

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DEL HORNO
DE CRISOL CON FIBRA CERÁMICA FRENTE A MATERIALES
REFRACTARIOS CONVENCIONALES EN LA EMPRESA MINERA AURÍFERA
ESTRELLA DE CHAPARRA S.A. (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

PRESENTADO POR:

Br. RAUL ARTURO MACEDO ANDRADE.

Br. ARNOLD JOSE ALFONSO QUISPE

GUERRERO

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO METALURGICO

ASESOR:

Mg. HONORATO SANCHEZ QUISPE

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Honorato Sánchez Quispe
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: Evaluación Comparativo del Rendimiento
Térmico del horno de crisol con fibra cerámica frente a materiales
refractarios convencionales en la Empresa Minera Aurífera
Estrella de Chqparra S.A. [Investigación Tecnológica]

Presentado por: Macedo Andrade Raul Arturo DNI N° 74756342
presentado por: Quispe Guerrero Arnold Jose Alfonso DNI N° 72850011
Para optar el título Profesional/Grado Académico de
..... Ingeniero Metalúrgico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 05 de Setiembre de 2026

Firma

Post firma Honorato Sánchez Quispe

Nro de DNI 23903892

ORCID del Asesor 0000-0002-4267-2636

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:620612629

Raul Arturo Macedo Andrade Arnold Jose Alfonso Q...

TESIS FINAL , RENDIMIENTO TERMICO 262.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::27259.620612629

153 páginas

Fecha de entrega

4 sep 2026, 8:10 p.m. GMT-5

27.695 palabras

Fecha de descarga

5 sep 2026, 10:06 p.m. GMT-5

163.325 caracteres

Nombre del archivo

TESIS FINAL , RENDIMIENTO TERMICO 262.pdf

Tamaño del archivo

6.7 MB

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Presentación

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

En cumplimiento de las disposiciones establecidas en el reglamento de grados y títulos vigente en la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica, y con el propósito de optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a su consideración el trabajo de investigación titulado:

EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DEL HORNO DE CRISOL CON FIBRA CERÁMICA FRENTE A MATERIALES REFRACTARIOS CONVENCIONALES EN LA EMPRESA MINERA AURÍFERA ESTRELLA DE CHÁPARRA S.A. (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

“La presente investigación tecnológica tiene como propósito evaluar experimentalmente el rendimiento térmico de dos hornos de crisol, cuyas características constructivas son similares y se diferencian únicamente en el tipo de revestimiento: uno constituido por ladrillo refractario convencional y otro por manta de fibra cerámica. El estudio se desarrolló en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A., donde ambos hornos operaron bajo las mismas condiciones de carga y trabajo a lo largo de siete ciclos de fundición de oro, con el fin de determinar el rendimiento térmico de cada sistema y contrastar la diferencia entre ambos por la vía estadística. Los resultados obtenidos permiten establecer cuál de los dos revestimientos ofrece un mejor desempeño y aportan criterios técnicos para optimizar el proceso de fundición y elevar la productividad de la operación.

Atentamente:

Bach. Macedo Andrade, Raúl Arturo.

Bach. Quispe Guerrero, Arnold José Alfonso.

Dedicatoria

En primer lugar, a Dios, fuente de sabiduría, fortaleza y guía permanente en cada etapa de mi vida, y al Señor de los Milagros, por su protección, fé y esperanza en los momentos de dificultad, permitiéndome culminar con éxito este importante objetivo académico.

A mi madre, Rosana Andrade, por su amor incondicional, sacrificio constante y apoyo inquebrantable, siendo mi mayor ejemplo de perseverancia y fortaleza.

A mi padre, Arturo Macedo, por sus consejos, enseñanzas y respaldo continuo, que han sido fundamentales en mi formación personal y profesional.

A mi hermana, Alnahir Macedo, por su cariño, comprensión y motivación constante a lo largo de este camino.

A todos ellos, quienes han sido el pilar fundamental para alcanzar este logro.

Raúl Arturo, MACEDO ANDRADE.

Dedicatoria

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mis padres, Arnolfo y Violeta, por su esfuerzo constante, el amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida académica, siendo el principal motor para alcanzar mis metas.

A mis hermanos, Marcela y Jorge, y a Timo, por su cariño, comprensión y aliento permanente en cada etapa de este proceso.

A mis abuelas, Marcelina y Maura, por sus consejos y el cariño que me brindan. A mis abuelos José y Alfonso, quienes hoy descansan en el cielo, siguen siendo una fuente de inspiración para mí en mi camino personal y profesional.

A mis tíos que muchas veces me aconsejaron y ayudaron, en especial a mis tíos Delfín, Simón, Reimundina, Maribel y Elena.

A todos ellos, quienes fueron el pilar fundamental para alcanzar este logro.

Arnold José Alfonso, QUISPE GUERRERO.

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis docentes universitarios, quienes, a lo largo de mi formación académica, compartieron sus conocimientos, experiencia y vocación, contribuyendo de manera significativa a mi desarrollo profesional y al logro de los objetivos planteados en la presente investigación.

De manera especial, agradezco al Ing. Honorato, por su valiosa orientación, disposición permanente y aportes técnicos, los cuales fueron fundamentales para el correcto desarrollo y culminación de esta tesis.

Asimismo, agradezco a mis compañeros de la universidad, por el apoyo, el trabajo en equipo y el compañerismo demostrado durante esta etapa académica. En especial, a Arnold, por su colaboración, apoyo constante y motivación, que fueron de gran ayuda a lo largo del proceso de investigación.

Finalmente, expreso mi profundo agradecimiento a mi padre, Arturo Macedo, por su respaldo incondicional, consejos y confianza, los cuales han sido un pilar fundamental para alcanzar este logro académico y personal.

Raúl Arturo, MACEDO ANDRADE.

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por la formación académica brindada y por contribuir de manera fundamental a mi desarrollo profesional.

A mi asesor de tesis, por su orientación, dedicación y valiosos aportes técnicos, los cuales fueron determinantes para la correcta ejecución y culminación de la presente investigación.

A la empresa EMAECSA, por facilitar el acceso a sus instalaciones, equipos y recursos necesarios para la realización de los ensayos experimentales de la presente investigación.

A mis amigos de la universidad, Wilner, Edghar, Yonathan, Christian, Wilfredo, Benjamín, Walter, Boris y Dilner, por su compañerismo, apoyo académico y amistad a lo largo de la carrera universitaria.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo y culminación de esta tesis.

Arnold José Alfonso, QUISPE GUERRERO.

Resumen

El objetivo de la presente investigación tecnológica fue determinar la influencia del material refractario en el rendimiento térmico de un horno de crisol. Para ello se evaluó comparativamente el rendimiento térmico de dos configuraciones de horno de crisol: uno convencional revestido con ladrillo refractario y otro utilizando manta de fibra cerámica, aplicadas al proceso de fundición de oro. Bajo un diseño experimental controlado, se mantuvieron constantes las condiciones operativas, variando exclusivamente el material refractario, con el propósito de determinar su influencia directa en el rendimiento térmico del sistema. Los resultados evidenciaron una mejora sustancial en el desempeño energético del sistema: el horno con fibra cerámica alcanzó una eficiencia promedio de 77.62%, superando de manera significativa al horno revestido con materiales refractarios convencionales, cuya eficiencia fue de 14.79%. El análisis estadístico (ANOVA) confirmó diferencias altamente significativas ($F = 32\,534.55$; $p < 0.001$), lo que evidencia que el material refractario constituye el factor crítico en la optimización térmica. Asimismo, el modelo de regresión presentó un ajuste elevado ($R^2 \geq 0.998$), lo que indica alta predictibilidad y control del proceso. La incorporación de fibra cerámica no solo reduce de manera sustancial el consumo de GLP, sino que mejora el rendimiento operativo del horno, reduce su dependencia del tiempo de fusión y maximiza el aprovechamiento energético. En conclusión, la sustitución del ladrillo refractario por fibra cerámica representa una innovación tecnológica viable, eficiente y sostenible.

Palabras clave: Rendimiento térmico, Fibra cerámica, Ladrillo refractario, Transferencia de calor.

Abstract

This technological study conducted a comparative evaluation of the thermal performance of two crucible furnace configurations: one conventional furnace lined with refractory brick and another using ceramic fiber blanket, as applied to the gold smelting process at Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A. Under a controlled experimental design, operating conditions were kept constant, varying only the refractory material, with the aim of determining its direct influence on the system's thermal efficiency. Thermal behavior was monitored using K-type thermocouples during the critical heating and melting stages (1150 °C), allowing for the quantification of the useful energy absorbed by the metal and the total energy supplied. Based on these data, the thermal efficiency of each configuration was determined. The results showed a substantial improvement in the system's energy performance: the ceramic fiber furnace achieved an average efficiency of 77.62%, significantly outperforming the conventional furnace, which had an efficiency of 14.79%. Statistical analysis (ANOVA) confirmed highly significant differences ($F = 32\,534.55$; $p < 0.001$), indicating that the refractory material is the critical factor in thermal optimization. Furthermore, the regression model showed a high goodness of fit ($R^2 \geq 0.998$), indicating high predictability and control of the process. The incorporation of ceramic fiber not only substantially reduces LPG consumption but also improves the furnace's operational performance, reducing its dependence on melting time and maximizing energy utilization. In conclusion, replacing refractory brick with ceramic fiber represents a viable, efficient, and sustainable technological innovation.

Keywords: Thermal efficiency, Ceramic fiber, Refractory brick, Heat transfer.

Índice General

Presentación.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iv
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Índice General.....	viii
Índice de Tablas.....	xiv
Índice de Figuras.....	xv
Simbología.....	xvii
Introducción.....	1
Capítulo I Planteamiento del Problema.....	5
1.1. Situación Problemática.....	5
1.2. Formulación del Problema.....	7
1.2.1. Problema General.....	7
1.2.2. Problemas Específicos.....	7
1.3. Justificación de la Investigación.....	7
1.3.1. Justificación Económica-Financiera.....	7
1.3.2. Justificación Tecnológica.....	9
1.3.3. Justificación Social.....	10
1.3.4. Justificación Ambiental.....	11
1.4. Objetivos de la Investigación.....	12
1.4.1. Objetivo General.....	12
1.4.2. Objetivos Específicos.....	12
Capítulo II Marco Teórico y Conceptual.....	13
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	13

2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	13
2.1.2. Antecedentes Nacionales.....	14
2.1.3. Antecedentes Locales.....	15
2.2. Bases Teóricas.....	16
2.2.1. Hornos de Crisol.....	16
2.2.2. Clasificación y Aplicaciones de los Hornos de Crisol.....	17
2.3. Transferencia de Calor.....	18
2.3.1. Conducción.....	19
2.3.2. Convección.....	20
2.3.3. Radiación.....	20
2.4. Flujo de Calor en Sistemas Cilíndricos.....	21
2.5. Rendimiento Térmico.....	22
2.5.1. Primera Ley de la Termodinámica y Balance de Energía.....	22
2.5.2. Calor Sensible y Calor Latente.....	23
2.5.3. Energía Útil.....	24
2.5.4. Energía Para Fundir.....	24
2.5.5. Energía Útil Total.....	25
2.5.6. Energía Consumida.....	25
2.5.7. Poder Calorífico del Gas Licuado de Petróleo.....	25
2.6. Oro.....	26
2.6.1. Propiedades Físicas del Oro.....	27
2.6.2. Fundición del Oro.....	27
2.7. Fibra Cerámica.....	28
2.7.1. Propiedades Físicas de la Fibra Cerámica.....	30
2.7.2. Propiedades Térmicas de la Fibra Cerámica.....	30

2.7.3. Microestructura de la Fibra Cerámica.....	33
2.7.4. Aplicaciones de la Fibra Cerámica.....	35
2.8. Ladrillo Refractario.....	38
2.8.1. Propiedades Físicas del Ladrillo Refractario.....	38
2.8.2. Propiedades Térmicas del Ladrillo Refractario.....	40
2.9. Controladores y Automatización del Proceso de Fundición.....	41
2.9.1. Control de Temperatura en Hornos de Crisol.....	41
2.9.2. Tipos de Sensores de Temperatura y su Aplicación.....	43
2.10. Transferencia de Calor en un Cilindro.....	44
2.10.1. Conducción.....	44
2.10.2. Convección.....	45
2.10.3. Radiación.....	45
2.11. Número de Rayleigh.....	45
2.12. Número de Nusselt.....	47
Capítulo III Hipótesis y Variables.....	49
3.1. Hipótesis.....	49
3.1.1. Hipótesis General.....	49
3.1.2. Hipótesis Específicas.....	49
3.2. Variables.....	49
3.2.1. Identificación de Variables e Indicadores.....	49
3.2.2. Operacionalización de Variables.....	50
Capítulo IV Metodología.....	51
4.1. Ámbito de Estudio.....	51
4.1.1. Localización Política.....	51
4.1.2. Localización Geográfica.....	51

4.2. Investigación: Nivel, Tipo, Alcance y Diseño.....	52
4.2.1. Nivel de Investigación.....	52
4.2.2. Tipo de Investigación.....	52
4.2.3. Alcance de la Investigación.....	52
4.2.4. Diseño de la Investigación.....	53
4.3. Población de Estudio.....	53
4.3.1. Población.....	53
4.3.2. Tamaño de Muestra.....	53
4.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	53
4.4.1. Técnicas.....	53
4.4.2. Instrumentos.....	54
4.5. Procedimiento Experimental del Estudio.....	55
4.5.1. Construcción de un Horno Alternó con Manta de Fibra Cerámica.....	55
4.5.2. Experimentación.....	55
4.5.3. Evaluación Post-Experimentación.....	55
4.6. Control de Variables.....	55
Capítulo V Procedimiento Metodológico Experimental.....	57
5.1. Materiales, Equipos e Instrumentos.....	57
5.2. Fabricación del Horno de Crisol con Fibra Cerámica.....	64
5.3. Instalación y Calibración de Instrumentos de Medición.....	73
5.4. Observaciones Preliminares.....	74
5.5. Ejecución de Ciclos de Fundición.....	74
5.6. Pruebas de Fundición.....	76
5.7. Cálculo del Rendimiento Térmico para el Horno “A”.....	77
5.7.1. Calor Requerido.....	77

5.7.2. Calor Perdido.....	78
5.7.3. Calor Perdido en el Horno.....	78
5.7.4. Calor Perdido en la Tapa.....	82
5.7.5. Calor Perdido en la Base.....	85
5.7.6. Cálculo del Calor Total.....	88
5.7.7. Cálculo del Rendimiento Térmico para el Horno “A”.....	88
5.8. Cálculo del Rendimiento Térmico para el Horno “B”.....	88
5.8.1. Calor Requerido.....	88
5.8.2. Calor Perdido.....	89
5.8.3. Calor Perdido en el Cilindro.....	89
5.8.4. Calor Perdido en la Tapa.....	93
5.8.5. Calor Perdido en la Base.....	96
5.8.6. Cálculo del Calor Total.....	98
5.8.7. Cálculo del Rendimiento Térmico para el Horno “B”.....	99
Capítulo VI Discusión de Resultados.....	101
6.1. Análisis Comparativo Entre Fibra y Ladrillo Mediante ANOVA.....	101
6.2. Modelado Matemático Mediante Regresión Cuadrática.....	106
6.2.1. Análisis del Horno “A”.....	107
6.2.2. Análisis del Horno “B”.....	109
6.2.3. Verificación de Supuestos del Modelo.....	111
6.3. Contrastación de Hipótesis.....	113
6.3.1. Contrastación de la Hipótesis Específica 1.....	114
6.3.2. Contrastación de la Hipótesis Específica 2.....	114
6.3.3. Contrastación de la Hipótesis Específica 3.....	115
6.3.4. Contrastación de la Hipótesis General.....	115

6.4. Contraste de Resultados con Antecedentes de Investigación.....	116
6.4.1. Contraste con Antecedentes Internacionales.....	116
6.4.2. Contraste con Antecedentes Nacionales.....	116
6.4.3. Contraste con Antecedentes Locales (Cusco).....	117
Conclusiones.....	118
Recomendaciones.....	120
Bibliografía.....	121
Anexos.....	126

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de los hornos de crisol y sus aplicaciones.....	18
Tabla 2 Propiedades físicas del oro.....	27
Tabla 3 Parámetros técnicos de la fundición del oro.....	28
Tabla 4 Datos técnicos de la fibra cerámica.....	31
Tabla 5 Cambios de fase de la fibra cerámica.....	35
Tabla 6 Datos técnicos del ladrillo refractario.....	39
Tabla 7 Tipos de termocuplas.....	44
Tabla 8 Matriz de operacionalización de variables.....	50
Tabla 9 Pruebas de fundición en el horno “A”.....	76
Tabla 10 Pruebas de fundición en el horno “B”.....	77
Tabla 11 Factores para la fusión de oro.....	77
Tabla 12 Propiedades termofísicas del aire a 526.36 K.....	79
Tabla 13 Propiedades termofísicas del aire a 463.48 K.....	82

Índice de Figuras

Figura 1 Horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales deteriorado.....	6
Figura 2 Horno de crisol cilíndrico revestido con fibra cerámica.....	17
Figura 3 Difusión de energía debido a la transferencia de calor por conducción.....	19
Figura 4 Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por convección.....	20
Figura 5 Rollo de fibra cerámica.....	29
Figura 6 Mecanismos de transferencia de calor en la fibra cerámica.....	32
Figura 7 Microestructura de la fibra cerámica compuesta por sílice y alúmina.....	33
Figura 8 Microestructura de la mullita.....	34
Figura 9 Horno para cerámicos con fibra cerámica.....	36
Figura 10 Implementación de aislamiento térmico a edificaciones.....	37
Figura 11 Tuberías revestidas con fibra cerámica.....	37
Figura 12 Ladrillo refractario.....	38
Figura 13 Sensor de temperatura “termocupla”.....	42
Figura 14 Ubicación de la Planta Beneficio Pampa Capac de la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.....	51
Figura 15 Vista lateral del horno A.....	58
Figura 16 Vista superior del horno A.....	59
Figura 17 Vista lateral del interior del horno A.....	59
Figura 18 Vista superior del interior del horno A.....	60
Figura 19 Horno “A”.....	61
Figura 20 Manta de fibra cerámica.....	62
Figura 21 Termocupla tipo K.....	63
Figura 22 Vista lateral del interior del horno B.....	65
Figura 23 Vista superior del interior del horno B.....	65

Figura 24 Pared exterior del horno B.....	66
Figura 25 Construcción de la tapa del horno B.....	66
Figura 26 Cuerpo metálico terminado del horno B.....	67
Figura 27 Flujo de calor en los hornos “A” y “B”.....	68
Figura 28 Implementación de ladrillos refractarios SK – 34 en la base del horno B.....	69
Figura 29 Corte de la manta de fibra cerámica.....	69
Figura 30 Primera capa de manta fibra cerámica.....	70
Figura 31 Segunda capa de manta fibra cerámica.....	70
Figura 32 Tercera capa de manta fibra cerámica.....	71
Figura 33 Horno B previo a la primera prueba de calentamiento.....	72
Figura 34 Horno B después de la primera prueba de calentamiento.....	72
Figura 35 Funcionamiento de la termocupla tipo K en el horno de crisol.....	73
Figura 36 Pruebas preliminares al horno “B”.....	74
Figura 37 Colado del oro fundido en el horno “B”.....	75
Figura 38 Comparación del rendimiento térmico por ciclo de fundición.....	100
Figura 39 Comparación del rendimiento térmico en gráfico de cajas.....	103
Figura 40 Gráfica de dispersión de eficiencia vs. consumo energético del ladrillo refractario.....	105
Figura 41 Gráfica de dispersión de eficiencia vs. consumo energético de la fibra cerámica.....	105
Figura 42 Gráfica de probabilidad normal.....	111
Figura 43 Gráfica de homogeneidad.....	112
Figura 44 Gráfica de independencia.....	113

Simbología

A:	Área de transferencia de calor (m^2).
ANOVA:	Análisis de varianza.
C_p:	Calor específico a presión constante ($\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$).
D:	Diámetro (m).
F:	Estadístico de Fisher del análisis de varianza.
FIV:	Factor de inflación de la varianza.
g:	Aceleración de la gravedad (m/s^2).
Gr:	Número de Grashof.
H_0:	Hipótesis nula.
H_1:	Hipótesis alterna.
h_c:	Coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$).
k:	Coeficiente de conductividad térmica del material ($\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$).
L:	Longitud o espesor característico (m).
L_f:	Calor latente de fusión (kJ/kg).
m:	Masa (kg).
Nu:	Número de Nusselt.
p:	Valor p o nivel de significancia observado.
P:	Poder calorífico (kJ/kg).
Pr:	Número de Prandtl.
Q:	Calor (kJ).
r:	Radio (m).
R^2:	Coeficiente de determinación del modelo de regresión.
Ra:	Número de Rayleigh.
R_t:	Resistencia térmica ($^\circ\text{C/W}$).

t:	Tiempo (h).
T:	Temperatura (°C).
T_a:	Temperatura ambiente (°C).
T_i:	Temperatura interna del horno (°C).
T_s:	Temperatura de la pared exterior del horno (°C).
α:	Difusividad térmica (m ² /s).
α:	Nivel de significancia estadística, en el análisis de varianza y la contrastación de hipótesis.
β:	Coeficiente de expansión térmica (1/K).
ΔT:	Variación de temperatura (°C).
ε:	Emisividad de la superficie.
η:	Rendimiento o rendimiento térmico del horno (%).
ν:	Viscosidad cinemática (m ² /s).
ρ:	Densidad (kg/m ³).
σ:	Constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} W/m ² ·K ⁴).
°C:	Grado Celsius.
kg:	Kilogramo.
kJ:	Kilojulio.
kW·h:	Kilovatio-hora.
W/m·°C:	Unidad de conductividad térmica.
FIV:	Factor de inflación de la varianza

Introducción

La fundición de oro en la pequeña minería se realiza mayoritariamente en hornos de crisol calentados con GLP, cuyo desempeño depende en buena medida del material que reviste la cámara de combustión. En la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A. el horno en operación se encontraba revestido con ladrillo refractario convencional, material de conductividad térmica elevada que favorece la disipación de calor hacia el entorno, prolonga los tiempos de operación e incrementa el consumo de combustible en cada ciclo de fundición.

En este contexto, el propósito de la investigación fue comparar el desempeño térmico de un horno revestido con ladrillo refractario frente a otro revestido con manta de fibra cerámica, determinando la influencia del material en el rendimiento térmico del sistema. Se planteó como objetivo general evaluar comparativamente el rendimiento térmico de ambos hornos, mientras que los objetivos específicos comprendieron determinar el rendimiento térmico del horno revestido con materiales refractarios convencionales, determinar el del horno revestido con fibra cerámica y comparar ambos resultados.

El estudio se justificó por su relevancia técnica, económica y ambiental, ya que la optimización del rendimiento térmico contribuye a reducir el consumo de combustible, disminuir costos operativos y minimizar el impacto ambiental asociado a las emisiones térmicas, en línea con los principios de sostenibilidad industrial. Asimismo, la literatura consultada señala que la fibra cerámica presenta ventajas frente a los materiales tradicionales por su baja conductividad térmica, su resistencia a temperaturas extremas y su capacidad de aislamiento (Luyang, 2015; NUTEC, s.f.), lo que respalda su aplicación en hornos industriales.

Desde el punto de vista conceptual, la variable dependiente del estudio fue el rendimiento térmico, entendido como la relación entre la energía útil absorbida por la carga y la energía total suministrada al sistema, en tanto que la variable independiente correspondió al tipo de material refractario empleado. Sobre esta base se formuló la hipótesis de que el horno

revestido con fibra cerámica alcanzaría un mayor rendimiento térmico, debido a que su menor conductividad térmica reduce las pérdidas de calor a través del revestimiento; este planteamiento constituyó el eje del análisis experimental desarrollado.

La investigación fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicado y nivel experimental, con un diseño en el que se mantuvieron constantes las condiciones operativas y se varió únicamente el material de revestimiento. Se ejecutaron siete ciclos de fundición en cada horno, con registro de temperaturas mediante termocuplas tipo K durante el calentamiento y la fusión, a partir de los cuales se calcularon el calor útil, las pérdidas de calor y el rendimiento térmico de cada sistema. Los resultados se contrastaron mediante análisis de varianza de un solo factor y se complementaron con modelos de regresión cuadrática.

El aporte original de la investigación radica en la generación de evidencia experimental y estadística obtenida en condiciones reales de operación de una planta minera aurífera, lo que permite establecer criterios técnicos para la selección de materiales refractarios más eficientes y sostenibles.

Para exponer este desarrollo, la tesis se organiza en seis capítulos. El capítulo I, Planteamiento del Problema, expone la situación problemática de la empresa, la formulación del problema general y de los problemas específicos, la justificación del estudio y los objetivos que orientan la investigación. El capítulo II, Marco Teórico y Conceptual, reúne los antecedentes y las bases teóricas que sustentan el trabajo: los mecanismos de transferencia de calor, el flujo de calor en sistemas cilíndricos, el concepto de rendimiento térmico, las propiedades del oro, de la fibra cerámica y del ladrillo refractario, los sistemas de control del proceso de fundición y los números adimensionales de Rayleigh y Nusselt empleados en los cálculos. El capítulo III, Hipótesis y Variables, formula la hipótesis general y las hipótesis específicas y define las variables con sus dimensiones e indicadores.

El capítulo IV, Metodología, precisa el ámbito de estudio, el nivel, tipo, alcance y diseño de la investigación, la población, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, el procedimiento experimental y el control de las variables que se mantuvieron constantes entre ambos hornos. El capítulo V, Procedimiento Metodológico Experimental, describe los materiales, equipos e instrumentos utilizados, la fabricación del horno revestido con manta de fibra cerámica, la instalación y calibración de los instrumentos de medición, las observaciones preliminares, la ejecución de los ciclos de fundición y el cálculo del rendimiento térmico de ambos sistemas a partir del balance de energía y de las pérdidas por conducción, convección y radiación. El capítulo VI, Discusión de Resultados, presenta el análisis comparativo entre revestimientos mediante el análisis de varianza, el modelado matemático por regresión cuadrática, la contrastación de las hipótesis y el contraste de los resultados con los antecedentes de la investigación.

Finalmente se presentan las conclusiones, que responden a cada una de las hipótesis planteadas, las recomendaciones derivadas del estudio, la bibliografía consultada y los anexos, que incluyen la matriz de consistencia y las fichas técnicas de los materiales e instrumentos empleados.

La presente tesis se organiza en seis capítulos. El capítulo I, Planteamiento del Problema, expone la situación problemática de la empresa, la formulación del problema general y de los problemas específicos, la justificación del estudio y los objetivos que orientan la investigación. El capítulo II, Marco Teórico y Conceptual, reúne los antecedentes nacionales e internacionales y las bases teóricas que sustentan el trabajo: los mecanismos de transferencia de calor, el flujo de calor en sistemas cilíndricos, el concepto de rendimiento térmico, las propiedades del oro, de la fibra cerámica y del ladrillo refractario, los sistemas de control del proceso de fundición y los números adimensionales de Rayleigh y Nusselt empleados en los

cálculos. El capítulo III, Hipótesis y Variables, formula la hipótesis general y las hipótesis específicas y define la variable dependiente e independiente con sus dimensiones e indicadores.

El capítulo IV, Metodología, precisa el ámbito de estudio, el nivel, tipo, alcance y diseño de la investigación, la población, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, el procedimiento experimental y el control de las variables que se mantuvieron constantes entre ambos hornos. El capítulo V, Procedimiento Metodológico Experimental, describe los materiales, equipos e instrumentos utilizados, la fabricación del horno revestido con manta de fibra cerámica, la instalación y calibración de los instrumentos de medición, las observaciones preliminares, la ejecución de los siete ciclos de fundición en cada horno y el cálculo del rendimiento térmico de ambos sistemas a partir del balance de energía y de las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación. El capítulo VI, Discusión de Resultados, presenta el análisis comparativo entre ambos revestimientos mediante el análisis de varianza, el modelado matemático por regresión cuadrática, la contrastación de las hipótesis y el contraste de los resultados con los antecedentes de la investigación.

Finalmente se presentan las conclusiones, que responden a cada una de las hipótesis planteadas, las recomendaciones derivadas del estudio, la bibliografía consultada y los anexos, que incluyen la matriz de consistencia y las fichas técnicas de los materiales e instrumentos empleados.

Capítulo I

Planteamiento del Problema

1.1. Situación Problemática

La Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A., ubicada en el sector Pampa Capac, distrito de Chaparra, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa, pertenece al sector de pequeña minería. La empresa se dedica tanto a la comercialización como al tratamiento de minerales auríferos, con un volumen aproximado de 1 500 toneladas de mineral aurífero al mes. Como producto final, se obtienen lingotes de oro y plata, con una producción promedio mensual de 20 kg de oro y 40 kg de plata.

El problema recae en el horno de crisol empleado en el área de fundición de la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A., el cual presenta deficiencias estructurales y de diseño que comprometen su rendimiento térmico. Dicho horno, construido con ladrillo y cemento refractario, presenta agrietamientos que constituyen la principal causa de estas deficiencias. La Figura 1 muestra el estado actual del horno de crisol, cuyas grietas generan pérdida de hermeticidad y facilitan la fuga de calor hacia el exterior, reduciendo la eficiencia del proceso. Asimismo, la ausencia de un sistema de control de temperatura dificulta mantener condiciones térmicas estables durante la fundición del oro, lo que puede traducirse en variaciones no controladas de temperatura y, con ello, afectar la calidad y homogeneidad del producto final.

Estas limitaciones pueden contribuir a un menor rendimiento térmico un menor rendimiento térmico, un mayor consumo de gas licuado de petróleo (GLP) y un mayor tiempo de fusión, lo cual eleva los costos operativos y de mantenimiento. Si bien existen alternativas de revestimiento como la fibra cerámica caracterizada por su baja conductividad térmica, alta resistencia a temperaturas extremas y mayor capacidad de retención de calor, la empresa no dispone de estudios comparativos que evalúen su comportamiento frente a los materiales

refractarios convencionales.

En este contexto, surge la necesidad de realizar una evaluación experimental que permita determinar qué tipo de revestimiento refractario ofrece un mejor rendimiento térmico y una mayor eficiencia energética en el proceso de fundición. Dicha evaluación busca comparar diferentes materiales y configuraciones de revestimiento bajo condiciones similares de operación, con el fin de identificar la alternativa más eficiente, duradera y viable económicamente para la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.

Figura 1

Horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales deteriorado



Nota. Fotografía tomada por los autores.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Qué diferencias existirán en el rendimiento térmico de un horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales y con manta de fibra cerámica durante el proceso de fundición de oro en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.?

1.2.2. Problemas Específicos

1. ¿Cuál será el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales?
2. ¿Cuál será el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica?
3. ¿Existirá diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento térmico entre el horno de crisol revestido con fibra cerámica y el horno revestido con materiales refractarios convencionales durante el proceso de fundición de oro?

1.3. Justificación de la Investigación

Se consideran las siguientes justificaciones:

1.3.1. Justificación Económica-Financiera

La presente investigación se justifica desde el enfoque económico-financiero, considerando que el consumo de combustible influye en los costos operativos del proceso de fundición en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A. Las limitaciones identificadas en el rendimiento térmico del horno de crisol generan un consumo energético superior al necesario, lo cual incide directamente en la estructura de costos de la operación y, por consiguiente, en la rentabilidad del proceso productivo (Cengel & Boles, 2015).

El uso de materiales refractarios convencionales, como el ladrillo, presenta una mayor conductividad térmica en comparación con materiales aislantes avanzados, lo que favorece las pérdidas de calor hacia el entorno y obliga a un mayor consumo de combustible para alcanzar

las temperaturas de fusión del oro (Incropera, 1999). Desde el punto de vista económico, esta ineficiencia se traduce en un incremento sostenido del gasto energético por cada ciclo de fundición, elevando el costo unitario de producción y reduciendo el margen operativo de la empresa.

Asimismo, el bajo rendimiento térmico prolonga los tiempos de fusión, lo que no solo incrementa el consumo de combustible, sino que también reduce la capacidad productiva del horno al limitar el número de ciclos de fundición que pueden completarse en un periodo determinado. Esta relación entre tiempo, energía y producción resulta clave para la empresa, ya que una mejora en el rendimiento térmico permite optimizar la relación costo-beneficio del proceso, disminuyendo el gasto energético por unidad de oro fundido y mejorando la rentabilidad general de la operación (Cengel & Boles, 2015).

En este contexto, la implementación de materiales como la fibra cerámica representa una alternativa económicamente atractiva, debido a su baja conductividad térmica, alta capacidad de aislamiento, menor costo de adquisición y facilidad de mantenimiento (Callister & Rethwish, 2018). Estas características permiten reducir el consumo de combustible de forma significativa, lo que se traduce en un ahorro económico sostenido a lo largo del tiempo. Adicionalmente, al disminuir el deterioro térmico del revestimiento, se prolonga la vida útil del horno, reduciendo la frecuencia y el costo de mantenimiento o reemplazo, lo cual representa un beneficio económico adicional para la empresa.

Por tanto, la presente investigación adquiere relevancia económica al proponer una solución técnica que permite reducir los costos operativos asociados al consumo de combustible y mantenimiento, optimizando el uso de recursos energéticos y contribuyendo a mejorar la rentabilidad y competitividad de la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A. en el mercado de la fundición aurífera.

1.3.2. Justificación Tecnológica

La presente investigación se justifica desde el enfoque tecnológico debido a las limitaciones identificadas en el sistema de fundición de la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A. Se ha evidenciado que el uso de ladrillo refractario presenta restricciones en términos de aislamiento térmico, lo que favorece la pérdida de calor hacia el entorno y reduce la optimización de la etapa de fusión del oro (Incropera, 1999)

Desde la perspectiva tecnológica, la eficiencia de un horno está condicionado por las características del material refractario, como la conductividad térmica, la resistencia a altas temperaturas y la capacidad de conservar el calor dentro del sistema. Materiales con menor conductividad térmica permiten optimizar la transferencia de calor hacia el metal y minimizar las pérdidas energéticas, mejorando así el rendimiento global del proceso (Cengel & Boles, 2015).

En este contexto, la fibra cerámica se presenta como una alternativa tecnológica avanzada, ampliamente utilizada en aplicaciones industriales de alta temperatura, debido a su baja conductividad térmica, alta resistencia térmica y capacidad de aislamiento superior. Estas características permiten mejorar significativamente el rendimiento térmico del horno, reducir las pérdidas de calor y optimizar el consumo energético (Callister & Rethwish, 2018).

La problemática observada en el horno convencional, caracterizada por tiempos prolongados de fusión, mayor consumo de combustible y deterioro del revestimiento evidencia la necesidad de incorporar soluciones tecnológicas que permitan modernizar el sistema de fundición.

La implementación de fibra cerámica responde a esta necesidad al ofrecer un material más eficiente, liviano y adaptable a las condiciones de operación.

Por tanto, este estudio tiene una importancia tecnológica al evaluar experimentalmente el comportamiento térmico de un horno de crisol con fibra cerámica en comparación con uno

convencional, generando evidencia que sustenta la adopción de tecnologías más eficientes en el sector minero-metalúrgico.

1.3.3. Justificación Social

Este estudio se justifica desde el enfoque social debido al impacto que la eficiencia energética de los procesos de fundición tiene en el entorno laboral, económico y ambiental de la empresa y de las comunidades vinculadas a la actividad minera. El uso de hornos de crisol con bajo rendimiento térmico no solo incrementa el consumo de combustible, sino que también genera mayores emisiones de calor y gases asociados al uso de gas licuado de petróleo (GLP), lo cual puede afectar la calidad del ambiente de trabajo y el entorno inmediato.

La problemática se caracteriza por pérdidas de calor, tiempos prolongados de explosión a altas temperaturas y mayor consumo energético, repercute indirectamente en las condiciones laborales, al exponer a los trabajadores a ambientes como este. En este sentido, la optimización del rendimiento térmico mediante la incorporación de materiales como la fibra cerámica contribuye a mejorar las condiciones de trabajo, al reducir la radiación térmica y favorecer un entorno más seguro y controlado (Incropera, 1999).

El desarrollo de procesos más eficientes y sostenibles en la minería aurífera contribuye al fortalecimiento del sector de la pequeña minería, que genera empleo directo e indirecto en la región de Caravelí y en el país. Una mejora en la eficiencia de los procesos productivos permite a las empresas mantenerse competitivas, lo cual repercute en la estabilidad laboral de sus trabajadores y en el desarrollo económico local. Además, los conocimientos generados en esta investigación podrán ser aprovechados no solo por el personal que labora en la empresa si no, también por profesionales y estudiantes de ingeniería metalúrgica, promoviendo la formación de recursos humanos más capacitados. La adopción de tecnologías más eficientes no solo beneficia a la empresa en términos productivos, de igual manera brinda aportes al desarrollo

comunitario al reducir la huella de carbono y las emisiones asociadas a la actividad minera (Callister & Rethwish, 2018).

Por tanto, la presente investigación adquiere importancia social al proponer una solución tecnológica que mejora las condiciones de operación, promueve la eficiencia energética y contribuye a la sostenibilidad del entorno. De esta manera, se genera un impacto positivo tanto en los trabajadores como en la comunidad, fortaleciendo el compromiso de la actividad minera con prácticas más responsables y sostenibles.

1.3.4. Justificación Ambiental

La presente investigación contribuye al cuidado del medio ambiente ya que teniendo en cuenta que disminuir el consumo de combustible, implica una disminución directa de la liberación de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación de la huella de carbono en la operación minera.

Gracias a las propiedades térmicas de la fibra cerámica, se podrá minimizar las pérdidas de calor hacia el entorno, optimizando el aprovechamiento de la energía y reduciendo las emisiones asociadas al proceso de fundición (Callister & Rethwish, 2018). Esta mejora en la eficiencia energética se alinea con los principios de procesos productivos sostenibles y el manejo eficiente de los recursos energéticos.

Asimismo, la optimización del rendimiento térmico no solo reduce la huella de carbono del proceso, sino que también disminuye la generación de residuos térmicos y contaminantes, fortaleciendo el enfoque de sostenibilidad ambiental.

En este marco, el estudio adquiere importancia al plantear una alternativa que optimiza el uso de energía en los hornos de crisol, promueve prácticas más sostenibles y contribuye tanto a la mejora del desempeño operativo como a la protección del entorno, en concordancia con estándares ambientales cada vez más exigentes.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Evaluar comparativamente el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con fibra cerámica frente a materiales refractarios convencionales en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Determinar el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales.
2. Determinar el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica.
3. Determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento térmico entre el horno de crisol revestido con fibra cerámica y el revestido con materiales refractarios convencionales.

Capítulo II

Marco Teórico y Conceptual

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

SEFU. (2024). *Application of ceramic fiber blanket in casting: A review of current uses*.

El autor profundiza en las aplicaciones específicas de la manta de fibra cerámica en los procesos de fundición. Este trabajo destaca los beneficios operativos y económicos de su uso, entre los cuales se encuentra la capacidad de lograr una reducción energética de hasta el 60%. Asimismo, el antecedente señala que la fibra cerámica mejora el rendimiento térmico global del horno y minimiza los tiempos de parada operacional debido a su fácil instalación y mantenimiento. Aporte a la Tesis: Esta fuente ayudó con la elaboración de la justificación económica de este estudio, ya que aumenta el ahorro energético que se espera replicar en el horno de crisol, proporcionando un respaldo técnico a la viabilidad de la inversión en el material experimental.

Tavira (2018), *Fibra cerámica para hornos industriales: rendimiento ideal térmico*. El autor establece que la fibra cerámica es una alternativa altamente efectiva frente a los materiales refractarios tradicionales, como el ladrillo. La investigación resalta su capacidad de soportar temperaturas superiores a los 1200 °C, su alta resistencia al choque térmico. Estos atributos son fundamentales, ya que acelera el proceso de fundición y contribuye directamente al ahorro energético. Además, Tavira menciona su compatibilidad con diversos diseños de hornos, incluidos los de crisol.

Aporte a la Tesis: Este antecedente fue clave para la elección del material experimental, pues valida la viabilidad de utilizar la fibra cerámica como sustituto del ladrillo refractario. Sus datos de resistencia a la alta temperatura (>1200 °C) y al choque térmico asegurando la integridad operativa del horno en las condiciones extremas de la fusión de oro.

Luyang. (2015). *Aplicación de fibra cerámica en hornos industriales*. El estudio resalta las principales ventajas de la fibra cerámica, entre las que se incluyen su alta resistencia térmica y, fundamentalmente, su baja conductividad, propiedades que se traducen en un mayor rendimiento térmico. La investigación de Luyang demostró cómo la implementación de la fibra en hornos de fusión y calderas industriales reduce el tiempo de calentamiento y optimiza el consumo energético, a la vez que mejora la seguridad operativa y reduce el peso del equipo. Aporte a la Tesis: Este antecedente se utilizó para la elaboración de la base técnica y los datos operativos necesarios para los cálculos de la presente investigación, sustentando la hipótesis de que el material cerámico ofrecerá un rendimiento superior al aislamiento convencional.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Cabrera y Morales, (2019). *Diseño y construcción de un horno crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre – Cajamarca*. Los autores se enfocaron en la optimización del diseño operativo. La investigación aportó mejoras específicas en la ubicación del quemador de un horno de crisol estacionario, lo que resultó en un sistema funcional y económico. Los autores concluyeron que esta mejora en el diseño del quemador y su alimentación permitió una distribución del calor más eficiente en el interior del horno, un factor crítico para maximizar la energía útil y reducir las pérdidas. Aporte a la Tesis: Este trabajo resalta la importancia de la configuración de la entrada de calor.

Pillaca, (2017). *Diseño de un horno de crisol para la fundición de 600 kg de aluminio reciclado utilizando gas natural*. El autor en su tesis estableció el marco teórico para el balance energético en este tipo de sistemas. También menciona que el rendimiento térmico del horno de crisol depende directamente de la relación entre la energía útil (necesaria para elevar la temperatura del metal) y la energía consumida (aportada por el combustible). Su estudio fue de bastante ayuda para entender las limitaciones de los materiales refractarios convencionales, concluyendo que una parte significativa de la energía suministrada no se convierte en energía

útil para la fusión, lo que resulta en un rendimiento térmico relativamente baja. Aporte a la Tesis: Esta investigación proporciona la base conceptual y el modelo de balance energético necesario para los cálculos de la presente tesis.

Mesía y Tello, (2012). *Diseño, construcción e instalación de un horno de resistencias para fundir minerales de oro y plata en la ciudad de Iquitos*. Los autores evaluaron de las condiciones operacionales y los parámetros de trabajo para la fundición de concentrados metálicos. Su investigación fue fundamental para determinar el rango de temperatura de trabajo adecuado para la fusión de oro y plata. Los autores establecieron una temperatura mínima de operación de 1050°C y una máxima de aproximadamente 1150 °C. Aporte a la Tesis: Este estudio proporcionó la base metodológica para definir los parámetros operativos de la presente investigación. Los rangos de temperatura máxima y mínima establecidos por Mesía y Tello fueron replicados en los ensayos de fusión de oro en crisol, asegurando así la validez y comparabilidad de las condiciones de ensayo entre el aislamiento convencional y la fibra cerámica.

2.1.3. Antecedentes Locales

Farfán y Quispe, (2024). *Análisis tecnológico en los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para la fusión de plata en joyerías de la región Cusco (Investigación Tecnológica)*. Los autores compararon el rendimiento térmico de un horno de crisol a gas y uno de resistencia eléctrica en la fusión de plata, obteniendo 81.26 % en 52 min para el horno a gas frente a 88.20 % en 45 min para el eléctrico, con una carga de 68.98 g de plata en ambos ensayos. Aporte a la Tesis: De esta investigación se adoptó el procedimiento para calcular el rendimiento térmico mediante un balance energético, considerando la energía útil absorbida por el metal, la energía aportada por el combustible y las pérdidas del sistema. Este procedimiento fue aplicado en la presente tesis para evaluar y comparar los revestimientos.

Aquima y Carlos, (2022). *Diseño y construcción de un horno de crisol basculante a gas natural para fusión de aluminio*. Los autores realizaron un análisis de los elementos de diseño y operación, logrando una eficiencia de operación de 69,12 % utilizando una carga de 15 kg de aluminio, abordando aspectos como el cálculo del rendimiento térmico, la clasificación y descripción detallada de los componentes del sistema (incluidos los refractarios y quemadores), así como las propiedades del combustible. Asimismo, enfatizaron la importancia de la distribución de calor en el interior del horno para mejorar el rendimiento térmico general del equipo.

Guevara, (2009). *Diseño y construcción de un ventilador centrífugo para horno de crisol*. Se abordó el diseño de un sistema auxiliar para hornos de crisol, enfocado en mejorar la combustión mediante el suministro adecuado de aire. Se destacó que una correcta distribución del flujo de aire permite optimizar la combustión y mejorar la transferencia de calor dentro del horno. Permitiendo alcanzar una eficiencia de combustión promedio de 59,43 % destacando la importancia del suministro y regulación del aire para mejorar la combustión.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Hornos de Crisol

Definición y funcionamiento

Un horno de crisol es un equipo térmico utilizado en procesos de fundición de metales, cuyo funcionamiento se basa en el calentamiento indirecto de un recipiente refractario denominado crisol, donde el metal alcanza la temperatura necesaria de fusión.

El calor no actúa directamente sobre el metal, sino que se transmite a través del crisol, lo que permite una mejor distribución de calor y una menor contaminación del baño metálico. (Trinks, 2004).

Este tipo de hornos, como el mostrado en la Figura 2, puede operar con diversos combustibles fósiles, como gas y petróleo, así como mediante el uso de resistencias eléctricas.

Su construcción consiste en una estructura refractaria que rodea al crisol, el cual se ubica en la parte central del horno y contiene el material a fundir. Esta estructura suele estar conformada por una carcasa metálica exterior que brinda soporte y protección, y un revestimiento interior de material refractario o aislante, como ladrillo, cemento refractario o fibra cerámica, encargado de resistir las altas temperaturas generadas durante el proceso.

Figura 2

Horno de crisol cilíndrico revestido con fibra cerámica



Nota. Adaptado de “Kit de horno de fusión de metal a gas”, Amazon.

2.2.2. Clasificación y Aplicaciones de los Hornos de Crisol

Según la Tabla 1, los hornos de crisol se clasifican de acuerdo con la fuente de energía empleada, el diseño estructural y el mecanismo de transferencia de calor hacia el crisol. Entre las fuentes más comunes destacan el gas y la electricidad, siendo los hornos eléctricos más limpios y precisos, mientras que los hornos a gas sobresalen por su rapidez y menor costo. En cuanto al diseño, existen hornos fijos y basculantes, estos últimos preferidos por facilitar el

colado. El tipo de revestimiento influye directamente en el rendimiento térmico: los hornos con ladrillo refractario presentan mayor inercia térmica, mientras que los revestidos con fibra cerámica logran calentamientos más rápidos y menor consumo energético.

Tabla 1

Clasificación de los hornos de crisol y sus aplicaciones

Tipo de Horno		Fuente de Energía	Aplicaciones
Según la Fuente de Energía	Combustibles fósiles	Gas licuado de petróleo, gas natural, diésel, etc.	Fundición de aluminio, bronce, latón, oro
	Eléctrico	Resistencias	Laboratorios, joyería, fundición fina
	Inducción	Corriente alterna de alta frecuencia	Industria metalúrgica, aceros, oro de alta pureza
	Carbón Coque	Carbón mineral o vegetal	Talleres artesanales, zonas remotas
Según la Posición del Crisol	Fijo	Gas, inducción o resistencia	Pequeñas fundiciones, joyería
	Basculante		Fundición industrial de aluminio
Según el Revestimiento	Ladrillo Refractario	Cualquier fuente	Hornos tradicionales, talleres grandes
	Fibra Cerámica		Hornos modernos, experimentales, portátiles
Según el Método de Calentamiento	Directo	Gas, carbón	Hornos artesanales y de gas
	Indirecto	Gas, eléctrico	Laboratorios, fundición fina

Nota. Elaboración propia.

2.3. Transferencia de Calor

Es el proceso mediante el cual la energía se da por una diferencia de temperatura (Incropera, 1999).

La transferencia de calor se da de un cuerpo de temperatura más elevada a uno de menor temperatura y este proceso se paraliza cuando ambos cuerpos llegan a obtener la misma

temperatura. Teniendo en consideración que siempre debe existir una diferencia de temperatura, el calor se propaga por tres distintas maneras: conducción, convección y radiación.

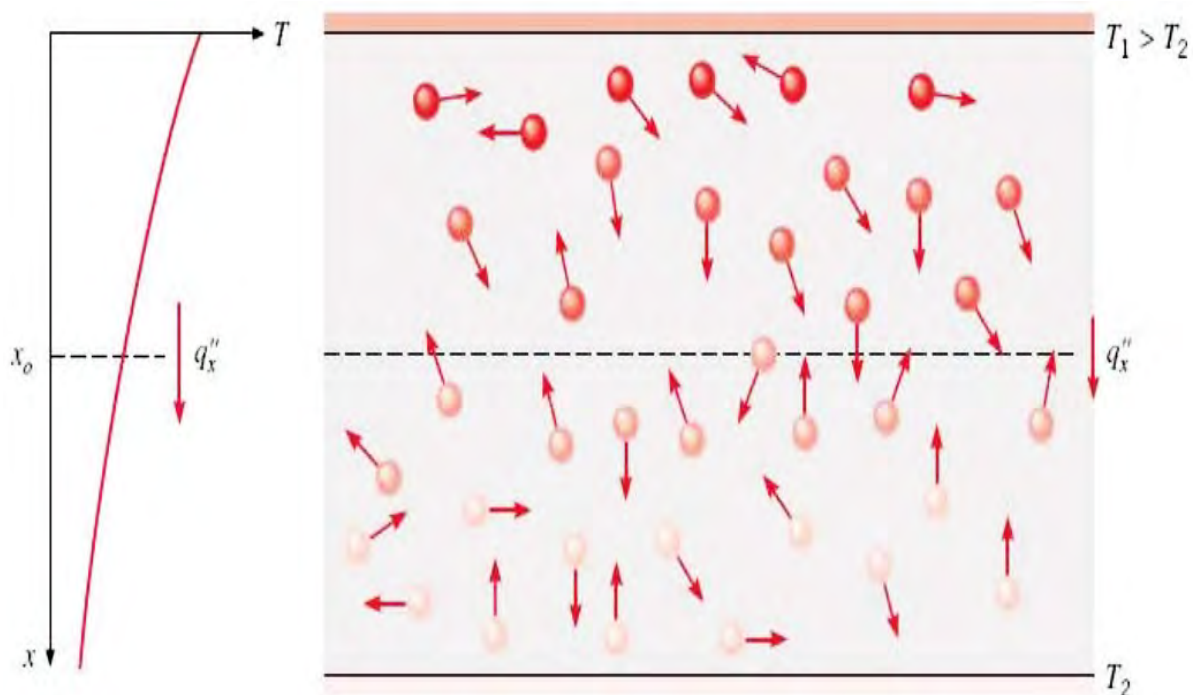
2.3.1. Conducción

La conducción se define como el paso de energía desde las partículas con mayor nivel energético hacia aquellas con menor energía dentro de una sustancia, como resultado de las interacciones entre ellas (Incropera, 1999).

La conducción es el mecanismo a través del cual el calor se transmite por medio de un material como consecuencia de la diferencia de temperatura existente. Como se observa en la Figura 3, las partículas del material, átomos o moléculas absorben energía térmica y aumentan su vibración o movimiento. A medida que estas partículas colisionan entre sí, transfieren la energía térmica a las partículas cercanas, propagando el calor de las zonas más calientes hacia las más frías.

Figura 3

Difusión de energía debido a la transferencia de calor por conducción



Nota. Tomado de, (Incropera, 1999)

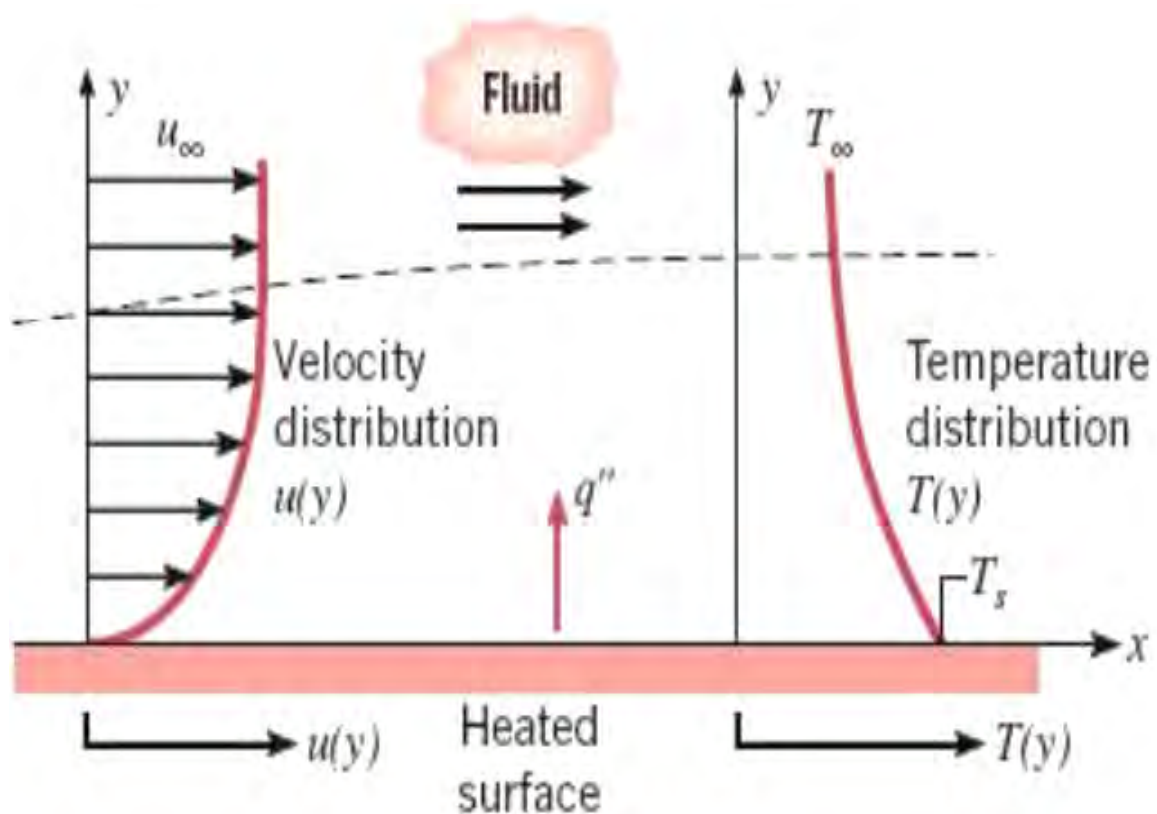
2.3.2. Convección

El mecanismo de transferencia de calor por convección está constituido por dos procesos. Además del transporte de energía originado por el movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía de igual forma es transmitida a través del desplazamiento global o macroscópico del fluido (Incropera, 1999).

La Figura 4 nos muestra como el flujo de calor por convección se da básicamente entre una zona superficial y un fluido en movimiento, los cuales interactúan por la diferencia térmica presente en ellas.

Figura 4

Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por convección



Nota. Tomado de Incropera, (1999)

2.3.3. Radiación

La radiación térmica es la energía liberada por la materia que se halla a una temperatura determinada (Incropera, 1999).

Comúnmente, si hablamos de proceso de propagación de calor mediante radiación, lo atribuimos a superficies sólidas, este fenómeno también se puede dar en gases y líquidos ya que la radiación se relaciona con los cambios de la configuración electrónica.

El medio de propagación de energía son ondas electromagnéticas en contraste con la conducción y la convección que necesitan de un medio material para la propagación de calor.

2.4. Flujo de Calor en Sistemas Cilíndricos

El flujo de calor en sistemas cilíndricos se presenta cuando existe una diferencia de temperatura entre la superficie interna y la superficie externa de un cilindro. A diferencia de los sistemas planos, en este caso la transferencia de calor ocurre en dirección radial, debido a que el área de transferencia térmica varía en función del radio.

En este tipo de geometría, el flujo de calor no es lineal, ya que el área a través de la cual se transfiere la energía térmica aumenta conforme se incrementa el radio. Por esta razón, el análisis de la conducción de calor en cilindros requiere considerar la variación logarítmica del área.

Para un cilindro de longitud L , el flujo de calor (q) se expresa mediante la ecuación (1):

(1)

Donde:

- r_i : radio interno del cilindro (m).
- r_e : radio externo del cilindro (m).
- k : conductividad térmica del material ($W/m \cdot K$).
- T_i : temperatura en la superficie interna (K).
- T_e : temperatura en la superficie externa (K).
- L : longitud del cilindro (m).

2.5. Rendimiento Térmico

El rendimiento térmico corresponde al vínculo entre la energía aprovechada que se ha obtenido en un proceso y la energía total suministrada al sistema. En términos generales,

expresa qué fracción del calor aportado se convierte efectivamente en energía útil dentro del proceso térmico desarrollado (Cengel & Boles, 2015).

Matemáticamente. El rendimiento térmico se expresa mediante la ecuación (2):

$$\text{Donde:} \quad \eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{total}}} \times 100 \quad (2)$$

- η : rendimiento térmico. (adimensional)
- $E_{\text{útil}}$: energía útil empleada en el proceso.
- E_{total} : energía total suministrada al sistema.

2.5.1. Primera Ley de la Termodinámica y Balance de Energía

La primera ley de la termodinámica, o principio de conservación de la energía, establece que la energía no se crea ni se destruye, sino que únicamente se transforma o se transfiere de un sistema a otro. Para un sistema cerrado, el enunciado se expresa como $E_{\text{entra}} - E_{\text{sale}} = \Delta E_{\text{sistema}}$, de modo que la energía neta transferida al sistema es igual al cambio en su energía interna (Cengel & Boles, 2015).

Aplicado a un horno de crisol, el sistema comprende el crisol, la carga metálica y el revestimiento refractario, y la frontera del sistema es la superficie exterior del horno. La energía que ingresa proviene de la combustión del gas licuado de petróleo, y esa energía se distribuye en dos destinos: la energía útil, que eleva la temperatura de la carga y produce su cambio de fase, y las pérdidas de calor, que se transfieren al ambiente por conducción a través del revestimiento, la tapa y la base, y por convección y radiación desde las superficies exteriores. El balance de energía del horno queda entonces expresado como $Q_{\text{suministrado}} = Q_{\text{útil}} + Q_{\text{pérdidas}}$.

Esta relación constituye el fundamento de la ecuación (2), puesto que el rendimiento térmico no es otra cosa que la fracción del balance de energía que se destina a la energía útil. Se desprende de ello que toda reducción de las pérdidas de calor, para una misma energía útil requerida, se traduce directamente en un mayor rendimiento térmico, razón por la cual el material del revestimiento resulta determinante en el desempeño del horno (Holman, 2010).

2.5.2. Calor Sensible y Calor Latente

La energía útil requerida en un proceso de fundición se compone de dos formas de transferencia de calor de naturaleza distinta. El calor sensible es aquel que produce una variación en la temperatura de la sustancia sin que ocurra un cambio de fase, y se cuantifica mediante la expresión $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$, donde c es la capacidad calorífica específica del material. El calor latente, en cambio, es el que se absorbe durante el cambio de fase a temperatura constante, y se cuantifica mediante la expresión $Q = m \cdot L$, donde L es el calor latente correspondiente a la transformación (Cengel & Boles, 2015).

En la fusión del oro intervienen ambas formas de manera consecutiva. En una primera etapa, el calor sensible eleva la temperatura de la carga desde la temperatura ambiente hasta el punto de fusión de 1064 °C. En una segunda etapa, el calor latente de fusión produce el cambio de estado de sólido a líquido, sin que la temperatura se modifique mientras la transformación se completa. En una tercera etapa, un aporte adicional de calor sensible sobrecalienta el metal líquido hasta la temperatura de colado, con el fin de asegurar la fluidez necesaria para el vaciado en la lingotera (Incropera, 1999).

La distinción entre ambas formas de calor resulta indispensable para el cálculo del rendimiento térmico, ya que la energía útil total no puede estimarse únicamente a partir de la diferencia de temperaturas: omitir el calor latente de fusión conduciría a subestimar la energía realmente aprovechada por el proceso.

2.5.3. Energía Útil

La energía útil puede manifestarse como trabajo mecánico, calor aprovechado, aumento de temperatura de un material objetivo o una combinación de estos. Un sistema térmico eficiente es aquel que minimiza las pérdidas de energía, especialmente por conducción, convección y radiación, las cuales son inevitables, pero pueden controlarse mediante mejoras de diseño o selección de materiales (Holman, 2010).

La energía útil teórica necesaria para elevar la temperatura del oro hasta su punto de fusión se expresa mediante la ecuación (3):

(3)

Donde:

- m: masa del metal a fundir (kg).
- c: capacidad calorífica (J/kg·K).
- T_m: temperatura de fusión (K)
- T_i: temperatura inicial (K).

2.5.4. Energía Para Fundir

La energía para fundir corresponde a la cantidad de energía requerida para llevar el metal desde su estado sólido hasta su estado líquido, una vez alcanzada la temperatura de fusión.

Esta energía está asociada al calor latente de fusión del material y se expresa mediante la ecuación (4):

(4)

Donde:

- L_f: calor latente de fusión del material (kJ/kg).
- m: masa del material (kg).

2.5.5. Energía Útil Total

La energía útil total corresponde a la suma de la energía necesaria para elevar la temperatura del metal hasta su punto de fusión y la energía requerida para completar el cambio de fase de sólido a líquido. Este parámetro representa la energía total aprovechada que interviene directamente en el proceso de fundición.

Se expresa mediante la ecuación (5):

(5)

2.5.6. Energía Consumida

La energía consumida corresponde a la cantidad total de energía suministrada al sistema durante el proceso de fundición, proveniente del combustible utilizado. Este parámetro permite evaluar el consumo energético real del sistema y es fundamental para el cálculo del rendimiento térmico.

Se expresa mediante la ecuación (6):

(6)

Donde:

- m: masa de combustible consumido (kg).
- PCI: poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg).

2.5.7. Poder Calorífico del Gas Licuado de Petróleo

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía liberada por unidad de masa durante su combustión completa. Se distinguen dos valores: el poder calorífico superior, que considera el calor latente recuperado al condensar el vapor de agua presente en los productos de la combustión, y el poder calorífico inferior, que excluye dicho calor por asumir que el agua permanece en estado de vapor. En hornos industriales, donde los gases de combustión se descargan a temperaturas muy superiores al punto de rocío, el valor aplicable es el poder calorífico inferior (Cengel & Boles, 2015).

El gas licuado de petróleo empleado en el horno de crisol es una mezcla de propano y butano en proporciones variables según su formulación comercial. El poder calorífico inferior del propano es de aproximadamente 46 350 kJ/kg y el del butano de aproximadamente 45 750 kJ/kg, por lo que la mezcla comercial se sitúa alrededor de 46 000 kJ/kg (Cengel & Boles, 2015). Esta cercanía entre ambos valores permite trabajar con un poder calorífico representativo de la mezcla sin introducir un error apreciable en el cálculo energético.

Con este valor y la masa de combustible consumida en cada ciclo de fundición se determina la energía consumida mediante la ecuación (6), que constituye el denominador del rendimiento térmico. De ello se sigue que el consumo de gas registrado en cada prueba es la magnitud que vincula directamente la operación del horno con su desempeño energético, y que una reducción del consumo, manteniendo la misma energía útil, implica necesariamente un mayor rendimiento térmico del sistema.

2.6. Oro

El oro es el metal de interés en la presente investigación, ya que constituye el material procesado en los hornos de crisol evaluados. Su estudio resulta fundamental debido a que sus propiedades físicas y térmicas, especialmente su punto de fusión (1064 °C), influyen directamente en el comportamiento térmico del sistema y en el consumo energético requerido durante el proceso de fundición.

Este metal es ampliamente valorado por su alta resistencia a la corrosión, su elevada conductividad térmica y eléctrica, así como por su gran maleabilidad y ductilidad, lo que lo convierte en un material de gran importancia en la industria metalúrgica. Además, su uso en procesos de fundición aurífera exige condiciones térmicas controladas, lo que hace indispensable analizar la eficiencia de los hornos empleados (Ballester, Verdeja, & Sancho, 1999).

2.6.1. *Propiedades Físicas del Oro*

Las propiedades físicas del oro son determinantes para el análisis térmico del proceso de fundición, ya que permiten establecer los requerimientos energéticos necesarios para elevar su temperatura y lograr el cambio de fase.

Entre los parámetros más relevantes se encuentran el calor específico, el punto de fusión y el calor latente de fusión, los cuales intervienen directamente en el cálculo de la energía útil del sistema. (McDonald & Hunt, 2004).

2.6.2. Fundición del Oro

La fundición del oro consiste en la aplicación de energía térmica para transformar el metal desde estado sólido hasta líquido, proceso que se desarrolla en hornos de crisol bajo condiciones controladas.

Desde el punto de vista energético, este proceso comprende dos etapas: el calentamiento del metal hasta su temperatura de fusión y el suministro de calor latente para completar el cambio de fase. Ambas etapas determinan la energía útil requerida y permiten evaluar el desempeño térmico del sistema.

En la Tabla 2 se presenta las principales propiedades físicas del oro:

Tabla 2

Propiedades físicas del oro

Propiedad	Unidad	Valor
Número atómico	-	79
Peso atómico	u	197.2
Densidad (20 °C)	g/cm ³	19.32
Punto de fusión	°C	1 064.4
Punto de ebullición	°C	2 808
Dureza (escala de Mohs)	-	2.5

Nota. Tomado de Metalurgia extractiva: Procesos de obtención: Vol. II. (p. 408), por A.

Ballester, 1999.

En este contexto, la eficiencia del proceso depende de la capacidad del horno para transferir y retener el calor suministrado, aspecto directamente influenciado por el material refractario utilizado. Por ello, el análisis de la fundición del oro permite cuantificar el consumo energético y comparar el rendimiento térmico entre los distintos revestimientos evaluados (McDonald & Hunt, 2004).

La fundición del oro se realiza generalmente en hornos de crisol, que contiene el metal y los fundentes en ambientes térmicamente estables. El uso de materiales refractarios, como la

fibra cerámica, permite optimizar el aislamiento térmico e incrementar el desempeño del proceso.

La Tabla 3 resume los parámetros técnicos de fundición de oro.

Tabla 3

Parámetros técnicos de la fundición del oro

Parámetro	Valor Típico
Punto de fusión	1,064 °C
Calor específico	0.129 J/g·°C
Calor latente de fusión	~12.55 kJ/mol (~64 J/g)
Densidad del oro fundido	~17.3 g/cm ³
Temperatura de operación del crisol	1,200–1,400 °C

Nota. Datos tomados de McDonald y Hunt (2004).

2.7. Fibra Cerámica

La fibra cerámica es uno de los materiales aislantes más eficientes para aplicaciones a altas temperaturas, debido a la baja conductividad térmica y elevada estabilidad térmica. Su desempeño está directamente relacionado con los mecanismos de transferencia de calor, por lo que su adecuada comprensión permite optimizar su uso como material de revestimiento en sistemas térmicos (Thermal Ceramics, 2009).

Este material que se puede observar en la (figura 5) es un refractario obteniéndose a partir de la fusión de alúmina (Al_2O_3) y sílice (SiO_2), formando una estructura de aluminosilicatos caracterizada por su baja densidad y alta resistencia térmica. Gracias a estas propiedades, la fibra cerámica es capaz de soportar temperaturas superiores a 1100 °C sin presentar degradación significativa, además de ofrecer una alta capacidad de aislamiento al reducir las pérdidas de calor hacia el entorno.

En aplicaciones industriales, la fibra cerámica se emplea principalmente como material de aislamiento en hornos, calderas y sistemas de conducción de fluidos a alta temperatura, donde se requiere mantener condiciones térmicas estables y mejorar la eficiencia energética del

proceso. Este material se presenta en diversas formas comerciales, tales como mantas, placas y módulos, siendo la presentación más utilizada de la manta, debido a su facilidad de instalación y flexibilidad.

Figura 5

Rollo de fibra cerámica



Nota. Elaboración propia

2.7.1. Propiedades Físicas de la Fibra Cerámica

La fibra cerámica, especialmente en su presentación en forma de manta, se caracteriza por su facilidad de instalación y adaptación a diferentes geometrías; sin embargo, presenta baja resistencia mecánica, lo que la hace susceptible a deterioro cuando es sometida a manipulación excesiva. Esta característica se debe a su baja resistencia a la tracción, aproximadamente 0.03 MPa.

Asimismo, posee una densidad del orden de 128 kg/m^3 , valor relativamente bajo que es característico de materiales aluminosilicatos con alta porosidad. Esta baja densidad contribuye directamente a su capacidad de aislamiento térmico.

En cuanto a sus propiedades térmicas, la fibra cerámica presenta una conductividad térmica aproximada de $0.16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, lo que indica una alta resistencia al flujo de calor y, por tanto, un comportamiento eficiente como material aislante.

Respecto a su comportamiento a altas temperaturas, este material puede soportar temperaturas máximas cercanas a $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que su rango de operación depende de la presentación y condiciones de uso, situándose generalmente entre $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1420 \text{ }^\circ\text{C}$ sin presentar degradación significativa en su estructura.

En conjunto, estas propiedades físicas hacen de la fibra cerámica un material altamente eficiente para aplicaciones de aislamiento térmico en sistemas de alta temperatura.

Los datos técnicos de la fibra cerámica son resumidos en la Tabla 4.

2.7.2. Propiedades Térmicas de la Fibra Cerámica

La manta de fibra cerámica, al ser sometida a condiciones de alta temperatura, presenta distintos comportamientos térmicos en función de los mecanismos de transferencia de calor involucrados, tales como la conducción, la convección y la radiación. Cada uno de estos mecanismos influye de manera diferente en el desempeño térmico del material, determinando su capacidad de aislamiento y su eficiencia en aplicaciones de alta temperatura.

Tabla 4*Datos técnicos de la fibra cerámica*

Propiedades	Unidad
Resistencia a la tracción	0.03 MPa
Densidad	128 kg/m ³
Conductividad Térmica	0.16 W/m·K
Temperatura de trabajo	1000 °C – 1420 °C
Max. Temperatura	1500 °C

Nota. Datos tomados de la ficha técnica del fabricante Schemin (2025)

2.7.2.1. Conducción.

La transferencia de calor por conducción en la manta de fibra cerámica se produce mediante dos mecanismos principales: la conducción a través del aire contenido en los poros entre las fibras y la conducción sólida a través de las fibras individuales y sus puntos de contacto.

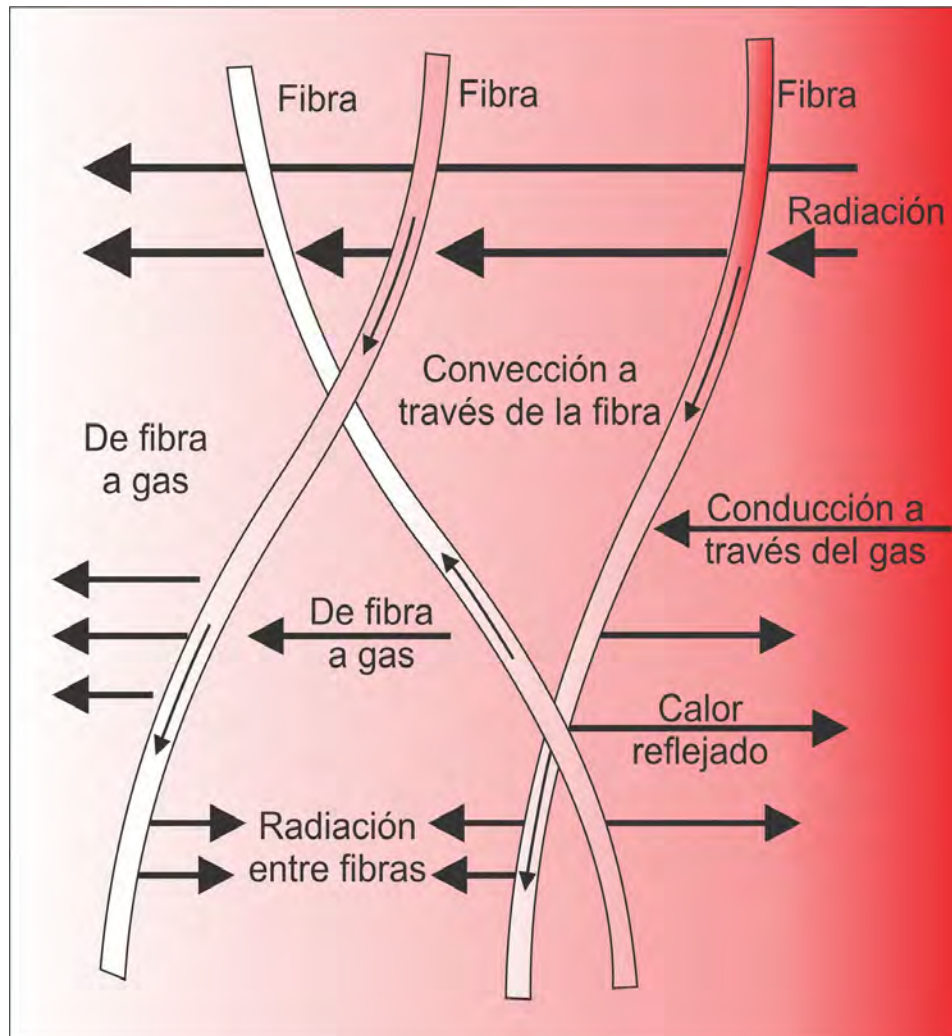
A bajas temperaturas, la conducción constituye el mecanismo predominante de transferencia de calor, tal como se ilustra en la Figura 6. Sin embargo, a medida que la temperatura aumenta, la contribución de la radiación térmica se vuelve significativa, incrementando la transferencia total de energía, mientras que los mecanismos de conducción en el aire y en la fase sólida continúan participando de manera simultánea.

2.7.2.2. Radiación.

La radiación es el mecanismo predominante de transferencia térmica cuando se habla de altas temperaturas y en el caso de la fibra cerámica, la transferencia de calor se produce en dos fases: en primer lugar, la radiación no es absorbida es reflejada y dispersada por las fibras. En segundo lugar, el calor que es absorbido por las fibras es reflejado entre ellas, favoreciendo la distribución térmica, tal cual se ilustra en la Figura 6.

Figura 6

Mecanismos de transferencia de calor en la fibra cerámica



Nota. Tomado de Thermal Ceramics (2009).

2.7.2.3. Convección.

La transferencia de calor por convección dentro de la manta de fibra cerámica es limitada debido a su estructura altamente porosa, constituida por una red de fibras que genera pequeños espacios de aire. Las reducidas dimensiones de estos espacios restringen el movimiento del aire en el interior de los poros y dificultan la formación de corrientes convectivas significativas.

Como consecuencia, el aire atrapado entre las fibras presenta una movilidad reducida, por lo que la transferencia de calor por convección a través de la manta es baja en comparación con los

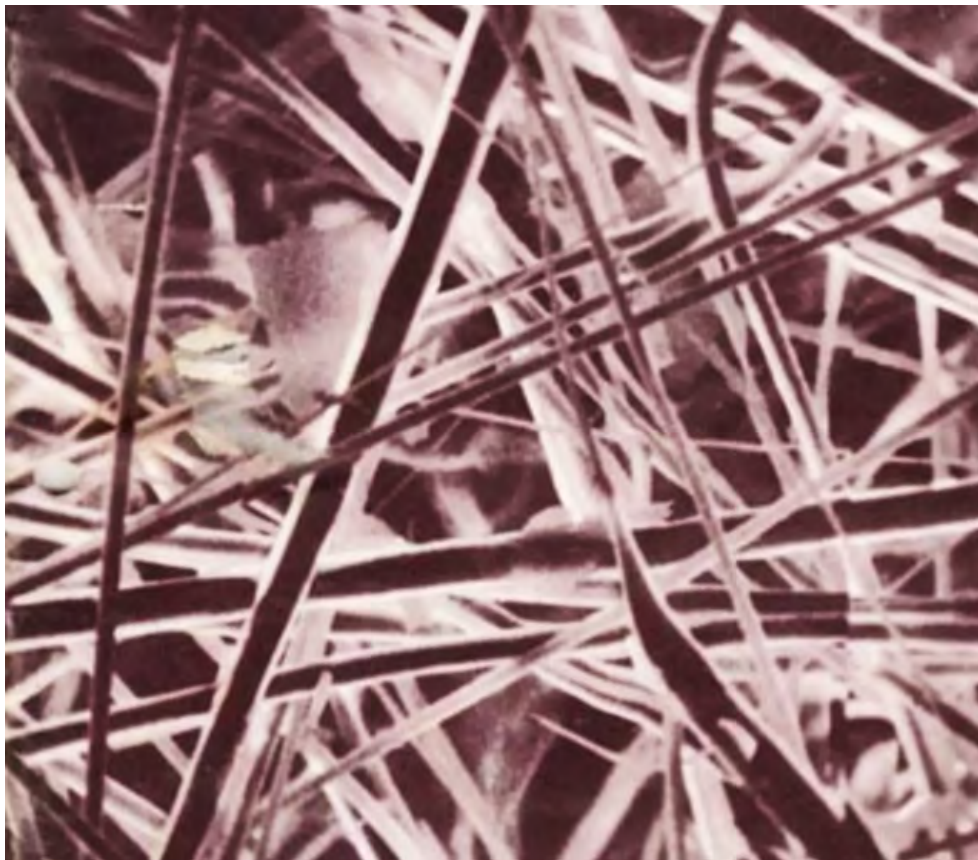
mecanismos de conducción y radiación. Esta característica contribuye al comportamiento aislante de la fibra cerámica, al limitar la transferencia de calor a través del revestimiento.

2.7.3. Microestructura de la Fibra Cerámica

La manta de fibra cerámica presenta una estructura fibrosa constituida por filamentos cerámicos finos dispuestos de manera entrelazada y no uniforme. Estas fibras forman una red tridimensional que presenta espacios intersticiales entre sus filamentos. La composición de las fibras depende del tipo de producto, siendo común la presencia de óxidos cerámicos como la sílice y la alúmina. En la Figura 7 se observa la microestructura de la fibra cerámica empleada en la investigación.

Figura 7

Microestructura de la fibra cerámica compuesta por sílice y alúmina



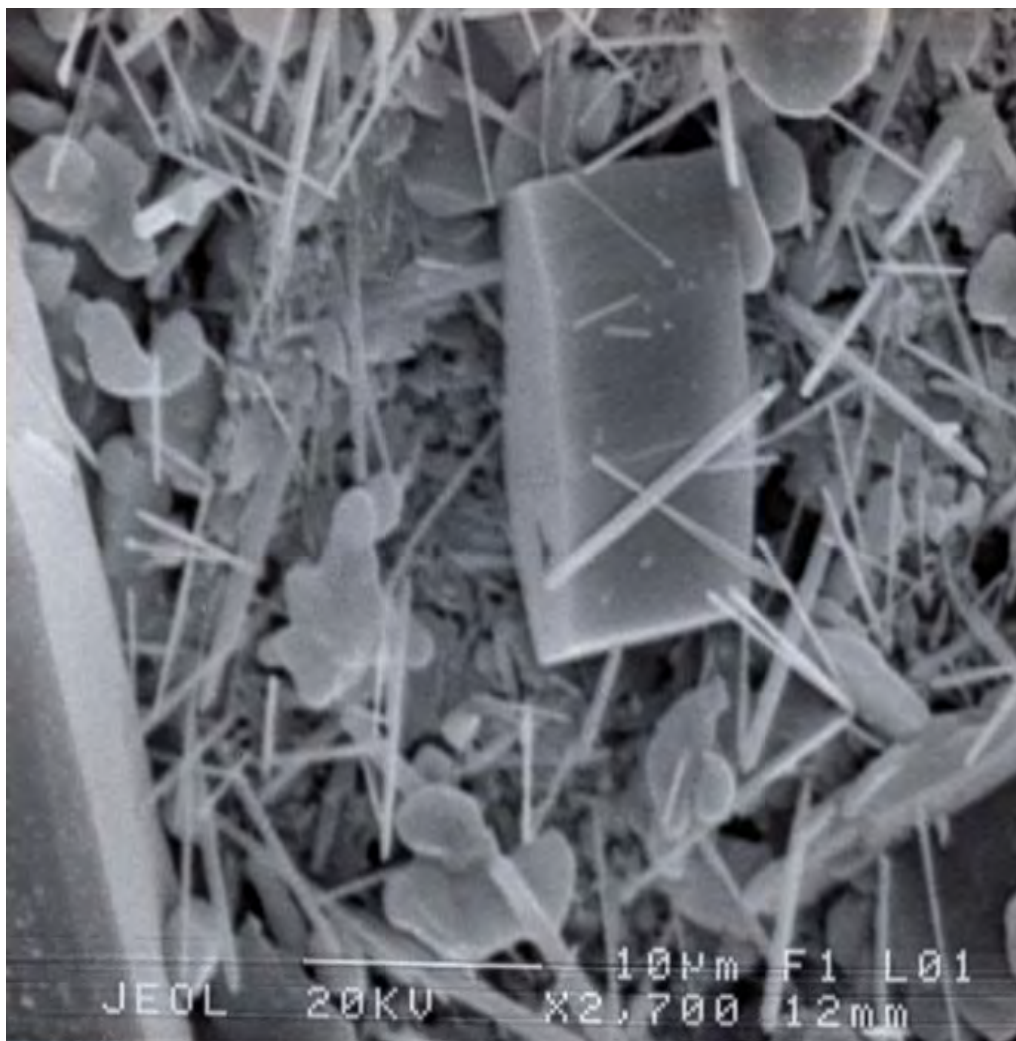
Nota. Tomado de Díaz. (2009).

La microestructura de la fibra cerámica es fibrosa, pero a la vez amorfa, no existe cristalización en su estructura, pero esto no quiere decir que no puedan aparecer formaciones cristalográficas. Si bien la fibra cerámica soporta altas temperaturas, la exposición a esto provoca la aparición de formaciones cristalinas, como lo son la “mullita” y la “cristobalita”.

La Mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) es la primera formación cristalográfica que aparece en la superficie de la fibra cerámica. Tiene una cristalización ortorrómbica y cuenta con una estructura lamelar, tal cual se muestra en la Figura 8. Estas estructuras se forman a temperaturas altas, superiores a los 1000 °C.

Figura 8

Microestructura de la mullita



Nota. Tomado de Witzke (2024).

La Mullita mejora las propiedades térmicas como la resistencia al choque térmico, la resistencia a la fluencia (deformación bajo carga a altas temperaturas) y la durabilidad frente a la erosión y al desgaste. Un exceso de cristales de Mullita provocara que la fibra cerámica sea muy propensa a sufrir fisuras.

La Cristobalita (SiO_2) es la segunda cristalización presente en la fibra cerámica, se podría considerar como una “recristalización”. Se forma a altas temperaturas, superiores a 1200 °C. Estas dos formaciones cristalográficas se dan según la temperatura en la que está expuesta la fibra cerámica. La Tabla 5 resume los cambios de fase de la fibra cerámica.

Tabla 5

Cambios de fase de la fibra cerámica

Temperatura (°C)	Mineralogía	Gravedad Específica g/cm ³	% Volumen de Fase Sólida
980	100% Alúmina - Sílice	2.6	4.6
980 - 1100	64% Mullita - 36% Sílice	2.6	4.2
1100	64% Mullita - 36% Cristobalita	2.88	4.1

Nota. Datos adaptados de Thermal Ceramics (2009)

2.7.4. Aplicaciones de la Fibra Cerámica

La fibra cerámica comenzó a comercializarse inicialmente en Estados Unidos hacia finales de la década de 1940 como aislante térmico, principalmente en presentaciones de fibra suelta, mantas y bloques.

2.7.4.1. Revestimientos de Hornos.

La fibra cerámica es por excelencia, un buen aislante térmico y, por ende, su uso como revestimiento de hornos (Figura 9) se hace ya algo común. No solo soporta altas temperaturas, si no que retiene el calor dentro del horno.

Figura 9

Horno para cerámicos con fibra cerámica



Nota. Tomado de Sánchez. (2024)

2.7.4.2. Aislamiento de Edificaciones.

El rubro inmobiliario no es ajeno a la innovación en aislamiento térmico, ya sea para zonas frías o cálidas, la fibra cerámica es utilizada en techos, paredes (Figura 10) y pisos con el fin de optimizar el rendimiento energético y disminuir los gastos de climatización y enfriamiento.

2.7.4.3. Aislamiento de Tuberías.

Algunas tuberías, en su mayoría metálicas, requieren de aislamiento térmico debido a que estas transportan fluidos a bajas o altas temperaturas, es ahí donde la fibra cerámica es utilizada debido a sus propiedades como aislante térmico. Tal como se muestra en la figura 11.

Figura 10

Implementación de aislamiento térmico a edificaciones



Nota. Tomado de Grupo Industrial Rusgar. (2024), Aislante térmico para casa.

Figura 11

Tuberías revestidas con fibra cerámica



Nota. Tomado de Sánchez (2024)

2.8. Ladrillo Refractario

Los ladrillos refractarios (Figura 12) son materiales capaces de resistir altas temperaturas, choques térmicos y ambientes químicamente agresivos. Su función principal es la de contener el calor en hornos industriales, calderas, cámaras de combustión y equipos de alta temperatura.

Figura 12

Ladrillo refractario



Nota. Tomado de Souza (2020)

2.8.1. *Propiedades Físicas del Ladrillo Refractario*

Los ladrillos refractarios presentan propiedades físicas y térmicas que dependen directamente de su densidad y porosidad. En general, los refractarios más densos poseen una mayor resistencia mecánica, mientras que los refractarios livianos o aislantes se caracterizan por ofrecer una mejor capacidad de aislamiento térmico.

La densidad está estrechamente vinculada al porcentaje de porosidad: los ladrillos densos presentan porosidades entre 15 % y 30 %, con densidades que varían entre 2.0 y 2.8

g/cm³; por su parte, los ladrillos livianos alcanzan porosidades de hasta 75 %, con densidades reducidas de 0.5 a 1.2 g/cm³, siendo estos últimos los más utilizados cuando se requiere minimizar la pérdida de calor.

El comportamiento térmico también está influenciado por la densidad del material. El coeficiente de conductividad térmica (k) suele ser menor en los ladrillos livianos, situándose alrededor de 0.47 W/m·K, lo que favorece su función aislante; por lo contrario, los ladrillos más densos presentan valores de conductividad cercanos a 1.05 W/m·K, reflejando una mayor facilidad para transmitir calor. (Kingery, Bowen, & Uhlman, 1976)

En cuanto a su desempeño térmico global, los ladrillos refractarios comunes trabajan de manera segura en un rango aproximado de 1,200 a 1,400 °C, alcanzando temperaturas máximas de servicio cercanas a 1,500 °C dependiendo de la composición y calidad del material. Asimismo, su resistencia a la tracción, aunque menor que otras características mecánicas como la capacidad de soportar compresión, suele encontrarse entre 1 y 3 MPa, valor típico para materiales cerámicos porosos empleados en hornos industriales.

Los datos técnicos del ladrillo refractario son resumidos en la tabla 6.

Tabla 6

Datos técnicos del ladrillo refractario

Propiedades	Denso	Ligero	Unidad
Resistencia a la tracción	1 - 3		MPa
Densidad	2.0 – 2.8	0.5 – 1.2	kg/m ³
Conductividad Térmica	1.05	0.47	W/m·K
Temperatura de trabajo	1200 – 1400		°C
Max. Temperatura	1500		°C

Nota. Datos tomados de la ficha técnica del fabricante Schemin (2025)

2.8.2. Propiedades Térmicas del Ladrillo Refractario

2.8.2.1. Conductividad Térmica.

Los ladrillos refractarios presentan una conductividad térmica baja en comparación con otros materiales cerámicos, lo que permite minimizar pérdidas de calor. (Kingery, Bowen, & Uhlman, 1976)

Según a la porosidad, los ladrillos refractarios adquieren distintos valores típicos de conductividad térmica.

- 30–40 % de porosidad: 0.8–1.3 W/m·K
- 20–25 % de porosidad: 1.4–1.8 W/m·K

A diferencia de los aislantes cerámicos (como la fibra cerámica, ~0.1–0.2 W/m·K), los ladrillos refractarios almacenan más calor y elevan la inercia térmica del horno.

2.8.2.2. Capacidad Calorífica y Almacenamiento Térmico.

El ladrillo refractario presenta una elevada capacidad térmica, lo que le permite almacenar una considerable cantidad de energía antes de elevar su temperatura.

Según (Richerson, 1995), el calor específico de los refractarios silico-aluminosos está en el siguiente rango:

- 0.75–1.05 kJ/kg·K

Provocando dos efectos dentro de los hornos:

- Aumento de inercia térmica: el horno tarda más en calentarse, pero mantiene mejor la temperatura.
- Mayor estabilidad térmica: las fluctuaciones de temperatura se reducen, protegiendo el crisol y minimizando tensiones térmicas.

2.8.2.3. Estabilidad Térmica y Transformación de Fases.

En ambientes de alta temperatura, los ladrillos refractarios experimentan transformaciones en su fase cristalina que pueden afectar su comportamiento.

Las principales son:

- Formación de mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$): mejora la resistencia mecánica y la refractariedad.
- Conversión de cuarzo (a tridimita y cristobalita): afecta el volumen y puede generar tensiones.
- Sinterización interna: reduce la porosidad y aumenta la conductividad con el tiempo.

2.9. Controladores y Automatización del Proceso de Fundición

Se han presentado avances en el área del control de hornos de fundición, basada en la tecnología de comunicación y transmisión de señales. Algunos sistemas emplean relés programables, PLCs o incluso sistemas embebidos o informáticos para el control del proceso de fundición. (Quiroga, Flores, Coba, & Jeysson, 2020).

Los controladores o sensores son dispositivos encargados de brindar información a los procesadores y dar así un valor real, en el caso de los sensores de temperatura, es el pirómetro el cual da lectura a la data otorgada por la termocupla y está la transforma en el valor de temperatura en la cual se encuentra el proceso. Su importancia es tal que actualmente en la industria, no hay equipos ni maquinas que no cuenten con al menos un controlador o sensor.

2.9.1. Control de Temperatura en Hornos de Crisol

La implementación de sensores de temperatura en hornos de crisol, son parte de la automatización de procesos, esto debido a que estos sensores nos brindaran información en tiempo real sobre los cambios de temperatura y así, poder regularla.

El control de temperatura en un horno de crisol se sustenta en tres elementos concatenados: la termocupla como sensor primario, protegida por una vaina cerámica; el pirómetro, que convierte la señal termoeléctrica en una lectura de temperatura; y el elemento final de control, que en los hornos a gas corresponde a la regulación del caudal de combustible y

del aire de combustión. La ubicación del sensor es determinante, pues una termocupla expuesta directamente a la llama registra una temperatura distinta a la de la carga, por lo que se recomienda instalarla protegida en la pared de la cámara y alejada del cono de combustión (Trinks, 2004).

Operativamente, este control asegura que la carga alcance y mantenga la temperatura objetivo de fusión, evitando la fusión incompleta y el sobrecalentamiento, y permite acortar el tiempo de permanencia del horno a máxima potencia, con la consiguiente reducción del consumo de combustible e incidencia directa en el rendimiento térmico. Quiroga et al. (2020) demuestran que esta lógica puede automatizarse en hornos de crisol mediante controladores programables que actúan sobre el quemador a partir de la lectura del sensor.

Figura 13

Sensor de temperatura “termocupla”



Nota. Tomado de (IQ S.A.C., 2020)

2.9.2. Tipos de Sensores de Temperatura y su Aplicación

- **Termocupla Tipo K:** La termocupla tipo K, formada por aleaciones de cromel (níquel-cromo) y alumel (níquel-aluminio), es una de las más utilizadas debido a su amplio rango de temperatura (-200 °C a 1,260 °C) y su resistencia a la oxidación, ideal para hornos y procesos de fundición (Holman, 2010).
- **Termocupla Tipo J:** Compuesta de hierro y Constantán (cobre-níquel), la termocupla tipo J opera en el rango de -40 °C a 760 °C. Aunque es menos resistente a la oxidación que el tipo K, es adecuada para ambientes de vacío o inertes (Holman, 2010).
- **Termocupla Tipo T:** El tipo T utiliza cobre y Constantán, destacándose por su alta precisión en mediciones de bajas temperaturas (-200 °C a 400 °C), por lo que es común en laboratorios y sistemas de refrigeración (Holman, 2010).
- **Termocupla Tipo N:** Fabricada con nicrosil y nisil, el tipo N es diseñada para ofrecer alta estabilidad a temperaturas elevadas (-200 °C a 1,300 °C) y mejor resistencia a la contaminación, siendo ideal en ambientes oxidantes de fundición (Holman, 2010).
- **Termocupla Tipo R:** Esta termocupla combina platino y rodio (13%) con platino puro, operando en temperaturas de 0 °C a 1,760 °C. Es utilizada en aplicaciones de alta precisión como metalurgia y laboratorios (Holman, 2010).
- **Termocupla Tipo S:** Similar a la R, pero con 10% de rodio, el tipo S es ampliamente empleada en hornos de alta temperatura y mediciones científicas gracias a su alta estabilidad y precisión (Holman, 2010).
- **Termocupla Tipo B:** La termocupla tipo B está formada por platino con 30% y 6% de rodio, soportando hasta 1,820 °C. Es preferida en procesos de fundición de metales preciosos debido a su excelente resistencia a temperaturas extremas (Holman, 2010).

En la tabla 7 se puede observar un resumen de los tipos de termocuplas, sus materiales, rango de temperatura, precisión y sus aplicaciones típicas.

Tabla 7*Tipos de termocuplas*

Tipo	Materiales	Rango de temperatura	Precisión	Aplicaciones típicas
K	Cromel–Alumel (Ni-Cr/Ni-Al)	–200 °C a 1,260 °C	±2.2 °C o 0.75%	Hornos, calderas, procesos industriales
J	Hierro–Constantán (Fe/Cu-Ni)	0 °C a 760 °C	±2.2 °C o 0.75%	Ambientes, reductores, hornos básicos
T	Cobre–Constantán (Cu/Cu-Ni)	–200 °C a 370 °C	±1.0 °C o 0.75%	Criogenia, refrigeración
N	Nicrosil–Nisil (Ni-Cr-Si/Ni-Si)	–200 °C a 1,300 °C	±2.2 °C o 0.75%	Alta estabilidad, sustituto de tipo K
R	Platino–Rodio (Pt–13%Rh/Pt)	0 °C a 1,760 °C	±1.5 °C o 0.25%	Hornos de alta precisión
S	Platino–Rodio (Pt–10%Rh/Pt)	0 °C a 1,760 °C	±1.5 °C o 0.25%	Fundición de metales preciosos (oro)
B	Platino–Rodio (Pt–30%Rh/Pt– 6%Rh)	870 °C a 1,820 °C	±0.5%	Alta temperatura, fundición, laboratorios

Nota. Datos adaptados Holman (2010).

2.10. Transferencia de Calor en un Cilindro

2.10.1. Conducción

La transferencia de calor por conducción en un cilindro ocurre debido a un gradiente de temperatura dentro del material sólido, sin movimiento macroscópico del mismo. En geometría cilíndrica, el flujo de calor se da radialmente desde la superficie interna hacia la externa (o viceversa), dependiendo de la diferencia de temperaturas. Este fenómeno se describe mediante la ley de Fourier adaptada a coordenadas cilíndricas (Incropera, 1999).

De manera complementaria, se puede entender la conducción como el mecanismo mediante el cual la energía térmica se transmite por interacción molecular directa dentro de un material, siendo más eficiente en sólidos con alta conductividad térmica, como los metales (Kreith & Bohn, 2001).

2.10.2. Convección

La convección en un cilindro implica la transferencia de calor entre la superficie del cilindro y un fluido en desplazamiento que lo rodea. Puede ser natural (por diferencias de densidad debido a la temperatura) o forzada (cuando interviene un agente externo como un ventilador). Este mecanismo combina conducción en la capa límite del fluido y el traslado de energía a causa del desplazamiento del fluido (Cengel & Boles, 2015).

Adicionalmente, la convección puede interpretarse como un proceso en el que el calor es transportado por el movimiento global del fluido, donde las variaciones de temperatura generan corrientes internas que intensifican la transferencia térmica (Bejan, 2013).

2.10.3. Radiación

La transferencia de calor por radiación en un cilindro se produce mediante la emisión de energía como radiación electromagnética desde su superficie, sin necesidad de un medio material. Este comportamiento está en función de la temperatura absoluta del cilindro y de sus propiedades superficiales, como la emisividad (Holman, 2010).

Asimismo, la radiación térmica puede describirse como un proceso de intercambio energético que ocurre incluso en el vacío, donde todos los cuerpos emiten energía proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta (Modest, 2013).

2.11. Número de Rayleigh

El número de Rayleigh describe el régimen de convección natural en un fluido. Representa el vínculo entre las fuerzas de flotación (debidas a diferencias de temperatura) y las fuerzas disipativas (viscosidad y difusión térmica). Su análisis permite determinar si las fuerzas generadas por las diferencias de temperatura son suficientes para producir un movimiento convectivo significativo. En nuestro caso, debido a las dimensiones reducidas de los espacios porosos, la convección interna resulta limitada, lo que permite considerar la conducción y la radiación como mecanismos de mayor relevancia en el comportamiento térmico del

revestimiento. Un valor alto de este número indica una convección más intensa (Incropera, 1999).

Desde otra perspectiva, este número también permite predecir el inicio de corrientes convectivas en un fluido, indicando cuándo el calor deja de transferirse predominantemente por conducción y pasa a ser dominado por la convección (Cengel & Boles, 2015).

Sus rangos de operación definen regímenes claramente diferenciados. En una capa de fluido confinada y calentada desde abajo, la convección no se establece mientras Ra permanece por debajo del valor crítico de aproximadamente 1708; en esa condición el calor atraviesa la capa por conducción pura y el número de Nusselt vale la unidad. Entre 1708 y del orden de 5×10^4 se desarrollan celdas convectivas ordenadas, y para valores superiores el movimiento se vuelve progresivamente irregular y turbulento (Incropera, 1999).

En superficies verticales calientes expuestas al aire, la capa límite se mantiene laminar mientras Ra es menor que 10^9 y se vuelve turbulenta por encima de ese valor, límite que determina cuál correlación de convección natural corresponde aplicar. Para cilindros horizontales, las correlaciones de uso corriente son válidas en el intervalo $10^{-5} \leq Ra \leq 10^{12}$, que cubre ampliamente el caso de la pared exterior del horno de crisol (Incropera, 1999). Este criterio sustenta lo señalado anteriormente: en los espacios porosos de la manta de fibra cerámica, cuya longitud característica es del orden de fracciones de milímetro, el valor de Ra resulta muy inferior al crítico, por lo que la convección interna es despreciable frente a la conducción y la radiación.

El número de Rayleigh se expresa en la ecuación (7):

(7)

- g : Aceleración de la gravedad.
- β : Coeficiente de expansión térmica volumétrica del fluido.
- t_{ex} : Temperatura interna.

- T_a : Temperatura ambiente.
- L : Longitud característica de la superficie o geometría estudiada.
- V : Viscosidad cinemática del fluido.
- α : Difusividad térmica del fluido.

2.12. Número de Nusselt

El número de Nusselt expresa el vínculo entre la transferencia de calor por convección y por conducción pura en un fluido. Indica la eficiencia del proceso convectivo; valores mayores implican una mayor transferencia de calor (Cengel & Boles, 2015).

De forma adicional, el número de Nusselt puede interpretarse como una medida del incremento de la transferencia de calor a causa de la existencia de movimiento del fluido en comparación con un estado puramente conductivo (Bejan, 2013)

Su cota inferior es la unidad: $Nu = 1$ corresponde a un fluido en reposo, en el que todo el calor atraviesa la capa por conducción. A partir de ese valor, la magnitud de Nu indica cuántas veces se intensifica la transferencia respecto de la conducción pura. En convección natural con aire, los valores usuales van desde unas pocas unidades hasta el orden de la centena, lo que corresponde a coeficientes de película de 2 a 25 $W/m^2 \cdot K$; en convección forzada de gases, Nu alcanza valores del orden de 10^2 a 10^3 , con coeficientes de 25 a 250 $W/m^2 \cdot K$ (Incropera, 1999).

A diferencia del número de Rayleigh, el número de Nusselt no constituye un criterio para establecer el régimen de flujo, sino su resultado: es Rayleigh el que define si la capa límite es laminar o turbulenta y, en función de ese régimen, se selecciona la correlación con la que se calcula Nu . Dichas correlaciones adoptan la forma general $Nu = C \cdot Ra^n$, con exponente próximo a 1/4 en régimen laminar y a 1/3 en régimen turbulento, y coeficientes que dependen de la geometría de la superficie (Incropera, 1999).

De este modo, ambos números adimensionales se emplean de forma encadenada en el presente estudio: el número de Rayleigh identifica el régimen de convección en la superficie

exterior del horno y el número de Nusselt permite estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección con el que se cuantifican las pérdidas térmicas de cada revestimiento.

El número de Nusselt se define como el producto del coeficiente de convección por la longitud característica, dividido entre la conductividad térmica del fluido, y se expresa en la ecuación (8):

(8)

- **Nu_s**: Número de Nusselt.
- **hc**: Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²·K).
- **L**: Longitud característica de la geometría estudiada (m).
- **k**: Conductividad térmica del fluido (W/m·K).

Capítulo III

Hipótesis y Variables

3.1. Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis General*

El horno de crisol revestido con fibra cerámica presenta un mayor rendimiento térmico en comparación con el horno revestido con materiales refractarios convencionales en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.

3.1.2. *Hipótesis Específicas*

1. El horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales presenta un menor rendimiento térmico debido a las mayores pérdidas de calor a través del revestimiento.
2. El horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica presenta un mayor rendimiento térmico debido a la baja conductividad térmica del material de revestimiento, lo que contribuye a reducir las pérdidas de calor.
3. Existe una diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento térmico entre el horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica y el horno revestido con materiales refractarios convencionales durante el proceso de fundición de oro.

3.2. Variables

3.2.1. *Identificación de Variables e Indicadores*

Variable Dependiente

- Rendimiento térmico.

Variable Independiente

- Tipo de revestimiento del horno de crisol (fibra cerámica / ladrillo refractario)

3.2.2. Operacionalización de Variables

Tabla 8

Matriz de operacionalización de variables

Variable		Definición Conceptual	Definición Operacional	Indicadores	Técnica e Instrumento
Dependiente	Rendimiento térmico	Grado de aprovechamiento de la energía térmica suministrada en relación con la energía útil requerida para fundir una masa específica. (Cengel & Boles, 2015)	Se calcula mediante la relación entre la Energía Útil y la Energía Consumida, expresada en porcentaje (Balance Energético).	- Rendimiento Térmico (%) - Energía útil (MJ) - Energía consumida (MJ)	- Balance energético - Análisis de datos - Termocupla. - Balanza - Cronómetro - Termómetro infrarrojo - Medidor de flujo de gas
Independiente	Tipo de revestimiento del horno de crisol	Material utilizado como revestimiento térmico del horno, cuya función es aislar térmicamente la cámara de combustión, reducir las pérdidas de calor y soportar altas temperaturas durante el proceso de fundición.	Se operacionaliza mediante la comparación de dos tipos de revestimiento aplicados a hornos de crisol: materiales refractarios convencionales y manta de fibra cerámica.	- Conductividad térmica (W/m*K) - Espesor del revestimiento (mm) - Densidad del material (kg/m³) - Tipo de revestimiento	- Observación directa. - Calibrador o micrómetro. - Revisión documental - Ficha técnica del proveedor - Registro experimental

Nota. Elaboración propia

Capítulo IV

Metodología

4.1. Ámbito de Estudio

4.1.1. Localización Política

La Empresa Minera Aurífera Estrella De Chaparra S.A. (EMAECSA), cuenta con una planta de beneficio llamada “Planta Pampa Capac”, ubicada en el sector de Pampa Capac, distrito de Chaparra, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa.

4.1.2. Localización Geográfica

Ubicada en las siguientes coordenadas: Latitud: $-15^{\circ} 53' 30.59''$ S y Longitud: $-74^{\circ} 7' 20.19''$ O. El acceso se realiza desde la ciudad de Arequipa, de la cual dista 396 km por vía terrestre. El ingreso se toma en el Arco de Cháparra, situado en el kilómetro 620 de la carretera Panamericana Sur, desde donde se recorren 8.26 km por vía carrozable hasta la planta de beneficio, según la ruta señalizada en la Figura 14.

Figura 14

Ubicación de la Planta Beneficio Pampa Capac de la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.



Nota. Elaboración propia a partir de capturas de Google Maps (2025).

4.2. Investigación: Nivel, Tipo, Alcance y Diseño

4.2.1. Nivel de Investigación

El presente estudio se enmarca en un nivel de investigación aplicativo - experimental, al emplear principios y teorías de transferencia de calor y metalurgia con el propósito de comparar el rendimiento térmico del horno de crisol cuando emplea fibra cerámica frente a materiales refractarios convencionales.

Asimismo, presenta un enfoque cuantitativo, al analizar y contrastar el comportamiento térmico de ambos hornos mediante mediciones, registros experimentales y criterios objetivos de desempeño.

4.2.2. Tipo de Investigación

El estudio fue de tipo tecnológica-aplicativa, dado que se orienta a la evaluación comparativa del rendimiento térmico del horno de crisol utilizando fibra cerámica frente a materiales refractarios convencionales. Este tipo de investigación implica el empleo de la práctica científica y técnica en transferencia de calor y tecnología de materiales con el propósito de analizar alternativas reales de mejora en un proceso productivo de la empresa ya mencionada.

4.2.3. Alcance de la Investigación

El alcance del estudio es Explicativo. La investigación está diseñada para establecer y demostrar la relación de causalidad entre las variables, buscando explicar por qué el uso de la fibra cerámica genera un impacto positivo en el rendimiento térmico.

El objetivo es determinar que la manipulación de la variable independiente (el tipo de revestimiento) es la causa directa de la variación significativa en la variable dependiente (rendimiento térmico).

4.2.4. Diseño de la Investigación

El diseño fue experimental, específico en cuasi experimental, debido a que la investigación se desarrolla en un contexto de campo, donde no es posible realizar una asignación aleatoria de los objetos de estudio ni mantener un control absoluto sobre todas las variables externas (como las fluctuaciones del gas o la calidad exacta del concentrado), características de un experimento neto de laboratorio.

4.3. Población de Estudio

4.3.1. Población

La población de la presente investigación estuvo conformada por el conjunto de todos los ciclos de fundición de oro realizados en los hornos de crisol. La población comprende los registros operativos y térmicos de los procesos de fusión ejecutados en el horno de crisol fabricado con materiales refractarios convencionales como también en el horno con fibra cerámica.

4.3.2. Tamaño de Muestra

El estudio emplea un muestreo no probabilístico por conveniencia.

La muestra está constituida por un total de 14 ciclos de fundición, distribuidos de la siguiente manera para el análisis comparativo:

- 07 ciclos de fundición realizados en el horno convencional de ladrillo refractario (Grupo Control).
- 07 ciclos de fundición realizados en el horno con revestimiento de fibra cerámica (Grupo Experimental).

4.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

4.4.1. Técnicas

La técnica principal empleada en la investigación es la observación estructurada, aplicada de manera sistemática durante los ensayos de fundición de oro en los hornos de crisol.

Esta técnica se complementa con el registro de mediciones directas y cálculo de parámetros, que implica el uso de instrumentos de precisión para capturar datos (tiempo, consumo de combustible y temperaturas); posteriormente procesarlos mediante el modelo de Balance Energético.

Para garantizar la homogeneidad en la toma de datos entre el horno de ladrillo refractario y el de fibra cerámica, se estableció el siguiente protocolo de registro para cada uno de los 14 ciclos:

- **Fase de Parametrización Inicial:** Registro de la temperatura ambiente (°C) mediante el termómetro digital infrarrojo y cuantificación de la masa de la carga de oro (kg) utilizando una balanza de precisión.
- **Registro de Consumo Energético:** Se inició el cronometraje y la lectura del medidor de flujo de gas simultáneamente con el encendido del quemador, asegurando la trazabilidad del consumo de combustible.
- **Registro de Temperatura:** Se tomó lectura de la temperatura superficial y la temperatura interna del horno en intervalos de tiempo fijos (cada minuto), permitiendo construir la curva de calentamiento de cada material.
- **Cierre de Ciclo Operativo:** Al alcanzar la temperatura objetivo de fusión (1150 °C), se registra el tiempo de fusión final y la lectura total del consumo de gas.

4.4.2. Instrumentos

- Crisol.
- Fibra cerámica.
- Termocupla tipo K: Temperatura interna del horno.
- Termómetro infrarrojo: Temperatura superficial del horno.
- Herramientas de análisis de datos: Análisis de datos en Microsoft Excel y Minitab.

4.5. Procedimiento Experimental del Estudio

El estudio constará de tres fases principales:

4.5.1. Construcción de un Horno Alterno con Manta de Fibra Cerámica

Con el fin de realizar un análisis comparativo adecuado, se procedió a la construcción de un horno alterno utilizando fibra cerámica como material refractario principal. El horno tiene las mismas dimensiones geométricas y características estructurales del horno convencional de ladrillo refractario, con el propósito de asegurar la uniformidad de las condiciones experimentales.

Con la ayuda de la termocupla tipo K, instalada en la zona de mayor gradiente térmico, se medirá la temperatura interna de manera precisa y continua durante el proceso de fusión. Este instrumento está conectado a un multímetro digital calibrado, permitiendo la recopilación de datos térmicos para su posterior análisis comparativo.

4.5.2. Experimentación

Se ejecutarán 7 ciclos de fundición en condiciones operativas normales en ambos hornos, registrando en cada uno:

- Temperatura inicial y final (°C).
- Temperatura externa del horno (°C).
- Temperatura de la tapa y base (°C).
- Tiempo de calentamiento (min).
- Energía suministrada (kJ).

4.5.3. Evaluación Post-Experimentación

Los datos obtenidos se compararán con los de la línea base para analizar el impacto.

4.6. Control de Variables

El análisis de datos se lleva a cabo a través del procesamiento de la información recolectada en tablas de registro técnico, utilizando herramientas como Microsoft Excel y

Minitab para el análisis de regresión cuadrática. Se calcularán promedios, porcentajes, análisis de varianza, contestación de hipótesis y gráficos para cada variable operativa, tanto antes como después de la aplicación de la fibra cerámica. Posteriormente, se realizará una comparación de resultados a fin de determinar el impacto de la intervención en el rendimiento térmico del horno. Cuando sea necesario, se aplicarán pruebas estadísticas para validar los cambios observados.

Capítulo V

Procedimiento Metodológico Experimental

5.1. Materiales, Equipos e Instrumentos

a) Horno de crisol

Los equipos objeto de análisis fueron dos hornos de crisol, denominados Horno A y Horno B. El Horno A corresponde al equipo utilizado actualmente por la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A., cuyo revestimiento térmico está constituido por ladrillo refractario convencional. Por su parte, el Horno B fue construido con las mismas características geométricas y condiciones operativas que el Horno A, diferenciándose por el empleo de una manta de fibra cerámica como material de aislamiento térmico.

El revestimiento del Horno B está conformado por tres capas de manta de fibra cerámica dispuestas sobre la cara interna del cuerpo metálico. En la base se mantuvo ladrillo refractario SK-34, dado que la manta no posee la rigidez necesaria para soportar el peso del crisol. Ambos equipos poseen cuerpo y tapa de acero, y el Horno B incorpora una termocupla tipo K destinada al monitoreo de la temperatura interna de la cámara durante los ciclos de fundición.

Con el propósito de garantizar una comparación experimental objetiva del rendimiento térmico, ambos hornos mantuvieron constantes la geometría, la capacidad del crisol, el sistema de combustión y las condiciones de operación. De este modo, el material empleado como revestimiento térmico interno constituye la variable de estudio modificada entre ambos equipos. La única diferencia constructiva adicional corresponde a la geometría de ingreso del combustible, secante en el Horno A y tangencial en el Horno B, adoptada para lograr una distribución más uniforme de la llama y de los gases calientes en la cámara de combustión.

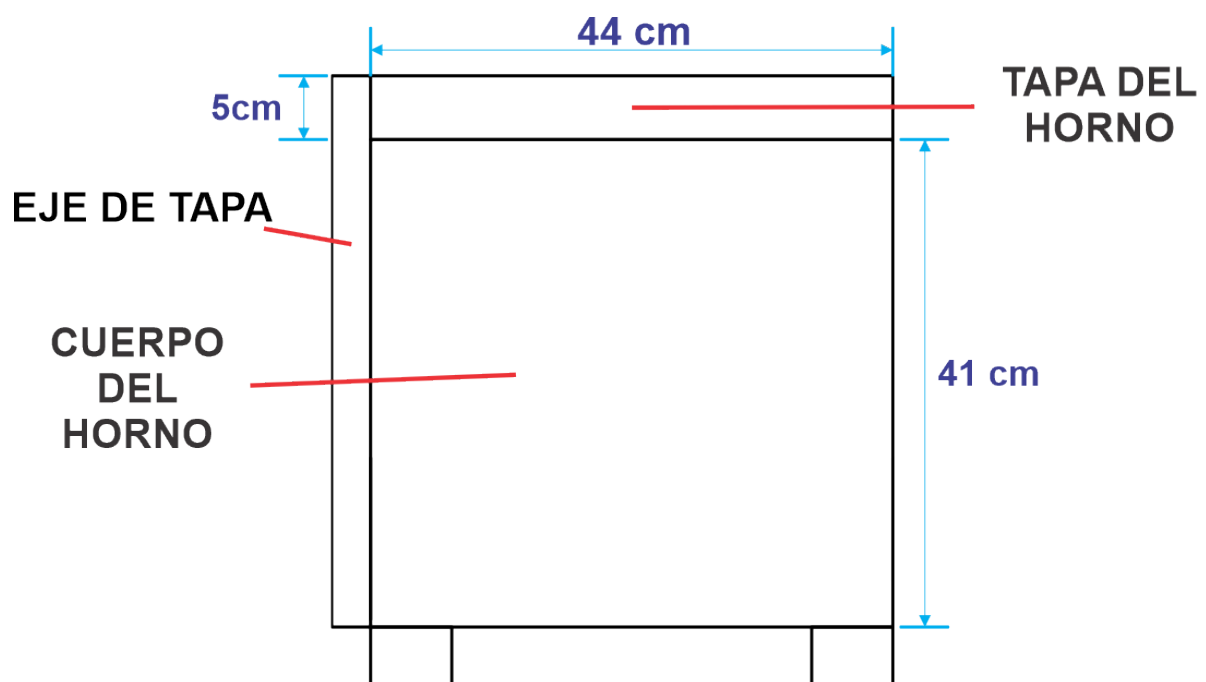
Las Figuras 15 a 18 presentan los planos del Horno A, correspondientes a las vistas lateral, superior, frontal y superior del interior del horno, las cuales muestran la geometría, las

dimensiones principales y la disposición de sus componentes estructurales. Estas vistas constituyen la base para la construcción del Horno B, en el cual se reemplazó el revestimiento refractario por manta de fibra cerámica, conservando las demás características de diseño.

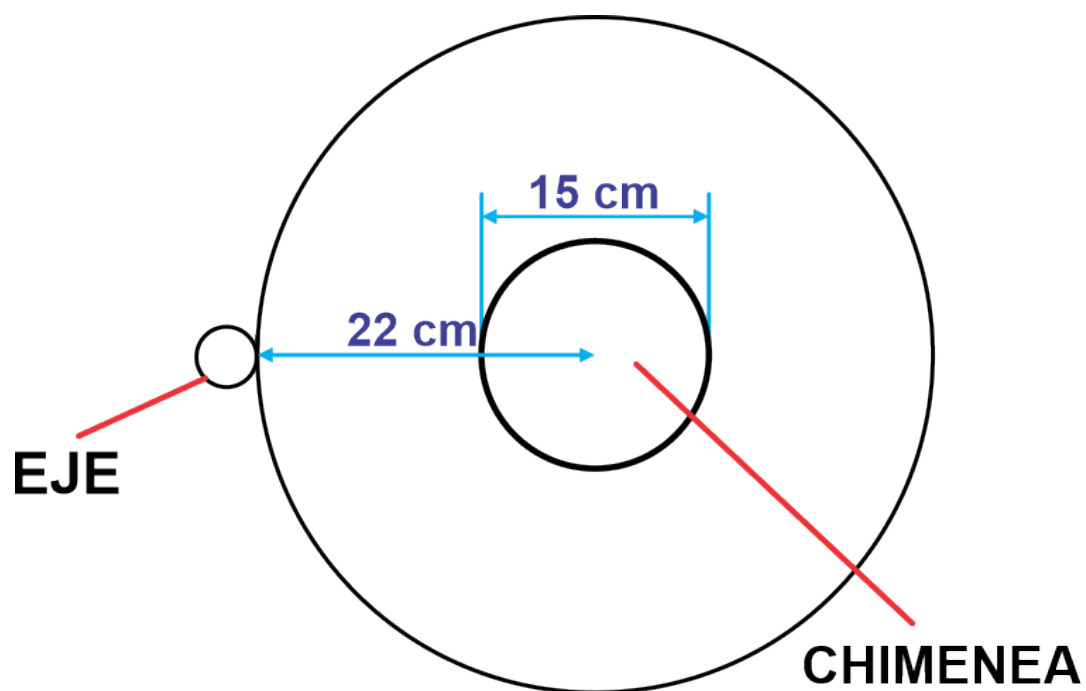
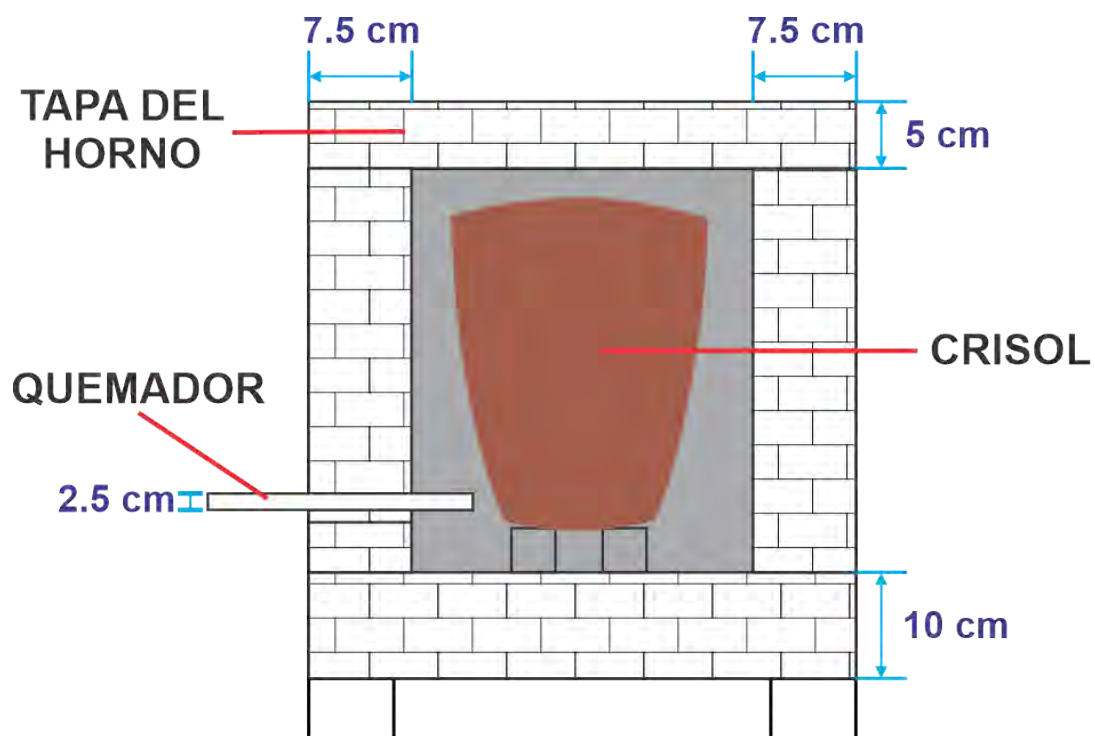
Antes de iniciar los ciclos de fundición, el Horno B fue sometido a una prueba de calentamiento hasta aproximadamente 1000 °C, con el fin de verificar el funcionamiento del sistema de suministro de combustible, la distribución de la llama en la cámara, el registro de la termocupla y la ausencia de deformaciones estructurales o pérdidas excesivas de calor. Superada esta verificación, ambos equipos quedaron en condiciones equivalentes de operación para la comparación del rendimiento térmico.

Figura 15

Vista lateral del horno A



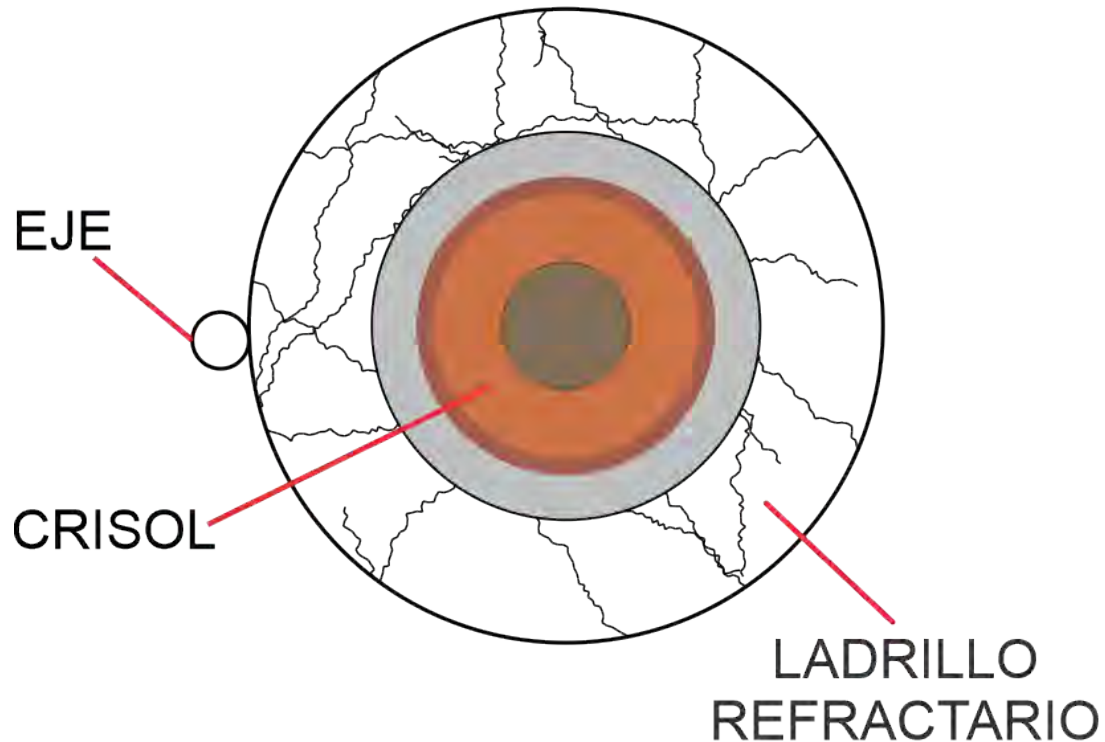
Nota. Elaboración propia.

Figura 16*Vista superior del horno A**Nota. Elaboración propia.***Figura 17***Vista lateral del interior del horno A*

Nota. Elaboración propia.

Figura 18

Vista superior del interior del horno A



Nota. Elaboración propia.

b) Ladrillo refractario.

El “Horno A” (Figura 19) se encuentra revestido con ladrillo refractario, material ampliamente utilizado en hornos de fundición debido a su alta resistencia mecánica y capacidad para soportar elevadas temperaturas de operación. Este tipo de revestimiento permite conservar la estabilidad estructural del horno frente a la exposición continua al calor y al contacto directo con el metal fundido.

Actualmente, el revestimiento presenta fisuras, desgaste superficial y pérdida parcial de material refractario, como consecuencia de los ciclos térmicos repetitivos, las altas temperaturas de trabajo y el uso continuo del equipo. Estas condiciones afectan progresivamente la capacidad de aislamiento térmico del horno, incrementando las pérdidas de calor y reduciendo el rendimiento térmico durante el proceso de fundición.

Figura 19*Horno “A”*

Nota. Elaboración propia.

c) Fibra cerámica

La manta de fibra cerámica (Figura 20) fue utilizada como material alternativo de revestimiento térmico en el horno B debido a sus propiedades de aislamiento y resistencia a altas temperaturas. Su incorporación tuvo como finalidad mejorar la retención de calor dentro del sistema y reducir las pérdidas térmicas durante el proceso de operación.

Asimismo, este material presenta baja conductividad térmica y menor absorción de calor en comparación con los revestimientos refractarios convencionales, lo que permite alcanzar temperaturas elevadas en menor tiempo y optimizar el rendimiento térmico del horno.

Por ello, su implementación permitió evaluar su desempeño como alternativa refractaria en aplicaciones de fundición aurífera.

Figura 20

Manta de fibra cerámica



Nota. Elaboración propia.

d) Termocupla tipo K y pirómetro.

La termocupla tipo K (figura 21) es un sensor utilizado para la medición de altas temperaturas.

Este dispositivo se conectó a un pirómetro el cual permitió registrar la temperatura interna de los hornos “A” y “B” durante las pruebas experimentales.

Figura 21

Termocupla tipo K



Nota. Elaboración propia.

e) Termómetro digital.

Instrumento de medición de temperatura utilizado para medir la temperatura externa de los hornos A y B.

f) Combustible (GLP).

El gas licuado de petróleo (GLP) utilizado como fuente de energía térmica en el proceso de fundición de oro en los hornos de crisol. Para el desarrollo de las pruebas experimentales se emplearon balones con una capacidad de 45 kg.

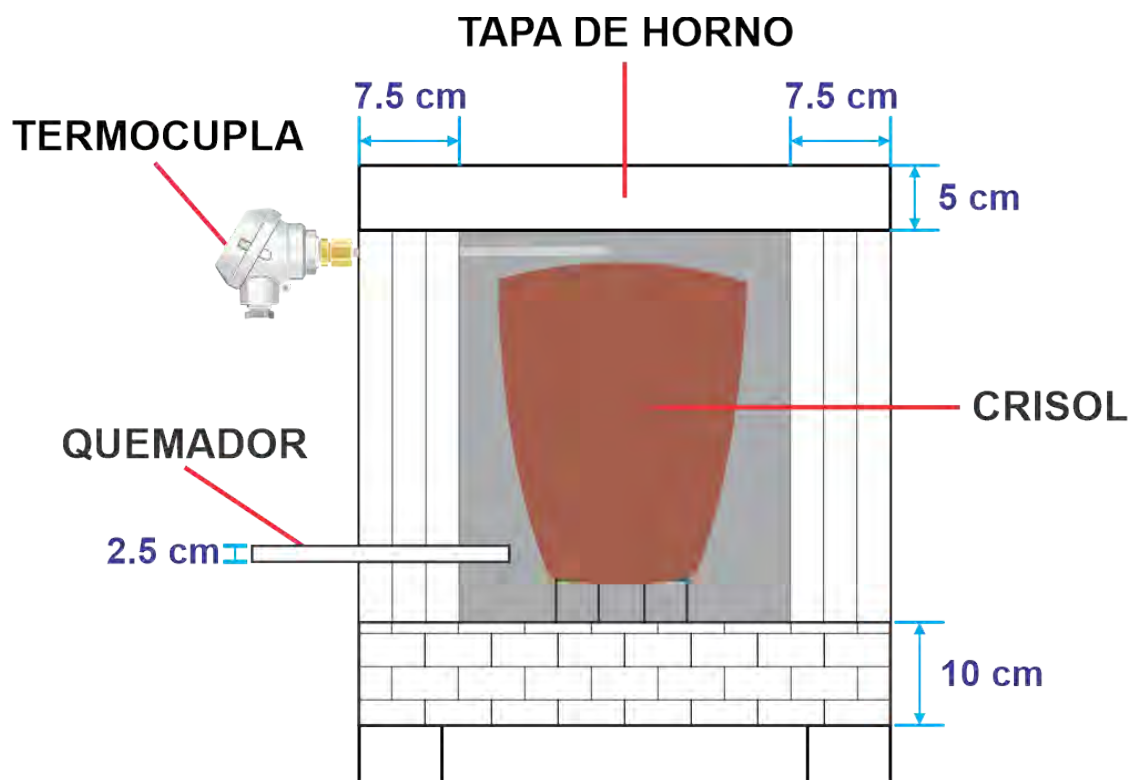
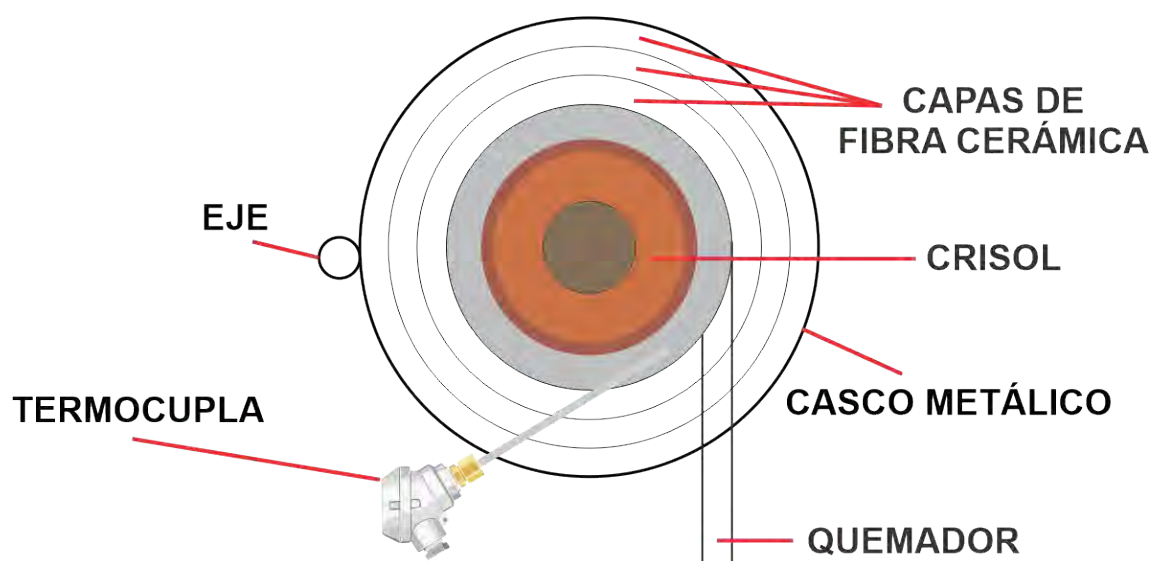
g) Metal para fundir (oro).

El material utilizado en el proceso de fundición corresponde al precipitado de oro obtenido como resultado del ataque químico realizado posteriormente a las etapas de desorción y electrodeposición del oro. Este precipitado aún contiene diversas impurezas, las cuales serán removidas durante el proceso de fusión y refinación del metal.

5.2. Fabricación del Horno de Crisol con Fibra Cerámica

Teniendo como referencia las dimensiones y características estructurales del horno A, se elaboró el plano del horno B manteniendo las mismas medidas del sistema original. Esto permitió asegurar condiciones experimentales equivalentes para el desarrollo de las pruebas experimentales, minimizando la influencia de variables asociadas al diseño físico del horno.

Asimismo, el diseño del horno B consideró la incorporación de manta de fibra cerámica como material refractario alternativo y la instalación de una termocupla tipo K para el monitoreo de la temperatura interna durante el funcionamiento del sistema. Los planos elaborados muestran las dimensiones principales y la distribución de los componentes del horno, tal como se presenta en las Figuras 22 y 23, correspondientes a las vistas lateral y superior interior del Horno B:

Figura 22*Vista lateral del interior del horno B**Nota. Elaboración propia.***Figura 23***Vista superior del interior del horno B**Nota. Elaboración propia.*

Siguiendo los planos de diseño, se fabricó el cuerpo metálico del Horno B, constituido por un cuerpo y tapa de acero, las cuales se muestran en las Figuras 24 y 25, respectivamente. El resultado final del ensamblaje del cuerpo metálico y la tapa del horno se presenta en la Figura 26.

Figura 24

Pared exterior del horno B



Nota. Elaboración propia.

Figura 25

Construcción de la tapa del horno B



Nota. Elaboración propia.

El resultado final se muestra en la Figura 26.

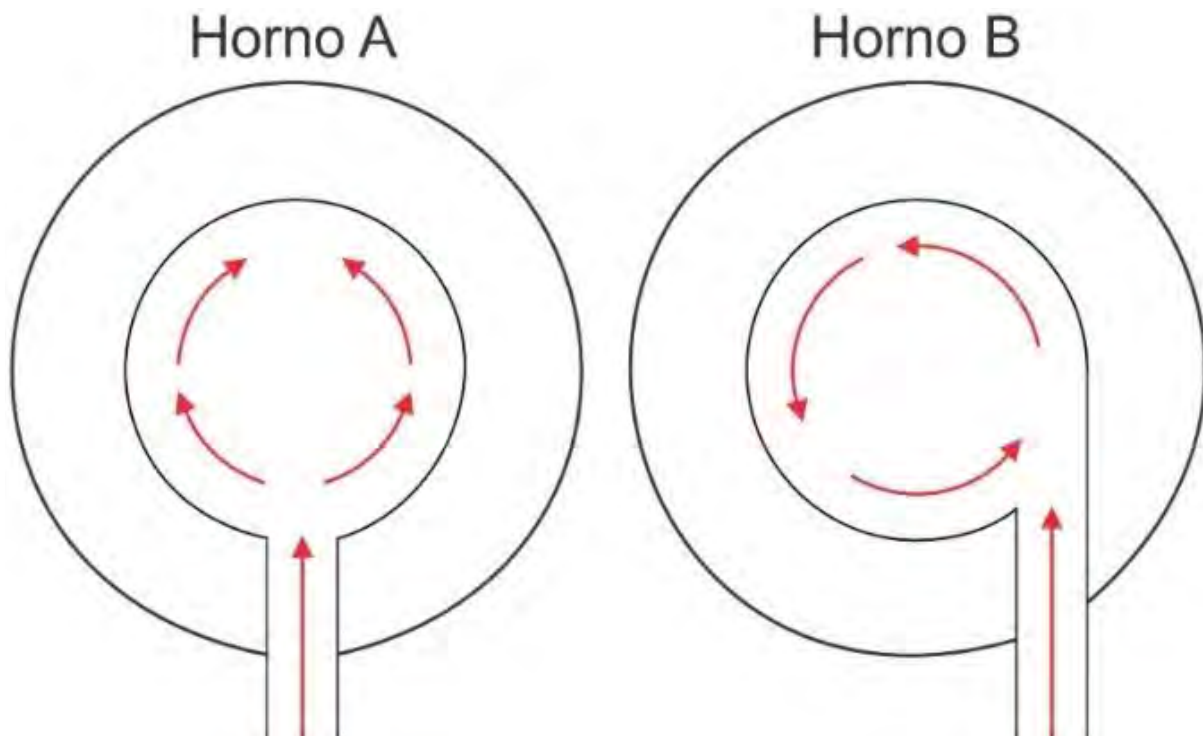
Figura 26

Cuerpo metálico terminado del horno B



Nota. Elaboración propia.

Se realizó una modificación en el sistema de suministro de combustible del horno B con respecto al horno A. Mientras que el horno A presenta una alimentación “secante”, en el horno B se implementó una alimentación “tangencial”, tal como se muestra en la Figura 27. Esta modificación tuvo como finalidad favorecer una mejor distribución de la llama y de los gases calientes dentro de la cámara de combustión, contribuyendo a una transferencia de calor más uniforme durante la operación del horno.

Figura 27*Flujo de calor en los hornos "A" y "B"**Nota.* Elaboración propia.

Si bien la manta de fibra cerámica presenta mejores propiedades de aislamiento térmico que el ladrillo refractario, este material no posee la rigidez necesaria para soportar el peso del crisol y las condiciones de operación en la base del horno. Por ello, en la parte inferior del sistema se utilizó ladrillo refractario, proporcionando estabilidad estructural y resistencia al contacto directo con altas temperaturas, tal como se muestra en la Figura 28.

Seguidamente se comenzó a implementar las tres capas de manta fibra cerámica tal cual se muestran en las Figuras 29 a 32, correspondientes al corte de la manta, la primera capa, la segunda capa y la tercera capa de manta fibra cerámica.

Figura 28

Implementación de ladrillos refractarios SK – 34 en la base del horno B



Nota. Elaboración propia.

Figura 29

Corte de la manta de fibra cerámica



Nota. Elaboración propia.

Figura 30

Primera capa de manta fibra cerámica



Nota. Elaboración propia.

Figura 31

Segunda capa de manta fibra cerámica



Nota. Elaboración propia.

Figura 32

Tercera capa de manta fibra cerámica



Nota. Elaboración propia.

Una vez finalizado el ensamblado del horno B, se realizó una prueba de funcionamiento del horno elevando la temperatura hasta aproximadamente 1000 °C, con la finalidad de verificar el correcto desempeño del sistema bajo condiciones de operación similares a las empleadas durante el proceso experimental (Figura 33).

Durante la prueba se verificó el adecuado funcionamiento del sistema de suministro de combustible, la correcta distribución de la llama dentro de la cámara de combustión y el desempeño de la termocupla tipo K en el registro de temperatura. También se inspeccionó la presencia de posibles fallas en el montaje, deformaciones estructurales o pérdidas excesivas de calor que pudieran afectar el desarrollo de los ciclos de fundición (Figura 34).

Finalmente, una vez comprobadas las condiciones mínimas de operación y manipulación del sistema, el horno quedó habilitado para la ejecución de las pruebas experimentales y la comparación de su desempeño térmico respecto al horno A.

Figura 33

Horno B previo a la primera prueba de calentamiento



Nota. Fotografía de elaboración propia.

Figura 34

Horno B después de la primera prueba de calentamiento



Nota. Elaboración propia.

Estas pruebas incluyeron la evaluación del ingreso y retiro del crisol mediante tenazas de acero, así como la comprobación de la facilidad de la apertura y cierre de la tapa del horno.

5.3. Instalación y Calibración de Instrumentos de Medición

Para el registro de temperatura, se empleó una termocupla tipo K (figura 35), previamente calibrada que fue instalada sin interferir con el trabajo del operador de fundición.

Se tomó el tiempo de calentamiento del horno llevando un registro de cada ciclo de fundición.

Figura 35

Funcionamiento de la termocupla tipo K en el horno de crisol



Nota. Elaboración propia.

5.4. Observaciones Preliminares

Se tomó en cuenta observaciones cualitativas como la pérdida de calor, comportamiento de los materiales refractarios y cualquier otra incidencia ocurrida durante las pruebas (Figura 36).

Figura 36

Pruebas preliminares al horno “B”



Nota. Elaboración propia.

5.5. Ejecución de Ciclos de Fundición

Se realizaron los siguientes pasos:

- Previo a los ciclos experimentales, se realizó un ciclo de fundición preliminar el cual sirvió para asegurar el correcto funcionamiento del horno.

- Se peso cada balón de gas a utilizar, también el precipitado de oro que será fundido en cada horno.
- Se registro la temperatura inicial y se dio inicio al primer ciclo de fundición.
- Se precalentaron los hornos hasta llegar a una temperatura de 500 °C para luego colocar los crisoles y luego los lingotes de oro.
- Una vez que el precipitado llegó a fundirse, se procedió a colar en una lingotera previamente calentada (Figura 37).

Figura 37

Colado del oro fundido en el horno “B”



Nota. Elaboración propia.

- Se apagó el horno y se tomó el tiempo en el que cada horno enfrió.
- Terminado el ciclo de fundición, se pesará el balón de gas para determinar el consumo de gas que se tuvo en cada etapa, se medirá el tiempo para su posterior análisis.

5.6. Pruebas de Fundición

Se realizaron 7 ciclos de fundición, de los cuales se registraron los siguientes datos:

- Peso del oro a fundir (Carga).
- Temperatura inicial del horno (Ti).
- Temperatura de fusión del oro (Tm).
- Temperatura de colada (Tf).
- Temperatura exterior del horno (Tex).
- Temperatura de la tapa del horno (Ttap).
- Temperatura de la base del horno (Tbase).
- El tiempo de fundición en ambos hornos.
- Consumo de gas en ambos hornos (GLP).

Los resultados se muestran en la tabla 9 para el horno A y la Tabla 10 para el Horno B

Tabla 9

Pruebas de fundición en el horno “A”

Descripción	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Carga (kg)	5	5	5	5	5	5	5
Ti (°C)	18	17	19	20	19	16	19.5
Tm (°C)	1064	1064	1064	1064	1064	1064	1064
Tf (°C)	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150
Text (°C)	94	92	90	93	97	97	92
Ttap (°C)	180	186	182	188	183	190	185
Tbase (°C)	60	62	61.5	63.5	64	64	65.5
Tiempo de Fundición (min)	35.10	34.57	34.42	34.15	33.55	34.00	35.51
Consumo de Gas (kg)	11.20	10.38	10.05	9.92	9.60	9.85	9.93

Nota. Elaboración propia

Tabla 10*Pruebas de fundición en el horno “B”*

Descripción	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Carga (kg)	5	5	5	5	5	5	5
Ti (°C)	18	17.5	20	19	19.5	18	20.1
Tm (°C)	1064	1064	1064	1064	1064	1064	1064
Tf (°C)	1150	1150	1150	1150	1150	1150	1150
Tex (°C)	65	63	68	71	67	69	66
Ttap (°C)	130	127	129	131	128	130	128
Tbase (°C)	49	47	51	50.5	48	49.5	52
Tiempo de Fundición (min)	11.44	12.21	10.55	11.08	12.14	11.56	11.22
Consumo de Gas (kg)	1.65	1.95	1.67	1.84	1.87	1.89	1.70

Nota. Elaboración propia**5.7. Cálculo del Rendimiento Térmico para el Horno “A”****Tabla 11***Factores para la fusión de oro*

Calor latente del oro (kJ/kg).	Viscosidad cinemática del aire (m²/s)	Conductivida d térmica del aire (W/m.°K)	Difusividad térmica α (m²/s)	Constante de Prandtl (Pr)	Gravedad
$L_f = 64.5$	16.55×10^{-6}	26.25×10^{-3}	22.77×10^{-6}	0.7268	9.81 m/s^2

Nota. Elaboración propia**5.7.1. Calor Requerido**

Cálculo para llegar a 1064 °C:

J

Cálculo del calor requerido para cambio de fase:

J

Cálculo del calor óptimo para la fluidez del oro:

J

Cálculo del calor total:

J

Cálculo del calor absorbido por el crisol:

J

Cálculo del calor requerido para fundir:

- T: tiempo de fundición

1 612.69 W

5.7.2. Calor Perdido

5.7.3. Calor Perdido en el Horno

La temperatura de la superficie exterior no se toma de la medición directa, sino que se determina por balance térmico: en régimen estacionario, el calor que atraviesa el revestimiento por conducción debe igualar al que la superficie disipa por convección y radiación. Se resuelve

por iteración la ecuación $UA \cdot (T_i - T_s) = A \cdot h_c(T_s) \cdot (T_s - T_{amb}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4)$, dado que el coeficiente de convección depende a su vez de T_s a través de la temperatura de película. Para el horno “A” el balance converge en $T_s = 761.57 \text{ K}$ (488.4 °C) en el cilindro y $T_s = 635.82 \text{ K}$ (362.7 °C) en la tapa y la base.

Cálculo de la temperatura de película:

Teniendo esta temperatura de película, se tienen los siguientes datos expresados en la siguiente tabla 12:

Tabla 12

Propiedades termofísicas del aire a 526.36 K

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Conductividad Térmica	k	0.0424	W/(m\K)
Viscosidad Cinemática	ν	4.24×10^{-5}	m ² /s
Difusividad Térmica	α	6.20×10^{-5}	m ² /s
Número de Prandtl	Pr	0.68	<i>Adimensional</i>

Nota. Las propiedades del aire fueron obtenidas de la Tabla A-4 (Incropera, 1999).

Cálculo del número de Rayleigh

Dado que el número de Rayleigh esta entre $10^3 < Ra < 10^9$, el flujo es laminar y de convección laminar.

Por lo tanto, el número de Nusselt se calculará con la siguiente expresión:

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Pérdida de calor por conducción

L : Altura del horno.

T_f : Temperatura interna del horno.

T_{cil} : Temperatura externa del horno.

r_1 : Radio interno del horno.

r_2 : Radio entre el refractario y la carcasa metálica.

r_3 : Radio externo del horno.

K_{refra} : Conductividad térmica del ladrillo refractario.

K_{met} : Conductividad térmica de la carcasa metálica.

Cálculo de la pérdida de calor por convección

Cálculo de la pérdida de calor por radiación

ϵ : emisividad de la superficie.

σ : constante de Stefan-Boltzmann.

A: área superficial.

T_s : Temperatura de la superficie

T_{amb} : Temperatura ambiente.

Calor perdido en el horno:

5.7.4. Calor Perdido en la Tapa

Cálculo de la temperatura de película:

Teniendo esta temperatura de película, se tienen estos datos expresados en la siguiente tabla 13:

Tabla 13*Propiedades termofísicas del aire a 463.48 K*

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Conductividad Térmica	k	0.0382	W/(m\K)
Viscosidad Cinemática	ν	3.41x10-5	m ² /s
Difusividad Térmica	α	4.98x10-5	m ² /s
Número de Prandtl	Pr	0.69	<i>Adimensional</i>

Nota. Las propiedades del aire fueron obtenidas de la Tabla A-4 (Incropera, 1999).

Cálculo del número de Rayleigh

Dado que el número de Rayleigh se encuentra entre $10^3 < Ra < 10^9$, el flujo es de convección laminar.

Por lo tanto, el número de Nusselt se calculará con la siguiente expresión:

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Pérdida de calor por conducción

A : Área de la tapa.

T_i : Temperatura interna del horno.

T_{tapa} : Temperatura de la tapa del horno.

E_{refrac} : Espesor del refractario.

E_{met} : Espesor de la carcasa metálica.

K_{refra} : Conductividad térmica del ladrillo refractario.

K_{met} : Conductividad térmica de la carcasa metálica.

Cálculo de la pérdida de calor por convección

Cálculo de la pérdida de calor por radiación

ϵ : emisividad de la superficie.

σ : constante de Stefan-Boltzmann.

A: área superficial.

T_s : Temperatura de la superficie

T_{amb} : Temperatura ambiente.

Calor perdido en la tapa:

5.7.5. Calor Perdido en la Base

Cálculo de la temperatura de película:

Dado que la base presenta el mismo espesor, área y conductancia que la tapa, converge a la misma temperatura de película, por lo que se emplean las propiedades del aire de la Tabla 13.

Cálculo del número de Rayleigh

Dado que el número de Rayleigh esta entre $10^3 < Ra < 10^9$, el flujo es laminar y de convección laminar.

Por lo tanto, el número de Nusselt se calculará con la siguiente expresión:

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Pérdida de calor por conducción

A: Área de la base.

T_i : Temperatura interna del horno.

T_{base} : Temperatura de la base del horno.

E_{refrac} : Espesor del refractario.

E_{met} : Espesor de la carcasa metálica.

K_{refra} : Conductividad térmica del ladrillo refractario.

K_{met} : Conductividad térmica de la carcasa metálica.

Cálculo de la pérdida de calor por convección

Cálculo de la pérdida de calor por radiación

ϵ : emisividad de la superficie.

σ : constante de Stefan-Boltzmann.

A: área superficial.

T_s : Temperatura de la superficie

T_{amb} : Temperatura ambiente.

Calor perdido en la base:

Cálculo de la pérdida de calor total en el horno de crisol

5.7.6. Cálculo del Calor Total

5.7.7. Cálculo del Rendimiento Térmico para el Horno “A”

x100

x100

Los resultados de las pruebas experimentales realizadas en el horno “A” se resumen en la Tabla 14:

Tabla 14

Resultados de las pruebas en el horno “A”

Descripción	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Rendimiento térmico (%)	14.56	14.76	14.80	14.89	15.12	14.98	14.41

Nota. Elaboración en base a los resultados de los ensayos.

5.8. Cálculo del Rendimiento Térmico para el Horno “B”

5.8.1. Calor Requerido

Cálculo para llegar a 1064 °C:

J

Cálculo del calor requerido para cambio de fase:

J

Cálculo del calor óptimo para la fluidez del oro:

J

Cálculo del calor total:

J

Cálculo del calor absorbido por el crisol:

J

Cálculo del calor requerido para fundir:

- T: tiempo de fundición

4 948.04 W

5.8.2. Calor Perdido

5.8.3. Calor Perdido en el Cilindro

La temperatura de la superficie exterior no se toma de la medición directa, sino que se determina por balance térmico: en régimen estacionario, el calor que atraviesa el revestimiento por conducción debe igualar al que la superficie disipa por convección y radiación. Se resuelve por iteración la ecuación $UA \cdot (T_i - T_s) = A \cdot h_c(T_s) \cdot (T_s - T_{amb}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{amb}^4)$, dado que el coeficiente de convección depende a su vez de T_s a través de la temperatura de película. Para el horno “B” el balance converge en $T_s = 460.61 \text{ K}$ (187.5 °C) en el cilindro y $T_s = 391.41 \text{ K}$ (118.3 °C) en la tapa y la base.

Cálculo de la temperatura de película:

A partir de la temperatura promedio calculada, se seleccionaron las propiedades termo físicas del aire correspondientes a dicha temperatura, las cuales se presentan en la Tabla 15:

Tabla 15*Propiedades termo físicas del aire a 375.88 K*

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Conductividad Térmica	k	0.0320	W/(m\K)
Viscosidad Cinemática	ν	2.38×10^{-5}	m ² /s
Difusividad Térmica	α	3.43×10^{-5}	m ² /s
Número de Prandtl	Pr	0.70	<i>Adimensional</i>

Nota. Las propiedades del aire fueron obtenidas de la Tabla A-4 (Incropera, 1999).

Cálculo del número de Rayleigh

Dado que el número de Rayleigh esta entre $10^3 < Ra < 10^9$, el flujo es laminar y de convección laminar.

Por lo tanto, el número de Nusselt se calculará con la siguiente expresión:

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Pérdida de calor por conducción

L : Altura del horno.

T_f : Temperatura interna del horno.

T_{cil} : Temperatura externa del horno.

r_1 : Radio interno del horno.

r_2 : Radio entre el refractario y la carcasa metálica.

r_3 : Radio externo del horno.

K_{refra} : Conductividad térmica de la fibra cerámica.

K_{met} : Conductividad térmica de la carcasa metálica.

Cálculo de la pérdida de calor por convección

Cálculo de la pérdida de calor por radiación

ϵ : emisividad de la superficie.

σ : constante de Stefan-Boltzmann.

A : área superficial.

T_s : Temperatura de la superficie

T_{amb} : Temperatura ambiente.

Calor perdido en el cilindro:

5.8.4. Calor Perdido en la Tapa

Cálculo de temperatura de película:

Teniendo esta temperatura de película, se tienen los siguientes datos expresados en la siguiente tabla 16:

Tabla 16

Propiedades termofísicas del aire a 341.28 K

Propiedad	Símbolo	Valor	Unidad
Conductividad Térmica	k	0.0294	W/(m\K)
Viscosidad Cinemática	ν	2.00×10^{-5}	m ² /s
Difusividad Térmica	α	2.86×10^{-5}	m ² /s
Número de Prandtl	Pr	0.70	Adimensional

Nota. Las propiedades del aire fueron obtenidas de la Tabla A-4 (Incropera, 1999).

Cálculo del número de Rayleigh

Dado que el número de Rayleigh esta entre $10^3 < Ra < 10^9$, el flujo es laminar y de convección laminar.

Por lo tanto, el número de Nusselt se calculará con la siguiente expresión:

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Pérdida de calor por conducción

A: Área de la tapa.

T_i : Temperatura interna del horno.

T_{tapa} : Temperatura de la tapa del horno.

E_{refrac} : Espesor del refractario.

E_{met} : Espesor de la carcasa metálica.

K_{refra} : Conductividad térmica de la fibra cerámica.

K_{met} : Conductividad térmica de la carcasa metálica.

Cálculo de la pérdida de calor por convección

Cálculo de la pérdida de calor por radiación

ϵ : emisividad de la superficie.

σ : constante de Stefan-Boltzmann.

A: área superficial.

T_s : Temperatura de la superficie

T_{amb} : Temperatura ambiente.

Calor perdido en la tapa:

5.8.5. Calor Perdido en la Base

Cálculo de la temperatura de película:

Dado que la base presenta el mismo espesor, área y conductancia que la tapa, converge a la misma temperatura de película, por lo que se emplean las propiedades del aire de la Tabla 16.

Cálculo del número de Rayleigh

Dado que el número de Rayleigh esta entre $10^3 < Ra < 10^9$, el flujo es laminar y de convección laminar.

Por lo tanto, el número de Nusselt se calculará con la siguiente expresión:

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Pérdida de calor por conducción

A: Área de la base.

T_i : Temperatura interna del horno.

T_{base} : Temperatura de la base del horno.

E_{refrac} : Espesor del refractario.

E_{met} : Espesor de la carcasa metálica.

K_{refra} : Conductividad térmica de la fibra cerámica.

K_{met} : Conductividad térmica de la carcasa metálica.

Cálculo de la pérdida de calor por convección

Cálculo de la pérdida de calor por radiación

ϵ : emisividad de la superficie.

σ : constante de Stefan-Boltzmann.

A : área superficial.

T_s : Temperatura de la superficie

T_{amb} : Temperatura ambiente.

Calor perdido en la base:

Cálculo de la pérdida de calor total en el horno de crisol

5.8.6. Cálculo del Calor Total

5.8.7. Cálculo del Rendimiento Térmico para el Horno “B”

x100

x100

Los resultados de las pruebas experimentales realizadas en el horno “B” se resumen en la Tabla 17:

Tabla 17

Resultados de las pruebas en el horno “B”

Descripción	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Rendimiento térmico (%)	77.64	76.49	79.01	78.19	76.59	77.46	77.97

Nota. Elaboración en base a los resultados de los ensayos.

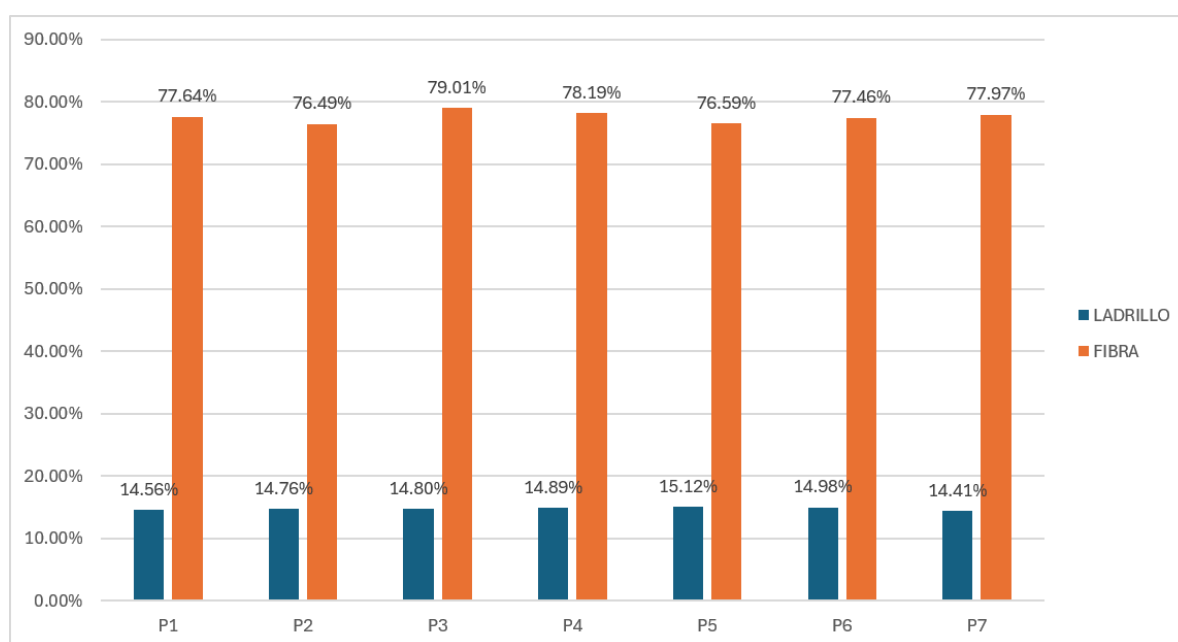
La Figura 38 consolida los rendimientos térmicos obtenidos en los siete ciclos de fundición ejecutados en cada horno, permitiendo observar de manera comparativa el comportamiento de ambos tipos de revestimiento. En el horno A, revestido con ladrillo refractario convencional, los valores de rendimiento térmico se mantienen en un intervalo comprendido entre 14.41 % y 15.12 %. En contraste, el horno B, revestido con fibra cerámica, presenta rendimientos significativamente superiores, con valores que oscilan entre 76.49 % y 79.01 %. Esta diferencia evidencia un comportamiento favorable del horno B durante el desarrollo de las pruebas experimentales.

Asimismo, la comparación individual de los siete ciclos muestra que el rendimiento térmico del horno B se mantiene consistentemente por encima del obtenido en el horno A. Las barras correspondientes a ambos grupos no presentan superposición en ninguna de las pruebas realizadas, lo que permite apreciar una separación clara entre los rendimientos de los dos revestimientos. Además, los resultados obtenidos para cada horno presentan una variación relativamente reducida entre ciclos, especialmente en el caso del horno B, cuyos valores se mantienen dentro de un rango estrecho.

En conjunto, estos resultados indican que la mayor eficiencia térmica asociada al revestimiento de fibra cerámica no corresponde a un comportamiento aislado de una determinada prueba, sino que se mantiene de manera consistente a lo largo de los siete ciclos de fundición evaluados. Por tanto, la Figura 38 proporciona evidencia gráfica de que el cambio del material de revestimiento modifica favorablemente el rendimiento térmico del horno bajo las condiciones experimentales establecidas.

Figura 38

Comparación del rendimiento térmico por ciclo de fundición



Nota. Elaboración propia en base a los rendimientos térmicos de las tablas 14 y 17.

Capítulo VI

Discusión de Resultados

6.1. Análisis Comparativo Entre Fibra y Ladrillo Mediante ANOVA

En primer lugar, se evaluó si el tipo de revestimiento produce una diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento térmico del horno de crisol. Para ello se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor en el software Minitab, tomando el tipo de revestimiento del horno de crisol como única variable independiente, con dos niveles (fibra cerámica y ladrillo refractario) y siete réplicas por nivel, para un total de catorce observaciones. La variable respuesta fue el rendimiento térmico expresado en fracción, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, el supuesto de igualdad de varianzas se evaluó mediante la prueba de Levene. Debe precisarse que las varianzas de ambos grupos difieren de manera apreciable ($s = 0.00889$ en fibra cerámica frente a $s = 0.00243$ en ladrillo refractario), por lo que el contraste se interpreta considerando que el análisis de varianza de un solo factor con tamaños de muestra iguales es robusto frente a la heterogeneidad de varianzas, y que la magnitud del estadístico F obtenido descarta que la conclusión dependa de este supuesto. Las hipótesis estadísticas fueron H_0 : las medias de rendimiento térmico de ambos revestimientos son iguales, frente a H_1 : las medias no son iguales.

Los resultados, detallados en la tabla 18, evidencian un efecto altamente significativo del tipo de revestimiento sobre el rendimiento térmico ($F=32534.55$; $p=0.000$), por lo que se rechaza la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95%. Cabe precisar que, al tratarse de un factor de dos niveles, este contraste equivale a una prueba t para muestras independientes, de modo que el ANOVA responde directamente a la comparación planteada en la hipótesis de la investigación.

Tabla 18*Resultados del análisis de varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
C1	1	1.381789	1.381789	32534.55	0.000
Error	12	0.00051	0.000042		
Total	13	1.382298			

Nota. Elaboración en base a los resultados de los ensayos.

La prueba de comparaciones múltiples de Tukey, con un nivel de confianza del 95 %, ubicó a los dos revestimientos en grupos estadísticamente distintos, como se aprecia en la Tabla 19. La fibra cerámica conformó el grupo A, con una media de 0.77621 y una desviación estándar de 0.00889 (IC 95 %: 0.77085 a 0.78158), mientras que el ladrillo refractario conformó el grupo B, con una media de 0.14789 y una desviación estándar de 0.00243 (IC 95 %: 0.14252 a 0.15325). La desviación estándar agrupada fue de 0.00651701. Al no existir intersección entre los intervalos de confianza, la diferencia de 0.62833, equivalente a 62.83 puntos porcentuales de rendimiento térmico a favor de la fibra cerámica, es estadísticamente significativa y técnicamente relevante para la operación del horno.

Tabla 19*Comparaciones en parejas de Tukey y una confianza del 95%*

C1	N	Media	Agrupación
FIBRA	7	0.77621	A
LADRILL O	7	0.14789	B

Nota. Elaboración en base a los resultados de los ensayos.

El resumen del modelo, presentado en la tabla 20, confirma la magnitud de este efecto: el coeficiente de determinación fue de 99.96%, el R-cuadrado ajustado de 99.96% y el R-

cuadrado predicho de 99.95%, con un error estándar de la estimación de 0.0065170, lo que significa que el tipo de revestimiento explica prácticamente toda la variabilidad observada en el rendimiento térmico y que la capacidad predictiva del modelo se mantiene al validarlo, consolidando al material del revestimiento como el factor predominante del sistema.

Tabla 20

Resumen del modelo

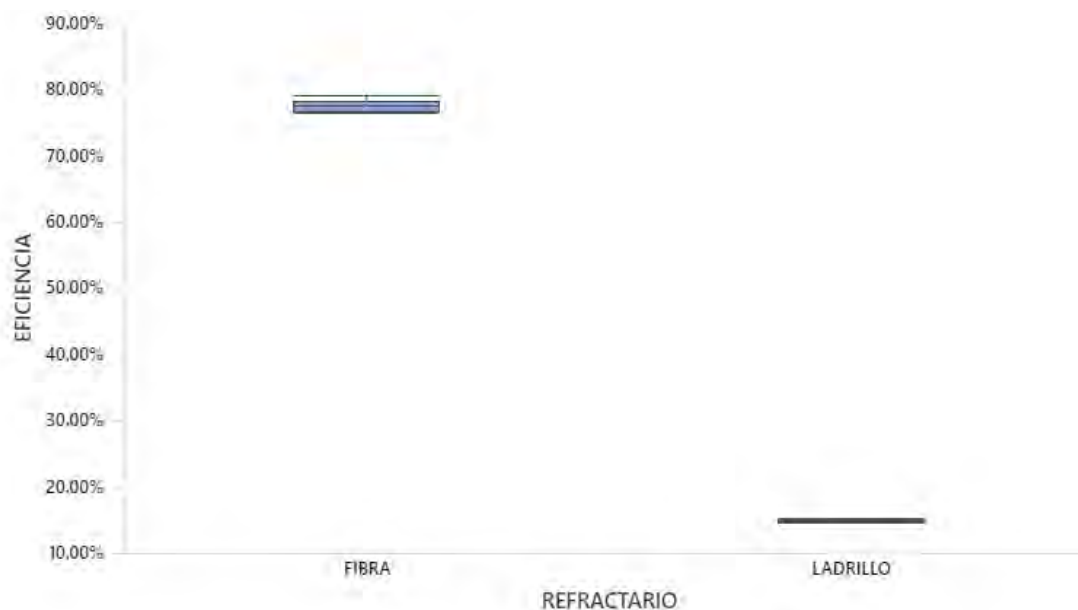
S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0065170	99.96%	99.96%	99.95%

Nota. Elaboración en base a los resultados de los ensayos.

Para la visualización de variables, se elaboraron gráficos que contrastan el desempeño de los materiales evaluados. La figura 39 es un Gráfico de Cajas (Boxplot), en donde se aprecia una separación clara entre las medias de eficiencia; el grupo de Fibra Cerámica se posiciona en un nivel superior (media de 0.7762) frente al Ladrillo Refractario (media de 0.1479). Esta representación visual permite confirmar que el tipo de refractario es el factor predominante, explicando el 99.96% de la variabilidad observada en el sistema.

Figura 39

Comparación del rendimiento térmico en gráfico de cajas



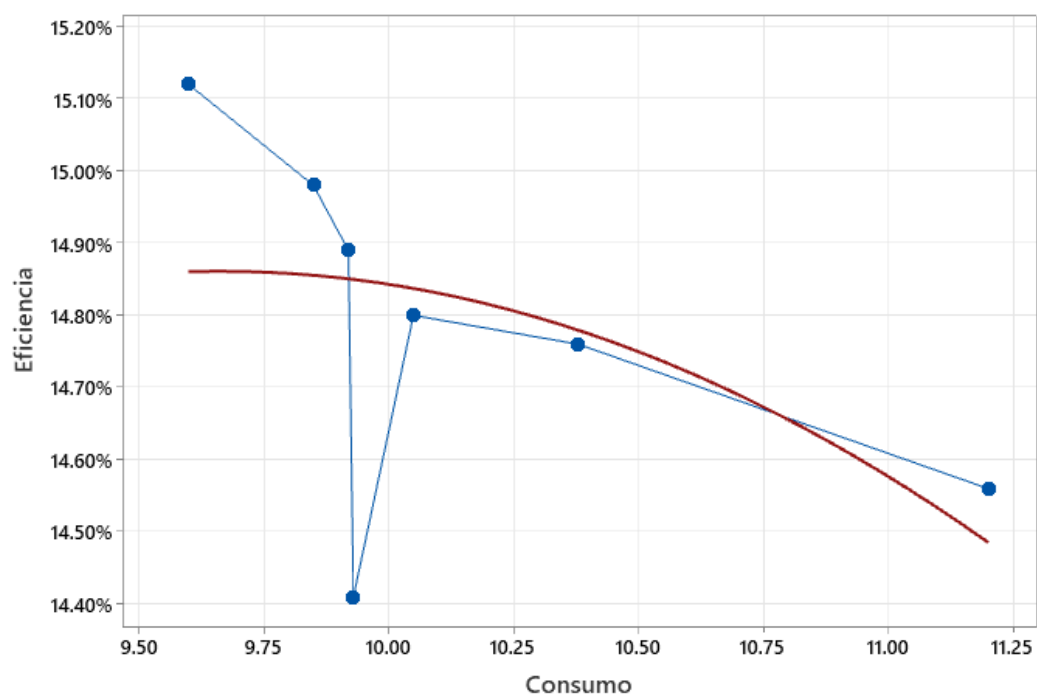
Nota. Elaboración propia.

Asimismo, en los gráficos de dispersión entre la eficiencia térmica y el consumo de GLP se observa que la relación entre ambas variables presenta un comportamiento no lineal, representado mediante una curva de segundo grado. En el horno revestido con ladrillo refractario el término cuadrático del consumo es negativo, lo que describe un punto de máxima eficiencia dentro del rango evaluado, a partir del cual incrementos adicionales de combustible no producen mejoras. En el horno revestido con fibra cerámica, en cambio, dicho término es positivo, de modo que la curva presenta concavidad hacia arriba y un punto de rendimiento mínimo a partir del cual la eficiencia se recupera. Debe precisarse que, en ambos hornos, los términos asociados al consumo de GLP no resultaron estadísticamente significativos ($p=0.710$ en el horno “A” y $p=0.331$ en el horno “B”), por lo que estas curvaturas describen la tendencia observada dentro del rango evaluado y no un comportamiento confirmado del sistema.

Al comparar ambos revestimientos, se aprecia que el refractario de ladrillo convencional (Figura 40) requiere un consumo de GLP considerablemente mayor, para alcanzar eficiencias alrededor del 15 %. En contraste, el revestimiento de fibra cerámica (Figura 41) logra eficiencias cercanas al 78 % con un consumo mucho menor. Esta diferencia evidencia la mayor capacidad de aislamiento térmico de la fibra cerámica, que reduce las pérdidas de calor a través del revestimiento. Cabe precisar que el rendimiento térmico definido en el capítulo V relaciona el calor útil con la suma del calor útil y las pérdidas, por lo que no constituye un rendimiento referido al poder calorífico del combustible; la comparación de consumos de GLP se presenta, por tanto, como una observación complementaria y no como la base del cálculo de eficiencia.

Figura 40

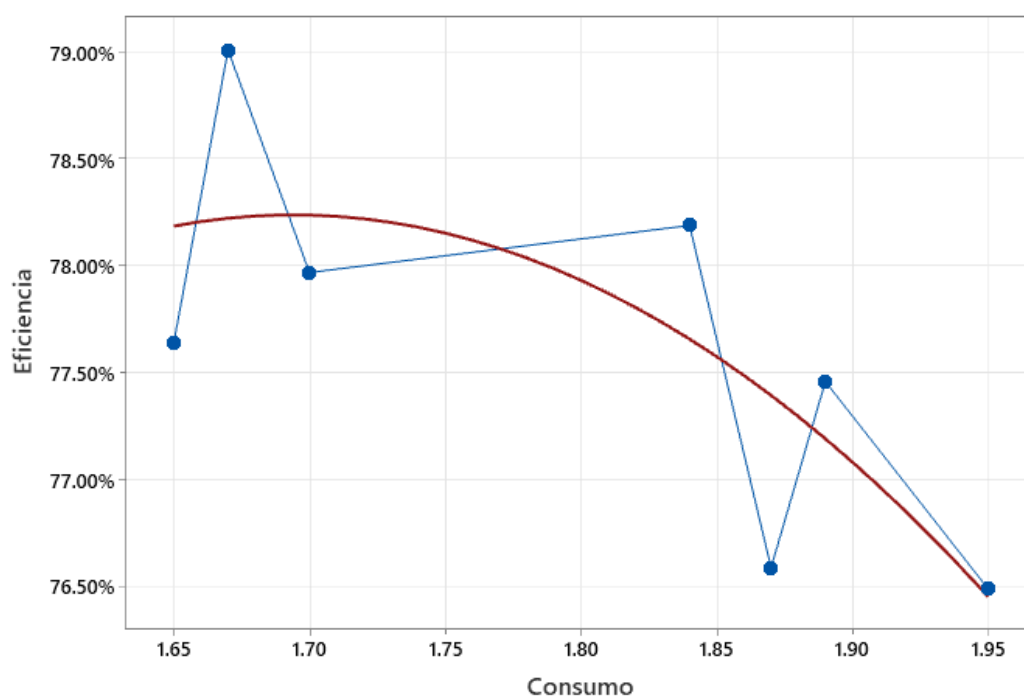
Gráfica de dispersión de eficiencia vs. consumo energético del ladrillo refractario



Nota. Elaboración propia

Figura 41

Gráfica de dispersión de eficiencia vs. consumo energético de la fibra cerámica



Nota. Elaboración propia.

6.2. Modelado Matemático Mediante Regresión Cuadrática

Se complementó el análisis de varianza con un modelado matemático mediante regresión cuadrática, con el objeto de describir el comportamiento del rendimiento térmico frente a las dos variables de operación registradas en cada ciclo: el tiempo de fusión y el consumo de gas licuado de petróleo. El modelo de segundo grado permite verificar si la respuesta del sistema es lineal o si presenta curvatura dentro del rango operativo evaluado. Los modelos se ajustaron por separado para cada horno, con las siete réplicas correspondientes, empleando el software Minitab, y la variable respuesta se expresó en fracción. Los datos de operación empleados en el ajuste se detallan en la tabla 21.

Tabla 21

Datos experimentales registrados por ciclo de fundición

Prueba	Horno	Tiempo de fusión (min)	Consumo de GLP (kg)	Rendimiento térmico (%)
P1	A (ladrillo)	35.10	11.20	14.56
P1	B (fibra)	11.44	1.65	77.64
P2	A (ladrillo)	34.57	10.38	14.76
P2	B (fibra)	12.21	1.95	76.49
P3	A (ladrillo)	34.42	10.05	14.80
P3	B (fibra)	10.55	1.67	79.01
P4	A (ladrillo)	34.15	9.92	14.89
P4	B (fibra)	11.08	1.84	78.19
P5	A (ladrillo)	33.55	9.60	15.12
P5	B (fibra)	12.14	1.87	76.59
P6	A (ladrillo)	34.00	9.85	14.98
P6	B (fibra)	11.56	1.89	77.46
P7	A (ladrillo)	35.51	9.93	14.41
P7	B (fibra)	11.22	1.70	77.97

Nota. Elaboración en base a los datos registrados en las tablas 9 y 10 y a los rendimientos térmicos de las tablas 14 y 17.

Debe precisarse que estos modelos describen el comportamiento interno de cada horno y no constituyen la prueba de comparación entre revestimientos: dicha comparación corresponde al análisis de varianza presentado en el apartado anterior.

6.2.1. Análisis del Horno “A”

La relación funcional se expresó mediante la siguiente ecuación de segundo grado:

$$E1 = 0.5060 - 0.01953 T1 + 0.008240 C1 + 0.0002281 T1^2 - 0.0003861 C1^2$$

- E1: rendimiento térmico del horno (fracción).
- T1: tiempo de fusión (min).
- C1: consumo de GLP (kg).

El modelo E1, cuyos coeficientes, resumen y análisis de varianza se presentan en las tablas 22, 23 y 24, alcanzó un coeficiente de determinación de 99.80%, con un R-cuadrado ajustado de 99.41% y un error estándar de la estimación de 0.0001856. El análisis de varianza de la regresión arrojó un valor F de 255.91 con un valor p de 0.004, inferior al nivel de significancia de 0.05, por lo que el modelo resulta estadísticamente significativo en su conjunto. No obstante, el R-cuadrado predicho fue de 0.00%, lo que indica que el ajuste no conserva capacidad predictiva al validarlo fuera de las observaciones empleadas para construirlo.

Al examinar los términos individuales, ninguno alcanza significancia estadística: el tiempo de fusión ($p=0.669$), el consumo de GLP ($p=0.709$), el término cuadrático del tiempo ($p=0.726$) y el término cuadrático del consumo ($p=0.710$). Los factores de inflación de la varianza son extremadamente elevados, hasta 119 908.12 para el tiempo de fusión, lo que evidencia una multicolinealidad severa entre los términos lineales y sus formas cuadráticas, propia de un modelo de cinco parámetros ajustado con solo siete observaciones, que deja únicamente dos grados de libertad para el error. Debe advertirse, además, que el elevado coeficiente de determinación no expresa una relación empírica descubierta: al determinarse el

rendimiento térmico a partir de la temperatura ambiente y del tiempo de fusión, la regresión sobre el tiempo reproduce por construcción la mayor parte de su variabilidad. El modelo debe leerse, por tanto, como una descripción del rango operativo evaluado y no como evidencia de una relación causal.

Tabla 22

Coefficientes de la regresión no lineal para el horno “A”

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0.5060	0.5915	0.86	0.482	
Tiempo (T1)	-0.01953	0.03940	-0.50	0.669	119908.12
Consumo (C1)	0.008240	0.019140	0.43	0.709	17626.37
T1·T1	0.0002281	0.0005665	0.40	0.726	118393.51
C1·C1	-0.0003861	0.0008995	-0.43	0.710	16996.32

Nota. Elaboración propia.

Tabla 23

Resumen del modelo para el horno “A”

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.000185	99.80%	99.41%	0.00%
6			

Nota. Elaboración propia.

Tabla 24

Análisis de varianza de la regresión para el horno “A”

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	0.00003526	0.00000881	255.91	0.004
Tiempo (T1)	1	0.00000001	0.00000001	0.25	0.669
Consumo (C1)	1	0.00000001	0.00000001	0.19	0.709
T1·T1	1	0.00000001	0.00000001	0.16	0.726
C1·C1	1	0.00000001	0.00000001	0.18	0.710
Error	2	0.00000007	0.00000003		

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Total	6	0.00003533			

Nota. Elaboración propia.

6.2.2. Análisis del Horno “B”

Para el horno revestido con manta de fibra cerámica, la relación funcional se expresó mediante la siguiente ecuación de segundo grado:

$$E2 = 0.9886 - 0.02092 T2 - 0.006573 C2 + 0.0002502 T2^2 + 0.001893 C2^2$$

- E2: rendimiento térmico del horno (fracción).
- T2: tiempo de fusión (min).
- C2: consumo de GLP (kg).

El modelo E2, detallado en las tablas 25, 26 y 27, alcanzó un coeficiente de determinación de 100.00%, con un R-cuadrado ajustado de 100.00%, un R-cuadrado predicho de 99.99% y un error estándar de la estimación de 0.0000242. El análisis de varianza de la regresión arrojó un valor F de 201 908.27 con un valor p de 0.000, por lo que el modelo resulta estadísticamente significativo en su conjunto y presenta un ajuste sensiblemente superior al obtenido para el horno “A”.

Entre los términos individuales resultan significativos la constante ($p=0.000$), el tiempo de fusión ($p=0.001$) y su término cuadrático ($p=0.018$); no alcanzan significancia el consumo de GLP ($p=0.339$) ni su término cuadrático ($p=0.331$). Los factores de inflación de la varianza, comprendidos entre 2 113.18 y 4 165.81, confirman también aquí una fuerte multicolinealidad entre los términos lineales y cuadráticos, por lo que los coeficientes individuales deben interpretarse con cautela.

Los coeficientes de los términos cuadráticos son positivos —0.0002502 para el tiempo de fusión y 0.001893 para el consumo de GLP—, lo que describe una superficie de respuesta con concavidad hacia arriba y sugiere la existencia de un punto de rendimiento mínimo dentro del rango evaluado, a partir del cual el rendimiento térmico se recupera. Al igual que en el

horno “A”, el ajuste casi perfecto obedece a que el rendimiento térmico se determina a partir del tiempo de fusión y de la temperatura ambiente, de modo que esta lectura debe tomarse como una descripción del rango evaluado y no como una relación causal confirmada.

Tabla 25

Coeficientes de la regresión no lineal para el horno “B”

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0.9886	0.005024	196.77	0.000	
Tiempo (T2)	-0.02092	0.0007752	-26.98	0.001	2113.18
Consumo (C2)	-0.006573	0.005271	-1.25	0.339	4086.34
T2·T2	0.0002502	0.00003423	7.31	0.018	2158.38
C2·C2	0.001893	0.001486	1.27	0.331	4165.81

Nota. Elaboración propia.

Tabla 26

Resumen del modelo para el horno “B”

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.0000242	100.00%	100.00%	99.99%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 27

Análisis de varianza de la regresión para el horno “B”

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	4	0.00047433	0.00011858	201908.27	0.000
Tiempo (T2)	1	0.00000043	0.00000043	728.06	0.001
Consumo (C2)	1	0.00000000	0.00000000	1.55	0.339
T2·T2	1	0.00000003	0.00000003	53.44	0.018
C2·C2	1	0.00000000	0.00000000	1.62	0.331
Error	2	0.00000000	0.00000000		
Total	6	0.00047433			

Nota. Elaboración propia.

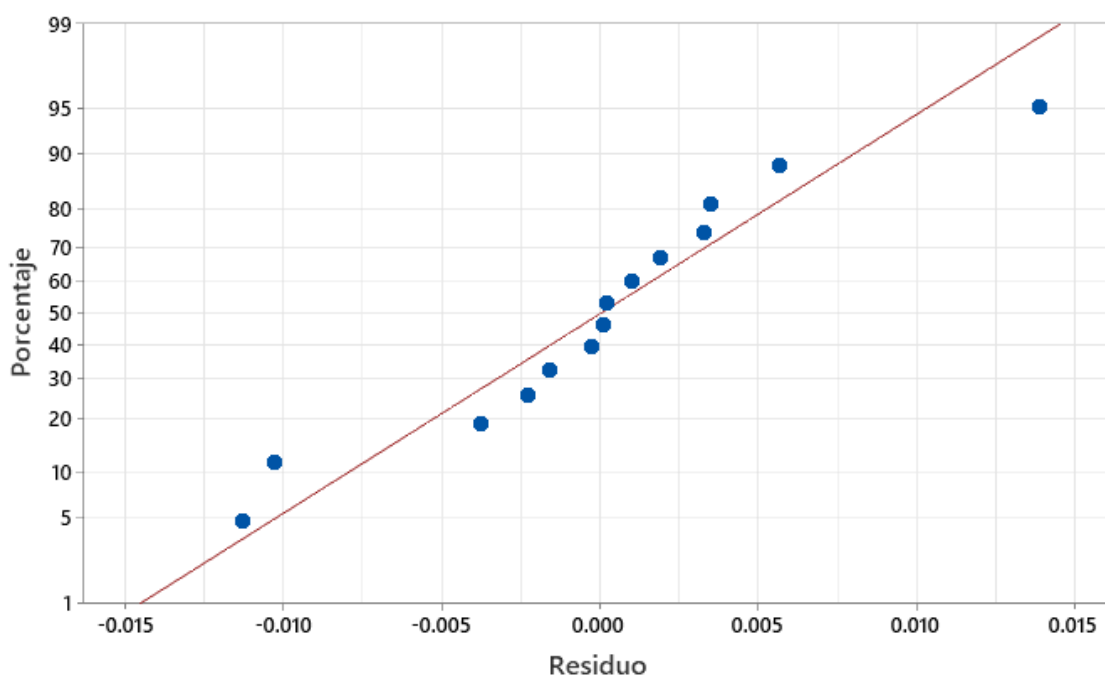
6.2.3. Verificación de Supuestos del Modelo

Se verificaron los supuestos estadísticos de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de los residuos, requeridos para la fiabilidad del análisis de varianza del apartado 6.1 y de los modelos de regresión del apartado 6.2. Las gráficas que se presentan a continuación corresponden a los residuos del análisis de varianza de un solo factor.

Como se ve en la gráfica de probabilidad normal (figura 42), los residuos se distribuyen a lo largo de la línea de ajuste, lo que demuestra que los datos de eficiencia de ambos hornos cumplen con el supuesto de normalidad.

Figura 42

Gráfica de probabilidad normal



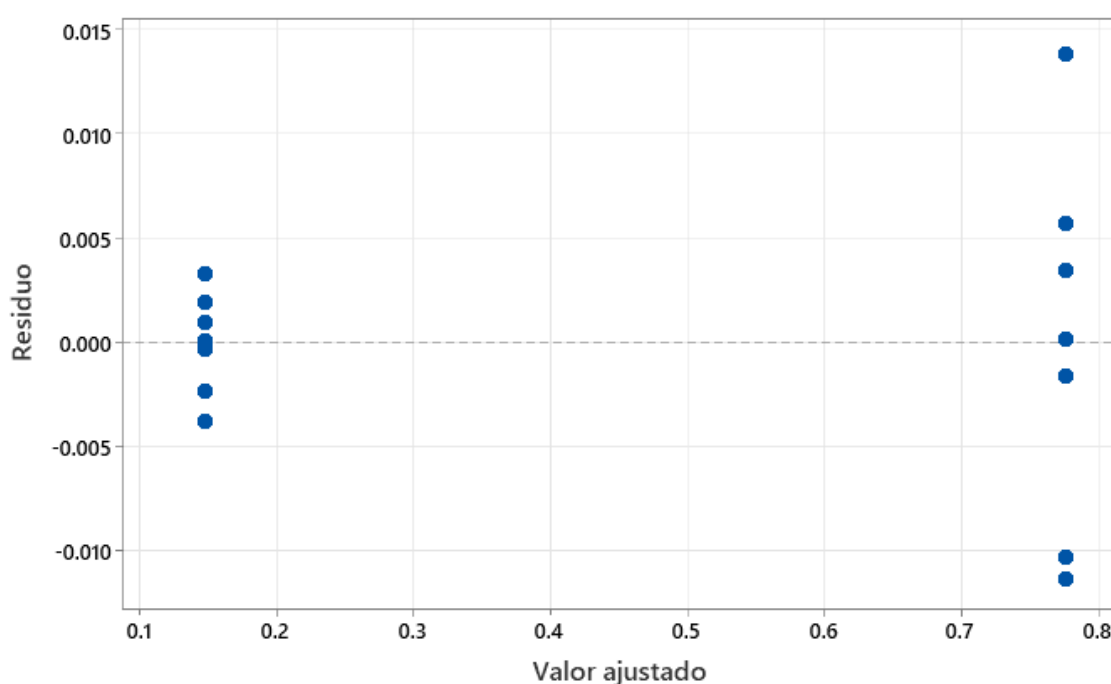
Nota. Elaboración propia.

Para verificar la homogeneidad de varianzas (homocedasticidad) del modelo, se analizó la distribución de los residuos frente a los valores ajustados, tal como se presenta en la figura 43. Se observa que los residuos se distribuyen de forma aleatoria alrededor de la línea horizontal correspondiente al valor cero, sin presentar una tendencia sistemática, curvaturas o patrones definidos que evidencien un comportamiento no aleatorio.

Se identifican algunos residuos con valores ligeramente más alejados de la línea central, estos se encuentran distribuidos de manera aislada y no constituyen valores atípicos que alteren el comportamiento general del modelo. Además, no se observa una concentración excesiva de residuos positivos o negativos en un determinado intervalo de los valores ajustados, lo que refuerza la ausencia de sesgo en las predicciones.

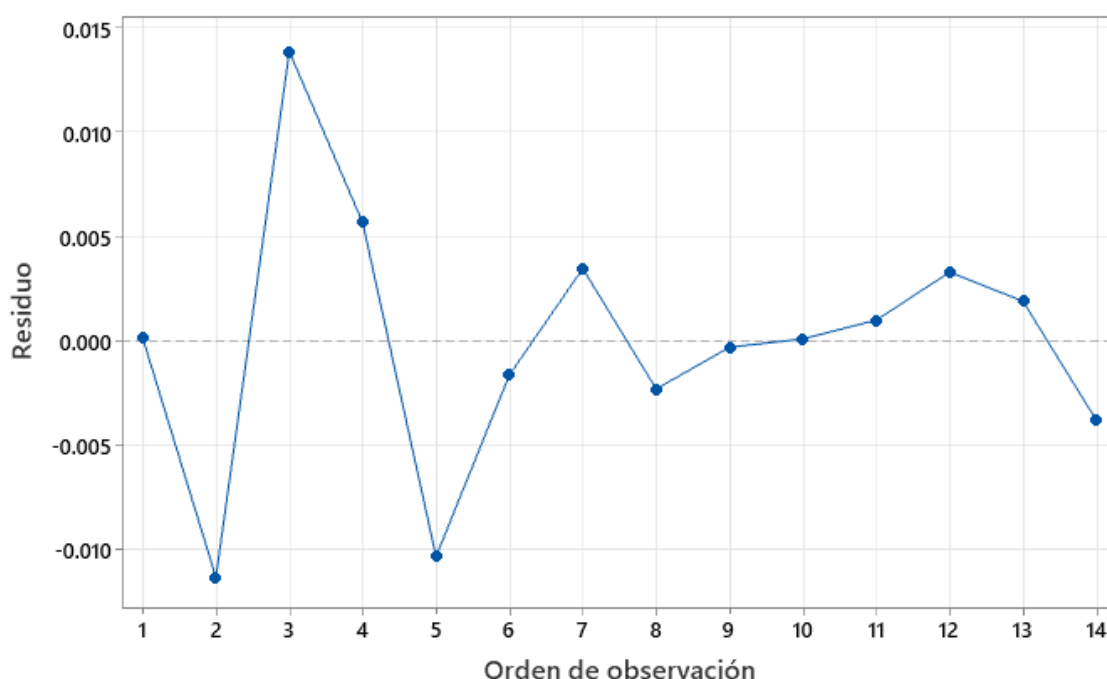
Figura 43

Gráfica de homogeneidad



Nota. Elaboración propia.

La Figura 44 presenta la distribución de los residuos en función del orden de observación. Se aprecia que los residuos se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea de referencia en cero, alternando entre valores positivos y negativos sin mostrar tendencias crecientes, decrecientes o patrones cíclicos. Asimismo, no se observan agrupamientos que indiquen dependencia entre las observaciones. En consecuencia, se considera que se cumple el supuesto de independencia de los errores, lo que respalda la validez del modelo de regresión.

Figura 44*Gráfica de independencia*

Nota. Elaboración propia.

El cumplimiento de estos supuestos respalda la validez de la inferencia realizada en el apartado 6.1, que constituye el contraste de hipótesis de la investigación. No obstante, debe reiterarse que los modelos de regresión del apartado 6.2 presentan limitaciones propias del tamaño de muestra: cinco parámetros ajustados con siete observaciones dejan únicamente dos grados de libertad para el error, los factores de inflación de la varianza son elevados y el R-cuadrado predicho del modelo del horno “A” es nulo. Por ello, dichos modelos se presentan como una descripción del rango operativo evaluado y no como herramientas de predicción.

6.3. Contratación de Hipótesis

La contratación de hipótesis se realizó sobre el rendimiento térmico medido en los siete ciclos de fundición ejecutados en cada horno, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$. Las hipótesis estadísticas contrastadas fueron H_0 : las medias de rendimiento térmico de ambos revestimientos son iguales, frente a H_1 : las medias no son iguales.

La prueba estadística empleada fue el análisis de varianza de un solo factor presentado en el apartado 6.1, complementada con la prueba de comparaciones múltiples de Tukey y con los cálculos térmicos del capítulo V. Cabe precisar que las hipótesis específicas 1 y 2 corresponden a la determinación del rendimiento térmico de cada horno, por lo que se verifican con los valores medios obtenidos y con los cálculos termodinámicos, mientras que la hipótesis específica 3 y la hipótesis general implican una comparación entre revestimientos y se resuelven mediante el contraste estadístico de H_0 .

6.3.1. Contrastación de la Hipótesis Específica 1

La primera hipótesis específica sostiene que el horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales presenta un menor rendimiento térmico debido a las mayores pérdidas de calor a través del revestimiento. Los resultados la respaldan: el horno “A” alcanzó un rendimiento térmico medio de 0.14789, el más bajo de los dos sistemas, y la prueba de Tukey lo ubicó en el grupo B, estadísticamente inferior. El cálculo térmico del apartado 5.7 cuantifica el mecanismo señalado en la hipótesis: promediando los siete ciclos, las pérdidas de calor de este horno alcanzan 9 464.32 W —prácticamente constantes en todo el rango ensayado—, frente a 1 642.62 W de potencia útil destinada a la fusión. Se acepta la hipótesis específica 1.

6.3.2. Contrastación de la Hipótesis Específica 2

La segunda hipótesis específica sostiene que el horno revestido con fibra cerámica presenta un mayor rendimiento térmico debido a la baja conductividad térmica del material, lo que contribuye a reducir las pérdidas de calor. El horno “B” alcanzó un rendimiento térmico medio de 0.77621 y fue asignado al grupo A de Tukey, estadísticamente superior. El cálculo del apartado 5.8 confirma el mecanismo: promediando los siete ciclos, las pérdidas de calor descienden a 1 425.13 W —prácticamente constantes en todo el rango ensayado y desglosadas en 987.73 W en el cilindro, 218.62 W en la tapa y 218.62 W en la base—, un 84.9 % menos que en el horno revestido con ladrillo refractario. Se acepta la hipótesis específica 2.

6.3.3. Contrastación de la Hipótesis Específica 3

La tercera hipótesis específica sostiene que el horno revestido con fibra cerámica presenta un incremento del rendimiento térmico respecto del horno revestido con materiales refractarios convencionales, debido a la reducción de las pérdidas de calor durante el proceso de fundición. Para contrastarla se plantearon H_0 : el rendimiento térmico medio de ambos revestimientos es igual, y H_1 : el rendimiento térmico medio de ambos revestimientos difiere. El análisis de varianza arrojó un valor F de 32 534.55 con un valor p de 0.000, inferior al nivel de significancia de 0.05, por lo que se rechaza H_0 y se acepta H_1 con un nivel de confianza del 95%. El incremento asciende a 0.62833, equivalente a 62.83 puntos porcentuales de rendimiento térmico, y los intervalos de confianza al 95% de ambos grupos no se traslapan. Se acepta la hipótesis específica 3.

6.3.4. Contrastación de la Hipótesis General

La hipótesis general sostiene que el horno de crisol revestido con fibra cerámica presenta un mayor rendimiento térmico en comparación con el horno revestido con materiales refractarios convencionales en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A. Habiéndose aceptado las tres hipótesis específicas, y considerando que el tipo de revestimiento explica el 99.96% de la variabilidad del rendimiento térmico con un efecto altamente significativo ($F=32534.55$; $p=0.000$), se acepta la hipótesis general de la investigación con un nivel de confianza del 95%.

Cabe precisar que los modelos de regresión cuadrática del apartado 6.2 no intervienen en esta contrastación. Dichos modelos describen el comportamiento del rendimiento térmico frente al tiempo de fusión y al consumo de GLP dentro de cada horno y, si bien resultan estadísticamente significativos en su conjunto ($p=0.004$ en el horno “A” y $p=0.000$ en el horno “B”), su elevado ajuste obedece a que el rendimiento térmico se determina a partir del tiempo de fusión y de la temperatura ambiente, tal como se advirtió en el apartado 6.2. Por tratarse de

modelos internos de cada horno, no constituyen un contraste entre revestimientos: esa función corresponde exclusivamente al análisis de varianza presentado en el apartado 6.1.

6.4. Contraste de Resultados con Antecedentes de Investigación

Finalmente, se procedió a contrastar los hallazgos de esta investigación con los antecedentes presentados en el marco teórico, permitiendo validar la relevancia técnica de los resultados obtenidos.

6.4.1. Contraste con Antecedentes Internacionales

Los resultados de esta tesis coinciden con lo expuesto por Luyang (2015) y Nutec (2018), quienes sostienen que la fibra cerámica ofrece un rendimiento térmico superior en hornos industriales debido a su baja conductividad. Sin embargo, mientras que SF Foundry Material (2024) describe el uso de mantas cerámicas de forma general, esta investigación cuantifica dicho beneficio de forma experimental y lo somete a contraste estadístico: el tipo de revestimiento explica el 99.96% de la variabilidad del rendimiento térmico ($F=32534.55$; $p=0.000$), lo que aporta una base estadística rigurosa al beneficio atribuido al material en procesos de fundición de oro.

6.4.2. Contraste con Antecedentes Nacionales

Al comparar este estudio con el diseño de Pillaca (2017) para aluminio y Cabrera & Morales (2019) para cobre, se observa que, aunque ambos autores logran fusiones exitosas con aislamientos convencionales, el uso de fibra cerámica en esta investigación permitió optimizar el rendimiento térmico a niveles superiores (media de 77.62%). Esto sugiere que la fibra cerámica no solo es viable para metales de bajo punto de fusión, sino que es altamente eficiente para metales preciosos como el oro, superando las limitaciones de porosidad irregular mencionadas en sistemas de ladrillo similares a los de Mesía & Tello (2012) en Iquitos.

6.4.3. Contraste con Antecedentes Locales (Cusco)

En el contexto regional, esta investigación complementa el trabajo de Aquima & Carlos (2022) sobre hornos basculantes en la UNSAAC, al introducir un análisis comparativo directo entre materiales aislantes. Asimismo, se diferencia del análisis tecnológico de Farfán & Quispe (2024) en joyerías del Cusco, ya que este estudio no solo describe el estado de los hornos, sino que propone una solución matemática y técnica (la fibra cerámica) para mitigar el alto consumo de gas y el bajo rendimiento térmico que afecta a la pequeña minería y joyería local. El rechazo de la hipótesis nula en este trabajo ($p=0.000$) brinda el sustento científico que las investigaciones locales previas sugerían como una necesidad técnica en la región.

Conclusiones

1. En cumplimiento del primer objetivo específico, se determinó que el horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales (horno “A”) presenta un rendimiento térmico medio de 14.79 % en los siete ciclos ejecutados, con una desviación estándar de 0.24 puntos porcentuales y un intervalo de confianza al 95 % de 14.25 % a 15.33 %. El análisis de varianza, complementado con la prueba de Tukey, utilizada para identificar diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, ubicó a este revestimiento en el grupo B, estadísticamente inferior, y el cálculo del apartado 5.7 identifica el mecanismo: sus pérdidas de calor promedian 9 464.32 W frente a 1 642.62 W de potencia útil destinada a la fusión. Se confirma así la primera hipótesis específica.
2. En cumplimiento del segundo objetivo específico, se determinó que el horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica (horno “B”) presenta un rendimiento térmico medio de 77.62 % en los siete ciclos ejecutados, con una desviación estándar de 0.89 puntos porcentuales y un intervalo de confianza al 95 % de 77.09 % a 78.16 %. El análisis de varianza lo ubicó en el grupo A de Tukey, estadísticamente superior, y sus pérdidas de calor promedian 1 425.13 W —desglosadas en 987.73 W en el cilindro, 218.62 W en la tapa y 218.62 W en la base—, un 84.9 % menos que el horno de ladrillo refractario. Se confirma así la segunda hipótesis específica, atribuible a la baja conductividad térmica de la fibra cerámica.
3. En cumplimiento del tercer objetivo específico, el análisis de varianza de un solo factor demostró que la diferencia entre ambos revestimientos es altamente significativa ($F = 32\,534.55$; $p = 0.000$), por lo que se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias con un nivel de confianza del 95 %. El tipo de revestimiento explica el 99.96 % de la variabilidad del rendimiento térmico, con un R-cuadrado ajustado de 99.96 % y un R-

cuadrado predicho de 99.95 %, y los intervalos de confianza al 95 % de ambos grupos no se traslapan. El incremento asciende a 62.83 puntos porcentuales a favor de la fibra cerámica, con lo que se confirma la tercera hipótesis específica.

4. En cumplimiento del objetivo general, se acepta la hipótesis general de la investigación: el horno de crisol revestido con fibra cerámica presenta un mayor rendimiento térmico que el horno revestido con materiales refractarios convencionales en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A. La conclusión se sustenta en el análisis de varianza, que descarta que la diferencia observada sea atribuible al azar y establece al tipo de revestimiento como el factor determinante del rendimiento, y en el cálculo termodinámico del capítulo V, que cuantifica la reducción de las pérdidas de calor como el mecanismo responsable de esa diferencia. Como resultado complementario, no comprendido en las hipótesis contrastadas, se registró que el cambio de revestimiento reduce el consumo de GLP por ciclo de 10.13 kg a 1.80 kg en promedio y el tiempo de fusión de 34.47 min a 11.46 min, manteniendo resultados constantes en la fusión de oro. Esta conclusión se circunscribe a las condiciones del estudio: siete ciclos de fundición por horno, una carga constante de 5 kg de oro y una única instalación.

Recomendaciones

1. Realizar futuras investigaciones empleando resistencias eléctricas como sistema de calentamiento, en reemplazo del GLP, con la finalidad de comparar el rendimiento térmico, el consumo energético, el tiempo de calentamiento y la eficiencia del horno bajo ambos sistemas de generación de calor.
2. Evaluar diferentes espesores de fibra cerámica como material de aislamiento térmico, a fin de determinar la influencia del espesor sobre el rendimiento térmico del horno y establecer un espesor óptimo que permita mejorar el aprovechamiento de la energía suministrada.
3. Comparar la fibra cerámica con otros materiales aislantes y refractarios disponibles para hornos de crisol, considerando materiales con diferentes propiedades de conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas y capacidad de aislamiento, con el propósito de identificar alternativas que puedan ofrecer un mejor desempeño térmico.
4. Evaluar el comportamiento y la vida útil de la fibra cerámica después de un mayor número de ciclos de fundición, considerando la posible degradación del material, pérdida de espesor, deterioro físico y variación del rendimiento térmico, con la finalidad de determinar su comportamiento durante periodos prolongados de operación.
5. Realizar un análisis económico de costo-beneficio de los revestimientos evaluados, considerando los costos de adquisición e instalación, consumo de combustible, mantenimiento, reemplazo del revestimiento y vida útil, con el propósito de determinar la conveniencia económica de implementar fibra cerámica en hornos de crisol.
6. Incorporar técnicas de termografía infrarroja en futuras investigaciones, con la finalidad de identificar y cuantificar las zonas de mayor pérdida de calor en la

superficie externa del horno, permitiendo complementar el análisis del rendimiento térmico y establecer oportunidades de mejora en el sistema de aislamiento.

Bibliografía

- Aceituno, C., Silva, R., & Cruz, R. (2020). *Mitos y realidades de la investigación científica*. Biblioteca Nacional del Perú. Obtenido de <https://repositorio.concytec.gob.pe/server/api/core/bitstreams/ca4464d4-169e-0301-da58-641ddde28ad3/content>
- Andia, B. (2015). *Recuperación de oro a partir de lodos de relave cianurados, utilizando la resina estireno divinilbenceno*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/540bfdad-bfe8-4b30-9d9a-cded7d0ea5fa>
- Aquima, W., & Carlos, D. (2022). *Diseño y construcción de un horno de crisol basculante a gas natural para fusión de aluminio*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6508/253T20220118_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arias, F. (2012). *El Proyecto de Investigación, introducción a la metodología científica* (6 ed.). Editorial Episteme. Obtenido de https://tauniversity.org/sites/default/files/libro_el_proyecto_de_investigacion_de_fidias_g_arias.pdf
- Ballester, A., Verdeja, L., & Sancho, J. (1999). *Metalurgia Extractiva. Volumen 1: Fundamentos*. Síntesis. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/299504324_Metalurgia_Extractiva_Volumen_1_Fundamentos

- Bejan, A. (2013). *Transferencia de calor por convección*. Wiley. Obtenido de <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1833111>
- Cabrera, D., & Morales, J. (2019). *Diseño y construcción de un horno crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre – Cajamarca 2019*. Tesis de grado, Universidad Privada del Norte. Obtenido de <https://repositorio.upn.edu.pe/item/8fb8032d-4041-4b6b-a8dd-ea5efb919295>
- Callister, W., & Rethwish, D. (2018). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Reverté. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/732556181/Ciencia-e-Ingenieria-de-Materiales-Callister-William-D-Rethwisch-David-G-9-2018-Editorial-Reverte-9788429195491-b6e89810b19826a157>
- Campbell, D., & Stanley, J. (1966). *Diseños experimentales y Cuasiexperimentales en la investigación social*. Amorrortu editores. Obtenido de https://www.academia.edu/33262198/CAMPBELL_STANLEY_Dise%C3%B1os_experimentales_y_Cuasiexperimentales_en_la_investigaci%C3%B3n_social
- Cengel, Y., & Boles, M. (2015). *Termodinámica* (7 ed.). McGraw-Hill. Obtenido de https://www.academia.edu/39821820/Termodin%C3%A1mica_Cengel_and_Boles_7ma_edici%C3%B3n
- Díaz, C. (2009). *Aspectos Técnicos de Fibra Cerámica*. Thermal Ceramics. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/91672224/Aspectos-Tecnicos-de-Fibra-Ceramica>
- Farfán, T., & Quispe, C. (2024). *Análisis tecnológico en los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para la fusión de plata en joyerías de la región Cusco (Investigación Tecnológica)*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de <https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/9296?locale-attribute=en>

- Google. (2025). *Mapa satelital de Pampa Capac, distrito de Chaparra, provincia de Caravelí, Arequipa*. Google Maps. Obtenido de <https://www.google.com/maps>
- Grupo Industrial Rusgar. (2024). *Aislante térmico para casa*. Grupo Industrial Rusgar. Obtenido de <https://impermeabilizantesyaislantestermicosmonterrey.com/aislante-termico-para-casa/>
- Guevara, W. (2009). *Diseño y construcción de un ventilador centrífugo para horno de crisol*. Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de investigación*. Mexico: Mc Graw Hill. Obtenido de <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-Metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- Holman, J. (2010). *Transferencia de calor* (9 ed.). McGraw-Hill. Obtenido de https://www.academia.edu/11993537/Transferencia_de_Calor_J_P_Holman
- Incropera, F. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor y Masa* (4 ed.). (R. Cruz, Trad.) Pearson. Obtenido de https://www.academia.edu/6619805/Fundamentos_de_transferencia_de_calor_Frank_Incropera
- IQ S.A.C. (2020). *Instrumentación y Control*. Obtenido de Termocupla tipo K: <https://www.iqsac.com.pe/productos/71/termocupla-tipo-k>
- Kingery, D., Bowen, H., & Uhlman, D. (1976). *Introducción a la cerámica* (2 ed.). Limusa. Obtenido de https://books.google.com.pe/books?id=nGjjDwAAQBAJ&printsec=frontcover&source=gbs_vpt_read#v=onepage&q&f=false

- Kreith, F., & Bohn, M. (2001). *Principios de transferencia de calor*. International Thomson Editores, S. A. de C. V.,. Obtenido de https://books.google.com.pe/books/about/Principios_de_transferencia_de_calor.html?id=3cH7AAAACAAJ&redir_esc=y
- Luyang. (2015). *Aplicación de fibra cerámica en hornos industriales*. Luyang Energy-saving Materials Co. Obtenido de <https://es.luyangwool.com/hot/ceramic-wool/application-of-ceramic-fiber-in-industrial.html>
- McDonald, D., & Hunt, L. (2004). *A history of platinum and its allied metals*. Johnson Matthey Plc. Obtenido de https://books.google.com.pe/books?id=xriMAGAAQBAJ&printsec=copyright&source=gbps_pub_info_r#v=onepage&q&f=false
- Mesia, J., & Tello, A. (2012). *Diseño, construcción e instalación de un horno de resistencias para fundir minerales de oro y plata en la ciudad de Iquitos*. Tesis de grado, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana. Obtenido de <https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/items/19673912-45d8-4612-8421-db7b6ff2525f>
- Modest, M. (2013). *Radiative Heat Transfer*. Academic Press. Obtenido de <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=2131706>
- Pillaca, R. (2017). *Diseño de un horno de crisol para la fundición de 600 kg. de aluminio reciclado utilizando gas natural*. Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <https://repositorio.pucp.edu.pe/items/fe70418c-0c63-4185-904f-599fcf5713c4>
- Quiroga, J., Flores, E., Coba, A., & Jeysson, T. (2020). Diseño e implementación de un sistema de control para un horno de crisol. *Revista Minerva de Investigación Científica*, 1(2), 30-39. doi:10.47460/minerva.V1i2.9
- Richerson, D. (1995). *Ciencia y tecnología de los materiales cerámicos*. McGraw-Hill.

- Sánchez, J. (2024). *Usos más comunes de Fibra Cerámica*. Insulation Guru MX. Obtenido de <https://www.insulationguru.mx/usos-mas-comunes-de-fibra-ceramica/>
- SEFU. (2024). *Application of ceramic fiber blanket in casting: A review of current uses*. SF Foundry Material. Obtenido de <https://es.sffoundrymaterial.com/info/application-of-ceramic-fiber-blanket-in-castin-95838637.html>
- Souza, E. (2020). *¿Qué son los ladrillos refractarios y para qué sirven?* Arch Daily. Obtenido de <https://www.archdaily.cl/cl/949969/que-son-los-ladrillos-refractarios-y-para-que-sirven>
- Tavira, C. (2018). *Fibra cerámica para hornos industriales: rendimiento ideal térmico*. Ingeniería de Aplicaciones y Soporte Técnico en NUTEC. Obtenido de <https://www.nutec.com/es/newsroom/articulos/fibra-ceramica-para-hornos-industriales>
- Thermal Ceramics. (2009). *Aspectos técnicos de fibra cerámica*.
- Trinks, W. (2004). *Industrial Furnaces* (6 ed.). John Wiley & Sons. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470172612>
- Witzke, T. (2024). *Mullita*. Holst. Obtenido de <https://tienda.holst-porzellan.es/conocimiento-de-la-mercancia/materias-primas/mullita/>

Anexos

Anexo 1: Matriz de Consistencia

“EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DEL HORNO DE CRISOL CON FIBRA CERÁMICA FRENTE A MATERIALES REFRACTARIOS CONVENCIONALES EN LA EMPRESA MINERA AURÍFERA ESTRELLA DE CHÁPARRA S.A.

Problemas	Objetivo	Hipótesis	Variables/Dimensiones	Metodología
<i>Problema General:</i>	<i>Objetivo General:</i>	<i>Hipótesis General:</i>	<i>Variable Dependiente</i>	
¿Qué diferencias existirán en el rendimiento térmico de un horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales y con manta de fibra cerámica durante el proceso de fundición de oro en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.?	Evaluar comparativamente el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con fibra cerámica frente a materiales refractarios convencionales en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.	El horno de crisol revestido con fibra cerámica presenta un mayor rendimiento térmico en comparación con el horno revestido con materiales refractarios convencionales en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.	Rendimiento térmico. Dimensión: Transferencia de calor. Conservación de energía (balance energético). Indicador: Rendimiento térmico (%) Energía útil (MJ) / Energía consumida (MJ)	Nivel y Tipo de Investigación: Nivel: Aplicativo – Experimental (enfoque cuantitativo) Tipo: Tecnológica – Aplicativa Alcance: Explicativo Diseño: Experimental – Cuasi experimental Población: Constituida por todos los ciclos de fundición de oro realizados en los hornos de crisol de la Empresa Minera Aurífera Estrella de Cháparra S.A.
<i>Problemas Específicos:</i>	<i>Objetivos Específicos:</i>	<i>Hipótesis Específicas:</i>	<i>Variable Independiente:</i>	
PE1. ¿Cuál será el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales?	OE1. Determinar el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales.	HE1. El horno de crisol revestido con materiales refractarios convencionales presenta un menor rendimiento térmico debido a las mayores pérdidas de calor a través del revestimiento.	Tipo de revestimiento del horno de crisol (fibra cerámica / ladrillo refractario).	Muestra: 14 ciclos de fundición: 07 en el horno revestido con ladrillo refractario (grupo control) y 07 en el horno revestido con fibra cerámica (grupo experimental).
PE2. ¿Cuál será el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica?	OE2. Determinar el rendimiento térmico del horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica.	HE2. El horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica presenta un mayor rendimiento térmico debido a la baja conductividad térmica del material de revestimiento, lo que contribuye a reducir las pérdidas de calor.	Dimensiones: Conductividad térmica del revestimiento. Espesor del revestimiento. Densidad del material. Tipo de revestimiento.	Técnicas e instrumentos: Observación estructurada y registro de mediciones directas mediante termocupla tipo K, termómetro infrarrojo, balanza de precisión, cronómetro y medidor de flujo de gas. Muestreo no probabilístico por conveniencia. Procesamiento por balance energético, ANOVA y regresión cuadrática (Excel y Minitab).
PE3. ¿Existirá diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento térmico entre el horno de crisol revestido con fibra cerámica y el horno revestido con materiales refractarios convencionales durante el proceso de fundición de oro?	OE3. Determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento térmico entre el horno de crisol revestido con fibra cerámica y el revestido con materiales refractarios convencionales.	HE3. Existe una diferencia estadísticamente significativa en el rendimiento térmico entre el horno de crisol revestido con manta de fibra cerámica y el horno revestido con materiales refractarios convencionales durante el proceso de fundición de oro.	Indicadores: W/m·K mm kg/m ³ Fibra cerámica / ladrillo refractario	

Anexo 2

Ficha técnica de ladrillo refractario SK34



SISA
SUMINISTROS, INGENIERÍA Y SOLUCIONES S.A.

Ficha técnica

Ladrillo Refractario SK34

Código: SF-051 (5/21)	Versión: 2	Revisión: 01/08/2018
-----------------------	------------	----------------------



Descripción:

Son productos refractarios preformados, a base de óxidos naturales no metálicos de alto punto de fusión, que brindan alta performance de refractariedad y expansión térmica; que los hacen compatibles para soportar acciones mecánicas presentes en la operación a altas temperaturas, se utilizan en todos los hornos industriales que se usan en refinerías de petróleo, industria química, industria siderúrgica y metalúrgica, cementera, ladrillos, cerámicas, industrias del vidrio, etc.

DESCRIPCIÓN	VALOR
Nombre	SK- 34
Clasificación NTC-773 ASTM C-27	Súper Duty

Análisis químico:

Análisis químico	%
Al ₂ O ₃	42.25
SiO ₂	52.5
Fe ₂ O ₃	1.5
TiO ₂	2.0
CaO	0.3
MgO	0.3
MgO	0.3

Otras propiedades:

Otras propiedades	VALOR
PCE (cono pirométrico equivalente)	34
Temperatura equivalente °C (NTC-706 ASTM C-24)	1763
Porosidad aparente (%) NTC-674 ASTM C-20	20.0-22.0
Densidad volumétrica °C gr/cm ³ ASTM C-134 110 °C	2.00-2.10
Lb/FT ³	125-130

Usos:

Son utilizados para revestir parrillas, calderas, ollas de aceración, hornos rotatorios de cementeras, etc., los cuales deben de estar pegados con tierra refractaria, estos se pueden adherir con firmeza en la tierra si se utiliza un poco de cemento donde el resultado de esta mezcla parecerá como un barro.

Propiedades Mecánicas:

Propiedades Mecánicas	VALOR
Módulo de ruptura en frío	
Mpa NTC-682 ASTM C-133	7.5-13.5
Kg/cm ²	(75-135)
Resistencia a Compresión en frío	
Mpa NTC-682 ASTM C-133	30.0-32.0
Kg/cm ²	300-320
Cambio lineal permanente a 1400 °C (%)	
NTC-688 ATSM C-133	0.0-0.2C
Deformación bajo carga en caliente a 1450 °C (%)	
NTC-1107 ASTM C-16	0.1-0.35

Cra. 51B N° 12 Sur 77 PBX (034) 444 18 04 – 3147891636

www.sissa.com.co



Nota. Tomado de fichas técnicas (p. 3), por Suministros, Ingeniería y Soluciones, 2018.

Anexo 3

Ficha técnica de termocupla



Control de combustión

FT-PB-8-CC6

Termopar o termocupla tipo K
Serie PBTk

Características

Referencia	PBTk
Tipo de termopar	Tipo K
Bulbo	Macizo
Longitud del bulbo	4", 6", 8", 10", 12", 15"
Diámetro del bulbo	1/4", 1/2"
Material cabezote	Aluminio
Tamaño cabezote	Grande - Pequeño
Elemento sensor	Material compacto acero inox. 310
Conexión a proceso	Lisa, roscada 1/2" NPT
Temperatura operación	0 - 1100 °C

Descripción

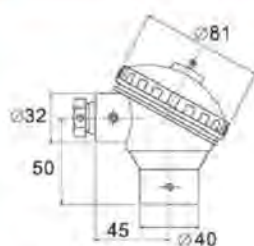
Las Termocupla tipo K de la serie PBTk son componentes eléctricos y electrónicos que, en calidad de sensores permiten medir la temperatura mediante una señal eléctrica determinada; esta señal puede enviarse directamente o mediante el cambio de la resistencia.

Las Termocupla tipo K de la serie PBTk están encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable. En un extremo está la unión y en el otro extremo el terminal de los cables, el cual está protegido por un cabezal de aluminio.

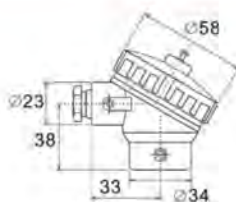
Las termocuplas tipo K permiten medir altos rangos de temperatura, son intercambiables y se pueden emplear.

Las termocuplas tipo K se utilizan en la industria como sensores de temperatura, ya que son capaces de medir altos rangos de temperatura; además son económicos, intercambiables y se pueden conectar en serie y utilizan conectores estándar.

Dimensiones generales



Cabezal grande



Cabezal pequeño



A	Bulbo
B	Conexión
C	Cabezal

Nota:

Las dimensiones pueden cambiar sin previo aviso, dependiendo de nuevos diseños, cambios en los prototipos y mejoras para efectos en la calidad.

10 - 2022

www.pirotecburners.com | Carrera 42A # 24 Sur -34
 repuestos@pirotecburners.com | T (604) 444 00 04 | +57 304 3422467
 Envigado - Colombia

Nota. Tomado de fichas técnicas (p. 10), por Pirotec Burners, 2022.

Elemento y número de parte

Esta tabla presenta la información básica para solicitar la termocupla Tipo K como elemento o como repuesto adicionalmente los elementos asociados para completar su correcta instalación. No se debe omitir la instalación de los elementos complementarios en ningún sistema.

No. parte	Elemento
1 - 2- 679	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/4" L: 4" Conexión: 1/2" NPT
	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/4" L: 6" Conexión: 1/2" NPT
	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/4" L: 8" Conexión: 1/2" NPT
1 - 2- 620	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/4" L: 10" Conexión: 1/2" NPT
1 - 2- 873	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/4" L: 12" Conexión: 1/2" NPT
	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/2" L: 8" Conexión: Sin conexión
	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/2" L: 10" Conexión: Sin conexión
	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/2" L: 12" Conexión: Sin conexión
	Termocupla tipo K Φ bulbo: 1/2" L: 15" Conexión: Sin conexión
1 - 3- 856	Cable Termocupla tipo K Fibra de Vidrio Enmallado
1 - 3- 32	Cable Termocupla tipo K PVC Amarillo

NOTA:

Para diámetros de bulbo, longitudes o conexiones diferentes consulta con tu asesor comercial.

Garantía

La Termocupla tipo K de la serie PBTk cuenta con una garantía de tres meses después de ser instalado o seis meses después de la entrega del proveedor al cliente (la que se cumpla primero).

La Termocupla tipo K de la serie PBTk debe ser instalada por personal capacitado, calificado o autorizado por Pirotec Burners o su representante en la zona.

La Termocupla tipo K será reemplazada por garantía si presenta defectos de fabricación, problemas de ensamble y calidad de los materiales.

La garantía no cubre daños por golpes o daños causados en su estructura física.

La garantía no incluye costos de envío, ni lucro cesante, ni costos de instalación o desmonte. Esta garantía se rige por las políticas del fabricante.

Precaución

Se recomienda el uso de repuestos originales para la termocuplas tipo K.

El Reemplazo de las termocuplas tipo K con cualquier elemento alternativo de características similares, afecta las condiciones operativas del sistema, la vida útil de los otros componentes y la pérdida de la garantía.

Sustituir este elemento representa una mala práctica industrial y puede tener como consecuencia conatos de incendio, pulsaciones en la combustión o incluso explosiones inesperadas.

Si el fluido a medir es aire, indicar antes de su fabricación para suministrar el bulbo con perforaciones especiales para aire.

Si el fluido a medir presenta vibraciones producidas por su alto caudal/velocidad, alta presión o productos corrosivos/abrasivos; es recomendable utilizar termopozos macizos para proteger la Termocupla tipo K de la serie PBTk.

www.pirotecburners.com | Carrera 42A # 24 Sur -34
repuestos@pirotecburners.com | T (604) 444.00.04 | +57 304 3422467
Envigado - Colombia

Nota. Tomado de fichas técnicas (p. 11), por Pirotec Burners, 2022.

Anexo 4

Propiedades químicas, físicas y térmicas de la fibra cerámica 1260

Composición química (%)	Al ₂ O ₃	45-50
	SiO ₂	50-57
	Otros	< 1
Color		Blanca
Temperatura de clasificación (°C)		1260
Temperatura de uso continuo (°C)		1200
Punto de fusión (°C)		1760
Diametro de fibra (µm)		2.5-3.5
Calor específico (J/Kg K)		
1100 °C		1.130 - 1.330
Cambio lineal permanente (%)		
1200 °C		<3
Dimensiones (mm)	Espesor	6, 13, 25, 38, 51
	Ancho	610, 1220
	Largo	3660, 7620, 14640, 21960

Nota. Tomado de Gamma (p. 13), por Erecos, 2021.

Conductividad térmica (W/m K)	Densidad (Kg/m ³)	64	96	128
	260 °C	0.10	0.07	0.06
	400 °C	0.13	0.118	0.105
	538 °C	0.19	0.15	0.12
	600 °C	0.22	0.18	0.16
	800 °C	0.32	0.24	0.235
	816 °C	0.33	0.25	0.24
	982 °C	0.43	0.34	0.26
	1000 °C	0.49	0.435	0.325
	1093 °C	0.50	0.44	0.33

Nota. Tomado de Gamma (p. 13), por Erecos, 2021.

Anexo 5

Ficha técnica de manta de fibra cerámica

MANTA DE FIBRA CERÁMICA



La manta refractaria de fibra cerámica es un aislante térmico para alta temperatura, está fabricada con tecnología de punta a base de fibras cerámicas entretejidas mediante un proceso continuo de aglutinamiento, la cual permite una excelente resistencia térmica

BENEFICIOS

- **CONSERVACIÓN DE ENERGIA**

La manta de fibra cerámica para alta temperatura, realizan una magnífica función térmica. Da una buena resistencia a la pérdida de calor por ello ahorra energía y baja el costo de operación.

- **TAMAÑO ADECUADO**

Los grandes tamaños reducen el número de uniones y por lo tanto, ahorran tiempo de instalación y elimina el riesgo de posibles pérdidas de calor.

- **INCONBUSTIBILIDAD**

No contribuye a la propagación del fuego y no produce ni acelera la corrosión en ningún tipo de metal.

- **RESISTENCIA A TEMPERATURAS**

La manta de fibra cerámica para alta temperatura, están fabricados para aplicaciones en temperaturas máximas de operación de 1260° C.

- **RESISTENCIA A HONGOS Y BACTERIAS**

La manta de fibra cerámica no estimula el desarrollo de hongos ni de bacterias.

USO

La manta de Fibra Cerámica, se utilizan como aislamientos que soportan altas temperaturas en hornos, cámaras de combustión, juntas de expansión, paredes de calderos, precipitadores, ductos calientes, torres, tanques cilíndricos, chimeneas y hornos industriales



994017225

(01) 6533802



vegasuperusac@gmail.com



Av. Argentina 608,
Stand 1033. Galería ViaMix

Nota. Tomado de fichas técnicas (p. 32), por Vegasu Perú, 2024.



DIMENSIONES

DIMENSIONES	1"	2"
Ancho	0.61 m	0.61 m
Longitud	7.62 m	3.81 m
Densidad	128kg/m ³	128kg/m ³

DATOS TÉCNICOS

ARTÍCULO	ESTÁNDAR
Max. Temperatura	1260°C
Temperatura de Trabajo	1000°C
Densidad	128kg/m ³
Color	Blanco
Tasa de revestimiento (%) (24h, Density 128kg/m ³)	-4 (1000°C)
Tasa de conductividad térmica (W/m.k) (Densidad 128kg/m ³)	0,09 (400°C) 0,16(800°C)
Resistencia a la tracción(Mpa) (Densidad 128kg/m ³)	0,03
Análisis químico (%)	Al ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ + SiO ₂ zirconium
	45-46 96-99 0



994017225

(01) 6533802



vegassuperusac@gmail.com



Av. Argentina 608,
Stand 1033. Galería ViaMix

Nota. Tomado de fichas técnicas (p. 32), por Vegasu Perú, 2024.

Apéndice A

Constancia de autorización para ejecución de la parte experimental de tesis EMAECSA



Empresa Minera Aurífera Estrella de Chaparra S.A.

R.U.C. 20539526074

PROCESOS DE EXPLOTACION – EXPLORACION DE MINERAL AURIFERO – METALIFERO NO FERROSO
PARTIDA REGISTRAL N° 12010700 ASIENTO A0000 I CAMANA

CONSTANCIA DE AUTORIZACIÓN PARA LA EJECUCIÓN DE LA PARTE EXPERIMENTAL DE TESIS

EMPRESA MINERA AURIFERA ESTRELLA DE CHAPARRA S.A., con RUC N° 20539526074, con domicilio fiscal en Cal. Manuel Villavicencio Nro. 441 Urb. Ingeniería, distrito de San Martín de Porres, Provincia de Lima, Departamento de Lima, debidamente representado por el Gerente General el **Sr. DIAZ MAMANI HECTOR FREDY**, identificado con **DNI N° 43379272**.

AUTORIZA:

Que, los señores egresados de la Universidad Nacional de San Antonio de Abad del Cusco, Sr. **MACEDO ANDRADE RAÚL ARTURO** identificado con **DNI N° 74756342** y Sr. **QUISPE GUERRERO ARNOLD JOSÉ ALFONSO** identificado con **DNI N° 72850011**, a desarrollar su investigación experimental de la tesis titulada ***"Evaluación comparativa del rendimiento térmico del horno de crisol con fibra cerámica frente a materiales refractarios convencionales en la Empresa Minera Aurífera Estrella de Chaparra S.A."***

La autorización comprende el desarrollo de las actividades experimentales en el Área de Fundición de la Planta de Beneficio de la empresa, durante el mes de diciembre de 2025, ***para fines exclusivamente académicos y de investigación.***

Asimismo, se autoriza la utilización de la información técnica obtenida durante la ejecución de las pruebas experimentales, únicamente para la elaboración y sustentación de la referida tesis, respetando la confidencialidad de la información interna de la empresa que no sea necesaria para el desarrollo de la investigación.

Se expide la presente constancia a solicitud de los interesados para los fines académicos que estimen convenientes.

Chaparra, 25 de noviembre del 2025.

EMPRESA MINERA AURIFERA
ESTRELLA DE CHAPARRA S.A.
Hector Diaz Mamani
Gerente General
DNI 43379272

Apéndice B

Cotización y boleta de compra de fibra cerámica



VEGA SUMINISTROS & SERVICIOS GENERALES PERU S.A.C.
RUC N° 20611605723

CELULAR: 967933439 - (01) 6533802
CORREO: vegasuperusac@gmail.com

BOLETA DE VENTA
N.º : M09 - 312

FECHA DE INICIO: 19/09/2024
FECHA DE VENCIMIENTO: 19/09/2024
FORMA DE PAGO: DEPÓSITO
VENDEDOR: JAIRO

CLIENTE: ARNOL PLANTA

DIRECCION
RUC - DNI - Carnet:
TELÉFONO: 978064346

CANT	UNI	DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO		TOTAL	
1	UNI	MANTA DE FIBRA CERAMICA SU FORMATO DE 0.61M X 7.62M X 1" DE ESPESOR CON 128KG/M3 DE DENSIDAD	S/	245.00	S/	245.00
1	UNI	PLACA DE FIBRA CERAMICA 1M X 0.60M X 1" DE ESPESOR CON 390KG/M3	S/	130.00	S/	130.00
1	UNI	CLAVO CON CHAPA DE 4"	S/	38.00	S/	38.00
1	UNI	CHAPA CON SOMBRERO	S/	100.00	S/	100.00

TOTAL	S/	513.00
-------	----	--------

No se aceptan cambios ni devoluciones

¡GRACIAS POR SU CONFIANZA!