} (2,624 \times 10^{-5})}$$

$$Ra_L = 3,81 \times 10^6$$

El valor calculado de Rayleigh se encuentra en el intervalo $1 \times 10^4 < 3,81 \times 10^6 < 1 \times 10^7$; por lo tanto, para determinar el número promedio de Nusselt en placas planas horizontales con su superficie superior caliente, se emplea la siguiente ecuación que comprende el intervalo mencionado.

$$Nu = 0,54 Ra_L^{1/4} \quad (45)$$

$$Nu = 0,54 (3,81 \times 10^6)^{1/4}$$

$$Nu = 23,86$$

El número promedio de Nusselt se puede expresar como:

$$Nu = \frac{h_{conv} L_c}{K} \quad (46)$$

Despejando se obtiene el coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$h_{conv} = \frac{K Nu}{L_C} \quad (47)$$

Donde:

h_{conv} : coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$.

K : 0,028044 $\left[\frac{W}{m K}\right]$ (conductividad térmica del aire).

$$h_{conv} = \frac{0,028044 (23,86)}{0,0925}$$

$$h_{conv} = 7,23 \frac{W}{m^2 K}$$

Con el valor del coeficiente h_{conv} se puede determinar la resistencia por convección debido a la superficie expuesta al aire circundante.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} A_S} \quad (48)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{7,23 \left[\frac{\pi}{4} (0,37)^2\right]}$$

$$R_{conv} = 1,29 \frac{K}{W}$$

- **Coeficiente de transferencia de calor por radiación (h_{rad})**

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_S^2 + T_{alred}^2) (T_S + T_{alred}) \quad (49)$$

Donde:

h_{rad} : coeficiente de transferencia de calor por radiación $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$.

ε : 0,52 (emisividad de la superficie externa del acero negro) (Cueva y Chiluisa, 2019, p.74).

σ : $5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$ (constante de Stefan-Boltzmann) (Çengel y Ghajar, 2020, p.27).

T_S : 373 [K] (temperatura asumida en la superficie de la chapa metálica).

T_{alred} : 292 [K] (temperatura ambiente de la ciudad de Riobamba).

$$h_{rad} = 0,52 (5,67 \times 10^{-8})(373^2 + 292^2)(373 + 292)$$

$$h_{rad} = 4,40 \frac{W}{m^2 K}$$

Con el valor del coeficiente h_{rad} se puede determinar la resistencia por radiación debido a la superficie expuesta al aire circundante.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_S} \quad (50)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{4,40 \left[\frac{\pi}{4} (0,37)^2 \right]}$$

$$R_{rad} = 2,11 \frac{K}{W}$$

Sabiendo que R_{conv} y R_{rad} se encuentran en paralelo es necesario establecer una resistencia equivalente para en lo posterior proceder a encontrar el calor total perdido por convección y radiación.

$$R_{equivalente} = \frac{R_{conv} * R_{rad}}{R_{conv} + R_{rad}} \quad (51)$$

$$R_{equivalente} = \frac{1,29 * 2,11}{1,29 + 2,11}$$

$$R_{equivalente} = 0,80 \frac{K}{W}$$

Calor total perdido por convección y radiación.

$$\dot{Q}_{conv rad} = \frac{T_S - T_{\infty}}{R_{equivalente}} \quad (52)$$

$$\dot{Q}_{conv rad} = \frac{(373 - 292)}{0,80}$$

$$\dot{Q}_{conv rad} = 101,312 W$$

Para alcanzar el estado estacionario y encontrar el equilibrio térmico debe cumplirse lo siguiente:

$$\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad} = 0 \quad (53)$$

Una vez que se ha obtenido las pérdidas totales de calor por conducción a través de las paredes de la base y las pérdidas totales de calor por convección y radiación hacia afuera de ellas se procede a comprobar si se cumple con lo mencionado.

$$\begin{aligned} 267,189 \text{ W} - 101,313 \text{ W} &= 0 \\ 165,876 \text{ W} &\neq 0 \end{aligned}$$

Como no se cumple lo anterior, se debe establecer una nueva temperatura en la superficie de la base T'_S que sustituya a la temperatura T_S que asumimos inicialmente, para lo cual se lleva a cabo el siguiente procedimiento.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv rad} \quad (54)$$

$$\frac{T_{\infty 1} - T'_S}{R_{cond total}} = \frac{T'_S - T_{\infty}}{R_{equivalente}} \quad (55)$$

Despejando T'_S de la igualdad se tiene:

$$T'_S = \frac{T_{\infty} R_{cond total} + T_{\infty 1} R_{equivalente}}{R_{equivalente} + R_{cond total}} \quad (56)$$

$$T'_S = \frac{292(3,743) + 1373(0,80)}{0,80 + 3,743}$$

$$T'_S = 482,275 \text{ K}$$

Con esta nueva temperatura superficial se debe obligatoriamente volver a realizar todo el proceso hasta que $\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad}$ sea cero o se aproxime.

Mediante el mismo proceso iterativo efectuado en las paredes cilíndricas, se determina la temperatura superficial a la que se encontrará la chapa metálica de la base cuando el horno alcance la temperatura de vertido. La Tabla 19-3 muestra los resultados de las iteraciones realizadas solo para el caso de la configuración seleccionada para la construcción.

Tabla 19-3: Iteraciones para hallar la temperatura teórica en la superficie de la base

Iteración	T_s (K)	\dot{Q}_{cond} (W)	$\dot{Q}_{conv rad}$ (W)	$\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad}$	T'_s (°C)
1	373,000	267,189	101,313	165,876	209,275
2	482,275	237,992	323,872	85,880	165,666
3	438,666	249,644	223,157	26,487	180,474
4	453,474	245,687	255,475	9,788	175,181
5	448,181	247,101	243,700	3,401	177,042
6	450,042	246,604	247,812	1,207	176,384
7	449,384	246,780	246,354	0,425	176,616
8	449,616	246,718	246,868	0,150	176,534
9	449,534	246,740	246,686	0,054	176,563
10	449,563	246,732	246,750	0,018	176,553
11	449,553	246,735	246,728	0,006	176,557

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

La Tabla 20-3 muestra distintas configuraciones de espesores de paredes refractarias para construir la base del horno y las temperaturas teóricas que se esperan obtener en la superficie de cada pared con el fin de encontrar nuevamente el mejor equilibrio entre el aislamiento conseguido y su costo.

Tabla 20-3: Configuraciones de espesores para la base

Espesor ladrillo refractario (mm)	Espesor manta cerámica (mm)	Espesor chapa metálica (mm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_s (°C)	Pérdidas de calor (W)	Estimación de costo
60,00	13,00	2,00	1100,00	745,97	226,87	226,74	369,24	BAJO
65,00	25,00	2,00	1100,00	843,71	176,63	176,56	246,73	MEDIO
100,00	51,00	3,00	1100,00	880,20	121,56	121,50	137,55	ALTO

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

De la Tabla 20-3 se establece que es aceptable seleccionar los espesores de la opción dos para construir la base del horno.

3.6.3. Pérdidas de calor a través de la tapa del horno

Para determinar la pérdida de calor por conducción en la tapa del horno es necesario conocer el supuesto recorrido que seguirán los gases de combustión al abandonar el horno como se muestra en la Figura 18-3, a partir de la cual se conocerá el área efectiva de transferencia de calor de la tapa que será la que esté directamente en contacto con los gases de combustión. El área restante de la tapa que no se encuentre en contacto con los gases se supondrá aislada para los cálculos.

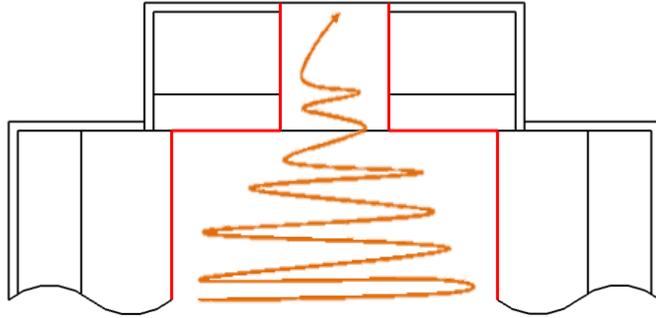


Figura 18-3: Recorrido de los gases de combustión al abandonar el horno
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En la Figura 18-3 podemos observar un caso de transferencia de calor unidireccional a través de una pared plana circular.

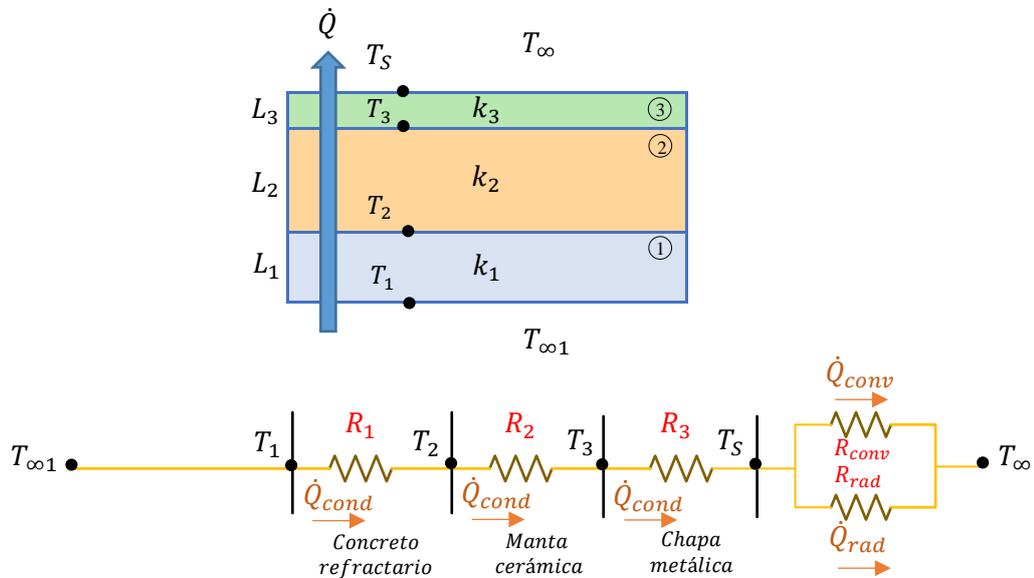


Figura 19-3: Transferencia de calor a través de una pared plana compuesta de tres capas
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Simbología correspondiente a la Figura 19-3.

$T_{\infty 1}$: 1100 [°C] (temperatura dentro de la cámara de combustión).

T_1 : 1100 [°C] (temperatura en la pared interna de concreto refractario).

T_2 : Temperatura entre la pared externa de concreto refractario y la pared interna de manta cerámica.

T_3 : temperatura entre la pared externa de manta cerámica y la pared interna de chapa metálica.

T_5 : 100 [°C] (temperatura asumida en la superficie de la chapa metálica (acero negro)).

T_{∞} : 19 [°C] (temperatura ambiente de la ciudad de Riobamba).

L_1 : 0,025 [m] (espesor de la pared compuesta de concreto refractario).

L_2 : 0,075 [m] (espesor de la pared compuesta de manta cerámica).

L_3 : 0,002 [m] (espesor de la de chapa metálica).

R_1 : resistencia térmica de la pared de concreto refractario $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_2 : resistencia térmica de la pared de manta cerámica $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_3 : resistencia térmica de la chapa metálica $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_{conv} : resistencia en el aire debido a la transferencia de calor por convección $\left[\frac{K}{W}\right]$.

R_{rad} : resistencia en el aire debido a la transferencia de calor por radiación $\left[\frac{K}{W}\right]$.

k_1 : 0,635 $\left[\frac{W}{m K}\right]$ (conductividad térmica del concreto refractario) (ANEXO B).

k_2 : 0,086 $\left[\frac{W}{m K}\right]$ (conductividad térmica de la manta cerámica).

k_3 : 58,7 $\left[\frac{W}{m K}\right]$ (conductividad térmica de la chapa metálica (acero negro)) (Cueva y Chiluisa, 2019, p.74).

Como se muestra en la Figura 18-3, el área efectiva de transferencia de calor en la tapa está formada por una corona circular compuesta de tres capas de revestimiento. A continuación, se determina esta área y su perímetro.

$$A_{corona} = \pi (R^2 - r^2) \quad (57)$$

Donde:

A_{corona} : área efectiva de transferencia de calor $[m^2]$.

R : 0,185 [m] (radio mayor).

r : 0,05 [m] (radio menor).

$$A_{corona} = \pi (0,185^2 - 0,05^2)m^2$$

$$A_{corona} = 0,0997 m^2$$

Perímetro de la corona circular.

$$P_{corona} = 2 \pi (R + r) \quad (58)$$

$$P_{corona} = 2 \pi (0,185 \text{ m} - 0,05 \text{ m})$$

$$P_{corona} = 1,477 \text{ m}$$

3.6.3.1. Pérdidas de calor por conducción

$$R_1 = \frac{L_1}{k_1 A_{corona}} \quad (59)$$

$$R_2 = \frac{L_2}{k_2 A_{corona}} \quad (60)$$

$$R_3 = \frac{L_3}{k_3 A_{corona}} \quad (61)$$

Resistencia térmica total de conducción.

$$R_{cond \text{ total}} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (62)$$

Aplicando las ecuaciones, se determinó la resistencia térmica de cada una de las paredes de la tapa del horno y la resistencia térmica total de conducción; los resultados se resumen en la Tabla 21-3.

Tabla 21-3: Resultado de las resistencias térmicas

Parámetro	Valor	Unidad
R_1	0,395	$\frac{K}{W}$
R_2	8,750	$\frac{K}{W}$
R_3	$3,418 \times 10^{-4}$	$\frac{K}{W}$
$R_{cond \text{ total}}$	9,145	$\frac{K}{W}$

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Establecido el valor de la resistencia térmica total se puede determinar la pérdida de calor por conducción a través de la tapa hasta la superficie.

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_{\infty 1} - T_s}{R_{cond \text{ total}}} \quad (63)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{1373 - 373}{9,145}$$

$$\dot{Q}_{cond} = 109,344 \text{ W}$$

3.6.3.2. Pérdidas de calor por convección y radiación en la tapa

- **Coefficiente de transferencia de calor por convección (h_{conv})**

Temperatura de película entre la superficie de la chapa metálica de la tapa y el aire circundante a temperatura ambiente.

$$T_f = \frac{1}{2} (T_s + T_\infty) \quad (64)$$
$$T_f = \frac{1}{2} (100 + 19) \text{ }^\circ\text{C}$$
$$T_f = 59,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

En la Tabla 15-3 se observan las propiedades del aire a la presión de 1 atmósfera para la temperatura de película calculada.

Longitud característica de la configuración geométrica caliente.

$$L_c = \frac{A_s}{P} \quad (65)$$

Donde:

L_c : longitud característica de la configuración geométrica caliente [m].

A_s : área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección [m²].

P : perímetro [m].

$$L_c = \frac{0,0997}{1,477}$$
$$L_c = 0,0675 \text{ m}$$

Con el valor de la longitud característica se puede determinar el número de Rayleigh.

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu\alpha} \quad (66)$$

Donde:

Ra_L : número de Rayleigh [Adimensional].

g : $9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ (aceleración gravitacional).

β : coeficiente de expansión volumétrica $\left[\frac{1}{K} \right]$.

ν : $1,891 \times 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ (viscosidad cinemática del fluido).

α : $2,624 \times 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s^2} \right]$ (difusividad térmica del fluido).

$$Ra_L = \frac{9,81 \left(\frac{1}{332,5} \right) (373 - 292) (0,0675)^3}{1,891 \times 10^{-5} (2,624 \times 10^{-5})}$$

$$Ra_L = 1,481 \times 10^6$$

Como se cumple que el valor calculado de Rayleigh se encuentra en el intervalo de 1×10^4 a 1×10^7 ; para determinar el número promedio de Nusselt en placas planas horizontales con su superficie superior caliente, se emplea la siguiente ecuación que comprende el intervalo mencionado.

$$Nu = 0,54 Ra_L^{1/4} \quad (67)$$

$$Nu = 0,54 (1,481 \times 10^6)^{1/4}$$

$$Nu = 18,84$$

El número promedio de Nusselt se puede expresar como:

$$Nu = \frac{h_{conv} L_C}{K} \quad (68)$$

Despejando se obtiene el coeficiente de transferencia de calor por convección en la tapa.

$$h_{conv} = \frac{K Nu}{L_C} \quad (69)$$

Donde:

h_{conv} : coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$.

K : $0,028044 \left[\frac{W}{m K} \right]$ (conductividad térmica del aire).

$$h_{conv} = \frac{0,028044 (18,84)}{0,0675}$$

$$h_{conv} = 7,826 \frac{W}{m^2 K}$$

Con el valor del coeficiente h_{conv} se puede determinar la resistencia por convección debido a la superficie expuesta al aire circundante.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} A_S} \quad (70)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{7,826 (0,0997)}$$

$$R_{conv} = 1,282 \frac{K}{W}$$

- **Coficiente de transferencia de calor por radiación (h_{rad})**

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_S^2 + T_{alred}^2) (T_S + T_{alred}) \quad (71)$$

Donde:

h_{rad} : coeficiente de transferencia de calor por radiación $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$.

ε : 0,52 (emisividad de la superficie externa del acero negro) (Cueva y Chiluisa, 2019, p.74).

σ : $5,67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$ (constante de Stefan-Boltzmann) (Çengel y Ghajar, 2020, p.27).

T_S : 373 [K] (temperatura asumida en la superficie de la chapa metálica).

T_{alred} : 292 [K] (temperatura ambiente de la ciudad de Riobamba).

$$h_{rad} = 0,52 (5,67 \times 10^{-8}) (373^2 + 292^2) (373 + 292)$$

$$h_{rad} = 4,40 \frac{W}{m^2 K}$$

Con el valor del coeficiente h_{rad} se puede determinar la resistencia por radiación debido a la superficie expuesta al aire circundante.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_S} \quad (72)$$

$$R_{rad} = \frac{1}{4,40 (0,0997)}$$

$$R_{rad} = 2,28 \frac{K}{W}$$

Como se ha establecido que R_{conv} y R_{rad} se encuentran en paralelo es necesario establecer una resistencia equivalente para en lo posterior encontrar el calor total perdido por convección y radiación.

$$R_{equivalente} = \frac{R_{conv} * R_{rad}}{R_{conv} + R_{rad}} \quad (73)$$

$$R_{equivalente} = \frac{1,282 * 2,28}{1,282 + 2,28}$$

$$R_{equivalente} = 0,82 \frac{K}{W}$$

Calor total perdido por convección y radiación.

$$\dot{Q}_{conv rad} = \frac{T_S - T_{\infty}}{R_{equivalente}} \quad (74)$$

$$\dot{Q}_{conv rad} = \frac{(373 - 292)}{0,82}$$

$$\dot{Q}_{conv rad} = 98,698 W$$

Para alcanzar el estado estacionario y encontrar el equilibrio térmico debe cumplirse lo siguiente:

$$\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad} = 0 \quad (75)$$

Una vez que se ha obtenido las pérdidas totales de calor por conducción a través de las paredes de la tapa y las pérdidas totales de calor por convección y radiación hacia afuera de ellas se procede a comprobar si se cumple con lo mencionado.

$$109,344 W - 98,698 W = 0$$

$$10,646 W \neq 0$$

Como no se cumple lo anterior, se debe establecer una nueva temperatura en la superficie de la tapa T'_S que sustituya a la temperatura T_S que asumimos inicialmente, para lo cual se lleva a cabo el siguiente procedimiento.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv rad} \quad (76)$$

$$\frac{T_{\infty 1} - T'_S}{R_{cond total}} = \frac{T'_S - T_{\infty}}{R_{equivalente}} \quad (77)$$

Despejando T'_S de la igualdad se tiene:

$$T'_S = \frac{T_{\infty} R_{cond total} + T_{\infty 1} R_{equivalente}}{R_{equivalente} + R_{cond total}} \quad (78)$$

$$T'_S = \frac{292 \text{ K } (9,145) + 1373 \text{ K } (0,82)}{0,82 + 9,145}$$

$$T'_S = 381,018 \text{ K}$$

Con esta nueva temperatura superficial se debe obligatoriamente volver a realizar todo el proceso hasta que $\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad}$ sea cero o se aproxime.

Siguiendo el mismo proceso iterativo efectuado para las paredes cilíndricas y de la base, se determina la temperatura superficial a la que se encontrará la chapa metálica de la tapa cuando el horno alcance la temperatura de vertido. La Tabla 22-3 muestra los resultados de las iteraciones realizadas solo para el caso de la configuración seleccionada para la construcción.

Tabla 22-3: Iteraciones para hallar la temperatura teórica en la superficie de la tapa

Iteración	T_S (K)	\dot{Q}_{cond} (W)	$\dot{Q}_{conv rad}$ (W)	$\dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv rad}$	T'_S (°C)
1	373,000	109,344	98,698	10,646	108,018
2	381,018	108,468	111,421	2,954	105,848
3	378,848	108,705	107,932	0,773	106,419
4	379,419	108,642	108,847	0,205	106,268
5	379,268	108,659	108,605	0,054	106,308
6	379,308	108,655	108,669	0,014	106,297
7	379,297	108,656	108,651	0,004	106,300

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En la Tabla 23-3 se observan distintas configuraciones de espesores de paredes refractarias para construir la tapa del horno y las temperaturas teóricas que se esperan obtener en la superficie de cada pared.

Tabla 23-3: Configuraciones de espesores para la tapa

Esesor concreto refractario (mm)	Esesor manta cerámica (mm)	Esesor chapa metálica (mm)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_5 (°C)	Pérdidas de calor (W)	Estimación de costo
50,00	50,00	2,00	1100,00	984,17	128,89	128,839	146,618	BAJO
25,00	75,00	2,00	1100,00	1057,08	106,33	106,300	108,656	MEDIO
25,00	75,00	3,00	1100,00	1057,08	106,35	106,298	108,653	MEDIO
75,00	100,00	2,00	1100,00	1006,58	86,88	86,852	78,831	ALTO

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Con el fin de encontrar el mejor equilibrio entre el aislamiento conseguido y su costo, se establece que es aceptable seleccionar los espesores de la opción dos de la Tabla 23-3 para construir la tapa del horno.

Esesor de mortero refractario: 25 mm

Esesor de manta cerámica: 75 mm

Esesor de chapa metálica: 2 mm

3.6.3.3. Pérdidas de calor por radiación en la abertura de tapa

De acuerdo con Flores y Orellana (2014, p.88), si se presume que la abertura hacia el entorno representa un cuerpo negro, el cálculo de transferencia de calor hacia los alrededores, sería:

$$\dot{Q}_{rad\ abertura} = \varepsilon A_j F_{i \rightarrow j} \sigma (T_S^4 - T_{alred}^4) \quad (79)$$

Donde:

$\dot{Q}_{rad\ abertura}$: pérdida de calor por radiación en la abertura de la tapa [W].

A_j : Área de la abertura [m^2].

$F_{i \rightarrow j}$: 0,59 (Factor de radiación para aberturas) (Flores y Orellana, 2014, p.88).

$$\dot{Q}_{rad\ abertura} = 0,52 \left[\frac{\pi}{4} (0,1)^2 \right] (0,59) (5,67 \times 10^{-8}) (1373^4 - 292^4)$$

$$\dot{Q}_{rad\ abertura} = 484,53\ W$$

La abertura de la tapa del horno presenta la mayor pérdida de calor por radiación hacia el ambiente. En la Tabla 24-3 se presentan diferentes diámetros de aberturas y la pérdida de calor resultante de esa configuración.

Tabla 24-3: Configuraciones para la abertura de la tapa

Diámetro de la abertura (mm)	Área de la abertura (m ²)	Pérdidas de calor (W)
50,000	0,002	121,133
75,000	0,004	272,548
100,000	0,008	484,530
150,000	0,018	1090,194
200,000	0,031	1938,122

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

De la Tabla 24-3 se selecciona la configuración de la opción tres para la abertura de la tapa que es aceptable en cuanto a pérdida de calor.

3.7. Energía total que se debe suministrar para fundir el metal

A partir de la ley de conservación de la energía, se puede afirmar que el calor liberado por el combustible en un horno será igual a la suma del calor requerido para el proceso de calentamiento, más las pérdidas de calor que se generen en el horno (Mazón, 2009, p.60).

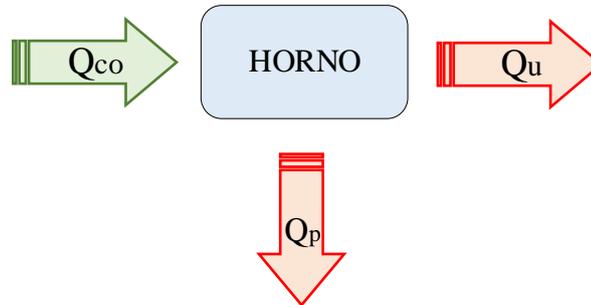


Figura 20-3: Balance de energía en un horno de fundición
Fuente: (Mazón, 2009, p.60)

$$Q_{CO} = Q_U + Q_P \quad (\text{Mazón, 2009, p.60}) \quad (80)$$

Donde:

Q_{CO} : calor liberado por el combustible $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$.

Q_U : calor útil para la fusión $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$.

Q_P : calor total perdido en el horno $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$.

3.7.1. Calor útil para el proceso de fundición

Para el cálculo del calor útil se va a establecer la siguiente ecuación:

$$Q_U = Q_{Carga\ metálica} + Q_{Absorbe\ crisol} \quad (81)$$

Donde:

$Q_{Carga\ metálica}$: calor que se entrega a la carga metálica $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$.

$Q_{Absorbe\ crisol}$: calor absorbido por el crisol $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$.

3.7.1.1. Calor que se entrega a la carga metálica

Para completar una operación de fundido, el metal debe calentarse a una temperatura algo superior a su punto de fusión; por lo tanto, la energía calorífica que se requiere será la suma del calor para elevar la temperatura al punto de fusión, el calor de fusión para convertirlo de sólido a líquido y el calor para llevar el metal fundido a la temperatura deseada para su vertido (Groover, 2020, p.188).

$$Q_{Carga\ metálica} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (82)$$

Calor necesario para elevar la temperatura desde los 19 °C hasta los 960 °C.

$$Q_1 = \frac{m Cp (Tf - To)}{t} \quad (83)$$

Donde:

m : 60 [kg] (masa de la carga).

Cp : 0,09 $\left[\frac{Kcal}{kg\ ^\circ C}\right]$ (calor específico del bronce).

Tf : 960 [°C] (temperatura de fusión del bronce).

To : 19 [°C] (temperatura ambiente).

t : 1,5 [h] (tiempo de fundición).

Calor necesario para promover un cambio de estado.

$$Q_2 = \frac{m h_{if}}{t} \quad (84)$$

Donde:

m : 60 [kg] (masa de la carga).

h_{if} : 57,36 $\left[\frac{Kcal}{kg}\right]$ (calor latente de fusión del bronce).

t : 1,5 [h] (tiempo de fundición).

Calor necesario para llegar a la temperatura de vertido

$$Q_3 = \frac{m C_p (T_f - T_o)}{t} \quad (85)$$

Donde:

m : 60 [kg] (masa de la carga).

C_p : 0,09 $\left[\frac{Kcal}{kg \text{ } ^\circ C}\right]$ (calor específico del bronce).

T_f : 1100 [°C] (temperatura de vertido del bronce).

T_o : 960 [°C] (temperatura de fusión del bronce).

t : 1,5 [h] (tiempo de fundición).

Con el cálculo de los calores Q_1 , Q_2 y Q_3 se puede determinar el calor que se entrega a la carga metálica. Los resultados se resumen en la Tabla 25-3.

Tabla 25-3: Resultado del cálculo de los calores

Parámetro	Valor	Unidad
Q_1	3387,6	$\frac{Kcal}{h}$
Q_2	2294,4	$\frac{Kcal}{h}$
Q_3	504,0	$\frac{Kcal}{h}$
$Q_{Carga\ metálica}$	6186,0	$\frac{Kcal}{h}$

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.7.1.2. Calor absorbido por el crisol

Un parámetro significativo que se debe considerar para determinar el calor útil es la energía calorífica que se requiere para elevar el crisol de una temperatura ambiente a la temperatura de vertido del bronce. La energía que absorbe el crisol se establece mediante la siguiente expresión:

$$Q_{Absorbe\ crisol} = \frac{m_{crisol} C_{p_{crisol}} (T_f - T_o)}{t} \quad (86)$$

Donde:

m_{crisol} : 20 [kg] (masa del crisol).

$C_{p_{crisol}}$: 0,1699 $\left[\frac{Kcal}{kg\ K}\right]$ (calor específico del grafito) (ANEXO D).

T_f : 1373 [K] (temperatura aproximada a la que puede estar el crisol cuando el bronce fundido esté a temperatura de vertido).

T_o : 292 [K] (temperatura ambiente).

t : 1,5 [h] (tiempo de fundición).

$$Q_{Absorbe\ crisol} = \frac{20 (0,1699) (1373 - 292)}{1,5}$$
$$Q_{Absorbe\ crisol} = 2448,83 \frac{Kcal}{h}$$

Calculado el calor que se entrega a la carga metálica y el calor que es absorbido por el crisol, se puede establecer el calor útil necesario para el proceso de fundición del bronce.

$$Q_U = 6186 \frac{Kcal}{h} + 2448,83 \frac{Kcal}{h}$$
$$Q_U = 8634,83 \frac{Kcal}{h}$$

3.7.2. Calor total perdido en el horno

En la tabla a continuación se presentan los valores concernientes a las pérdidas de calor que existe a través de las paredes cilíndricas, base y tapa del horno.

Tabla 26-3: Pérdidas de calor en el horno

Parámetro	Valor	Unidad
$Q_{paredes}$	1960,053	W
Q_{base}	246,735	W
Q_{tapa}	108,656	W
$Q_{abertura}$	484,530	W
Q_P	2407,540	Kcal/h

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

La energía total requerida para el proceso de fundición del bronce sería la suma del calor útil y de las pérdidas totales del horno.

$$Q_{CO} = 8634,83 \frac{Kcal}{h} + 2407,54 \frac{Kcal}{h}$$

$$Q_{CO} = 11042,37 \frac{Kcal}{h}$$

3.8. Cálculo del rendimiento del horno

El rendimiento térmico del horno está en función del calor útil y del calor total requerido para el proceso de fundición, y se establece por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Q_U}{Q_{CO}} * 100 \quad (87)$$

Donde:

η : rendimiento del horno [%].

Q_U : 8634,83 $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$ (calor útil para la fusión).

Q_{CO} : 11042,37 $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$ (calor liberado por el combustible)

$$\eta = \frac{8634,83}{11042,37} * 100$$

$$\eta = 78,2 \%$$

3.9. Potencia

Para saber cuánto calor suministra un quemador es necesario conocer el flujo de combustible con el que se le alimenta, el cual debe ser lo suficiente para entregar calor a la carga metálica y hacer frente a las pérdidas de calor a través de las paredes del horno. Por consiguiente, el quemador debería ser capaz de proporcionar una potencia igual a:

$$P = \frac{Q_{CO}}{\eta} \quad (88)$$

Donde:

P : potencia del quemador $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$.

η : 78,2 [%] (rendimiento de horno).

$$P = \frac{11042,37}{0,782}$$
$$P = 14120,68 \frac{Kcal}{h}$$

Normalmente los proveedores requieren la potencia del quemador en KW o BTU/h.

$$P = 16,42 \text{ KW}$$
$$P = 56035,39 \frac{BTU}{h}$$

En el mercado los quemadores a gas de más baja potencia calorífica son los de 16,6 KW (14272,68 Kcal/h), por lo que se decide construir un quemador de dicha potencia.

3.10. Consumo de combustible

El consumo de combustible o gasto de combustible se calcula en base a los parámetros, potencia calorífica solicitada y poder calórico inferior del combustible en nuestro caso el GLP. Con estos parámetros se obtendrá la proporción de combustible en Kg/h que se requerirá.

$$\dot{m}_c = \frac{Q}{H_{ci}} \quad (\text{Mazón, 2009, p.81}) \quad (89)$$

Donde:

\dot{m}_c : gasto de combustible $\left[\frac{kg}{h}\right]$.

Q : 14272,68 $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$ (potencia calorífica).

H_{ci} : 11015,8 $\left[\frac{Kcal}{kg}\right]$ (poder calórico inferior del gas GLP) (Rojas et al., 2017, p.194).

$$\dot{m}_c = \frac{14272,68}{11015,8}$$

$$\dot{m}_c = 1,30 \frac{kg}{h}$$

El valor del consumo de combustible es un parámetro que ayuda a tener una idea de cuál va a ser la duración de un tanque de gas; es decir si se utilizará un tanque de GLP convencional de 15 kg este tendría una duración aproximada de 11 horas y 32 minutos.

El flujo de gas para la potencia calorífica solicitada será igual a:

$$\dot{V}_c = \dot{m}_c * \frac{1}{\rho_c} \text{ (Mazón, 2009, p.81)} \quad (90)$$

Donde:

\dot{V}_c : flujo de combustible $\left[\frac{m^3}{h}\right]$.

ρ_c : 2,1023 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ (densidad del combustible) (Rojas et al., 2017, p.194).

$$\dot{V}_c = 1,30 * \frac{1}{2,1023}$$

$$\dot{V}_c = 0,619 \frac{m^3}{h}$$

3.11. Relación aire-combustible

Un parámetro frecuentemente empleado para cuantificar las cantidades de combustible y de aire en un proceso particular de combustión es la relación aire-combustible, AC. Suele expresarse en una base de masa y se define como la relación entre la cantidad de aire utilizada por unidad de masa de combustible durante un proceso de combustión (Çengel et al., 2019, p.751).

$$AC = \frac{\text{moles de aire}}{\text{moles de combustible}} \left(\frac{M_{\text{aire}}}{M_{\text{combustible}}} \right) \quad (91)$$

o

$$AC = \overline{AC} \left(\frac{M_{\text{aire}}}{M_{\text{combustible}}} \right) \quad (92)$$

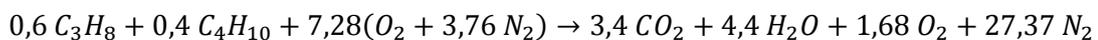
La cantidad mínima de aire necesaria para la combustión completa de un combustible se denomina aire estequiométrico o teórico; un proceso de combustión con cantidad de aire menor está sentenciado a ser incompleto. En un proceso de combustión real es habitual emplear más aire que la cantidad estequiométrica, con el fin de incrementar las oportunidades de combustión completa o para controlar la temperatura de la cámara de combustión. La cantidad de aire en exceso de la cantidad teórica se denomina exceso de aire (Çengel et al., 2019, p.752).

Para nuestro caso tomaremos un valor de exceso de aire del 30%, porque las condiciones ambientales de donde se instalará el horno así lo requieren. Según Rojas et al (2017, p.194), el GLP está compuesto por 40% de butano y 60% de propano.

La combustión estequiométrica o teórica del GLP es:



Con un exceso de aire del 30% es decir 130% la reacción es:



Cociente aire-combustible en base molar.

$$\overline{AC} = \frac{7,28 + 27,37}{0,6 + 0,4}$$

$$\overline{AC} = 34,65 \frac{Kmol(\text{aire})}{Kmol(\text{combustible})}$$

Relación aire-combustible en base másica.

$$AC = 34,65 \left(\frac{28,97}{0,6 * 44,09 + 0,4 * 58,12} \right)$$

$$AC = 20,19 \frac{Kg(aire)}{Kg(combustible)}$$

3.12. Cantidad de aire para la combustión

El flujo másico de aire será igual a:

$$\dot{m}_a = AC * \dot{m}_c \quad (\text{Mazón, 2009, p.82}) \quad (93)$$

Donde:

\dot{m}_a : gasto de aire $\left[\frac{kg}{h} \right]$.

\dot{m}_c : 1,30 $\left[\frac{kg}{h} \right]$ (gasto de combustible).

$$\dot{m}_a = 20,19 * 1,30$$

$$\dot{m}_a = 26,25 \frac{kg}{h}$$

Para establecer el volumen de aire necesario para una combustión completa se plantea la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_a = \dot{m}_a * \frac{1}{\rho_a} \quad (\text{Mazón, 2009, p.82}) \quad (94)$$

Donde:

\dot{V}_a : flujo de aire $\left[\frac{m^3}{h} \right]$.

ρ_a : 1,204 $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (densidad del aire) (ANEXO C).

$$\dot{V}_a = 26,25 * \frac{1}{1,204}$$

$$\dot{V}_a = 21,80 \frac{m^3}{h}$$

3.13. Cálculo del diámetro de la tubería de combustible

Una vez calculado el flujo másico de aire y combustible, es posible determinar el diámetro de la tubería para el GLP por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_T = \frac{\pi}{4} \rho V D^2 \quad (95)$$

Despejando resulta:

$$D = \sqrt{\frac{4 \dot{m}_T}{\pi \rho V}} \quad (96)$$

Donde:

D : diámetro mínimo de la tubería [mm].

\dot{m}_T : $7,65 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{s} \right]$ (flujo másico total a la entrada del quemador).

ρ : $1,204 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ (densidad del aire) (ANEXO C).

V : (velocidad mínima a la entrada del quemador) $\left[\frac{m}{s} \right]$.

Afirma Flores y Orellana (2014, p.99), que la velocidad de flujo dentro de tuberías debe sobrepasar por lo menos 7 veces la velocidad de la llama. Por esta razón, la velocidad mínima en la entrada del quemador debe ser de 36,58 m/s.

$$D = \sqrt{\frac{4 * 7,65 \times 10^{-3}}{\pi * 1,204 * 36,58}}$$

$$D = 14,87 \text{ mm}$$

El valor calculado es el diámetro mínimo de tubería a seleccionar. Dentro de las medidas de tubería comercial es aceptable escoger la de 1/2".

Dimensiones				Propiedades			
Diámetro D		Espesor e	Peso P	Área A	I	W	i
Nominal	Exterior						
Pulg	mm	mm	Kg/6m	cm	cm4	cm3	cm
1/2	21,35	2,00	0,99	1,22	0,57	0,59	0,98
3/4	26,90	2,30	1,45	1,78	1,34	1,09	0,87
1	33,70	2,50	1,96	2,45	2,98	1,91	1,10

Figura 21-3: Tubería galvanizada especificaciones generales
Fuente: (DIPAC)

3.14. Cálculo del diámetro del inyector

El diámetro del inyector se puede calcular empleando la siguiente ecuación:

$$Q = 0,01139 C_V D^2 \sqrt{\frac{Pr}{dr}} H_{cs} \quad (97)$$

Despejando se obtiene:

$$D = \sqrt{\frac{Q}{0,01139 * H_{cs} * C_V * \sqrt{\frac{Pr}{dr}}}} \quad (98)$$

Donde:

D : diámetro del inyector [mm].

Q : 14272,68 $\left[\frac{Kcal}{h}\right]$ (potencia calorífica).

C_V : 0,825 (coeficiente de descarga del inyector).

Pr : 280 [$mm. c. a$] (presión relativa del gas).

dr : 1,52 (densidad relativa del gas).

H_{cs} : 22472 $\left[\frac{Kcal}{m^3}\right]$ (poder calórico superior del gas).

$$D = \sqrt{\frac{14272,68}{0,01139 * 22472 * 0,825 * \sqrt{\frac{280}{1,52}}}}$$

$$D = 2,23 \text{ mm}$$

3.15. Diseño de la estructura de soporte

3.15.1. Análisis por flexión viga

La estructura es el elemento encargado de soportar las cargas estáticas presentes en el horno, estas son debido al peso de los componentes y al peso de la carga del material que se pretende fundir. Los valores se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 27-3: Peso a considerar en el diseño

Parámetro	Valor	Unidad
Carcasa del cuerpo	303,45	N
Aislante de la base	10,35	N
Base de ladrillos refractarios	551,81	N
Aislante del cuerpo del horno	35,33	N
Pared de ladrillos refractarios	1985,15	N
Aislante de la tapadera	4,12	N
Base de soporte del crisol	154,02	N
Crisol	217,59	N
Cargador de crisol	78,89	N
Mezcla refractaria de la tapa	193,26	N
Aislante de la tapa	17,66	N
Carcasa de la tapa	73,38	N
Material a fundir	588,60	N
TOTAL	4213,61	N

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

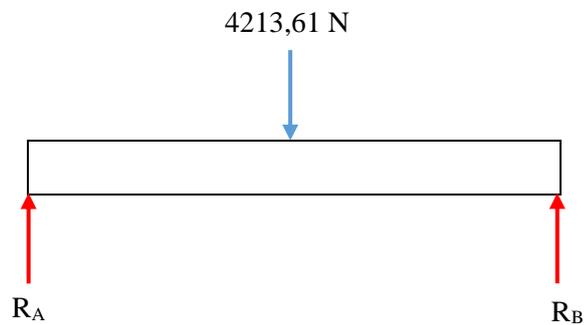


Figura 22-3: Diagrama de cuerpo libre del tubo cuadrado

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

$$\sum F_y = 0 \quad (99)$$

$$R_A + R_B - 4213,61 \text{ N} = 0$$

$$R_A + R_B = 4213,61 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0 \quad (100)$$

$$R_B(0,529 \text{ m}) - 4213,61 \text{ N}(0,264 \text{ m}) = 0$$

$$R_A = 2110,79 \text{ N}$$

$$R_B = 2102,82 \text{ N}$$

A continuación, se presentan los diagramas de cortante y momento flector.

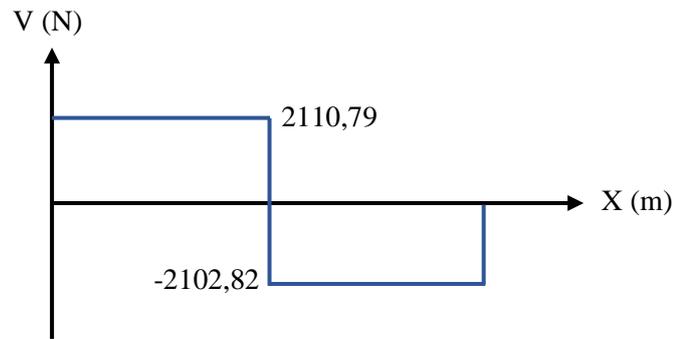


Figura 23-3: Diagrama de esfuerzo cortante
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

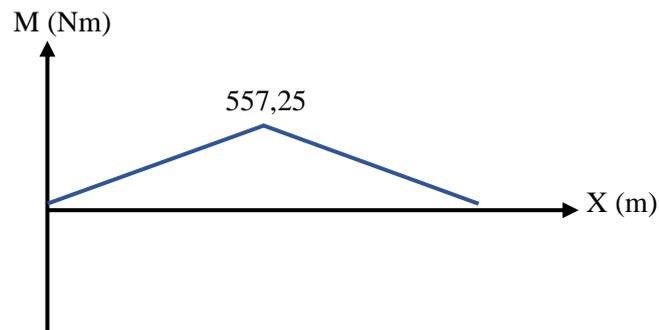


Figura 24-3: Diagrama de momento flector
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

$$\sigma = \frac{Mmáx}{S} \quad (101)$$

$$\frac{S_y}{n} = \frac{Mmáx}{S} \quad (102)$$

$$S = \frac{n * Mmáx}{S_y} \quad (103)$$

Donde:

S : módulo de la sección [m^3].

n : 2 (coeficiente de seguridad) [Adimensional].

$M_{máx}$: 557,25 [Nm] (momento máximo)

S_y : 250×10^6 [Pa] (esfuerzo de fluencia del material).

$$S = \frac{2 * 557,25}{250 \times 10^6}$$

$$S = 4,458 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$S = 4,458 \text{ cm}^3$$

En vista de que el peso de los componentes es considerable para mayor seguridad se ha seleccionado tubo estructural cuadrado de 60x60x2mm para el diseño.

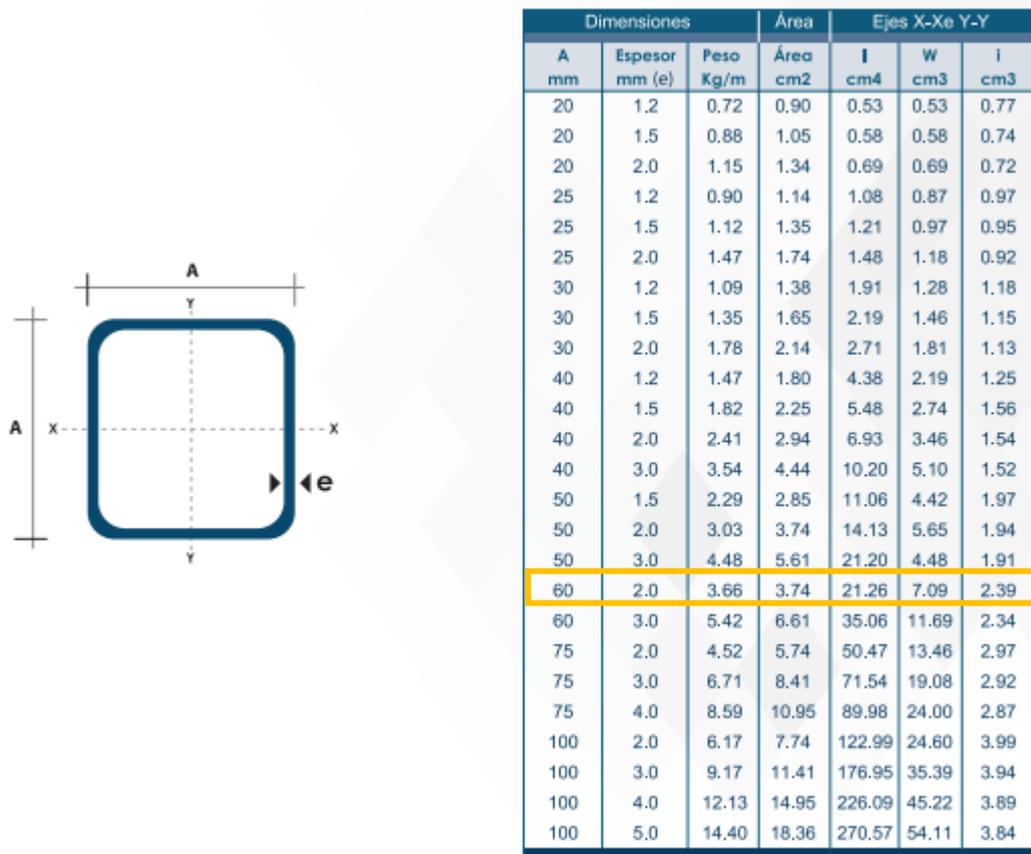


Figura 25-3: Tubo estructural cuadrado especificaciones generales
Fuente: (DIPAC)

3.16. Modelado CAD

El modelo del horno de fundición del presente trabajo de titulación está basado en el diseño desarrollado por David Gingery; un diseño constituido de dos elementos principales: el horno crisol y un quemador a gas GLP económico y de fácil suministro de repuestos.

El modelado de los distintos elementos que conforman el horno de fundición se realizó en el software SolidWorks. A continuación, en la siguiente figura se detalla el resultado del modelado.

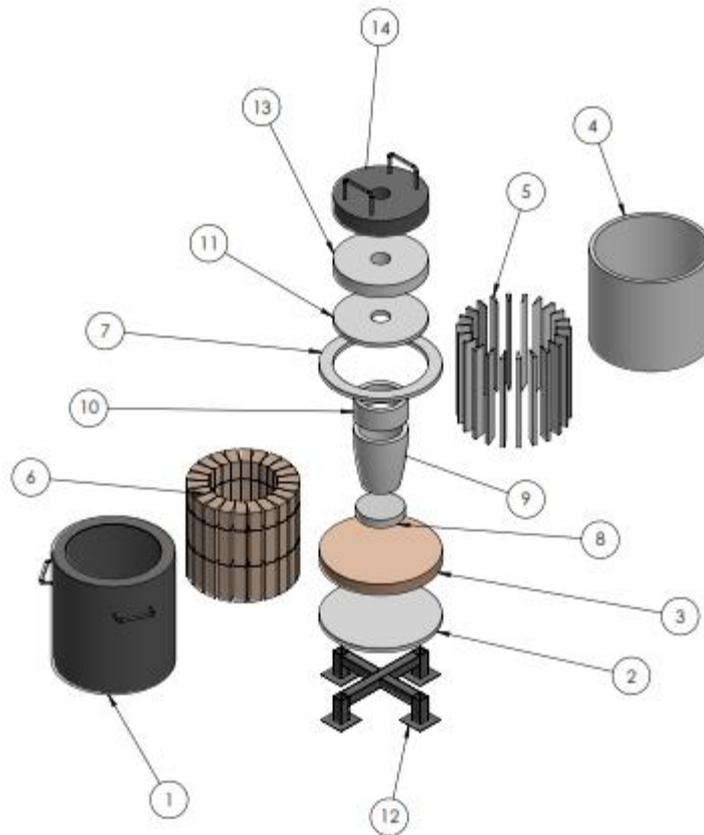


Figura 26-3: Modelado CAD del horno de fundición
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H. 2021

La Tabla 28-3 muestra los elementos del horno con sus respectivos materiales de construcción.

Tabla 28-3: Elementos del horno de fundición

Elemento	Denominación	Material	Cantidad
1	Carcasa del cuerpo	ASTM A36	1
2	Aislante de la base	Fibra cerámica	1
3	Base de ladrillos refractarios	Alúmina	16
4	Aislante del cuerpo del horno	Fibra cerámica	1
5	Mezcla refractaria	Concreto CERCAST 2900	22
6	Pared de ladrillos refractarios	Alúmina	55
7	Aislante de la tapadera	Fibra cerámica	1
8	Base de soporte del crisol	Concreto CERCAST 2900	1
9	Crisol	Grafito	1
10	Cargador de crisol	Grafito	1
11	Mezcla refractaria de la tapa	Concreto CERCAST 2900	1
12	Estructura de soporte	ASTM A36	1
13	Aislante de la tapa	Fibra cerámica	1
14	Carcasa de la tapa	ASTM A36	1

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Las dimensiones de los elementos mencionados se detallan en los planos del horno descritos en el ANEXO E.

3.16.1. Validación del diseño

3.16.1.1. Análisis térmico del cuerpo del horno

Con el fin de comprobar que los cálculos realizados para determinar la temperatura en la superficie de la chapa metálica sean los correctos se realiza una simulación térmica del horno empleando como herramienta informática el software Ansys. Para lo cual se selecciona el módulo Steady-State Thermal utilizado para análisis térmicos en régimen estacionario.

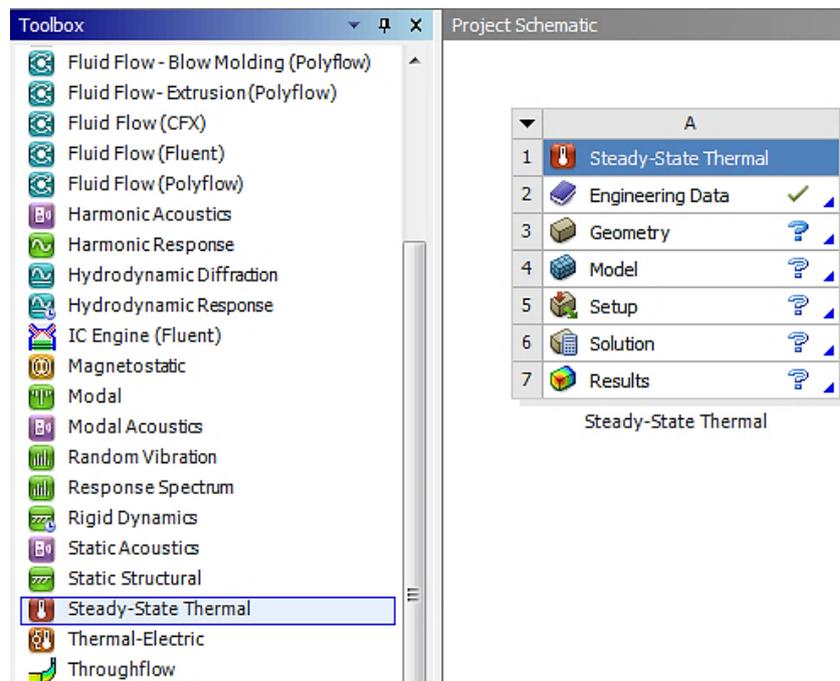


Gráfico 2-3: Módulo Steady-State Thermal de Ansys

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En el Engineering Data se crea los materiales para cada elemento del horno a los cuales se les añade la propiedad de conductividad térmica isotrópica, estos valores de conductividad serán los mismo con los que se ha realizado los cálculos.

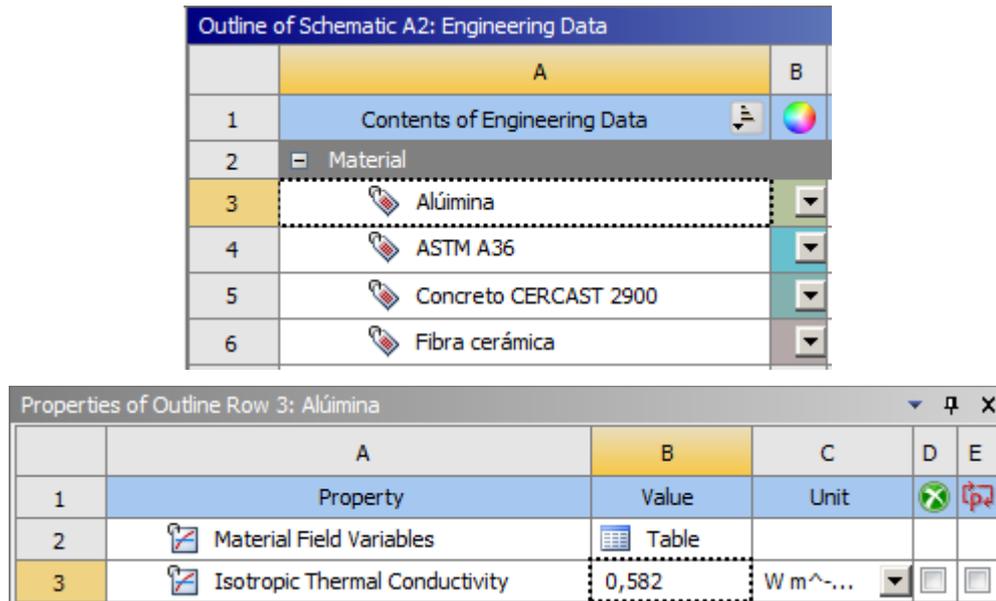


Gráfico 3-3: Creación de materiales en el Engineering Data
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En el apartado de Model se genera el mallado correspondiente al cuerpo del horno. Se debe procurar que el mallado sea el más fino posible de manera que este tenga buena calidad y nos permita tener resultados reales y confiables.

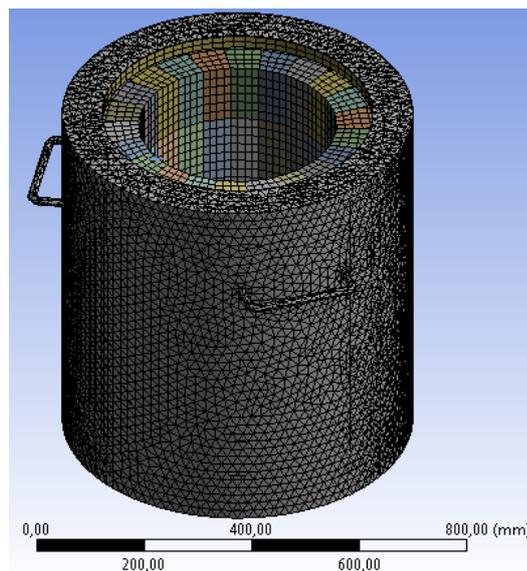


Figura 27-3: Mallado del cuerpo del horno
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Insertamos el parámetro de temperatura establecido en 1100 °C en todas las caras internas que constituyen la cámara de combustión; posteriormente se inserta el parámetro de convección con

su respectivo coeficiente de transferencia de calor por convección en toda la superficie expuesta al aire circundante y por último se inserta el parámetro de radiación con el valor de la emisividad del acero negro y seleccionando nuevamente toda la superficie expuesta al aire circundante.

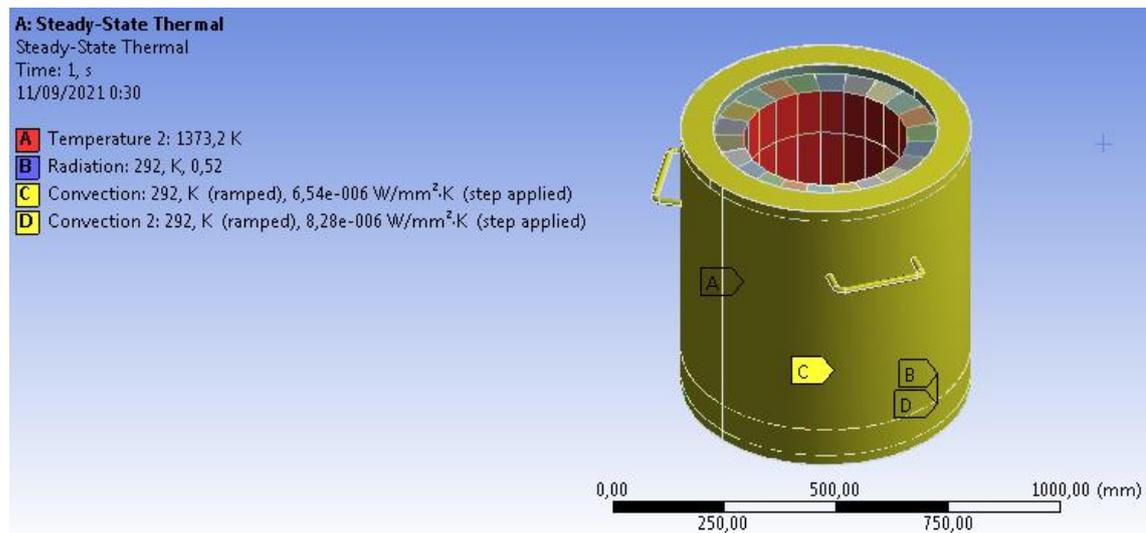
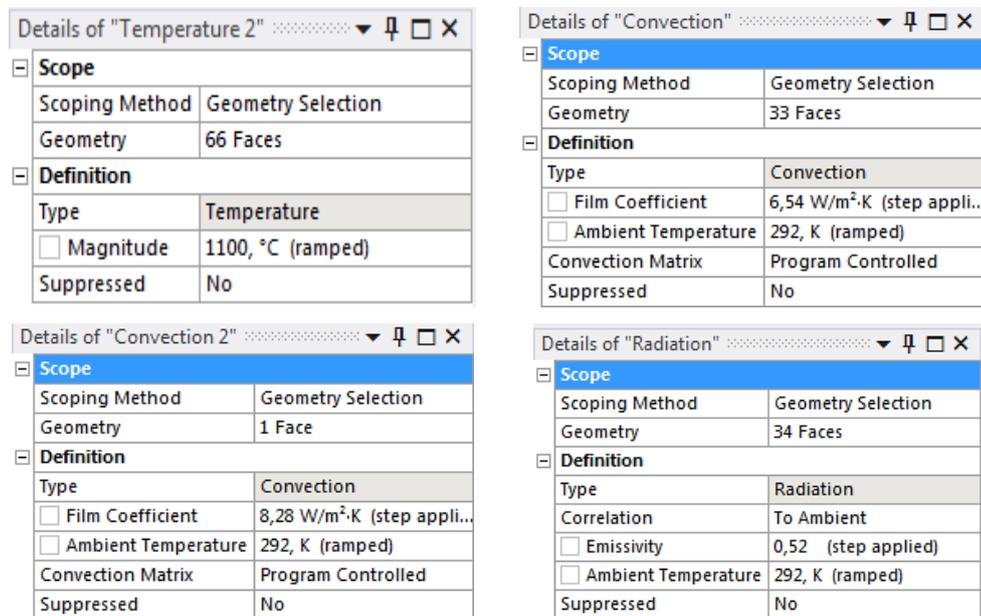


Gráfico 4-3: Configuración de parámetros de transferencia de calor
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Para concluir la simulación térmica se inserta los parámetros de solución que se requiere. En nuestro análisis deseamos obtener la temperatura superficial a la que se encontrará la chapa metálica cuando en el interior del horno se alcance la temperatura máxima de operación.

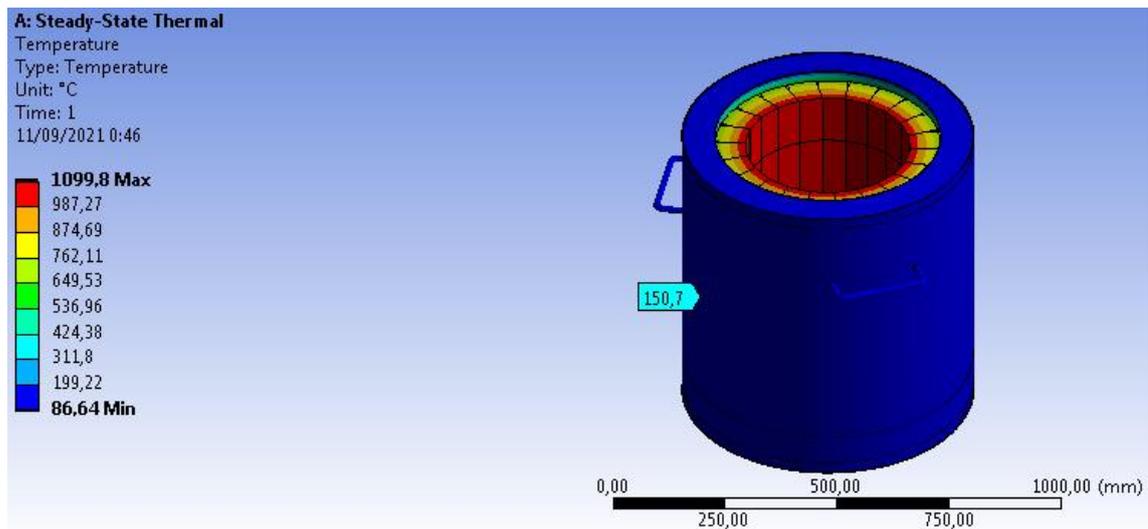


Gráfico 5-3: Resultados de la simulación térmica
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

La temperatura superficial simulada no tiene mayor variación con la temperatura teórica calculada mediante modelos matemáticos la cual se estableció en 154,07 °C con lo que se comprueba la correcta realización de los cálculos.

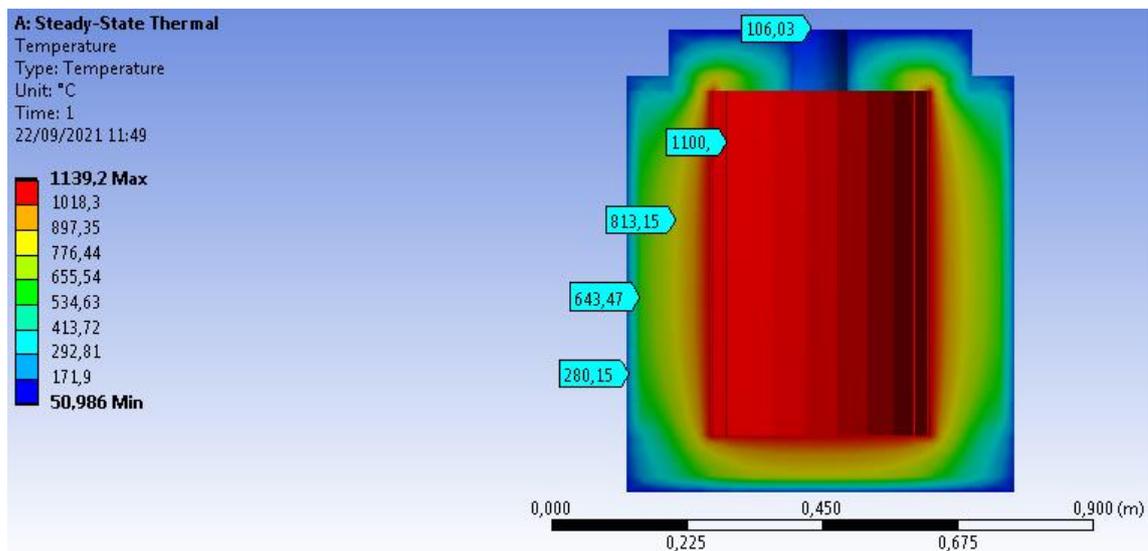


Gráfico 6-3: Distribución de temperaturas a través del horno
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Resulta importante el gráfico de distribución de temperaturas debido a que este expone las áreas efectivas de transferencia de calor utilizadas para los cálculos efectuados en apartados anteriores.

Se debe tener en cuenta que los resultados logrados son una estimación; los valores reales se obtendrán una vez que el horno haya sido construido.

3.16.1.2. Análisis estático de la estructura de soporte

La importancia de un análisis estático radica en que posibilita simular la conducta de la estructura frente a cargas estáticas como el peso de los componentes. En el análisis se establece la presión máxima que soporta la estructura, la deformación y el factor de seguridad.

El análisis estático se lleva a cabo en el software SolidWorks, para ello se realiza el modelo de la estructura y se le coloca sujeciones y cargas externas.

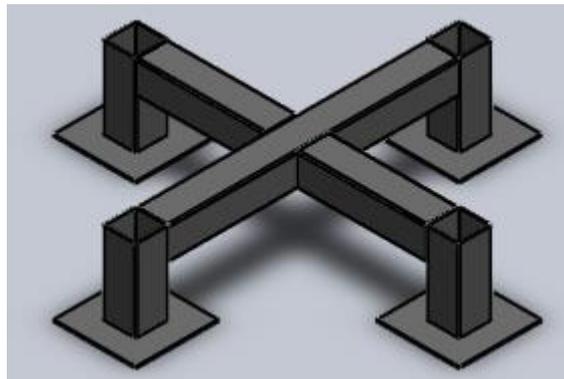


Figura 28-3: Modelo de la estructura de soporte
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

La información del modelo se detalla a continuación:

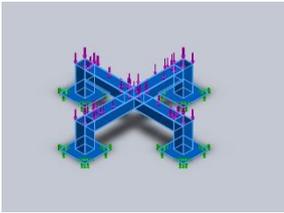
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas
Tubo cuadrado 60x60x2 	Sólido	Masa:7,855 kg Volumen: 0,0010007115 m ³ Densidad:7850 kg/m ³ Peso:77,0575 N

Gráfico 7-3: Información del modelo
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Un factor fundamental que es necesario para el análisis estático es el material de la estructura de soporte. Las propiedades se detallan en el gráfico a continuación.

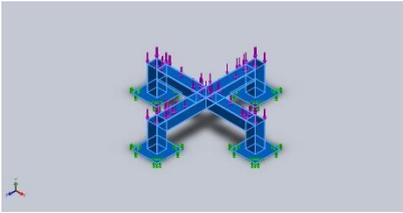
Referencia de modelo	Propiedades
	Nombre: ASTM A36 Acero Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de Von Mises máx. Límite elástico: 2.5e+08 N/m² Límite de tracción: 4e+08 N/m² Módulo elástico: 2e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.26 Densidad: 7850 kg/m³ Módulo cortante: 7.93e+10 N/m²

Gráfico 8-3: Propiedades del material

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Se colocan las sujeciones y cargas externas a las que va a estar sometida la estructura como se evidencia en los siguientes gráficos.

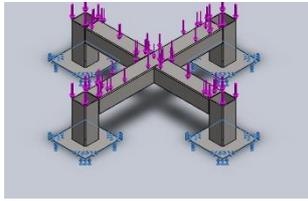
Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 4 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción (N)	0,000965987	4213,61	-0,000296705	4213.61
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

Gráfico 9-3: Sujeciones

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

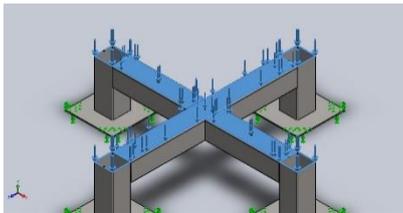
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 7 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 4213.61 N

Gráfico 10-3: Cargas establecidas

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

El primer resultado obtenido de la simulación se basa en el análisis de la tensión de Von Mises, que es un criterio de falla para elementos estáticos y se emplea como indicativo de un buen diseño para materiales dúctiles. El acero ASTM A36 presenta un límite elástico de 250 MPa este dato se compara con el máximo valor obtenido en la simulación que es de 151,439 MPa. Este resultado está por debajo del límite elástico del material; por lo tanto, se puede asegurar que la estructura soportará las cargas previamente establecidas.

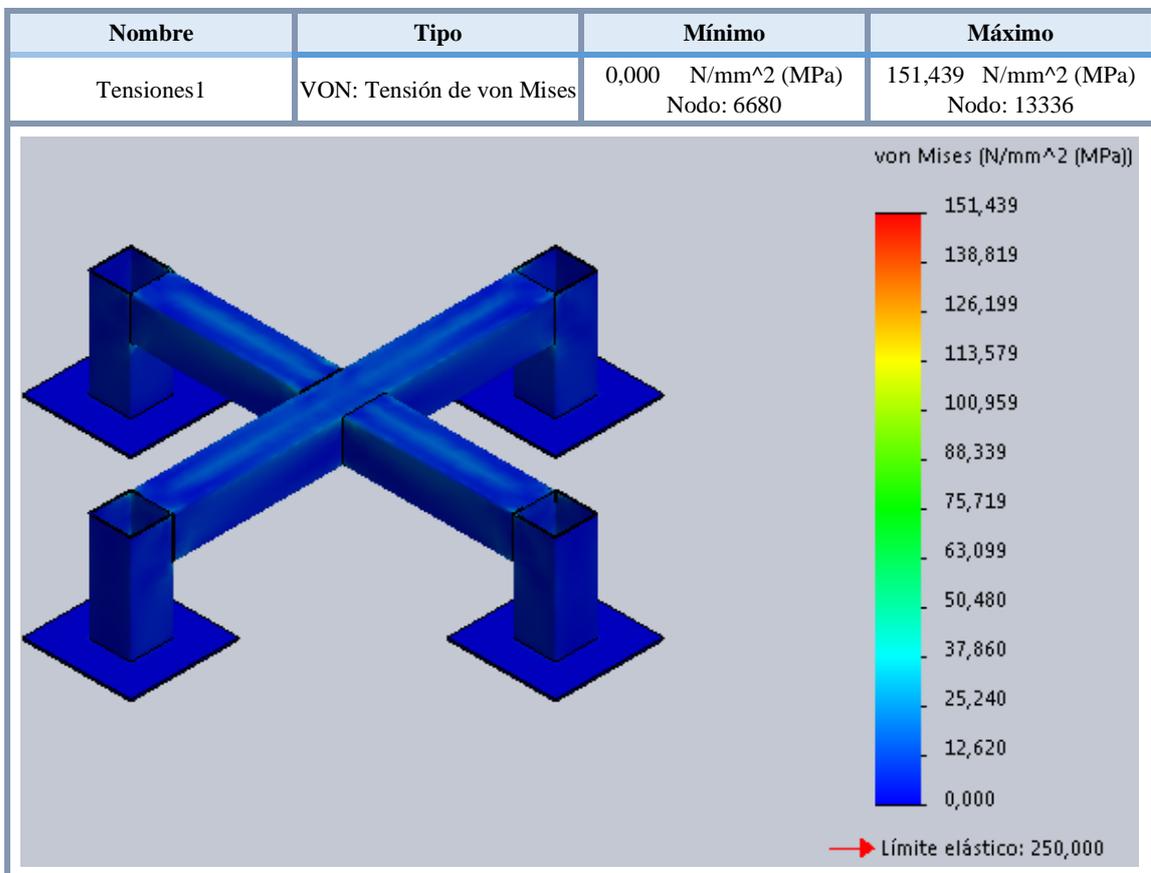


Gráfico 11-3: Análisis de fallo de la estructura del horno mediante Von Mises

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En la siguiente gráfica se muestra un segundo resultado el cual permite observar las deformaciones en la estructura de soporte producto de la presión que ejercen los elementos, este análisis nos permitirá verificar la rigidez de la estructura. Se presenta en la simulación un valor máximo de deformación de 0,0786 mm con una presión máxima de 151,439 MPa en el centro de la estructura correspondiente a la zona de color rojo. Esta deformación es imperceptible para el ojo humano; en consecuencia, la estructura puede considerarse como rígida.

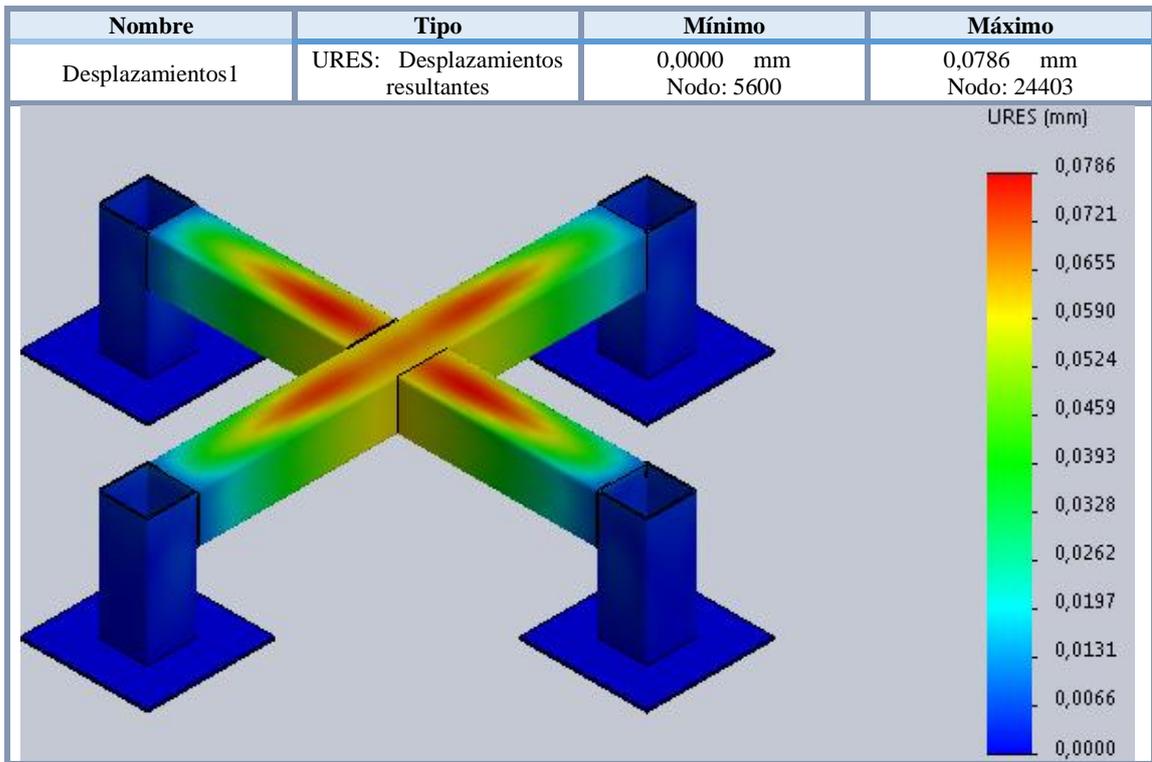


Gráfico 12-3: Deformación en la estructura

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Por último, se determina el factor de seguridad el mismo que debe ser mayor a la unidad para tener seguridad ante el fallo. El valor del factor de seguridad obtenido en la simulación es igual a 1,7 con ese dato se puede afirmar que la estructura es confiable. Por lo tanto, va a soportar sin ningún problema la carga estática que se le aplique.

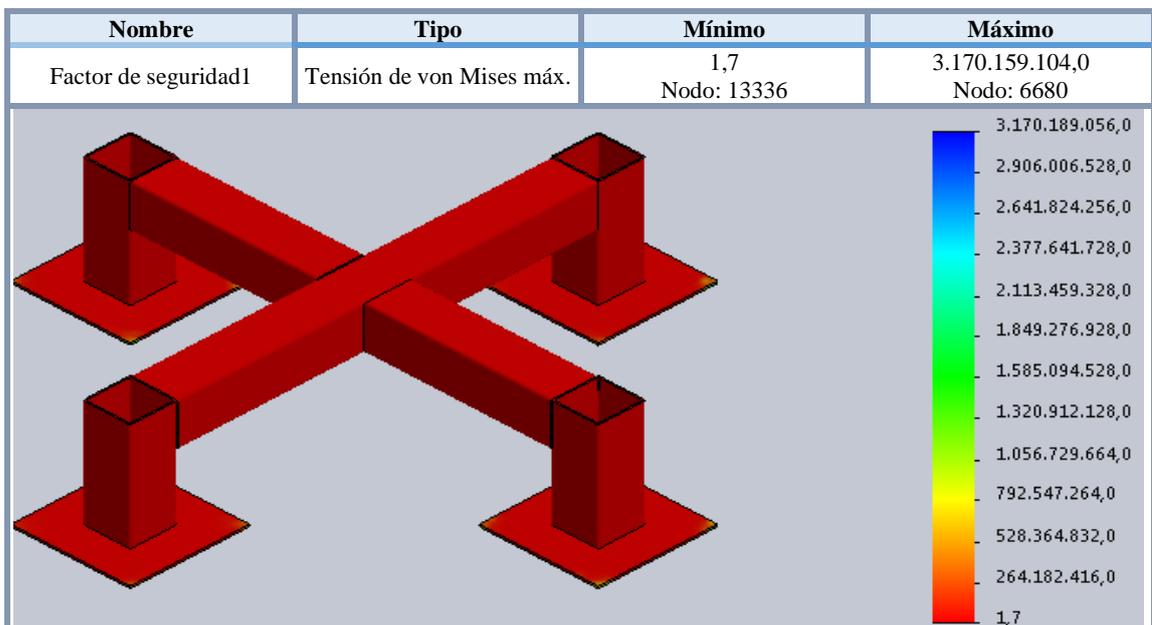


Gráfico 13-3: Análisis del factor de seguridad

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

- Pulsador verde (START): es el encargado de poner en funcionamiento el sistema mediante la activación del RELÉ 1 que enclava la señal de inicio. Además, energiza las bobinas del contactor K (blower), Timer T1 y luz piloto verde que indica que el sistema está en correcto funcionamiento.

El apagado del sistema de control de combustión cuenta con los siguientes dispositivos:

- Pulsador rojo (STOP): encargado de cortar el suministro de energía a los dispositivos que estén en funcionamiento, excepto al controlador de temperatura.
- Paro de emergencia: es un pulsador tipo seta que se encarga de cortar el suministro de energía a todo el sistema en caso de que se produzca un accidente.

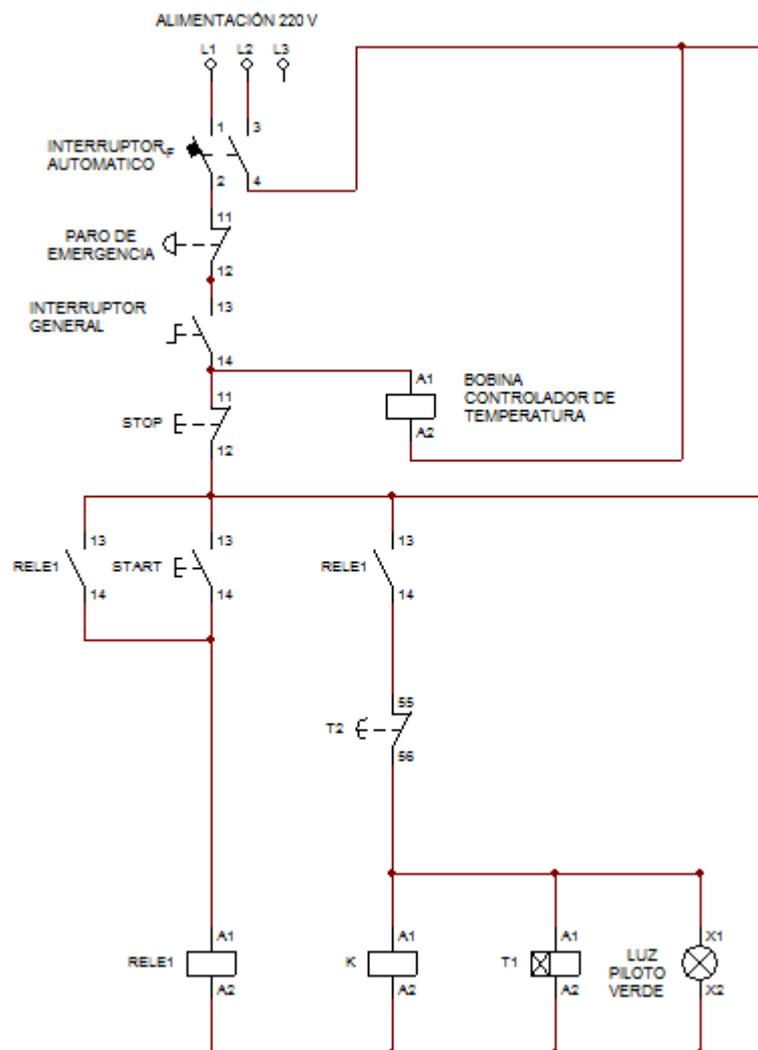


Gráfico 15-3: Diagrama segmentado de las conexiones eléctricas on/off
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

El primer ciclo del encendido tiene una duración de 10 segundos en el cual únicamente se activa el blower para realizar un barrido de los gases sobrantes de fundiciones anteriores presentes en el hogar del horno ver Gráfico 16-3.

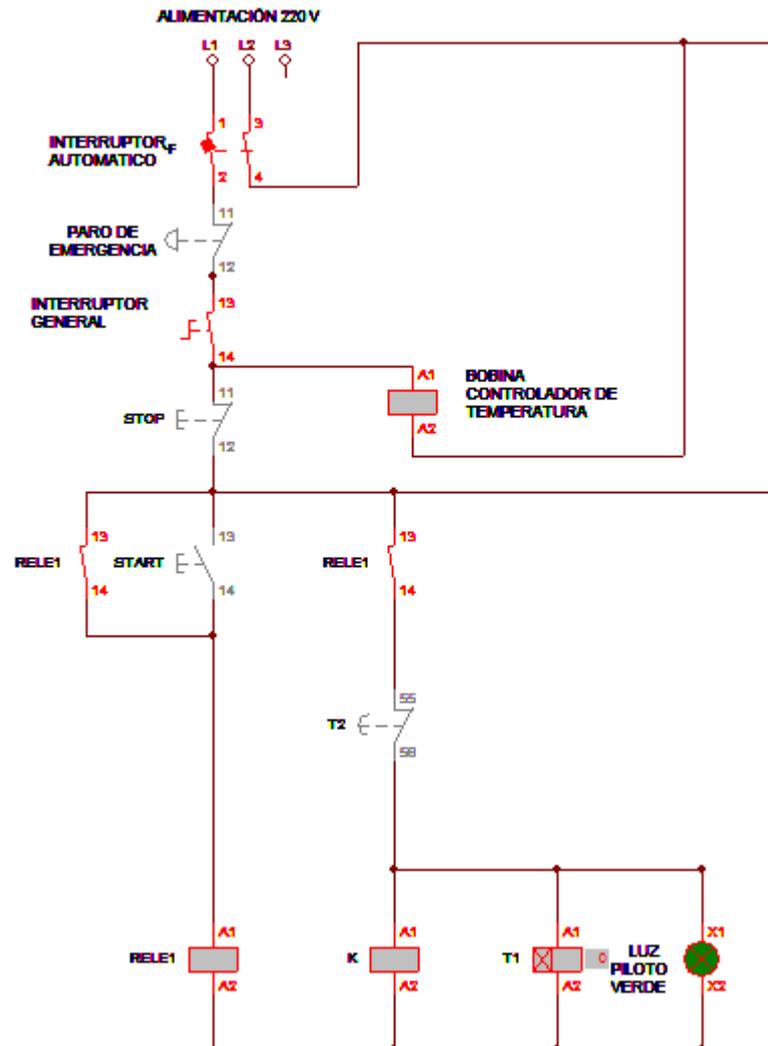


Gráfico 16-3: Simulación del funcionamiento del primer ciclo de encendido
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Después de los 10 segundos de barrido empieza el segundo ciclo como se muestra en el Gráfico 17-3, en el cual el timer T1 conmuta y activa el RELÉ 2; esta activación energiza la bobina del controlador de ignición previamente encendido que entra en funcionamiento abriendo la válvula solenoide para el flujo del gas, generando la chispa con el pin de ignición y activando el sensor de llama el cual mediante la luz piloto amarilla indicará que existe presencia de llama en el hogar del horno. El controlador de ignición se encenderá solo con selector on/off.

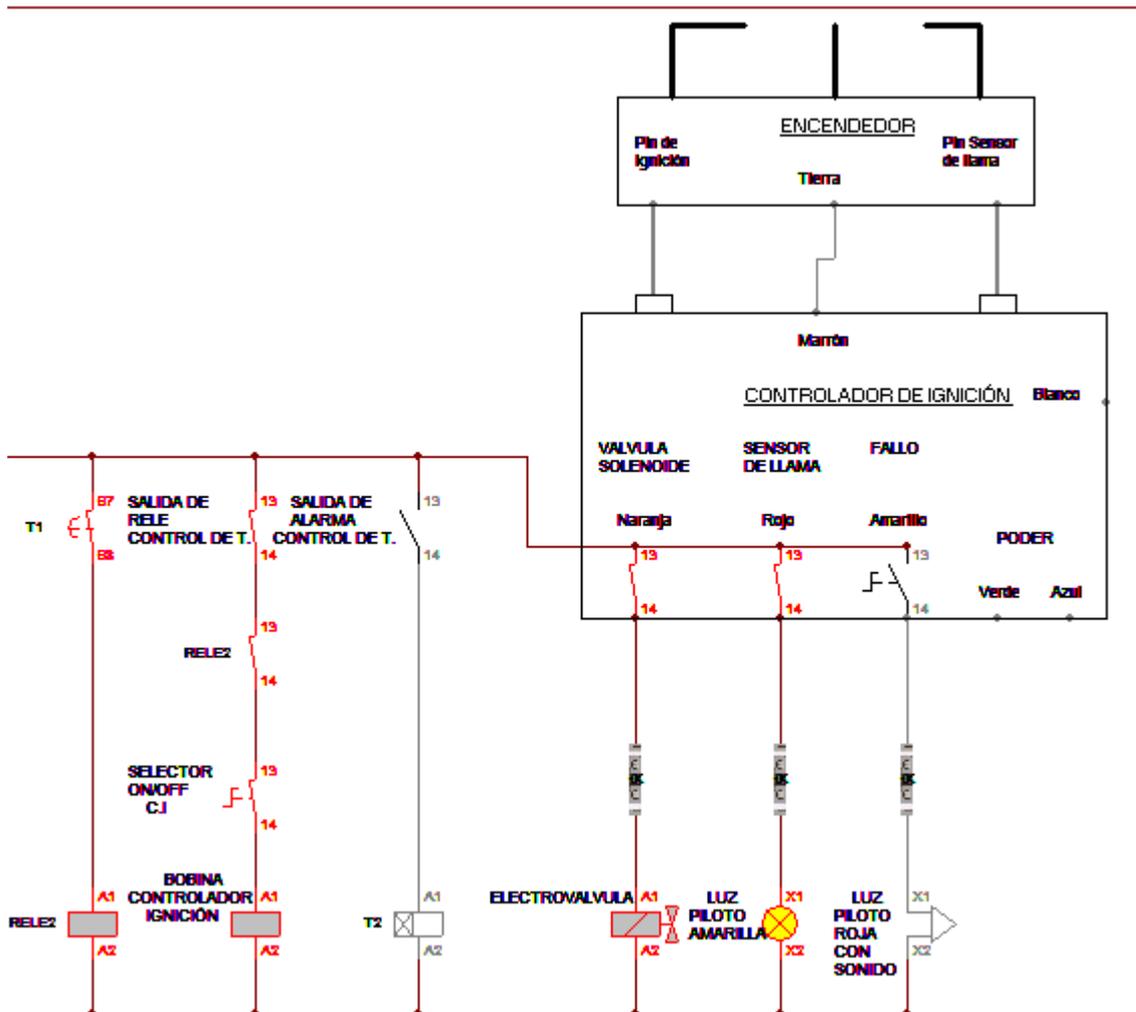


Gráfico 17-3: Simulación del funcionamiento del segundo ciclo de encendido
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.17.2. Control de fallo del sistema de combustión

El controlador de ignición mediante su sensor de llama indica la presencia o no de llama en el hogar del horno. Si el sensor no detecta flama por algún motivo entonces, el pín de ignición se queda activo por 10 segundos, transcurrido ese tiempo se desactivará la válvula solenoide para impedir el paso de gas y como medida de alerta para los operarios se indicará el fallo del sistema mediante una luz piloto roja con sirena. Ver Gráfico 18-3.

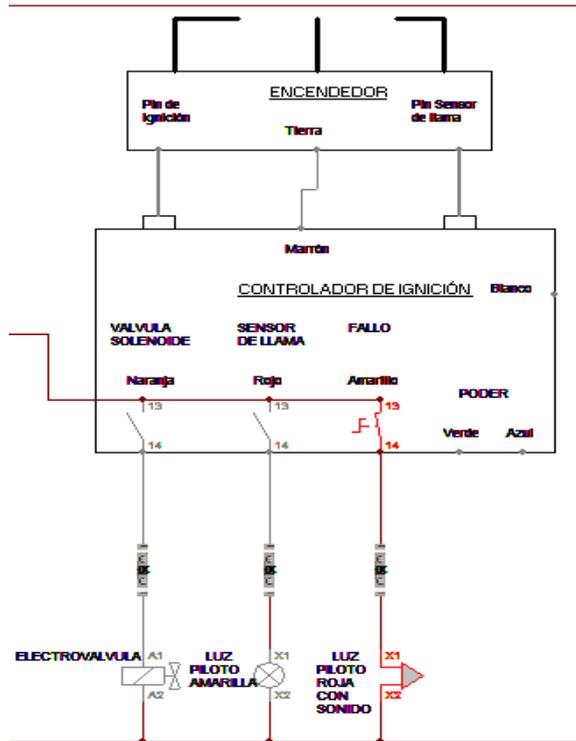


Gráfico 18-3: Simulación de fallo del sistema
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.17.3. Diagrama de conexión del controlador de temperatura

El controlador de temperatura Camsco Rex-C100 trabaja con una termocupla que se ubica en el interior de la cámara del horno, el esquema de conexión del controlador se expone en el Gráfico 19-3. Este actúa como indicador de temperatura y se encuentra programado con un valor final de 1200 °C. En el momento en que la temperatura dentro de la cámara del horno alcanza los 1200 °C se activa el timer T2 que es el encargado de apagar todo el sistema de combustión después de 10 segundos como se muestra en el Gráfico 20-3.

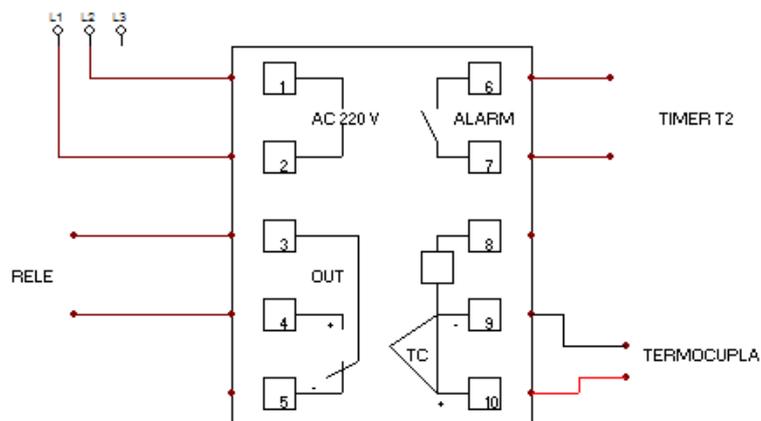


Gráfico 19-3: Diagrama de conexión del controlador de temperatura
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

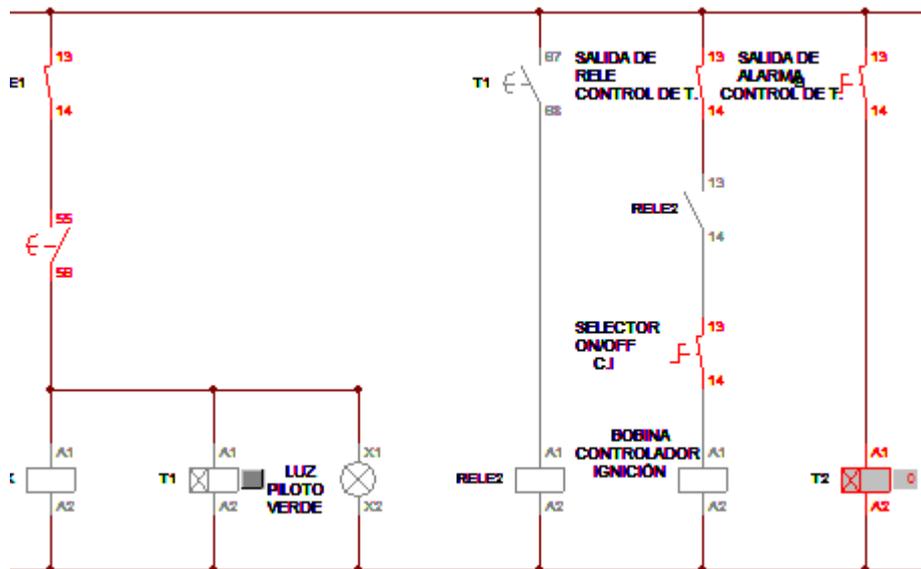


Gráfico 20-3: Simulación de apagado automático con la temperatura final de 1200 °C
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Para volver a encender el quemador se debe reiniciar el sistema presionando el pulsador rojo (STOP) y luego el pulsador verde (START).

3.17.4. Esquema de conexión del controlador de ignición

El controlador de ignición cuenta con las siguientes salidas y entradas:

- N: salida de encendido.
- S: sensor (entrada de señal de llama).
- Verde: línea L1 de alimentación de 220 V.
- Azul: línea L2 de alimentación 220 V.
- Naranja: salida de 220V que se conecta a la electroválvula o válvula solenoide de gas.
- Rojo: salida de 220 V conectada al indicador de trabajo de combustión luz piloto amarillo.
- Blanco: salida de 220 V conectada al indicador de on/off.
- Amarillo: salida de 220 V conectada a la alarma de fallo luz piloto roja con sirena.
- Marrón: cable de tierra conectado en el encendedor.

Para que el controlador de ignición funcione correctamente se debe conectar a un encendedor que cuenta con tres pines que son:

- Pin de ignición o generador de chispa.
- Sensor de llama.
- Tierra.

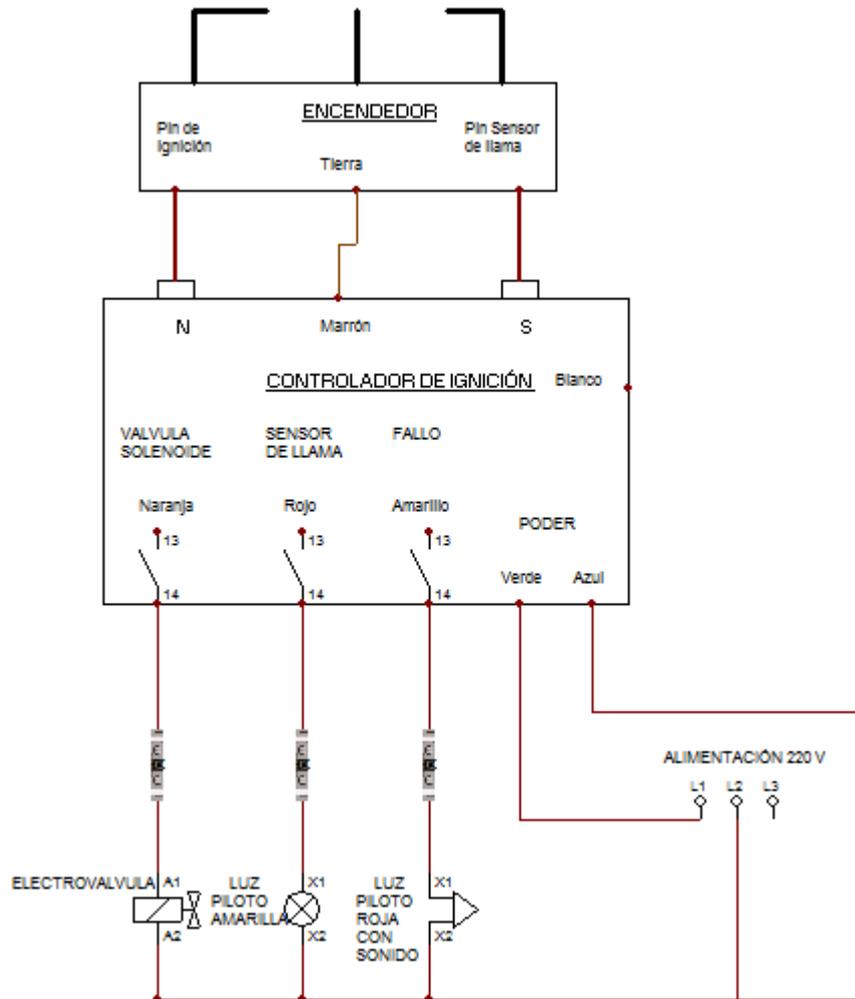


Gráfico 21-3: Esquema de conexión de controlador de ignición
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

3.17.5. Circuito de potencia del blower

El blower o venterol es el encargado de generar el aire forzado para obtener una mejor combustión en la cámara del horno. Además de suministrar oxígeno necesario para conservar la combustión y llegar a la temperatura máxima de operación en el horno. En el Gráfico 22-3 se observa su circuito de potencia.

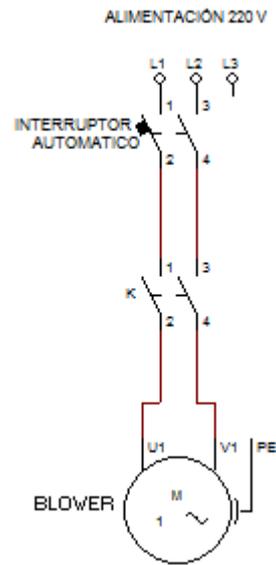


Gráfico 22-3: Circuito de potencia del blower
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DEL HORNO DE FUNDICIÓN

El horno de fundición está formado por cuatro componentes principales:

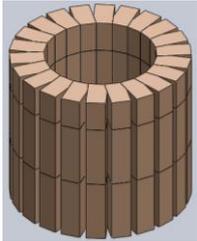
- Cuerpo del horno.
- Estructura de soporte.
- Tapa.
- Sistema de combustión o quemador.

4.1. Procedimiento de construcción

4.1.1. Construcción del cuerpo del horno y estructura de soporte

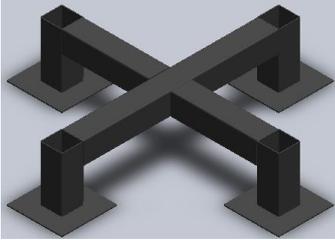
Las Tablas 1-4 y 2-4 detallan los elementos que conforman el cuerpo y la estructura de soporte del horno a construirse.

Tabla 1-4: Elementos que conforman el cuerpo del horno

Componente	Elemento	Imagen
Cuerpo del horno	Pared de ladrillos refractarios	
	Pared de manta cerámica	
	Chapa metálica de acero negro	

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Tabla 2-4: Estructura de soporte

Componente	Imagen
Estructura de soporte	

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

A partir de una plancha de acero negro de 2 mm de espesor y las dimensiones del diseño propuesto, se realizaron con ayuda de una cizalla hidráulica, dos cortes rectangulares que se utilizaran para la carcasa del cuerpo del horno y tapa.



Figura 1-4: Corte de la carcasa del cuerpo del horno y carcasa de la tapa
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Se llevo a cabo tres procesos de corte láser para obtener de una plancha de acero negro de 2 mm de espesor una forma circular y dos en forma de arandela que servirán para la base, tapadera y parte superior de la tapa respectivamente.



Figura 2-4: Corte láser de la base, tapadera y parte superior de la tapa
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

A los dos cortes rectangulares de acero negro obtenidos en la cizalla hidráulica, se les aplica un proceso de barolado de manera que los cortes adquieran las formas cilíndricas deseadas que servirán para la carcasa del cuerpo del horno y para la carcasa de la tapa.



Figura 3-4: Cilindros para el cuerpo del horno y la tapa
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En la figura siguiente se puede observar cómo quedaron las partes que conformarán la carcasa del cuerpo del horno y tapa, las mismas que se unirán completamente mediante soldadura por arco eléctrico.



Figura 4-4: Carcasa del cuerpo del horno y tapa
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Se realizó un proceso de soldadura por arco eléctrico para unir por completo la carcasa del cuerpo del horno y temporalmente para unir mediante puntos la tapadera al cuerpo y mantener la forma cilíndrica hasta que en lo posterior se suelde completamente. Para el proceso de soldadura se empleó electrodo revestido E-6013 que es un electrodo ideal para aceros con bajo porcentaje de carbono como el acero negro utilizado en este proyecto.



Figura 5-4: Soldadura de la carcasa del cuerpo del horno
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Continuamos con un nuevo proceso de soldadura por arco eléctrico para ensamblar la estructura de soporte a la carcasa del horno, respetando siempre las dimensiones establecidas en el diseño. Para la soldadura se empleó electrodo revestido E-6013.



Figura 6-4: Soldadura de la estructura de soporte a la carcasa del horno
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

A la manta fibra cerámica se le practicó un corte para obtener una circunferencia de diámetro 648 mm que se instaló dentro de la base del horno para evitar sobrecalentamientos. Para facilitar el montaje de los elementos internos del horno se retiró la tapadera. En la figura a continuación se evidencia la instalación.



Figura 7-4: Corte e instalación de manta fibra cerámica
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En el interior del cuerpo del horno se instaló un revestimiento aislante de manta fibra cerámica para evitar un sobrecalentamiento excesivo de su superficie. Después se procedió con la base de la cámara de combustión que se elaboró a partir de 11 ladrillos refractarios enteros y 4 que se cortaron por la mitad para formar un arco tomando como base la circunferencia interna del cilindro.



Figura 8-4: a) Corte de manta cerámica para el interior del cuerpo, b) Base de ladrillos
 Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Para la construcción de la cámara de combustión se comenzó por realizar cortes a los ladrillos refractarios de modo que puedan formar una circunferencia y constituyan la pared refractaria cilíndrica del horno de 370 mm de diámetro interior. Las dimensiones del ladrillo se muestran en la Figura 9-4. Para obtener la forma requerida del ladrillo utilizamos un disco de corte con la

banda diamantada segmentada; este disco es especial para cortar materiales como los ladrillos refractarios.

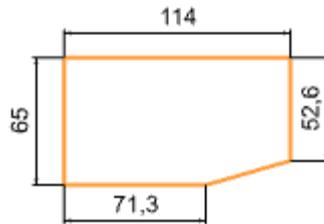


Figura 9-4: Dimensión del ladrillo refractario requerido
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

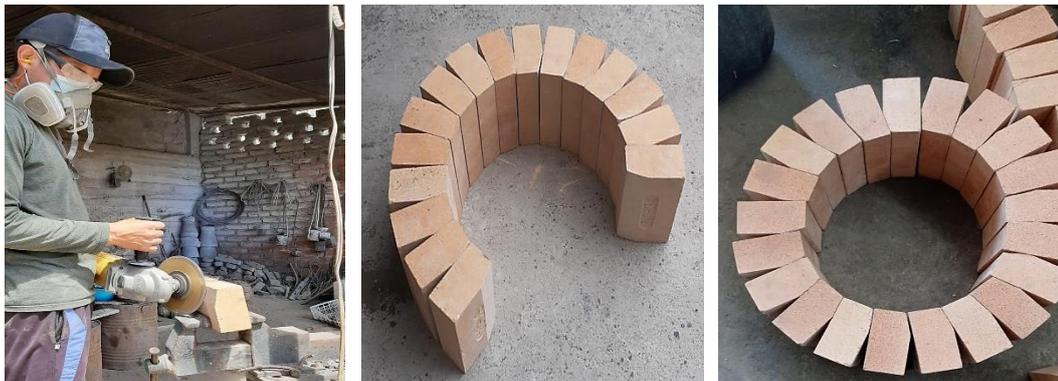


Figura 10-4: Ladrillos refractarios que forman la pared cilíndrica del horno
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Utilizamos una mezcla a base de agua y concreto refractario VESUVIUS CERCAST™ 2900 ideal para hornos (ANEXO B), para unir los ladrillos e introducirla en las separaciones que se forman entre cada ladrillo con el fin de dejar más consolidada la cámara de combustión y evitar fugas de calor. Para unir los ladrillos estos deben estar húmedos para que la mezcla de concreto refractario se adhiera con más facilidad.



Figura 11-4: Unión de los ladrillos refractarios para formar la cámara de combustión
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Como paso final en la construcción del cuerpo del horno se llevó a cabo un proceso de soldadura para unir completamente la tapadera a la carcasa del cuerpo del horno mediante un adecuado cordón de soldadura. Para este proceso se manejó electrodo revestido E-6013.



Figura 12-4: Soldadura de la tapadera a la carcasa del cuerpo del horno
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.1.2. *Construcción de la tapa del horno*

Mediante soldadura por arco eléctrico y empleando electrodo revestido E-6013, se realizó la completa unión de la carcasa de la tapa, una de las arandelas obtenidas previamente, un tubo mecánico redondo de 100 mm de diámetro utilizado para el escape de los gases de combustión y unas agarraderas para permitir que el levantamiento de la tapa sea de manera segura.



Figura 13-4: Carcasa de la tapa del horno
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Se soldaron varillas rectas de 8 mm de diámetro alrededor del tubo redondo utilizado para el escape de gases, de modo que el concreto refractario se sujete firmemente a la carcasa de la tapa y evite que este se derrumbe al momento de levantarla.



Figura 14-4: Soldado de varilla recta
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Para cumplir con el espesor de manta fibra cerámica establecido en el diseño de la tapa, se instaló en su interior 3 arandelas de 500 mm de diámetro exterior, 100 mm de diámetro interior y 25 mm espesor a las cuales se les practicó un corte a la mitad para introducirlas fácilmente como se muestra en la figura a continuación.



Figura 15-4: Montaje de manta fibra cerámica en el interior de la tapa
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Por último, se empleó una mezcla a base de agua y concreto refractario para verter en el interior de la tapa y dar el espesor de 25 mm que se menciona en el diseño. Aproximadamente se utilizaron 12 kg de concreto refractario VESUVIUS CERCAST™ 2900.



Figura 16-4: Secado de la mezcla refractaria
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.1.3. Construcción del quemador

El sistema de combustión a construirse es un quemador de aire forzado como se muestra en la Figura 17-4; este tipo de quemador se caracteriza porque el flujo de aire primario de combustión es suministrado y mezclado por un ventilador de inyección. No es necesario que el gas combustible se inyecte a altas presiones y cantidades, el gas entra a una velocidad más baja lo que le da más tiempo para quemarse en el horno en lugar de desperdiciarse como una columna de fuego sobre el orificio de ventilación. En la tobera de un quemador de tiro forzado se suele presentar una mayor caída de presión de aire, así que las velocidades del aire son mayores. Por consiguiente, existe una mejor mezcla y control de la configuración de la llama lo que lo hace más eficiente.



Figura 17-4: Prueba del quemador de aire forzado
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

El quemador está compuesto de un blower que se utiliza para proporcionar la cantidad de aire necesaria, generar una mejor combustión en la cámara del horno y suministrar el oxígeno para conservar la combustión; ya que, utilizando solo la combustión del gas GLP no se tendrían las condiciones deseadas para alcanzar una temperatura de 1100 °C, por esta razón se justifica alimentar artificialmente la combustión de la cámara del horno por medio de un blower. Para regular el flujo de gas GLP el quemador posee una electroválvula conectada a un suministro de energía de 220V y una válvula de esfera manual. Además, cuenta con un controlador de flama para el encendido y apagado del sistema de combustión.

Todos estos elementos ubicados de manera adecuada permiten mantener el control del quemador y proporcionar seguridad al operario del equipo de fundición.



Figura 18-4: Instalación del quemador en el horno
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

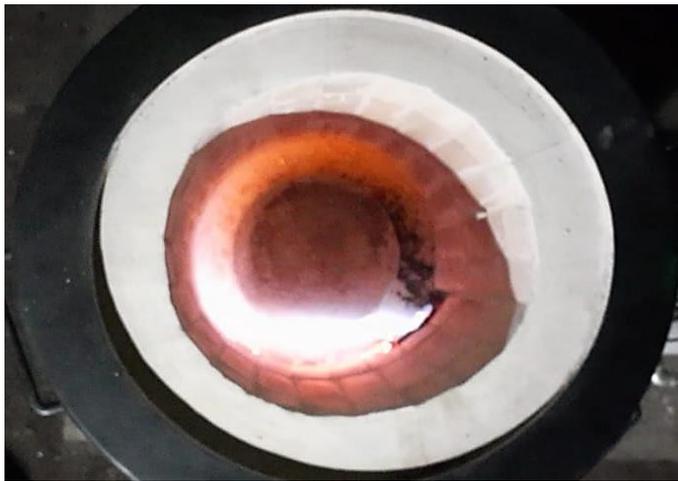


Figura 19-4: Prueba del quemador en la cámara de combustión
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.2. Pruebas de funcionamiento

Una vez construido e instalado el equipo de fundición se procede a realizar las respectivas pruebas para calibrar, verificar y garantizar un correcto funcionamiento.

Se determina obtener 60 kg de aleación de bronce que es la capacidad para la que se diseñó el horno, y efectuar pruebas de precalentamiento y operación con arranque en caliente. A partir de la puesta en marcha del horno se recopilaron los datos para obtener sus curvas características con los parámetros de tiempo, temperatura y consumo de combustible. Las pruebas de funcionamiento se realizaron en condiciones controladas mediante experimentación y tabulación de datos.

La prueba de precalentamiento de la cámara y el crisol sin carga se llevó a cabo para un tiempo de 15 minutos con la ventana de aspiración de aire del blower cerrada y la válvula de paso de gas abierta un 10%. Las temperaturas en el interior de la cámara de combustión siguen la configuración de la curva que se muestra en el Gráfico 1-4, la tendencia del aumento de temperatura varía desde una zona de calentamiento rápido en la que se alcanza los 328 °C durante el primer minuto de operación para luego experimentar una zona estable de incremento gradual hasta llegar a los 518 °C en los 15 minutos.

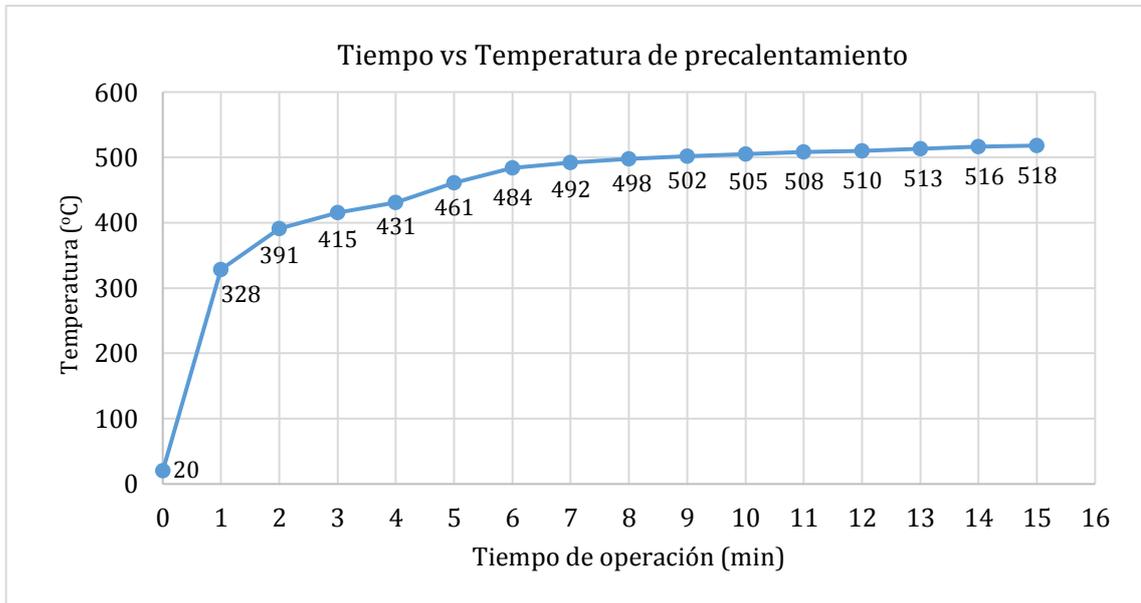


Gráfico 1-4: Curva de precalentamiento de la cámara del horno
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Posterior al precalentamiento se realizó inmediatamente una prueba de operación del horno con arranque en caliente. La prueba consistió en introducir el material a fundir en el crisol precalentado y cada 5 minutos tomar lectura de la temperatura en el interior de la cámara hasta conseguir que el material quede completamente fundido y listo para su colado. Para la prueba se estableció como condición experimental que la válvula de paso de gas se abra un 25% y además que la ventana de aspiración de aire del blower se abra en un 50% para alcanzar temperaturas superiores a los 1000 °C.

El Gráfico 2-4 muestra la temperatura en el interior de la cámara de combustión durante la operación del horno, en él se puede observar una temperatura de 193 °C en el instante cero y, al igual que en la prueba de precalentamiento, la tendencia del aumento de temperatura varía desde una zona de calentamiento rápido en la que se alcanza los 793 °C durante los primeros 5 minutos de operación hasta llegar a una zona estable con incrementos cortos de temperatura. Al

llegar al minuto 15 de operación se alcanza los 961 °C y 20 minutos más tarde se alcanza la temperatura de 1114 °C, estas temperaturas son aproximadamente la temperatura de fusión y de colado del bronce. Trascurrido 50 minutos desde la puesta en marcha del horno se llega a la temperatura de 1165 °C y el bronce se encuentra totalmente líquido.

Cabe mencionar que al momento de obtener la temperatura de colado se empezó a introducir más chatarra de bronce en el crisol hasta conseguir llenarlo a su máxima capacidad.

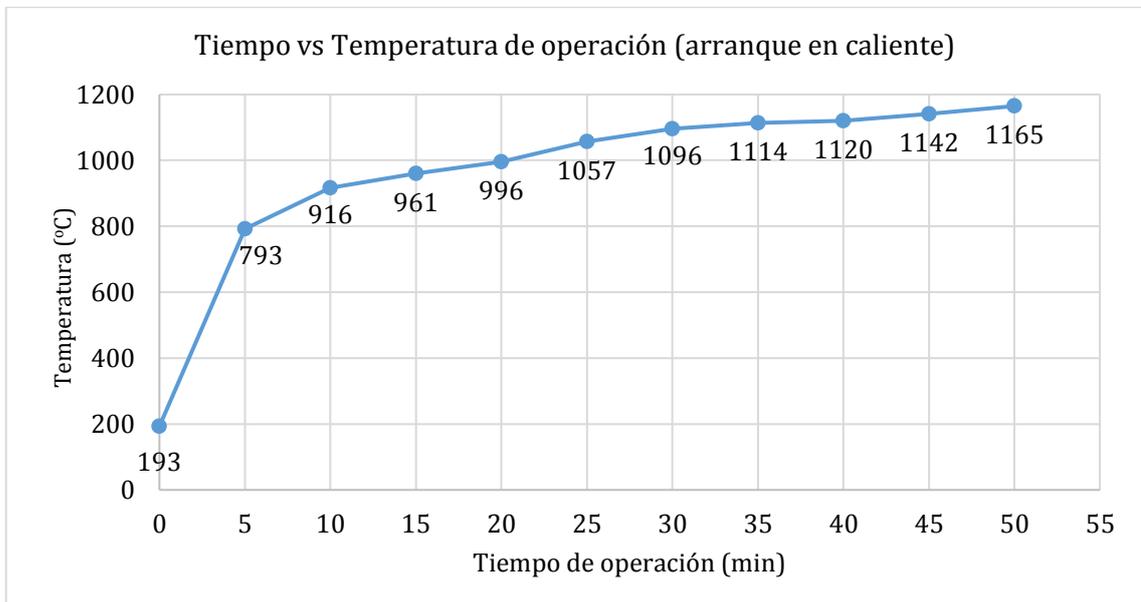


Gráfico 2-4: Curva de operación del horno con arranque en caliente
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

En la Figura 20-4 a) se observa que trascurrido 15 minutos de operación el bronce aún permanece en estado sólido a una temperatura de 961 °C. En la Figura 20-4 b) se puede apreciar que el bronce se ha transformado de sólido a líquido, se encuentra a una temperatura de 1165 °C está listo para retirar la escoria y proceder a su colado en los moldes.

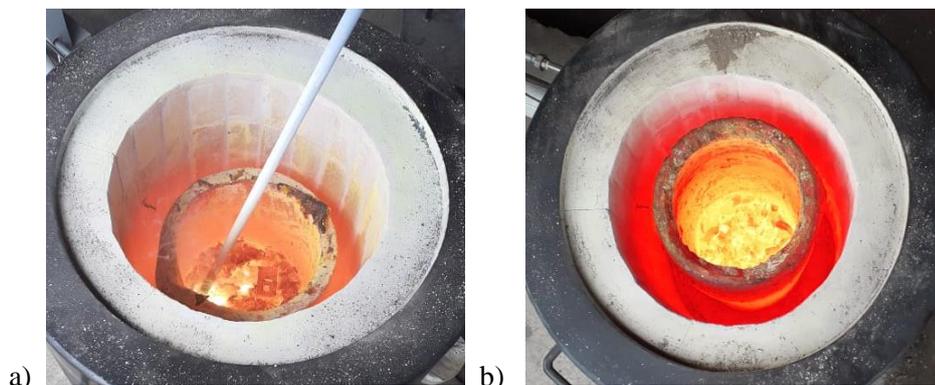


Figura 20-4: a) Bronce en estado sólido, b) bronce líquido listo para su colado
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

El Gráfico 3-4 proporciona información sobre el consumo de combustible para los 50 minutos de operación del horno, en él se evidencia que al término de los 50 minutos se tiene disponible 9,75 kg de combustible; es decir que para obtener los 60 kg de aleación de bronce se requiere aproximadamente de 5 kg de combustible GLP.

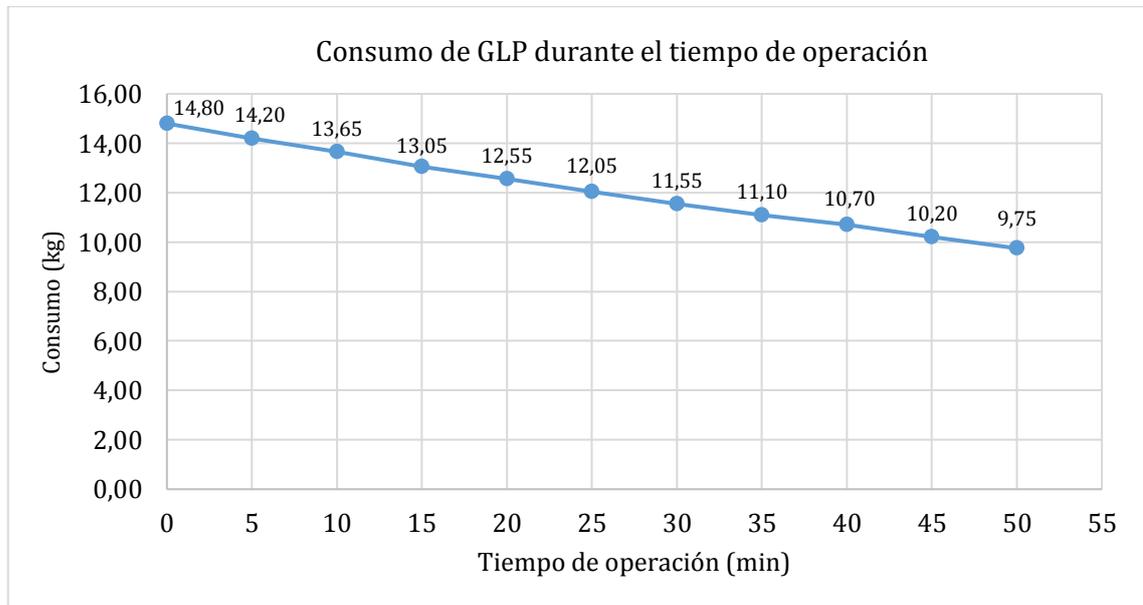


Gráfico 3-4: Curva del consumo de GLP durante el tiempo de operación

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

Por medio de las pruebas realizadas se comprobó el correcto funcionamiento del horno de fundición, además se pudo verificar que los materiales refractarios seleccionados cumplen con el aislamiento requerido.

4.3. Análisis de costos

En este apartado se realiza un análisis del costo general de los materiales, componentes y actividades que se han empleado durante la etapa de construcción del horno crisol de fundición. Se utiliza la metodología de análisis de costos directos e indirectos. A continuación, se enlista todos los valores económicos necesarios para la ejecución del presente proyecto.

4.3.1. Costos directos

Se refieren a todos los costos que se involucran directamente en la construcción del horno de fundición, es decir el costo de los materiales, máquinas o herramientas, transporte y mano de obra mano utilizada. Como el horno está compuesto por un sistema mecánico y otro eléctrico, el costo de los materiales de cada sistema se analizará por separado.

4.3.1.1. Costos de elementos mecánicos

La Tabla 3-4 detalla los componentes y materiales mecánicos. Según el material el precio se determina en función al peso o dimensiones.

Tabla 3-4: Costo de los materiales mecánicos

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio unitario (\$)	IVA	Precio total (\$)
1	Plancha acero negro 2010x695x2	mm	31,61	3,80	35,41
1	Plancha acero negro 1600x98x2	mm	6,97	0,82	7,79
2	Plancha acero negro 67x67x2	mm	11,95	1,43	26,76
2	Concreto refractario CERCAST 2900	kg	57,42	6,89	128,62
1	Manta fibra cerámica 7620x610x25	mm	44,66	5,36	50,02
71	Ladrillo denso refractario SK-34 230x114x65	mm	3,52	0,42	279,74
1	Tubo estructural cuadrado negro 3000x60x2	mm	15,5	1,86	17,36
1	Varilla redonda ASTM A36 Ø15	mm	7,00	0,84	7,84
1	Crisol de 60 kg de capacidad	-	308,00	42,00	350,00
2	Disco Diamante Rhino	-	11,00	1,32	24,64
Subtotal 1					928,18

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.3.1.2. Costos de elementos eléctricos

Para el quemador y sistema de control de temperatura se utilizaron elementos eléctricos. A continuación, se detallan los valores correspondientes a estos componentes:

Tabla 4-4: Costo de los componentes eléctricos

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio unitario (\$)	IVA	Precio total (\$)
1	Control de temperatura digital 1200 °C 220V TIPO K	-	36,15	4,34	40,49
1	Electroválvula 1/2" 220V cerrada	-	49,11	5,89	55,00
1	Luz Ø22 CSC verde 220V	mm	1,56	0,19	1,75
1	Luz Ø22 CSC naranja 220V	mm	1,47	0,18	1,65
1	Selector Ø22 2 posiciones CSC	-	1,79	0,21	2,00
1	Termocupla tipo K cerámica 1300 °C	-	31,25	3,75	35,00
1	Contactador 220V	-	19,54	2,34	21,88
1	Tablero metálico SBOX 30X20X15	cm	30,35	3,64	33,99
1	Controlador de flama 220V	-	180,00	21,60	201,60
2	Pulsador Ø22	mm	1,51	0,18	3,38
1	Blower 200V	-	120,00	14,40	134,40
1	Luz con sonido EBS rojo Ø22 220 VAC	mm	2,28	0,27	2,55
1	Pulsador plástico hongo Ø40 rojo 1NC	mm	2,21	0,27	2,48
1	Interruptor de levas 3P DIX para candado 20A ON-OFF	-	7,42	0,89	8,31

1	Riel DIN 35mm 1 metro acero perforado	-	1,76	0,21	1,97
2	Relay 8 pines redondos serie MK2 220VAC	-	4,27	0,51	9,56
4	Base relay timer 8 pines redondos pequeño	-	1,43	0,17	6,41
2	Timer ON delay 220VAC EBC	-	8,93	1,07	20,00
6	Tope bornera riel fat	-	0,20	0,02	1,34
11	Tapa para bornera LEIPOLE 4	mm	0,22	0,03	2,71
1	Puente equipotencial 4 LEIPOLE	mm	1,13	0,14	1,27
15	Bornera riel 4 #10AWG LEIPOLE	mm	0,42	0,05	7,06
2	Prensa estopa PG16 negra hueco=22,5	mm	0,59	0,07	1,32
2	Prensa estopa PG21 negra hueco=28,30	mm	0,91	0,11	2,04
2	Prensa estopa PG13,5 negra hueco=20,4	mm	0,47	0,06	1,05
22	Cable flexible TFF #18 AWG	m	0,17	0,02	4,19
4	Cable flexible TFF #16 AWG	m	0,24	0,03	1,08
10	Terminal U rojo 1/8 22-18AWG 1,25-3Y	-	0,05	0,01	0,56
30	Terminal U azul 1/8 16-14AWG 2-3Y	-	0,05	0,01	1,68
10	Terminal puntera doble 2x18 rojo	-	0,03	0,00	0,34
20	Terminal puntera simple 18-16 AWG amarillo	-	0,02	0,00	0,45
10	Terminal puntera simple 16-14 AWG rojo	-	0,02	0,00	0,22
25	Amarras 10cm T4 blanca DXN3004B	-	0,01	0,00	0,28
4	Base adhesiva 20x20 CV-100 a CV-400	mm	0,03	0,00	0,13
6	Tornillo autoperforante C/100 1/2"	-	0,03	0,00	0,20
1	Bornera plástica transparente 15A 16AWG y 14AWG	-	1,39	0,17	1,56
6	Cable concéntrico 2x18awg	m	0,45	0,05	3,02
2	Cable concéntrico 3x18awg	m	0,55	0,07	1,23
2	Cable concéntrico 2x16awg	m	0,68	0,08	1,52
1	Cable para termocupla PT100 3 hilos PC105B	m	1,97	0,24	2,21
3	Cable termocupla C105/6/7	m	3,33	0,40	11,19
1	Caja plástica retroquel 160x120x80 10 PG16	mm	4,30	0,52	4,82
Subtotal 2					633,90

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.3.1.3. Costo de mano de obra

En la Tabla 5-4 se detalla los costos de mano de obra empleada tanto para la parte de la construcción mecánica como para la implementación eléctrica.

Tabla 5-4: Costo de mano de obra

Cantidad	Descripción	horas/hombre	USD/hora	Precio total (\$)
1	Técnico soldador	48	3,75	180,00
1	Técnico eléctrico	56	4,25	238,00
Subtotal 3				418,00

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.3.1.4. Costo de transporte

Para el proyecto se ha estimado gastos de transporte referentes al envío de los materiales refractario desde distintas ciudades del país, al consumo de combustible para el vehículo debido a que se movilizó en búsqueda de diferentes componentes eléctricos para la construcción del quemador y al transporte del horno hacia el taller de fundición. Estas tres actividades generan un costo de 90 dólares aproximadamente. Este valor participa de manera notable en el proyecto por lo que es considerado como un costo directo.

4.3.1.5. Costo directo total

Para establecer el costo total directo se debe sumar los subtotales referentes a los costos de elementos mecánicos, elementos eléctricos, mano de obra y transporte. La Tabla 6-4 muestra el valor del costo total directo del proyecto.

Tabla 6-4: Costo directo total

Descripción	Costo total (\$)
Subtotal 1	928,18
Subtotal 2	633,90
Subtotal 3	418,00
Costo de transporte	90,00
TOTAL	2070,08

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.3.2. Costos indirectos

Estos costos influyen indirectamente en el precio del horno. Se toma en cuenta los costos por conceptos ingenieriles que tienen un valor de 10% a 15% del costo total y hacen relación al tiempo de diseño del horno. Se toma en cuenta además los imprevistos que pueden surgir durante el trabajo con un valor del 5%.

Tabla 7-4: Costos indirectos

Descripción	Porcentaje	Precio total (\$)
Ingenieriles	12,00 %	248,41
Imprevistos	5,00 %	103,50
Utilidad	0,00 %	0,00
Otros	3,00 %	62,10
TOTAL		414,02

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.3.3. Costos totales

El costo total será la sumatoria de los costos directos e indirectos de fabricación, tomando en cuenta que en estos valores ya se encuentra incorporado el valor del IVA. En la Tabla 8-4 se muestra el costo total de inversión para el presente proyecto de titulación.

Tabla 8-4: Costo total de la construcción del equipo

Costo	Valor total (\$)
Directo	2070,08
Indirecto	414,02
TOTAL	2484,10

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

La inversión total que se ha realizado para la construcción del horno es de 2484,10 USD.

4.4. Manual de operaciones

Una vez finalizada la construcción y verificación del funcionamiento del horno de fundición, es indispensable capacitar al operario en el manejo del equipo. Para ello, se elabora un manual de operación en el que se describe el procedimiento para su puesta en marcha y operación.

4.4.1. Componentes del horno de fundición semiautomatizado

En la figura que se muestra a continuación se puede evidenciar los componentes que forman parte del horno de fundición semiautomatizado.



Figura 21-4: Componentes del horno de fundición

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

1. Cuerpo del horno.
2. Estructura de soporte.
3. Tapa.
4. Quemador de aire forzado.
5. Tablero de control.

En la Figura 22-4 se muestra los componentes eléctricos que forman el tablero de control.

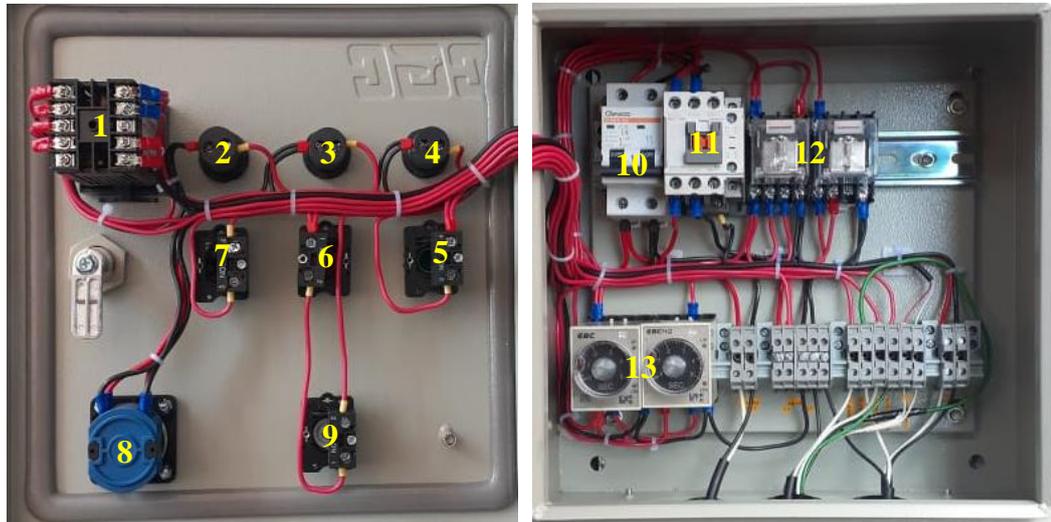


Figura 22-4: Componentes eléctricos del tablero de control
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

1. Control de temperatura digital.
2. Luz roja con sonido (en caso de fallo).
3. Luz led naranja (controlador de flama en operación).
4. Luz led verde (blower en operación).
5. Botón de inicio.
6. Botón de paro.
7. Selector (encendido y apagado del controlador de flama).
8. Encendido general.
9. Paro de emergencia.
10. Breaker.
11. Contactor.
12. Relay.
13. Timer.

En la figura 23-4 se observa la interfaz de control del equipo.



Figura 23-4: Interfaz de control
Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

1. Control de temperatura digital.
2. Luz roja con sonido (en caso de fallo).
3. Luz led naranja (controlador de flama en operación).
4. Luz led verde (blower en operación).
5. Botón de inicio.
6. Botón de paro.
7. Selector (encendido y apagado del controlador de flama).
8. Encendido general.
9. Paro de emergencia.

4.4.2. Instrucciones de seguridad

Cuando se trabaja con equipos que producen calor, deben cumplirse algunas normas básicas de seguridad para evitar lesiones físicas en el operario o daños materiales. Para minimizar los riesgos al poner en funcionamiento el equipo hay que seguir rigurosamente las siguientes instrucciones.

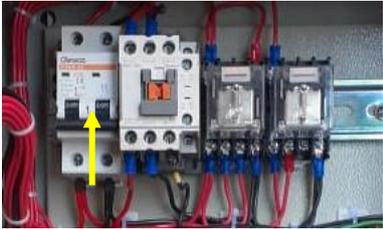
- Lea atentamente cada una de las instrucciones antes de utilizar el equipo de fundición.
- Utilizar los equipos de protección personal (casco de seguridad, gafas con resguardos laterales, protección auditiva, mascarilla con filtros, delantal, guantes y polainas de cuero, calzado de seguridad) durante todo el proceso fusión y colado del metal o aleación.

- Ubique el equipo de fundición en una superficie estable y nivelada.
- El cable de alimentación de suministro eléctrico debe situarse en una zona estratégica, lejos del calor, sustancias inflamables y superficies cortantes.
- Si el cable de alimentación presenta fallas, no utilice el equipo hasta que sustituya el cable por uno en perfecto estado.
- Antes de enchufar el cable de alimentación al suministro de 220V verifique que los componentes eléctricos se encuentren desenergizados.
- Verificar el buen estado de la línea de suministro de gas GLP hacia el quemador.
- Antes de encender el quemador, libere la presión interna en la línea de suministro de gas abriendo la válvula de esfera.
- Durante el encendido del quemador procurar no abrir y cerrar la válvula de esfera, pues se produciría acumulación de presión en la tubería de suministro de gas lo que provocaría pequeñas detonaciones dentro de la cámara de combustión.
- Mientras el equipo esté en funcionamiento, evite tocar la superficie del cuerpo del horno para prevenir quemaduras.
- El quemador debe estar apagado para iniciar el proceso de colado del material.
- Desconectar el sistema eléctrico y suministro de gas cuando el equipo no esté en operación o se encuentre en mantenimiento.
- Procurar no emplear disolventes o diluyentes para ejecutar trabajos de limpieza en el horno o en los componentes eléctricos del tablero de control.
- Compruebe que no exista la presencia de líquidos o gases inflamables en la zona de trabajo.
- El uso del equipo está destinado exclusivamente para los operarios del taller de fundición, se prohíbe el uso a personas ajenas a esta actividad con el fin de precautelar su seguridad.

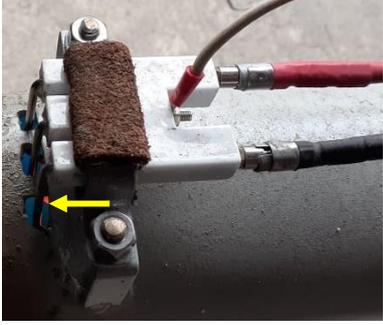
- Está prohibido utilizar el equipo de fundición en actividades no establecidas por el manual de operación.
- Antes de efectuar cualquier modificación en el equipo, consulte con personal técnico capacitado para evitar que se produzcan accidentes o lesiones graves en los operarios producto de modificaciones no autorizadas.

4.4.3. Instrucciones de operación

Tabla 9-4: Instrucciones de operación del equipo

Paso	Descripción de la acción	Descripción gráfica
01	Conectar el equipo a la red eléctrica de 220V y al suministro de gas.	
02	Energizar los componentes eléctricos del tablero de control accionando el breaker.	
03	Colocar ceniza entre la base de soporte y el fondo del crisol.	
04	Centrar correctamente el crisol y el cargador sin carga en el interior de la cámara de combustión del horno.	

05	Accionar el encendido general.	
06	Revisar que el control de temperatura digital muestre la temperatura interna del horno y la máxima permitida (1200 °C).	
07	Encender el controlador de flama.	
08	Pulsar el botón de inicio, esperar 10 segundos de barrido de los gases y verificar que se genere la chispa de ignición.	
09	Abrir lentamente la válvula de esfera para permitir que el gas GLP fluya.	

10	Comprobar que el proceso de combustión ha iniciado sin inconvenientes. De no ser así se activará la luz roja de fallo.	
11	Precalentar el horno durante unos 15 minutos.	
12	Pulsar el botón de paro para detener el proceso.	
13	Cargar en el crisol el metal o aleación a fundir, cerrar el horno para evitar pérdidas de calor y repetir los pasos 08, 09 y 10.	
14	Apagar el horno una vez que se ha obtenido el metal líquido.	

15	Presionar el botón paro de emergencia en caso de que se produzca un accidente y sea necesaria la parada inmediata del equipo.	
16	Desenergizar los componentes eléctricos del tablero de control desactivando el breaker.	

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

4.4.4. Plan de mantenimiento

El horno de fundición necesita un ligero mantenimiento para su correcto funcionamiento. En la Tabla 10-4 se detalla el plan de mantenimiento para sus principales componentes.

Tabla 10-4: Plan de mantenimiento

Componente	Actividad a realizar	Diario	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Sistema de suministro de gas	Detección y eliminación de fugas de gas.	X					
	Inspección completa de toda la línea de suministro.					X	
	Inspección de uniones, codos y acoplamientos.				X		
	Limpieza de las tuberías del sistema.					X	
Válvulas de control	Controlar que no exista fuga de gas en la posición cerrada.	X					
	Revisar daños mecánicos en sus partes.						X
Conexión eléctrica	Realice una inspección del estado de los empalmes entre conductores y de la cubierta de cinta adhesiva aislante en caso de existir.	X					
	Revisar el estado y continuidad del cableado eléctrico, verificando que no existan roturas, presencia de daño mecánico o recalentamientos.	X					
Tablero de control	Inspección visual de la integridad del tablero de control.	X					
	Limpiar el tablero de suciedad y polvo.		X				
	Realizar mediciones de voltaje y corriente en el cable alimentador del tablero.			X			
	Eliminar goteos o condensación de agua sobre el tablero en el caso de existir.	X					

	Inspección del funcionamiento de la interfaz de mando y control.	X					
	Revisar el estado de los contactos del circuito de control.					X	
	Examinar el estado de los componentes eléctricos.			X			
Termocupla	Revisar el estado de la termocupla y examinar que no posea deformaciones.			X			
	Comprobar que los cables de conexiones estén en buen estado.			X			
Cámara de combustión	Verificar si la pared refractaria de la cámara presenta grietas o fracturas, en caso se haberlas realizar el curado con material refractario.			X			
	Mantener el horno cerrado para impedir que la humedad ingrese al interior de la cámara.	X					
Crisol	Revisar el estado del crisol y verificar que no exista ningún tipo de desgaste que provoque fracturas.			X			
Quemador	Inspeccionar el funcionamiento de la varilla de ignición.				X		
	Realizar una inspección de la varilla de falla de flama.				X		
	Ejecutar una inspección de la válvula solenoide.				X		
	Comprobar que los cables de conexiones estén en buen estado.			X			

Realizado por: Amaguaya, J.; Sefla, H., 2021.

CONCLUSIONES

Mediante la investigación bibliográfica se logró conocer los tipos de hornos que se utilizan para la fundición de metales y aleaciones, comprendiendo que estos se diferencian principalmente por su diseño y capacidad, y que el tipo de horno a emplearse en un proceso de fundición se establecerá en función de los factores: producción requerida del horno, tipo de material a fundir, capacidad económica y tipo de industria. Con la información recopilada se pudo establecer que, de acuerdo a las necesidades y requerimientos de producción del taller de fundición, los hornos para capacidades bajas son los más apropiados.

Los parámetros que se determinó para el diseño del horno de fundición fueron los relacionados con el tipo de material a fundir, temperatura y tiempo de operación, capacidad de carga del crisol y la cantidad de calor necesario para el proceso de fundición. A partir de los parámetros establecidos, se desarrolló cálculos de transferencia de calor que ayudó a seleccionar los espesores de las paredes refractarias para la construcción del horno. Se seleccionó los espesores que presentaron el mejor equilibrio entre el aislamiento conseguido y su costo, con el propósito de tener ahorros significativos en el proyecto.

Mediante la matriz de ponderación se realizó un análisis de alternativas que permitió seleccionar para el diseño, el horno de crisol no basculante o estacionario por ser el tipo de horno más adecuado, de fácil diseño y construcción, de fácil operatividad y mantenimiento, bajo consumo de energía y bajo costo de mantenimiento y fabricación con respecto a otros hornos que, además de tener un alto costo de inversión inicial para la construcción y su manejo, requieren de una capacitación previa. Como combustible para el funcionamiento del horno se seleccionó el GLP ya que este brinda un alto poder calorífico, alta eficiencia, no causa contaminación ambiental y es de gran accesibilidad en el país. Con la selección realizada se obtuvo un diseño acorde a las necesidades y requerimientos del taller de fundición.

Se realizó el diseño y modelado del horno crisol de fundición empleando el software SolidWorks educativo; por medio de un análisis estático efectuado en el mismo software, se verificó la rigidez del diseño de la estructura de soporte del horno asegurando que esta soportará las cargas estáticas presentes debido al peso de los componentes y al peso de la carga del material a fundir. Además, para validar el comportamiento del cuerpo del horno se realizó un análisis térmico empleando el software ANSYS académico, que determinó una temperatura

superficial de 150,7 °C cuando se alcance la temperatura máxima de operación, siendo este análisis el más cercano a la realidad. Por otro lado, en los cálculos teóricos del diseño del horno se obtuvo una temperatura superficial de 154 °C.

A partir del modelado CAD y su respectiva validación se construyó y ensambló el horno crisol estacionario para la fundición de bronce que posee las características requeridas por el taller de fundición Granito de Mostaza. El horno se construyó para una capacidad de 60 kg de aleación de bronce y puede operar a una temperatura máxima de 1200 °C, su uso se extiende a otros metales o aleaciones cuyas temperaturas de fusión se encuentren por debajo de los 1200 °C, sus dimensiones son: diámetro de la cámara de combustión 0,370 m, diámetro exterior 0,652 m, altura incluyendo la estructura de soporte y tapa 1,061 m. A través de las paredes del horno se pierde una cantidad de calor total de 2407,54 Kcal/h por lo que el equipo requiere una cantidad de energía de 11042,37 Kcal/h para que el bronce alcance la temperatura de 1100 °C, esta cantidad de energía debe ser suministrada por un quemador con una potencia mínima de 16,42 KW.

Se realizó la semiautomatización del sistema de combustión basado en un controlador automático de ignición a gas, el cual controla el encendido abriendo la electroválvula y generando la chispa para la combustión del GLP. Además, si la llama se apaga accidentalmente o no se logra encender, un sensor envía una señal de alarma y cierra la electroválvula de suministro del gas inmediatamente. También se utilizó un controlador de temperatura el mismo que actúa con una termocupla, este es el que indica los grados de temperatura dentro del hogar del horno. El controlador se programó con una temperatura máxima de 1200 °C, en donde al alcanzar esta temperatura todo el sistema de combustión se apaga después de 10 segundos. Al hacer que el sistema de combustión sea semiautomático se logró precautelar la salud e integridad del operador del horno, evitando tareas que con anterioridad se hacía de manera manual.

En la prueba de precalentamiento se alcanzó una temperatura máxima de 518 °C en 15 minutos de operación y por medio de la prueba de operación con arranque en caliente se determinó que para obtener 60 kg de aleación de bronce se requiere de 50 minutos de operación y aproximadamente de 5 kg de combustible GLP, la temperatura máxima que se alcanzó en este tiempo fue de 1165 °C. Con la realización de las pruebas de funcionamiento se verificó que el equipo de fundición posee un correcto desempeño.

Se elaboró un manual de operación y mantenimiento que abarca una fuente importante de información a la que el operario debe recurrir para hacer uso correcto del horno de fundición y realizar las diferentes actividades para las cuales fue diseñado. La correcta aplicación del manual precautela la integridad tanto del horno como de los operarios.

RECOMENDACIONES

Antes de iniciar el proceso de fundición, se recomienda precalentar la cámara de combustión y el crisol sin carga durante 15 minutos, con la ventana de aspiración de aire del blower cerrada y la válvula de paso de gas abierta un 10% para evaporar la humedad y evitar probables fracturas en las paredes.

Para mejorar el funcionamiento del equipo se debe considerar implementar un sistema mecánico o automatizado para el levantamiento y cierre de la tapa en lugar de hacerlo manualmente, con esto se busca reducir los esfuerzos a los que se somete el operario al realizar esta actividad. Además, se recomienda controlar el flujo de aire primario suministrado por el blower mediante la instalación de una válvula de control de manera que se logre disminuir o aumentar la circulación del calor hacia la cámara del horno.

Se recomienda la instalación de una centralina para conducir el GLP desde dos cilindros hacia el quemador, con el fin de que se pueda aprovechar al máximo la presión del tanque y principalmente para evitar la congelación del cilindro debido a un consumo intensivo de gas.

Para que el ladrillo refractario tenga una mayor vida útil se recomienda recubrirlo con una mezcla de concreto CERCAST™ 2900 u otro tipo de concreto refractario cada cierto tiempo, así como evitar trabajar con temperaturas superiores a los 1200 °C durante largos periodos de tiempo, ya que esto acorta la vida del ladrillo refractario y además puede deteriorar la termocupla.

Debe darse prioridad a la utilización de materiales, componentes y equipos que puedan conseguirse a nivel provincial o nacional, ya que el tiempo necesario para la construcción del horno de fundición depende directamente de ello.

Se presenta fuga de calor a través de las paredes del horno a pesar de que este cuenta con aislamiento térmico. Además, se tiene emisión de gases producto de la combustión y calor que escapa por la abertura de la tapa, por lo que es recomendable construir un lugar adecuado para la instalación del horno que tenga buena ventilación, esté libre de humedad y tenga instalado una chimenea de evacuación que cumpla con normas ambientales de emisión de gases.

Debido a que el operario del horno está en contacto con el calor y el material fundido, se recomienda utilizar el equipo de protección personal mencionado en las instrucciones de seguridad del manual de operaciones, además de tener cerca un extintor de incendios para el caso de que se produzca algún accidente.

A fin de garantizar el adecuado funcionamiento y perfecto estado del horno de fundición, se debe capacitar a los operarios sobre el uso, funcionamiento y mantenimiento del equipo, para lo cual se recomienda emplear el manual de operaciones propuesto.

GLOSARIO

Calor específico: Se entiende por calor específico o capacidad calórica específica a la cantidad de calor que se requiere para que una unidad de una sustancia incremente su temperatura en una unidad de grado Celsius (Çengel et al., 2019).

Colado: Es el proceso de verter el material fundido desde la cuchara al molde, hasta el llenado de la pieza a través de los conductos establecidos en el molde. Para poder realizar el colado del metal, inicialmente hay que fundir y ajustar la composición del mismo (Groover, 2020).

Conductividad térmica: Es una medida de la capacidad del material para conducir el calor, puede definirse como la tasa de transferencia de calor a través de una unidad de espesor de material por unidad de superficie por unidad de diferencia de temperatura (Çengel y Ghajar, 2020).

Forja: Procedimiento que cambia la forma de los metales a través de una deformación plástica generada por impacto o presión, la deformación controlada del metal efectuada a elevadas temperatura origina mejor calidad metalúrgica y aumento de las propiedades mecánicas (Ríos y Vargas, 2018).

Grashof: El número de Grashof es una medida de las magnitudes relativas de la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa en oposición que actúan sobre el fluido (Çengel y Ghajar, 2020).

Laminación: Consiste en reducir la sección transversal de un material haciéndolo pasar entre dos rodillos cilíndricos que giran en direcciones opuestas, estos rodillos producen la deformación plástica del material por medio de esfuerzos de compresión y corte (Kalpakjian y Schmid, 2008).

Nusselt: Es una magnitud bastante utilizada para la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección, basada en el análisis dimensional, la cual es utilizada para determinar parámetros a través de relaciones de similitud (Çengel y Ghajar, 2020).

Prandtl: Es una cantidad adimensional que relaciona la difusividad de la cantidad de movimiento, a través de la viscosidad cinemática de un fluido, con su difusividad térmica (Çengel y Ghajar, 2020).

Rayleigh: Es un número adimensional asociado con la transferencia de calor en el interior del fluido. Cuando el número de Rayleigh está por debajo de un cierto valor crítico, la transferencia de calor se produce principalmente por conducción; cuando está por encima del valor crítico, la transferencia de calor se produce principalmente por convección (Çengel y Ghajar, 2020).

Temperatura de película: Se define como la temperatura de un fluido en una capa límite, se puede aproximar por el promedio aritmético de las temperaturas de la superficie y del flujo libre (Çengel y Ghajar, 2020).

BIBLIOGRAFÍA

CALLISTER, William; & REITHWISCH, David. *Ciencia e Ingeniería de Materiales* [En línea]. 2ª ed. Barcelona-España: Editorial Reverté, 2018. [Consulta: 17 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/170298>

ÇENGEL, Yunus; et al. *Termodinámica* [En línea]. 9ª ed. México, D.F: McGraw-Hill, 2019. [Consulta: 02 julio 2021]. Disponible en: <https://pdfcoffee.com/termodinamica-yunus-a-engel-novena-edicion-mc-graw-hill-pdf-free.html>

ÇENGEL, Yunus; & GHAJAR, Afshin. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* [En línea]. 6ª ed. New York-USA: McGraw-Hill Education, 2020. [Consulta: 15 junio 2021]. Disponible en: <https://dokumen.pub/heat-and-mass-transfer-fundamentals-and-applications-6nbsped-9780073398198-0073398195-9781260440027-1260440028.html>

CERDÁ FILIU, Luis Miguel. *Automatismos neumáticos e hidráulicos* [En línea]. Madrid-España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2018, [Consulta: 30 junio 2021]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=4_p6DwAAQBAJ&hl=es&source=gbs_navlinks_s

CUEVA QUINGA, Mauricio Xavier, & CHILUISA PASTUÑA, Neptalí Ramiro. Implementación de un sistema de convección forzada mediante combustión a gas en el horno de pintura electrostática de la empresa Metal Electric [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Escuela de Ingeniería Industrial. Latacunga, Ecuador. 2019. pp. 33-34. [Consulta: 16 mayo 2021]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/5476/1/T-001069.pdf>

DIEZ, Ana María; et al. *Eficiencia energética en las instalaciones de calefacción y ACS en los edificios* [En línea]. España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2015. [Consulta: 03 junio 2021]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=koO5CgAAQBAJ&hl=es&source>

ENTRENA GONZÁLES, Francisco. *UF0565: Eficiencia energética en las instalaciones de calefacción y ACS en los edificios* [En línea]. Málaga-España: IC Editorial, 2013. [Consulta: 07 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/43898>

FLORES GARCÍA, Evelin Yesenia, & ORELLANA NÚÑEZ, Roberto Enrique. Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Mecánica. San Salvador, El Salvador. 2014. pp. 88-88. [Consulta: 19 julio 2021]. Disponible en: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6320/>

GARCÍA LÓPEZ, José Bolívar. Diseño y construcción de un sistema de control automático para una caldera piro tubular horizontal [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Escuela de Ingeniería Electrónica en Control y Redes Industriales. Riobamba, Ecuador. 2013. pp. 62-62. [Consulta: 04 julio 2021]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3263>

GARCÍA SEGURA, Vicente. *Ejecución de fábricas para revestir: UF0303* [En línea]. Antequera-España: IC Editorial, 2018. [Consulta: 28 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/esPOCH/59191>

GROOVER, Mikell. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* [En línea]. 7ª ed. Laramie-USA: John Wiley & Sons, Inc., 2020. [Consulta: 26 mayo 2021]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=mB7zDwAAQBAJ&dq=crucible>

GUPTA, R. *Fuels, Furnaces And Refractories* [En línea]. Nueva Delhi-India: PHI Learning Private Limited, 2016. [Consulta: 27 mayo 2021]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/483030567/Fuels-Furnaces-and-Refractories-PDFDrive-com-1-pdf>

GUTIÉRREZ, Marllelis; & ITURRALDE, Sadi. *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control* [En línea]. La Libertad-Ecuador: UPSE, 2017. [Consulta: 03 julio 2021]. Disponible en: <https://www.fnmt.es/documents/10179/10666378/Fundamentos+básico+de+instrumentación+y+control.pdf/df746edc-8bd8-2191-2218-4acf36957671>

ILLÁN GÓMEZ, Fernando. *UF0565: Eficiencia energética en las instalaciones de calefacción y ACS en los edificios* [En línea]. Lorquí-España: Cano Pina, 2015. [Consulta: 07 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/esPOCH/43126>

INEN 607 1981-05. *Materiales refractarios. Formas y dimensiones recomendadas de ladrillos y piezas de caras planas.*

INEN 608 1981-11. *Materiales refractarios. Terminología.*

IÑIGUEZ MALLOL, Santiago. *¿Qué es la automatización de procesos?* [blog]. [Consulta: 30 junio 2021]. Disponible en: https://es.over-blog.com/Que_es_la_automatizacion_de_procesos-1228321767-art127041.html

JAMI JAMI, Milton Danilo. Diseño y construcción de un molde permanente para la fabricación de bornes de baterías automotrices [En línea] (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidad Internacional SEK, Facultad de Arquitectura e Ingeniería. Quito, Ecuador. 2018. pp. 16-16. [Consulta: 10 mayo 2021]. Disponible en: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2793>

KALPAKJIAN, Serope; & SCHMID, Steven. *Manufactura, ingeniería y tecnología* [En línea]. 5ª ed. México: Pearson Educación, 2008. [Consulta: 28 mayo 2021]. Disponible en: https://www.academia.edu/45035516/Manufactura_ingenieria_y_tecnologia_Kalpakjian_5ta_edicion_

MAZÓN FIERRO, Guido Javier. Rehabilitación de un horno a gas para cerámica [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica. Riobamba, Ecuador. 2009. pp. 79-81. [Consulta: 02 septiembre 2021]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/273>

MEJÍA SILVA, Wendy Stephania, & VILLALOBOS BAQUERO, Gina Fernanda. Diseño de un horno por inducción para prácticas en laboratorio [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Mecánica. Bogotá, Colombia. 2019. pp. 75-75. [Consulta: 03 julio 2021]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7322/1/4132695-2019-1-IM.pdf>

METALINSUMOS. *Guía para el uso y cuidado de crisoles* [blog]. [Consulta: 15 julio 2021]. Disponible en: <https://docplayer.es/10373823-Guia-para-el-uso-y-cuidado-de-crisoles-de-carburo-de-silicio.html>

MORALES GÜETO, Juan. *Tecnología de los materiales cerámicos* [En línea]. Madrid-España: Ediciones Díaz de Santos, 2012. [Consulta: 28 junio 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/esPOCH/52877>

MORO VALLINA, Miguel. *Tecnología industrial I* [En línea]. Madrid-España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2016. [Consulta: 26 mayo 2021]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=3xfuCwAAQBAJ&hl=es&source=gbs_navlinks_s

MOTT, Robert. *Diseño de elementos de máquinas* [En línea]. 4ª ed. México: Pearson Educación, 2006. [Consulta: 25 junio 2021]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=nrYd_BjTL0UC&hl=es&source=gbs_navlinks_s

MURRIETA LUNA, Edilberto; et al. "Simulación de reacción de combustión (CH₄/O₂) en horno de crisol para fundición de metales no-ferrosos". *Acta universitaria* [En línea], 2019, (México) 29, pp. 4-8. [Consulta: 15 julio 2021]. ISSN 0188-6266. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-62662019000100176

NAVAS CARRILLO, Daniel. *UF0565: Eficiencia energética en las instalaciones de calefacción y ACS en los edificios* [En línea]. España: Editorial Elearning S.L., 2015. [Consulta: 03 junio 2021]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=03xXDwAAQBAJ&hl>

NORMA IEC 60204-1. *Seguridad de las máquinas. Equipo eléctrico de las máquinas. Parte 1: Requisitos generales.*

PALACIOS VÁZQUEZ, Francisco Javier. Programa en lenguaje gráfico ladder para la operación de seguridad en un quemador industrial [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Ciudad de México, México. 2016. pp. 7-13. [Consulta: 12 julio 2021]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/22365/1/tesis%20Q.%20INDUSTRIAL.pdf>

RÍOS LINARES, Ricardo; & VARGAS TAMAYO, Luis. *Procesos de fabricación en metales* [En línea]. Bogotá-Colombia: Ediciones de la U, 2018. [Consulta: 25 mayo 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/70323>

RODRIGUEZ ABURTO, Cesar. *Libro Instrumentos para Tableros* [En línea]. Bellavista-Perú: Universidad Nacional del Callao, 2012. [Consulta: 2 julio 2021]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/471748497/LIBRO-INSTRUMENTOS-PARA-TABLEROS>

ROJAS, Freddy; et al. "Diseño y Evaluación de Mezcladores de un Quemador Doméstico usando Gas Licuado de Petróleo". *Información tecnológica* [En línea], 2017, (Perú) 28 (5), pp. 4-6. [Consulta: 22 agosto 2021]. ISSN 0718-0764. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642017000500019&lang=pt

SHANMUGAM, G; & PALANICHAMY, M. *Basic Civil and Mechanical Engineering* [En línea]. India: McGraw-Hill Education, 2018. [Consulta: 25 mayo 2021]. Disponible en: https://books.google.com.ec/books?id=5_-pDwAAQBAJ&source=gbs_navlinks_s

SOTO PAYARES, Armando Enrique, & PÉREZ PINO, Frey Jonathan. Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Mecánica. Pamplona, España. 2009. pp. 14-14. [Consulta: 10 mayo 2021]. Disponible en: <https://www.academia.edu/8082546/>

SPEIGHT, James. *Handbook of Natural Gas Analysis* [En línea]. Laramie-USA: John Wiley & Sons, Inc., 2018. [Consulta: 04 junio 2021]. Disponible en: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00CYXM04/handbook-natural-gas/types-of-g-liquefied-petroleum>

SUNTAXI LOACHAMIN, Edison Eduardo, & TORRES RIASCOS, Calos David. Diseño y construcción de un horno crisol para fundición de aluminio con una capacidad de 15 kg/h a una temperatura de 800 °C utilizando GLP [En línea] (Trabajo de titulación) (Ingeniería). Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingenierías, Escuela de Ingeniería Mecánica. Quito, Ecuador. 2014. pp. 27-27. [Consulta: 29 mayo 2021]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7226/6/UPS-KT00851.pdf>

ZANÓN CUENCA, José; et al. *Fundición a la cera perdida con molde de cascarilla cerámica. Publicación docente* [En línea]. Elche-España: Universidad Miguel Hernández, 2019. [Consulta: 29 junio 2021]. Disponible en: <https://innovacionumh.es/editorial/Fundicion.pdf>

ZÁRATE, José Javier; et al. *Ciencia y Tecnología de Materiales* [En línea]. Ciudad de México: Grupo Editorial Éxodo, 2016. [Consulta: 27 mayo 2021]. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/epoch/128626>

ANEXOS

ANEXO A: INEN 607 MATERIALES REFRACTARIOS



CDU: 666.76

CO 02.07-402

Norma Técnica Ecuatoriana	MATERIALES REFRACTARIOS. FORMAS Y DIMENSIONES RECOMENDADAS DE LADRILLOS Y PIEZAS DE CARAS PLANAS	INEN 607 1981-05
---------------------------	---	-----------------------------

1. OBJETO

1.1 Esta norma establece las formas y dimensiones de los ladrillos y piezas refractarias de caras planas, frecuentemente utilizados en la construcción de las diferentes partes estructurales de hornos industriales, hogares de calderas, incineradores, conductos, etc.

2. DEFINICIONES

2.1 **Ladrillo normal o fundamental.** Para los efectos de esta norma, es el ladrillo prismático-rectangular, tomado como de dimensiones unitarias y normalizadas, cuya fabricación exige el mínimo de modificaciones en los métodos actuales de producción y utilización.

2.2 **Ladrillos prismáticos-rectangulares.** Para los efectos de esta norma, son ladrillos prismáticos-rectangulares de dimensiones diferentes al de formato normal o fundamental.

2.3 **Ladrillos o piezas prismáticas especiales.** Para los efectos de esta norma, son los ladrillos o piezas prismáticas de caras planas, en las cuales una o más caras forman, con sus adyacentes, ángulos no rectos, de formas y dimensiones normalizadas, y que se emplean generalmente en la construcción de arcos, bóvedas y cúpulas de los diferentes tipos de hornos industriales.

3. REQUISITOS

3.1 Designación INEN.

3.1.1 *Ladrillo normal o fundamental.* Se sujetará a las dimensiones y tolerancias que se indican en la Tabla 1.

TABLA 1. Ladrillo. Refractario

Formato normal o fundamental (mm)	Dimensiones y tolerancias (mm)		
	a (largo)	c (ancho)	e (espesor)
229 x 114 x 63	229 ± 5	114 ± 3	63 ± 2

3.1.2 *Ladrillos prismáticos-rectangulares.* Con una o más de sus dimensiones diferentes a las del ladrillo normal, recibirán la denominación de ladrillo recto, teja y jabón.

3.1.3 *Ladrillo recto.* Tendrá una o más de sus dimensiones diferentes a las del ladrillo normal y se sujetará a las dimensiones y tolerancias de los tipos que se indican en la Tabla 2.

(Continúa)

ANEXO B: DATA SHEET DEL CONCRETO REFRACTARIO

Product Information Sheet				Monolithic Refractory			
CERCAST™ 2900 is a high alumina, dense castable that can be cast or gunned. It displays high strengths and abrasion resistance.							
Service Temperature:	2900 °F			Material Required:	130 lb/ft ³		
Typical Water Required:	-			Maximum Grain Size:	-		
Chemical Analysis							
SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O + K ₂ O	
41.5	1.7	50.3	1.0	5.1	0.2	0.2	
Typical Physical Properties							
Tested in accordance with International and ASTM Standards							
Prefired to	Bulk Density	Cold Crushing Strength		Cold Modulus of Rupture	Permanent Linear Change		
(°F)	(lb/ft ³)	(psi)		(psi)	(%)		
230	135	2250		-	0.0		
1000	-	-		-	-0.2		
1500	130	1550		-	-0.2		
2000	-	-		-	0.0		
2400	-	-		-	0.0		
Other Physical Properties							
Tested in accordance with International and ASTM Standards							
Prefired to	Apparent Porosity	Thermal Conductivity		Hot Modulus of Rupture	Permanent Volume Change		
(°F)	(%)	(Btu.in/h.ft ² .F)		(psi)	(%)		
500	-	6.8		-	-		
1000	-	4.8		-	-		
1500	-	4.5		-	-		
2000	-	4.4		-	-		
Formerly: MOLDIT® HT, CERCAST® 16 HT, CERCAST® 1600, CERCAST® 1600 HT, CERCAST® 1600 HT FINE, DURAX® 1600, DURAX® 1600P, DURAX® C1600, THERMHYDRO™ 586A, THERMHYDRO™ 596M, THERMHYDRO™ 6010S, THERMHYDRO™ 8310, THERMHYDRO™ 836, B-4, B-6, BOK-160, PFB-1ANP, PFB1-NP, PFBOK-160NP							
Product Number:	LEA16214 MIX IN CASE			MSDS Reference:	LEA10214		
Effective Date:	12/02/2002			Revision:	A10		

ANEXO C: PROPIEDADES DEL AIRE A LA PRESIÓN DE 1 ATM

TABLE A-15							
Properties of air at 1 atm pressure							
Temp. <i>T</i> , °C	Density ρ , kg/m ³	Specific Heat c_p , J/kg·K	Thermal Conductivity k , W/m·K	Thermal Diffusivity α , m ² /s	Dynamic Viscosity μ , kg/m·s	Kinematic Viscosity ν , m ² /s	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

ANEXO D: CALOR ESPECÍFICO DEL GRAFITO

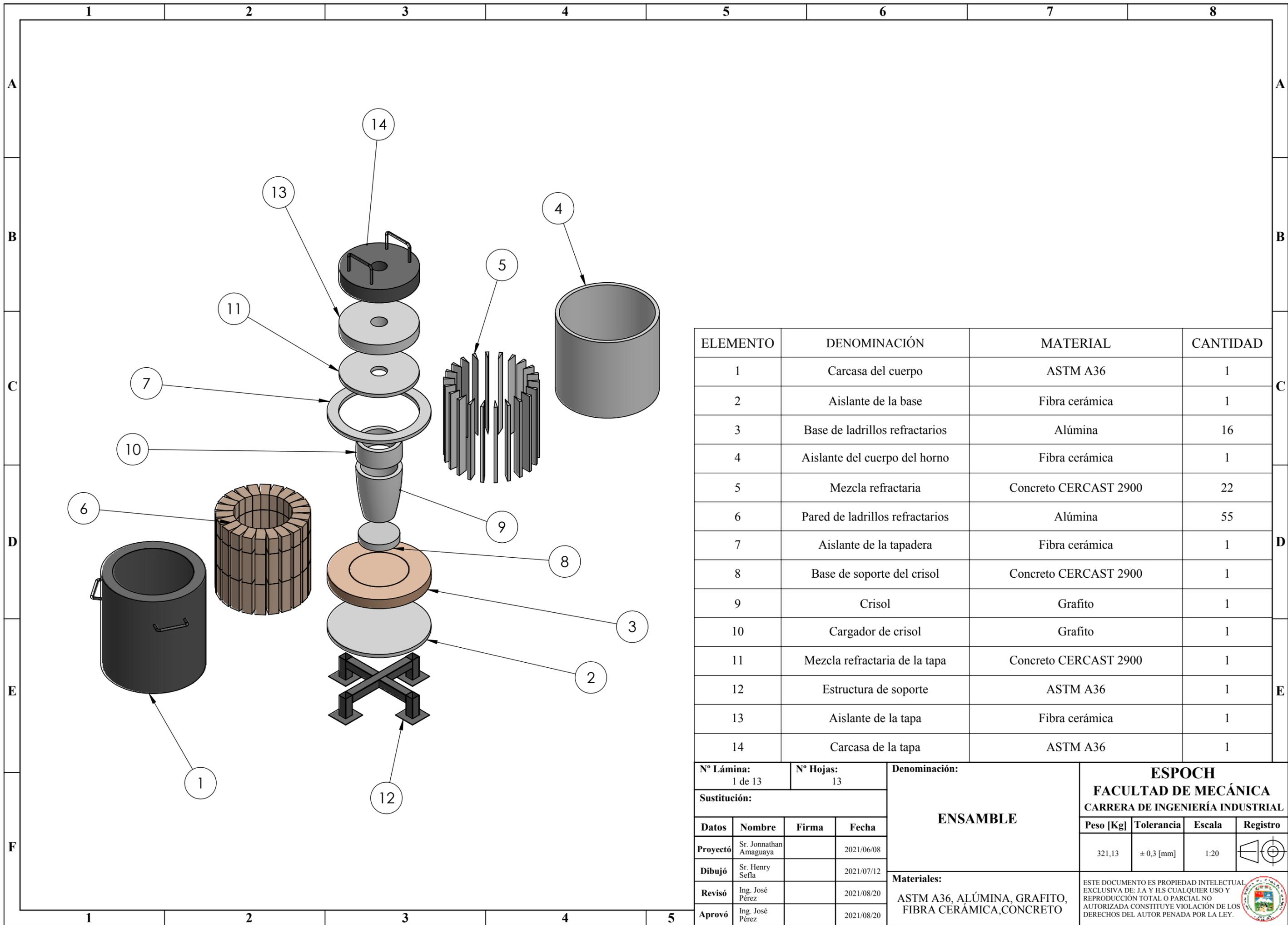
TABLA A-3

Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes (*conclusión*)

b) Sólidos (los valores son para temperatura ambiente, excepto que se indique otra cosa)

Sustancia	Densidad, ρ kg/m ³	Calor específico, c_p kJ/kg · K	Sustancia	Densidad, ρ kg/m ³	Calor específico, c_p kJ/kg · K
Metales			No metales		
Acero dulce	7 830	0.500	Arena	1 520	0.800
Aluminio			Arcilla	1 000	0.920
200 K		0.797	Asfalto	2 110	0.920
250 K		0.859	Caucho (blando)	1 100	1.840
300 K	2 700	0.902	Caucho (duro)	1 150	2.009
350 K		0.929	Concreto	2 300	0.653
400 K		0.949	Diamante	2 420	0.616
450 K		0.973	Grafito	2 500	0.711
500 K		0.997	Granito	2 700	1.017
Bronce (76% Cu, 2% Zn, 2% Al)	8 280	0.400	Hielo		
Cobre			200 K		1.56
-173 °C		0.254	220 K		1.71
-100 °C		0.342	240 K		1.86
-50 °C		0.367	260 K		2.01
0 °C		0.381	273 K	921	2.11
27 °C	8 ,900	0.386	Ladrillo común	1 922	0.79
100 °C		0.393	Ladrillo refractario (500 °C)	2 300	0.960
200 °C		0.403	Madera contrachapada (abeto Douglas)	545	1.21
Hierro	7 840	0.45	Maderas duras (maple, encino, etc.)	721	1.26
Latón amarillo (65% Cu, 35% Zn)	8 310	0.400	Maderas suaves (abeto, pino, etc.)	513	1.38
Magnesio	1 730	1.000	Mármol	2 600	0.880
Níquel	8 890	0.440	Piedra	1 500	0.800
Plata	10 470	0.235	Piedra caliza	1 650	0.909
Plomo	11 310	0.128	Vidrio para ventanas	2 700	0.800
Tungsteno	19 400	0.130	Vidrio pìrex	2 230	0.840
			Yeso o tabla de yeso	800	1.0

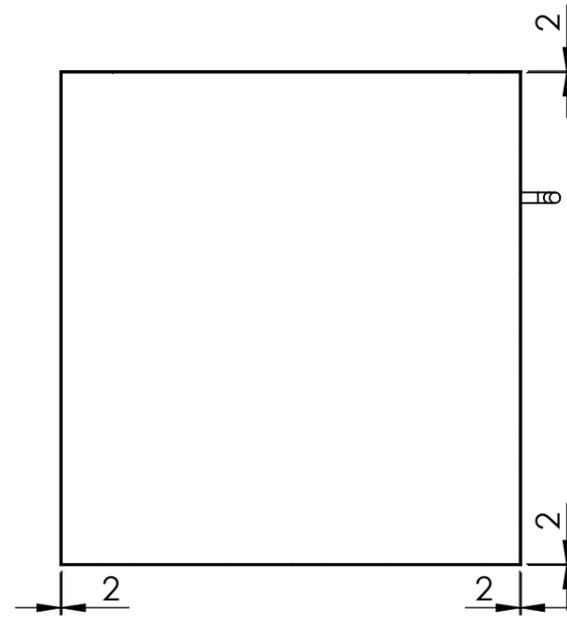
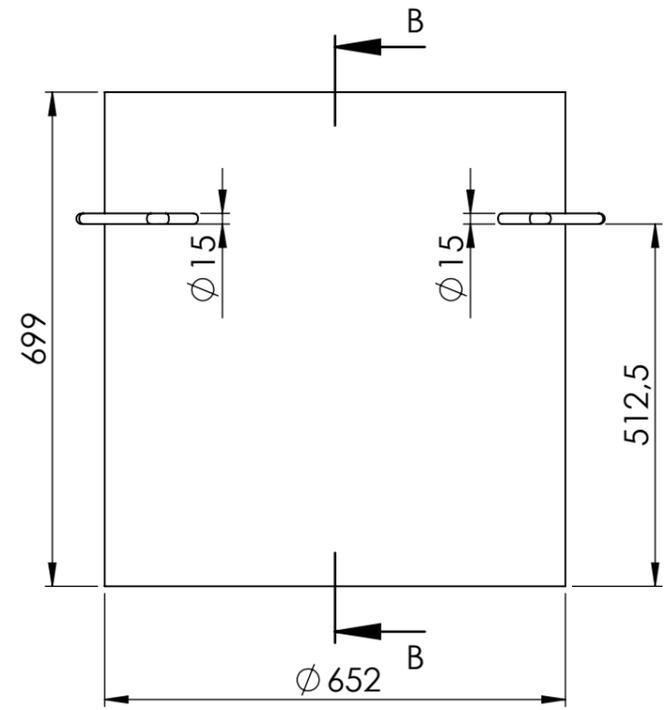
ANEXO E: PLANOS DEL HORNO CRISOL Y SUS COMPONENTES



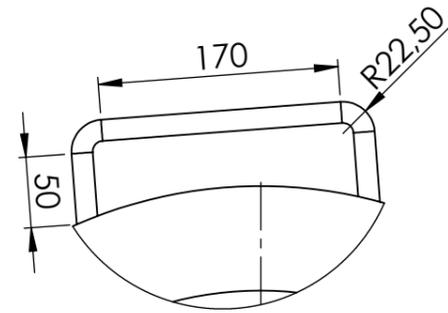
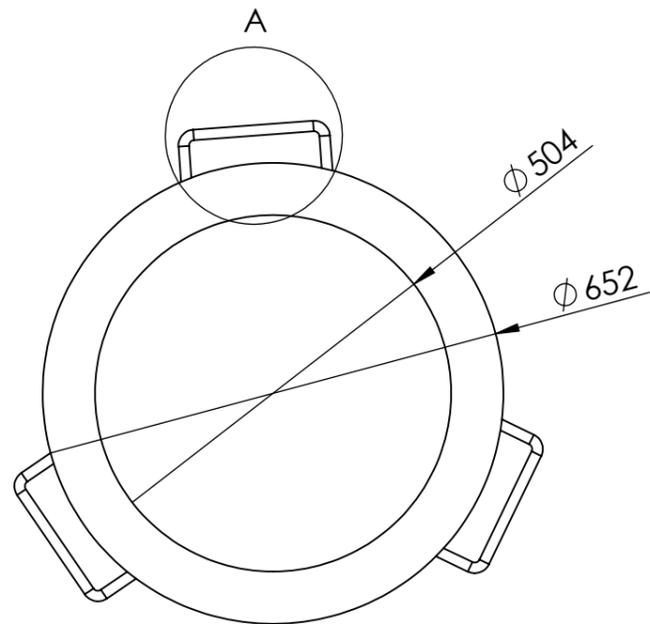
ELEMENTO	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD
1	Carcasa del cuerpo	ASTM A36	1
2	Aislante de la base	Fibra cerámica	1
3	Base de ladrillos refractarios	Alúmina	16
4	Aislante del cuerpo del horno	Fibra cerámica	1
5	Mezcla refractaria	Concreto CERCAST 2900	22
6	Pared de ladrillos refractarios	Alúmina	55
7	Aislante de la tapadera	Fibra cerámica	1
8	Base de soporte del crisol	Concreto CERCAST 2900	1
9	Crisol	Grafito	1
10	Cargador de crisol	Grafito	1
11	Mezcla refractaria de la tapa	Concreto CERCAST 2900	1
12	Estructura de soporte	ASTM A36	1
13	Aislante de la tapa	Fibra cerámica	1
14	Carcasa de la tapa	ASTM A36	1

N° Lámina: 1 de 13		N° Hojas: 13		Denominación:						
Sustitución:				ENSAMBLE						
Datos		Nombre	Firma	Fecha	Peso [Kg]		Tolerancia	Escala	Registro	
Proyectó		Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08	321,13		± 0,3 [mm]	1:20		
Dibujó		Sr. Henry Sefla		2021/07/12						
Revisó		Ing. José Pérez		2021/08/20						
Aprovó		Ing. José Pérez		2021/08/20	Materiales: ASTM A36, ALÚMINA, GRAFITO, FIBRA CERÁMICA, CONCRETO				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.	





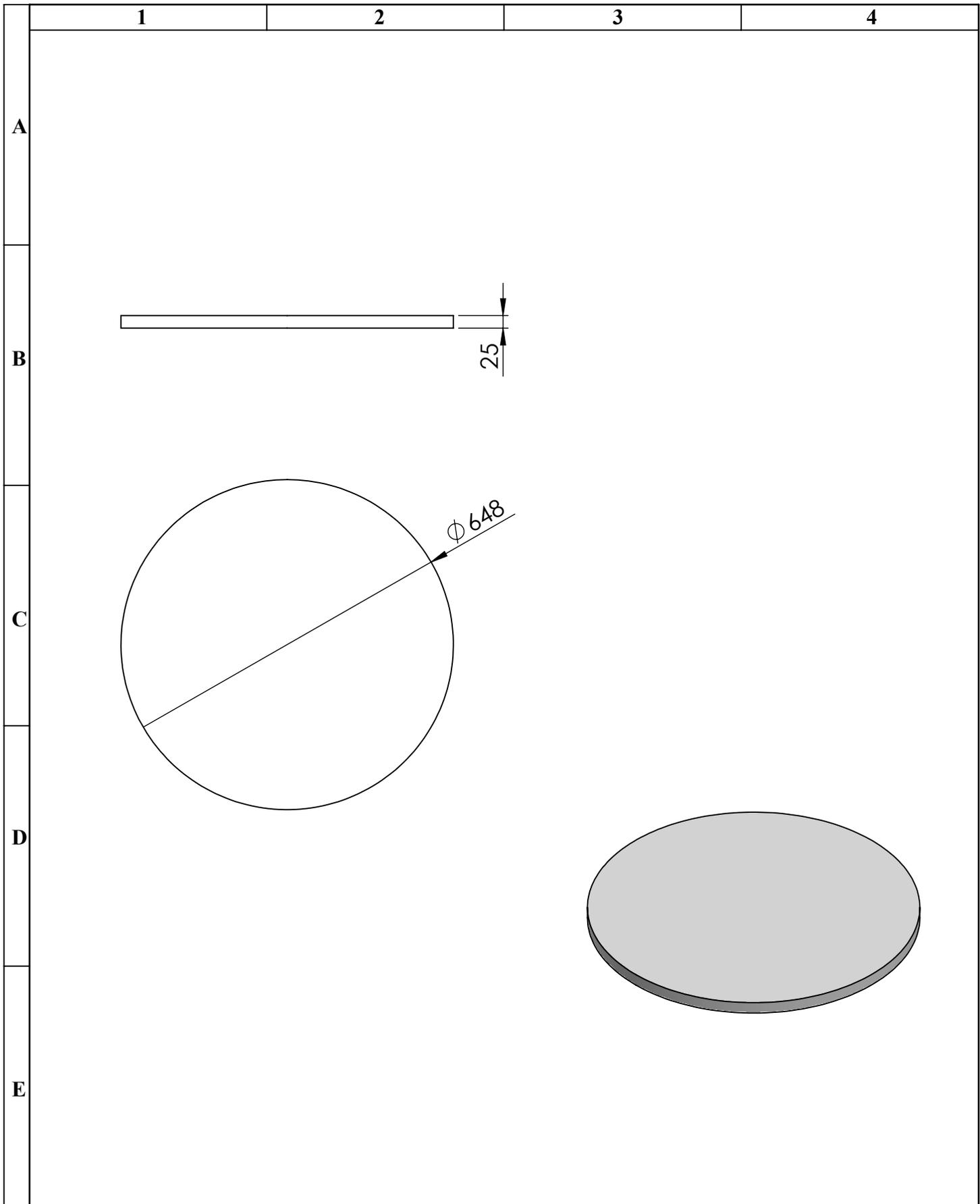
SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 10

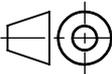


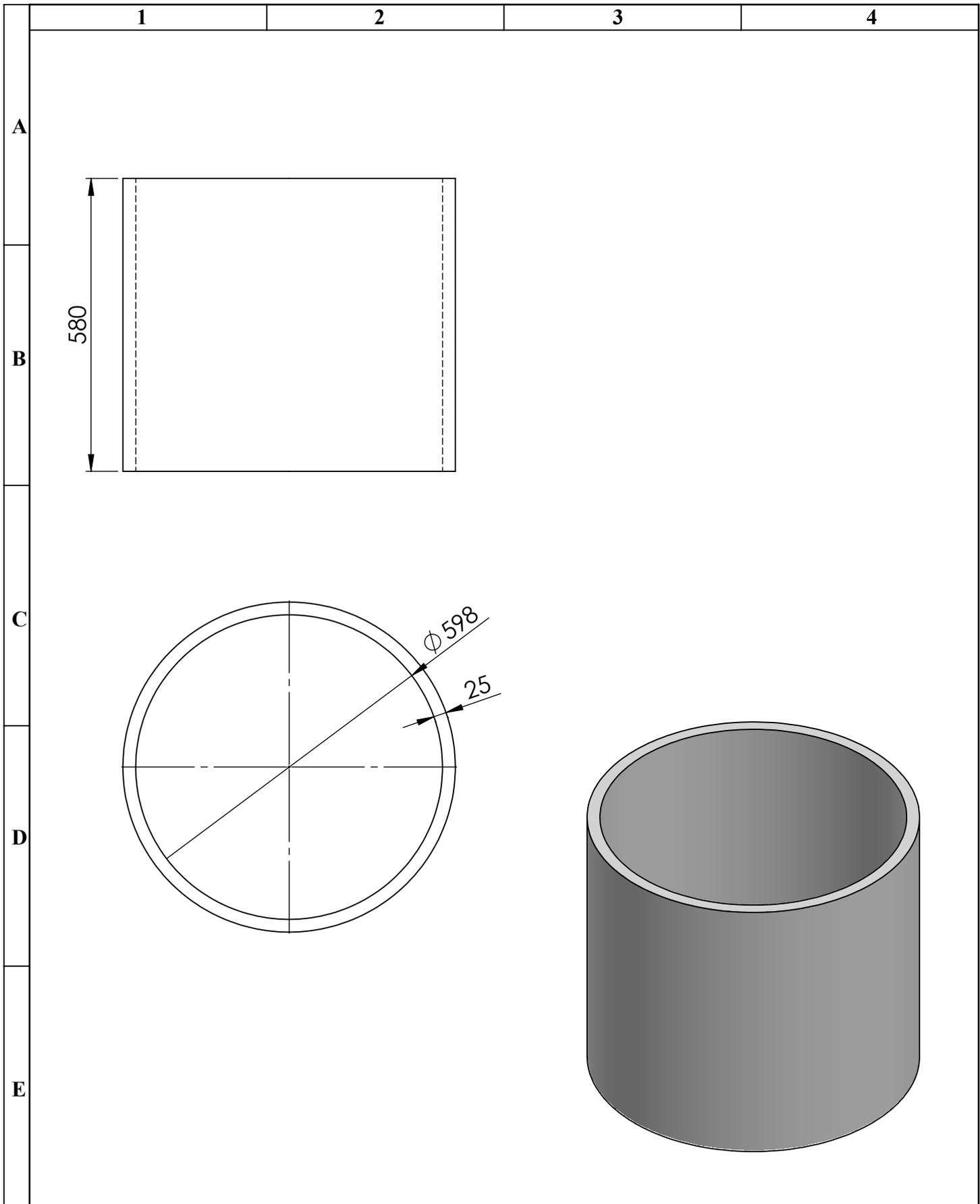
DETALLE A
ESCALA 1 : 5



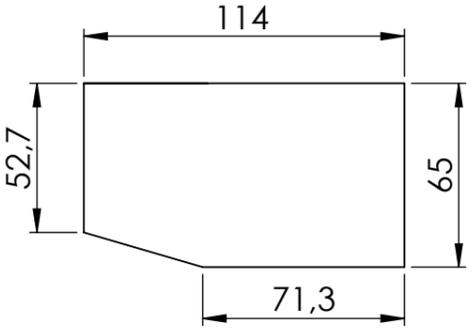
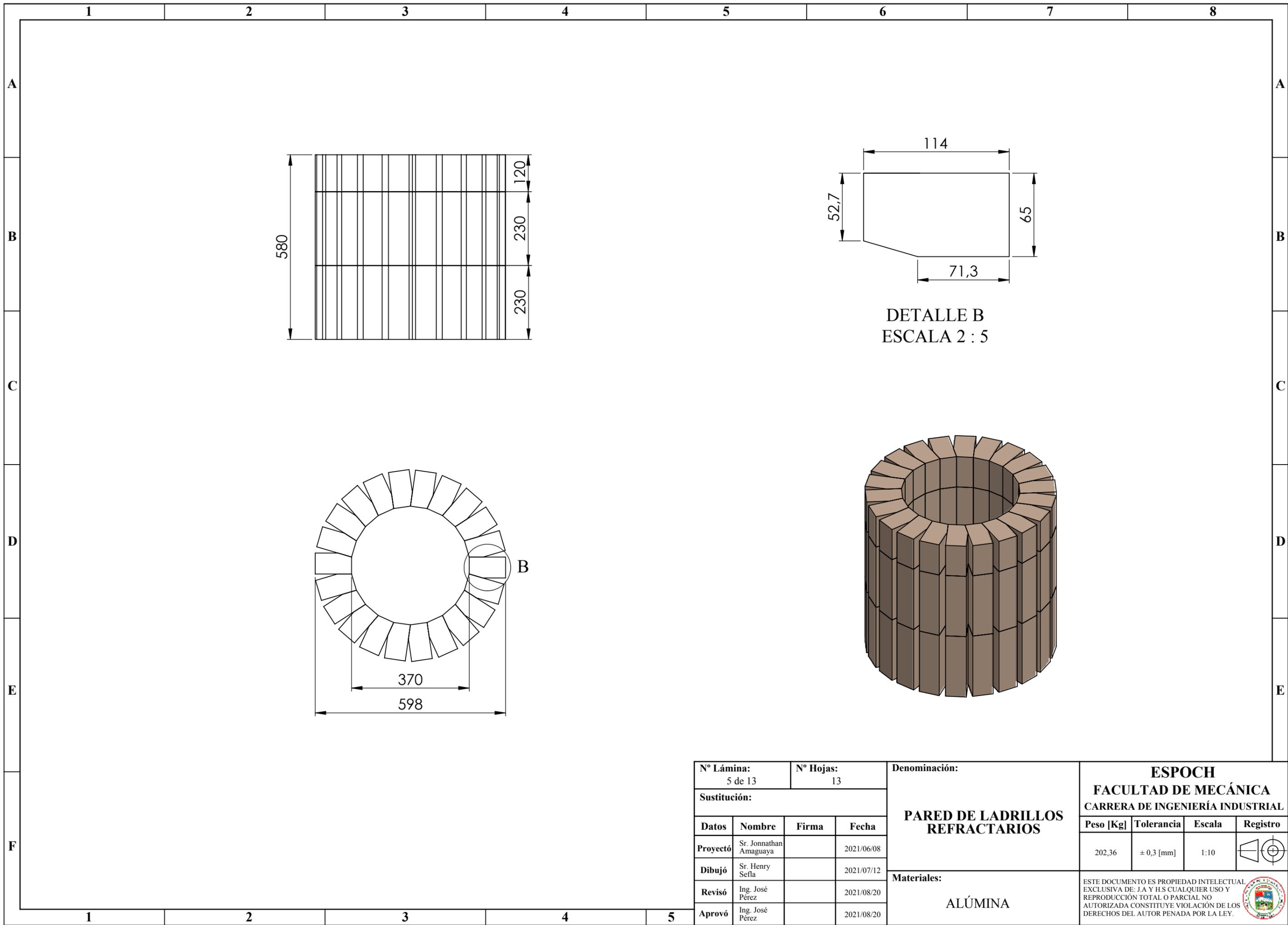
N° Lámina: 2 de 13		N° Hojas: 13		Denominación: CARCASA DEL CUERPO		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL									
Sustitución:										<table border="1"> <tr> <th>Peso [Kg]</th> <th>Tolerancia</th> <th>Escala</th> <th>Registro</th> </tr> <tr> <td>30,9</td> <td>± 0,3 [mm]</td> <td>1:10</td> <td></td> </tr> </table>				Peso [Kg]	Tolerancia
Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro												
30,9	± 0,3 [mm]	1:10													
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: ASTM A36		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.									
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08												
Dibujó	Sr. Henry Sefla		2021/07/12												
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20												
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20												



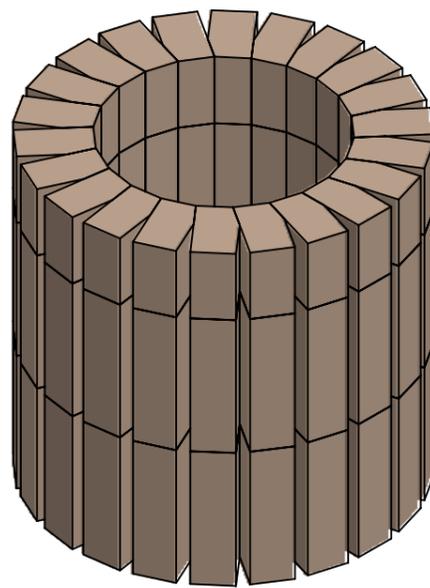
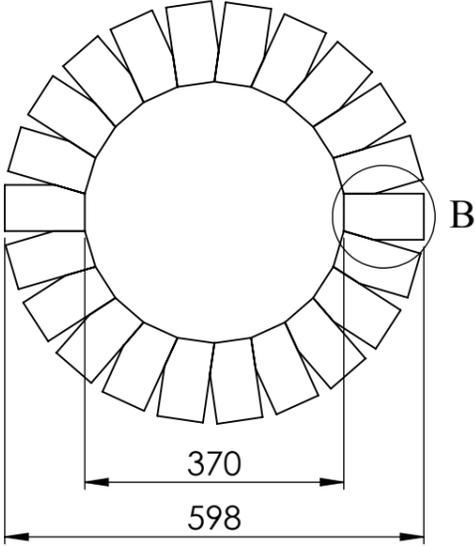
N° Lámina: 3 de 13		N° Hojas: 13		Denominación: ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL			
Sustitución:							
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08	1,055	± 0,3 [mm]	1:10	
Dibujó	Sr. Henry Seña		2021/07/12	ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY. 			
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20				
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20				
Material:				FIBRA CERÁMICA			



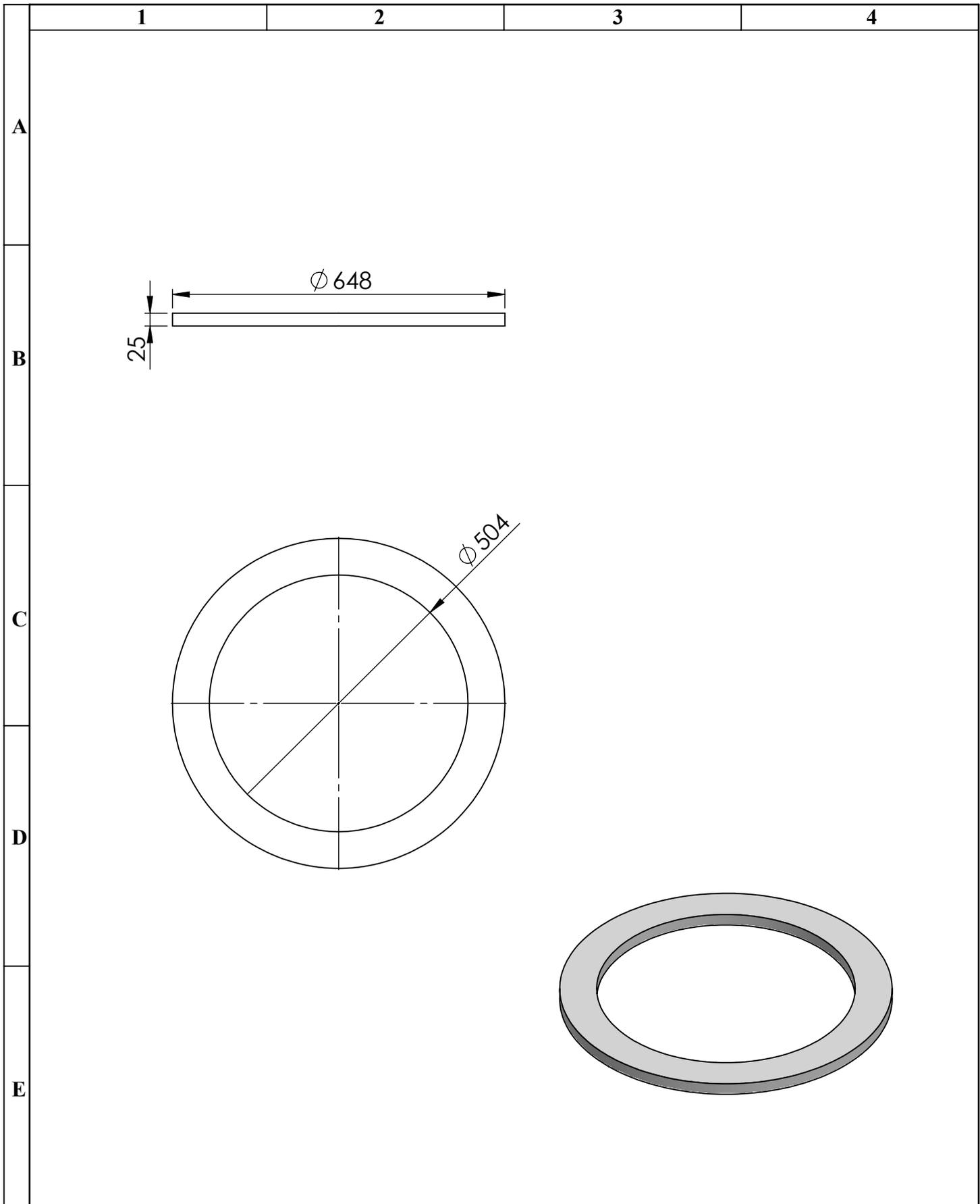
N° Lámina: 4 de 13		N° Hojas: 13		Denominación:			
Sustitución:				 AISLANTE DEL CUERPO DEL HORNO 			
ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL							
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08	3,60	± 0,3 [mm]	1:10	
Dibujó	Sr. Henry Seña		2021/07/12	ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.			
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20				
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20				
Materiales:				FIBRA CERÁMICA			



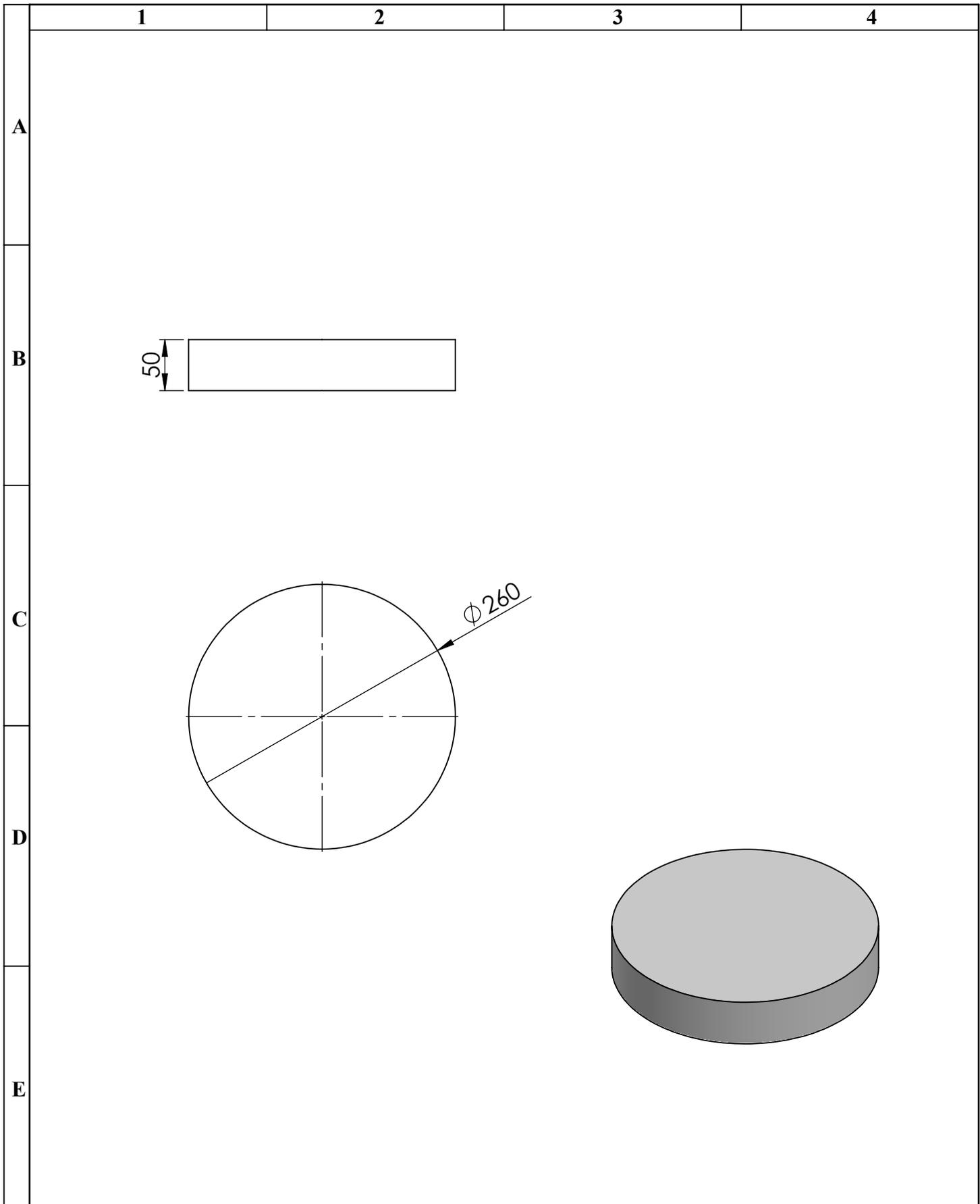
DETALLE B
ESCALA 2 : 5

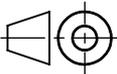


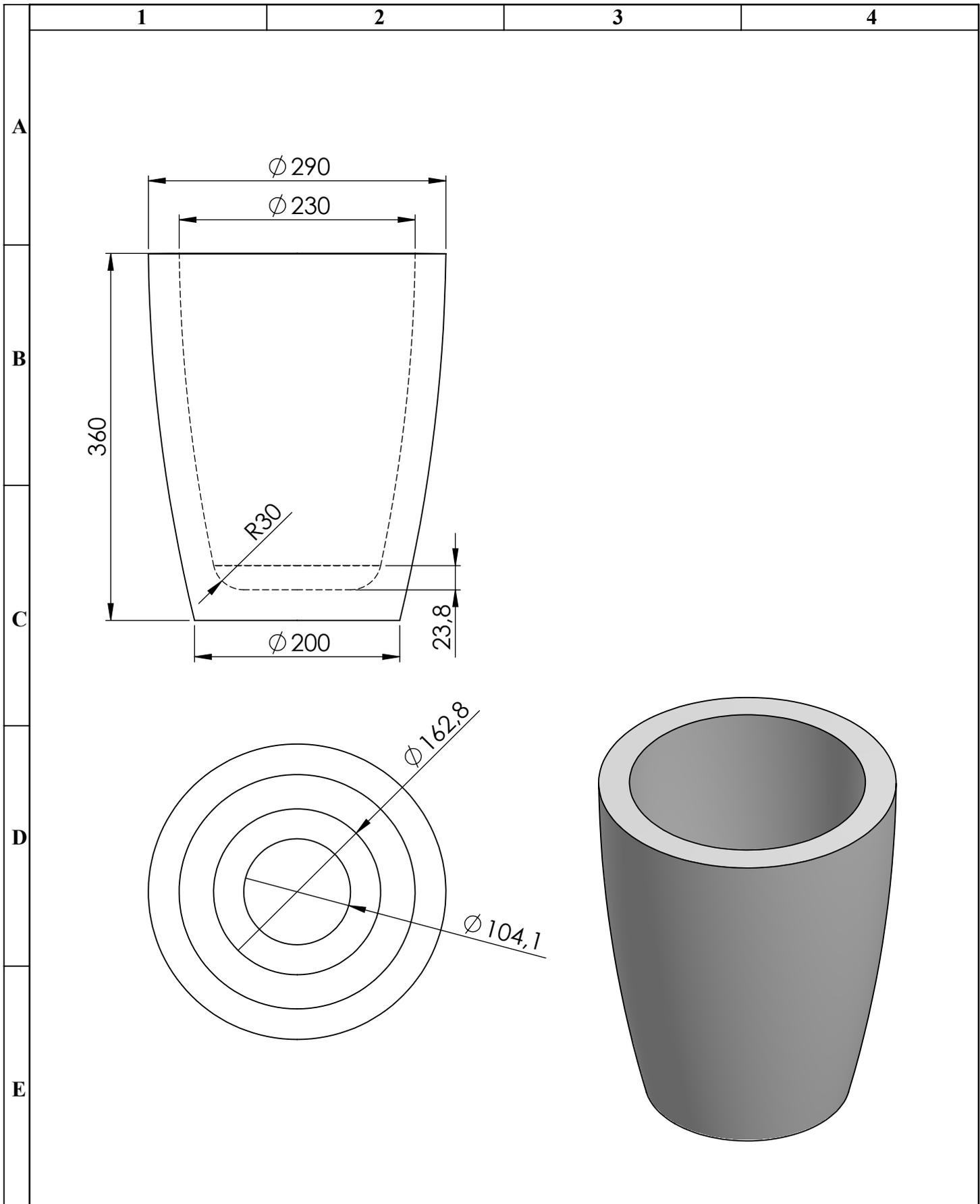
N° Lámina: 5 de 13		N° Hojas: 13		Denominación: PARED DE LADRILLOS REFRACTARIOS				ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL			
Sustitución:											
Datos	Nombre	Firma	Fecha	202,36	± 0,3 [mm]	1:10					
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08	Materiales: ALÚMINA				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.			
Dibujó	Sr. Henry Sefla		2021/07/12								
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20								
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20								



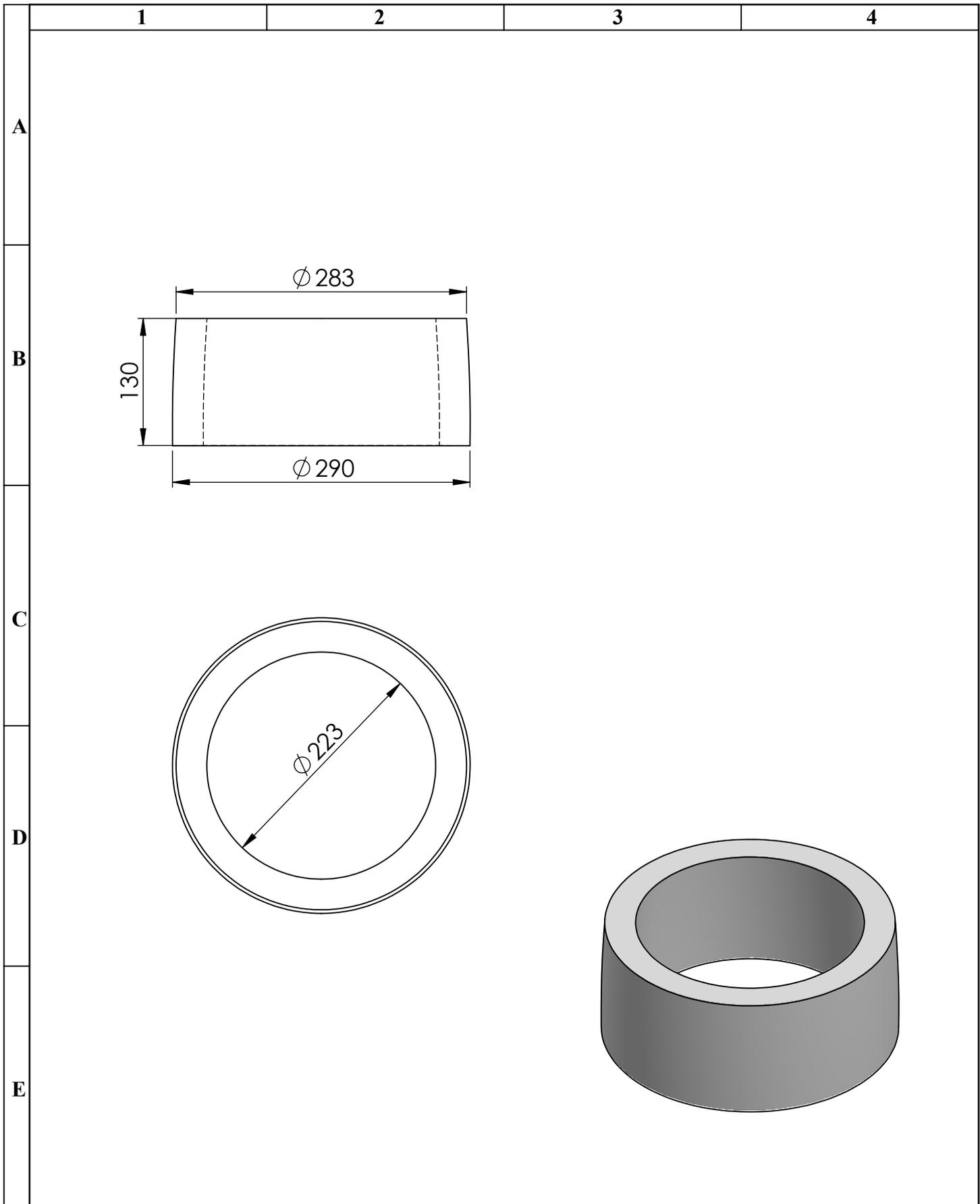
N° Lámina: 6 de 13		N° Hojas: 13		Denominación:			
Sustitución:				AISLANTE DE LA TAPADERA			
Este documento es propiedad intelectual exclusiva de J.A. y H.S. cualquier uso y reproducción total o parcial no autorizada constituye violación de los derechos del autor penada por la ley.							
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: FIBRA CERÁMICA		ESPOCH	
						FACULTAD DE MECÁNICA	
				CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL			
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08	Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro
Dibujó	Sr. Henry Seña		2021/07/12	0,42	± 0,3 [mm]	1:10	
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20	ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.			
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20				

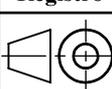


N° Lámina: 7 de 13		N° Hojas: 13		Denominación:							
Sustitución:				BASE DE SOPORTE DEL CRISOL							
ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL											
Datos	Nombre	Firma	Fecha					Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08					15,7	± 0,3 [mm]	1:5	
Dibujó	Sr. Henry Seña		2021/07/12					ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY. 			
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20								
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20								
Materiales:				CONCRETO CERCAST 2900							

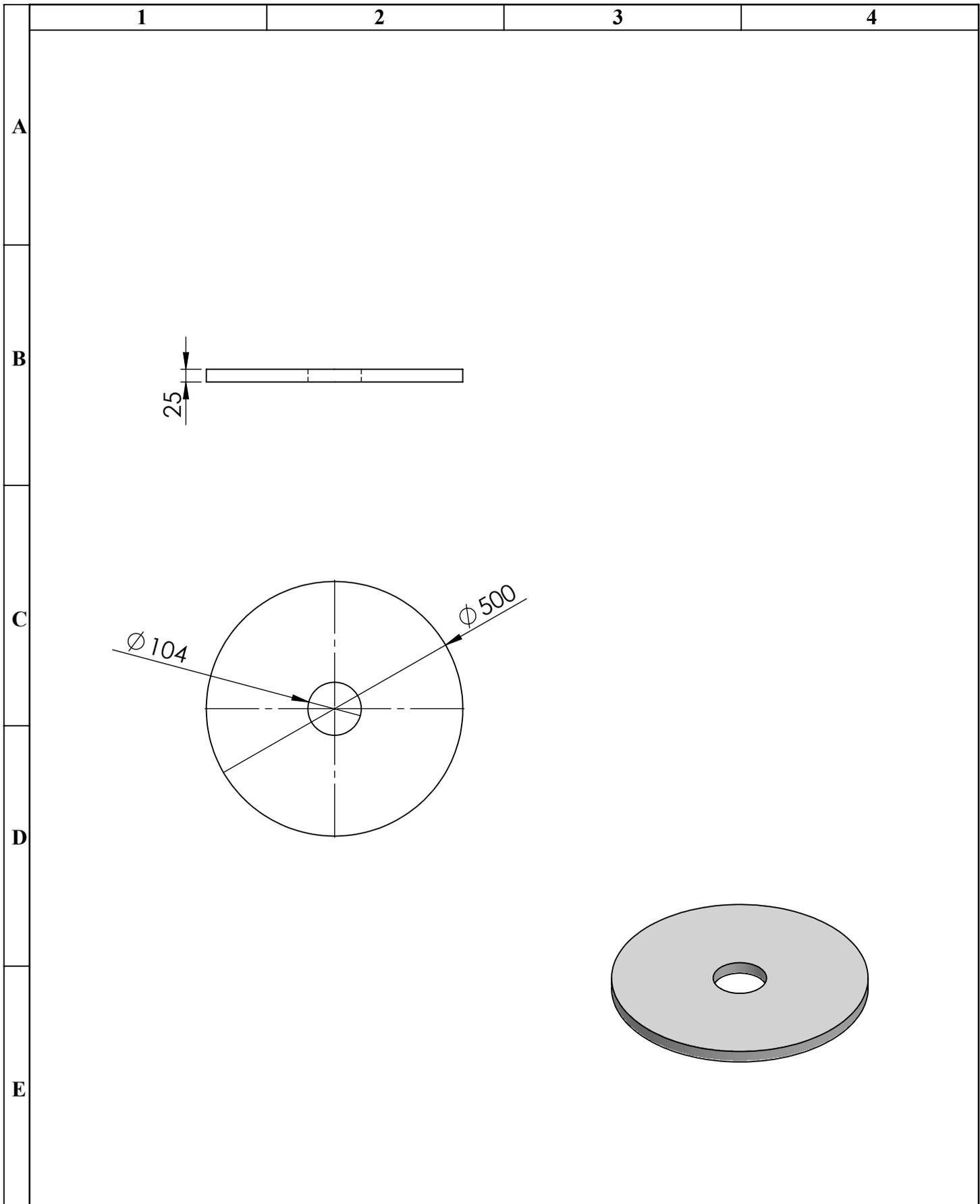


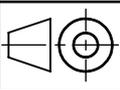
N° Lámina: 8 de 13		N° Hojas: 13		Denominación: CRISOL	ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL			
Sustitución:					Materiales: GRAFITO	Peso [Kg]	Tolerancia	Escala
Datos	Nombre	Firma	Fecha	22,18		± 0,3 [mm]	1:5	
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08	ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY. 				
Dibujó	Sr. Henry Sefla		2021/07/12					
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20					
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20					

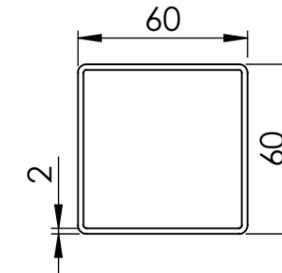
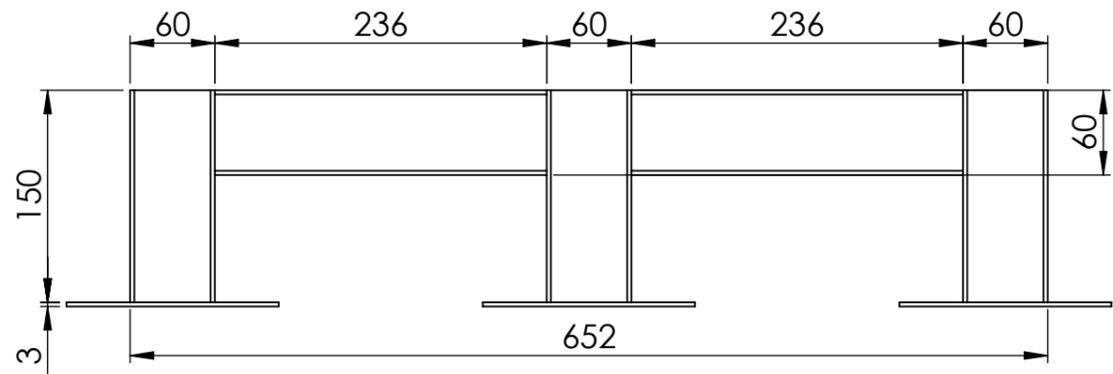


N° Lámina: 9 de 13		N° Hojas: 13		Denominación:		ESPOCH				
Sustitución:				CARGADOR DE CRISOL		FACULTAD DE MECÁNICA				
						CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL				
Datos	Nombre	Firma	Fecha			Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro	
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08			8,04	± 0,3 [mm]	1:5		
Dibujó	Sr. Henry Seña		2021/07/12							
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20	Materiales:		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.				
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20	GRAFITO						

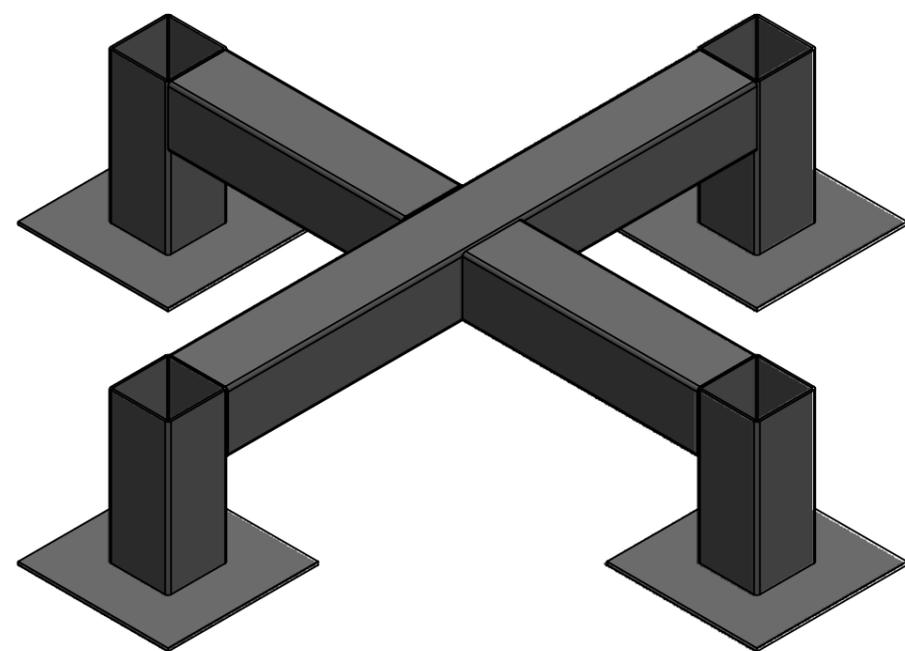
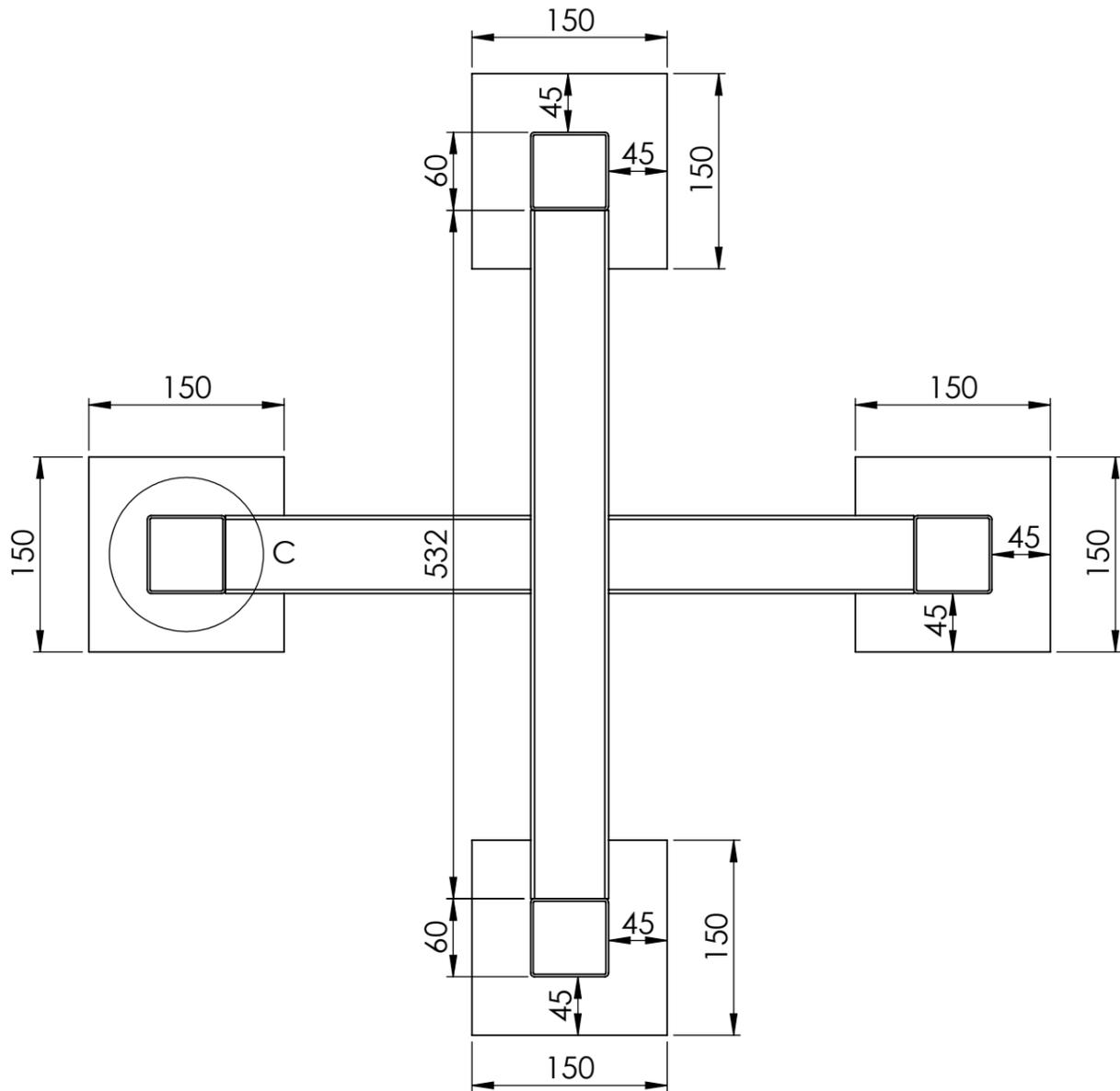




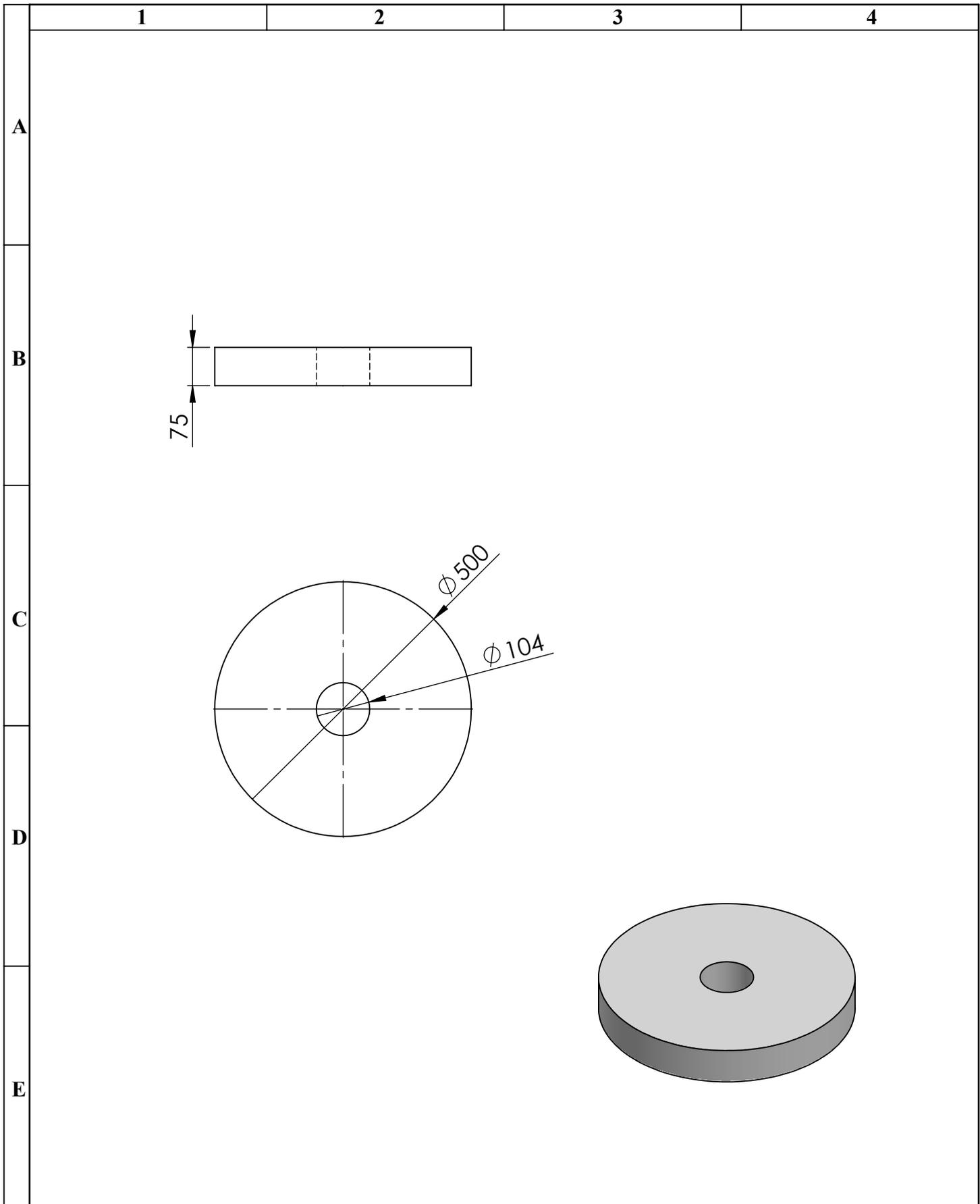
N° Lámina: 10 de 13		N° Hojas: 13		Denominación:				ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL				
Sustitución:				MEZCLA REFRACTARIA DE LA TAPA				Peso [Kg]		Tolerancia	Escala	Registro
Datos	Nombre	Firma	Fecha					19,7		± 0,3 [mm]	1:5	
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08	Materiales: CONCRETO CERCAST 2900				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.				
Dibujó	Sr. Henry Seña		2021/07/12									
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20									
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20									



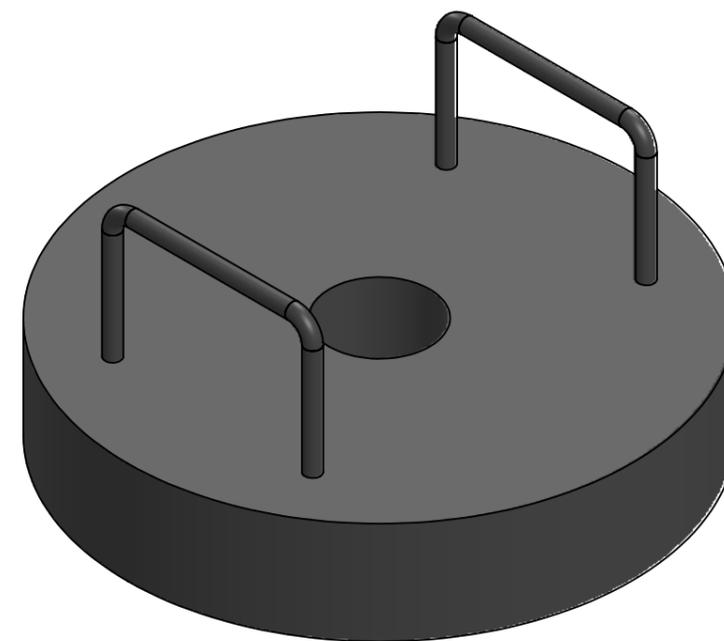
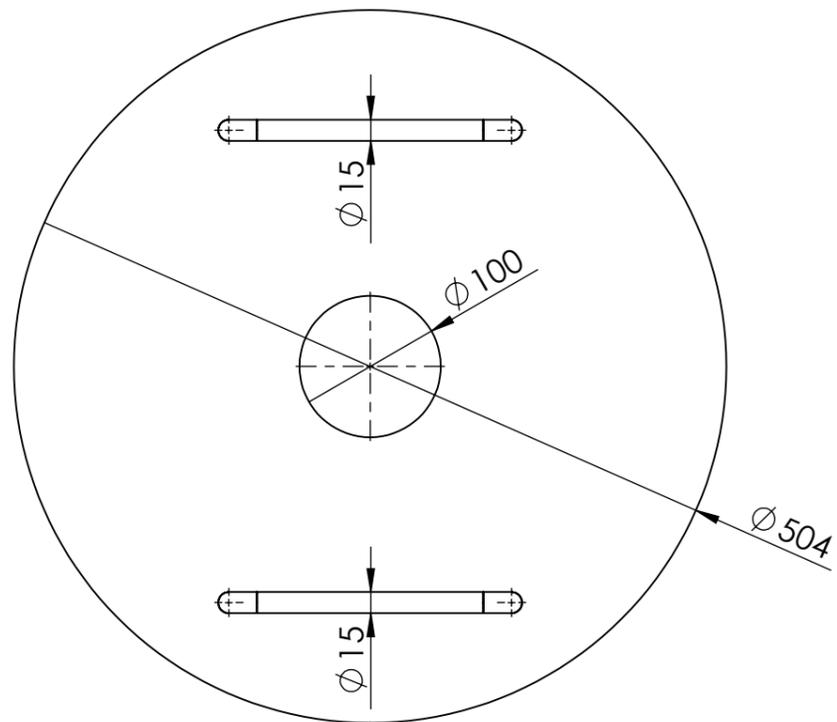
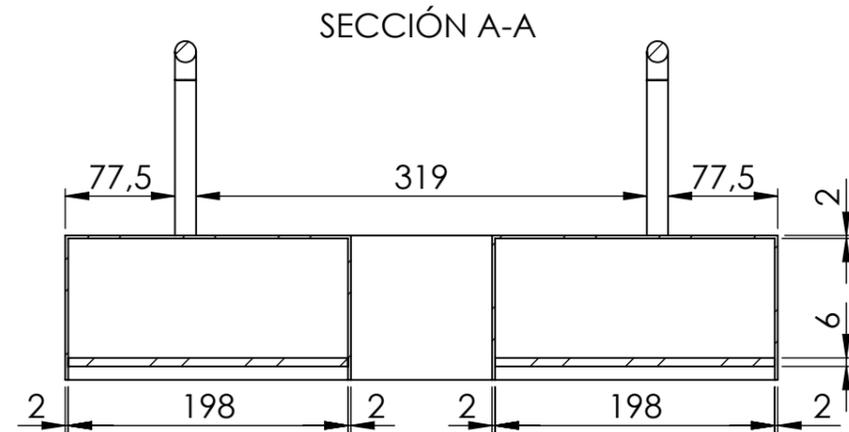
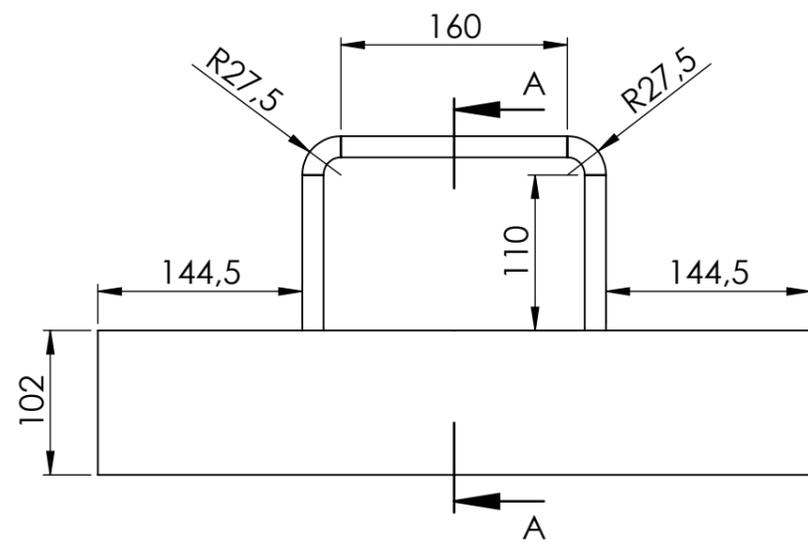
DETALLE C
ESCALA 2 : 5



N° Lámina: 11 de 13		N° Hojas: 13		Denominación: ESTRUCTURA DE SOPORTE				ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL									
Sustitución:						<table border="1"> <tr> <th>Peso [Kg]</th> <th>Tolerancia</th> <th>Escala</th> <th>Registro</th> </tr> <tr> <td>7,86</td> <td>± 0,3 [mm]</td> <td>1:5</td> <td></td> </tr> </table>				Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro	7,86	± 0,3 [mm]	1:5	
Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro														
7,86	± 0,3 [mm]	1:5															
Datos	Nombre	Firma	Fecha	Materiales: ASTM A36				<small>ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.</small>									
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08														
Dibujó	Sr. Henry Sefla		2021/07/12														
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20														
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20														



N° Lámina: 12 de 13		N° Hojas: 13		Denominación: AISLANTE DE LA TAPA 	 ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL 			
Sustitución:					Peso [Kg]	Tolerancia	Escala	Registro
Datos	Nombre	Firma	Fecha					
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08	1,80	± 0,3 [mm]	1:10		
Dibujó	Sr. Henry Sefla		2021/07/12	 Materiales: FIBRA CERÁMICA 				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20					
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20					



N° Lámina: 13 de 13		N° Hojas: 13		Denominación: CARCASA DE LA TAPA				ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL							
Sustitución:								Peso [Kg]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos	Nombre	Firma	Fecha					7,48		± 0,3 [mm]		1:5			
Proyectó	Sr. Jonnathan Amaguaya		2021/06/08												
Dibujó	Sr. Henry Sefla		2021/07/12												
Revisó	Ing. José Pérez		2021/08/20												
Aprovó	Ing. José Pérez		2021/08/20												
				Materiales: ASTM A36				ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE: J.A Y H.S CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACIÓN DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY.							