

**MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE
UN HORNO PARA LA REFUSIÓN DE COBRE
MEDIANTE REDISEÑO TERMOMECAÁNICO PARA
LA EMPRESA INGEBRACOL S.A.S**

JESÚS PÉREZ NAIZZIR

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, 03/06/19

**MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE
UN HORNO PARA LA REFUSIÓN DE COBRE
MEDIANTE REDISEÑO TERMOMECAÁNICO PARA
LA EMPRESA INGEBRACOL S.A.S**

JESÚS PÉREZ NAIZZIR

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título
de
INGENIERO MECÁNICO**

**Director: WILSON TAFUR PRECIADO
Magister Ing. Mecánico
ingebracol@gmail.com**

**Co-Director: ALBERT MIYER SUAREZ
Doctor Ing. Mecánico
asuarez@unipamplona.edu.co**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, 03/06/19

Dedicatoria

A mis padres Pedro Pérez, Vilma Naizzir y mis hermanos Cristian Pérez y Pedro Pérez porque siempre estuvieron presentes en todas mis metas, apoyándome e incentivándome incondicionalmente, mentalizándome siempre en que las cosas son realizables siempre y cuando uno mismo lo quiera.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios todo poderoso por darme cada día salud y sabiduría, para el desarrollo de mi estudio profesional.

A mis familiares por brindarme siempre confianza, apoyo y seguridad en las tomas de mis decisiones.

A mi director, Ingeniero Wilson Tafur Preciado, por su apoyo formativo para la realización de este proyecto.

Al grupo de profesores de Ingeniería Mecánica, por sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1 EL PROCESO PARA LA REFUSIÓN DEL COBRE DE ALTA PUREZA..	15
4.2 COSTO Y CONSUMO DEL COBRE	16
4.3 HORNO DE CRISOL BASCULANTE	17
4.3.1 CONCEPTO Y FUNCIONALIDAD	17
4.3.2 MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA	18
4.3.3 ASPECTOS DEL REDISEÑO TERMO-MECÁNICO.....	18
4.4 DISEÑO DEL HORNO DE CRISOL BASCULANTE.....	19
4.4.1 SELECCIÓN DEL CRISOL	19
4.4.2 POSICIONAMIENTO DEL CRISOL	19
4.4.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA CÁMARA INTERNA	20
4.4.4 POSICIONAMIENTO DEL QUEMADOR	20
4.4.5 SELECCIÓN DE MATERIALES EN LAS PAREDES DEL HORNO...21	
4.4.6 PROTECCIÓN DE LA SUPERFICIE FUNDIDA.....	22
4.4.7 DISEÑO DEL EJE PIVOTE	23
4.4.8 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS [3] Y [12].....	23
4.5 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA	24
4.5.1 CALOR NECESARIO PARA FUNDIR EL COBRE.....	24
4.5.2 PÉRDIDAS DE CALOR.....	24
4.5.3 POTENCIA DEL QUEMADOR.....	26
4.5.4 EFICIENCIA TÉRMICA	26
4.6 SOFTWARE ANSYS PARA SIMULACIÓN TÉRMICA	26
4.6.1 MÓDULOS DEL SOFTWARE	26
4.6.1.1 ANALYSIS SYSTEM	27
4.6.1.2 GEOMETRY	27
4.6.1.3 MODEL.....	27

4.6.1.4	SETUP.....	27
5.	METODOLOGÍA.....	28
5.1	SELECCIÓN DE MATERIALES	28
5.2	DISEÑO TÉRMICO ANALÍTICO.....	31
5.3	SIMULACIÓN TÉRMICA	32
5.3.1	ANALISYS SYSTEM.....	32
5.3.2	GEOMETRY.....	32
5.3.3	MODEL	33
5.3.4	SETUP	34
5.4	DISEÑO MECÁNICO.....	35
5.4.1	DISEÑO DEL EJE PIVOTE	35
5.4.2	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....	36
5.5	DETALLAMIENTO TÉCNICO.....	36
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
6.1	SELECCIÓN DE MATERIALES	37
6.2	DISEÑO TÉRMICO ANALÍTICO.....	37
6.3	SIMULACIÓN TÉRMICA	40
6.3.1	SETUP	40
6.3.2	RESULTS.....	40
6.4	DISEÑO MECÁNICO.....	41
6.4.1	DISEÑO DEL EJE PIVOTE	41
6.4.2	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....	43
6.5	COMPARACIÓN DE LOS NUEVOS DISEÑOS CON EL DISEÑO ORIGINAL (MÉTODO ANALÍTICO).....	43
6.6	COMPARACIÓN DEL MÉTODO ANALÍTICO CON EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	44
6.7	DETALLAMIENTO TÉCNICO.....	45
7.	CONCLUSIONES.....	54
8.	REFERENCIAS.....	55
9.	ANEXOS	57
	ANEXO A	57
	ANEXO B	58
	ANEXO C	59

ANEXO D	60
ANEXO E	61
ANEXO F	62
ANEXO G	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Requerimientos de diseño y funcionalidad.....	19
Tabla 2 Instalación correcta del crisol en la cámara del horno. Fuente: Flores [5]	20
Tabla 3 Instalación correcta del quemador y recomendaciones de operación. Fuente: Flores [5].....	21
Tabla 4 Consumo energético en el ciclo de trabajo del horno [15]	30
Tabla 5 Datos de Mallado.	34
Tabla 6 Requerimientos de diseño para la selección de materiales para las paredes del horno.....	37
Tabla 7 Cálculo del espesor óptimo de los materiales seleccionados para la pared del horno.....	37
Tabla 8 Resultados método analítico diseño original.....	38
Tabla 9 Resultados método analítico Configuración 1.....	38
Tabla 10 Resultados método analítico Configuración 2.....	39
Tabla 11 Prueba de espesores de material refractario y aislante en las paredes del horno de crisol	39
Tabla 12 Condiciones iniciales utilizadas en la simulación con ANSYS R16.....	40
Tabla 13 Partes del horno y su peso	41
Tabla 14 Comparación de los nuevos diseños con el diseño original (Método analítico)	43
Tabla 15 Comparación del método analítico con el método elementos finitos	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama del proceso de refusión del cobre de alta pureza Fuente: Autor	15
Figura 2 Proceso de refusión del cobre de alta pureza: Estado actual. Fuente: Autor	16
Figura 3 Horno de crisol basculante y sus partes. Fuente: Autor	18
Figura 4 Protección de la superficie fundida mediante inyección de gas argón. Fuente: Campbell [11]	23
Figura 5 a) Dimensiones del crisol de grafito. b) Dimensiones internas del horno. Fuente: Autor	28
Figura 6 Vista en corte de perfil frontal del horno de crisol basculante y sus partes. Fuente: Autor	29
Figura 7 Sistema térmico del horno de crisol basculante. Fuente: Autor.....	31
Figura 8 Esquema del proyecto de simulación con ANSYS. Fuente: Autor.....	32
Figura 9 Horno de crisol en el Design Modeler. Fuente: Autor.....	33
Figura 10 Mallado: a) Horno de crisol. b) Horno de crisol, vista de corte. Fuente: Autor	33
Figura 11 Mallado del crisol. Fuente: Autor	34
Figura 12 a) Comportamiento térmico de crisol b) Comportamiento térmico estructural. Fuente: Autor.....	41
Figura 13 Diagrama de cargas en XWIGAS del eje. Fuente: Autor.....	42
Figura 14 Plano de la Carcasa de acero del horno de crisol basculante. Fuente: Autor	45
Figura 15 Plano de las placas de acero. Fuente: Autor	46
Figura 16 Plano de los ejes de acero. Fuente: Autor	46
Figura 17 CAD de la estructura metálica. Fuente: Autor	47
Figura 18 Plano de la base y el apoyo del crisol. Fuente: Autor	47
Figura 19 Plano del crisol. Fuente: Autor	48
Figura 20 Plano del ladrillo y la pared refractaria. Fuente: Autor	48
Figura 21 Plano de la manta cerámica. Fuente: Autor.....	49
Figura 22 CAD del Conjunto partes internas del horno. Fuente: Autor.....	49
Figura 23 Plano estructura soporte del horno. Fuente: Autor	50
Figura 24 Plano del volante	51
Figura 25 CAD Conjunto Estructura soporte. Fuente: Autor	51
Figura 26 Plano tapa inicial. Fuente: Autor	51
Figura 27 Plano refractario de la tapa con protección de gas argón. Fuente: Autor	52
Figura 28 Plano tapa de acero con protección de gas argón. Fuente: Autor.....	52
Figura 29 Figura 29 a) Horno con la tapa inicial, b) Horno con la tapa de protección con gas argón	53
Figura 30 Explosionado de piezas del horno.....	53

RESUMEN EXTENDIDO

En este trabajo se realizó el rediseño termo-mecánico de un horno de crisol basculante para la refusión de cobre de alta pureza con el fin de mejorar la eficiencia térmica en comparación a diseños previos. Se aplicaron métodos analíticos de diseño que fueron validados mediante simulación térmica con software CAE. Analizando un diseño inicial y otros diseños consultados en la literatura y, siguiendo recomendaciones para el rediseño del horno, se alcanzó una eficiencia térmica **entre 20 y 40%** superior a la de los diseños iniciales disminuyendo hasta en tres veces menos las pérdidas de calor. Se obtuvo un margen de **error de 4,44%** de variación entre los valores calculados de forma analítica y los simulados.

1. INTRODUCCIÓN

La chatarra de cobre de alta pureza podría ser refundida con aplicación en la construcción de electrodos de electroerosión por penetración, siempre que se asegure la correcta selección del material reutilizado. En una empresa del sector metalmeccánico se percibió la necesidad de ahorrar costos de adquisición de cobre de alta pureza en pequeñas cantidades y de forma estratégica implementar procesos de fundición que permitan reciclar estos materiales usados como materia prima para manufacturar sus productos y herramientas. En particular, allí cuentan con un horno de crisol basculante con limitaciones de diseño que dificultan las operaciones de fundición del cobre. Con el fin de rediseñar dicho horno se tuvieron en cuenta algunas consideraciones generales para el diseño de hornos a partir de la caracterización del proceso de refusión del cobre de alta pureza. La tecnificación y viabilización de dicho proceso productivo esta soportada por algunas experiencias como las de la empresa Cobres de Colombia [1], quienes obtienen cobre de alta pureza mediante procesos pirometalúrgicos. Kallarackel [2] afirma que es posible realizar la refusión con posteriores operaciones de refinado siempre y cuando se conozcan los elementos constitutivos del cobre, el procedimiento adecuado para refinarlo y emplearlo. Para el rediseño del horno de crisol basculante se usaron las diferentes recomendaciones y consideraciones dadas por Olalla [3] y Payares [4], quienes realizaron el diseño para la fundición de aluminio y fueron extendidas para la fundición del cobre en el trabajo presentado por Flores [5]. Flores, diseñó e implemento un horno de crisol para fundir cobre y aluminio con el que se pudieron alcanzar temperaturas de fusión hasta de 1700 °C cumpliendo los parámetros requeridos de operación al validar las simulaciones de diseño con resultados experimentales, lo cual viabilizó el uso del horno de crisol. Cabe resaltar que en este trabajo se hizo el estudio del sistema de combustión y el diseño de los quemadores verificando las características de las emisiones de gases de combustión al utilizar gas propano con inyección de aire, los cuales no se mantuvieron dentro de los valores permisibles quedando limitado el estudio de los quemadores y la cámara interna del horno con eficiencias de combustión hasta el 60% al medirlas experimentalmente. No se entregaron resultados de la fundición del cobre [5].

En el actual proyecto se hizo un mejoramiento de la eficiencia térmica con cálculos analíticos validados mediante simulación térmica. Se obtuvo un mejor dimensionamiento de la cámara interna con recomendaciones de expertos en fabricación de hornos industriales y en la literatura. Se enfocó en el proceso de refusión de cobre de alta pureza tomando como precaución la protección de contaminantes de la combustión que inciden sobre la superficie fundida.

2. JUSTIFICACIÓN

El problema que presenta la empresa INGEBRACOL S.A.S. es un horno de crisol basculante que fue previamente diseñado y fabricado, que no está cumpliendo con la función de refundir cobre de alta pureza y a su vez garantizar que no pierda su pureza, esto para para su reutilización en la fabricación de electrodos para electroerosión. La empresa INGEBRACOL S.A.S. busca rediseñar el horno de crisol basculante para que pueda realizar el proceso de refusión de pequeñas cantidades de cobre de alta pureza, buscando disminuir los gastos en la compra de cobre comercial fuera de la región disminuyendo las pérdidas de cobre en los procesos de mecanizado.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Mejorar la eficiencia térmica de un horno para refusión de cobre mediante rediseño termo-mecánico.

3.2 Objetivos específicos

- Rediseñar el interior del horno y la configuración de partes y materiales.
- Realizar diseño termo-mecánico
- Validar el diseño térmico mediante la simulación con método de elementos finitos.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 El proceso para la refusión del cobre de alta pureza

Los procedimientos correctos para seleccionar y refundir los desechos de cobre y los materiales de aleación de base de cobre no se describen en la literatura. Las 2 fuentes de conocimiento son investigación y experiencia. El objetivo de toda investigación operativa es minimizar la pérdida de los elementos cargados y, al mismo tiempo, recopilar la cantidad máxima de todas las emisiones generadas [6].

El personal de producción debe combinar los conocimientos adquiridos en investigación con su propia experiencia práctica y trabajar hacia el objetivo de una producción económica óptima. Se debe hacer mayor hincapié en el control de las pérdidas durante la operación de fundición para lograr el menor costo de producción posible. Esto involucra [6]:

1. Selección y preparación adecuada del material a cargar.
2. Orden de carga correcta, ya que, en muchos casos, se puede introducir chatarra de alto punto de fusión en el baño fundido y fundirse a una temperatura mucho más baja de la que sería necesaria que si se cargase directamente en el horno y se calentara.
3. En el uso de gases para proteger de la contaminación la superficie fundida, se debe hacer el uso correcto del caudal correcto en el momento correcto y
4. El ejercicio del procedimiento adecuado durante la operación.

Schwartz [6] según su experiencia afirma que no hay problemas serios en la operación desde que este sea diseñado adecuadamente. Es por esto que para la concepción del nuevo horno de fundición se diseñó un modelo propuesto para la refusión de cobre de alta pureza similar al mostrado por Dablement [7]. En la Figura 1, se muestra un esquema de este proceso. El cobre de alta pureza preseleccionado pasa directamente al horno crisol basculante para la refusión luego es hecho el moldeo, desmoldeo y mecanizado final.

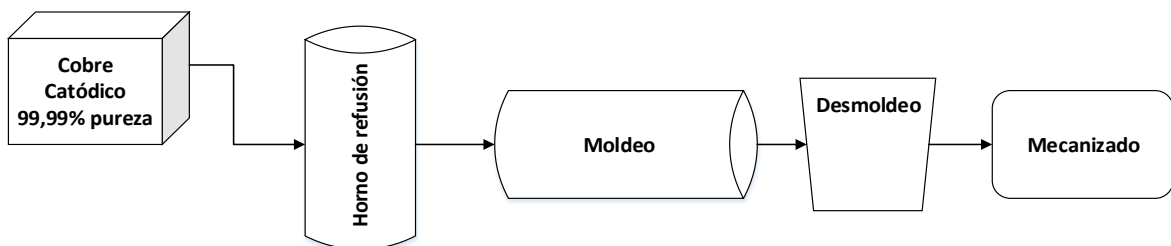


Figura 1 Diagrama del proceso de refusión del cobre de alta pureza Fuente: Autor

Las condiciones iniciales del estado actual de este proceso en la empresa donde se hace el presente estudio son presentadas a continuación en la Figura 2.

El cobre de alta pureza se obtiene de flejes de cobre electrolítico reciclado que ha sido utilizado como conductor de electricidad. El problema surge cuando se lleva al horno de crisol basculante en el cual no se alcanza a fundir el cobre, mostrando una falla en la eficiencia térmica pues gran parte del calor suministrado por los quemadores se pierde a través de las paredes del horno y componentes y muy poco de este calor se usa para fundir el cobre dentro del crisol. Los accesorios ya están preparados para las operaciones de moldeo y desmoldeo para finalmente darle el conformado final a los electrodos de electroerosión.

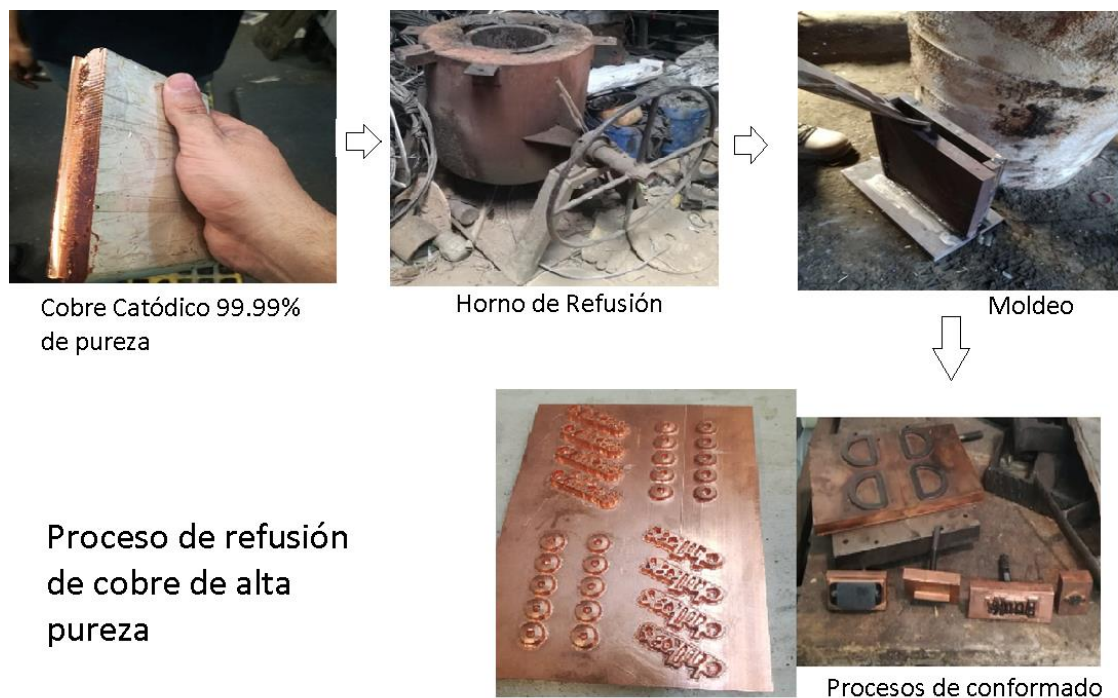


Figura 2 Proceso de refusión del cobre de alta pureza: Estado actual. Fuente: Autor

4.2 Costo y consumo del cobre

Generalmente el costo del cobre usado para la fabricación de electrodos para electroerosión está comprendido entre el 8 y 10% del costo total de producción. Esto representa un gasto promedio mensual de 2,5 millones de pesos.

Se estima, que se usan entre 20 y 50 kg al mes, siendo necesario hacer la preselección del mismo en condiciones de alta pureza que viene preferiblemente en forma de planas con dimensiones mayores a las necesarias para la fabricación de electrodos para electroerosión.

4.3 Horno de crisol Basculante

4.3.1 Concepto y funcionalidad

Un horno es un dispositivo que genera calor y que lo mantiene dentro de un compartimiento cerrado. En la industria se utiliza para la fundición, refinamiento, secado entre otros procesos. La energía calorífica utilizada para alimentar un horno puede obtenerse directamente, por combustión (leña, gas u otro combustible), radiación (luz solar), o indirectamente, por medio de electricidad (horno eléctrico) [8].

El horno de crisol basculante consiste de una recamara a la cual se le suministra energía, almacena calor y promueve la transferencia de este a un metal contenido en un recipiente conductor del calor y resistente a la acción del metal y a las altas temperaturas denominado crisol, el cual permite fundir el metal en su interior para luego ser vertido a un molde previamente preparado. Los hornos de crisol trabajan por combustión de un elemento como el gas el cual calienta el crisol que contiene el metal fundido. También, puede ser calentado usando energía eléctrica. Para lograr concentrar el calor alrededor del crisol este está contenido entre unas paredes refractarias que generan una cavidad para el flujo de los gases de combustión. El crisol es un recipiente que se coloca dentro de los hornos para que reciba el metal fundido. Normalmente está hecho de grafito con cierto contenido de arcilla y puede soportar materiales a altas temperaturas [8].

Los hornos de crisol basculantes son hornos movibles apoyados sobre un sistema de sustentación. La ventaja aparente que otorga el horno de crisol basculante es la capacidad que tiene este de extraer el metal fundido con mayor facilidad sin la necesidad de exponer a los operarios al calor proveniente de la cámara del horno. Sin embargo, se requiere la fabricación de una base especial, lo suficientemente resistente para soportar el peso del crisol y un sistema que permita el control del giro del horno. Usualmente se les utiliza cuando es necesaria una producción relativamente grande de una aleación determinada, el metal es transferido a los moldes en una cuchara o un crisol precalentado. En la figura 3 se muestra un esquema conceptual del horno de crisol basculante y sus partes.

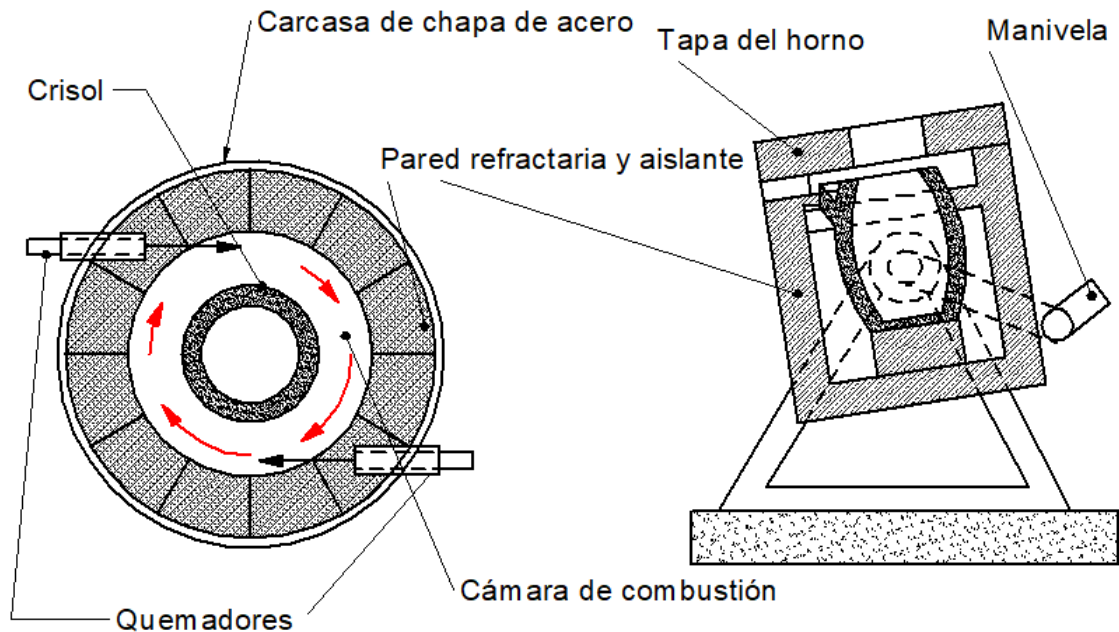


Figura 3 Horno de crisol basculante y sus partes. Fuente: Autor

4.3.2 Mejoramiento de la eficiencia térmica

Con base en las literaturas estudiadas se recomienda implementar un aislante cerámico en las paredes del horno, este aislante cumplirá con la función de mantener el calor dentro del horno disminuyendo de gran manera las pérdidas de calor que se producen en las paredes del horno y consecuentemente mejorando la eficiencia térmica [3], [4] y [5].

Otros de los aspectos para tener en cuenta en cuanto al mejoramiento de la eficiencia térmica del horno son las distancias que hay entre el crisol y la pared, esta distancia denominada como cámara de combustión es limitada teniendo en cuenta las recomendaciones de expertos en la construcción de horno industriales para procesos de fundición y las recomendaciones dadas en las literaturas estudiadas [3], [4] y [5].

4.3.3 Aspectos del rediseño termo-mecánico

Con base en la caracterización del proceso de refusión del cobre presentada en las Figuras 1 y 2, se elaboró la tabla de requerimientos de diseño y funcionalidad (Tabla 1). Siendo estos los aspectos que se tendrán en cuenta para la realización del rediseño termo-mecánico del horno de crisol basculante

Tabla 1 Requerimientos de diseño y funcionalidad

Requisitos funcionales	Requisitos de diseño	
Minimizar la cantidad y el costo de material refractario y aislante	Metal a fundir	Cobre
	Espacio de estructura metálica	2 m ³
Proteger de contaminantes a la superficie fundida	Espacio entre crisol y pared	10 a 15 cm
	Espacio entre tapa y crisol	10 a 15 cm
Máxima eficiencia energética	Tiempo de operación máximo	60 min
	Temperatura máxima en el crisol	1200 °C

4.4 Diseño del horno de crisol basculante

Dentro de la literatura estudiada se encontraron diferentes recomendaciones para el diseño de hornos de crisol basculantes, estas recomendaciones son hechas a partir del estudio de la eficiencia térmica que se presentan en el horno, lo cual conlleva la modificación de diferentes parámetros del horno como; la selección del crisol y su posicionamiento, dimensionamiento de la cámara interna, instalación de los quemadores y por último una protección de la superficie fundida




4.4.1 Selección del crisol

Para la selección del crisol se debe tener en cuenta el tipo de metal que se fundirá, las impurezas que este puede agregar al metal y la cantidad de metal que se piensa fundir, a partir de esta selección se determinará el dimensionamiento interno del horno.

4.4.2 Posicionamiento del crisol

Para un correcto posicionamiento e instalación del crisol se tuvo en cuenta la Tabla 2 presentada por Flores [5].

Tabla 2 Instalación correcta del crisol en la cámara del horno. Fuente: Flores [5]

INSTALACIÓN	
<p>1) Utilizar la base apropiada para el crisol y del tamaño adecuado. Nunca acuñar los crisoles, se tiene que permitir la expansión y contracción del crisol.</p>	 <p>El crisol debe colocarse dentro de la cámara del horno en una base plana adecuada.</p>
<p>2) Evitar esfuerzos por carga; la tapa del horno o el anillo nunca deben descansar sobre el borde del crisol.</p>	 <p>Debe existir una distancia entre la tapa del horno y el borde superior del crisol.</p>
<p>3) Mantenga el revestimiento interior del horno en buenas condiciones; con una pared uniforme y concéntrica manteniendo la disposición tangencial del eje del quemador. Esto evitara la desviación de la flama y asegurara una fusión apropiada.</p>	 <p>Se debe mantener una pared interior uniforme para que no se pierda la trayectoria de la llama.</p>

4.4.3 Dimensionamiento de la cámara interna

El diámetro de la cámara interior debe ser entre 100 y 150 mm superior que el diámetro del crisol [3].

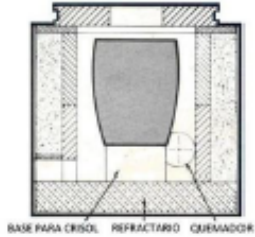


La altura de la cámara junto con su recubrimiento, debe tener en cuenta el bloque base en el cual se colocará el crisol para evitar que la flama del quemador incida directamente sobre él, además, debe permitirse un espacio entre 100 y 150 mm entre el borde superior del crisol y la tapa [5].

4.4.4 Posicionamiento del quemador

Para un correcto posicionamiento e instalación del quemador se tuvo en cuenta la Tabla 3 presentada por Flores [5].

Antes de cada operación del horno se debe realizar una limpieza previa de la cámara del horno para corregir imperfecciones en el revestimiento. Se debe revisar la correcta instalación del quemador y del crisol en la cámara del horno para conservar la trayectoria de la llama y correcta operación del horno evitando así posibles daños.

Tabla 3 Instalación correcta del quemador y recomendaciones de operación. Fuente: Flores [5]

INSTALACIÓN DEL QUEMADOR	
<p>1) Revisión y limpieza del horno. Revisar el revestimiento interno del horno y reparar de ser necesario. Retirar cualquier objeto adherido a las paredes y piso. Asegurarse que el quemador esté limpio y correctamente alineado.</p>	 <p>BASE PARA CRISOL REFRACTARIO QUEMADOR</p> <p>Se debe realizar una limpieza previa a los diferentes elementos del horno.</p>
<p>2) Centrar el crisol en la base de soporte dentro del horno. El fondo de un crisol debe estar al mismo nivel o ligeramente arriba de la línea central de la entrada del quemador. Esto se realiza sentando el crisol en una base o block pedestal de altura apropiada. Los crisoles deben estar centrados para asegurar un buen espacio alrededor y una combustión uniforme.</p>	 <p>El crisol debe estar centrado sobre su base</p>
<p>3) Verificar la alineación del quemador y asegurarse que la flama quede centrada y dirigida entre el crisol y la base que lo soporta. La salida del quemador debe centrarse dentro de la cámara de combustión del horno y correr tangencialmente alrededor del crisol.</p>	 <p>Se debe verificar la salida de la flama de forma tangencial a la pared interior del horno.</p>
<p>4) Asegurarse que la flama sea ligeramente oxidante y no esté en contacto directo con el crisol.</p>	

4.4.5 Selección de materiales en las paredes del horno

El término refractario se refiere a la propiedad de ciertos materiales de resistir altas temperaturas sin descomponerse. Los refractarios son materiales inorgánicos, no metálicos, porosos y heterogéneos, compuestos por agregados minerales termoestables, un aglomerante y aditivos. Las principales materias primas empleadas en la elaboración de estos materiales son óxidos de: silicio, aluminio, magnesio, calcio y circonio; y algunos refractarios no provenientes de óxidos como los carburos, nitruros, boratos, silicatos y grafito [9].

Los refractarios son fundamentalmente materiales capaces de resistir altas temperaturas sin fundirse. Pero no solo eso, además deben poseer una resistencia mecánica elevada a dichas temperaturas para poder resistir sin deformarse su propio peso y el de los materiales que están en contacto sobre ellos. Dependiendo de las aplicaciones se les exigirán otras propiedades en mayor o menor grado, por ejemplo, la estabilidad química frente a los metales fundidos, las escorias, el vidrio fundido, los gases y vapores, etc. Y resistencia a los cambios bruscos de temperatura (Choque térmico) [10].

Los materiales aislantes reducen considerablemente la pérdida de calor a través de las paredes de los hornos. Una baja transferencia de calor se puede alcanzar al colocar capas de material con baja conductividad térmica entre la superficie interna caliente de un horno y la superficie externa, haciendo que esta última se mantenga a una baja temperatura [9].

La razón de su baja conductividad se debe a la alta cantidad de poros dentro del material, los cuales están llenos de aire y por lo tanto impiden una alta tasa de transferencia de calor. Estos materiales usualmente son muy livianos. Materiales con una porosidad entre 75 y 85% se consideran muy livianos, y por arriba de ese porcentaje se vuelven materiales ultra-livianos [9]

Los materiales con alto porcentaje de poros resultan poseer una resistencia mecánica muy baja y deben manejarse con mucho cuidado. Además, gases, humos y líquidos pueden penetrar fácilmente estos materiales, por ello no deben emplearse en hornos donde puedan entrar en contacto directo con ellos.

Entre los aislantes refractarios se pueden encontrar: Ladrillos aislantes, Cementos aislantes, Fibra cerámica, Silicatos de calcio, y Recubrimientos cerámicos.

En cuanto la fibra cerámica, es una familia de productos aislantes refractarios elaborados en fibras esponjosas parecidas al algodón. Estas pueden ser utilizadas para fabricar telas, mantas, tablas, bloques, etc. Estos materiales poseen una muy baja conductividad térmica, baja capacidad calorífica, extremadamente livianos e inmunes a los choques térmicos y son químicamente estables [9].

4.4.6 Protección de la superficie fundida

Para el nuevo diseño de horno de crisol basculante se debe considerar la protección de la superficie fundida del cobre dentro del crisol para que no ingresen gases o componentes contaminantes. Para esto existen dos alternativas: Protección con la propia escoria o Protección mediante inyección de gas argón (Figura 4).

El argón se inyecta tangencialmente contra la superficie de fusión, y se hace circular dentro de un cono refractario adherido a la tapa (Figura 4). La inyección del gas paralela a las paredes internas del cono evita el arrastre de aire, y la técnica de remolino organiza el gas para que el uso del gas sea altamente eficiente. El gas calentado y expandido finalmente escapa por la parte superior del cono. Esta

técnica reduce la acumulación de escoria y reduce la frecuencia de mantenimiento del crisol [11].

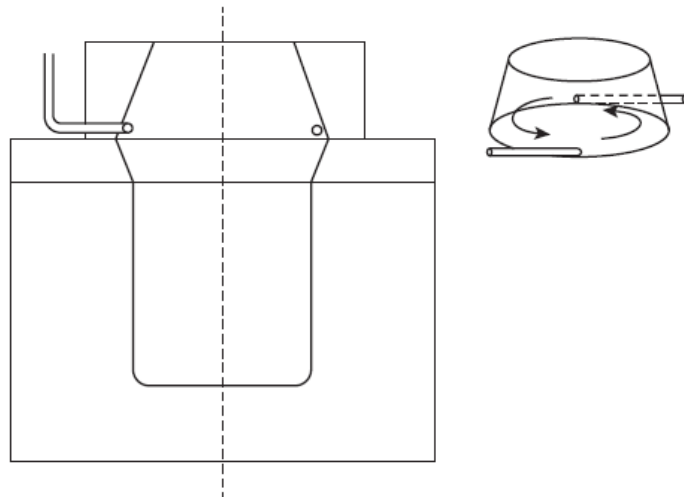


Figura 4 Protección de la superficie fundida mediante inyección de gas argón. Fuente: Campbell [11]

La aplicación de la protección con la propia escoria del metal fundido es otra alternativa, pero no se evidenciaron estudios en la literatura al respecto. En todo caso se deben evitar la llegada de gases contaminantes a la superficie fundida provenientes de la cámara de combustión que rodea el crisol. Una buena alternativa sería implementar un sistema de desgasificación especial por la tapa del horno.

4.4.7 Diseño del eje pivote

La estructura original cuenta con un eje de 80mm de diámetro el cual se encarga de soportar el peso de todos los componentes del horno, pero se hace necesario determinar este eje soportara las cargas y esfuerzos generados por el nuevo diseño, el cual traerá cambios en los materiales y sus dimensiones.

4.4.8 Selección de rodamientos [3] y [12]

Cuando un rodamiento bajo carga está parado, efectúa lentos movimientos de oscilación, o funciona a velocidades muy bajas, su capacidad para soportar carga no viene determinada por la fatiga del material, sino por la deformación permanente en los puntos de contacto entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura.

Esto también es válido para rodamientos giratorios sometidos a elevadas cargas de choque durante una fracción de revolución. En general pueden absorberse cargas equivalentes a la capacidad de carga estática C_0 , sin perjuicio alguno sobre las características de funcionamiento del rodamiento.

4.5 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA

Una de las dificultades que tiene la construcción del horno tipo basculante es el cálculo del revestimiento refractario. Los materiales refractarios tienen la función de mantener la temperatura y otorgar estabilidad estructural al horno. Por esta razón la determinación del espesor del ladrillo refractario, la manta cerámica y carcasa que los encierra es relevante para determinar el estado del equipo en cuanto a la efectividad en la fusión y eficiencia térmica. La configuración de los mismos para promover el encapsulamiento y concentración de la fuente de calor sobre el crisol minimizando las pérdidas de calor es determinante también en estos dos aspectos. Los cálculos térmicos realizados por Olalla [3], Payares [4] y Flores [5], fueron tenidos en cuenta en este trabajo y son mostrados a continuación.

4.5.1 Calor necesario para fundir el cobre

La energía o calor necesario para fundir cualquier metal puede simplificarse si se supone que su conductividad térmica no varía en cierto intervalo de temperaturas. El error introducido debido a la suposición resulta ser pequeño para esta aplicación en específico. Para el cálculo se toma en cuenta los diferentes calores específicos de los elementos en sus diferentes estados, así como el calor latente de fusión requerido para cambiar de estado el material. El procedimiento se presenta a continuación.

$$Q = mC_p\Delta T \quad (1)$$

El calor requerido para llevar el cobre a su punto de fusión es:

$$Q_{Cu1} = m_{Cu}C_{p-CuS}\Delta T \quad (2)$$

El calor latente de fusión es:

$$Q_{Cu2} = m_{Cu}h_{CuF} \quad (3)$$

El calor si se sobrecalienta el cobre hasta llevarlo a la temperatura de colada de 1200°C:

$$Q_{Cu3} = m_{Cu}C_{p-CuL}\Delta T \quad (4)$$

Por lo tanto, el calor total requerido para la fundición del cobre es:

$$Q_c = Q_{Cu1} + Q_{Cu2} + Q_{Cu3} \quad (5)$$

4.5.2 Pérdidas de calor

Como el proceso precisa una temperatura relativamente alta, es evidente que los gases abandonan el horno a grandes temperaturas con la inevitable pérdida de calor para contrarrestar dicha pérdida. Los gases de combustión atraviesan un laberinto construido con material refractario al que ceden su calor sensible acumulándolo en las paredes. El calor perdido por un horno debe pasar primero por conducción a través de las paredes a la superficie exterior y después se debe disipar a los alrededores por convección.

En consecuencia, los datos disponibles deben incluir a todos los otros factores necesarios para el cálculo de la conducción y convección, estos son: para la conducción, el área y resistividad de las paredes del horno, además la temperatura interior de la pared; para la convección, solo el área (asumiendo una temperatura exterior de 27°C). La temperatura óptima de vertido del metal en los moldes; el calor necesario para fundir el metal; las dimensiones de sus paredes. Así como del material que está construidas; se puede calcular las pérdidas de calor por conducción y la temperatura de la superficie exterior.

Se consideraron estas pérdidas en la pared cilíndrica, para un cilindro de pared compuesta [13]:

$$Q_p = 2\pi L \frac{\Delta T}{R} \quad (6)$$

Donde R es la resistencia térmica por cada capa del horno y está definida como:

$$R = \frac{\ln(r_i/r_o)}{k} \quad (7)$$

Reemplazando la ecuación (7) en la ecuación (6) obtenemos:

$$Q_p = 2\pi k L \frac{(T_i - T_o)}{\ln(r_i/r_o)} \quad (8)$$

De la ecuación (8) despejamos T_i para encontrar la temperatura en las paredes del horno y en su superficie obteniendo

$$T_i = T_o - \frac{Q_p \ln(r_i/r_o)}{2\pi k L} \quad (9)$$

Con estas ecuaciones como base se desarrollaron tablas de resultados para las diferentes configuraciones de refractarios para el horno de refusión de cobre.

4.5.3 Potencia del quemador

Usualmente para poder conocer cuánto calor es suministrado por un quemador es necesario saber el flujo de combustible que se le provee a este, el cual debe ser lo suficiente para proveer calor a la carga y afrontar las pérdidas de energía a través del recubrimiento del horno y en los gases de escape.

$$E_q = \frac{Q_p + Q_c}{n_c} \quad (10)$$

4.5.4 Eficiencia térmica

La eficiencia térmica del horno se calculó en función de la relación entre las pérdidas de calor generadas en el horno sobre la potencia del quemador utilizado para el proceso.

$$n_e = 1 - \frac{Q_p}{E_q} \quad (11)$$

4.6 Software ANSYS para simulación térmica

ANSYS es un soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otro software para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos. Además, presta soporte a la industria.

4.6.1 Módulos del software

Dentro del software ANSYS se encuentran diferentes módulos para la correcta realización de simulaciones mediante el método de elementos finitos, estos módulos se clasifican de la siguiente manera:

- Analysis System
- Geometry
- Model
- Setup

4.6.1.1 Analysis System

Este módulo se utiliza para la selección del módulo con el que se desarrollarán las simulaciones.

4.6.1.2 Geometry

Este módulo es utilizado para importación de los diseños CAD a través de Design Modeler para la optimización de la geometría mediante la limpieza de las superficies con correcciones en las caras y los bordes.

4.6.1.3 Model

En este módulo se trabaja en la interfaz Mechanical de ANSYS, esta herramienta es la encargada de la asignación de las condiciones y parámetros de los materiales suministrados, así como la realización del mallado de los elementos para las simulaciones.

4.6.1.4 Setup

En este módulo se definen todas las condiciones iniciales para las simulaciones.

5. METODOLOGÍA

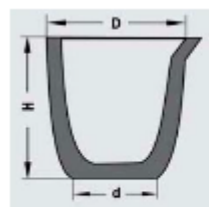
Se utilizó la siguiente metodología para realizar el mejoramiento de la eficiencia térmica de un horno para la refusión de cobre mediante rediseño termo-mecánico:

1. Selección de materiales
2. Diseño térmico analítico
3. Simulación térmica
4. Diseño mecánico
5. Detallamiento técnico

5.1 Selección de materiales

Se utilizó un crisol de grafito con dimensiones mostradas en la Figura 5 a), que puede trabajar a altas temperaturas y no afecta la composición del material fundido (cobre) [14].

Con el diámetro y la altura del crisol se calculó el diámetro interno y la altura interna del horno mostrado en la Figura 5 b).



a

D=175mm
H=225mm
d=145mm

$$D_{int} = 175 + 120$$

$$D_{int} = 295mm$$

$$H_{int} = 225 + 85 + 100$$

$$H_{int} = 410mm$$

b

Figura 5 a) Dimensiones del crisol de grafito. b) Dimensiones internas del horno. Fuente: Autor

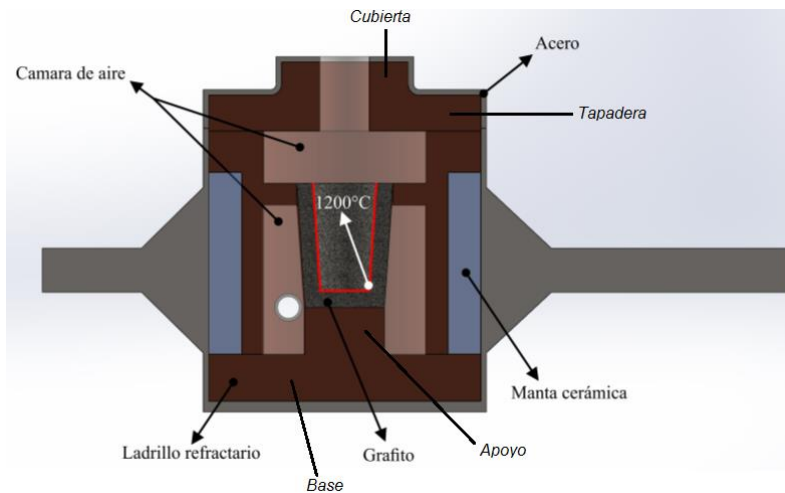


Figura 6 Vista en corte de perfil frontal del horno de crisol basculante y sus partes. Fuente: Autor

Se incluyó un pedestal o apoyo para soportar el crisol que sobresale en relieve sobre la base de la cámara interna y su función es evitar que la llama de los quemadores incida directamente en el crisol para protegerlo. El pedestal fue hecho del mismo material refractario de las paredes de la cámara interna. Por recomendación de la literatura la altura se estableció en 85 mm. En la Figura 6 se indica un esquema del horno de crisol con sus partes, en el cual para su dimensionamiento se enfocó en el análisis para mejorar la eficiencia térmica, conservando las dimensiones estructurales del horno.

Unas últimas recomendaciones se tuvieron en cuenta con base en la literatura para la instalación del crisol conforme a la nueva configuración del horno, entre estas están [3], [4] y [5]:

- La base del horno fue hecha de ladrillo refractario de 85 mm de espesor.
- La tapadera y la cubierta del horno se fabricarán de ladrillo refractario con la configuración recomendada para aislar el material fundido de los gases contaminantes, creando una cámara que permita la inyección de gas argón sobre la superficie fundida.
- El espesor adecuado se determinará mediante un análisis de transferencia de calor, sin embargo, para un estimado se establece de 70 mm la tapadera y 60 mm la cubierta. Estas medidas básicas servirán de parámetro para realizar el análisis termodinámico: por lo tanto, se entiende que estas medidas están sujetas a cambio y dependientes de los resultados del proceso.

Para la selección del refractario y el aislante térmico se estudiaron los trabajos hechos por Olalla [3] y Payares [4], ellos recomiendan el uso de ladrillo refractario para el material refractario y una manta cerámica para el aislante cerámico, además de un elemento ligante llamado SUPERAEOFLAX el cual unirá los ladrillos para

obtener una pared uniforme, cuyas propiedades se muestran en los Anexos A, B y C.

Para dar un soporte a la selección de los materiales se usó un modelo analítico de transferencia de calor en las paredes del horno para relacionar las variables en busca de la minimización del consumo de energía. Dicho modelo fue usado en el trabajo realizado por Sales [15] para la selección del material para las paredes de un horno y el espesor de las mismas bajo la metodología Ashby de selección de materiales [16].

Para minimizar el consumo de energía se analiza el ciclo de trabajo del horno y se observa en que se emplea la energía que este consume. Este ciclo comprende tres etapas [15]:

1. Calentamiento del horno desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de trabajo
2. Mantenimiento de la temperatura de trabajo el tiempo que requiera la producción.
3. Enfriamiento del horno hasta la temperatura ambiente, una vez termine la producción.

En la Tabla 4, se muestran los consumos de energía en cada una de las etapas

Tabla 4 Consumo energético en el ciclo de trabajo del horno [15]

Etapa 1	$Q_{\text{absorción}} = C_p \cdot \rho \cdot w (T_{\text{trabajo}} - T_o) / 2$ C_p = calor específico de material de la pared ρ = densidad del material de la pared	Calor por unidad de área por absorción de las paredes durante el calentamiento hasta alcanzar la temperatura de trabajo
Etapa 2	$Q_{\text{conducción}} = k \cdot t (T_{\text{trabajo}} - T_o) / w$ k = conductividad térmica del material t = tiempo de operación del horno	Calor aportado para contrarrestar las pérdidas por conducción al exterior
Etapa 3	No aplica	
Consumo de energía	$Q = Q_{\text{absorción}} + Q_{\text{conducción}}$ $Q = C_p \cdot \rho \cdot w (T_{\text{trabajo}} - T_o) / 2 + k \cdot t (T_{\text{trabajo}} - T_o) / w$	Calor total aportado en el ciclo de trabajo

Como el objetivo es minimizar el consumo de energía se deriva la ecuación de consumo de energía y se iguala a cero y se despeja el espesor óptimo obteniendo la ecuación 12.

$$w_{\text{óptimo}} = \sqrt{\frac{2kt}{\rho \cdot Cp}} \quad (12)$$

5.2 Diseño térmico analítico

La determinación de la eficiencia térmica del horno mediante el método analítico se realizó a partir del calor requerido para la fusión del metal y las pérdidas a través de las paredes del horno mostradas en el ítem 4.5. Se aplicó un modelo matemático siguiendo la analogía entre flujo de calor y flujo eléctrico conforme mostrado en la Figura 7. Con este método se hicieron pruebas en un algoritmo implementado en una planilla de Excel; probando primero la configuración del horno original y luego dos configuraciones con el nuevo diseño:

-Configuración 1: pared refractaria sin aislante térmico

-Configuración 2: pared refractaria con aislante térmico

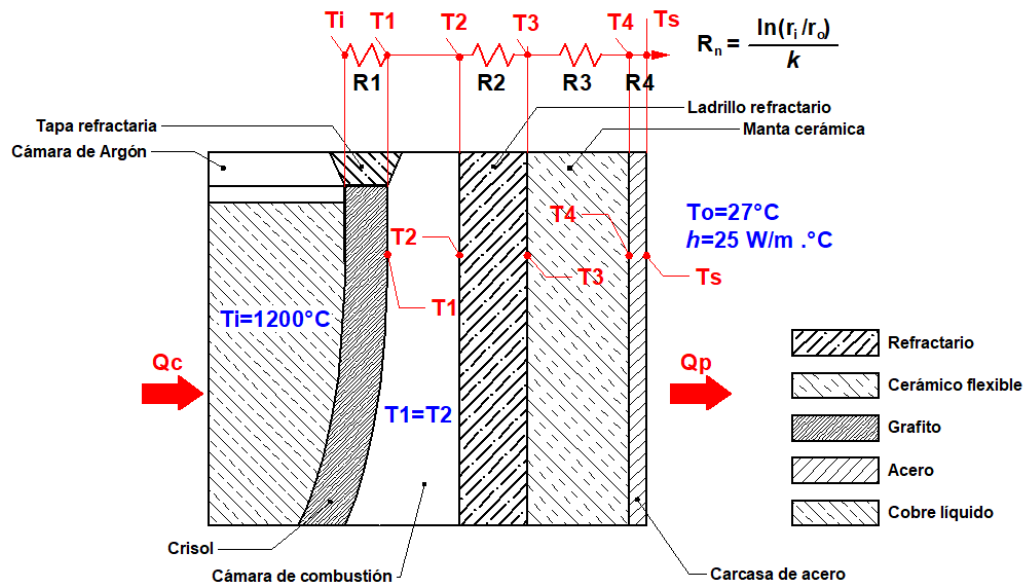


Figura 7 Sistema térmico del horno de crisol basculante. Fuente: Autor

5.3 Simulación térmica

Mediante el uso de software CAE ANSYS se hicieron las validaciones correspondientes al comportamiento térmico del horno mediante el uso del método de los elementos finitos (FEM) en el cual se utilizaron los 4 módulos.

5.3.1 Analisis system

Se utilizó el módulo Steady-State Thermal de ANSYS R16 con el cual se realizaron las simulaciones y se determinó el comportamiento térmico del horno. El esquema del proyecto se organiza como se observa en la Figura 8. Se relacionan las soluciones de la simulación A con el Setup de la simulación B.



Figura 8 Esquema del proyecto de simulación con ANSYS. Fuente: Autor

5.3.2 Geometry

Se realizó la importación del CAD del crisol y del horno en el Design Modeler y se optimiza la geometría al realizar limpieza de la superficie con corrección de caras y bordes.

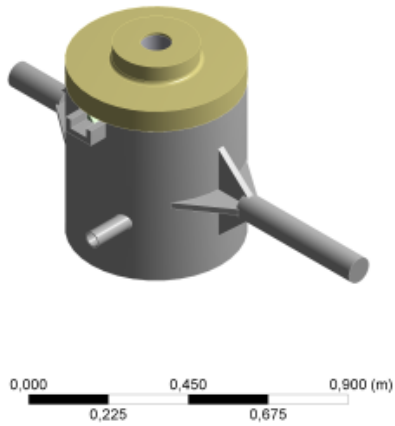


Figura 9 Horno de crisol en el Design Modeler. Fuente: Autor.

5.3.3 Model

A partir de este paso se trabaja en la interfaz Mechanical de ANSYS R16. Se asignan los materiales con base en la información suministrada y se realiza el mallado de las piezas. Se configuró la malla para que utilice el tipo de preferencia física Mechanical y el solucionador Mechanical APDL.

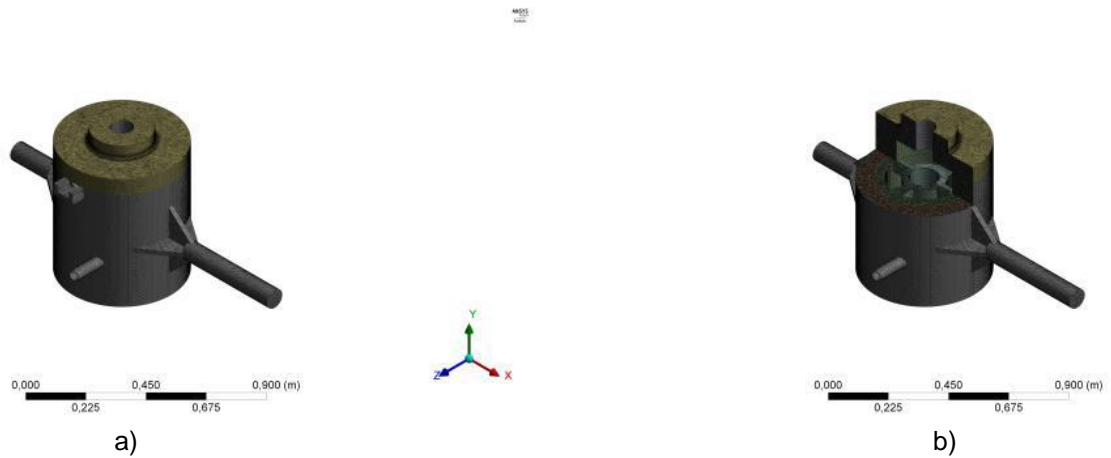


Figura 10 Mallado: a) Horno de crisol. b) Horno de crisol, vista de corte. Fuente: Autor

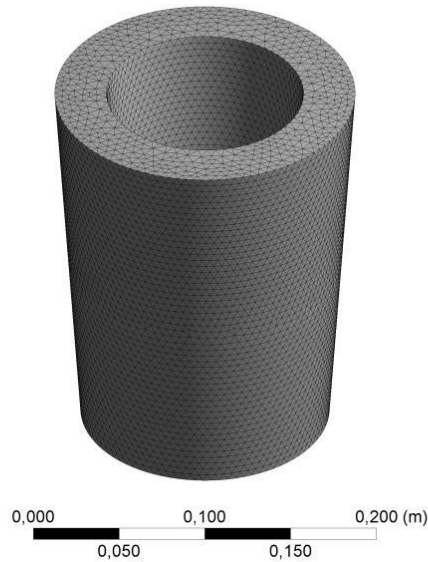


Figura 11 Mallado del crisol. Fuente: Autor

Los datos más importantes de las mallas se muestran en la Tabla 5. El objetivo es mallar teniendo como parámetro una calidad de elemento alta y una tasa de aspecto cercana a 1, para obtener uniformidad en el modelado.

Tabla 5 Datos de Mallado.

Simulación	Nodos	Elementos	Calidad del elemento	Taza de aspecto
A	166 189	110 110	0,83	1,88
B	909 974	568 660	0,82	1,89

5.3.4 Setup

En este módulo se definieron todas las condiciones iniciales para la simulación. Cabe resaltar que fueron hechas algunas consideraciones:

1. Realizar la simulación con el crisol aislado y luego los resultados de este fueron exportarlo para realizar la simulación térmica de la estructura del horno con el material refractario y el aislante térmico
2. La temperatura obtenida en las caras externas del crisol se asumió como siendo igual a la de las de la pared refractaria que define la cámara interna, asumiendo que el aire circundante se encuentra a la misma temperatura
3. Se asume la máxima transferencia de calor por convección natural en las caras externas que están en contacto directo con el aire ($h = 25W / m^2\text{°C}$) Anexo E.
4. El espesor del refractario y el aislante térmico es el resultado del algoritmo implementado en Excel realizando los cálculos de eficiencia térmica.

5.4 Diseño mecánico

5.4.1 Diseño del eje pivote

Para corroborar la resistencia mecánica del eje pivote se aplica el teorema de Goodman [17] el cual tiene en cuenta los esfuerzos de Von Mises alternantes y normales adaptados para ecuaciones específicas de ejes sólidos con sección transversal redonda, además, tiene en cuenta los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga [18] para determinar si el eje soporta las cargas y esfuerzos generados a partir del peso del horno.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[3(K_{fs} T)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (13)$$

K_a = factor de modificación de la condición superficial

K_b = factor de modificación del tamaño

K_c = factor de modificación de la carga

K_d = factor de modificación de la temperatura

K_e = factor de confiabilidad

K_f = factor de modificación de efectos varios

K_{fs} = factor de concentración del esfuerzo por fatiga

$$S'_e = 0.5S_{ut} \quad (14)$$

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_f S'_e \quad (15)$$

$$T = F * \frac{d}{2} \quad (16)$$

Donde:

T= Toque

F= Fuerza del operario
d= Diámetro primitivo del engrane

5.4.2 Selección de rodamientos

Para la selección de rodamientos se tuvo en cuenta la capacidad de carga estática necesaria que debe soportar. Esta capacidad denominada C_0 de un rodamiento puede determinarse por medio de la ecuación:

$$C_0 = S_0 P_0 \quad (17)$$

Donde:

$P_0 =$ Carga estática equivalente, en N

$S_0 =$ Factor de seguridad estático

Teniendo en cuenta lo estudiado de la literatura [3] se optó por manejar la carga estática equivalente como todo el peso generado por el horno y un factor de seguridad estático de 1.6

5.5 Detallamiento técnico

Para el detallamiento técnico del horno de crisol basculante se utilizó el Software CAD Solid Edge ST 8, en él se desarrollaron los planos de diseño y los CAD de cada una de las partes que conforman al horno de crisol basculante definiendo, materiales a utilizar, aspectos perceptivos y utilitarios, conjuntos y subconjuntos, geometría y vínculos entre partes.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Selección de materiales

Con base en la literatura estudiada se recomienda los siguientes materiales para el diseño del horno:

- Crisol de grafito: $k = 48,13W/m^{\circ}C$
- Ladrillo refractario: $k = 1,07W/m^{\circ}C$
- Manta cerámica: $k = 0,3W/m^{\circ}C$
- Placa de acero: $k = 53W/m^{\circ}C$
- Aire circundante: $h = 25W/m^2^{\circ}C$

Aplicando la metodología Ashby [16] a nuestro caso de selección del material refractario y el material aislante en el horno de crisol basculante se inició con los requerimientos de diseño detallados en la Tabla 6.

Tabla 6 Requerimientos de diseño para la selección de materiales para las paredes del horno

Función	Acción refractaria y acción aislante en la pared del horno
Restricciones	$1000^{\circ}C < T_{\text{refractario}} < 1200^{\circ}C$ $900^{\circ}C < T_{\text{aislante}} < 1000^{\circ}C$
Objetivo	Minimizar el consumo de energía
Variables libres	El espesor de pared, w El material

Usando los materiales recomendados para la pared del horno tanto para el refractario (Anexo A) como para el aislante (Anexo B), se estimó el espesor óptimo para las paredes del horno conforme la ecuación 12 y son mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7 Cálculo del espesor óptimo de los materiales seleccionados para la pared del horno

Material	k (W/m. $^{\circ}C$)	ρ (kg/m 3)	C_p (J/kg. $^{\circ}C$)	Espesor, w (cm)
Refractario	1,07	2930	960	5,2
Fibra cerámica	0,23	128	1129	10,5

7.2 Diseño térmico analítico

La configuración original que tiene el horno (Tabla 8), que cuenta con un crisol de 250 mm de diámetro exterior y una pared de ladrillo refractario de 60 mm de espesor, se obtuvieron unas pérdidas de calor en el sistema muy elevadas (8776,7 W). Estas pérdidas son más altas que el calor necesario para fundir el cobre (7395,6 W), siendo esta la razón por la cual el sistema no funcionó de la manera que se esperaba.

Tabla 8 Resultados método analítico diseño original

Variable	Nomenclatura	Valor
		Diseño original
Temperatura ambiente	$T_0(^{\circ}C)$	27
Temperatura de Trabajo	$T(^{\circ}C)$	1200
Calor necesario para fundir el cobre.	$Q_c(W)$	7395,6
Calor perdido a través de las paredes	$Q_p(W)$	8776,7
Temperatura interna refractario	$T_1(^{\circ}C)$	1181,8
Temperatura interna manta cerámica	$T_2(^{\circ}C)$	1181,8
Temperatura interna acero	$T_3(^{\circ}C)$	455,6
Temperatura superficial del horno	$T_s(^{\circ}C)$	452,5
Potencia del Quemador	$E_q(W)$	14572
Eficiencia Térmica	η_e	0,40

Para la configuración 1 (Tabla 9), se colocó un crisol de 175 mm de diámetro exterior y una pared de ladrillo refractario de 100 mm de espesor. Se estimaron pérdidas de calor por 5822,9 W, mostrando mejoras con respecto al diseño original. De esta forma se pierde una gran cantidad de calor a través de las paredes; esto indica que en el rediseño se espera que el horno funcione fundiendo el cobre, pero sigue perdiendo mucho calor.

Tabla 9 Resultados método analítico Configuración 1

Variable	Nomenclatura	Valor
		Configuración 1
Temperatura ambiente	$T_0(^{\circ}C)$	27
Temperatura de Trabajo	$T(^{\circ}C)$	1200
Calor necesario para fundir el cobre.	$Q_c(W)$	7395,6
Calor perdido a través de las paredes	$Q_p(W)$	5822,9
Temperatura interna refractario	$T_1(^{\circ}C)$	1186,8
Temperatura interna manta cerámica	$T_2(^{\circ}C)$	1186,8
Temperatura interna acero	$T_3(^{\circ}C)$	310,7
Temperatura superficial del horno	$T_s(^{\circ}C)$	309,3
Potencia del Quemador	$E_q(W)$	14572
Eficiencia Térmica	η_e	0,60

En cuanto a las temperaturas no se logra cumplir con el requerimiento de diseño de alcanzar una temperatura exterior menor a 200°C resaltando que la temperatura interior en el crisol fue fijada en 1200°C para los dos diseños y que un poco superior a la temperatura máxima para fundir el cobre. Debido a que no cumple con los requisitos funcionales (Tabla 1) se desarrolló una nueva configuración añadiendo un aislante cerámico.

Para la configuración 2 (Tabla 10), se colocó el mismo crisol de 175 mm de diámetro exterior junto con una pared de ladrillo refractario de 40 mm de espesor y se implementó una manta cerámica de 60 mm de espesor. Se obtuvo una pérdida de

calor de 2804,8W, casi tres veces menor al calor necesario para fundir el cobre (7395,6 W); esto indica que en el rediseño se espera que el horno funcione fundiendo el cobre.

Tabla 10 Resultados método analítico Configuración 2

Variable	Nomenclatura	Valor
		Configuración 2
Temperatura ambiente	$T_0(^{\circ}C)$	27
Temperatura de Trabajo	$T(^{\circ}C)$	1200
Calor necesario para fundir el cobre.	$Q_c(W)$	7395,6
Calor perdido a través de las paredes	$Q_p(W)$	2804,8
Temperatura interna refractario	$T_1(^{\circ}C)$	1186,8
Temperatura interna manta cerámica	$T_2(^{\circ}C)$	988,6
Temperatura interna acero	$T_3(^{\circ}C)$	170,5
Temperatura superficial del horno	$T_s(^{\circ}C)$	169,9
Potencia del Quemador	$E_q(W)$	14572
Eficiencia Térmica	η_e	0,80

Cabe resaltar, que, en la planilla de Excel, se pudieron variar los espesores del material refractario y del aislante térmico, al mismo tiempo que se calculaban las pérdidas y eficiencia energética. Estos resultados se muestran en la tabla 11.

Tabla 11 Prueba de espesores de material refractario y aislante en las paredes del horno de crisol

Nomenclatura	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Método Ashby	
	Wrefract	Waisl.	Wrefract	Waisl.	Wrefract	Waisl.	Wrefract	Waisl.	Wrefract	Waisl.
Espesor (mm)	30	70	40	60	50	50	60	40	50	100
$Q_p (W)$	2549,4		2804,8		3099,2		3442,7		2075,1	
$T_3 (^{\circ}C)$	1047,8		988,6		920,33		840,7		997,5	
$T_s (^{\circ}C)$	156,8		169,9		184,8		202,3		114,9	

Como restricciones térmicas se consideraron:

- Las pérdidas de calor Q_p deben ser mínimas
- La temperatura del aislante T_3 no debe superar los 1000 °C
- La temperatura de la superficie T_s debe ser de máximo 200 °C, cuanto menor mejor

Se observa que los espesores obtenidos en la selección de materiales por el modelo de consumo energético (Ecuación 12) siguiendo el método Ashby son los óptimos, pues cumplen las restricciones térmicas. Pero estos espesores deben considerar la restricción de espacio entre la carcasa y la pared refractaria del horno (100 mm). Siendo así, los espesores calculados en la Prueba 2 son los escogidos para el nuevo diseño del horno y se consideraron en la Configuración 2 (Tabla 10).

Las dimensiones y parámetros obtenidos de la configuración 2 y los espesores de los materiales de la pared fueron colocados como entradas en el software ANSYS para el desarrollo de la simulación por el método de elementos finitos.

7.3 Simulación térmica

7.3.1 Setup

Se definieron todas las condiciones iniciales para la simulación, las cuales están detalladas en la tabla 12.

Tabla 12 Condiciones iniciales utilizadas en la simulación con ANSYS R16

Parámetro	Nombre	Valor
Temperatura del metal fundido	Ti	1200 °C
Temperatura ambiente	To	27 °C
Calor de entrada necesario para fundir el cobre	Qc	7395,6 W
Conductividad térmica del crisol de grafito	k _{grafito}	48,13 W/ m°C
Conductividad térmica del ladrillo refractario	k _{refract}	1,07W/ m°C
Conductividad térmica de la manta cerámica	k _{manta}	0,3W/ m°C
Conductividad térmica del acero	k _{acero}	53W/ m°C
Coefficiente de transferencia de calor del aire	h	25W/ m ² °C
Espesor de material refractario	W _{refract}	40 mm
Espesor de material aislante	W _{aislante}	60 mm

7.3.2 Results

Se obtuvieron los resultados mostrados en las Figuras 12 a) y 12 b) mediante simulación con el software CAE ANSYS. En la Figura 12 a) se observa la distribución de temperatura del crisol y en la Figura 12 b) la distribución de temperaturas a lo largo de la estructura interna y externa del horno.

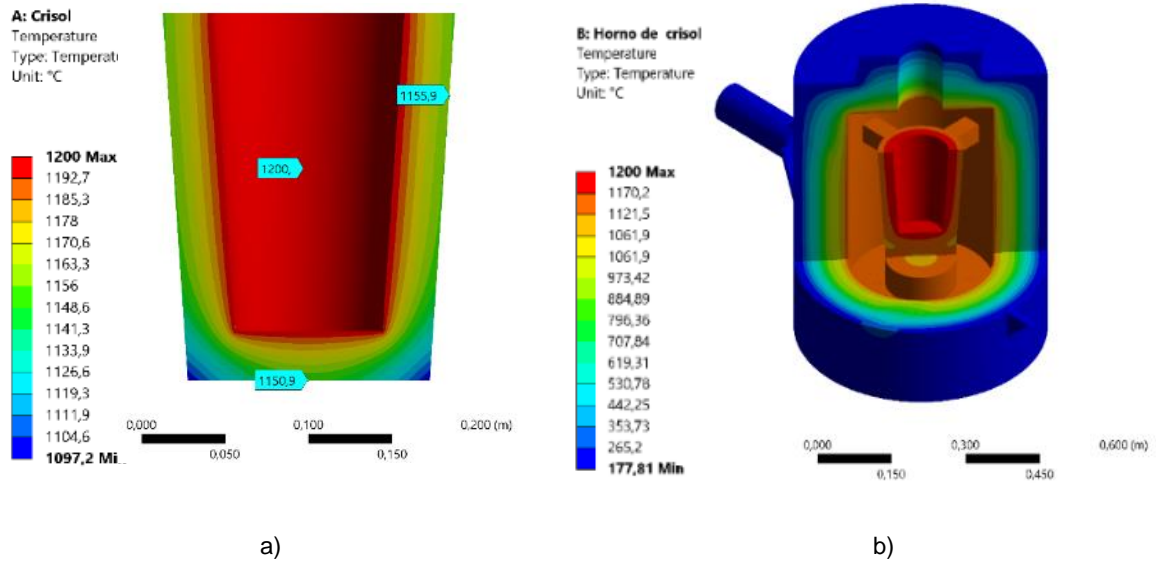


Figura 12 a) Comportamiento térmico de crisol b) Comportamiento térmico estructural. Fuente: Autor

7.4 Diseño mecánico

7.4.1 Diseño del eje pivote

Se realizó la verificación de la resistencia del eje para ello, fue se calculó el peso del horno conformado por un crisol de grafito, ladrillo refractario, manta cerámica y una carcasa de acero y estos fueron mostrados en la Tabla 13.

Tabla 13 Partes del horno y su peso

Elemento	Masa(Kg)
Crisol de Grafito	1.70
Ladrillo Refractario	168.18
Manta Cerámica	5.27
Carcasa de Acero	110.68
Total	285.83

El torque generado para girar el horno se calculó con la ecuación (16):

$$T = 208 N$$

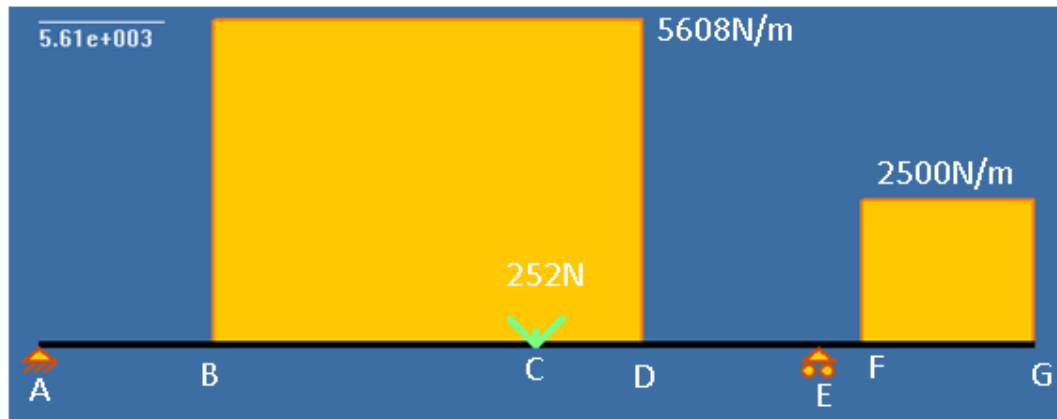


Figura 13 Diagrama de cargas en XvIGAS del eje. Fuente: Autor

Luego de tener viga creada en el software XvIGAS se calcularon las reacciones y momentos, teniendo el valor del momento máximo $M=459.1\text{Nm}$, un torque de $T=208\text{Nm}$ generado por el operario, y el material del eje Acero SAE 1045 el cual nos indica los valores S_y y S_{ut} (Anexo D), se calcularon los factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga del eje los cuales son:

$$S_y = 413\text{Mpa}$$

$$S_{ut} = 655\text{Mpa}$$

$$K_a = 0.81$$

$$K_b = 0.759$$

$$K_c = 0.7$$

$$K_d = 1$$

$$K_e = 0.75$$

$$K_f = 1$$

$$K_{fs} = 1$$

Aplicando las ecuaciones 14 y 15 se obtuvo:

$$S'_e = 327.5\text{Mpa}$$

$$S_e = 105.7\text{Mpa}$$

Aplicando la ecuación (13) se encontró el factor de seguridad del eje con diámetro 8cm:

$$n = 10.9$$

Demostrando así que el eje está sobredimensionado por lo que no se presenta la necesidad de cambiarlo.

7.4.2 Selección de rodamientos

La capacidad de carga estática necesaria C_0 de un rodamiento puede determinarse por medio de la ecuación (17) donde:

Donde:

$$P_0 = 2.8kN$$

$$S_0 = 1.6$$

$$C_0 = 4.48kN$$

El soporte de rodamiento que tiene eje es denominado 1218K SNL 518-615 (Anexo F) con rodamientos de bola auto-alienables 1218K (Anexo G) que tienen un $C_0 = 23.6kN$. Soportando una carga hasta 5 veces mayor que la calculada.

7.5 Comparación de los nuevos diseños con el diseño original (Método analítico)

Para la comparación de los nuevos diseños con el diseño original se agruparon en la Tabla 14 los resultados obtenidos de las Tablas 11, 12 y 13 donde se muestran los diseños térmicos mediante el método analítico de cada una de las configuraciones.

Tabla 14 Comparación de los nuevos diseños con el diseño original (Método analítico)

Variable	Nomenclatura	Valor		
		Diseño original	Configuración 1	Configuración 2
Temperatura ambiente	$T_0(^{\circ}C)$	27	27	27
Temperatura de Trabajo	$T(^{\circ}C)$	1200	1200	1200
Calor necesario para fundir el cobre.	$Q_c(W)$	7395,6	7395,6	7395,6
Calor perdido a través de las paredes	$Q_p(W)$	8776,7	5822,9	2804,8
Temperatura interna refractario	$T_1(^{\circ}C)$	1181,8	1186,8	1186,8
Temperatura interna manta cerámica	$T_2(^{\circ}C)$	1181,8	1186,8	988,6
Temperatura interna acero	$T_3(^{\circ}C)$	455,6	310,7	170,5
Temperatura superficial del horno	$T_s(^{\circ}C)$	452,5	309,3	169,9
Potencia del Quemador	$E_q(W)$	14572	14572	14572
Eficiencia Térmica	η_e	0,40	0,60	0,80

Con base en lo mostrado en la Tabla 14 se observa que con la implementación de la manta cerámica en la configuración 2, se logró obtener una eficiencia térmica **20%** mayor a la configuración 1 de solo ladrillo refractario y una mejora del **40%** en comparación con el diseño original. En cuanto a las temperaturas, la configuración 2 es la única que logra cumplir con el requerimiento de diseño de alcanzar una temperatura exterior menor a 200°C resaltando que la temperatura interior en el crisol fue fijada en 1200°C para los tres diseños y que un poco superior a la temperatura máxima para fundir el cobre.

7.6 Comparación del método analítico con el método de elementos finitos

En la Tabla 15 se compararon los resultados obtenidos mediante el método analítico y la simulación con el software CAE ANSYS del método de elementos finitos.

Tabla 15 Comparación del método analítico con el método elementos finitos

Variable	Nomenclatura	Valor	
		Nuevo diseño	Simulación
Temperatura ambiente	$T_0(^{\circ}C)$	27	27
Temperatura de Trabajo	$T(^{\circ}C)$	1200	1200
Calor necesario para fundir el cobre.	$Q_c(W)$	7395,6	7395,6
Calor perdido a través de las paredes	$Q_p(W)$	2804,8	2730
Temperatura exterior del crisol (interna refractario)	$T_1(^{\circ}C)$	1186,8	1155,9
Temperatura externa refractario (interna manta cerámica)	$T_2(^{\circ}C)$	988,6	960,6
Temperatura externa manta cerámica (interna acero)	$T_3(^{\circ}C)$	170,5	181,5
Temperatura superficial del horno	$T_s(^{\circ}C)$	169,9	180,9
Potencia del Quemador	$E_q(W)$	14572	14572
Eficiencia Térmica	η_e	0,80	0,81
Error promedio	%	4.44	

Con base en lo mostrado en la Tabla 15 se observa un porcentaje de **error promedio de 4,44 %** entre los datos obtenidos mediante la simulación y los datos obtenidos por medio del método analítico. Este es lo suficientemente bajo para validar el método analítico y el nuevo diseño desarrollado. La estimación de las pérdidas tuvo un **error de 2.71%**, el cálculo de la eficiencia se obtuvo con un **error de 1,23%**. Estos resultados demuestran que la metodología analítica de cálculo térmico usada para el diseño del horno de crisol basculante esta correcta y en consecuencia el diseño del horno.

7.7 Detallamiento técnico

Con base en los resultados obtenidos, se desarrollaron los planos de diseño y los CAD de cada una de las partes que conforman al horno de crisol basculante.

La estructura metálica contiene una carcasa, placas de acero soldadas en las partes laterales del horno y 2 ejes soldados a estas. En las figuras 14, 15 y 16 se muestran los planos de la carcasa, las placas y los ejes respectivamente.

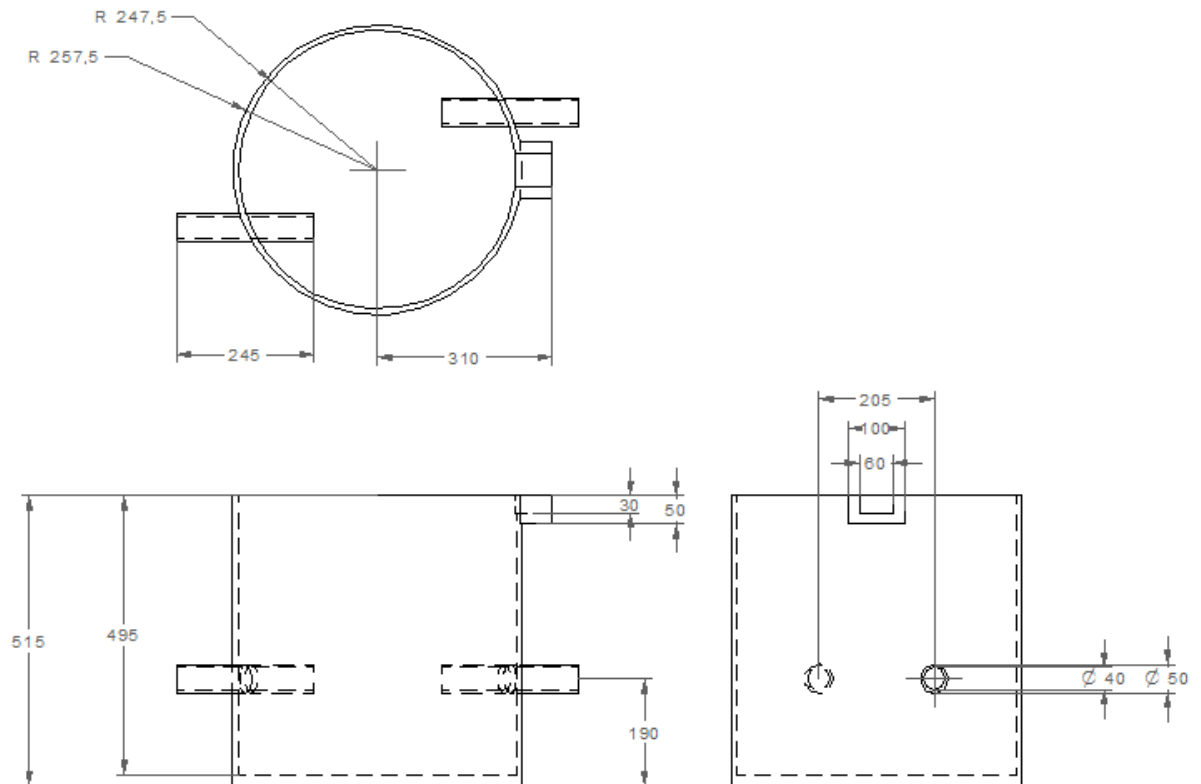


Figura 14 Plano de la Carcasa de acero del horno de crisol basculante. Fuente: Autor

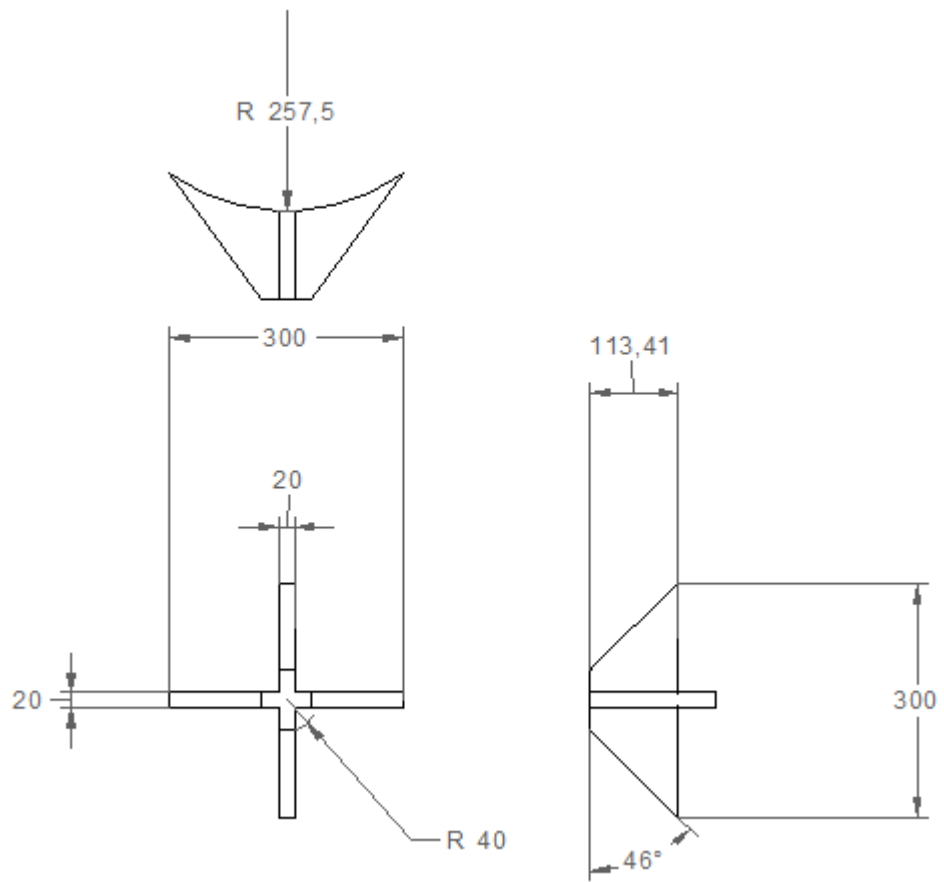


Figura 15 Plano de las placas de acero. Fuente: Autor

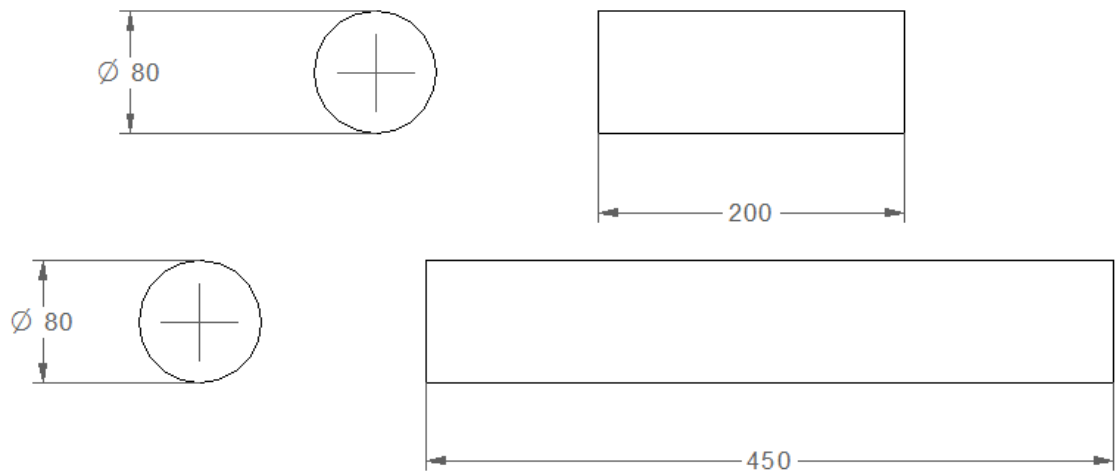


Figura 16 Plano de los ejes de acero. Fuente: Autor

En la Figura 17 se observa el diseño CAD de la estructura metálica completa.

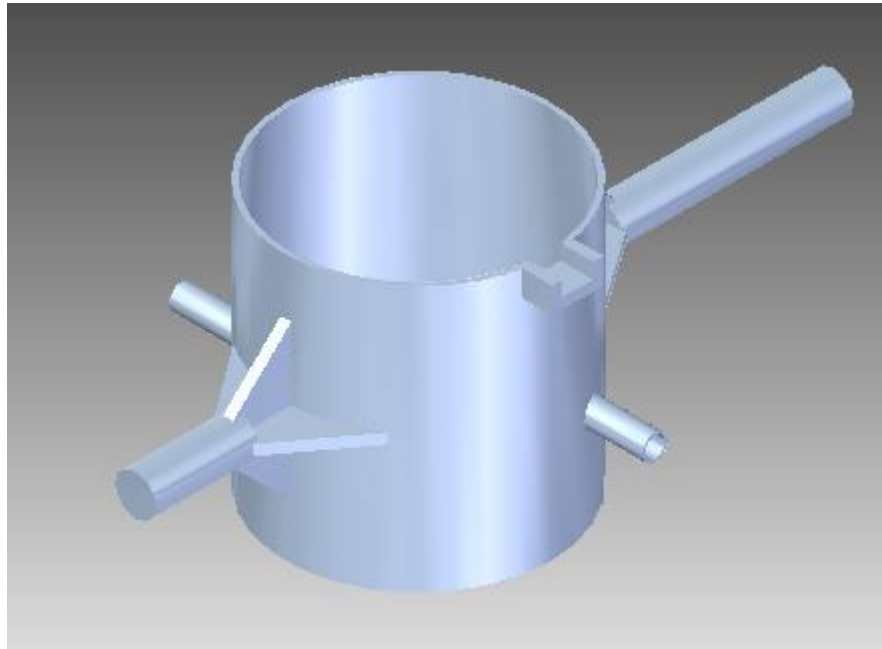


Figura 17 CAD de la estructura metálica. Fuente: Autor

Ahora en la parte interna del horno de crisol basculante se encuentra la base y el apoyo del crisol hechos con ladrillos refractarios, el crisol de grafito, la pared del horno que está compuesta por ladrillos refractarios y una manta cerámica. En las figuras 18, 19, 20 y 21 se muestran los planos la base y el apoyo, el crisol, el ladrillo refractario y la manta cerámica respectivamente.

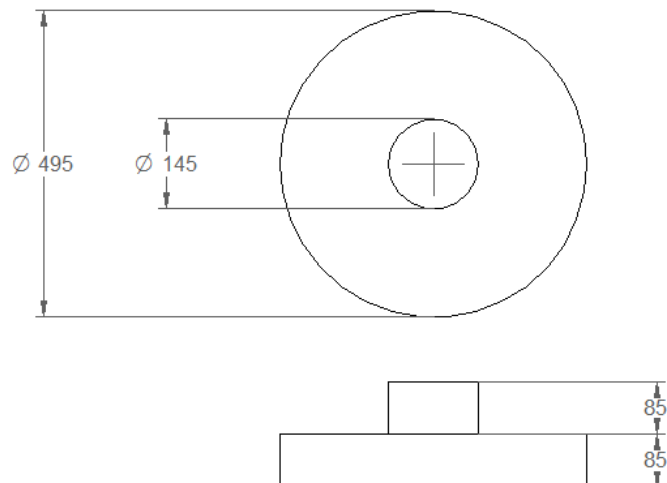


Figura 18 Plano de la base y el apoyo del crisol. Fuente: Autor

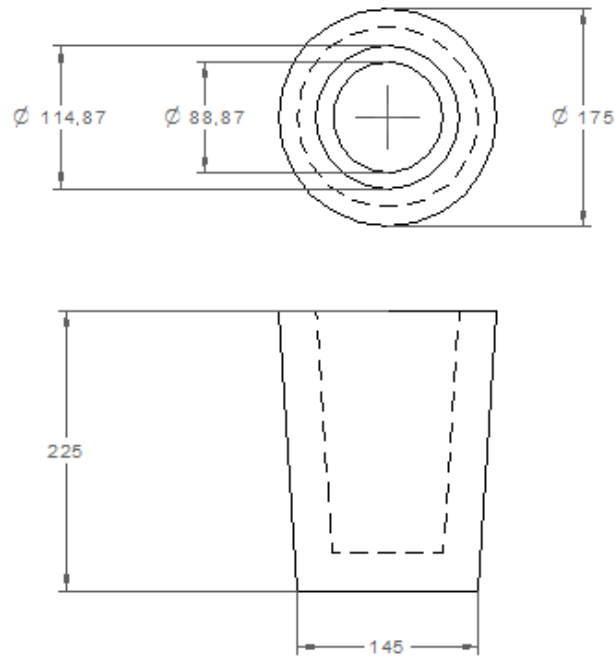
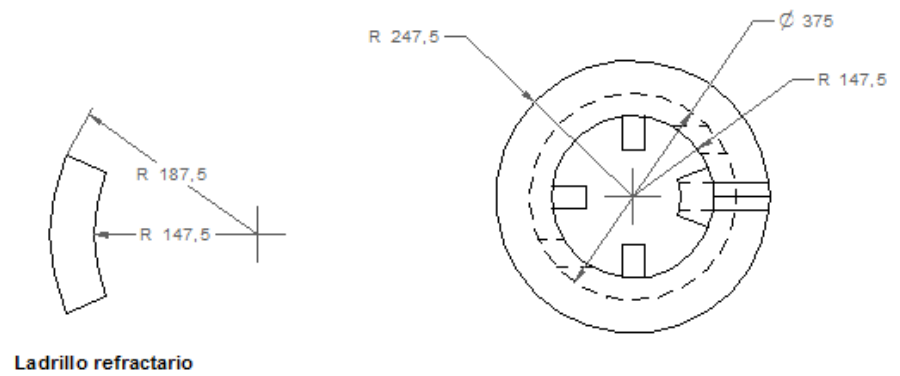


Figura 19 Plano del crisol. Fuente: Autor



Ladrillo refractario

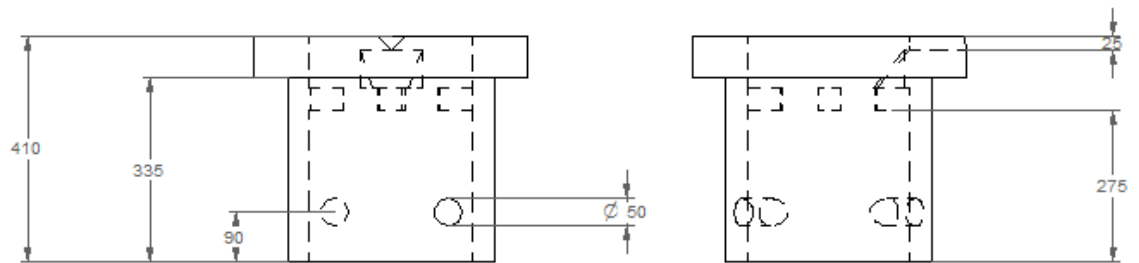


Figura 20 Plano del ladrillo y la pared refractaria. Fuente: Autor

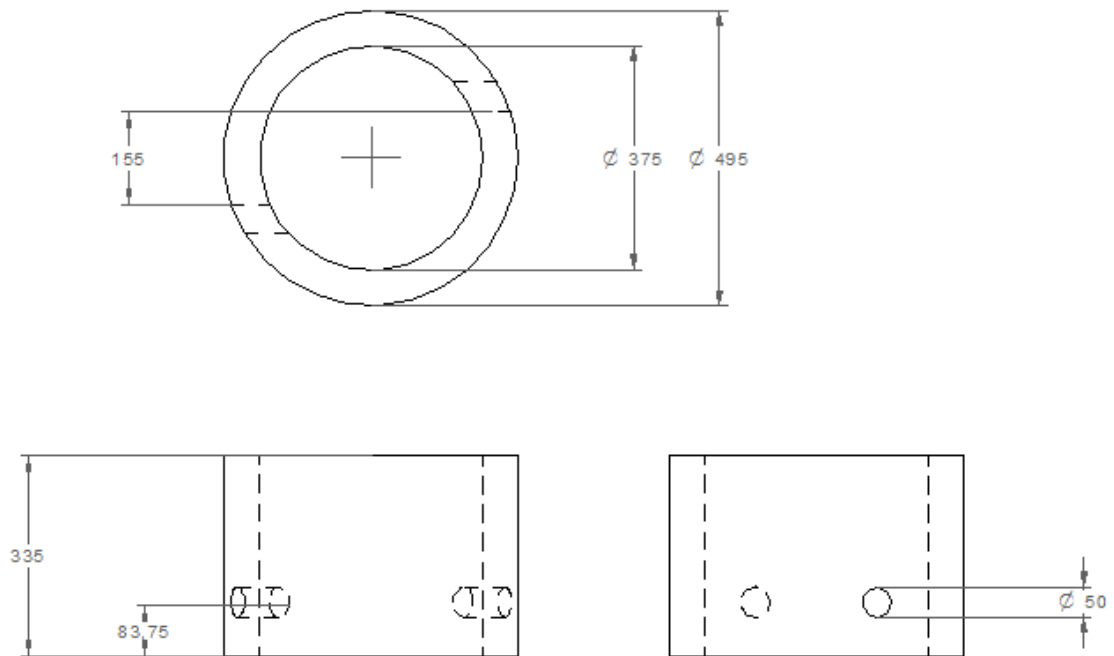


Figura 21 Plano de la manta cerámica. Fuente: Autor

En la Figura 22 se observa el diseño CAD el conjunto de las partes internas del horno de crisol basculante.

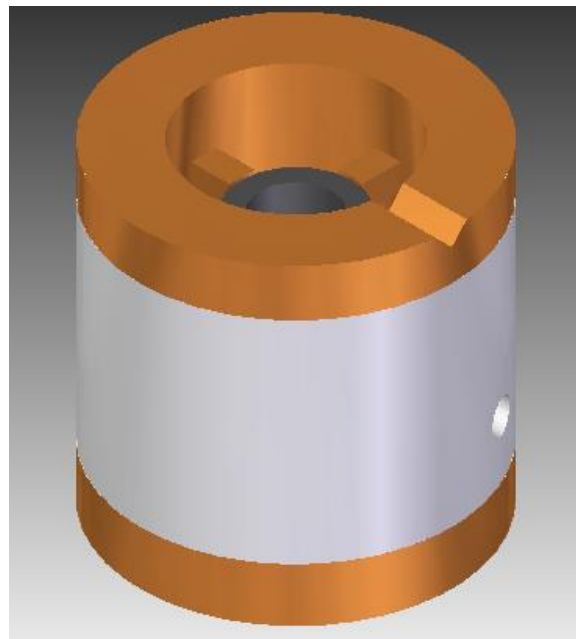


Figura 22 CAD del Conjunto partes internas del horno. Fuente: Autor

También se hizo el plano y el CAD de la estructura que soporta todo el horno, a la cual se le ensamblan los soportes para rodamientos y los rodamientos previamente seleccionados junto con el plano del volante con el que se realiza la descarga de la colada.

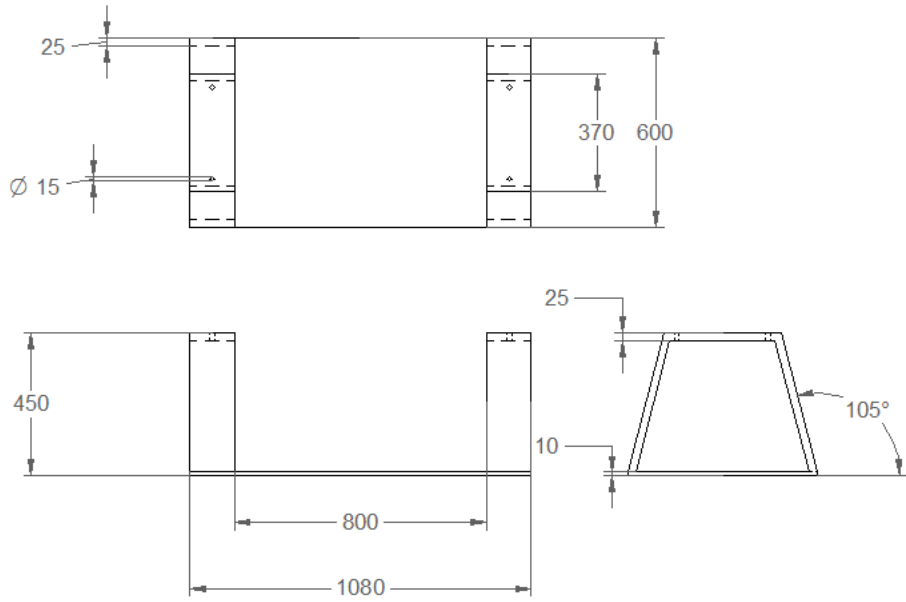


Figura 23 Plano estructura soporte del horno. Fuente: Autor

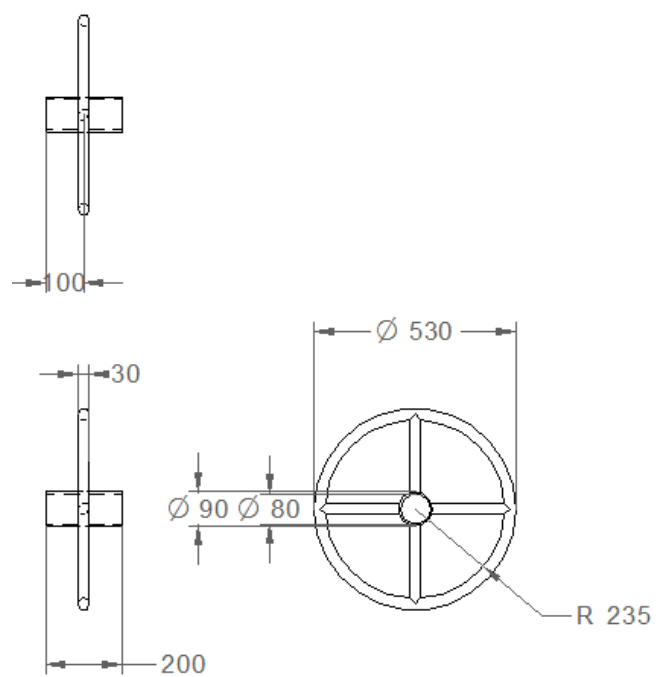


Figura 24 Plano del volante

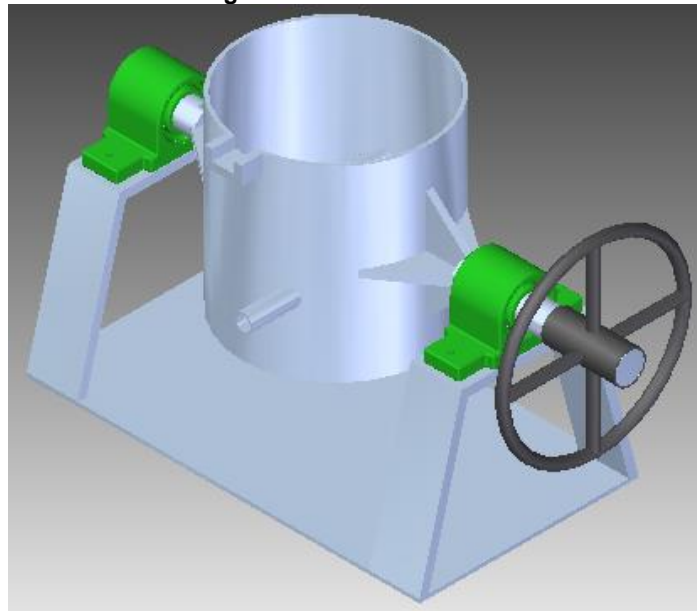


Figura 25 CAD Conjunto Estructura soporte. Fuente: Autor

Además se realizaron dos diseños de la tapa del horno, uno teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por expertos en construcción de hornos industriales y otro realizado para el caso en el que la escoria no sea suficiente para proteger la colada de las impurezas del ambiente. En la Figura 26 se muestra el plano de la tapa diseñada con las recomendaciones de expertos y en las Figuras 27 y 28 la tapa diseñada con la recomendación de Campbell [11].

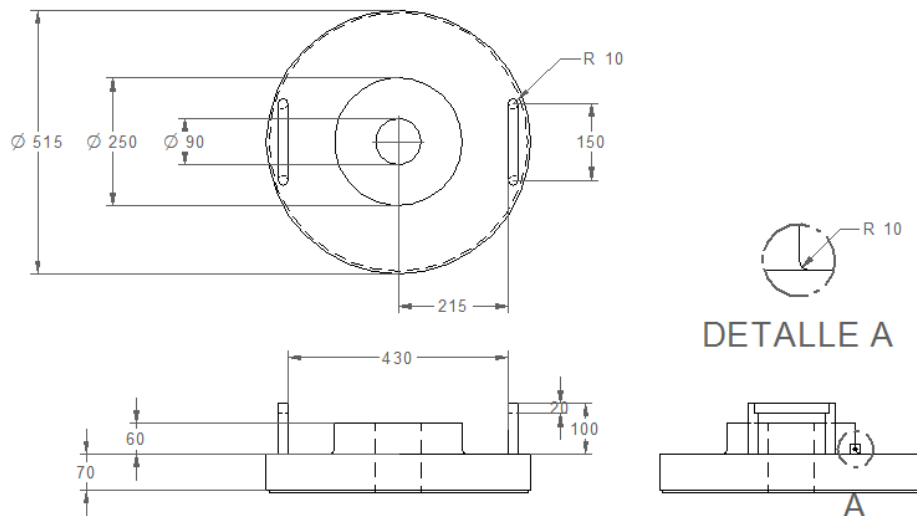


Figura 26 Plano tapa inicial. Fuente: Autor

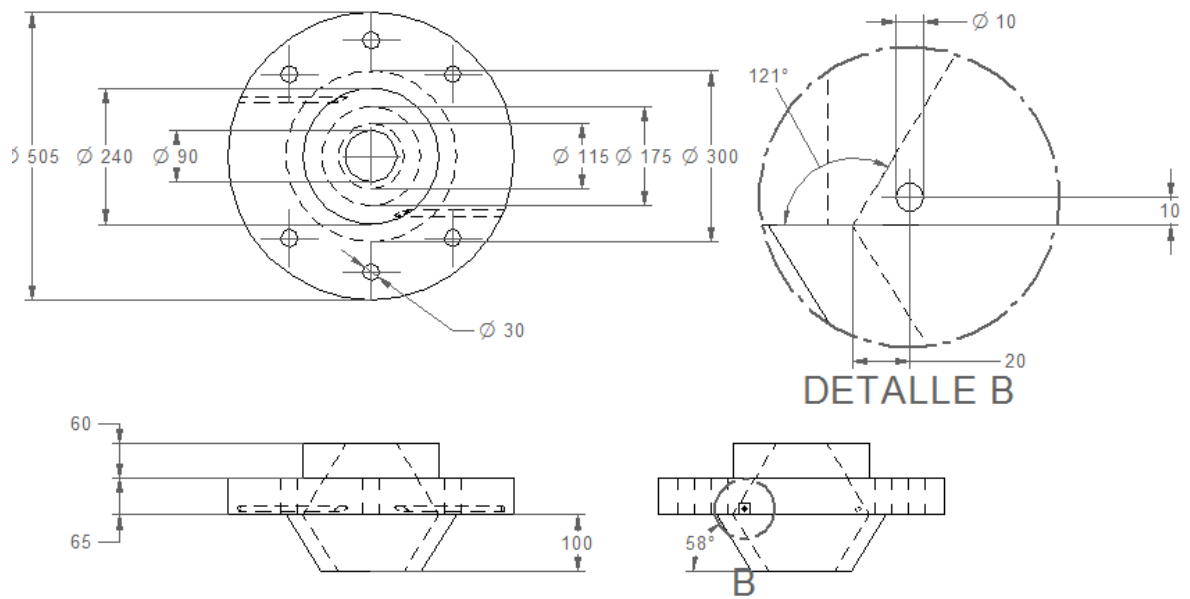


Figura 27 Plano refractario de la tapa con protección de gas argón. Fuente: Autor

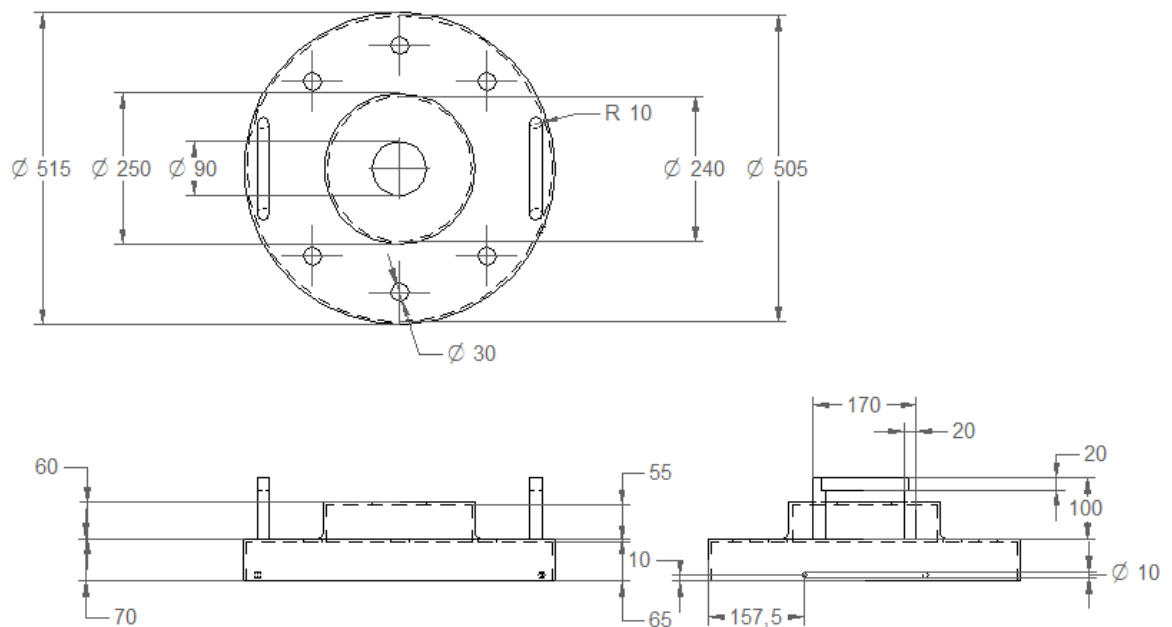
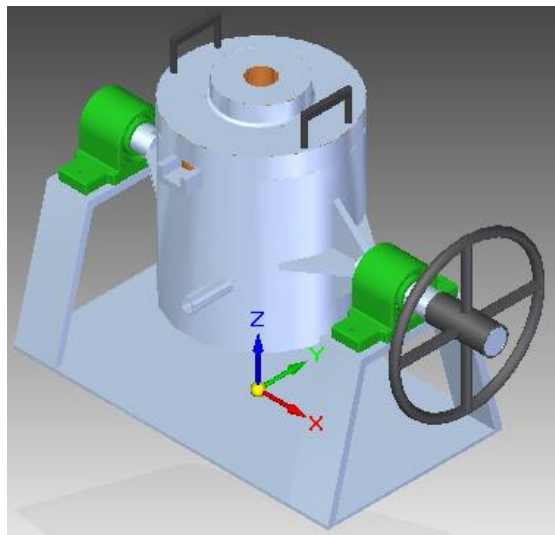
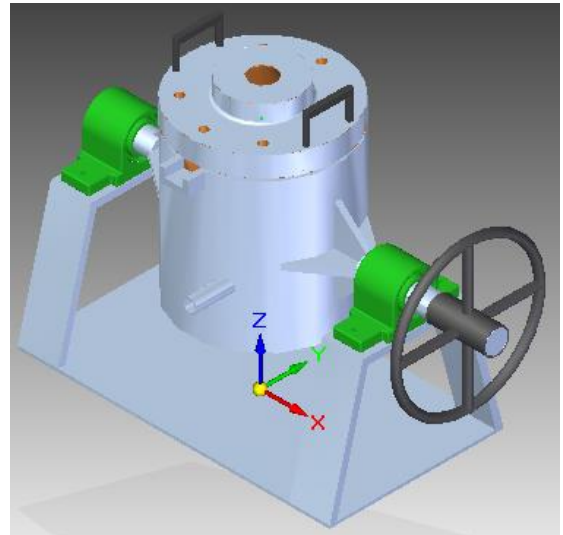


Figura 28 Plano tapa de acero con protección de gas argón. Fuente: Autor

Por ultimo en la Figura 29 se muestran los CAD del horno con las diferentes tapas y en la Figura 30 se muestra el explosionado de todas las partes

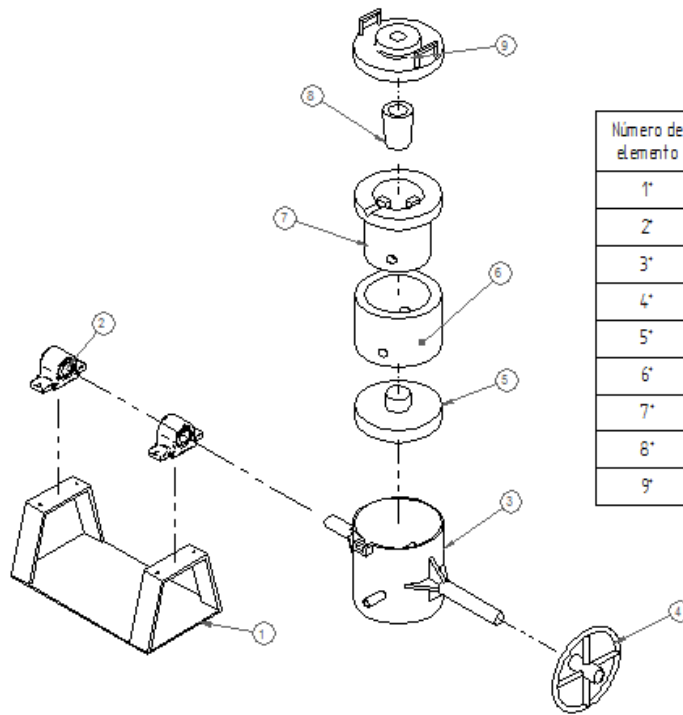


a)



b)

Figura 29 Figura 29 a) Horno con la tapa inicial, b) Horno con la tapa de protección con gas argón



Número de elemento	Título	Material	Cantidad
1*	Soporte del horno	Acero	1
2*	Soporte rodamientos	Acero	2
3*	Carcasa del horno	Acero	1
4*	Volante	Aluminio + revestimiento	1
5*	Base y apoyo	Ladrillo refractario	1
6*	Manta cerámica	Fibra Cerámica	1
7*	Pared de ladrillo	Ladrillo refractario	1
8*	Crisol	Grafito	1
9*	Tapa	Acero + Ladrillo Refractario	1

Figura 30 Explosionado de piezas del horno

8. CONCLUSIONES

Con respecto a la efectividad de la fundición se verifico de forma analítica y simulada que el horno rediseñado presenta perdidas de calor tres veces menores a la requerida para fundir el cobre, con lo cual se espera que funcione.

Con respecto a la eficiencia térmica de la combustión se duplico la eficiencia del diseño original y se aumentó en un 20% la obtenida por Flores [5], mostrando de esta manera la mejora del diseño de los hornos de crisol consultados en la literatura.

Con respecto al proceso de refusión del cobre de alta pureza se recomienda el diseño de la tapa en forma de cámara para concentrar la inyección de gas Argón para proteger la superficie fundida de la inclusión de gases de combustión que puedan contaminar el cobre.

Con respecto la selección de materiales se verifica que el modelo analítico que relaciona las variables en método Ashby es válido para las aplicaciones de horno de crisol basculante, pues son coherentes con los cálculos de eficiencia energética.

9. REFERENCIAS

- [1] Cobres de Colombia LTDA, «Refinación del cobre Cobres de Colombia LTDA FINAL,» 25 07 2015. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=KHZfAjMYItU>.
- [2] J. Kallarackel, Physical chemistry of fire refinaion of cooper, Researchgate, 1972.
- [3] J. F. Olalla y J. J. Carrillo, - Diseño y construcción de un horno de crisol basculante, calentado por combustible para la fundición de aluminio, Latacunga: ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO SEDE LATACUNGA, TESIS DE GRADO, CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ, 2009.
- [4] A. Payares y F. Pino, Diseño, cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes, Pamplona: UNIVERSIDAD DE PAMPLONA, TRABAJO DE GRADO, FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, 2009.
- [5] O. N. R. E. Flores García Evelyn Yesenia, Diseño Y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas, San Salvador: Universidad del Salvador, 2014.
- [6] K. h. K. L. S. A. Schwartz Harry, «Controlling Atmospheric Contaminants in the Smelting and Refining of Copper-Base Alloys,» *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 5, 2012.
- [7] S. Dablement, «Recycling and refining of copper for electrical application,» *EDP Sciences*, nº 7, 2013.
- [8] ASM commitee, «ASM Handbook - Casting,» *ASM International*, vol. 15, 1998.
- [9] A. Bathia, «Overview of Refractory Materials,» PDHonline, 2012. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/77801649/Overview-of-Refractory-Materials>. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [10] W. D. Callister, Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, España: Reverte S. A, 1995.
- [11] J. Campbell, «Chapter 14 - Melting,» de *Metal Castin Processes, Techniques and Design*, vol. Volumen 2, Complete Casting Handbook, 2011, pp. 879-910.
- [12] SKS, «SKF,» [En línea]. Available: <https://www.skf.com/group/splash/index.html>. [Último acceso: Septiembre 2018].
- [13] C. Yunus A, Transferencia de calor y masa, McGrawHill 3era edicion.
- [14] M. Zitnanský, «Refining of the Copper and Investment Casting,» *Journal of Materials Processing Technology ELSEVIER*, vol. 53, pp. 499-507, 1995.
- [15] D. Sales, Selección de materiales y dimensionamiento de paredes de hornos de alfalería, España: Universidad de Cádiz, 2012.

- [16] M. ASHBY, *Material selection in mechanical design*, Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [17] Shigley, «Ejes, flechas y sus componentes,» de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, McGrawHill, pp. 386-395.
- [18] Shigley, «Fallas por fatiga resultantes de carga variable,» de *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, McGrawHill, pp. 257-346.
- [19] ANSYS, «ANSYS,» [En línea]. Available: <https://www.ansys.com>. [Último acceso: Septiembre 2018].

10.ANEXOS

Anexo A

Ladrillo refractario propiedades

LA A.3	Propiedades de los no metales* (Continuación.)	Temperatura, °C	k, W/m · °C	ρ, kg/m ³
		Materiales estructurales y resistentes al calor		
	Arillo:			
	tierra de diatomeas, moldeado y cocido	200	0.24	
		870	0.31	
	Ladrillo refractario Cocido a 1.330 °C	500	1.04	2.000
		800	1.07	
		1.100	1.40	
	Cocido a 1.450 °C	500	1.28	2.300
		800	1.37	
		1.100	1.40	
	Missouri	200	1.00	2.600
		600	1.47	
		1.400	1.77	
	lagnesita	200	3.81	
		650	2.77	
		1.200	1.90	
	ladera (transversal a la veta):	30	0.055	140
	alsa, 42.97 kg/m ² (8.8 lb/ft ²)	30	0.097	460
	iprés	23	0.11	420
	betón	30	0.166	540
	roble	23	0.147	640
	ino amarillo (<i>Pinus strobus</i>)*	30	0.112	430
	ino blanco	20	0.48	1.440
	terro, yeso	20	0.47	
	arillas de metal	20	0.28	
	listones de madera	20		
	do de aluminio. zafiro	30	46	3.970

Anexo B
Fibra Cerámica Propiedades

MaxWool colcha de fibra cerámica

MaxWool™ colcha de fibra cerámica está compuesta por fibras entrelazadas largas y flexibles, fabricadas a través del proceso "spun", creando con esto un producto durable, fuerte y ligero. Este material puede usarse para aplicaciones con temperaturas que van desde los 538 °C (1000 °F) hasta los 1425 °C (2600 °F). Las Colchas Nutec tienen alta resistencia a la tensión para una mayor durabilidad.

Otras Aplicaciones

- Aislamiento de Cubiertas y Sotadores Comerciales
- Revestimiento sobre Refractarios Existentes
- Aislamiento en Horno como Alivio de Tensión
- Aislamiento en la Carcasa de Hornos para la Industria del Vidrio
- Protección contra Incendios



CARACTERÍSTICAS

- Bajo Conductividad Térmica
- Bajo Almacenamiento de Color
- Alta Resistencia a la Tensión
- Resistencia al Choque Térmico
- Absorción del Sonido
- Fácil Instalación
- No Contiene Aglutinante
- No Contiene Asbestos
- No Requiere Tiempo de Secado o de Curado

APLICACIONES COMUNES

Refinamiento y Petroquímica

- Hornos de Pirólisis y Reformadoras
- Sellos para Tubos, Empaques y Juntas de Expansión
- Tubaría para Alta Temperatura, Aislamiento de Ductos y Turbinas
- Revestimiento para Calentadores de Crudo

Industria Siderúrgica

- Hornos de Tratamiento Térmico y Templado
- Revestimiento para el Interior de las Puertas de los Hornos y Sellos
- Tapas y Sellos para Hornos de Fundición
- Reparaciones en la Cara Caliente de los Hornos
- Hornos de Recalentamiento
- Tapas de Ollas

Industria Cerámica

- Aislamiento para las Carros de los Hornos y Sellos
- Horno Continuo y Batch

Generación de Energía

- Aislamiento de Caldera
- Puertas de Caldera
- Cubiertas Reusables de Turbinas
- Reacubrimiento para Tuberías

Propiedades Físicas

Densidad lb/ft³ (kg / m³)

Temperatura de Uso Máximo, °C (°F)

Temperatura de Uso Continuo, °C (°F)

Punto de Fusión, °C (°F)

Diámetro de Fibras Promedio, micrones

Encogimiento Lineal (%)

24 Hrs @ 1000 °C (1832°F)

24 Hrs @ 1200 °C (2192°F)

24 Hrs @ 1300 °C (2372°F)

Análisis Químico (%)

Al₂O₃

SiO₂

ZrO₂

Otros < 1%

Conductividad Térmica W/m °K (BTU-in/hr-ft² °F)

Temperatura Promedio, 120 kg/m³ (8 lb/ft³)

● 260 °C (500 °F)

● 538 °C (1000 °F)

● 816 °C (1500 °F)

● 982 °C (1800 °F)

● 1093 °C (2000 °F)

Temperatura Promedio, 96 kg/m³ (6 lb/ft³)

● 260 °C (500 °F)

● 538 °C (1000 °F)

● 816 °C (1500 °F)

● 982 °C (1800 °F)

● 1093 °C (2000 °F)

Temperatura Promedio, 64 kg/m³ (4 lb/ft³)

● 260 °C (500 °F)

● 538 °C (1000 °F)

● 816 °C (1500 °F)

● 982 °C (1800 °F)

● 1093 °C (2000 °F)

	LTS	HPS	HTZ
Densidad lb/ft ³ (kg / m ³)	4, 6, 8, 10 (64, 96, 128, 160)	4, 6, 8, 10 (64, 96, 128, 160)	4, 6, 8, 10 (64, 96, 128, 160)
Temperatura de Uso Máximo, °C (°F)	1093 (2000)	1316 (2400)	1425 (2600)
Temperatura de Uso Continuo, °C (°F)	982 (1800)	1200 (2192)	1343 (2450)
Punto de Fusión, °C (°F)	1760 (3200)	1760 (3200)	1760 (3200)
Diámetro de Fibras Promedio, micrones	3.0	3.0	3.0
Encogimiento Lineal (%)			
24 Hrs @ 1000 °C (1832°F)	2.0	-	-
24 Hrs @ 1200 °C (2192°F)	-	< 3	-
24 Hrs @ 1300 °C (2372°F)	-	-	2.0
Análisis Químico (%)			
Al ₂ O ₃	42-46	44-60	39-67
SiO ₂	50-60	50-56	47-51
ZrO ₂	-	-	19-19
Otros < 1%			
Conductividad Térmica W/m °K (BTU-in/hr-ft ² °F)			
Temperatura Promedio, 120 kg/m ³ (8 lb/ft ³)			
● 260 °C (500 °F)	0.06 (0.41)	0.06 (0.41)	0.06 (0.41)
● 538 °C (1000 °F)	0.12 (0.83)	0.12 (0.83)	0.12 (0.83)
● 816 °C (1500 °F)	0.20 (1.38)	0.20 (1.38)	0.20 (1.38)
● 982 °C (1800 °F)	0.26 (1.77)	0.26 (1.77)	0.26 (1.77)
● 1093 °C (2000 °F)	0.30 (2.05)	0.30 (2.05)	0.30 (2.05)
Temperatura Promedio, 96 kg/m ³ (6 lb/ft ³)			
● 260 °C (500 °F)	0.07 (0.52)	0.07 (0.52)	0.07 (0.52)
● 538 °C (1000 °F)	0.15 (1.01)	0.15 (1.01)	0.15 (1.01)
● 816 °C (1500 °F)	0.25 (1.76)	0.25 (1.76)	0.25 (1.76)
● 982 °C (1800 °F)	0.34 (2.37)	0.34 (2.37)	0.34 (2.37)
● 1093 °C (2000 °F)	0.41 (2.83)	0.41 (2.83)	0.41 (2.83)
Temperatura Promedio, 64 kg/m ³ (4 lb/ft ³)			
● 260 °C (500 °F)	0.10 (0.69)	0.10 (0.69)	0.10 (0.69)
● 538 °C (1000 °F)	0.19 (1.32)	0.19 (1.32)	0.19 (1.32)
● 816 °C (1500 °F)	0.33 (2.28)	0.33 (2.28)	0.33 (2.28)
● 982 °C (1800 °F)	0.43 (2.95)	0.43 (2.95)	0.43 (2.95)
● 1093 °C (2000 °F)	-	0.50 (3.45)	0.50 (3.45)

Anexo C SUPERAEROFRAX Mortero Refractario

GAMMA

ERECOS®

CORONA
Negocio de Energía
Carrera 49 No. 67 Sur 680
Sabaneta, Colombia - 055450
Teléfono: (574) 305 8000
ventas@erecos.com

Morteros refractarios

Los morteros refractarios se utilizan para pegar ladrillos refractarios y/o aislantes entre sí, a la estructura de los equipos, o a revestimientos refractarios y/o aislantes previamente instalados.

SUPERAEROFRAX	Propiedades	Aplicaciones
Clasificación NTC - 765 , NTC - 851	Super Duty	Mortero refractario silico-aluminoso húmedo de fraguado al aire para usar en mamposterías refractarias. Se recomienda para pegar ladrillos refractarios densos U-32, U-33, ER-40, AQ-45 y ALUM 50, y para pegar ladrillos aislantes ER-IFB 2300, ER-IFB 2600 y ER-IFB 2800. Se requiere adicionar agua limpia al producto en la proporción descrita sólo para aplicación por inmersión del ladrillo, y permitir fraguado al ambiente para desarrollar las propiedades del mortero siguiendo las instrucciones de aplicación.
Tipo	Húmedo de fraguado al aire	
ANÁLISIS QUÍMICO (%)		
AL ₂ O ₃	44.7	
SiO ₂	49.1	
Fe ₂ O ₃	1.2	
TiO ₂	2.0	
CaO	0.3	
MgO	0.4	
Alcalis	2.2	
CPE	32 1/2	
Temperatura equivalente (°C) NTC-706, ASTM C-24	1724	
Refractariedad (el mortero no fluye a la junta)°C NTC-851, ASTM C-199	1600	
Tamaño máximo del grano (mm)	0.6	
AGUA DE PREPARACIÓN ml por kg DE MORTERO		
Para aplicar con palustre	Como se entrega	
Para aplicar por inmersión	60	
kg DE MORTERO REQUERIDO PARA PEGAR 1000 LADRILLOS DE 9x4 1/2x2 1/2		
Con palustre	180	
Por inmersión	160	
Presentación	Tambor 35Kg	

Anexo D Acero 1045

ACERO SAE 1045

DIN	CK - 45
UNI	C - 45
AFNOR	XC - 45
SAE	1045

CARACTERÍSTICAS DE EMPLEO

SAE 1045 es un acero grado ingeniería de aplicación universal que proporciona un nivel medio de resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo con respecto a los aceros de baja aleación. Frecuentemente se utiliza para elementos endurecidos a la llama o por inducción. Este acero puede ser usado en condiciones de suministro: laminado en caliente o con tratamiento térmico (templado en aceite y revenido; o templado en agua y revenido).

SAE 1045 es un acero de baja templabilidad que puede ser endurecido totalmente en espesores delgados por temple en agua. En secciones más gruesas se puede obtener un endurecimiento parcial de la sección de la pieza y el incremento de la resistencia será proporcional a la capa o espesor endurecido, al ser deformado en frío se presenta un incremento en la dureza y la resistencia mecánica.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	C %	Mn %	P máx. %	S máx. %	Si máx. %
Análisis típico en %	0.48 0.60	0.6 0.9	0.04	0.05	0.2 0.4

Estado de suministro: Recocido

Dureza de suministro: 150 - 200 Brinell

PROPIEDADES FÍSICAS

Estos valores son obtenidos a partir de probetas bajo condiciones específicas de laboratorio y deben ser usados como referencia.

- Densidad → 7.85 gr/cm³.
- Módulo de elasticidad → 2 x 10¹¹ Pa (24 x 10⁶ PSI).
- Conductividad térmica → 52 W/(m·°C).
- Calor específico J/(Kg·K) → 460
- Coefficiente de Poisson → 0,3
- Resistividad eléctrica (microhm-cm):
 - a 32°F = 16.2
 - a 212°F = 22.3
- Coefficiente de dilatación térmica / °C
 - (20 - 100°C) 12.3 x 10⁻⁶
 - (20 - 200°C) 12.7 x 10⁻⁶
 - (20 - 400°C) 13.7 x 10⁻⁶

PROPIEDADES TÍPICAS A TEMPERATURA AMBIENTE SIN ENDURECIMIENTO

Diámetro de la barra: 12 a 38 mm

Propiedad	Laminado en caliente	Normalizado	Recocido
Resistencia a la tracción MPa	665	665	620
Punto de fluencia MPa	413	413	379
% de elongación	23	23	28
% de reducción de área	44	45	53
Dureza brinell (3000 kg.)	190	190	180

Anexo E

Coefficiente de transferencia de calor por convección natural para los gases

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/lopez_s_ia/capitulo2.pdf

Tabla 2.1 Magnitud de coeficientes de transferencia de calor por convección [W/m² C] [6].

Convección natural

Gases 2-25

Líquidos 50-10,000

5

Capítulo 2

Antecedentes

Convección forzada

Gases 25-250

Líquidos 50-20,000

Convección por cambio de fase

2,500-100,000

Anexo F

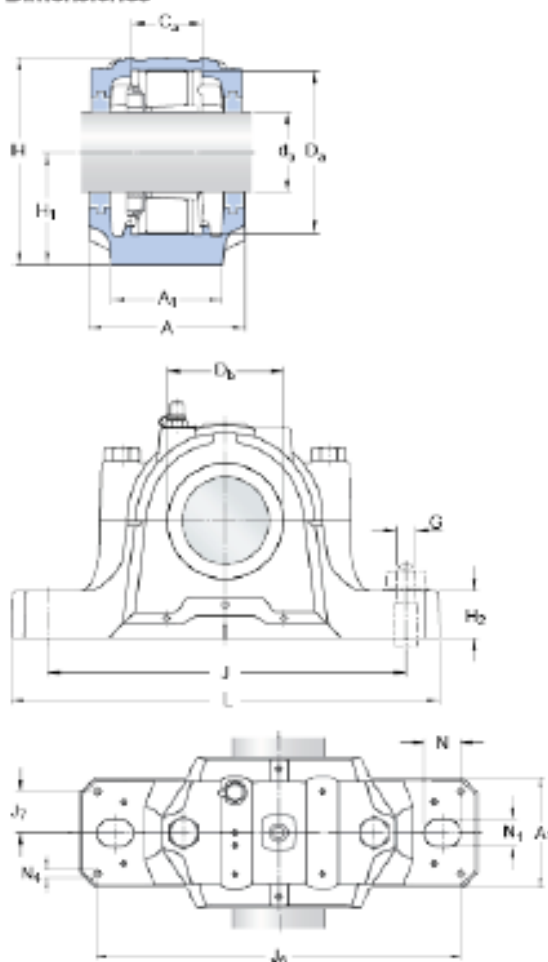
Soporte Para Rodamiento SNL 518-615

SNL 518-615

Productos adecuados

Rodamiento (designación básica)	C 2218 K
Manguito de fijación	H 318 E
Anillo de fijación	2 x FRB 12.5/160

Dimensiones



d_a	80	mm
C_a	65	mm
D_a	160	mm
D_b	102.5	mm
A	140	mm
A_1	100	mm
H	194	mm
H_1	100	mm
H_2	35	mm
J	290	mm
L	345	mm
N	28	mm
N_1	22	mm

Fijas de situación

J_6	317	mm
J_7	35	mm
N_4	max. 8	mm

Anexo G

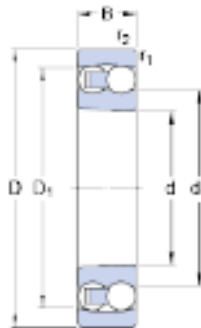
Rodamiento 1218K del Soporte SNL 518-615



1218 K

Popular item

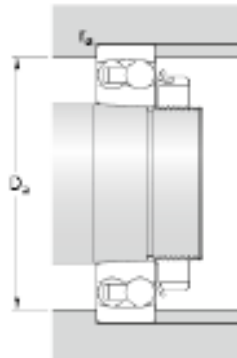
Dimensions



d	90	mm
D	160	mm
B	30	mm
d ₁	≈ 112.5	mm
D ₁	≈ 138.7	mm
r _{1,2}	min. 2	mm

Tapered bore, taper 1:12

Abutment dimensions



D _a	max. 149	mm
r _a	max. 2	mm

Calculation data

Basic dynamic load rating	C	57.2	kN
Basic static load rating	C ₀	23.6	kN
Fatigue load limit	P _u	1.08	kN
Reference speed		8500	r/min
Limiting speed		5300	r/min
Permissible angular misalignment	α	2.5	°

