



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
EXTENSIÓN LA MANÁ

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS-CIYA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN
HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA.**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del título de Ingeniero
Electromecánico

AUTORES:

Delgado Pullaguari Wilson Bladimir

Uyaguari Ruiz Brayan Javier

TUTOR:

Ing. Morales Cevallos José Williams

LA MANÁ-ECUADOR

FEBRERO-2023

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Delgado Pullaguari Wilson Bladimir con cédula de ciudadanía 1900774041 y Uyaguari Ruiz Brayan Javier con cédula de ciudadanía 1150082590, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: “ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA”, siendo el Ing. Morales Cevallos José Williams Mg., tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maná y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



Delgado Pullaguari Wilson Bladimir
C.I. 1900774041



Uyaguari Ruiz Brayan Javier
C.I. 1150082590

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutora del trabajo de investigación sobre el título:

“ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA” de Delgado Pullaguari Wilson Bladimir y Uyaguari Ruiz Brayan Javier de la carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aporte científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del tribunal de validación de Proyecto que el Honorable Consejo Académico de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas – CIYA de la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maná designe, para su correspondiente estudio y calificación.

La Maná, diciembre del 2022

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a blue oval. The signature reads "JOSE MORALES C" with a stylized flourish at the end.

Ing. Morales Cevallos José Williams M.Sc.
C.I. 0502675424

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de lectores, aprueban el presente informe de investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi extensión La Maná, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas – CIYA por cuanto los postulantes: Delgado Pullaguari Wilson Bladimir con cédula de ciudadanía 1900774041 y Uyaguari Ruiz Brayan Javier con cédula de ciudadanía 1150082590 con el título de proyecto de investigación: “ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA”, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

La Maná, febrero del 2023

Para constancia firman:



PhD. Morales Tamayo Yoandrys

C.I. 1756958797

LECTOR 1 (PRESIDENTE)



M.Sc. Hidalgo Osorio William Armando

C.I. 0502657885

LECTOR 2 (MIEMBRO)



M.Sc. Corrales Bonilla Johnatan Israel

C.I. 0503145518

LECTOR 3 (SECRETARIO)

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer Dios, a mis padres que son los que me han ayudado y apoyado en todo mi proceso de formación académica, a mi tutor de tesis, José Morales, por haberme orientado en todo este proceso. Así mismo, deseo expresar mi agradecimiento a la emblemática UTC y a todas las autoridades, por permitirme concluir con una etapa de mi vida, gracias por la paciencia, orientación y guiarme en el desarrollo de esta investigación.

Wilson

AGRADECIMIENTO

Me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial a mi Padre que con su esfuerzo y dedicación me ayudo a culminar mi carrera universitaria y me dio el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

Brayan

DEDICATORIA

Dedico esta tesis, de manera especial a mis padres que son un pilar muy fundamental dentro de mi formación académica, quienes me enseñaron que el mejor conocimiento que se puede tener es el que se aprende por uno mismo.

Wilson

DEDICATORIA

A mi padre quien con su amor, paciencia y esfuerzo me ha permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

A mi hermano por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias. Y a toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Brayan

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS – CIYA

TÍTULO: ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

Autores:

Delgado Pullaguari Wilson Bladimir

Uyaguari Ruiz Brayan Javier

RESUMEN

El proyecto consistió en analizar el proceso de fundición del aluminio utilizando un horno de crisol compuesto en sus tres paredes laterales y una pared superior de materiales como son dos ladrillos refractarios, uno está colocado hacia la parte interior del horno, seguidamente de una manta cerámica y el otro ladrillo en la parte exterior, en la pared lateral restante se tiene la compuerta de metal y en la pared inferior se aloja el carbón vegetal usado como fuente calorífica, se realizó el análisis termodinámico mencionando que el aluminio con el crisol necesitan una cantidad de calor de 7,46 kW, las pérdidas de calor por conducción y convección en los refractarios y en la compuerta metálica dio un total de 2,54 kW, de manera que se necesitó una cantidad de 10 kW para cumplir con este proceso, se analizó el carbón vegetal con capacidad de suministrar 25 kW obteniendo un rendimiento del 60 %, se utilizó el software ANSYS para determinar la distribución de las temperaturas a lo largo del refractario, el análisis se dio por medio de la simplificación por simetría, en donde se ingresaron los valores de la temperatura interna del horno de 1149,1 K y la exterior de 330,1 K, así como también la conductividad térmica que para el ladrillo es de 0,25 W/m.K y para la manta cerámica es de 0,22 W/m.K, finalmente en el área del ladrillo interno rodea una temperatura de 1058 K, en la manta cerámica se tiene un rango entre 694 K a 512 K y para el ladrillo exterior se presenta una temperatura de 400 K.

Palabras clave: horno de crisol, aluminio, conductividad térmica, material refractario y temperatura.

ABSTRACT

The project consisted of analyzing the aluminum smelting process using a crucible furnace composed in its three side and an upper wall of materials such as two refractory bricks, one is placed in the inside of the furnace followed by a ceramic blanket and the other brick on the outside, the remaining side wall has the metal gate and the lower wallhouses the charcoal used as a heat source, the thermodynamic analysis was performed so that the aluminum with the crucible need an amount of heat of 7.46 kW, the heat losses by conduction and convection in the refractories and in the metal gate gave a total of 2.54 kW so that an amount of 10 kW was needed to fulfill this process, the charcoal with a capacity to supply 25 kW obtaining a yield of 60%, ANSYS software was used to determine the distribution of temperatures along the refractory, the analysis was given by means of simplification by symmetry, where the values of the internal temperature of the furnace of 1149.1 K and the external temperature of 330.1 K were entered, as well as the thermal conductivity that for the brick is 0.25 W/m. K, for the ceramic blanket, is 0.22 W/m.K. Finally, in the area of the internal brick has a temperature of 1058 K, the ceramic blanket has a range between 694 K to 512 K, and the external brick has a temperature of 400 K.

Keywords: crucible furnace, aluminum, thermal conductivity, refractory material, and temperature.

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal CERTIFICO que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: “ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA”, presentado por Delgado Pullaguari Wilson Bladimir y Uyaguari Ruiz Brayan Javier, egresados de la Carrera de: Electromecánica, perteneciente a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicada, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

La Maná, febrero del 2023

Atentamente,



Mg. Wendy Núñez
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI: 0925025041

ÍNDICE GENERAL

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
ÍNDICE GENERAL	xii
INDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xviii
1. INFORMACIÓN GENERAL	1
2. RESUMEN DEL PROYECTO	2
3. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
3.1. Justificación del proyecto	2
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	3
5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
5.1. Planteamiento del problema	4
5.2. Delimitación del problema	4
6. OBJETIVOS.....	5
6.1. Objetivo General.....	5
6.2. Objetivos específicos.....	5
7. ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS. 6	
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA.....	7
8.1. Antecedentes de la investigación.....	7
8.2. Fundición de metales	10
8.2.1. Historia de la fundición de metales.....	10
8.3. Horno de fundición de metales	11
8.3.1. Horno de crisol.....	11

8.3.2.	Horno Mufla	13
8.3.3.	Horno de arco eléctrico.....	13
8.4.	Material refractario	14
8.4.1.	Ladrillos refractarios.....	14
8.4.2.	Concretos refractarios	15
8.4.3.	Morteros refractarios.....	15
8.5.	Generación de calor en hornos	16
8.5.1.	Hornos mediante energía eléctrica.....	16
8.5.2.	Hornos mediante combustible	17
8.5.3.	Diferentes hornos en función de la fuente de energía.....	18
8.6.	Análisis termodinámico.....	19
8.6.1.	Balance energético.....	20
8.6.2.	Transferencia de calor.....	21
8.7.	Simulación numérica	26
9.	METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL	28
	Localización.....	28
9.1.	Tipos de investigación.....	28
9.1.1.	Investigación bibliográfica	28
9.2.	Métodos de investigación	28
9.2.1.	Método científico	28
9.2.2.	Método explicativo	29
9.2.3.	Hipótesis del proyecto	29
9.2.4.	Pregunta científica	29
9.3.	Declaración de variables.....	29
9.3.1.	Variable independiente	29
9.3.2.	Variable dependiente	30
9.4.	Descripción del horno de fundición.....	30

9.4.1.	Descripción del control de temperatura	31
9.4.2.	Descripción del crisol	33
9.4.3.	Descripción del ladrillo aislante refractario	34
9.4.4.	Descripción de la manta cerámica	35
9.4.5.	Descripción de la fuente calorífica	36
9.4.6.	Descripción de la compuerta metálica	37
9.4.7.	Descripción del metal a utilizarse	38
9.5.	Expresiones termodinámicas	39
9.5.1.	Calor que necesita el proceso.....	39
9.5.2.	Calor entregado al metal	39
9.5.3.	Calor del crisol.....	41
9.5.4.	Cantidad de calor total	41
9.5.5.	Análisis de transferencia de calor	41
9.5.6.	Cálculo del espesor del material refractario.....	43
9.5.7.	Cálculo de la transferencia de calor por conducción	44
9.5.8.	Cálculo de la transferencia de calor por convección	45
9.5.9.	Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección	45
9.5.10.	Análisis de la pérdida de calor en la cubierta de metal	47
9.5.11.	Pérdidas de calor total	48
9.5.12.	Cantidad de energía final necesaria para el horno de crisol	49
9.5.14.	Rendimiento del horno de crisol	49
9.6.	Software de simulación para temperatura nodal.....	50
10.	ANALISIS DE LOS RESULTADOS.	51
10.1.	Resolución de las ecuaciones termodinámicas	51
10.1.2.	Valor de calor para el crisol	53
10.1.3.	Cantidad de calor necesario para el proceso	54
10.1.4.	Espesor del refractario.....	55

10.1.5.	Pérdidas de calor por conducción en los materiales refractarios	56
10.1.6.	Pérdidas de calor por convección en materiales refractarios	57
10.1.7.	Pérdidas de calor por conducción en la puerta metálica	59
10.1.8.	Pérdidas de calor por convección en la puerta metálica.....	60
10.1.9.	Pérdidas de calor total	63
10.1.10.	Valor total del calor que necesita el horno con pérdidas.....	64
10.1.12.	Valor del rendimiento del horno	64
10.1.13.	Cuadro de resumen de los resultados por ecuaciones	65
10.2.	Resolución por software	66
10.2.1.	Modelado del horno de crisol.....	67
10.2.2.	Ingreso de propiedades.....	69
10.2.3.	Mallado del material aislante	70
10.2.4.	Aplicación de temperatura constante	71
10.2.5.	Solución de la simulación	71
11.	PRESUPUESTO DEL PROYECTO.....	73
11.1.	Costos directos.....	73
11.2.	Costos de mano de obra.....	73
11.3.	Presupuesto total.....	74
12.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
12.1.	Conclusiones.....	75
12.2.	Recomendaciones	76
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	77
14.	77
14.	ANEXOS	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fundición de metales	10
Figura 2 Horno de crisol.....	12
Figura 3 Horno mufla	13
Figura 4 Horno de arco eléctrico	13
Figura 5 Ladrillo refractario	15
Figura 6 Concreto refractario	15
Figura 7 Mortero refractario	15
Figura 8 Resistencia eléctrica.....	16
Figura 9 Análisis térmico en sistemas computacionales	19
Figura 10 Balance de energía del equipo	20
Figura 11 Conducción en transferencia de calor	22
Figura 12 Convección en transferencia de calor	23
Figura 13 Radiación en transferencia de calor	25
Figura 14 Simulación numérica.....	27
Figura 15 Ubicación del proyecto	28
Figura 16 Horno de crisol.....	30
Figura 17 Tablero de control	31
Figura 18 Crisol.....	33
Figura 19 Ladrillo refractario	35
Figura 20 Situación de la manta cerámica.....	35
Figura 21 Carbón vegetal	37
Figura 22 Compuerta metálica	37
Figura 23 Aluminio	38
Figura 24 Diagrama de la distribución del material refractario	42
Figura 25 Resistencias para la transferencia de calor.....	42
Figura 26 Distribución del material refractario físicamente.....	43
Figura 27 Distribución de temperaturas	47
Figura 28 Resistencias térmicas en la cubierta metálica	47
Figura 29 Resistencias térmicas en la cubierta metálica	48
Figura 30 Entorno de trabajo de Ansys	50
Figura 31 Medición de temperatura para vertido del aluminio	52
Figura 32 Calor necesario para el aluminio.....	53

Figura 33	Crisol utilizado para la fundición de aluminio.....	54
Figura 34	Medición de temperatura a la salida del material refractario.....	57
Figura 35	Medición de temperatura en la salida de la compuerta del horno.....	60
Figura 36	Distribución de las pérdidas de calor	63
Figura 37	Análisis bidimensional del horno de crisol	66
Figura 38	Creación de puntos en el plano 2D	67
Figura 39	Creación de líneas en el plano 2D.....	68
Figura 40	Creación de áreas en el plano 2D.....	68
Figura 41	Separación de espesor de los 3 tipos de materiales refractarios	69
Figura 42	Ingreso de la conductividad térmica	69
Figura 43	Definición del tipo de material	70
Figura 44	Ingreso del mallado.....	70
Figura 45	Mallado del material aislante	71
Figura 46	Temperatura constante al interior y exterior	71
Figura 47	Ingreso para la solución de la simulación	72
Figura 48	Distribución de las temperaturas nodales	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Beneficiarios del proyecto	3
Tabla 2 Actividades y sistemas de tareas en relación a los objetivos.....	6
Tabla 3 Tipos de horno de crisol	12
Tabla 4 Solicitaciones de los materiales refractarios.....	14
Tabla 5 Tipo de combustible	17
Tabla 6 Tipo de combustible	18
Tabla 7 Ventajas y desventajas de una simulación numérica.....	27
Tabla 8 Variable independiente	29
Tabla 9 Variable dependiente	30
Tabla 10 Características técnicas del horno	31
Tabla 11 Características del control de temperatura.....	32
Tabla 12 Descripción de los elementos	33
Tabla 13 Características técnicas del crisol.....	34
Tabla 14 Características técnicas del ladrillo refractario.....	34
Tabla 15 Características técnicas de la manta cerámica.....	36
Tabla 16 Características técnicas del ladrillo refractario.....	36
Tabla 17 Características técnicas de la compuerta metálica.....	37
Tabla 18 Propiedades físicas del aluminio	38
Tabla 19 Propiedades temperatura de 40 °C	57
Tabla 20 Propiedades del aire a la temperatura pelicular de 111,5 °C.....	61
Tabla 20 Resumen de los resultados por ecuaciones.....	65
Tabla 22 Costos indirectos	73
Tabla 23 Costos directos.....	73
Tabla 24 Costos directos.....	73
Tabla 25 Presupuesto anual	74

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (1).....	21
Ecuación (2).....	21
Ecuación (3).....	23
Ecuación (4).....	24
Ecuación (5).....	25
Ecuación (6).....	39
Ecuación (7).....	39
Ecuación (8).....	40
Ecuación (9).....	40
Ecuación (10).....	40
Ecuación (11).....	41
Ecuación (12).....	41
Ecuación (12).....	43
Ecuación (13).....	43
Ecuación (14).....	44
Ecuación (15).....	44
Ecuación (16).....	44
Ecuación (17).....	45
Ecuación (18).....	45
Ecuación (19).....	46
Ecuación (20).....	46
Ecuación (21).....	46
Ecuación (22).....	48
Ecuación (23).....	49
Ecuación (24).....	49
Ecuación (25).....	49

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

“ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA”

Fecha de inicio:	Noviembre del 2022
Fecha de finalización:	Febrero del 2023
Lugar de ejecución:	Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná
Unidad académica que auspicia:	Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas CIYA
Carrera que auspicia:	Ingeniería Electromecánica
Proyecto de investigación vinculado:	La transferencia tecnológica sustentable como eje fundamental para el desarrollo socio económico y la vinculación social.
Tutor del Proyecto:	Ing. Morales Cevallos José Williams
Postulante:	Sr. Delgado Pullaguari Wilson Bladimir Sr. Uyaguari Ruiz Brayan Javier
Área de conocimiento:	Ingeniería, Industria y Construcción
Línea de investigación:	Procesos Industriales
Sub líneas de investigación de la carrera:	Diseño, construcción y mantenimiento de elementos, prototipos y sistemas electromecánicos.
Núcleo Disciplinar:	Desarrollo de tecnología y procesos de fabricación.

2. RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto consistió en analizar el proceso de fundición del aluminio utilizando un horno de crisol compuesto en sus tres paredes laterales y una pared superior de materiales como son dos ladrillos refractarios, uno está colocado hacia la parte interior del horno, seguidamente de una manta cerámica y el otro ladrillo en la parte exterior, en la pared lateral restante se tiene la compuerta de metal y en la pared inferior se aloja el carbón vegetal usado como fuente calorífica, se realizó el análisis termodinámico mencionando que el aluminio con el crisol necesitan una cantidad de calor de 7,46 kW, las pérdidas de calor por conducción y convección en los refractarios y en la compuerta metálica dio un total de 2,54 kW, de manera que se necesitó una cantidad de 10 kW para cumplir con este proceso, se analizó el carbón vegetal con capacidad de suministrar 25 kW obteniendo un rendimiento del 60 %, se utilizó el software ANSYS para determinar la distribución de las temperaturas a lo largo del refractario, el análisis se dio por medio de la simplificación por simetría, en donde se ingresaron los valores de la temperatura interna del horno de 1149,1 K y la exterior de 330,1 K, así como también la conductividad térmica que para el ladrillo es de 0,25 W/m.K y para la manta cerámica es de 0,22 W/m.K, finalmente en el área del ladrillo interno rodea una temperatura de 1058 K, en la manta cerámica se tiene un rango entre 694 K a 512 K y para el ladrillo exterior se presenta una temperatura de 400 K.

Palabras clave: horno de crisol, aluminio, conductividad térmica, material refractario y temperatura.

3. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Justificación del proyecto

Por medio del presente proyecto se promueve el desarrollo de tecnologías y procesos permitiendo mejorar el rendimiento productivo y la transformación de materias primas en productos de alto valor añadido, formando una producción industrial más limpia y el diseño de nuevos sistemas de producción industrial. Adicional dentro de las sublíneas de investigación que otorga la Carrera de Ingeniería Electromecánica está presente en la primera que menciona el “Diseño, construcción y mantenimiento de elementos, prototipos y sistemas electromecánicos”

Para el sector de manufactura es fundamental cumplir con las expectativas y satisfacciones de los compradores, para lo cual, es necesario profundizar en el estudio técnico de los procesos de

fundición de metales con la finalidad de obtener un producto de excelente calidad, en la actualidad se utilizan diferentes tipos de hornos para llevar a cabo este proceso, pero el más utilizado por su facilidad de manejo y economía son los famosos hornos de crisol, en donde el metal no está directamente en contacto con la fuente de generación de calor.

Los avances tecnológicos dentro de la industria y los procesos electromecánicos tienen relación en la recepción de información y el desarrollo de modelos matemáticos que predicen el comportamiento de los diferentes fenómenos físicos con mejor precisión y mayor eficacia mediante el uso de software computacionales impulsando los avances científico-técnicos dentro de la ingeniería, así como la distribución de las temperaturas nodales a lo largo de las paredes del horno de crisol utilizado en el proceso de fundición de metales que es el objeto de estudio de esta investigación.

Dentro de la parte legal, esta investigación se valida mediante la Constitución Nacional del Ecuador, especialmente en el artículo 334 en donde menciona que es necesario impulsar y apoyar al desarrollo y la difusión de conocimientos y tecnologías que tengan relación a los procesos de producción, de igual manera en el artículo 385 indica la importancia de generar tecnologías computacionales que impulsen a la producción nacional, contribuyendo a la realización del buen vivir, finalmente en el artículo 386 el estado aprueba la participación de universidades y escuelas politécnicas, institutos de investigación públicos y particulares a la realización de actividades de investigación, desarrollo tecnológico, innovación y aquellas ligadas a los saberes ancestrales.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

A continuación, en la tabla 1 se presentan los beneficiarios directos e indirectos del proyecto de investigación.

Tabla 1 Beneficiarios del proyecto

Beneficiarios directos	Beneficiarios indirectos
Estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión “La Maná”	Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión “La Maná” Empresas que se dedican al proceso de fundición de metales

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

5. EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

5.1. Planteamiento del problema

Los procesos de fundición de metales tienen la capacidad de fabricar piezas u objetos de difícil construcción, con medidas exactas y diferentes tipos de propiedades en función del metal utilizado, siendo útil dentro del sector de la Ingeniería Electromecánica y de gran importancia en el sector manufacturero. La variable fundamental dentro de estos procesos es la temperatura, esta variable cumple la función de realizar un cambio de fase de estado sólido a líquido, la cantidad de temperatura va a depender del tipo de metal que se vaya a utilizar, a lo que se denomina temperatura de fusión. Existen diferentes formas de generar calor, como, por ejemplo; mediante la electricidad, utilizando hidrocarburos, combustibles sólidos, entre otros.

Para llevar a cabo estos procesos de fundición de metales, es necesario contar con un horno de crisol. Este tipo de hornos permite que la fuente de generación de calor no incida directamente sobre el metal provocando una desuniformidad en su fundición, otra característica que posee es que son relativamente económicos.

Para el desarrollo de esta investigación, se va a utilizar un horno de crisol con las siguientes características principales: una cámara de combustión de 50 x 50 x 50 cm, material refractario utilizado como aislante térmico y un control de temperatura on/off, para desarrollar el proceso de fundición de metales, específicamente del aluminio, se desconoce la cantidad de calor que necesita el horno de crisol, considerando las pérdidas de calor por los materiales refractarios utilizados y su construcción, que inciden directamente en el rendimiento de este horno, finalmente es necesario conocer cómo se encuentran distribuidas las temperaturas nodales a lo largo de las paredes del horno, mediante un análisis termodinámico considerando una simulación por software.

5.2. Delimitación del problema

El desconocimiento de los parámetros térmicos en el proceso de fundición de metales y el comportamiento termodinámico en las paredes del horno de crisol.

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo General

Analizar el proceso termodinámico de fundición de metales en un horno de crisol mediante una simulación numérica para visualizar la distribución de las temperaturas nodales en las paredes del horno

6.2. Objetivos específicos

- Describir el estado del arte que relaciona el proceso de fundición de metales mediante un estudio técnico para la obtención de datos relevantes.
- Calcular la cantidad y las pérdidas de calor del horno de crisol en el proceso de fundición del aluminio mediante el empleo de expresiones matemáticas.
- Determinar la distribución de la temperatura nodal en las paredes del horno de crisol por medio de un software de simulación.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS.

Tabla 2 Actividades y sistemas de tareas en relación a los objetivos

Objetivos	Actividades	Resultados de las actividades	Descripción (técnicas e instrumentos)
Describir el estado del arte que relaciona el proceso de fundición de metales mediante un estudio técnico para la obtención de datos relevantes.	<p>Recolección de datos e información técnica en proyectos de titulación, artículos científicos, entre otros.</p> <p>Desarrollo del estado del arte con la obtención de la información técnica del proceso de fundición de metales</p>	Marco teórico con la obtención de la información técnica acerca del proceso de fundición de metales mediante un horno de crisol.	Investigación bibliográfica
Calcular la cantidad y las pérdidas de calor del horno de crisol en el proceso de fundición del aluminio mediante el empleo de expresiones matemáticas..	<p>Procedimiento de selección de los parámetros térmicos del proceso de fundición de metales</p> <p>Identificación de expresiones matemáticas relacionadas con la termodinámica</p> <p>Verificación de los resultados de las expresiones matemáticas.</p>	Informe térmico acerca de la cantidad y pérdidas de calor en el proceso de fundición del aluminio utilizando el horno de crisol.	<p>Investigación bibliográfica</p> <p>Investigación de campo</p> <p>Ecuaciones</p>
Determinar la distribución de la temperatura nodal en las paredes del horno de crisol por medio de un software de simulación.	<p>Medición de la variable temperatura dentro del horno de crisol.</p> <p>Uso del software de simulación en el horno de crisol.</p>	Informe y registro fotográfico de la distribución nodal en las paredes del horno de crisol.	<p>Investigación de campo</p> <p>Software</p>

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA.

8.1. Antecedentes de la investigación

Dentro de la literatura que se relaciona con el análisis termodinámico del proceso de fundición en un horno de crisol mediante simulación numérica se tienen los siguientes trabajos investigativos.

En el proyecto de titulación de (Vallejo, 2013) denominado “Simulación de fundición por ordenador mediante QuikCAST”, realizado en la Universidad de Zaragoza – España manifiesta lo siguiente:

- Se desarrolló una guía práctica para el uso y aprendizaje del programa para simulación, en donde primeramente se debe elaborar una pieza tridimensional en cualquier programa CAD. La metodología que utilizó fue de tipo cuantitativa, utilizando una investigación de campo y una investigación experimental, esto se debió a que se trabajaron con valores matemáticos y estadísticos con la finalidad de demostrar el proceso físico-térmico que incide en la fundición del aluminio. El software QuikCAST es una herramienta computacional que tiene la capacidad de realizar modelaciones y simulaciones, por medio de la extensión “STL” cualquier pieza tridimensional se puede evaluar el comportamiento del proceso metalúrgico, así como establecer los parámetros de tiempo y temperatura a través de una interfaz mostrando interactividad a la simulación y apoyando la oportunidad de abastecer diferentes eventos y condiciones del objeto de fundición. El investigador destacó entre sus principales resultados el uso de una aleación de aluminio AlSi7Mg obteniendo una mayor eficiencia al trabajar a una temperatura de 610 °C con un flujo másico de llenado del molde de 0,007 Kg/s, esto conllevó a la obtención de una óptima temperatura y un flujo másico ideal de llenado de la pieza o molde receptor de la colada de esta aleación.

Según (Huaca, 2011) dentro de su proyecto de investigación denominado “Desarrollo de una simulación utilizando el software VULCAN para la fundición de tres geometrías distintas en aluminio”, realizado en la Escuela Politécnica Nacional – Ecuador indica lo siguiente:

- Los resultados que se obtuvieron en el software “Vulcan” pueden ser analizados solamente si se mantienen constante tres parámetros de gran importancia: la composición de la arena, temperatura y composición de colado, y las condiciones de entrada del material, el análisis de los elementos fundidos difirieron con los resultados

obtenidos en la simulación de Vulcan con un 25% de error aproximadamente, siendo aceptable porque existieron variables que fueron distintas a las condiciones reales al momento de desarrollar la fundición como: la composición de la aleación, composición de la arena de moldeo y la velocidad de verti-colado. Finalmente, el uso de un software de simulación representa un ahorro en el costo de ingeniería y el tiempo de diseño del producto al ofrecer una disminución en la realización de pruebas de certificación de calidad (radiografía, partículas magnéticas, metalografías) y en la construcción de prototipos para la evaluación experimental, así como la facilidad de implementar y evaluar los cambios de ingeniería. El análisis por el método de los elementos finitos del fenómeno de solidificación permitió obtener la información necesaria para explorar las diferentes posibilidades en el diseño del sistema de alimentación y la ubicación de mazarotas.

En la investigación de (Pando & Zapatán , 2012) denominado “Desarrollo del análisis que involucra al aluminio y su proceso de fundición con una propuesta de elevar su eficiencia en la empresa PRESS FORJA S.A”, desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador menciona lo siguiente:

- Se analizó el proceso de fundición de aluminio con la finalidad de eliminar o disminuir defectos que se presentan en las mismas, a partir de datos estadísticos partió la investigación, en donde se incluyeron datos de producción, fichas de maquinaria, diagramas, materia prima, insumos, FODA, identificación de defectos y falencias en el proceso. Se planteó la mejora de la maquinaria existente por lo que mediante un análisis de la transferencia de calor, se dio a conocer la importancia por la cual un horno de fusión debe tener una tapa que impida el contacto directo de la colada con el aire, esto generaba una gran cantidad de pérdidas en el balance energético del horno, esto se reflejaba en el consumo excesivo de combustible, para lo cual se propuso la implementación de una tapa refractaria para el horno, en donde de manera teórica ahorrará la cantidad de un cilindro de gas por día, reduciendo esta pérdida en un 54%. Adicional se propuso la implementación de un controlador de temperatura que garantizará una adecuada temperatura de fusión para inyectar, la misma que es de 600 a 660°C, finalmente el desgasificador eliminará porosidades de la colada en el horno, la cual según los porcentajes correctos se puede modificar para que tenga una mayor cantidad de propiedades al momento de inyectar.

En el proyecto de titulación de (Hernández, 2019) denominada “Desarrollo del análisis utilizando un ordenador acerca del proceso de fundición de metales y la selección de materiales para realizar un diseño de armadura denominado Plenum del Gulfstream V”, realizado en el Centro de Enseñanza Técnico Superior – México manifiesta lo siguiente:

- En este trabajo se involucró la clasificación de materiales que fueron usados para diseño moderno del plenum del Gulfstream V (avión de negocios de gran tamaño), se utilizó una metodología relacionada con una investigación bibliográfica para constatar las propiedades de carácter físico, mecánico, térmico y las condiciones de estabilidad acerca del material, uno de los materiales seleccionados fue el Aluminio A332 y el Magnesio QE22A por la capacidad de resistencia a elevadas velocidad y presiones. Se utilizó un software de simulación “Investment Casting” en el que se validó la información de varios materiales para la construcción de la cubierta del avión, este software facilita una interfaz que demuestra la selección del material más apropiado para este tipo de utilidad.

En el artículo científico de (Amaury, Calzada, Morales, Hernandez, & García , 2022) denominado “Desarrollo numérico mediante un análisis de validación de tipo experimento para demostrar el vertido en un molde que es elaborado con arena” indica lo siguiente:

- El proceso de fundición de metales mediante el método de vaciado de metal en moldes de arena es un método que fue usado durante la antigüedad, consiste en que un diseñador tiene la facilidad de elegir la forma y el tamaño, por lo tanto, el proyecto consta en que se determine una simulación de tipo numérica que contiene un estudio de los efectos que provoca los rodamientos de la grada de 120 kg. En esta oportunidad se ejecutó un método de elementos finitos con normativas de temperatura en los distintos puntos como son: vertido del metal fundido, precalentamiento del molde y adición se analizó la velocidad de llenado, estas variables fueron registrados durante el trabajo de tipo experimento ejecutado en el proceso. Utilizando el software de simulación SolidWorks se realizó el método de MEF, en donde se determinó las variables en magnitud y localización que tuvo la pieza considerando efectos mecánicos de tipo sopladura, porosidad y unión fría, dentro de esta parte se ejecutó una correspondencia en cuanto a su lugar de origen, considerando la simulación se puede mencionar que los errores que arroja el software tiene un porcentaje de error, es decir del 10%.

8.2. Fundición de metales

La fundición es el proceso con mayor antigüedad muy utilizado al momento de dar una forma deseada a los metales. Propiamente este proceso consiste en fundir y colar el metal líquido en un molde que tenga la forma y tamaño esperado para que posteriormente se solidifique. Generalmente el molde se suele hacer en arena y se debe consolidar el proceso mediante una compactadora alrededor de este molde, el tamaño de las piezas a elaborarse no tiene limitaciones, estas pueden ser desde una prótesis dental hasta un bastidor de una maquinaria. Existen piezas que solamente se fabrican fundiendo en un molde, es decir no necesitan de otros procesos como como la forja, la laminación, soldadura, entre otros. En la figura 1 se puede observar a un operador realizando el proceso de fundición de metales.

Figura 1 Fundición de metales



Fuente: (TORRENT, 2020)

La posibilidad de fundir un metal o una aleación de la misma va a depender de varios factores como: la composición, la fusión en forma de temperatura y la variable tensión superficial que contiene el aluminio fundido, lo antes mencionado pueden considerar la fluidez. Se determina que los tipos de fundición hay demasiados, pero el más utilizado en la industria metalúrgica es mediante el uso de moldes, en el que menciona la obtención de un producto, introduciendo metal en estado líquido en un recipiente con la forma adecuada, llamado molde, este recipiente puede ser de arena o también puede ser metálico. (Reremsa, 2020).

8.2.1. Historia de la fundición de metales

La historia comienza en lo años antes de cristo, una persona moldeaba con facilidad un pedazo de roca brillante de color rojo mediante golpes sin conocer que se trataba de un material metálico (cobre), en esos tiempos estas piedras brillantes con una variedad de colores eran

utilizadas de adorno para viviendas, posteriormente cuando se descubrió el fuego, estas piedras (metales) eran colocadas al interior y alrededor de la fogata logrando su fundición, las cenizas de este material sólido relativamente plástico, que se dejaba formar a través de golpes, hoy por hoy este proceso es denominado como “forja”, de esta manera el hombre descubrió la necesidad de utilizar fuego para la elaboración de cualquier tipo de instrumento y herramienta.

Tuvieron que pasar varios años para deducir e innovar el desarrollo de materiales metálicos en donde era su principal aliado era y sigue siendo el calor a elevadas temperaturas, estos metales ya los colocaban en recipientes de barro y/o rocas para concentrar el calor en un solo punto, de allí nació el primer horno de fundición metalúrgico, en donde, la primera fuente para generar calor fue la madera, aunque con dificultad llegaba a las temperaturas necesarias.

Con los avances de la época, los materiales metálicos que elaboraban no eran lo suficientemente resistentes para las actividades que necesitaban, por lo tanto, surge la necesidad de investigar la fusión de metales con el objetivo de que sean más resistentes y tengan un desempeño mejor de las herramientas, utensilios y armas, en la actualidad la fusión de metales es conocido como aleaciones. (Vega Cardenal, 2021, pág. 20)

8.3. Horno de fundición de metales

Los hornos utilizados para la fundición de metales y aleaciones son equipos en donde se desarrolla el proceso de calentamiento y fusión del metal, estas temperaturas pueden variar dependiendo al tipo de metal a fundir, también existen hornos diseñados en función de la cantidad de metal a ejecutar que va desde mínima cantidad de kg hasta grandes cantidades de toneladas, además estos pueden ser de tipo estacionarios o móviles, y también son de tipo energético es decir depende de su fuente de energía que generalmente son de combustibles o energía eléctrica. (Alvarez & Quimi, 2020, pág. 4)

En la siguiente parte, se presentan los diferentes tipos de hornos que son muy usados dentro en la industria de la fundición de metales.

8.3.1. Horno de crisol

El horno de crisol viene siendo el horno con mayor uso en toda la historia de la metalurgia, de manera actual aún se sigue utilizando debido a fácil manipulación y costo inicial barato, estos hornos se emplean a menudo para realizar el proceso de fundición de aleaciones no ferrosas basadas en aluminio, zinc y cobre. Una de las cualidades principales es que el metal a fundir no está en contacto directo con la fuente de calor, porque este metal es depositado en un contenedor

denominado “crisol” (de ahí el nombre) que tiene la función de calentarse y transferir calor necesario para fundir el metal. Generalmente, los crisoles se fabrican con materiales refractarios como mezclas de arena y grafito, o aleaciones de acero de alta resistencia térmica con el fin de mantener el calor. (Alvarez & Quimi, 2020, pág. 4). En la figura 2 se observa un horno de crisol.

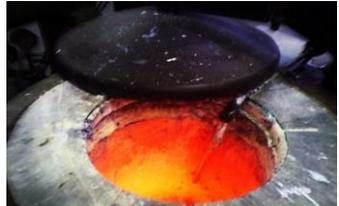
Figura 2 Horno de crisol



Fuente: (HONGXING, 2020)

En la tabla 3 se puede observar un cuadro conceptual con su respectiva imagen de los tipos de horno de crisol.

Tabla 3 Tipos de horno de crisol

Tipo de horno de crisol	Definición	Imagen
Móvil	Consisten en un crisol extraíble dentro del horno, para una vez obtenida la fundición poder realizar el vertido en el molde.	
Fijo o estacionario	Se caracterizan por mantener el crisol integrado al horno y utilizan un cucharón para retirar el metal fundido	
Basculante o de volteo	son similares a los de crisol fijo con la diferencia de contar con mecanismo de inclinación para verter la fundición y son utilizados para procesar grandes cantidades de metal.	

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

8.3.2. Horno Mufla

Este tipo de horno es destinado normalmente para la fundición de metales a través de la energía térmica, consta de una parte interior construida con componentes incombustibles que son los ladrillos refractarios. En la parte superior se ubica un agujero por donde salen los gases de la cámara interna, las paredes están hechas de placas de materiales térmicos y aislantes. Generalmente es utilizado cuando se requiere alcanzar temperaturas mayores a 200 °C hasta los 1200 °C aproximadamente. En la figura 3 se puede observar el horno de mufla. (Vega Cardenal, 2021, pág. 18)

Figura 3 Horno mufla

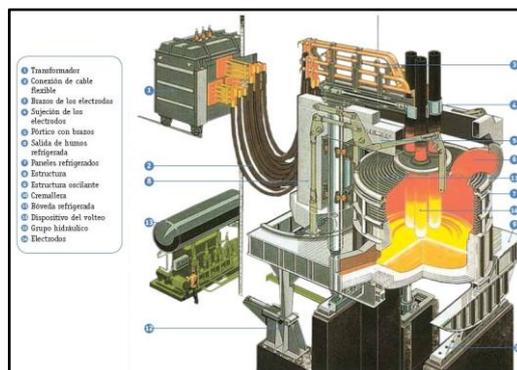


Fuente: (Arellano, 2017)

8.3.3. Horno de arco eléctrico

Este tipo de horno es utilizado para la fundición de aleaciones ferrosas por la gran cantidad de temperatura que genera alcanzando los 4000 K, este tipo de hornos son realizados para fundir una cantidad extensa de material metálico, alrededor de (20 a 75 tone/ho) en lo que consume una gran cantidad de energía. Generalmente son de tipo basculante por su capacidad. Utiliza la electricidad para generar un arco eléctrico y de esta manera generar calor para cumplir con su proceso como se ilustra en la figura 4. (Alvarez & Quimi, 2020, pág. 6)

Figura 4 Horno industrial de arco eléctrico



Fuente: (Carrizosa Isaza, 2017)

8.4. Material refractario

Estos materiales están expuestos a elevadas temperaturas (superiores a 1200 °C) durante un tiempo determinado sin que tengan alguna variación en sus propiedades químicas y físicas, por tal razón, son muy utilizados en hornos para la fundición de metales y aleaciones son equipos para cumplir correctamente el proceso de calentamiento y fusión. (Coinref, 2020)

Dentro del estudio de los materiales refractarios existen las solicitaciones que se refieren a las reacciones internas que se produce en una sección del refractario como consecuencia de la aplicación de calor, en la tabla 4 se presentan las solicitaciones más importantes de estos materiales.

Tabla 4 Solicitaciones de los materiales refractarios

Solicitud térmica	Solicitud mecánica	Solicitud química
Refractariedad	Resistencia a la compresión en frío	Resistencia a las escorias
Dilatación térmica	Resistencia a la flexión	Permeabilidad a los gases
Variación lineal permanente	Resistencia al desgaste	Efecto monóxido de carbono (400 – 500 °C)
Choque térmico	Porosidad	Efecto metano (>900°C)
Conductividad térmica	Densidad	Atmósfera reductora y oxidante

Fuente: (López, 2018)

Dentro de los materiales refractarios con mayor aplicación se tienen los siguientes:

8.4.1. Ladrillos refractarios

Se utilizan para revestir hornos crematorios, hornos rotatorios, calderas, hornos de fundición y hornos de tratamiento térmico. A continuación, se enlistan los diferentes tipos de ladrillos refractarios:

- Ladrillo Refractario Canto
- Ladrillo Refractario Círculo
- Ladrillo Refractario Cuña

- Ladrillo Refractario Punta
- Ladrillo Refractario Rectangular
- Ladrillo Refractario Salmer
- Ladrillo Refractario Teja y Jamba

Figura 5 Ladrillo refractario



Fuente: (Coinref, 2020)

8.4.2. Concretos refractarios

Son mezclas secas tecnológicamente formuladas a base de materias primas refractarias, cuidadosamente seleccionadas y agentes ligantes de fraguado hidráulico. Se utilizan para la fabricación de piezas especiales o piezas monolíticas y en hornos rotatorios, hornos de tratamiento térmico, tapas de hornos de inducción y calderas. (Ratsa, 2018)

Figura 6 Concreto refractario



Fuente: (Coinref, 2020)

8.4.3. Morteros refractarios

Los morteros refractarios son agentes refractarios ligantes, constituidos por una mezcla de compuestos refractarios finamente molidos, con agregados de otras sustancias que pueden no ser refractarias y que en estado húmedo se utilizan para adherir ladrillos o piezas refractarias. (Ratsa, 2018)

Figura 7 Mortero refractario

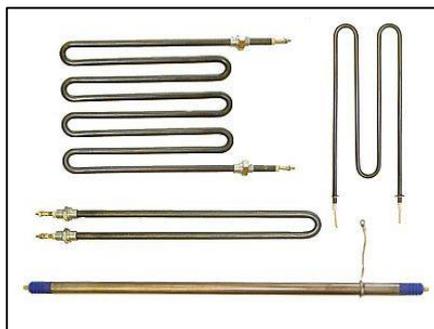
Fuente: (Coinref, 2020)

8.5. Generación de calor en hornos

Los hornos para la fundición de metales o aleaciones pueden utilizar combustibles o energía eléctrica para cumplir con el proceso de calentamiento y fusión. Dentro de la generación de calor mediante la energía eléctrica son muy comunes los de resistencia y de inducción, por otra parte, cuando se usan combustibles pueden ser de diferentes formas detalladas en la tabla 5. El diseño para su selección va a depender de la calidad que se exija a la masa fundida, la cantidad de producción y la eficiencia energética, adicional es necesario considerar el aspecto económico según los niveles locales. Cada forma de generación de calor (eléctrico/combustible) tiene sus ventajas y desventajas que deben ser aprovechadas o evitadas de acuerdo con las condiciones de producción exigidas. (Maldonado Cañamar, 2022, pág. 10)

8.5.1. Hornos mediante energía eléctrica

Cuando se utiliza la energía eléctrica, la regulación de este medio pausada y precisa, además que no se tiene riesgos de contaminación, tiene la capacidad de lograr un 72 % adicional de potencia vs un horno que tiene combustible. En la figura 8 se puede observar una resistencia eléctrica como ejemplo de este tipo de fuentes de generación de calor.

Figura 8 Resistencia eléctrica

Fuente: (Resistencias Tope, 2017)

8.5.2. Hornos mediante combustible

Este tipo de generación de calor es idóneo para el servicio de fundición previa, especialmente cuando cuentan con evacuación de gases de combustión a través del borde del crisol, cuando se persigue una alta cantidad de la masa fundida, es aconsejable usar una evacuación lateral de los gases de combustión. (Gómez Alencastro, 2018, pág. 15). En la tabla 5 se presenta los combustibles en estado sólido, líquido y gaseoso con su respectivo poder calorífico.

Tabla 5 Tipo de combustible

Tipo de Combustible	Ejemplo del tipo de combustible	Poder calorífico
Sólido	Leña	3800 kcal/kg
	Carbón mineral	4000 a 6000 kcal/kg
	Carbón vegetal	3500 a 7000 kcal/kg
Líquido	Gasolina	10200 kcal/kg
	Diesel	11000 kcal/litro
	Alcohol etílico	7300 kcal/kg
Gaseoso	Gas natural	10000 kcal/kg
	Gas de coque	4500 kcal/kg
	Gas licuado	10900 kcal/kg

Fuente: (Escobar Ruiz, 2021)

El poder calorífico de cada tipo de combustible mencionado en la tabla anterior es definido como la cantidad de calor que se obtiene de la oxidación completa, a presión atmosférica, de los componentes de la unidad de masa (o volumen) de dicho combustible. Su unidad se mide en función de la unidad de masa o unidad de volumen de combustible que se ha oxidado (quemado). Cuanto mayor sea el poder calorífico de un combustible, menor cantidad de éste utilizaremos. Es por esta razón por la que es importante la calidad de un gas en relación a los costes energéticos.

Se puede distinguir de dos tipos:

- Poder calorífico superior (PCS): El poder calorífico superior es el que viene definido cuando todos los elementos que participan en la combustión (combustible y oxígeno) se

toman a 0°. De la misma manera, los gases que resultan de la combustión también se llevan a 0°. Así, el PCS puede aprovechar la energía de la condensación del agua, generando más calor con menor cantidad de combustible. El PCS también se denomina poder calorífico neto. Para poder aprovechar el PCS se necesitan unas calderas especiales: las calderas de condensación.

- Poder calorífico inferior (PCI): El poder calorífico inferior es, por otro lado, el calor de la combustión que no aprovecha la energía de condensación del agua, al no producirse cambio de fase en la materia.

8.5.3. Diferentes hornos en función de la fuente de energía

En la tabla 6 se puede apreciar los diferentes hornos de fusión para las diferentes aplicaciones según el tipo de aleaciones y la fuente de energía

Tabla 6 Tipo de combustible

Fuente de energía	Forma de la fuente de energía	Aleaciones	Tipo de horno
Carbón	Bituminoso en polvo	Fierros fundidos	Llama directa
	Antracita	Fierros fundidos	Cubilote
Coque	Tamaño medio	No ferrosos, hierro, acero	Cubilote Horno de crisol
Petróleo	Diesel o residual	No ferrosos, hierro, acero	Horno de crisol Horno de hogar
Gas	Gas licuado de petróleo	No ferrosos, hierro, acero	Horno de crisol Horno de hogar
	Gas natural		
Electricidad	Arco directo	Acero, fierros fundidos	Horno de arco
	Resistencia	No ferrosos	Horno de resistencia
	Inducción	Todos los metales	Horno de inducción

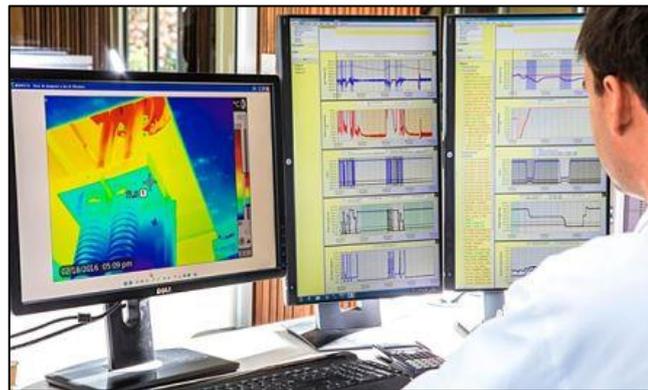
Fuente: (Escobar Ruiz, 2021)

8.6. Análisis termodinámico

El criterio termodinámico se ocupa de estudiar los diferentes procesos y propiedades de la materia en función de la cantidad de calor y temperatura. Se trata de los cambios de un sistema, desde unas condiciones iniciales hasta otras condiciones finales, debido a la desestabilización del sistema. Existen diversas variables termodinámicas que son utilizadas, estas son: masa, volumen, densidad, presión y temperatura. (LLanez & Jami Jami, 2018)

Dentro de la parte térmica, se utilizó un análisis como herramienta para el control de calidad desde varios años atrás en las fábricas donde se realiza el proceso de fundición de aluminio, de manera actual se ha utilizado con mayor frecuencia el uso de simuladores computacionales para mejorar su precisión.

Figura 9 Análisis térmico en sistemas computacionales



Fuente: (Díaz Ibarra, 2011)

Los parámetros de temperaturas (variable de la termodinámica) en los hornos de crisol no son fáciles de medirlas superficiales en la práctica para poder determinarlas ya que, estas no son iguales a la temperatura del aire o gas en contacto con la superficie y varían considerablemente. Se determina la temperatura exterior de las capas superficiales de las paredes pueden variar sustancialmente con respecto a la temperatura del aire y es la temperatura de la capa de la pared interior que frecuentemente es inferior a la temperatura en la cámara de combustión. (Téllez Martínez & Vergara Hernández, 2021) Los parámetros que se toman en cuenta son:

- Temperatura exterior
- Temperatura de fusión
- Temperatura de calentamiento
- Capacidad del horno
- Temperatura de vertido

8.6.1. Balance energético

El balance energético de un horno varía fundamentalmente de un horno continuo a uno intermitente. En los hornos continuos interviene la producción en kg/h o en tn/h, mientras que en los intermitentes es más importante la carga introducida en cada operación en kg o tn. La temperatura en los hornos continuos es prácticamente constante en cada zona a lo largo del tiempo, y la temperatura de la carga varía a lo largo del horno desde la entrada hasta la salida.

En los hornos intermitentes la temperatura de la carga varía a lo largo del tiempo, pero se mantiene en todo el horno en un instante dado. En los hornos intermitentes deben distinguirse lo siguiente: (González Sánchez, 2018)

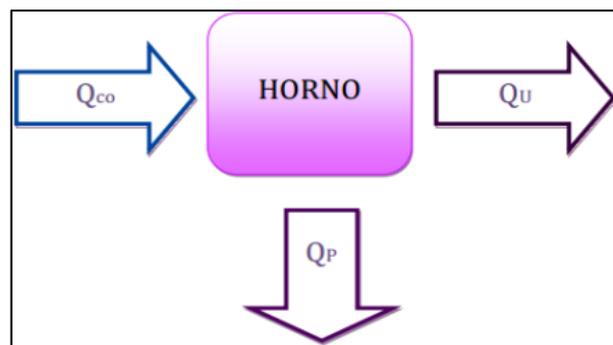
- Los procesos en los que la temperatura de regulación del horno permanece prácticamente constante.
- Los procesos en los que la temperatura del horno sigue un ciclo de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento sin extraer la carga del interior del horno.

Debe aclararse que el concepto de temperatura del horno es bastante convencional:

- Los elementos calefactores (llamas o resistencias eléctricas) tendrán la mayor temperatura.
- La carga, incluso al final del periodo de calentamiento, estará a menor temperatura.
- El revestimiento tendrá probablemente, una temperatura mayor a la de la carga e inferior a la de los elementos calefactores.

De la ley de la conservación de la energía, se afirma que el calor liberado por el combustible en un horno es igual a la suma del calor necesario para el proceso de calentamiento, más las pérdidas de calor que tengan lugar en el horno como se puede observar en la ecuación (1) (Incropera, 2002)

Figura 10 Balance de energía del equipo



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

$$Q_{co} = Q_U + Q_P \quad \text{Ecuación (1)}$$

En donde:

- Q_{co} = Calor liberado por el combustible [kcal/h]
- Q_U = Cantidad de calor perdido en el horno [kcal/h]
- Q_P = Cantidad de calor útil para la cocción [kcal/h]

8.6.2. Transferencia de calor

El calor es la forma de energía que tiene la capacidad de transferir de un sistema a otro sistema obteniendo un resultado que se cómo diferencia de temperatura, este estudio está enfocado a la determinación de las velocidades de esa transferencia, lo que se conoce como transferencia de calor. Dicho de otra manera, la transferencia de calor es el proceso de intercambio de energía calorífica entre distintos cuerpos, o entre las diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. (Marcillo, 2020, pág. 5)

La cantidad de energía calorífica dentro de un sistema que desarrolle algún proceso, desde un estado de equilibrio a otro, se puede determinar con la aplicación del análisis termodinámico, pero, la termodinámica no indicará cuánto tiempo transcurrirá. Dentro de la ingeniería se tiene un gran interés en hallar la velocidad con la que ocurre la transferencia de calor, como se mencionaba, la termodinámica trata de estados de equilibrio y de los cambios desde un estado de equilibrio hacia otro.

- Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica relaciona el trabajo y el calor transferido intercambiado en un sistema a través de una nueva variable termodinámica, la energía interna, como dice el dicho de ingeniería “la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma”, esta ley es conocida como la ley de la conservación de la energía. (Incropera, 2002)

$$\Delta U = Q - W \quad \text{Ecuación (2)}$$

En donde:

- ΔU = Cambio de la energía interna [J]
- Q = Calor añadido al sistema [J]
- W = Trabajo efectuado por el sistema [J]

- Segunda ley de la termodinámica

En la segunda ley se requiere que el calor se transfiera en la dirección de la temperatura decreciente. Como se mencionaba, el requisito básico para la transferencia de calor es la presencia de una diferencia de temperatura, esta diferencia de temperatura es la fuerza impulsora para la transferencia de calor.

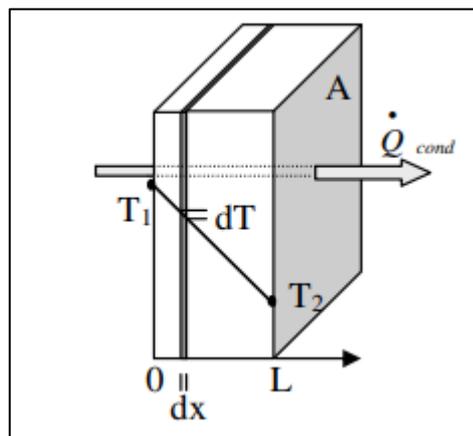
8.6.2.1. Formas de transferencia de calor

El calor tiene la capacidad de transferir en tres modos diferentes: conducción, radiación y convección. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren desde el medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

- **Conducción**

La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio, en los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas, ubicadas en posiciones más o menos fijas de una red cristalina y al transporte de energía por parte de los electrones libres. (Ratsa, 2018)

Figura 11 Conducción en transferencia de calor



Fuente: (Reremsa, 2020)

El gradiente de velocidad para la conducción de energía calorífica depende de la figura, del espesor y del tipo de material que está fabricado, así como de la diferencia de temperatura a través de él. Se sabe que al envolver un tanque de agua caliente con fibra de vidrio (un material aislante) se reduce la velocidad de la pérdida de calor de ese tanque. Cuanto más grueso sea el

aislamiento, menor será la pérdida de calor. También se conoce que un tanque de agua caliente perderá calor a mayor velocidad cuando se baja la temperatura del medido en donde se aloja. Además, entre más grande sea el tanque, mayor será el área superficial y, por consiguiente, la velocidad de la pérdida de calor.

De la figura 11 se demuestra que la velocidad de transferencia de calor por conducción a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa, es decir,

$$V = \frac{A \cdot \Delta T}{e} \quad \text{Ecuación (3)}$$

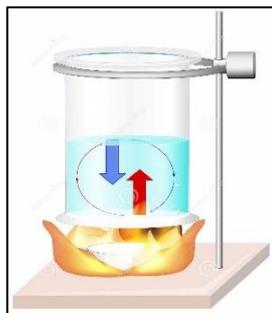
En donde:

- V = velocidad de conducción del calor
- A = Área
- ΔT = diferencia de temperatura
- e = espesor

- **Convección**

La convección es un modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Cuanto más rápido es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de la velocidad de transferencia. (Ratsa, 2018)

Figura 12 Convección en transferencia de calor



Fuente: (Reremsa, 2020)

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Por otro lado, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por diferencia de densidades debidas a la variación de temperatura en ese fluido. Por ejemplo, en ausencia de un ventilador, la transferencia de calor del bloque caliente de la figura será por convección natural, ya que, en este caso, cualquier movimiento en el aire se deberá a la elevación del aire más caliente (y, por lo tanto, más liviano) cercano a la superficie y la caída del más frío (y, por lo tanto, más pesado) para llenar su lugar.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$Q_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_{fluido}) \quad \text{Ecuación (4)}$$

En donde:

- Q_{conv} = Transferencia de calor por convección [W]
- A = Área [m²]
- h = Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/m²]
- T_s = Temperatura de la superficie [°C]
- T_{fluido} = Temperatura del fluido [°C]

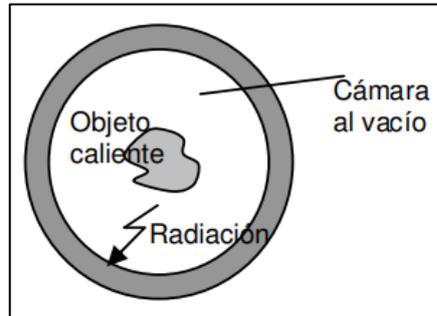
El coeficiente “h” no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo

- **Radiación térmica**

La radiación es la energía que emite la materia en la forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. En los estudios de transferencia de calor es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Considere un objeto caliente que está suspendido en una cámara en la que se ha hecho vacío y cuyas paredes se encuentran a la temperatura ambiente. Llegará un momento en que el objeto caliente se enfriará y alcanzará equilibrio térmico con sus alrededores. Es decir, perderá calor hasta que su temperatura alcance

la de las paredes de la cámara. Esta transferencia de calor no pudo haber tenido lugar por conducción o convección, ya que estos mecanismos no pueden desarrollarse en el vacío. Este nuevo mecanismo es la radiación (Ratsa, 2018, pág. 15)

Figura 13 Radiación en transferencia de calor



Fuente: (Reremsa, 2020)

La transferencia de energía por radiación ocurre en los sólidos, líquidos y gases. En la mayor parte de las aplicaciones prácticas, los tres modos de transferencia de calor ocurren de manera concurrente en grados variables. Pero la transferencia a través de un espacio en el que se ha hecho el vacío solo puede ocurrir por radiación. Resulta interesante observar que la transferencia de calor por radiación puede ocurrir entre dos cuerpos separados por un medio más frío que ambos. Por ejemplo, la radiación solar llega a la superficie de la Tierra después de pasar a través de capas de aire frías a grandes altitudes. Asimismo, las superficies que absorben radiación dentro de un invernadero alcanzan temperaturas elevadas incluso cuando sus cubiertas de plástico o de vidrio permanecen más o menos frías. La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann como:

$$Q_{rad} = \sigma \cdot A \cdot T_s^4 \quad \text{Ecuación (5)}$$

En donde:

- Q_{rad} = Transferencia de calor por radiación [W]
- A = Área [m²]
- σ = Constante Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8}$ [W/m²·K⁴]
- T_s = Temperatura de la superficie [°C]

8.6.2.2. Conductividad térmica

La conductividad térmica generalmente se la representa por medio de la letra (k), este término se refiere a capacidad para conducir calor de un material cualquiera. Un valor elevado para la

conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor, y un valor bajo indica que es un mal conductor o aislante. Sus unidades son $[W/m \cdot ^\circ C]$

Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura. Esta variación sobre ciertos rangos de temperatura es despreciable para algunos materiales, pero significativa para otros. Las conductividades térmicas de ciertos sólidos exhiben incrementos sorprendentes a temperaturas cercanas al cero absoluto, cuando estos sólidos se convierten en superconductores. Por ej. la conductividad del cobre alcanza un valor máximo de alrededor de $20\,000\, W/m \cdot ^\circ C$, la cual es alrededor de 50 veces mayor a la correspondiente a la temperatura ambiente. La dependencia de k con la temperatura causa complejidad considerable en el análisis de la conducción, por lo tanto, es práctica común evaluar la conductividad térmica a la temperatura promedio y tratarla como una constante en los cálculos. (Pando & Zapatán , 2012, pág. 17)

8.7. Simulación numérica

La simulación numérica tiene uso en la integración de las diferentes herramientas matemáticas permitiendo modelar, simular, o predecir el comportamiento de sistemas y procesos de la ingeniería y de las ciencias aplicadas, se pueden destacar la simulación numérica de fenómenos mecánicos o estructurales, térmicos o termodinámicos, acústicos o vibroacústicos, de interacción fluido-estructura, de procesos de fabricación (inyección, estampación o forja), electrónicos o electromagnéticos, de fluidos, de reacciones químicas, de fenómenos de combustión, medioambientales, de valoración de productos financieros y sus riesgos, gestión de carteras, entre otros. (Vallejo, 2013, pág. 16)

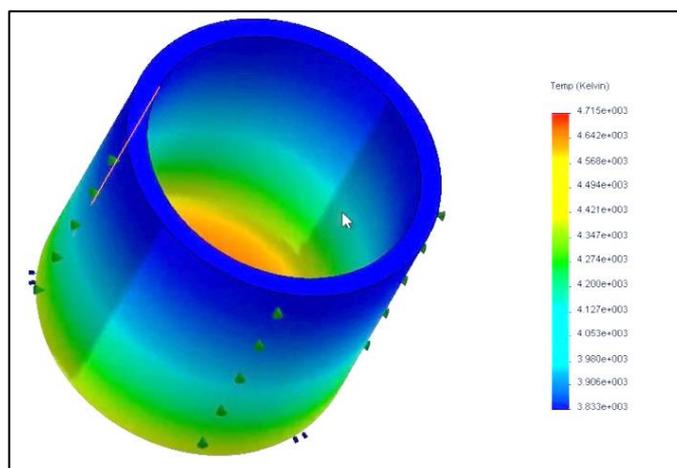
Generalmente, la simulación numérica viene asociada a las cátedras de CAD/CAE, los grupos de investigación involucrados en el desarrollo de soluciones incluyen todas las etapas, desde la modelización matemática hasta la elaboración de paquetes de software, pasando por el análisis matemático y la discretización numérica de los modelos obtenidos. Al tratarse de tecnologías de carácter transversal, los campos y sectores de aplicación son muy diversos; como ejemplos de aplicación de estas herramientas se pueden mencionar el cálculo de la resistencia de estructuras, el diseño de aerogeneradores, la solidificación de aleaciones, el calentamiento de hornos en procesos de fundición de metales, entre otros.

A continuación, en la tabla 7 se describen las ventajas y las desventajas principales de la aplicación de una simulación numérica:

Tabla 7 Ventajas y desventajas de una simulación numérica

Ventajas	Desventajas
Permite adquirir experiencia de manera rápida con un bajo costo y sin poner en riesgo la productividad del sistema.	No es aplicable cuando existan técnicas analíticas que permitan corregir u optimizar el sistema.
Permite identificar áreas con problemas en un proceso complejo.	En ocasiones no es posible asegurar que el modelo sea válido.
Permite realizar un estudio sistemático de alternativas aplicables al sistema.	Es posible querer utilizar el modelo fuera de los límites para los que fue construido causando una falsa apreciación del problema.
No importa que tan complejo sea el sistema ya que todo sistema puede ser modelado y de esta manera poder atacar el problema	No existe ninguna criterio científico sobre las posibles alternativas a ser simuladas
Puede ser aplicada en cualquier punto de la vida de un sistema, ya sea durante el diseño o la producción planteando alternativas para el mejoramiento del mismo.	La simulación es imprecisa y en ocasiones no proveen soluciones óptimas.

Fuente: (Arciniega, 2018)

Figura 14 Simulación numérica

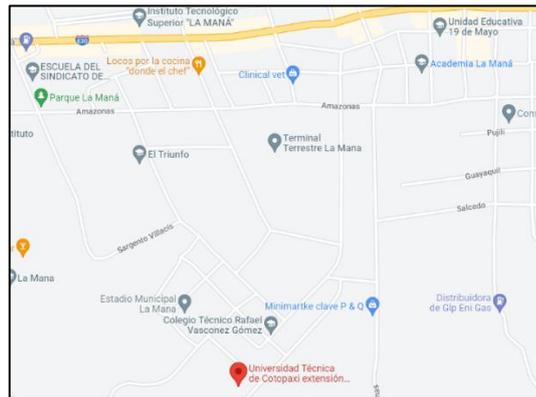
Fuente: (Carrizosa Isaza, 2017)

9. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Localización

El proyecto de investigación tiene lugar en los laboratorios de la carrera de Ingeniería en Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión “La Maná”, en la provincia de Cotopaxi, cantón La Maná.

Figura 15 Ubicación del proyecto



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.1. Tipos de investigación

9.1.1. Investigación bibliográfica

Este tipo de investigación proporciona las definiciones y características principales para el desarrollo del análisis termodinámico del proceso de fundición de metales mediante una búsqueda de información relevante como: libros, artículos de revistas técnicas y proyectos de titulación que tienen relación con el objeto de estudio desarrollando la fundamentación teórica.

9.1.2. Investigación de campo

Se desarrolló una investigación de campo en la que se constató el proceso de fundición de metales, los tipos de hornos utilizados, el tablero de control de temperaturas, preparación de la materia prima, entre otros.

9.2. Métodos de investigación

9.2.1. Método científico

Este método permite seguir de una manera ordenada los criterios técnicos para el desarrollo del análisis termodinámico del proceso de fundición de metales utilizando un horno de crisol para

visualizar la distribución de las temperaturas nodales en las paredes del horno mediante una simulación numérica.

9.2.2. Método explicativo

Este tipo de método permite detallar de una manera ordenada los procedimientos que se utilizarán para la ejecución de la simulación numérica, desde su gráfico en CAD, el ingreso de los datos térmicos, el mallado y los diferentes materiales usados como aislantes térmicos.

9.2.3. Hipótesis del proyecto

El desarrollo del proceso de fundición de metales permitirá visualizar la distribución de las temperaturas nodales en las paredes del horno de crisol.

9.2.4. Pregunta científica

¿Cuáles son los metales más utilizados en el proceso de fundición mediante un horno de crisol y qué valor tiene su temperatura de fusión?

9.3. Declaración de variables

9.3.1. Variable independiente

En la tabla 8 se presenta la variable independiente con su definición, indicadores, ítems, técnicas e instrumentos utilizados en el presente proyecto.

Tabla 8 Variable independiente

Variable independiente: Proceso de fundición de metales				
Definición	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Consiste en vaciar metal fundido en un recipiente con la forma deseada y esperar a solidificarse.	Temperatura de fusión	°C	Cálculo/Medición	Ecuación/pirómetro
	Cantidad de calor	W	Cálculo	Ecuación
	Transferencia de calor	W	Cálculo	Ecuación

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.3.2. Variable dependiente

En la tabla 9 se presenta la variable dependiente del proyecto con su definición, indicadores, ítems, técnicas e instrumentos.

Tabla 9 Variable dependiente

Variable dependiente: Distribución de la temperatura nodal				
Definición	Indicadores	Ítem	Técnicas	Instrumentos
Temperatura en cada punto del material refractario del horno.	Espesor del refractario	mm	Medición	Flexómetro
	Temperatura nodal	°C	Cálculo	Software
	Pérdidas de calor	W	Cálculo	Ecuación

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.4. Descripción del horno de fundición

A continuación, se presenta una caracterización técnica del horno de crisol para el estudio, en la tabla 10 se pueden observar sus características técnicas más importantes y relevantes para emplear y desarrollar las diferentes expresiones matemáticas térmicas y en la figura 16, se presenta físicamente el horno de crisol.

Figura 16 Horno de crisol



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Tabla 10 Características técnicas del horno

Definición	Característica técnica
Fuente de generación de calor	Carbón de tipo vegetal
Calor latente de fusión	398,7 kJ/kg
Dimensiones	Alto: 1560 mm; largo: 900 mm; ancho 700 mm
Dimensión de la cámara para fundición	Alto: 530 mm; largo: 500 mm; ancho 500 mm.
Material aislante	Manta de tipo cerámica Ladrillo especial refractario Cubierta de metal
Dimensión del material refractario	30 x 18 x 14 cm
Tipo de control de temperatura	Control Todo/nada
Equipo para flujo de aire	Blower

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.4.1. Descripción del control de temperatura

Siendo la temperatura la variable de interés, ésta debe permanecer a un cierto valor para llevar a cabo el proceso deseado, dentro de los distintos tipos de control, para el horno de crisol se usa un control ON/OFF conocido como “todo o nada”, este tipo de control se selecciona porque no es necesario tener un control preciso dentro de la fundición de metales, en la figura 17 se puede observar el tablero de control y en la tabla 11 los elementos utilizados para el control.

Figura 17 Tablero de control



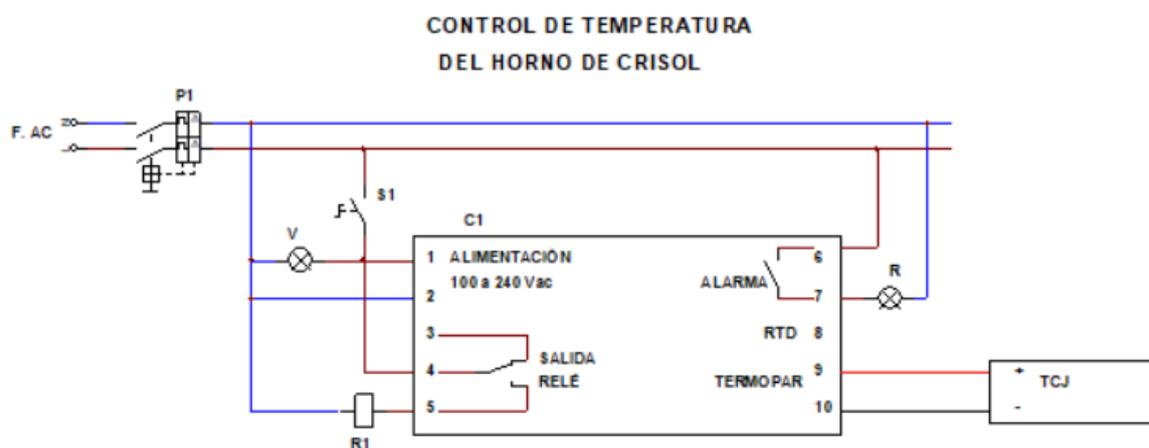
Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Tabla 11 Características del control de temperatura

Cant.	Descripción	Imagen
1	Luces piloto	
1	Termomagnético de 20 Amp.	
1	Selector de dos posiciones	
1	Gabinete	
1	Equipo controlador de temperatura	
1	Termopar tipo k	

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

En la siguiente figura se puede observar el diagrama eléctrico que se realizó para el control de temperatura del horno de crisol y en la tabla 12 se presenta una descripción de cada uno de estos elementos utilizados.

Figura 18 Diagrama eléctrico

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Tabla 12 Descripción de los elementos

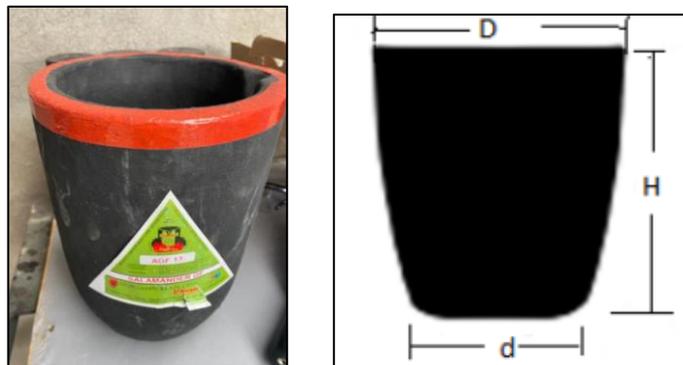
Designación	Nombre	Función
F. AC	Fuente de alimentación AC	Proporcionar el voltaje necesario para el funcionamiento de los equipos
P1	Protección eléctrica	Proteger a los elementos eléctricos y electrónicos de cortocircuitos o sobrecargas.
S1	Selector	Encendido o pagado del sistema de control de temperatura
V	Luz indicadora verde	Indica el encendido del sistema de control de temperatura
R1	Relé	Activa o desactiva el blower dependiendo la cantidad de temperatura que se suministra en el horno
C1	Controlador de temperatura	Equipo electrónico que permite el control de temperatura
R	Luz indicadora roja	Indica si el controlador presenta algún fallo en su sistema
TCJ	Termocupla	Sensor de temperatura en el interior del horno

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.4.2. Descripción del crisol

El crisol es un recipiente que está fabricado a base de material refractario usualmente de porcelanato, es utilizado para proceso de fundición de metales, esto por poseer características que soportan elevadas temperaturas (alrededor de 1700 °C). En la siguiente figura se observa el crisol utilizado para el proceso de fundición de metales.

Figura 19 Crisol



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Tabla 13 Características técnicas del crisol

Definición	Característica técnica
Tipo de crisol	45 % grafito 15 % carburo de silicio
Marca	Salamander
Temperatura de operación	900 – 1500 °C
Masa	6000 gr
Calor específico	0,962 kJ/kg.°C
Dimensiones (Ver figura 18)	D: 20 cm d: 14 cm H: 25 cm

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.4.3. Descripción del ladrillo aislante refractario

Estos materiales soportan temperatura que sobrepasan los 1000 °C sin sufrir alguna alteración, dentro del horno de crisol, este material guarda el calor para cumplir el proceso de fundición de metales, en la tabla 14 se presenta las características técnicas que tiene el ladrillo refractario.

Tabla 14 Características técnicas del ladrillo refractario

Definición	Característica técnica
Marca	SDMEC
Porcentaje de alúmina	42 %
Porosidad aparente	69 %
Densidad	0,6 g/cm ³
Temperatura de trabajo	Max: 1400 °C
Calor específico	0,92 kJ/kg.K
Conductividad térmica	0,25 W/m.K
Dimensión del material refractario interior	30 x 18 x 14 cm
Dimensión del material refractario exterior	30 x 18 x 6 cm

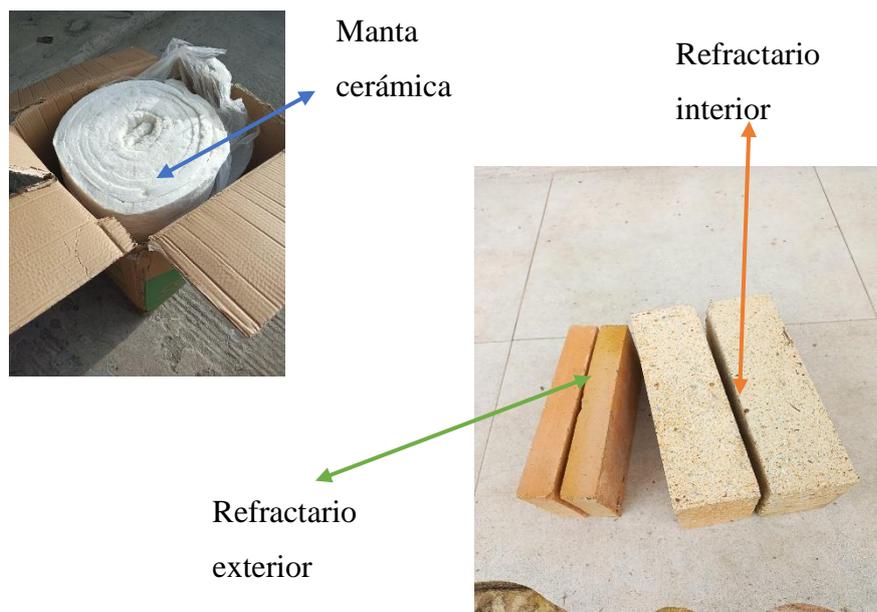
Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Figura 20 Ladrillo refractario

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.4.4. Descripción de la manta cerámica

Dentro de la construcción del horno de crisol, se encuentra una manta cerámica que cumple la función de mantener elevados los niveles de aislamiento térmico dentro del horno su característica principal es que tiene una baja conductividad térmica, esta manta está situada en las paredes del horno entre los dos ladrillos refractarios (interior y exterior) como se observa en la figura 21. Adicional, sus características técnicas se presentan en la tabla 15.

Figura 21 Situación de la manta cerámica

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Tabla 15 Características técnicas de la manta cerámica

Definición	Característica técnica
Marca	Calorcol
Conductividad térmica	0,22 W/m.K
Color	Blanco
Densidad	125 kg/cm ³
Temperatura de trabajo	Hasta 1350 °C
Conductividad térmica	0,25 W/m.K
Dimensiones	Longitud: 382 cm Ancho: 60 cm Espesor 2,54 cm

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.4.5. Descripción de la fuente calorífica

El horno de crisol utiliza como fuente calorífica un combustible en estado sólido conocido como carbón vegetal como se observa en la figura 22. Sus características técnicas se presentan en la tabla 16.

Tabla 16 Características técnicas del ladrillo refractario

Definición	Temperatura de carbonización	Valor
Poder calorífico	-----	25000 – 35000 kJ/kg
Densidad	150 °C	1500 kg/m ³
	240 °C	1500 kg/m ³
	270 °C	1400 kg/m ³
	1600 °C	2000 kg/m ³
Humedad	150 °C	21 %
	250 °C	7 %
	350 °C	6 %
	1500 °C	2%

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Figura 22 Carbón vegetal

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.4.6. Descripción de la compuerta metálica

Se puede determinar el horno de crisol como un cubo en donde la pared inferior está presente la fuente calorífica, en 3 de las 4 paredes laterales más la pared superior está compuesta por los materiales refractarios mencionados, mientras que en la pared lateral restante es utilizada como puerta de ingreso del crisol para el horno, esta puerta es de tipo metálica como se observa en la figura 23 y sus características técnicas se presentan en la tabla 17.

Figura 23 Compuerta metálica

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Tabla 17 Características técnicas de la compuerta metálica

Definición	Característica técnica
Tipo de metal	Aleación de acero al carbono A36
Conductividad térmica	64 W/m.K
Densidad	7860 kg/m ³
Dimensiones	Alto: 530 mm; largo: 500 mm; ancho 500 mm.

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.4.7. Descripción del metal a utilizarse

El metal seleccionado para realizar el estudio planteado es el aluminio, este metal es mayormente utilizado en las industrias metalúrgicas para el desarrollo de procesos de fundición con hornos de crisol, debido a que el aluminio presenta una gran cantidad de funcionalidades en el mundo de la construcción.

El aluminio se ha convertido cada vez más importante en la producción de automóviles y camiones, envasado de alimentos y bebidas, edificaciones y construcción, transmisión de electricidad, desarrollo de infraestructuras de transporte, producción de defensa y equipo aeroespacial, fabricación de maquinaria y herramientas, y producción de duraderos productos de consumo. Esta tendencia se debe a las propiedades especiales del aluminio como su peso ligero, alta resistencia a la corrosión, buena conformabilidad y no toxicidad. Las principales propiedades físicas se observan en la tabla 18.

Figura 24 Aluminio



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Tabla 18 Propiedades físicas del aluminio

Propiedad física	Valor
Peso atómico	26,98154
Masa específica en 20 °C	2,69890 g/cm ³
Contracción de solidificación	6,5 %
Temperatura de fusión	660,4 °C
Temperatura de ebullición	2494 °C
Calor específico	900 J/kg °C

Calor latente de fusión	397 kJ/kg
Calor de combustión	31,07 MJ/kg
Conductividad térmica	247 W/m °C

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.5. Expresiones termodinámicas

A continuación, se presentan las expresiones térmicas que se utilizan para desarrollar un análisis termodinámico en el proceso de fusión del aluminio utilizando un horno de crisol.

9.5.1. Calor que necesita el proceso

Es importante conocer la cantidad de energía en forma de calor que el horno de crisol necesita para desarrollar el proceso de fundición, para lo cual, se tiene la siguiente ecuación.

$$Q_{req} = Q_{Al} + Q_{crisol} \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

- Q_{pro} = Calor que necesita el proceso [kJ]
- Q_{al} = Calor que se entrega al metal [kJ]
- Q_{crisol} = Calor del crisol [kJ]

9.5.2. Calor entregado al metal

Para conocer el valor de energía calorífica que es necesario para el aluminio cumpla con su proceso de fundición, se necesita poner en conocimiento los siguientes aspectos:

9.5.2.1. Elevación a temperatura de fusión

Calcular la cantidad de calor necesario para aumentar la temperatura ambiente (considerada de 23 °C para la ciudad de La Maná) a la temperatura de fusión del aluminio que es 660 °C, se aplica la ecuación 7.

$$Q_{elev} = C_p \cdot m \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

- Q_{elev} = Elevación hasta la temperatura de fusión [kJ]
- C_p = Calor específico [kJ/kg.K]
- m = masa [kg]

- ΔT = variación de temperatura [K]

9.5.2.2. Calor para cambio de estado

Calcular la cantidad de calor que se necesita para que el metal (aluminio) realice el proceso de calor latente, esto significa el cambio de su estado de sólido a líquido, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{latente} = m \cdot \gamma \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

- $Q_{latente}$ = Calor para cambio de estado [kJ]
- γ = Valor de calor latente del metal [kJ/kg]
- m = masa [kg]

9.5.2.3. Cantidad de calor para vertido

Se considera una cantidad para vertido, en donde menciona que es necesario garantizar que el aluminio siempre esté en condiciones óptimas para ser vertido en los distintos moldes, para lo cual, esta temperatura de colado es de 820 °C, se aplica la siguiente ecuación:

$$Q_{vertido} = C_p \cdot m \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación (9)}$$

Donde:

- $Q_{vertido}$ = Cantidad de calor para cambio de fase [kJ]
- C_p = Calor específico [kJ/kg.K]
- m = masa [kg]
- ΔT = variación de temperatura [K]

9.5.2.4. Cantidad de calor por el aluminio

La cantidad de calor final que se entrega al metal (aluminio) se obtiene por medio de la sumatoria del valor del calor para elevar de 23 °C a 660 °C, el valor del cambio de fase y el valor del calor de vertido para lo cual se utiliza la siguiente ecuación.

$$Q_{al} = Q_{elev} + Q_{latente} + Q_{vertido} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

- Q_{al} = Calor que se entrega al metal [kJ]

- Q_{elev} = Elevación hasta la temperatura de fusión [kJ]
- Q_{latente} = Calor para cambio de estado [kJ]
- Q_{vertido} = Cantidad de calor para cambio de fase [kJ]

9.5.3. Calor del crisol

Para determinar la cantidad de calor que el crisol absorbe dentro del horno de fundición, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{crisol}} = C_p \cdot m \cdot T \quad \text{Ecuación (11)}$$

En donde:

- Q_{crisol} = Cantidad de calor absorbido por el crisol [kJ]
- C_p = Calor específico del crisol [kJ/kg.K]
- m = masa del crisol [kg]
- ΔT = variación de temperatura [K]

9.5.4. Cantidad de calor total

Para calcular la cantidad de calor total que necesita el proceso de fundición del aluminio se realiza la sumatoria del calor que se entrega al metal y el calor del crisol, adicional se debe dividirlo para un tiempo (segundos para el cálculo). El horno de crisol tiene un tiempo de fundición de 20 minutos (1800 segundos).

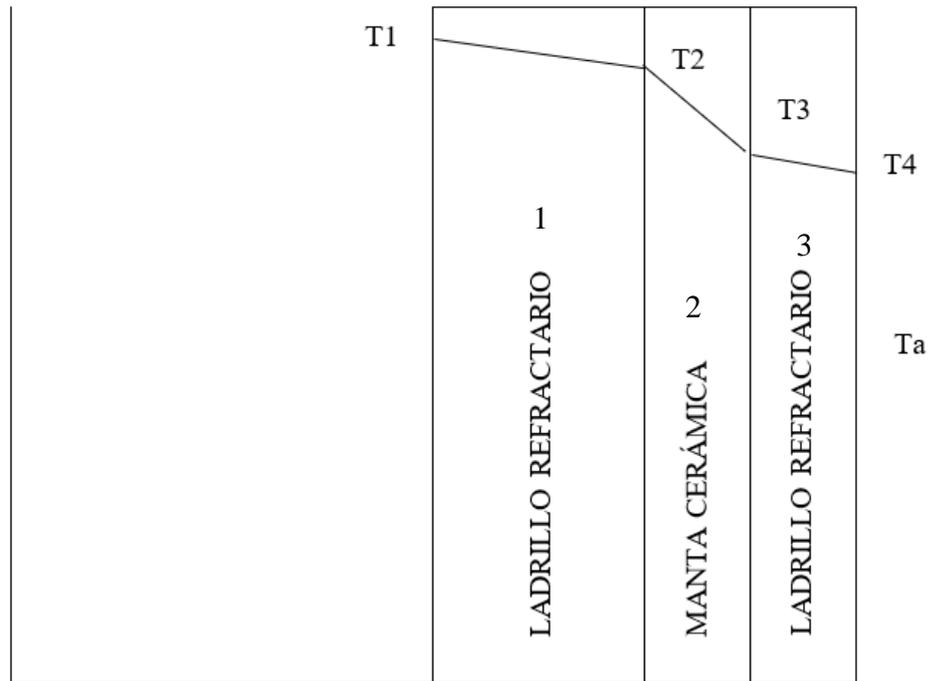
$$Q_{\text{fund}} = \frac{Q_{\text{al}} + Q_{\text{crisol}}}{t} \quad \text{Ecuación (12)}$$

- Q_{fund} = Calor para realizar el proceso de fundición ideal [W]
- Q_{crisol} = Cantidad de calor absorbido por el crisol [kJ]
- Q_{al} = Calor que se entrega al metal [kJ]
- t = tiempo [s]

9.5.5. Análisis de transferencia de calor

Para calcular el valor de energía calorífica que se pierde para cumplir el proceso de fundición de metales (aluminio), se desarrolla análisis sencillo, considerando los materiales refractarios con lo que están construidas las paredes del horno, éstas son: ladrillo de tipo refractario, manta cerámica y cubierta de metal, en la siguiente figura se puede observar su distribución.

Figura 25 Diagrama de la distribución del material refractario



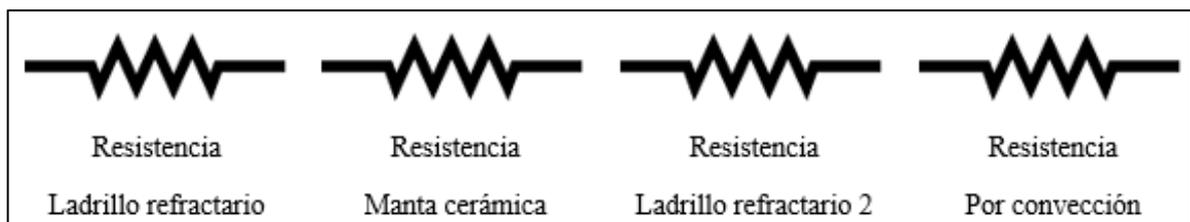
Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

De la figura 25 se mencionan los siguientes perfiles de temperatura en cada punto de inicio y fin del material refractario, a continuación, se tiene su significado:

- T1: Temperatura interior del horno de crisol [°C]
- T2: Temperatura en la manta cerámica [°C]
- T3: Temperatura del ladrillo refractario externo [°C]
- T4: Temperatura en el exterior del horno de crisol [°C]
- Tam: Temperatura ambiental [°C]

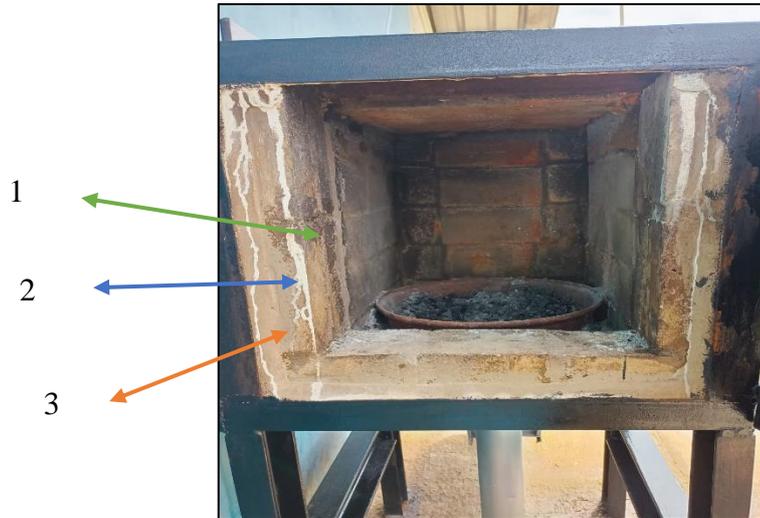
Se desarrolla un análisis de resistencias térmicas para generar una evaluación de transferencia de calor en paredes planos por unidad de longitud.

Figura 26 Resistencias para la transferencia de calor



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Figura 27 Distribución del material refractario físicamente



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.5.6. Cálculo del espesor del material refractario

Para determinar el espesor del material refractario se realiza una evaluación entre las resistencias de transferencia de calor tomando en consideración la temperatura interna (T1) y la temperatura ambiental (Ta).

$$\dot{Q} = \frac{T1 - Ta}{R_{total}} \quad \text{Ecuación (13)}$$

En donde:

- \dot{Q} : Razón de transferencia de calor [W]
- T1: Temperatura interior del horno de crisol [°C]
- Tam: Temperatura ambiental [°C]
- R_{total} : Resistencia térmica total [°C/K]

La resistencia térmica por conducción se puede establecer de la siguiente manera:

$$R_{total} = \frac{e}{k \cdot A} \quad \text{Ecuación (14)}$$

En donde:

- e: Espesor del refractario [m]
- k = Conductividad térmica [W/m.K]

- $A = \text{Área del material refractario [m}^2\text{]}$

Dentro de la resistencia por convección se puede establecer el cálculo de transferencia de calor por convección establecido en la ecuación 18, obteniendo lo siguiente:

$$\dot{Q} = \frac{T1 - Ta}{\frac{e}{K \cdot A}} \quad \text{Ecuación (15)}$$

$$e = \frac{k \cdot A \cdot (T1 - Ta)}{Q_{conv}} \quad \text{Ecuación (16)}$$

9.5.7. Cálculo de la transferencia de calor por conducción

Las pérdidas de la energía en forma de calor presentes en el horno de fundición de aluminio se las determina a través de las 5 paredes del horno, 4 laterales y 1 superior. Para determinar la transferencia de calor por conducción se utiliza la ecuación 13.

$$Q_{cond} \quad \text{Ecuación (17)}$$

$$= \frac{T1 - T4}{\left(\frac{e_{refractario}}{k_{refra} \cdot A_{refr}} \right) + \left(\frac{e_{manta\ cerámica}}{k_{manta} \cdot A_{manta}} \right) + \left(\frac{e_{refractario\ ext}}{k_{refra\ ext} \cdot A_{refra\ ext}} \right)}$$

En donde:

- $Q_{cond} = \text{Pérdida por transferencia de calor por conducción [W]}$
- $T1 = \text{Temperatura en el interior del horno de crisol [K]}$
- $T4 = \text{Temperatura del ladrillo refractario externo [K]}$
- $k_{refra} = \text{Conductividad térmica del ladrillo refractario interno [W/m.K]}$
- $k_{manta} = \text{Conductividad térmica de la manta cerámica [W/m.K]}$
- $k_{refra\ ext} = \text{Conductividad térmica del ladrillo refractario externo [W/m.K]}$
- $e_{refra} = \text{Espesor del ladrillo refractario interno [m]}$
- $e_{manta} = \text{Espesor de la manta cerámica [m]}$
- $e_{refra\ ext} = \text{Espesor del ladrillo refractario externo [m]}$
- $A_{refra} = \text{Área del ladrillo refractario interno [m}^2\text{]}$
- $A_{manta} = \text{Área de la manta cerámica [m}^2\text{]}$
- $A_{refra\ ext} = \text{Área del ladrillo refractario externo [m}^2\text{]}$

9.5.8. Cálculo de la transferencia de calor por convección

Para determinar la transferencia de calor por convección se utiliza la ecuación 18.

$$Q_{convección} = A \cdot h \cdot (T_4 - T_a) \quad \text{Ecuación (18)}$$

En donde:

- $Q_{convección}$ = Pérdida por transferencia de calor por convección [W]
- T_a = Temperatura de ambiente [K]
- T_4 = Temperatura del ladrillo refractario externo [K]
- A = Área [m²]
- h = Coeficiente por convección [W/m².K]

9.5.9. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Considerando al horno de crisol de manera física es necesario determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección para paredes planas, para ello, se debe realizar unos cálculos precios detallados a continuación:

- **Temperatura de película**

La temperatura de película se determina con la siguiente ecuación:

$$T_{Pel} = \frac{T_a + T_4}{2} \quad \text{Ecuación (19)}$$

En donde:

- T_{Pel} = Temperatura de película [K]
- T_a = Temperatura del ambiente [K]
- T_4 = Temperatura del ladrillo refractario externo [K]

Con el valor que se obtenga del cálculo de la temperatura de película es necesario ir a las tablas de las propiedades de aire a la temperatura de película de (Incropera, 2002), para obtener los valores de: viscosidad cinemática, conductividad térmica y el número de Prandtl.

- **Número de Rayleigh**

El número de Rayleigh se determina con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_a) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad \text{Ecuación (20)}$$

En donde:

- R = Número de Rayleigh [adimensional]
- g = gravedad [m/s²]
- T_s = Temperatura de salida [K]
- T_a = Temperatura ambiente [K]
- L = Altura [m]
- ν = Viscosidad cinemática [m²/s]
- α = 24,42 x 10⁻⁶ [m²/s]
- β = 1 / T_p

• Número de Nusselt

El número de Nusselt se determina con la siguiente ecuación:

$$N = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot R^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr_a} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 \quad \text{Ecuación (21)}$$

En donde:

- N = Número de Nusselt
- R = Número de Rayleigh
- Pr_a = Número de Prandtl

• Coeficiente por convección

Finalmente, el coeficiente de transferencia de calor por convección se determina con la siguiente ecuación:

$$h = \frac{N \cdot k}{L} \quad \text{Ecuación (22)}$$

En donde:

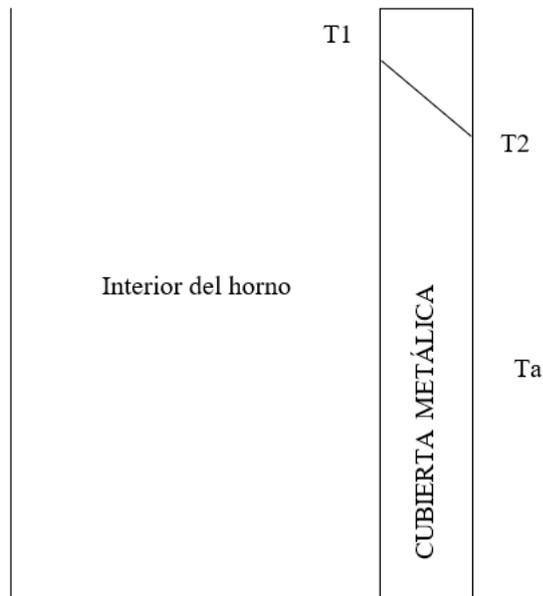
- h = Coeficiente por convección [W/m².K]

- N = Número de Nusselt
- k = Conductividad [W/m.K]
- L = Altura [m]

9.5.10. Análisis de la pérdida de calor en la cubierta de metal

Para determinar el valor de la cantidad de calor que se pierde por la puerta del horno (cubierta de metal) se desarrolla un por medio de la transferencia de calor (conducción y convección), dentro de la figura 30 se puede observar de manera física está cubierta de metal que es utilizada como puerta del horno de crisol y dentro de la figura 28 se observa el gráfico de la distribución de las temperaturas en esta cubierta.

Figura 28 Distribución de temperaturas



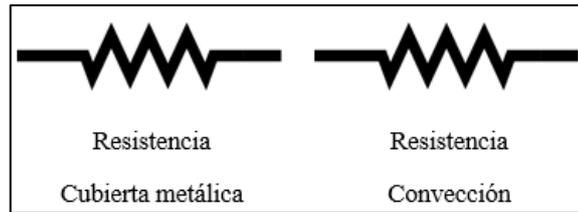
Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

A continuación, de la figura 24 se puede mencionar lo siguiente:

- T_1 : Temperatura en el interior del horno [°C]
- T_2 : Temperatura en el exterior del horno [°C]
- T_a : Temperatura de ambiente [°C]

En la figura 29 se presentan las resistencias térmicas para realizar el análisis técnico evaluativo de la transferencia de calor por conducción y convección sobre paredes planas.

Figura 29 Resistencias térmicas en la cubierta metálica



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

9.5.11. Pérdidas de calor total

Para conocer el valor de las pérdidas de la energía en forma de calor total que se produce en el horno de crisol es necesario realizar una sumatoria (ver ecuación 23) de todas las pérdidas de calor que se consideraron con anterioridad, éstas implican la transferencia de calor por conducción y convección en la 5 paredes que contiene el horno, 4 de estas paredes están conformados por los materiales refractarios, mientras que una de ellas es la puerta de metal del horno como se puede observar la siguiente figura.

Figura 30 Resistencias térmicas en la cubierta metálica



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

$$Q_{perd} = (4p) \cdot Q_{cond} + (4p) \cdot Q_{conv} + (1p) \cdot Q_{cond} + (1p) \cdot Q_{conv} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde:

- Q_{perd} = Cantidad de calor por pérdidas de transferencia [W]
- $4p$ = 4 paredes con material refractario
- Q_{cond} = Pérdidas de calor por conducción [W]
- $1p$ = 1 pared de metal para puerta del horno
- Q_{conv} = Pérdidas de calor por convección [W]

9.5.12. Cantidad de energía final necesaria para el horno de crisol

Finalmente, se realiza el cálculo para determinar el valor de la cantidad de calor final que se necesita para cumplir el proceso de fundición del aluminio, este cálculo incluye la cantidad de calor total para fundir el aluminio con sus pérdidas por transferencia de calor, por lo tanto, se aplica la ecuación 24.

$$Q_T = Q_{fund} + Q_{perd} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

- Q_T = Cantidad de energía calorífica necesaria [W]
- Q_{perd} = Cantidad de calor por pérdidas de transferencia [W]
- Q_{fund} = Calor para realizar el proceso de fundición ideal [W]

9.5.13. Suministro de calor por fuente

Una vez conocido la cantidad de calor que se necesita para el proceso de fundición del aluminio es necesario determinar si la fuente de calor puede proporcionar esa cantidad requerida, para lo cual se determina este suministro mediante la ecuación 25.

$$Q_{suministro} = \frac{Pc \cdot m}{t} \quad \text{Ecuación (25)}$$

Donde:

- $Q_{suministro}$ = Calor suministrado [kJ]
- Pc = Poder calorífico [kJ/kg]
- m = masa [kg]
- t = tiempo [s]

9.5.14. Rendimiento del horno de crisol

Para determinar el rendimiento del horno de crisol para realizar la fundición de aluminio se aplica la siguiente ecuación, cabe recalcar que el rendimiento se lo expresa en porcentaje.

$$\eta = \frac{Q_{suministro} - Q_T}{Q_{suministro}} \cdot 100 \% \quad \text{Ecuación (26)}$$

En donde:

- η = rendimiento [%]

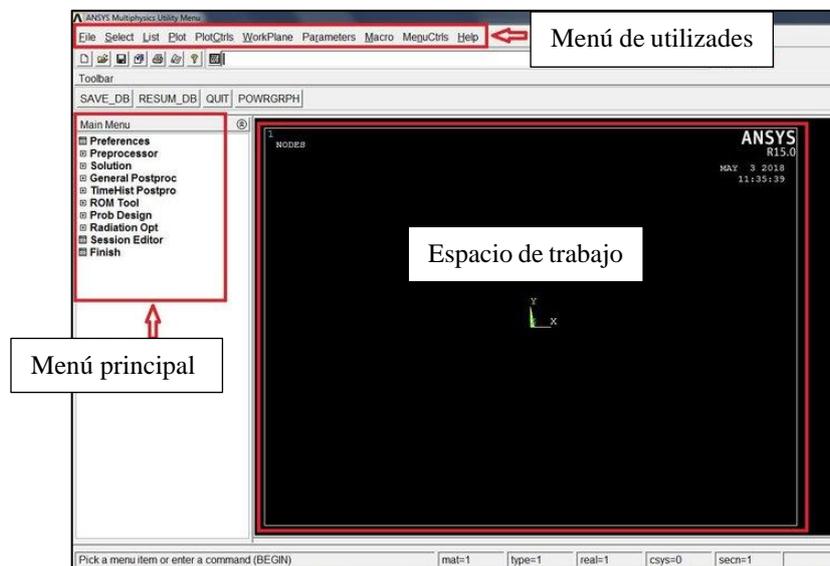
- $Q_{\text{suministro}} = \text{Calor suministrado [W]}$
- $Q_T = \text{Cantidad de energía calorífica necesaria [W]}$

9.6. Software de simulación para temperatura nodal

Para conocer como está distribuida la temperatura en cada punto de las paredes del horno de crisol especialmente en donde se encuentran los materiales refractarios (ladrillo y manta cerámica) es necesario realizar un análisis técnico mediante el uso de un software de simulación numérica, para lo cual se utiliza el software ANSYS que cuenta con una licencia de tipo educativa para estudiantes de ingeniería con la finalidad de que cumplan su proceso en formación técnica y resolución de problemas.

Dentro del software se trabaja con el Lenguaje de Diseño Paramétrico de Ansys (APDL) que ofrece una secuencia de comandos ordenados y estructurados mediante la aplicación de elementos finitos para la obtención de resultados del tipo de análisis de interés, éstos pueden ser: térmico, estructural, acústico, piezoeléctrico, electrostático y electromagnético. Por lo tanto, se utiliza el software en versión educativa ANSYS Mechanical APDL, su entorno se visualiza en la siguiente figura.

Figura 31 Entorno de trabajo de Ansys



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

10. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

Se presenta a continuación la resolución de las ecuaciones termodinámicas para el desarrollo de criterios y valoraciones en función a la cantidad de calor necesaria para la función de calor incluidas sus pérdidas, así como también el suministro de la fuente calorífica conjuntamente con el rendimiento del horno de crisol, para finalizar se conocen los valores de la distribución de las temperaturas en cada punto de las paredes con material refractario mediante el uso del software de simulación Ansys.

10.1. Resolución de las ecuaciones termodinámicas

10.1.1.1. Cantidad de calor para alcanzar la temperatura de fusión

El valor del calor específico del aluminio se puede encontrar en la tabla 17, la masa del aluminio depende del tamaño que tiene el crisol y la variación de temperatura es la diferencia entre la temperatura de fusión del aluminio con la ambiental, al aplicar la ecuación 7 se obtienen los siguientes resultados.

Datos:

- $C_p = 960 \text{ [J/kg}\cdot\text{°C]}$
- $m = 7 \text{ [kg]}$
- $\Delta T = 660 \text{ °C} - 23 \text{ °C}$

$$Q_{elev} = 960 \cdot 7 \cdot (660 - 23)$$

$$Q_{elev} = 4280,64 \text{ kJ}$$

Para alcanzar la temperatura de fusión del aluminio es necesario una cantidad de calor de 4280,65 kJ.

10.1.1.2. Cantidad de calor para cambio de estado

El valor del calor latente del aluminio se encuentra en la tabla 17, mientras que la masa del aluminio sigue dependiendo del tamaño del crisol, para lo cual aplicando la ecuación 8 se obtiene el siguiente resultado.

Datos:

- $\gamma = 397 \text{ [kJ/kg]}$
- $m = 7 \text{ [kg]}$

$$Q_{latente} = 7 \cdot 397$$

$$Q_{latente} = 2779 \text{ kJ}$$

Para que el aluminio pase de un estado sólido a un estado líquido es necesario una cantidad de calor de 2779 kJ.

10.1.1.3. Valor de la cantidad de calor para vertido

Para realizar el vertido del aluminio en estado líquido en los recipientes metálicos para su posterior solidificación, tiene que alcanzar una temperatura de 876,1 °C, este dato se determinó aplicando la investigación de campo como se puede observar en la figura 32, por lo tanto, aplicando la ecuación 9 se obtiene el siguiente resultado.

Figura 32 Medición de temperatura para vertido del aluminio



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Datos:

- $C_p = 960 \text{ [J/kg.K]}$
- $m = 7 \text{ [kg]}$
- $\Delta T = 876,1 \text{ }^\circ\text{C} - 660 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{vertido} = 960 \cdot 7 \cdot (876,1 - 660)$$

$$Q_{vertido} = 1452,2 \text{ kJ}$$

La cantidad de calor que se necesita para que el aluminio en estado líquido pueda verterse en un recipiente es de 1452,2 kJ.

10.1.1.4. Cantidad de calor necesaria para el aluminio

Datos:

- $Q_{elev} = 4280,64 \text{ [kJ]}$
- $Q_{latente} = 2779 \text{ [kJ]}$

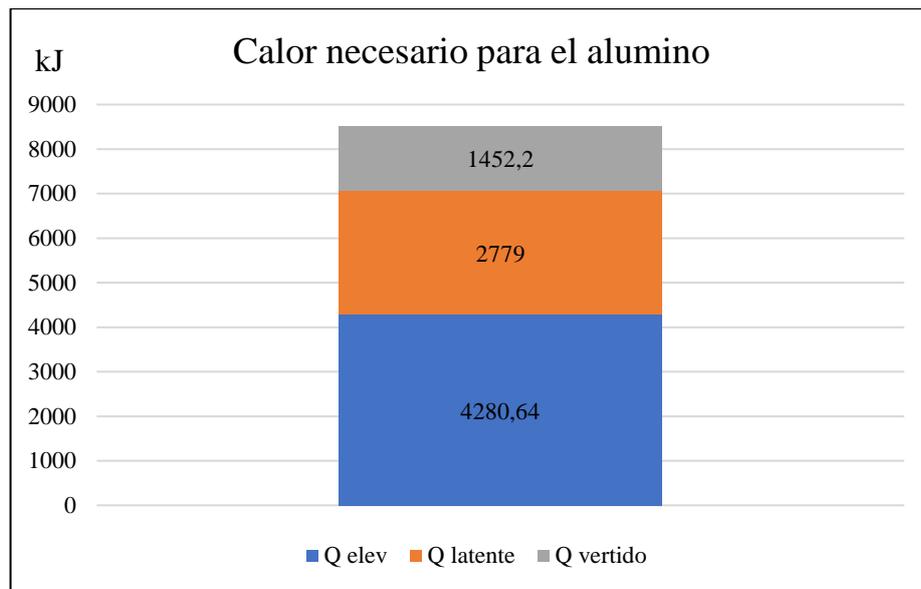
$$- Q_{\text{vertido}} = 1452,2 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{al}} = 4280,64 + 2779 + 1452,2$$

$$Q_{\text{al}} = 8511,84 \text{ kJ}$$

El valor de energía calorífica necesaria para el aluminio cumpla con su proceso de fundición es de 8511,84 kJ.

Figura 33 Calor necesario para el aluminio



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Dentro de la figura 33 se tiene una partición de la cantidad de calor que necesita el aluminio para garantizar el proceso de fundición, se puede constatar que el calor de elevación es mucho mayor que los calores (latente y vertido), esto se da porque el aluminio parte del reposo (estado sólido) a una temperatura ambiente considerada para “La Maná” de 23 °C.

10.1.2. Valor de calor para el crisol

Dependiendo del tipo de crisol, características técnicas y tamaño, este valor de calor puede variar ligeramente, el calor específico se puede observar en la tabla 12 y la variación de temperatura es la diferencia de la temperatura de vertido con la temperatura ambiental, para lo cual aplicando la ecuación 11 se obtiene el siguiente resultado.

Datos:

- $C_p = 0,962 \text{ [kJ/kg.K]}$
- $m = 6 \text{ [kg]}$

$$- \Delta T = 876,1 \text{ }^{\circ}\text{C} - 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{crisol}} = 0,962 \cdot 6 \cdot (876,1 - 23)$$

$$Q_{\text{crisol}} = 4924,09 \text{ kJ}$$

La cantidad de calor que absorbe el crisol es de 4924,09 kJ. En la figura 34 se presenta el uso del crisol dentro del proceso de fundición de aluminio.

Figura 34 Crisol utilizado para la fundición de aluminio



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

10.1.3. Cantidad de calor necesario para el proceso

Cabe recalcar que esta cantidad de calor que necesita el proceso es de manera ideal, es decir sin considerar sus pérdidas, para lo cual, se realiza una sumatoria entre el calor del crisol y el calor del aluminio obteniendo lo siguiente.

Datos:

$$- Q_{\text{metal}} = 8511,84 \text{ [kJ]}$$

$$- Q_{\text{crisol}} = 4924,09 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{req}} = 8511,84 + 4924,09$$

$$Q_{\text{req}} = 13435,93 \text{ kJ}$$

Dentro de la investigación de campo se constató que una cantidad de 7 kg de aluminio cumple su proceso de fundición en un tiempo de 20 minutos es de decir 1800 segundos (dato para el cálculo), para lo cual, aplicando la ecuación 12 se obtiene la cantidad de calor en función del tiempo.

$$Q_{fund} = \frac{13435,93}{1800}$$

$$Q_{fund} = 7,46 \text{ kW}$$

El valor de la cantidad de calor necesaria para cumplir el proceso de fundición del aluminio incluido los cálculos del metal y el crisol en una unidad de tiempo es de 7,46 kW.

10.1.4. Espesor del refractario

- **Refractario interno**

Para determinar el espesor del material refractario interno se utiliza la ecuación 16 con los siguientes datos:

- $T_1 = 876,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 1149,1 \text{ [K]}$
- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $k_{refra} = 0,25 \text{ [W/m.K]}$
- $A = 0,025 \text{ [m}^2\text{]}$
- $Q_{conv} = 39,61 \text{ [W]}$

$$e = \frac{0,25 \cdot 0,025 \cdot (1149,1 - 296)}{39,61}$$

$$e = 13,45 \text{ cm} \approx 14 \text{ cm}$$

- **Refractario intermedio (manta cerámica)**

Para determinar el espesor del material refractario intermedio se utiliza la ecuación 16 con los siguientes datos:

- $T_1 = 876,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 1149,1 \text{ [K]}$
- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $k_{refra} = 0,22 \text{ [W/m.K]}$
- $A = 0,0044 \text{ [m}^2\text{]}$
- $Q_{conv} = 39,61 \text{ [W]}$

$$e = \frac{0,22 \cdot 0,0044 \cdot (1149,1 - 296)}{39,61}$$

$$e = 2,08 \text{ cm} \approx 2,54 \text{ cm}$$

Se determina el valor de 2,54 cm de manera comercial.

- **Refractario externo**

Para determinar el espesor del material refractario externo se utiliza la ecuación 16 con los siguientes datos:

- $T_1 = 876,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 1149,1 \text{ [K]}$
- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $k_{\text{refra}} = 0,25 \text{ [W/m.K]}$
- $A = 0,0108 \text{ [m}^2\text{]}$
- $Q_{\text{conv}} = 39,61 \text{ [W]}$

$$e = \frac{0,25 \cdot 0,0108 \cdot (1149,1 - 296)}{39,61}$$

$$e = 5,8 \text{ cm} \approx 6 \text{ cm}$$

10.1.5. Pérdidas de calor por conducción en los materiales refractarios

Para determinar las pérdidas por conducción, se utilizan las características técnicas y de medida de los materiales refractarios ubicados en las paredes del horno dentro de los cuales se obtienen los siguientes datos:

- $T_1 = 876,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 1149,1 \text{ [K]}$
- $T_4 = 57,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 330,1 \text{ [K]}$ (ver figura 34)
- $k_{\text{refra}} = 0,25 \text{ [W/m.K]}$
- $k_{\text{manta}} = 0,22 \text{ [W/m.K]}$
- $k_{\text{refra ext}} = 0,25 \text{ [W/m.K]}$
- $e_{\text{refra}} = 0,14 \text{ [m]}$
- $e_{\text{manta}} = 0,0254 \text{ [m]}$
- $e_{\text{refra ext}} = 0,06 \text{ [cm]}$
- $A_{\text{refra}} = 0,25 \text{ [m}^2\text{]}$
- $A_{\text{manta}} = 0,25 \text{ [m}^2\text{]}$
- $A_{\text{refra ext}} = 0,25 \text{ [m}^2\text{]}$

$$Q_{\text{cond}} = \frac{1149,1 - 330,1}{\left(\frac{0,14}{0,25 \cdot 0,25}\right) + \left(\frac{0,0254}{0,22 \cdot 0,25}\right) + \left(\frac{0,06}{0,25 \cdot 0,25}\right)}$$

$$Q_{\text{cond}} = 251,68 \text{ W}$$

Figura 35 Medición de temperatura a la salida del material refractario



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Mediante el proceso de la transferencia de calor por conducción, el horno de crisol en sus paredes que utilizan material refractario contiene pérdidas por el valor de 251,68 W en forma de calor.

10.1.6. Pérdidas de calor por convección en materiales refractarios

- **Cálculo de la temperatura de película**

Para determinar la temperatura de película se aplica la ecuación 19 y se consideran los siguientes datos:

- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $T_4 = 57,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 330,1 \text{ [K]}$ (ver figura 34)

$$T_{Pel} = \frac{296 + 330,1}{2}$$

$$T_{Pel} = 313,05 \text{ K} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con el valor de la temperatura de película que es de 40 °C, hay que considerar el anexo 2 que contiene las propiedades del aire a la temperatura pelicular del libro de (Incropera, 2002).

Tabla 19 Propiedades temperatura de 40 °C

Propiedad	Valor
Temperatura	40 °C
Conductividad térmica	0,02662 W/m.K

Difusividad	$2,346 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Viscosidad	$1,702 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Número de Prandtl	0,7255
Calor específico	1007 J/kg.K
Densidad	$1,127 \text{ kg/m}^3$

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

- **Cálculo del valor de Rayleigh**

Aplicando la ecuación 20 se determina el número de Rayleigh con los siguientes datos:

- $g = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- $T_s = 57,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 330,1 \text{ [K]}$
- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $L = 0,53 \text{ [m]}$
- $\nu = 1,702 \times 10^{-5} \text{ [m}^2/\text{s]}$
- $\alpha = 2,346 \times 10^{-5} \text{ [m}^2/\text{s]}$
- $\beta = 1 / 313 \text{ K}$

$$R = \frac{9,8 \cdot \frac{1}{313} \cdot (330 - 296) \cdot 0,53^3}{1,702 \times 10^{-5} \cdot 2,346 \times 10^{-5}}$$

$$R = 396917914,2$$

- **Cálculo del valor de Nusselt**

Aplicando la ecuación 21 se determina el número de Nusselt con los siguientes datos:

- $R = 396917914,2$
- $Pra = 0,7255$

$$N = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot (396917914,2)^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{0,7255} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$N = 92,8$$

- **Cálculo del valor del coeficiente por convección**

Aplicando la ecuación 22 se determina el valor del coeficiente por convección con los siguientes datos:

- $N = 92,8$
- $k = 0,02662 \text{ [W/m.K]}$
- $L = 0,53 \text{ [m]}$

$$h = \frac{92,8 \cdot 0,02662}{0,53}$$

$$h = 4,66 \frac{W}{m \cdot K}$$

- **Valor de las pérdidas de calor por convección**

Aplicando la ecuación 18 se determina el valor de la transferencia de calor mediante la convección con los siguientes datos:

- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $T_4 = 57,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 330,1 \text{ [K]}$
- $A = 0,25 \text{ [m}^2\text{]}$
- $h = 4,66 \text{ [W/m.K]}$

$$Q_{convección} = 0,25 \cdot 4,66 \cdot (330 - 296)$$

$$Q_{convección} = 39,61 \text{ W}$$

Mediante el proceso de la transferencia de calor por convección, el horno de crisol en sus paredes que utilizan material refractario contiene pérdidas por el valor de 39,61 W en forma de calor.

10.1.7. Pérdidas de calor por conducción en la puerta metálica

Para determinar las pérdidas por conducción en la compuerta metálica, se utilizan las características técnicas y de medida de la puerta del horno de crisol dentro de los cuales se obtienen los siguientes datos:

- $T_1 = 876,1 \text{ [}^\circ\text{C]} = 1149,1 \text{ [K]}$
- $T_2 = 200 \text{ [}^\circ\text{C]} = 473 \text{ [K]}$ (ver figura 35)

- $K_{comp} = 64 \text{ [W/m.K]}$
- $E_{comp} = 0,01 \text{ [m]}$
- $A_{comp} = 0,25 \text{ [m}^2\text{]}$

$$Q_{cond} = \frac{1149,1 - 473}{\left(\frac{0,01}{64 \cdot 0,25}\right)}$$

$$Q_{cond} = 1081,76 \text{ kW}$$

Figura 36 Medición de temperatura en la salida de la compuerta del horno



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Mediante el proceso de la transferencia de calor por conducción en la compuerta metálica del horno de contiene una gran cantidad de pérdidas por el valor de 1081,76 W en forma de calor.

10.1.8. Pérdidas de calor por convección en la puerta metálica

- **Cálculo de la temperatura de película**

Para determinar la temperatura de película se aplica la ecuación 19 y se consideran los siguientes datos:

- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $T_2 = 200 \text{ [}^\circ\text{C]} = 473 \text{ [K]}$ (ver figura 35)

$$T_{Pel} = \frac{296 + 473}{2}$$

$$T_{Pel} = 384,5 \text{ K} = 111,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con el valor de la temperatura de película que es de 111,5 °C, hay que considerar el anexo 2 que contiene las propiedades del aire a la temperatura pelicular del libro de (Incropera, 2002).

Tabla 20 Propiedades del aire a la temperatura pelicular de 111,5 °C

Propiedad	Valor
Temperatura	111,5 °C
Conductividad térmica	0,03095 W/m.K
Difusividad térmica	3,243 x 10 ⁻⁵ m ² /s
Viscosidad cinemática	2,306 x 10 ⁻⁵ m ² /s
Número de Prandtl	0,7111
Calor específico	1009 J/kg.K
Densidad	0,9458 kg/m ³

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

- **Cálculo del valor de Rayleigh**

Aplicando la ecuación 20 se determina el número de Rayleigh con los siguientes datos:

- $g = 9,8 \text{ [m/s}^2\text{]}$
- $T_s = 200 \text{ [}^\circ\text{C]} = 473 \text{ [K]}$
- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $L = 0,53 \text{ [m]}$
- $\nu = 2,306 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$
- $\alpha = 3,243 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$
- $\beta = 1 / 384,5 \text{ K}$

$$R = \frac{9,8 \cdot \frac{1}{384,5} \cdot (473 - 296) \cdot 0,53^3}{2,306 \times 10^{-5} \cdot 3,243 \times 10^{-5}}$$

$$R = 898099294,2$$

- **Cálculo del valor de Nusselt**

Aplicando la ecuación 21 se determina el número de Nusselt con los siguientes datos:

- $R = 898099294,2$
- $Pra = 0,7111$

$$N = \left[0,825 + \frac{0,387 \cdot (898099294,2)^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{0,7111} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2$$

$$N = 116,52$$

- **Cálculo del valor del coeficiente por convección**

Aplicando la ecuación 22 se determina el valor del coeficiente por convección con los siguientes datos:

- $N = 116,52$
- $k = 0,03095 \text{ [W/m.K]}$
- $L = 0,53 \text{ [m]}$

$$h = \frac{116,52 \cdot 0,03095}{0,53}$$

$$h = 6,8 \frac{W}{m \cdot K}$$

- **Valor de las pérdidas de calor por convección**

Aplicando la ecuación 18 se determina el valor de la transferencia de calor mediante la convección con los siguientes datos:

- $T_a = 23 \text{ [}^\circ\text{C]} = 296 \text{ [K]}$
- $T_2 = 200 \text{ [}^\circ\text{C]} = 473 \text{ [K]}$
- $A = 0,25 \text{ [m}^2\text{]}$
- $h = 6,8 \text{ [W/m.K]}$

$$Q_{convección} = 0,25 \cdot 6,8 \cdot (473 - 296)$$

$$Q_{convección} = 300,9 \text{ W}$$

Mediante el proceso de la transferencia de calor por convección en la compuerta metálica del horno de crisol contiene pérdidas por el valor de 300,9 W en forma de calor.

10.1.9. Pérdidas de calor total

Tomando en consideración los cálculos de transferencia de calor por conducción y convección sobre los materiales refractarios y la compuerta metálica del horno de crisol, se realiza la sumatoria de las pérdidas totales de calor, aplicando la ecuación 23.

Datos:

- $Q_{\text{cond refra}} = 251,68 \text{ [W]}$
- $Q_{\text{cond comp}} = 1081,76 \text{ [W]}$

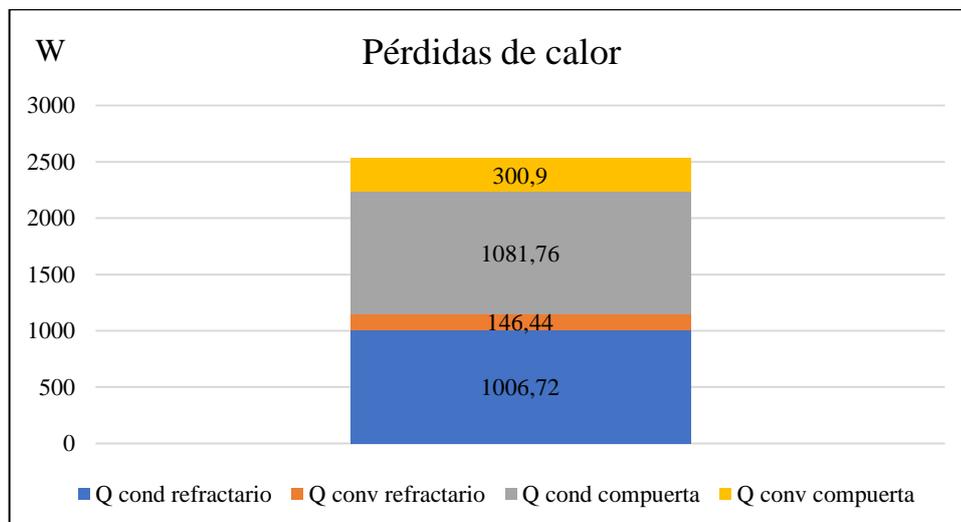
$$Q_{\text{perd}} = 4 \cdot (251,68) + 4 \cdot (36,61) + 1 \cdot (1081,76) + 1 \cdot (300,9)$$

$$Q_{\text{perd}} = 2535,82 \text{ W}$$

El valor de la cantidad de pérdidas por conducción y convección del horno de crisol es de 2535,82 W.

De la figura 37 se puede mencionar que los valores de la transferencia de calor por conducción y convección en la compuerta metálica del horno de crisol tienen valores superiores a las pérdidas por el material refractario, esto se da porque la puerta del horno no cuenta con ningún tipo de recubrimiento refractario lo que permite que la cantidad de pérdida de calor sea extensa.

Figura 37 Distribución de las pérdidas de calor



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

10.1.10. Valor total del calor que necesita el horno con pérdidas

Aplicando la ecuación 24 se tiene el valor total de energía calorífica que necesita el horno de crisol para cumplir de manera satisfactoria el proceso de función del aluminio.

Datos:

- $Q_{\text{perd}} = 2,55$ [kW]
- $Q_{\text{fund}} = 7,46$ [kW]

$$Q_T = 7,46 + 2,54$$

$$Q_T = 10 \text{ kW}$$

Se necesita un valor de 10 kW de calor para que el horno desarrolle su proceso de fundición del aluminio.

10.1.11. Valor del suministro de calor por fuente

Este valor de suministro tiene relación a la cantidad de calor que proporciona el carbón vegetal hacia el horno, para lo cual se utiliza el parámetro térmico “poder calorífico” de la tabla 15, como tiene un rango de valores se procede a elegir el valor medio, adicional se determinó que solamente se necesitó 1 kg de carbón para desarrollar el proceso mencionado.

Datos:

- $P_c = 30000$ [kJ/kg]
- $m = 1$ [kg]
- $t = 1200$ [s]

$$Q_{\text{suministro}} = \frac{30000 \cdot 1}{1200}$$

$$Q_{\text{suministro}} = 25 \text{ kW}$$

El valor de calor que proporciona el carbón vegetal es de 25 kW, es decir según los cálculos realizados el proceso solo necesita utilizar un valor de 10 kW de calor.

10.1.12. Valor del rendimiento del horno

Aplicando la ecuación 25 se determina el rendimiento del horno de crisol con los siguientes datos:

- $Q_{\text{suministro}} = 25 \text{ [kW]}$
- $Q_T = 10 \text{ [kW]}$

$$\eta = \frac{25 - 10}{25} \cdot 100 \%$$

$$\eta = 60 \%$$

El rendimiento del horno de crisol es del 60 %.

10.1.13. Cuadro de resumen de los resultados por ecuaciones

En la tabla 21 se tiene una descripción breve de los resultados obtenidos del análisis termodinámico del horno de crisol.

Tabla 21 Resumen de los resultados por ecuaciones

Calor de elevación 4280,64 kJ	Calor por unidad de tiempo del aluminio 7,46 kW
Calor para cambio de estado 2779 kJ	
Calor para vertido 1452,2 kJ	
Calor del crisol 4924,09 kJ	
Pérdidas por conducción del refractario 1006,76 W	Pérdidas totales 2,54 kW
Pérdidas por convección del refractario 146,44	
Pérdidas por conducción de la compuerta 1081,76 W	
Pérdidas por convección de la compuerta 300,09	
Calor por unidad de tiempo del aluminio 7,46 kW	Calor necesario para fundir aluminio 10 kW
Pérdidas totales 2,54 kW	

Calor necesario para fundir aluminio 10 kW	Rendimiento del horno 60 %
Suministro de calor 25 kW	

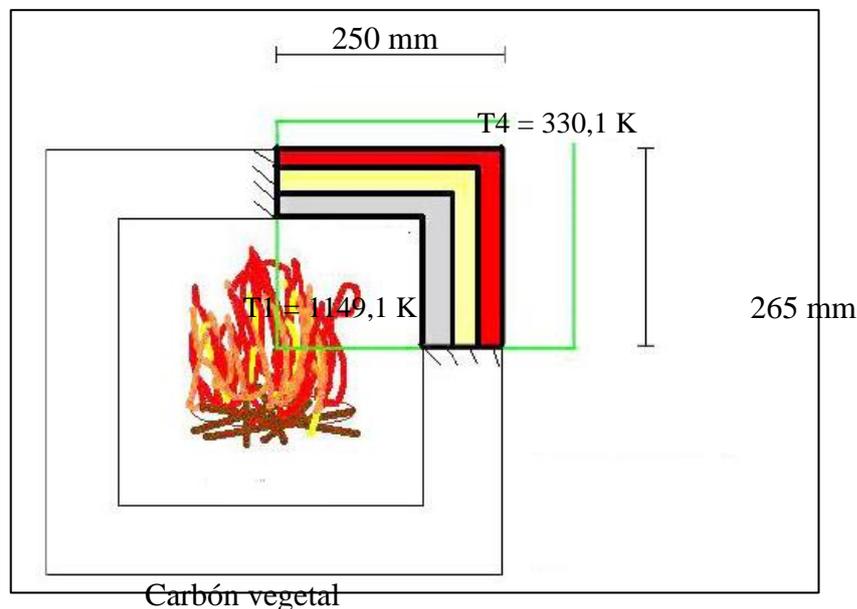
Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

10.2. Resolución por software

La distribución de las temperaturas en los distintos puntos del material refractario (ladrillo y manta cerámica) se conoce como temperatura nodal y se la determina mediante el uso de un software para simulación denominado “Ansys”. Para dar inicio con la simulación se toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se utiliza la técnica de simplificación utilizando simetría, es decir como el horno de crisol es de igual forma y tamaño en cada una de sus paredes, se puede determinar un análisis bidimensional como se presenta en la figura 38.

Figura 38 Análisis bidimensional del horno de crisol



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

- Las unidades se desarrollarán bajo el Sistema Internacional de Medida.
- La temperatura interior y exterior del horno de crisol permanecen constantes para el análisis.

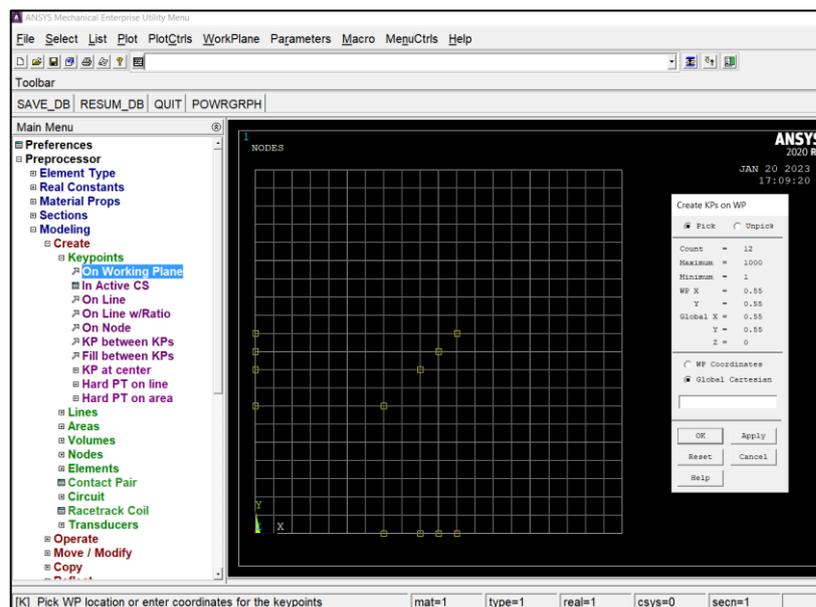
Una vez determinadas las condiciones iniciales para la simulación, es necesario conocer las propiedades de cada material refractario que se utilizó para el horno.

- **Ladrillo refractario interior (color plomo de la figura 36):**
 - Conductividad térmica: 0,25 W/m.K
 - Espesor: 14 cm
 - Temperatura interior: 1149,1 K
- **Manta cerámica (color amarillo de la figura 36):**
 - Conductividad térmica: 0,22 W/m.K
 - Espesor: 2,54 cm
- **Ladrillo refractario exterior (color rojo de la figura 36):**
 - Conductividad térmica: 0,25 W/m.K
 - Espesor: 6 cm
 - Temperatura exterior: 330 K

10.2.1. Modelado del horno de crisol

Una vez ingresado al software Ansys, se procede con el modelo bidimensional del horno de crisol utilizando los comandos de “keypoints” para realizar los puntos dentro del plano cuadrado en 2 dimensiones para determinar el contorno de cada uno de los materiales refractarios tomando en cuenta el valor del espesor de cada uno.

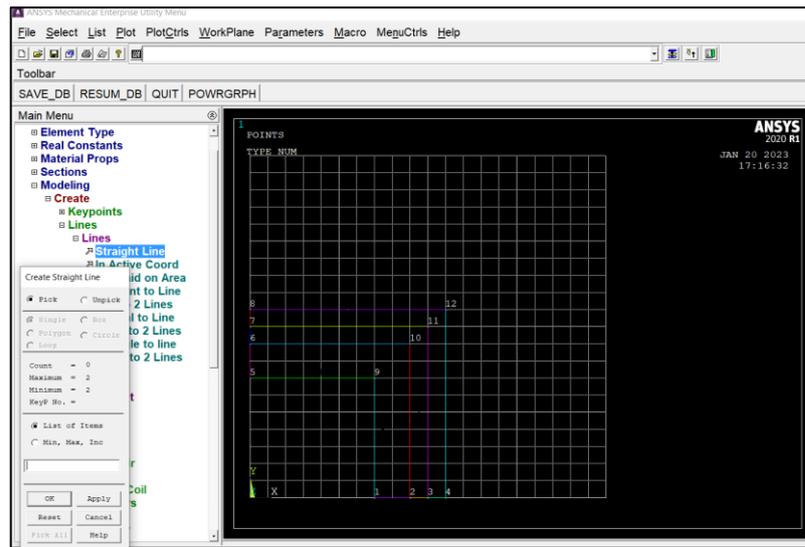
Figura 39 Creación de puntos en el plano 2D



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Una vez determinado los puntos esquineros de los materiales refractarios, se procede a unirlos mediante el comando “líneas” de tal manera que se observe la separación del material refractario con respecto a otro. En la figura 38 se tiene la unión de cada uno de los puntos realizados mediante líneas rectas, en donde se puede apreciar de mejor manera la separación de los materiales.

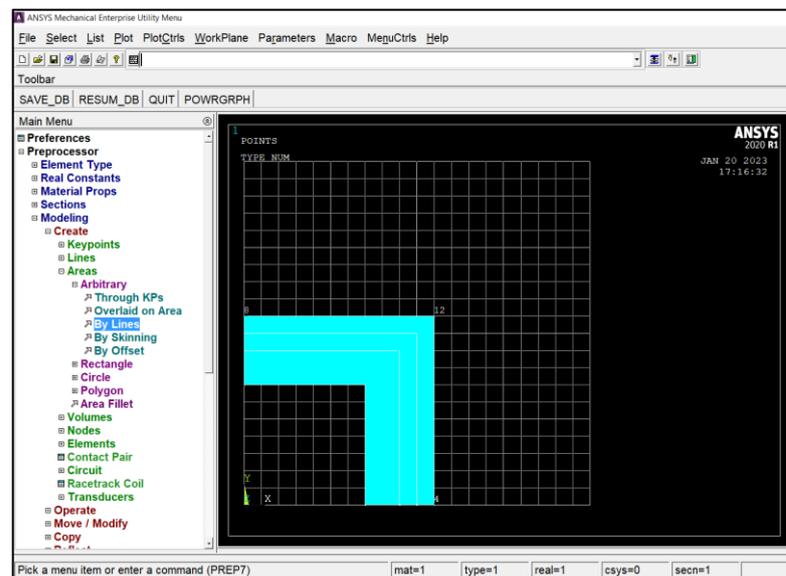
Figura 40 Creación de líneas en el plano 2D



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Es necesario realizar la partición de toda esta área, es decir separarlas en 3 áreas diferentes para cada uno de los materiales refractarios, para después definir sus propiedades térmicas, en la figura 41 se puede observar el modelo posterior a la partición de áreas.

Figura 41 Creación de áreas en el plano 2D

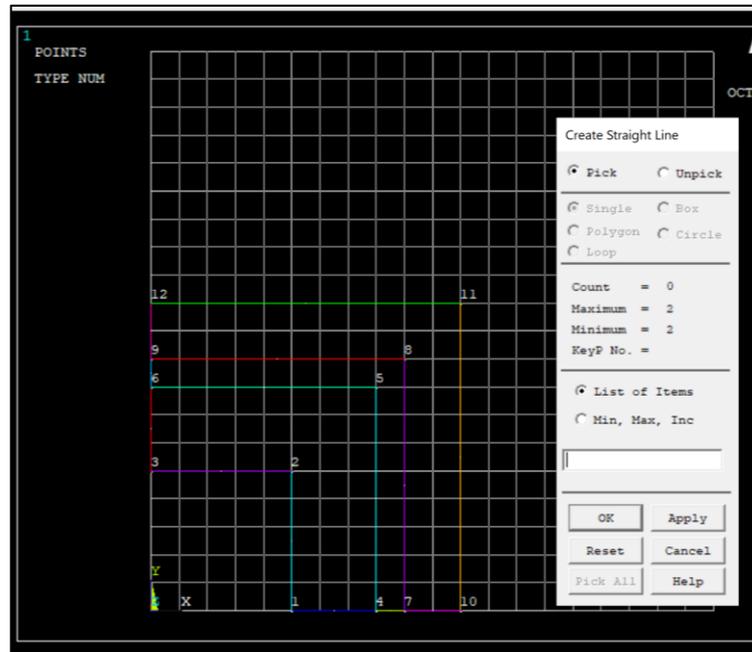


Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

10.2.2. Ingreso de propiedades

Antes de ingresar las propiedades térmicas de cada uno de los materiales refractarios, se procede a ingresar el espesor correspondiente a cada área como se observa en la figura 42.

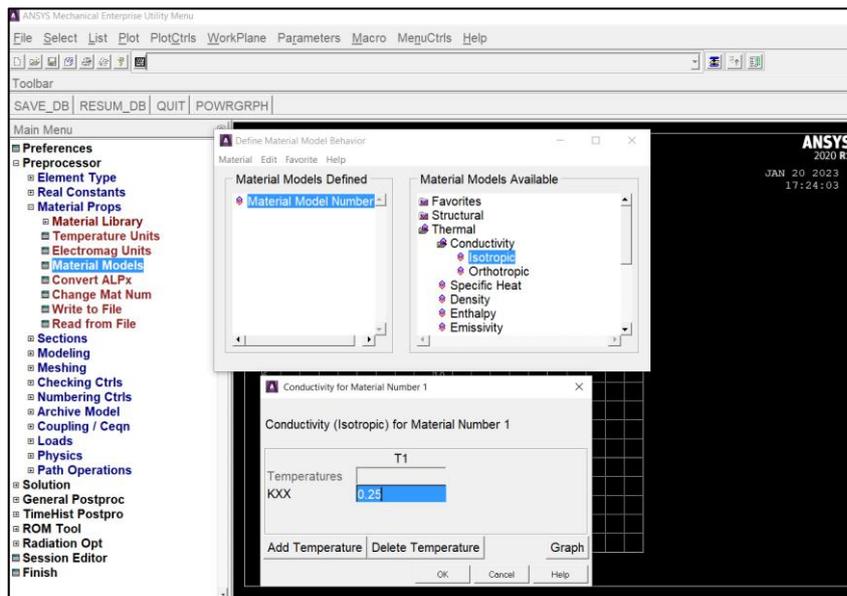
Figura 42 Separación de espesor de los 3 tipos de materiales refractarios



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

En la figura 43 se puede observar la ventana que permite el ingreso de la conductividad térmica de cada uno de los materiales refractarios.

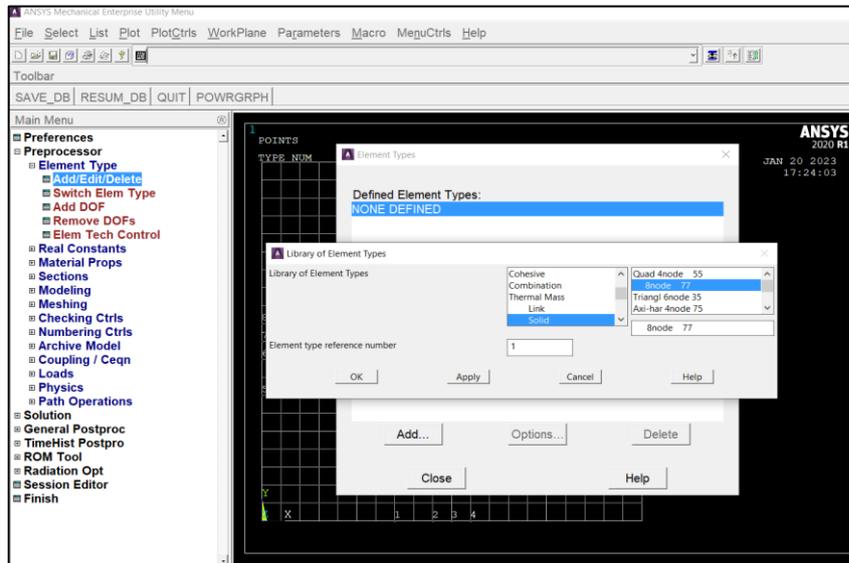
Figura 43 Ingreso de la conductividad térmica



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Una vez ingresados los valores de la conductividad térmica, el software tiene que entender que tipo de material está analizando, para lo cual, se define que es un material en estado sólido como se observa en la figura 44.

Figura 44 Definición del tipo de material

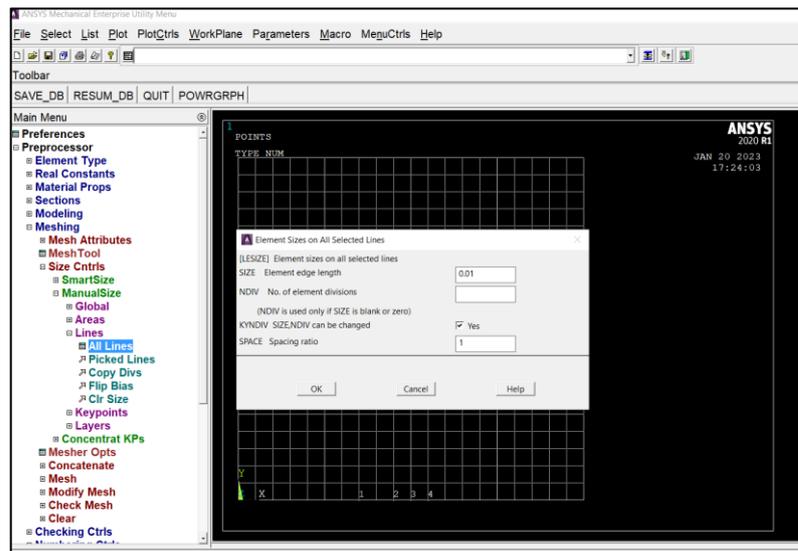


Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

10.2.3. Mallado del material aislante

En este apartado el software debe conocer como dividir cada una de las áreas de tal manera que tengan suficientes nodos o puntos para producir resultados precisos, para lo cual se crea un mallado con 0,01 m de separación, esto se puede observar en la figura 45.

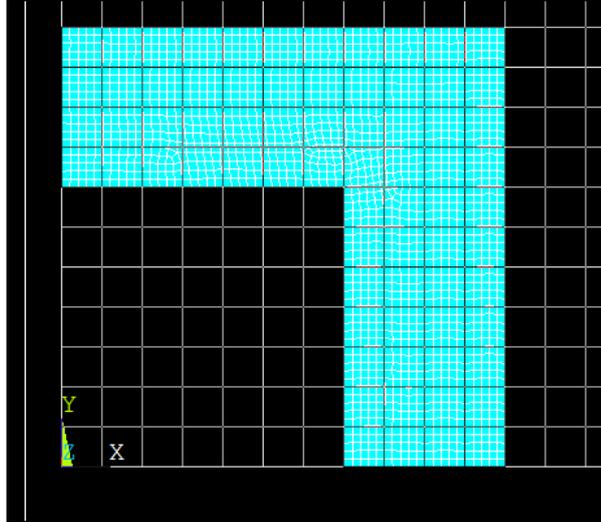
Figura 45 Ingreso del mallado



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

En la figura 46 se puede observar el resultado del mallado de cada una de las áreas correspondiente a cada material refractario.

Figura 46 Mallado del material aislante

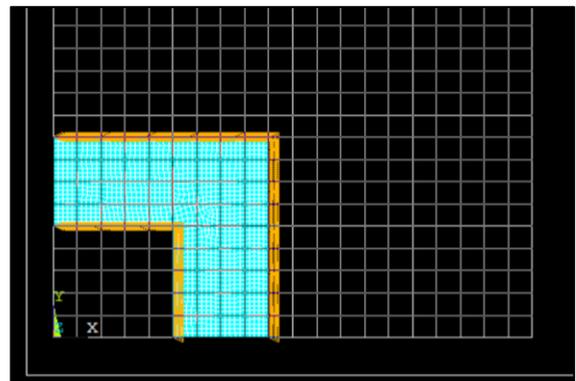
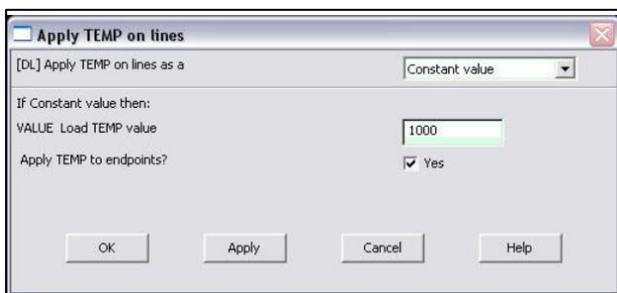


Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

10.2.4. Aplicación de temperatura constante

La temperatura va a permanecer constante en el interior del horno, así como en su exterior para lo cual es necesario que el software entienda esta instrucción. En la figura 47 (parte izquierda) se selecciona la opción de valores constantes y finalmente en la misma figura (parte derecha) se seleccionan las partes internas y externas donde la temperatura permanece constante.

Figura 47 Temperatura constante al interior y exterior



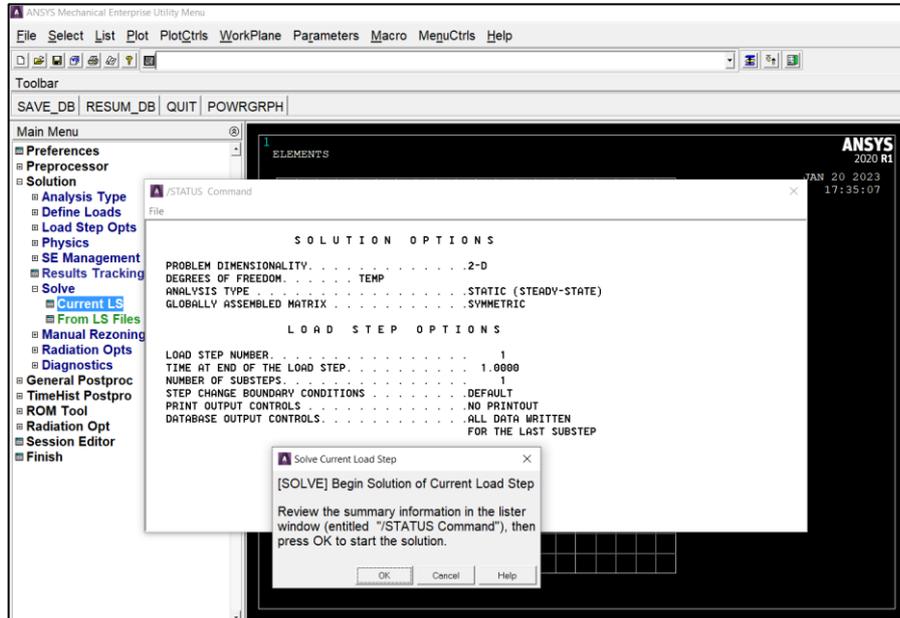
Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

10.2.5. Solución de la simulación

En la figura 48 se tiene el ingreso de la solución de la simulación, mientras que en la figura 49 se tiene el resultado de la simulación en donde se puede observar la cantidad de calor que se

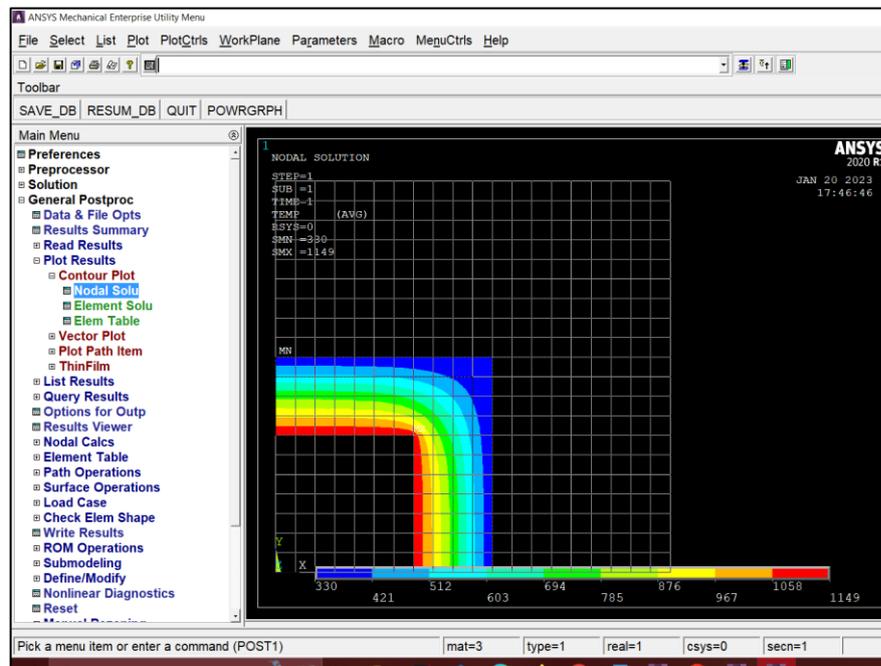
distribuye a lo largo de las paredes del material refractario del horno de crisol, en el anexo 5 se tiene un listado de temperaturas puntuales que arroja el software dentro de sus simulaciones.

Figura 48 Ingreso para la solución de la simulación



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Figura 49 Distribución de las temperaturas nodales



Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

11. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

El presupuesto del proyecto tiene algunos detalles económicos tomados en cuenta los cuales son: materiales indirectos, materiales directos y mano de obra. En la tabla 22 se detallan los costos indirectos.

Tabla 22 Costos indirectos

Detalle	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Transporte	20	\$ 2,50	\$ 50,00
Alimentación	20	\$ 4,00	\$ 80,00
TOTAL			\$ 130,00

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

11.1. Costos directos

En la tabla 23 se describe un listado de los costos directos utilizados para determinar el análisis termodinámico del proceso de fundición del aluminio.

Tabla 23 Costos directos

Detalle	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Adquisición del horno de crisol	1	\$ 800,00	\$ 800,00
Termómetro infrarrojo	1	\$ 40,00	\$ 40,00
Aluminio	7 kg	\$10,00	\$10,00
Carbón vegetal	5 kg	\$ 5,00	\$ 5,00
TOTAL			\$ 855,00

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

11.2. Costos de mano de obra

En la tabla 24 se describen los costos de mano de obra del proyecto.

Tabla 24 Costos directos

Detalle	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Modelación y simulación en dos dimensiones del horno de crisol	1	\$ 350,00	\$ 350,00
TOTAL			\$ 350,00

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

11.3. Presupuesto total

En la tabla 25 se describe el presupuesto total del proyecto de titulación considerando los costos indirectos, costos directos y mano de obra.

Tabla 25 Presupuesto anual

Detalle	Valor Total
Costos indirectos	\$ 130,00
Costos directos	\$ 855,00
Costo de mano de obra	\$ 350,00
TOTAL	\$ 1335,00

Fuente: Delgado W., Uyaguari B. (2023)

Para el desarrollo del proyecto de titulación denominado “Análisis termodinámico del proceso de fundición en un horno de crisol mediante simulación numérica” es necesario un presupuesto de mil trescientos treinta y cinco dólares americanos (\$ 1335,00)

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

12.1. Conclusiones

- Se analizó el estado del arte donde se analizó los procesos de fundición de metales, se observó acerca que se puede utilizar un horno de crisol que utiliza carbón vegetal como fuente de generación calorífica y además que para su construcción se puede utilizar material refractario.
- Se desarrolló el proceso de fundición del aluminio en donde se utilizaron las expresiones termodinámicas señalando que el aluminio conjuntamente con el crisol necesitan una cantidad de calor de 7,46 kW a un tiempo de 20 minutos que duró la fundición, se determinaron las pérdidas de calor por conducción y convección en los materiales refractarios y en la compuerta metálica obteniendo un total de 2,54 kW, de tal manera que se necesita una cantidad de calor de 10 kW para que el horno de crisol pueda cumplir con este proceso de fundición, es ahí que se analizó la fuente calorífica que tiene la capacidad de suministrar 25 kW, teniendo finalmente un rendimiento del 60 %.
- Se utilizó el software ANSYS Mechanical APDL versión educativa para determinar la distribución de las temperaturas a lo largo del material refractario, se utilizó la técnica de simplificación por simetría por tener igual forma y tamaño en cada una de las paredes del horno, la simulación parte con el ingreso de la temperatura interna del horno que es de 1149,1 K y la exterior es de 330,1 K, así como también la conductividad térmica que para el ladrillo refractario es de 0,25 W/m.K y para la manta cerámica es de 0,22 W/m.K, se definió un mallado de 0,01 m de separación y finalmente en el área del material refractario interior rodea una temperatura de 1058 K, en la manta cerámica se presenta un rango de temperaturas entre 694 K a 512 K y para el ladrillo exterior se presenta una temperatura de 400 K

12.2. Recomendaciones

- Se recomienda recubrir con material aislante térmico (ladrillo refractario y/o manta cerámica) la compuerta metálica del horno de crisol con la finalidad de reducir las pérdidas por convección y conducción en esa área, adicional realizar un análisis comparativo para verificar la variación del rendimiento.
- Se recomienda realizar el análisis termodinámico utilizando otro tipo de metal y un crisol de mayor capacidad de almacenamiento con la finalidad de comparar parámetros térmicos como la cantidad de calor necesaria y las pérdidas de calor, así como también el comportamiento de las temperaturas nodales a lo largo del material refractario.
- Se recomienda realiza una investigación de campo acerca del proceso de fundición del aluminio o de cualquier otro tipo de metal tomando en cuenta diferentes tipos de fuentes suministradoras de calor en estado gaseoso como el gas licuado de petróleo, gas natural, entre otros, en estado líquido, gasolina, diésel, entre otros, y por resistencias eléctricas.

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/39158/u821029.pdf?sequence=1>

Hernández, B. (04 de marzo de 2019). Análisis por Computadora del Proceso de Fundición y Selección de Materiales para el nuevo diseño de Armadura del Plenum del Gulfstream V. Obtenido de <https://repositorio.cetys.mx/handle/60000/1138>

HONGXING. (14 de diciembre de 2020). Horno de fundición y mantenimiento para metales no ferrosos. Obtenido de <http://heatingmelting.com/1-2-2-regenerative-aluminum-melting-furnaces.html>

Huaca, E. (10 de octubre de 2011). SIMULACIÓN MEDIANTE EL PROGRAMA VULCAN DE LA FUNDICIÓN DE TRES DIFERENTES GEOMETRÍAS EN ALUMINIO. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4327>

Incropera. (2002). Fundamentos de transferencia de calor.

LLanez, E., & Jami Jami, M. (10 de febrero de 2018). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLDE PERMANENTE PARA LA FABRICACIÓN DE BORNES DE BATERÍA AUTOMOTRICES. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2793>

López, J. (04 de junio de 2018). MATERIALES REFRACTARIOS PARA USOS EN LAS FUNDICIONES. Obtenido de <https://cecma.com.ar/wp-content/uploads/2019/04/presentacion-j-lopez-mat-refractarios-para-usos-en-las-fund-ferrosas.pdf>

Maldonado Cañamar, E. (23 de julio de 2022). Molde permanente para fundición de bolas de 5 pulgadas para molinos horizontales. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/12636>

Marcillo, H. F. (05 de agosto de 2020). MODELAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE LAS CONDICIONES DE REACCIÓN DE COMBUSTIÓN, DEL PROCESO DE FUSIÓN DE ACERO RECICLADO, CON GLP Y AIRE ENRIQUECIDO EN UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EN EL ÁREA DE ACERÍA DE ADELCA. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/23224/2/T-ESPEL-IPE-0057.pdf>

- Narvaez Cardenas, A. (10 de enero de 2016). Diseño, construcción y montaje de un horno tipo crisol con capacidad de 5kg, para aluminio. Obtenido de <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/433>
- Pando, F., & Zapatán, C. (14 de septiembre de 2012). ANÁLISIS DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO Y PROPUESTAS DE MEJORAS EN LA EFICIENCIA DE PRODUCCIÓN DE BASES DENTADAS EN LA EMPRESA PRESS FORJA S.A. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/2129/13/UPS-CT002396.pdf>
- Ratsa. (04 de julio de 2018). Refractarios. Obtenido de <https://www.ratsa.mx/producto/refractarios#>
- Reremsa. (28 de septiembre de 2020). EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE METALES. Obtenido de <https://www.elchatarrero.com/el-proceso-de-fundicion-de-metales/>
- Resistencias Tope. (14 de septiembre de 2017). Aplicación: Resistencias para hornos industriales. Obtenido de <https://www.resistenciastope.com/es/listado-aplicaciones/20-resistencias-para-hornos-industriales/>
- Rockwood Iglesias, R., Calle Calderón, P., & Cumbe Fárez, E. (08 de abril de 2017). Análisis del diseño estructural y los procesos de producción de aros para vehículos livianos. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6841>
- Rueda Guerrero, N. (14 de septiembre de 2017). Defectos en fundición muisca : análisis computacional y experimental del proceso de vaciado. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/34217>
- Serna Colunga, F. (13 de diciembre de 2019). Análisis de la transferencia de calor en hornos regenerativos para vidrios sódico-cálcicos. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/4836/>
- Téllez Martínez, J. S., & Vergara Hernández, H. (01 de mayo de 2021). Simulaciones numéricas por elementos discretos del sinterizado de sistemas complejos para la fabricación de materiales arquitecturados. Obtenido de <https://rinacional.tecnm.mx/handle/TecNM/1872>
- Tirado Gallo, I. (20 de julio de 2018). Evaluación del funcionamiento técnico del horno de cubilote en la fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad

de Ambato para la mejora de la eficiencia térmica. Propuesta de reformas técnicas al horno. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6060>

Toapanta Ramos, L. (09 de enero de 2016). Evaluación del funcionamiento técnico del horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, para la mejora en la eficiencia térmica, durante el año 2015. Propuesta de reformas técnicas en el horno. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6548>

TORRENT. (12 de enero de 2020). La evolución de una saga centenaria ligada al mundo de la fundición. Obtenido de <https://economia3.com/2020/01/12/242051-fundhialmet-la-evolucion-de-una-saga-centenaria-ligada-al-mundo-de-la-fundicion/>

Vallejo, J. (08 de mayo de 2013). Simulación de fundición por ordenador mediante QuikCAST. Obtenido de <https://zaguan.unizar.es/record/10542/files/TAZ-PFC-2013-240.pdf>

Vargas Barreda, D. (15 de enero de 2015). Estudio de la solidificación en fundiciones vermiculares para la fabricación de autopartes. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40454419/Diseno_y_construccion_de_una_bobina_de_calentamiento-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1667405464&Signature=http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2610

Vega Cardenal, E. (12 de enero de 2021). Diseño y construcción de horno basculante a gas para la fundición de metales blandos. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/37775/2021edisonvega.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

14. ANEXOS

	<p>Anexo 1. Hoja de vida del tutor</p>	<p>1/1</p>																					
<p style="text-align: center;">JOSE WILLIAMS MORALES CEVALLOS</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="339 616 545 878">  </div> <div data-bbox="614 616 1300 878"> <p>Datos Personales</p> <p>Dirección: AV. ANTONIA VELA 18-28 y BENJAMÍN TERÁN</p> <p>Teléfono (s): 032807978 - 032804019 - 0985346678</p> <p>Cédula de identidad: 0502675424</p> <p>Correo electrónico: pepewmoralesc@yahoo.com</p> <p>Ciudad / Provincia / País: LATACUNGA / COTOPAXI / ECUADOR</p> </div> </div> <p>Instrucción Formal</p> <hr/> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 15%;">(2 AÑOS)</td> <td style="width: 60%;">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</td> <td style="width: 25%; text-align: right;">CUARTO NIVEL - MAESTRIA</td> </tr> <tr> <td></td> <td>INGENIERO EN ELECTROMECHANICA</td> <td style="text-align: right;">TERCER NIVEL</td> </tr> <tr> <td>(5 AÑOS)</td> <td>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>MECANICO INDUSTRIAL</td> <td style="text-align: right;">SECUNDARIA</td> </tr> <tr> <td>(6 AÑOS)</td> <td>COLEGIO TÉCNICO INDUSTRIAL RAMÓN BARBA NARANJO</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: right;">PRIMARIA /BÁSICA ELEMENTAL</td> </tr> <tr> <td>(6 AÑOS)</td> <td>ESCUELA FISCAL ISIDRO AYORA</td> <td></td> </tr> </table> <p>CERTIFICADO DE IDIOMAS</p> <hr/> <p>Certificado: IDIOMA INGLÉS B1</p> <p>Otorgada por: Instituto Superior Tecnológico Cotopaxi</p> <p>Año: 2021</p> <p>Certificaciones Por Competencias Laborales</p> <hr/> <p>Certificado: PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES: ENERGÍA ELÉCTRICA</p> <p>Otorgada por: M&V INGENIEROS / MINISTERIO DE TRABAJO</p> <p>Certificado: PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES: CONSTRUCCIÓN Y OBRAS PÚBLICAS</p>			(2 AÑOS)	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	CUARTO NIVEL - MAESTRIA		INGENIERO EN ELECTROMECHANICA	TERCER NIVEL	(5 AÑOS)	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI			MECANICO INDUSTRIAL	SECUNDARIA	(6 AÑOS)	COLEGIO TÉCNICO INDUSTRIAL RAMÓN BARBA NARANJO				PRIMARIA /BÁSICA ELEMENTAL	(6 AÑOS)	ESCUELA FISCAL ISIDRO AYORA	
(2 AÑOS)	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	CUARTO NIVEL - MAESTRIA																					
	INGENIERO EN ELECTROMECHANICA	TERCER NIVEL																					
(5 AÑOS)	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI																						
	MECANICO INDUSTRIAL	SECUNDARIA																					
(6 AÑOS)	COLEGIO TÉCNICO INDUSTRIAL RAMÓN BARBA NARANJO																						
		PRIMARIA /BÁSICA ELEMENTAL																					
(6 AÑOS)	ESCUELA FISCAL ISIDRO AYORA																						

	Anexo 2. Hoja de vida de los investigadores	1/1																
<p>□ DATOS PERSONALES</p>																		
<table border="1"> <tr> <td>Nombres</td> <td>Wilson Bladimir</td> </tr> <tr> <td>Apellidos</td> <td>Delgado Pullaguari</td> </tr> <tr> <td>Lugar y fecha de nacimiento</td> <td>27 de Enero de 1999</td> </tr> <tr> <td>Cédula de ciudadanía</td> <td>1900774041</td> </tr> <tr> <td>Estado civil</td> <td>Soltero</td> </tr> <tr> <td>Dirección domiciliaria</td> <td>Loja-Loja, Colón Castro y Eduardo Mora Moreno.</td> </tr> <tr> <td>Teléfonos de contacto</td> <td>0979727619</td> </tr> <tr> <td>Email</td> <td>Wilson.delgado4041@utc.edu.ec</td> </tr> </table>		Nombres	Wilson Bladimir	Apellidos	Delgado Pullaguari	Lugar y fecha de nacimiento	27 de Enero de 1999	Cédula de ciudadanía	1900774041	Estado civil	Soltero	Dirección domiciliaria	Loja-Loja, Colón Castro y Eduardo Mora Moreno.	Teléfonos de contacto	0979727619	Email	Wilson.delgado4041@utc.edu.ec	
Nombres	Wilson Bladimir																	
Apellidos	Delgado Pullaguari																	
Lugar y fecha de nacimiento	27 de Enero de 1999																	
Cédula de ciudadanía	1900774041																	
Estado civil	Soltero																	
Dirección domiciliaria	Loja-Loja, Colón Castro y Eduardo Mora Moreno.																	
Teléfonos de contacto	0979727619																	
Email	Wilson.delgado4041@utc.edu.ec																	
<p>Estudios Realizados</p>																		
<table border="1"> <tr> <td>Primarios</td> <td>Escuela “Eloy Alfaro”</td> </tr> <tr> <td>Secundarios</td> <td>Colegio Fiscomisional “Madre Bernarda”</td> </tr> <tr> <td>Superiores</td> <td> <ul style="list-style-type: none"> • Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná. </td> </tr> <tr> <td></td> <td> <p>Certificados obtenidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones eléctricas domiciliarias. • IV Congreso Internacional de Investigación Científica UTC-La Maná 2019. • Curso de auxiliar en domótica. • VII Congreso Internacional de Investigación Científica-2023. • I Congreso Internacional Multidisciplinario de Vinculación con la Sociedad “Experiencias, resultados e impactos de los Proyectos de Vinculación de las IES. </td> </tr> </table>	Primarios	Escuela “Eloy Alfaro”	Secundarios	Colegio Fiscomisional “Madre Bernarda”	Superiores	<ul style="list-style-type: none"> • Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná. 		<p>Certificados obtenidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones eléctricas domiciliarias. • IV Congreso Internacional de Investigación Científica UTC-La Maná 2019. • Curso de auxiliar en domótica. • VII Congreso Internacional de Investigación Científica-2023. • I Congreso Internacional Multidisciplinario de Vinculación con la Sociedad “Experiencias, resultados e impactos de los Proyectos de Vinculación de las IES. 										
Primarios	Escuela “Eloy Alfaro”																	
Secundarios	Colegio Fiscomisional “Madre Bernarda”																	
Superiores	<ul style="list-style-type: none"> • Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná. 																	
	<p>Certificados obtenidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones eléctricas domiciliarias. • IV Congreso Internacional de Investigación Científica UTC-La Maná 2019. • Curso de auxiliar en domótica. • VII Congreso Internacional de Investigación Científica-2023. • I Congreso Internacional Multidisciplinario de Vinculación con la Sociedad “Experiencias, resultados e impactos de los Proyectos de Vinculación de las IES. 																	
<p>Idiomas</p>																		
<ul style="list-style-type: none"> • Español • Inglés 																		

□ **DATOS PERSONALES**



Nombres	Brayan Javier
Apellidos	Uyaguari Ruiz
Lugar y fecha de nacimiento	17 de Febrero del 2000
Cédula de ciudadanía	1150082590
Estado civil	Soltero
Dirección domiciliaria	Loja-El Cisne, José María Cueva.
Teléfonos de contacto	0979727619
Email	Brayan.uyaguari2259@utc.edu.ec

Estudios Realizados

Primarios	Escuela mixta "Abdón Calderón"
Secundarios	Unidad educativa "El Cisne"
Superiores	<ul style="list-style-type: none"> • Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná.
	<p>Certificados obtenidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones eléctricas domiciliarias. • IV Congreso Internacional de Investigación Científica UTC-La Maná 2019. • Curso de auxiliar en domótica. • VII Congreso Internacional de Investigación Científica-2023. • I Congreso Internacional Multidisciplinario de Vinculación con la Sociedad "Experiencias, resultados e impactos de los Proyectos de Vinculación de las IES.

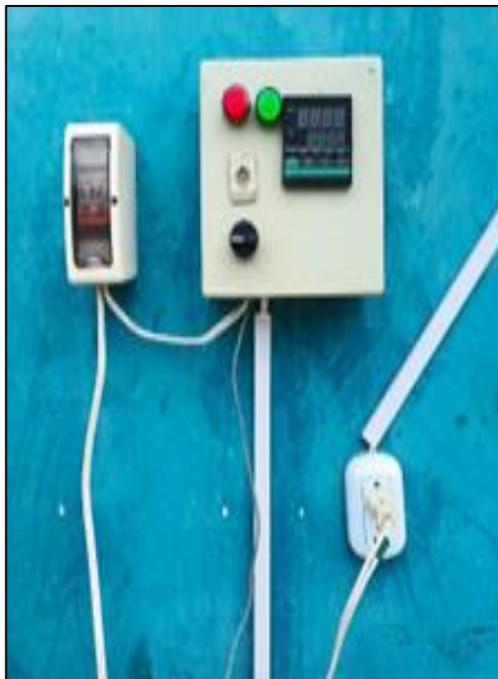
Idiomas

- Español
- Inglés



Anexo 3. Proceso de fundición del aluminio

1/1





Anexo 4. Propiedades del aire a 1 ATM de presión.

1/1

TABLA B-6

Propiedades del aire a 1 atm de presión

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $C_p, \text{J/kg}\cdot\text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m}\cdot\text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m}\cdot\text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr
-150	2,866	983	0,01171	$4,158 \times 10^{-6}$	$8,636 \times 10^{-6}$	$3,013 \times 10^{-6}$	0,7246
-100	2,038	966	0,01582	$8,036 \times 10^{-6}$	$1,189 \times 10^{-6}$	$5,837 \times 10^{-6}$	0,7263
-50	1,582	999	0,01979	$1,525 \times 10^{-5}$	$1,474 \times 10^{-5}$	$9,319 \times 10^{-6}$	0,7440
-40	1,514	1002	0,02057	$1,356 \times 10^{-5}$	$1,527 \times 10^{-5}$	$1,008 \times 10^{-5}$	0,7436
-30	1,451	1004	0,02134	$1,465 \times 10^{-5}$	$1,579 \times 10^{-5}$	$1,087 \times 10^{-5}$	0,7425
-20	1,394	1005	0,02211	$1,578 \times 10^{-5}$	$1,630 \times 10^{-5}$	$1,169 \times 10^{-5}$	0,7408
-10	1,341	1006	0,02288	$1,696 \times 10^{-5}$	$1,680 \times 10^{-5}$	$1,252 \times 10^{-5}$	0,7387
0	1,292	1006	0,02364	$1,818 \times 10^{-5}$	$1,729 \times 10^{-5}$	$1,338 \times 10^{-5}$	0,7362
5	1,269	1006	0,02401	$1,880 \times 10^{-5}$	$1,754 \times 10^{-5}$	$1,382 \times 10^{-5}$	0,7350
10	1,246	1006	0,02439	$1,944 \times 10^{-5}$	$1,778 \times 10^{-5}$	$1,426 \times 10^{-5}$	0,7336
15	1,225	1007	0,02476	$2,009 \times 10^{-5}$	$1,802 \times 10^{-5}$	$1,470 \times 10^{-5}$	0,7323
20	1,204	1007	0,02514	$2,074 \times 10^{-5}$	$1,825 \times 10^{-5}$	$1,516 \times 10^{-5}$	0,7309
25	1,184	1007	0,02551	$2,141 \times 10^{-5}$	$1,849 \times 10^{-5}$	$1,562 \times 10^{-5}$	0,7296
30	1,164	1007	0,02588	$2,208 \times 10^{-5}$	$1,872 \times 10^{-5}$	$1,608 \times 10^{-5}$	0,7282
35	1,145	1007	0,02625	$2,277 \times 10^{-5}$	$1,895 \times 10^{-5}$	$1,655 \times 10^{-5}$	0,7268
40	1,127	1007	0,02662	$2,346 \times 10^{-5}$	$1,918 \times 10^{-5}$	$1,702 \times 10^{-5}$	0,7255
45	1,109	1007	0,02699	$2,416 \times 10^{-5}$	$1,941 \times 10^{-5}$	$1,750 \times 10^{-5}$	0,7241
50	1,092	1007	0,02735	$2,487 \times 10^{-5}$	$1,963 \times 10^{-5}$	$1,798 \times 10^{-5}$	0,7228
60	1,059	1007	0,02808	$2,632 \times 10^{-5}$	$2,008 \times 10^{-5}$	$1,896 \times 10^{-5}$	0,7202
70	1,028	1007	0,02881	$2,780 \times 10^{-5}$	$2,052 \times 10^{-5}$	$1,995 \times 10^{-5}$	0,7177
80	0,9994	1008	0,02953	$2,931 \times 10^{-5}$	$2,096 \times 10^{-5}$	$2,097 \times 10^{-5}$	0,7154
90	0,9718	1008	0,03024	$3,086 \times 10^{-5}$	$2,139 \times 10^{-5}$	$2,201 \times 10^{-5}$	0,7132
100	0,9458	1009	0,03095	$3,243 \times 10^{-5}$	$2,181 \times 10^{-5}$	$2,306 \times 10^{-5}$	0,7111
120	0,8977	1011	0,03235	$3,565 \times 10^{-5}$	$2,264 \times 10^{-5}$	$2,522 \times 10^{-5}$	0,7073
140	0,8542	1013	0,03374	$3,898 \times 10^{-5}$	$2,345 \times 10^{-5}$	$2,745 \times 10^{-5}$	0,7041
160	0,8148	1016	0,03511	$4,241 \times 10^{-5}$	$2,420 \times 10^{-5}$	$2,975 \times 10^{-5}$	0,7014
180	0,7788	1019	0,03646	$4,593 \times 10^{-5}$	$2,504 \times 10^{-5}$	$3,212 \times 10^{-5}$	0,6992
200	0,7459	1023	0,03779	$4,954 \times 10^{-5}$	$2,577 \times 10^{-5}$	$3,455 \times 10^{-5}$	0,6974
250	0,6746	1033	0,04104	$5,890 \times 10^{-5}$	$2,760 \times 10^{-5}$	$4,091 \times 10^{-5}$	0,6946
300	0,6158	1044	0,04418	$6,871 \times 10^{-5}$	$2,934 \times 10^{-5}$	$4,765 \times 10^{-5}$	0,6935
350	0,5664	1056	0,04721	$7,892 \times 10^{-5}$	$3,101 \times 10^{-5}$	$5,475 \times 10^{-5}$	0,6937
400	0,5243	1069	0,05015	$8,951 \times 10^{-5}$	$3,261 \times 10^{-5}$	$6,219 \times 10^{-5}$	0,6948
450	0,4880	1081	0,05298	$1,004 \times 10^{-4}$	$3,415 \times 10^{-5}$	$6,997 \times 10^{-5}$	0,6965
500	0,4565	1093	0,05572	$1,117 \times 10^{-4}$	$3,563 \times 10^{-5}$	$7,806 \times 10^{-5}$	0,6986
600	0,4042	1115	0,06093	$1,352 \times 10^{-4}$	$3,846 \times 10^{-5}$	$9,515 \times 10^{-5}$	0,7037
700	0,3627	1135	0,06581	$1,598 \times 10^{-4}$	$4,111 \times 10^{-5}$	$1,133 \times 10^{-4}$	0,7092
800	0,3289	1153	0,07037	$1,855 \times 10^{-4}$	$4,362 \times 10^{-5}$	$1,326 \times 10^{-4}$	0,7149
900	0,3008	1169	0,07465	$2,122 \times 10^{-4}$	$4,600 \times 10^{-5}$	$1,529 \times 10^{-4}$	0,7206
1000	0,2772	1184	0,07868	$2,398 \times 10^{-4}$	$4,826 \times 10^{-5}$	$1,741 \times 10^{-4}$	0,7260
1500	0,1990	1234	0,09599	$3,908 \times 10^{-4}$	$5,817 \times 10^{-5}$	$2,922 \times 10^{-4}$	0,7478
2000	0,1553	1264	0,11113	$5,664 \times 10^{-4}$	$6,630 \times 10^{-5}$	$4,270 \times 10^{-4}$	0,7539

Nota: Para gases ideales, C_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P distinta a 1 atm se determinan cuando se multiplican los valores de ρ a la temperatura dada por P (en atm) y cuando se divide ν y α entre P (en atm)

Fuente: Datos generados a partir del Software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Originalmente: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8

	Anexo 5. Datos técnicos del material refractario.	1/1
---	---	-----

	HOJA DE DATOS DE APLICACIÓN	996
MARCA: CERABOND-40-S		Edición: 12 de Agosto, 2011
Praça Louis Ensch, 240 P.O. Box 25 32210-050 Cidade Industrial – Contagem – MG – Brasil		Teléfono: + 55 31 3368 1228 Fax: + 55 31 3333 0768 e-mail: export@magnesita.com.br

DESCRIPCIÓN TÉCNICA

Mortero refractario de sílice-alúmina, seco, pega al aire.
Temperatura máxima de uso: 1550°C.

PRINCIPALES APLICACIONES

Asentamiento de ladrillos y material aislante, ambos de sílice-alúmina.

PLAZO DE ALMACENAMIENTO

El plazo de almacenamiento de 365 días es el período de tiempo durante el cual el producto, en su embalaje original y almacenado en condiciones adecuadas, mantiene sus características esenciales de aplicación y desempeño, sin modificaciones que contraindiquen su uso.
Para obtener informaciones adicionales consulte el Manual de Embalaje de Magnesita Refratários S.A.

MÉTODOS DE APLICACIÓN

-Cuidados:

Durante el manejo y carga del producto evitar generación de polvo. Usar un respirador con filtro mecánico, guantes, gafas, vestimenta adecuada y demás equipos de seguridad. No permitir el contacto del producto con el cuerpo. Para obtener informaciones adicionales consultar la Hoja de Seguridad 996.

-Equipo de mezcla:

Usar mezclador de muela o palas de raspar. Para mezcla con las manos se puede utilizar caja de albañil.

-Humidificación y aplicación:

Después de cargar el producto en el contenedor, agregar agua potable y mezclar durante 10 minutos al menos. Asegurar una consistencia cremosa y homogénea, con buena trabajabilidad.

Cuchara – agregar 24 hasta 28 litros de agua potable por cada 100kg del producto seco y mezclar durante 10 minutos al menos.

Relleno de juntas – diluir el mortero con agua potable y extender horizontalmente en la superficie con utilización de una paleta.

Pintura refractaria – diluir el mortero con agua potable y aplicar con un cepillo o por pulverización. Para obtener una cobertura perfecta, la sugerencia es aplicar 3 capas del producto con un intervalo de tiempo adecuado entre las aplicaciones para obtener una buena pega.

-Secado y calentamiento:

Deben ser tomados acorde la curva de secado y calentamiento del equipo.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Las informaciones adicionales de este folleto se basan en el estado de la técnica de nuestro conocimiento. Se suministran de buena fe, con el objeto de optimizar el desempeño del producto, no se deben confundir con garantías y podrán sufrir modificaciones sin aviso previo. Contacte nuestra área comercial.

APROBACIÓN

Centro de Investigaciones y Desarrollo

	<p>Anexo 6. Datos técnicos del material refractario (Manta cerámica)</p>	<p>1/1</p>																																																												
<h2>MAXIAL 42-M</h2>																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Información general</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Clasificación</td> <td>Producto de Chamota tipo FC40 ISO 10081-1</td> </tr> <tr> <td>Materia prima</td> <td>Chamota</td> </tr> <tr> <td>Tipo de aglomeración</td> <td>Cerámico</td> </tr> <tr> <td>Información adicional</td> <td>alta resistencia a CO</td> </tr> </tbody> </table>			Información general		Clasificación	Producto de Chamota tipo FC40 ISO 10081-1	Materia prima	Chamota	Tipo de aglomeración	Cerámico	Información adicional	alta resistencia a CO																																																		
Información general																																																														
Clasificación	Producto de Chamota tipo FC40 ISO 10081-1																																																													
Materia prima	Chamota																																																													
Tipo de aglomeración	Cerámico																																																													
Información adicional	alta resistencia a CO																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Análisis Químicos</th> </tr> <tr> <th>Al₂O₃</th> <th>Fe₂O₃</th> <th>SiO₂</th> <th>TiO₂</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>44.0%</td> <td>1.4%</td> <td>51.0%</td> <td>2.3%</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Determinado sobre muestra calcinada (1025 °C / 1877 °F) según EN ISO 12677</td> </tr> </tbody> </table>			Análisis Químicos				Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	44.0%	1.4%	51.0%	2.3%	Determinado sobre muestra calcinada (1025 °C / 1877 °F) según EN ISO 12677																																															
Análisis Químicos																																																														
Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂																																																											
44.0%	1.4%	51.0%	2.3%																																																											
Determinado sobre muestra calcinada (1025 °C / 1877 °F) según EN ISO 12677																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Propiedades físicas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Densidad aparente</td> <td>2,28</td> <td>[g/cm³]</td> <td>EN 993-1</td> </tr> <tr> <td>Porosidad abierta</td> <td>18,0</td> <td>[vol%]</td> <td>EN 993-1</td> </tr> <tr> <td>Resistencia a la comp. en frío</td> <td>50,0</td> <td>[N/mm²]</td> <td>EN 993-5</td> </tr> <tr> <td>Resist. a la flexión en frío</td> <td>8,0</td> <td>[N/mm²]</td> <td>EN 993-6</td> </tr> <tr> <td>Res. a la flex.en cal.(1250 °C / 2282 °F)</td> <td>2,8</td> <td>[N/mm²]</td> <td>EN 993-7</td> </tr> <tr> <td>Variación perm. lin. (1400 °C / 2552 °F)</td> <td>0,45</td> <td>[%]</td> <td>EN 993-10</td> </tr> <tr> <td>Refractariedad bajo carga T_{0,5}</td> <td>1300</td> <td>[°C]</td> <td>ISO 1893</td> </tr> <tr> <td>- con carga</td> <td>0,200</td> <td>[N/mm²]</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Res. al choque térmico agua</td> <td>30</td> <td>[ciclos]</td> <td>DIN 51068-1</td> </tr> <tr> <td>Conductividad térmica</td> <td>500 °C / 932 °F</td> <td>1,30</td> <td>[W/mK] Dr. Klasse</td> </tr> <tr> <td></td> <td>750 °C / 1382 °F</td> <td>1,35</td> <td>[W/mK] Dr. Klasse</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1000 °C / 1832 °F</td> <td>1,40</td> <td>[W/mK] Dr. Klasse</td> </tr> <tr> <td>CO-resistencia (clase)</td> <td>A</td> <td></td> <td>ASTM C288</td> </tr> <tr> <td>Módulo de deformación</td> <td>10.000</td> <td>[N/mm²]</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			Propiedades físicas				Densidad aparente	2,28	[g/cm ³]	EN 993-1	Porosidad abierta	18,0	[vol%]	EN 993-1	Resistencia a la comp. en frío	50,0	[N/mm ²]	EN 993-5	Resist. a la flexión en frío	8,0	[N/mm ²]	EN 993-6	Res. a la flex.en cal.(1250 °C / 2282 °F)	2,8	[N/mm ²]	EN 993-7	Variación perm. lin. (1400 °C / 2552 °F)	0,45	[%]	EN 993-10	Refractariedad bajo carga T_{0,5}	1300	[°C]	ISO 1893	- con carga	0,200	[N/mm ²]		Res. al choque térmico agua	30	[ciclos]	DIN 51068-1	Conductividad térmica	500 °C / 932 °F	1,30	[W/mK] Dr. Klasse		750 °C / 1382 °F	1,35	[W/mK] Dr. Klasse		1000 °C / 1832 °F	1,40	[W/mK] Dr. Klasse	CO-resistencia (clase)	A		ASTM C288	Módulo de deformación	10.000	[N/mm ²]	
Propiedades físicas																																																														
Densidad aparente	2,28	[g/cm ³]	EN 993-1																																																											
Porosidad abierta	18,0	[vol%]	EN 993-1																																																											
Resistencia a la comp. en frío	50,0	[N/mm ²]	EN 993-5																																																											
Resist. a la flexión en frío	8,0	[N/mm ²]	EN 993-6																																																											
Res. a la flex.en cal.(1250 °C / 2282 °F)	2,8	[N/mm ²]	EN 993-7																																																											
Variación perm. lin. (1400 °C / 2552 °F)	0,45	[%]	EN 993-10																																																											
Refractariedad bajo carga T_{0,5}	1300	[°C]	ISO 1893																																																											
- con carga	0,200	[N/mm ²]																																																												
Res. al choque térmico agua	30	[ciclos]	DIN 51068-1																																																											
Conductividad térmica	500 °C / 932 °F	1,30	[W/mK] Dr. Klasse																																																											
	750 °C / 1382 °F	1,35	[W/mK] Dr. Klasse																																																											
	1000 °C / 1832 °F	1,40	[W/mK] Dr. Klasse																																																											
CO-resistencia (clase)	A		ASTM C288																																																											
Módulo de deformación	10.000	[N/mm ²]																																																												



Anexo 7. Distribución de temperaturas a lo largo del material refractario

1/1

PRINT TEMP NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

NODE	TEMP	NODE	TEMP
1	1149.0	5539	337.69
2	1149.0	5540	339.25
3	1149.0	5541	340.83
4	1149.0	5542	342.46
5	1149.0	5543	344.01
6	1149.0	5544	345.60
7	1149.0	5545	347.20
8	1149.0	5546	348.79
9	1149.0	5547	350.85
10	1149.0	5548	352.38
11	1149.0	5549	353.87
12	1149.0	5550	355.31
13	1149.0	5551	356.70
14	1149.0	5552	358.02
15	1149.0	5553	359.27
16	1149.0	5554	360.46
17	1149.0	5555	361.57
18	1149.0	5556	362.60
19	1149.0	5557	363.56
20	1149.0	5558	364.44
21	1149.0	5559	365.24
22	1149.0	5560	365.96
23	1149.0	5561	366.62
24	1149.0	5562	367.20
25	1149.0	5563	367.72
26	1149.0	5564	368.18
27	1149.0	5565	368.59
28	1149.0	5566	368.94
29	1149.0	5567	369.26
30	1149.0	5568	369.53
31	1149.0	5569	369.77
32	1149.0	5570	369.97
33	1149.0	5571	370.15
34	1149.0	5572	370.30
35	1149.0	5573	370.43
36	1149.0	5574	370.54
37	1149.0	5575	370.64
38	1149.0	5576	370.72
39	1149.0	5577	370.79

	<p>Anexo 8. Manual de puesta en marcha del horno de crisol</p>	<p>1/1</p>
<p>Para la puesta en marcha del horno de crisol, previamente el operario debe de tener en cuenta una serie de pasos a seguir.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paso N.º 1: Verificar la presencia de tensión. <p>El operario debe verificar si en la caja térmica existe la presencia de tensión (110 Vac), para ello se debe destapar la caja y colocar el multímetro en la opción de tensión en corriente alterna y proceder a realizar la medición.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paso N.º 2: Conexiones primarias. <p>El operario debe realizar la respectiva conexión primaria que corresponde colocar dos conductores eléctricos (fase y neutro) de la caja térmica hacia la parte superior de la protección eléctrica.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paso N.º 3: Encender la protección eléctrica. <p>En la caja del interruptor termomagnético, el operario debe colocarlo en la posición de encendido (ON) y posterior a ello realizar una medición de presencia de tensión en los bornes de la parte inferior de la protección eléctrica.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paso N.º 4: Colocación de la fuente calorífica. <p>El operador debe ingresar una cierta cantidad de cabrón vegetal seco e inmediatamente proceder a encenderlo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paso N.º 5: Colocación del metal a fundir. <p>El operador debe colocar cierta cantidad del metal de interés a fundirlo en el crisol y colocar el crisol dentro de la fuente calorífica e inmediatamente cerrar la compuerta del horno.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Paso N.º 6: Encendido de los equipos de control. <p>En la caja de control del horno se debe encender la luz indicadora de color rojo, esto significa que existe la presencia de tensión en la caja, por lo tanto, el operador debe cambiar la posición del selector a encendido (ON) y de inmediatamente el controlador de temperatura debe</p>		

encenderse conjuntamente con la luz indicadora de color verde y la luz indicadora de color rojo debe apagarse.

• **Paso N.º 7: Programación del controlador de temperatura.**

El controlador de temperatura tiene dos pantallas, la pantalla de arriba indica la temperatura a lo que se encuentra en ese estado del horno, generalmente la temperatura ambiental (se recuerda que la termocupla es el sensor que se está utilizando) y la pantalla inferior indica la temperatura deseada (temperatura de fusión del metal a fundirse) es decir este valor se puede cambiar con las flechas de subida y bajada del controlador.

Paso N.º 8: Incremento de temperatura.

Si el controlador de temperatura aun no llega a la temperatura deseada (temperatura de fusión del metal a fundirse) el controlador enviará una señal al blower para su encendido hasta alcanzar esta temperatura, una vez alcanzada esta temperatura el blower se apagará.

Paso N.º 9: Metal fundido.

Una vez que el metal cumplió su proceso de fundición, en la caja de control se debe colocar el selector en la posición de apagado (OFF) para apagar el controlador de temperatura, proceder a abrir la puerta del horno y retirar el crisol con cuidado porque existe alto riesgo de quemaduras.

Paso N.º 10: Vertido.

El metal fundido (en estado líquido) dentro del crisol el operador debe verter en un recipiente o molde para su solidificación.

Paso N.º 11: Apagar el sistema.

Una vez realizado el proceso de fundición del metal, en la protección termomagnética cambiar su posición a apagado (OFF).

	Anexo 9. Manual de puesta en marcha del horno de crisol		1/1	
FACULTAD:	Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas	CARRERA:	Electromecánica	
ASIGNATURA:	Procesos Industriales	PERIODO LECTIVO:	ABRIL – AGOSTO	CICLO: 8
DOCENTE:	Ing. José Williams Morales Cevallos Mg.	PRÁCTICA N°:	1	FECHA: 15/02/2023
LABORATORIO DONDE SE DESARROLLARÁ LA PRÁCTICA	Laboratorio de la Universidad técnica de Cotopaxi extensión La Maná			
TEMA DE LA PRÁCTICA:	“ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA”			
INTRODUCCIÓN:				
<p>La fundición es el proceso con mayor antigüedad muy utilizado al momento de dar una forma deseada a los metales. Propiamente este proceso consiste en fundir y colar el metal líquido en un molde que tenga la forma y tamaño esperado para que posteriormente se solidifique. Generalmente el molde se suele hacer en arena y se debe consolidar el proceso mediante una compactadora alrededor de este molde, el tamaño de las piezas a elaborarse no tiene limitaciones, estas pueden ser desde una prótesis dental hasta un bastidor de una maquinaria.</p> <p>Existen piezas que solamente se fabrican fundiendo en un molde, es decir no necesitan de otros procesos como como la forja, la laminación, soldadura, entre otros.</p>				
				
<i>Figura 50. Horno Crisol</i>				
OBJETIVOS:				
<ul style="list-style-type: none"> • Describir el estado del arte que relaciona el proceso de fundición de metales mediante un estudio técnico para la obtención de datos relevantes. • Establecer las expresiones matemáticas que determinen la cantidad de calor que necesita el horno de crisol en la fundición de metales. • Analizar la distribución de la temperatura nodal en las paredes del horno de crisol por medio de un software de simulación 				

MATERIALES:	
REACTIVOS: Ninguna	INSUMOS: <ul style="list-style-type: none"> • Cabón vegetal • Aluminio
EQUIPOS: <ul style="list-style-type: none"> • Horno Crisol. • Pinzas. • Equipo de protección personal. • Pirómetro. • Cámara Termográfica. • Multímetro. 	
MUESTRA: <ul style="list-style-type: none"> • Tocho de Aluminio. • Software de ingeniería ANSYS educativo. 	
INSTRUCCIONES:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tomar las medidas de seguridad dentro del laboratorio. 2. Verificar la presencia de tensión. 3. Mientras se realiza el proceso de 	
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Verificar la presencia de tensión: El operario debe verificar si en la caja térmica existe la presencia de tensión (110 Vac), para ello se debe destapar la caja y colocar el multímetro en la opción de tensión en corriente alterna y proceder a realiza la medición. 	
	
<p>Figura 2. Verificar la tensión en AC</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 2. Conexiones primarias: El operario debe realizar la respectiva conexión primaria que corresponde colocar dos conductores eléctricos (fase y neutro) de la caja térmica hacia la parte superior de la protección eléctrica. 3. Encender la protección eléctrica: En la caja del interruptor termomagnético, el operario debe colocarlo es la posición de encendido (ON) y posterior a ello realizar una medición de presencia de tensión en los bornes de la parte inferior de la protección eléctrica. 4. Colocación de la fuente calorífica: El operador debe ingresar una cierta cantidad de cabrón vegetal seco e inmediatamente proceder a encenderlo. 	



Figura 3. Colocación de la fuente de calor.

5. Colocación del metal a fundir: El operador debe colocar cierta cantidad del metal de interés a fundirlo en el crisol y colocar el crisol dentro de la fuente calorífica e inmediatamente cerrar la compuerta del horno.



Figura 3. Colocación del metal a fundir.

6. Encendido de los equipos de control: En la caja de control del horno se debe encender la luz indicadora de color rojo, esto significa que existe la presencia de tensión en la caja, por lo tanto, el operador debe cambiar la posición del selector a encendido (ON) y de inmediatamente el controlador de temperatura debe encenderse conjuntamente con la luz indicadora de color verde y la luz indicadora de color rojo debe apagarse.



Figura 4. Encendido de equipos.

7. Programación del controlador de temperatura: El controlador de temperatura tiene dos pantallas, la pantalla de arriba indica la temperatura a lo que se encuentra en ese estado del horno, generalmente la temperatura ambiental (se recuerda que la termocupla es el sensor que se está utilizando) y la pantalla inferior indica la temperatura deseada (temperatura de fusión del metal a fundirse) es decir este valor se puede cambiar con las flechas de subida y bajada del controlador.
8. Incremento de temperatura: Si el controlador de temperatura aun no llega a la temperatura deseada (temperatura de fusión del metal a fundirse) el controlador enviará una señal al blower para su encendido hasta alcanzar esta temperatura, una vez alcanzada esta temperatura el blower se apagará.
9. Metal fundido: Una vez que el metal cumplió su proceso de fundición, en la caja de control se debe colocar el selector en la posición de apagado (OFF) para apagar el controlador de temperatura, proceder a abrir la puerta del horno y retirar el crisol con cuidado porque existe alto riesgo de quemaduras.

10. Vertido: El metal fundido (en estado líquido) dentro del crisol el operador debe verter en un recipiente o molde para su solidificación.



Figura 5. Vertido del metal.

11. Apagar el sistema: Una vez realizado el proceso de fundición del metal, en la protección termomagnética cambiar su posición a apagado (OFF).

RESULTADOS OBTENIDOS:

Análisis Teórico

El análisis termodinámico mencionando que el aluminio con el crisol necesita una cantidad de calor de 7,46 kW, las pérdidas de calor por conducción y convección en los refractarios y en la compuerta metálica dio un total de 2,54 kW, de manera que se necesitó una cantidad de 10 kW para cumplir con este proceso, se analizó el carbón vegetal con capacidad de suministrar 25 kW obteniendo un rendimiento del 60 %.

Análisis Práctico



Figura 19. Análisis de resultados obtenidos

Mediante este proceso de fundición de aluminio se comprobó el estado de fusión y ebullición del mismo y que todos los materiales utilizados en el horno crisol son aptos para llevar a cabo este proceso siempre y cuando la fuente de calor sea la ideal, no obstante, podemos decir que el carbón vegetal es ideal para realizar una fundición de aluminio.

CONCLUSIONES:

- El horno de crisol utiliza carbón vegetal como fuente de generación calorífica, está forrado en sus 3 paredes laterales y una pared superior de materiales aislantes como son dos ladrillos refractarios, uno está colocado hacia la parte interior del horno con un espesor de 14 cm y el otro en la parte exterior con

un espesor de 6 cm, en medio de estos materiales se presenta una manta cerámica de 2,54 cm de espesor; el metal de estudio es el aluminio que presenta una temperatura de fusión de 660 °C y al utilizarse 7 kg del mismo alcanzó una temperatura de colado (vertido) de 876,1 °C.

- Se desarrolló el proceso de fundición del aluminio en donde se utilizaron las expresiones termodinámicas señalando que el aluminio conjuntamente con el crisol necesitan una cantidad de calor de 7,46 kW a un tiempo de 20 minutos que duró la fundición, se determinaron las pérdidas de calor por conducción y convección en los materiales refractarios y en la compuerta metálica obteniendo un total de 2,54 kW, de tal manera que se necesita una cantidad de calor de 10 kW para que el horno de crisol pueda cumplir con este proceso de fundición, es ahí que se analizó la fuente calorífica que tiene la capacidad de suministrar 25 kW, teniendo finalmente un rendimiento del 60 %.

RECOMENDACIONES:

- Se recomienda recubrir con material aislante térmico (ladrillo refractario y/o manta cerámica) la compuerta metálica del horno de crisol con la finalidad de reducir las pérdidas por convección y conducción en esa área.
- Se recomienda realizar el análisis termodinámico utilizando otro tipo de metal y un crisol de mayor capacidad de almacenamiento con la finalidad de comparar parámetros térmicos como la cantidad de calor necesaria y las pérdidas de calor, así como también el comportamiento de las temperaturas nodales a lo largo del material refractario.
- Se recomienda realiza una investigación de campo acerca del proceso de fundición del aluminio o de cualquier otro tipo de metal tomando en cuenta diferentes tipos de fuentes suministradoras de calor en estado gaseoso como el gas licuado de petróleo, gas natural, entre otros, en estado líquido, gasolina, diésel, entre otros, y por resistencias eléctricas.

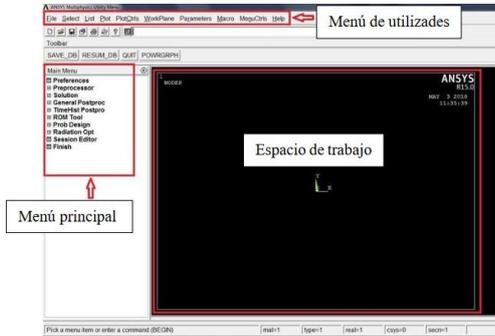
FIRMAS

F:

Nombre: Ing. Francisco Saul Alcocer Salazar
ENCARGADO DE LABORATORIO

F:

Nombre: PhD. Yoandrys Morales Tamayo
DIRECTOR DE CARRERA

FACULTAD :	Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas	CARRERA:	Electromecánica		
ASIGNATURA:	Procesos Industriales	PERIODO LECTIVO:	OCTUBRE – FEBRERO	CICLO :	8
DOCENTE:	Ing. José Williams Morales Cevallos Mg.	PRÁCTICA N°:	1	FECHA:	15/02/2023
LABORATORIO DONDE SE DESARROLLARÁ LA PRÁCTICA		Laboratorio de la Universidad técnica de Cotopaxi extensión La Maná			
TEMA DE LA PRÁCTICA:	“ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN UN HORNO DE CRISOL MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA”				
INTRODUCCIÓN:					
<p>Para conocer como está distribuida la temperatura en cada punto de las paredes del horno de crisol especialmente en donde se encuentran los materiales refractarios (ladrillo y manta cerámica) es necesario realizar un análisis técnico mediante el uso de un software de simulación numérica, para lo cual se utiliza el software ANSYS que cuenta con una licencia de tipo educativa para estudiantes de ingeniería con la finalidad de que cumplan su proceso en formación técnica y resolución de problemas.</p>					
 <p style="text-align: center;"><i>Figura 1 Entorno de trabajo de Ansys</i></p>					
OBJETIVOS:					
<ul style="list-style-type: none"> • Analizar la distribución de la temperatura nodal en las paredes del horno de crisol por medio de un software de simulación • Corroborar los cálculos obtenidos en el programa de simulación Ansys. 					
MATERIALES:					
REACTIVOS:			INSUMOS:		
Ninguna			Ninguna		
EQUIPOS:					
<ul style="list-style-type: none"> • Computadora • Programa 					
MUESTRA:					
Ninguna					
INSTRUCCIONES:					
<ol style="list-style-type: none"> 1. Tener el equipo necesario para la realización de la simulación. 2. Tener el software listo para la simulación. 					
ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:					
<ol style="list-style-type: none"> 1. Creación de puntos en el plano 2D 					

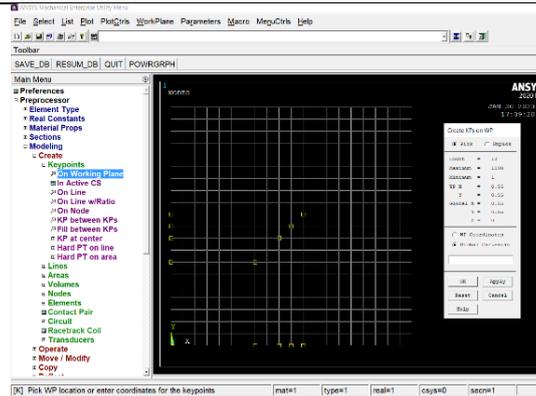


Figura 2. Creación de los puntos

2. Creación de líneas en el plano 2D

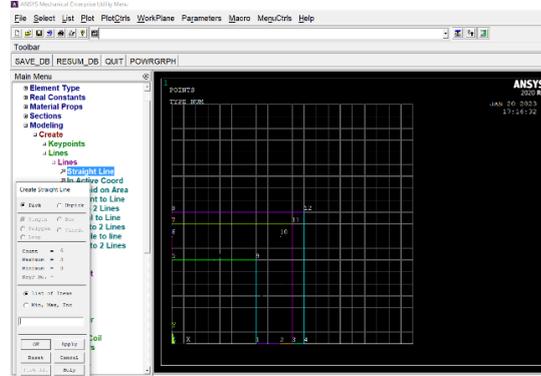


Figura 3. Creación de líneas.

3. Creación de áreas en el plano 2D

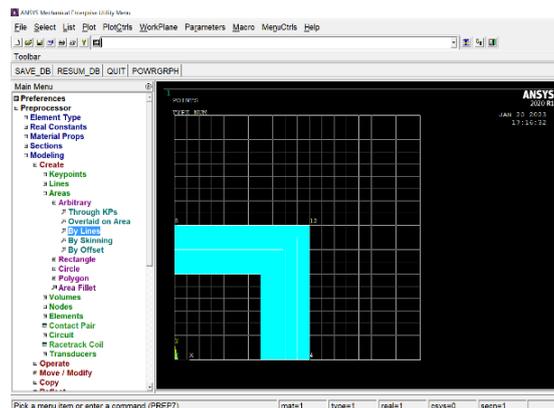


Figura 4. Creación de áreas

4. Separación de espesor de los 3 tipos de materiales refractarios

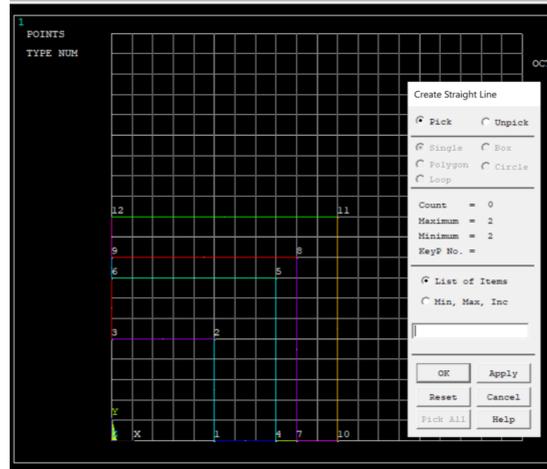


Figura 5. Separación de espesor

5. Ingreso de la conductividad térmica

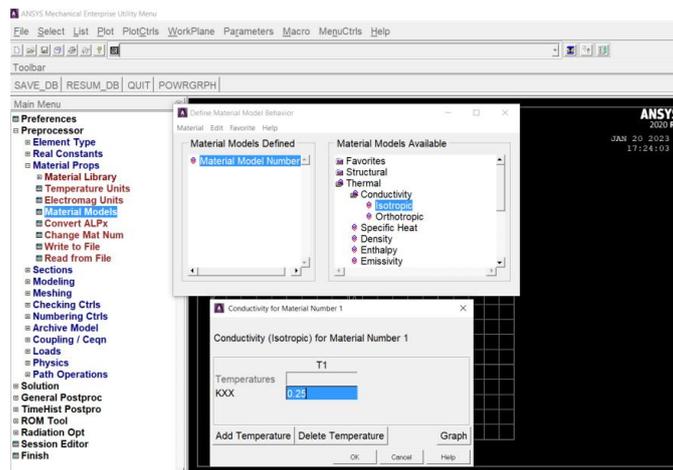


Figura 6. Ingreso de datos

6. Definición del tipo de material

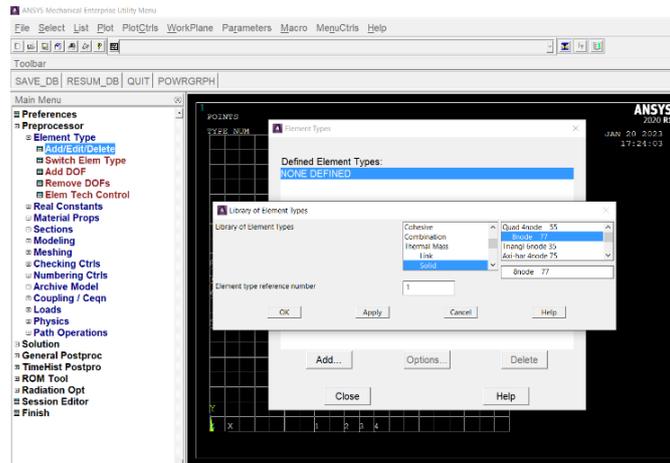


Figura 7. Definición de tipo de material

7. Ingreso del mallado

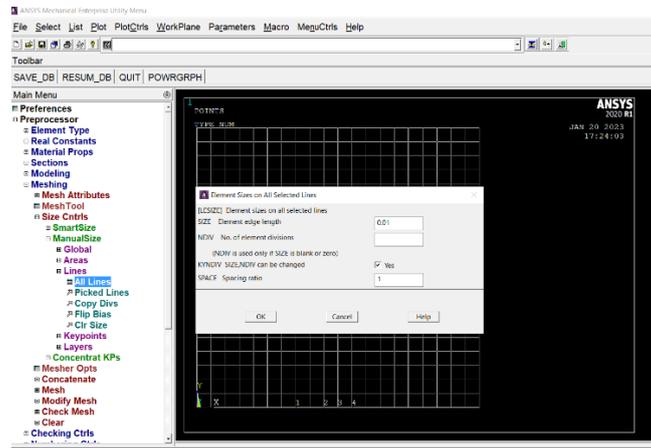


Figura 8. Ingreso del mallado

8. Mallado del material aislante

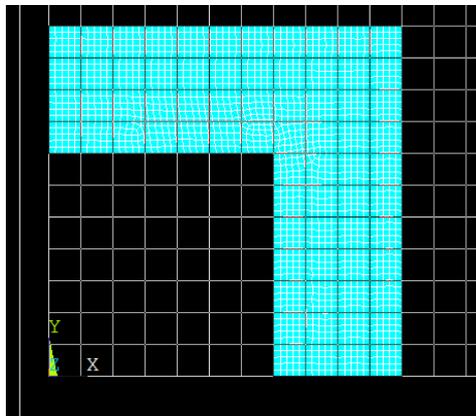


Figura 9. Pasos del mallado

9. Temperatura constante al interior y exterior.



Figura 10. Ingreso de temperatura

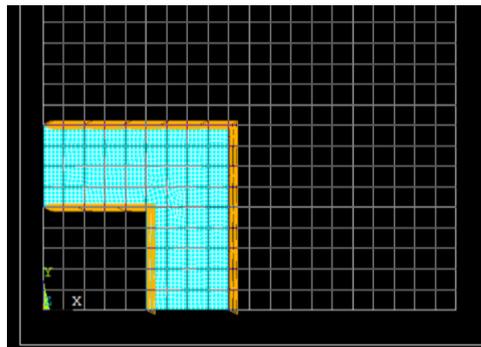


Figura 11. Ingresos de la temperatura a las paredes

10. Ingreso para la solución de la simulación.

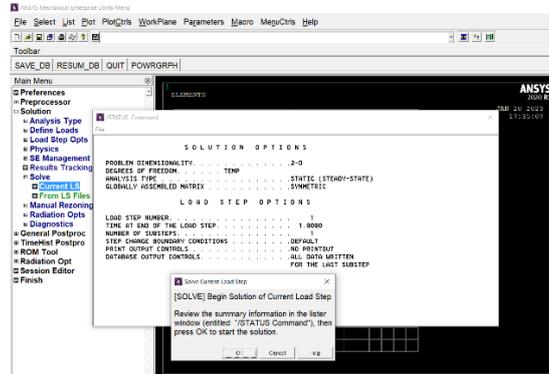


Figura 12. Ingreso de la solución de la simulación

11. Distribución de las temperaturas nodales

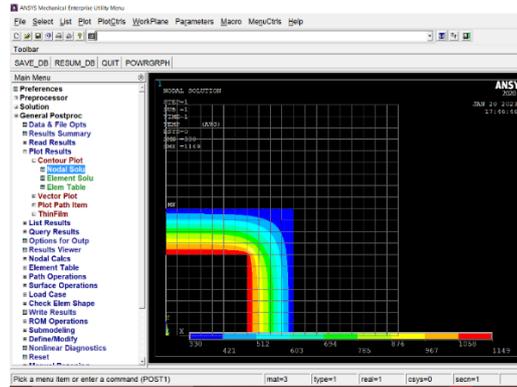


Figura 13. Simulación final

RESULTADOS OBTENIDOS:

Análisis Práctico

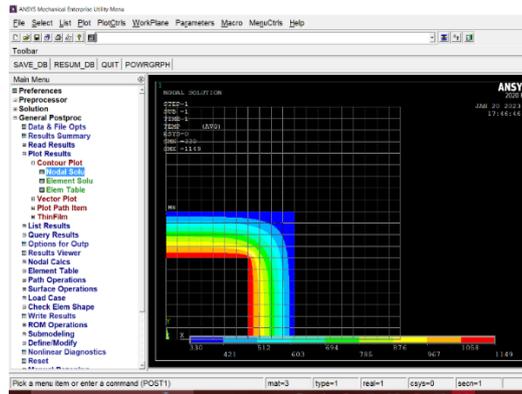


Figura 14. Análisis de resultados obtenidos

Se analizo los resultados obtenidos dentro de la simulación en el software ANSYS estudiantil, el cual hemos concluido que es muy importante para verificar cuales serían las temperaturas obtenidas en la parte interna y externa del horno crisol.

CONCLUSIONES:

- Al pasar el tiempo estos software de simulación seran indispensables para el análisis y el comportamiento de los procesos termodinámicos.
- Teniendo en cuenta que va dirigido hacia persons que estan en el proceso de estudio de la carrera de electromecánica, es necesario conocer el manejo del software para complementar le estudio.
- Ansys ofrece al mercado un paquete completo de software multifísicos, brindando acceso virtual a prácticamente todos los campos de la ingeniería que requiera simulación en el proceso de desarrollo de productos.

RECOMENDACIONES:

- La elección de hardware correcto para el uso de las herramientas de Ansys tendrá un impacto significativo en la productividad en términos de tamaño del modelo, desempeño y experiencia del usuario.

FIRMAS

F:

**Nombre: Ing. Francisco Saul Alcocer Salazar
ENCARGADO DE LABORATORIO**

F:

**Nombre: PhD. Yoandrys Morales Tamayo
DIRECTOR DE CARRERA**

	<p>Anexo 10. Certificado de reporte de la herramienta de prevención de coincidencia y/o plagio académico</p>	<p>1/1</p>
<p>Document Information</p>		
<p>Analyzed document</p>	<p>TESIS UTC.docx (D158952099)</p>	
<p>Submitted</p>	<p>2/18/2023 2:33:00 AM</p>	
<p>Submitted by</p>		
<p>Submitter email</p>	<p>yoandrys.morales@utc.edu.ec</p>	
<p>Similarity</p>	<p>5%</p>	
<p>Analysis address</p>	<p>yoandrys.morales.utc@analysis.arkund.com</p>	
<p>Sources included in the report</p>		
<p>SA</p>	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI / 2022 - LASSO-ARBOLEDA 2022 tesiiis-Otro.pdf Document 2022 - LASSO-ARBOLEDA 2022 tesiiis-Otro.pdf (D143335348) Submitted by: yoandrys.morales@utc.edu.ec Receiver: yoandrys.morales.utc@analysis.arkund.com</p>	<p> 1</p>
<p>SA</p>	<p>Juan Carlos Anchundia - Tesis entregar.pdf Document Juan Carlos Anchundia - Tesis entregar.pdf (D142497418)</p>	<p> 1</p>
<p>SA</p>	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI / JOSE MORALES.pdf Document JOSE MORALES.pdf (D116569256) Submitted by: mauro.albarracin@utc.edu.ec Receiver: mauro.albarracin.utc@analysis.arkund.com</p>	<p> 19</p>
<p>SA</p>	<p>proyecto mufla MANRIQUE N.docx Document proyecto mufla MANRIQUE N.docx (D77298762)</p>	<p> 6</p>
<p>SA</p>	<p>jonnathanamaguayahenrysefla.pdf Document jonnathanamaguayahenrysefla.pdf (D122462038)</p>	<p> 1</p>
<p>SA</p>	<p>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI / TESIS UTC (Delgado-Brayan-.).pdf Document TESIS UTC (Delgado-Brayan-.).pdf (D158833195) Submitted by: yoandrys.morales@utc.edu.ec Receiver: yoandrys.morales.utc@analysis.arkund.com</p>	<p> 1</p>
<p>Entire Document</p>		