

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO PARA LA SINTERIZACIÓN DE
MATERIALES METÁLICOS ALEADOS MECÁNICAMENTE**

JEANMADELEN BALSEIRO ORTIZ

YAMILE QUINTERO CHAPARRO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

BUCARAMANGA

2012

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO PARA LA SINTERIZACIÓN DE
MATERIALES METÁLICOS ALEADOS MECÁNICAMENTE**

JEANMADELEN BALSEIRO ORTIZ

YAMILE QUINTERO CHAPARRO

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director: Alfonso Santos Jaimes
Ingeniero Mecánico**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

BUCARAMANGA

2012

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, Febrero del 2012

DEDICATORIA

A Dios, simplemente por todo.

A mi madre, Doris Ortiz y a mi padre Edinildo Balseiro, siempre Ángeles quienes con su apoyo incondicional y sacrificio me alentaron a seguir adelante iluminando siempre mi camino.

A mis hermanos Edinildo Balseiro, Dayra Dayana Balseiro y Cristian Camilo Balseiro, a quienes espero este logro personal los aliente a alcanzar los propios.

A mis sobrinitos, Salome Balseiro y Thomas Balseiro quienes llegaron sorpresivamente a mi vida robándome siempre con su presencia una sonrisa.

A Diego Armando por su apoyo y su necia insistencia en la importancia del tiempo y el futuro.

JEANMADELEN BALSEIRO ORTIZ

Principalmente a Dios por que nos permitió hacer esto realidad.

A mi hija Ana Lucia que me da la fuerza para seguir adelante y enfrentar todas las adversidades.

A mis padres Ismael Quintero y Maribel Chaparro que me exigieron y me apoyaron durante la carrera y todo este proceso de realización del proyecto, tanto económica como moralmente.

A mis hermanos Christian y Oscar, y a mi sobrina María José quienes me facilitaron algunos instrumentos necesarios y ayudaron a solucionar algunos inconvenientes.

A mi compañera Jeanmadelen con quien trabaje arduamente de la manera más armoniosa y tranquila posible.

Y por ultimo a Jorge Ibáñez quien me apoyo y me impulso en los momentos de desgane para seguir adelante y no dejarme vencer.

YAMILE QUINTERO CHAPARRO

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecerles a todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Alfonso Santos por el tiempo dedicado.

A Ludwing Casas que nos ayudo en la construcción del horno.

A todos los docentes que compartieron su conocimiento a través de la carrera.

A nuestros compañeros por hacernos mas ameno el paso por esta etapa.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	3
1. MARCO TEORICO	6
1.1. LA PULVIMETALURGIA Y EL PROCESO DE SINTERIZADO	6
1.1.1. Fabricación de los polvos	6
1.1.2. Fabricación de la pieza	8
1.1.3. La sinterización	9
1.2. HORNOS ELECTRICOS	12
1.3. MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE HORNOS ELÉCTRICOS	13
1.3.1. Recámara del horno	13
1.3.2. Resistencias	14
1.3.3. Regulación y control	16
1.4. OPCIONES COMERCIALES	17
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	18
2.1. DIMENSIONES Y CONDICIONES DE DISEÑO	18
2.1.1. Condiciones de diseño	18
2.2. RECÁMARA DEL HORNO	19
2.2.1. Resistencias	20
2.3. REGULACIÓN Y CONTROL	21
2.4. CÁLCULOS Y SIMULACIONES	21
2.4.1. Análisis térmico: Aproximación numérica	21

2.4.2. Análisis térmico: ANSYS	26
2.4.3. Cálculo de las resistencias	28
2.4.4. Esfuerzo máximo y factor de seguridad	30
2.5. CONSTRUCCIÓN	32
3. PRUEBAS	35
3.1. PRIMERA PRUEBA: TEMPERATURA MAXIMA DE OPERACIÓN 1100°C	36
3.2. SEGUNDA PRUEBA: 850°C, SIN CARGA Y CONTROL ON/OFF	37
3.3. TERCERA PRUEBA: 850°C, CON CARGA Y CONTROL PID (AUTO-AJUSTE)	38
3.4. TEMPLE Y REVENIDO	39
3.5. ENSAYO DE DUREZA BRINELL	40
3.5.1. Equipo	40
3.5.2. Procedimiento	40
4. CONCLUSIONES	43
5. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	46
6. BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Dimensiones del horno	18
Figura 2: Esquema de las paredes del horno	20
Figura 3: Regulador digital de temperatura XMTG 808	21
Figura 4: Distribución de temperatura y circuito térmico correspondiente a las paredes del horno.	22
Figura 5: Dimensiones tenidas en cuenta en el cálculo del área efectiva.	23
Figura 6: Distribución de temperatura obtenida en ANSYS para determinar el tipo de aislante térmico a utilizar.	27
Figura 7: Distribución de temperaturas obtenidas en ANSYS para las paredes exteriores del horno.	27
Figura 8: Flujo de calor a través de las paredes del horno obtenido en ANSYS	28
Figura 9: Distribución de temperaturas para el ladrillo (superior) y para el kaowool (inferior) temperatura máxima de operación de 1100°C	30
Figura 10: Deformación máxima	31
Figura 11: Factor de seguridad	31
Figura 12: Horno	33
Figura 13: Caja de Control	33
Figura 14: Encendido del horno	34
Figura 15: Producto final	34

Figura 16: Dimensiones de la probeta y condiciones de temple y revenido para acero 1045.	36
Figura 17: Gráfico temperatura vs tiempo. Primera prueba	37
Figura 18: Gráfico temperatura vs tiempo. Segunda prueba	38
Figura 19: Temple	39
Figura 20: Principio básico del ensayo de dureza Brinell	40

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Temperaturas y tiempos de sinterizado	10
Tabla 2: Clasificación de las termocuplas	16
Tabla 3: Opciones comerciales de hornos eléctricos de resistencias	17
Tabla 4: Primera iteración análisis estacionario	24
Tabla 5: Segunda iteración análisis estacionario	25
Tabla 6: Tercera iteración análisis estacionario	25
Tabla 7: Materiales utilizados en la construcción del horno	32
Tabla 8: Ensayo dureza Brinell antes del realizar el temple	41
Tabla 9: Ensayo dureza Brinell después de realizar el temple	41
Tabla 10: Ensayo dureza Brinell después de realizar el revenido	42

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 1: Planos	51
Anexo 2: Simulación en ANSYS	54
Anexo 3: Propiedades de materiales	60
Anexo 4: Guía rápida para la solución de problemas.	63

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Diseño y construcción de un horno para la sinterización de materiales metálicos aleados mecánicamente.

AUTOR(ES): Jeanmadelen Balseiro Ortiz
Yamile Quintero Chaparro

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): M.Sc. Alfonso Santos Jaimes

RESUMEN

En este proyecto se describe el proceso completo de desarrollo de un producto, desde su concepción hasta la puesta en marcha del mismo y cuyo entregable principal es un horno eléctrico de resistencias que requiere una alimentación de 220V y constituido básicamente por 6 resistencias conectadas en serie de 4 Ohmios cada una y un sistema de control sobre la temperatura en la cavidad del horno. El equipo entregado como resultado de este proyecto, fue evaluado bajo diferentes condiciones de trabajo (temperatura, carga y tipo de control) y cuyos resultados obtenidos se presentan y se analizan en el presente documento.

PALABRAS CLAVES:

Pulvimetalurgia, sinterización, horno eléctrico, aislante, refractario, control on/off y PID.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Design and construction of a furnace for sintering metallic materials alloyed mechanically.

AUTHOR(S): Jeanmadelen Balseiro Ortiz
Yamile Quintero Chaparro

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: M.Sc. Alfonso Santos Jaimes

ABSTRACT

This Project describes the entire process to develop a specific product, from its conception to its implementation. The final product is an electrical heating furnace with 6 resistances of 4 ohms each one connected in series and a temperature controller that requires a 220 V power supply. The furnace performance was evaluated under different working conditions as temperature, control type and load, and the results obtained are also presented and discussed in this document.

KEYWORDS:

Powder metallurgy, sintering, furnace, insulation, refractory, on/off and PID control.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

El constante desarrollo humano y los avances tecnológicos han hecho necesario la creación de nuevos materiales, más resistentes y con propiedades físicas específicas para diferentes aplicaciones. La pulvimetalurgia (PM), como ciencia de investigación, constituye un pilar importante en los procesos y adelantos en este campo.

Entre los diferentes procesos para la fabricación y tratamientos térmicos de materiales se encuentra la sinterización, la cual permite el fortalecimiento de la micro-estructura del elemento tratado. Este método requiere condiciones específicas de atmosfera y temperatura, exigiendo así la construcción de un horno con las características adecuadas que admita el ambiente (interno y externo) presente en los ensayos mecánicos.

Siguiendo el proceso científico con lo que respecta a nuevos materiales generados a través de la PM y los estudios realizados en esta área por el grupo de investigación GIM, es conveniente la adquisición de un horno en donde se pueda llevar a cabo el proceso de sinterizado. Es así, como en este proyecto se presenta el diseño y la construcción de un horno eléctrico en el cual no solo se pueden realizar tratamientos térmicos convencionales tales como el temple y el revenido; sino que también, con la implementación de equipos adicionales (sistemas que permitan generar una atmosfera controlada dentro de la cavidad del horno) se puede llevar a cabo la sinterización de algunos compactados metálicos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y evaluar un horno para la sinterización de materiales aleados mecánicamente con el fin de suplir la necesidad del Grupo de Investigación de Materiales (GIM) de adquirir esta herramienta para el desarrollo de sus investigaciones de nuevos materiales obtenidos a través de la pulvimetalurgia.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar el diseño mecánico y térmico del horno. **Resultado:** Planos del diseño y documento con los cálculos necesarios para su realización. **Indicador:** Los diseños serán soportados por un análisis en ANSYS del horno bajo una temperatura máxima de 1500 °C y una presión de vacío de 10^{-3} Bares.
- Construir un horno para la sinterización de materiales aleados mecánicamente con un sistema de control sobre la temperatura, basado en los planos del diseño mecánico y térmico y en el esquema obtenido para el sistema de control. **Resultado:** Horno para sinterización. **Indicador:** El horno debe tener un sistema de control que permita alcanzar y mantener la temperatura del proceso constante durante su desarrollo y debe alcanzar una temperatura máxima en su interior de 1500°C.
- Probar el horno de sinterización bajo diferentes condiciones de funcionamiento. **Resultado:** Gráficos de temperatura vs tiempo que representen los resultados obtenidos en las pruebas. **Indicador:** El horno debe cumplir con las condiciones de diseño.
- Realizar una prueba de temple y revenido en un acero al carbono. **Resultado:** tabla de la microestructura presente después de realizar el tratamiento térmico. **Indicador:** el análisis microestructural de las probetas se realizarán en un laboratorio de metalografía.

JUSTIFICACION

Actualmente el Grupo de Investigación de Materiales GIM conformado por docentes de la Universidad Pontificia bolivariana (Bucaramanga) y la Universidad del Valle (Cali), están desarrollando materiales metálicos mediante el proceso de la metalurgia de polvos mediante las siguientes etapas de desarrollo:

- Elaboración de las probetas (alineamiento mecánico de los polvos, compactación y sinterización): esta etapa es realizada en los laboratorios del Grupo de Metalurgia Física y Transición de Fase de la Universidad del Valle (Cali).
- Realización de los ensayos mecánicos necesarios para la caracterización de los materiales: esta etapa se realiza en el laboratorio de Materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana (Bucaramanga).

Esta situación hace necesario dotar el Laboratorio de Materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana con herramientas que permitan realizar los procesos pertinentes para la elaboración de probetas, herramientas entre las cuales se encuentra el horno de sinterizado; con el fin de llevar a cabo las dos etapas del proyecto en las instalaciones de la universidad.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. LA PULVIMETALURGIA Y EL PROCESO DE SINTERIZACIÓN.

El uso de los metales en polvos se remonta a varios centenares de años atrás. Pero fue apenas en el siglo pasado que, debido a avances tecnológicos de la segunda guerra mundial, la industria de la pulvimetalurgia (PM) se creó como tal. Desde entonces y gracias a sus continuos avances y la calidad y utilidad de sus productos ha crecido más rápidamente que cualquier otro proceso de manufactura de piezas metálicas como la forja, entre otras. La PM es una realidad industrial, lo suficientemente madura como para asumir un papel preponderante en el desarrollo de materiales avanzados, para la obtención de piezas metálicas, de difícil manufactura, con excelentes tolerancias, de alta calidad y en grandes series. [2]

1.1.1. Fabricación de los polvos. Todo el proceso de la industria de la metalurgia de polvos tiene su comienzo con los procesos por el cual se fabrican los polvos metálicos. Hay gran variedad de procesos para producir polvos de metales. A continuación se discutirán los tres más importantes pues estos manejan la mayor cantidad de producción de polvos metálicos.

- Reducción a Estado Sólido (Solid State Reduction): Este proceso ha sido, por mucho tiempo el más utilizado para la producción de polvo de hierro; la materia prima seleccionada es macerada o triturada, mezclada con carbón y pasada por un horno continuo en donde reacciona. Este proceso deja una especie de torta esponjada de hierro. Después se aplasta nuevamente, se separan los materiales no metálicos y se tamiza para producir el polvo. Este es el único método práctico disponible para producir polvos de metales refractarios, como el tungsteno y el molibdeno, también es una técnica económica para producir polvos de hierro, níquel, cobalto y cobre. [2]

- **Electrólisis:** Escogiendo las condiciones apropiadas - posición y fuerza del electrolito, corriente, densidad, temperatura, etc., muchos metales pueden convertirse en polvos metálicos. Este proceso puede requerir de otros procesos (secado, aleado, lavado, etc.) para lograr las propiedades deseadas. Se usa por lo general para producir polvo de Cobre, pero también se puede utilizar para la producción de polvo de Cromo y Manganeso. Dos de las mayores cualidades de este proceso son la alta pureza y la alta densidad alcanzada en los polvos. [6]
- **Atomización:** En este proceso, el metal fundido es separado en pequeñas goteras que luego son congeladas rápidamente antes de que entren en contacto entre ellas o con una superficie sólida. El principal método para desintegrar la delgada corriente de metal fundido es el de someterla al impacto de fuertes golpes de gas (se usan comúnmente Aire, Nitrógeno y Argón) o de líquido (generalmente agua). Variando diferentes parámetros del proceso se puede controlar el tamaño de las partículas. En principio la técnica es aplicable para todos los metales que se puedan fundir pero es comercialmente utilizada para la producción de polvos de Hierro, Cobre, Aceros, Bronce, Aluminio, Plomo y Zinc. [6]

Además de estos tres procesos, hay varios que están obteniendo una creciente aceptación, debido a sus aplicaciones. Los Procesos de Electrodo Rotatorio y Trituración Mecánica son ejemplos representativos de estos métodos. El Proceso de Electrodo Rotatorio tiene la gran ventaja de que se puede ejecutar en envases cerrados, con atmósfera controlada e inclusive en el vacío, con esto se obtiene un polvo muy puro y limpio, además permite trabajar con metales altamente reactivos. El Proceso de Trituración Mecánica tiene gran aplicabilidad en la producción de polvos extremadamente finos. Esto se alcanza con la pulverización mecánica en un molino de bolas. Para este proceso se acostumbra utilizar como materia prima metales que ya hayan sido pulverizados. La finura de los polvos producidos por este método, le ha representado un incremento en su uso sobre todo para la

fabricación de polvos finos para el moldeo por inyección (Método nuevo de la metalurgia de polvos).

1.1.2. Fabricación de la pieza. Una vez se tiene el polvo empieza el proceso de fabricación de la pieza deseada. Este proceso está compuesto básicamente por tres etapas - la mezcla, el compactado y la sinterización. Cada una de estas etapas contribuye en las características finales de la pieza:

- La mezcla: En la etapa del mezclado se debe alcanzar una mezcla homogénea de los materiales y añadir el lubricante. La principal función del lubricante es la reducir la fricción entre el polvo metálico y las superficies de las herramientas utilizadas en el proceso. Además, el lubricante debe deslizarse durante la compactación, y así ayudar a conseguir una densidad uniforme en todo el compactado. De igual importancia resulta el hecho de que la reducción de fricción también ayuda a la eyección del compactado minimizando la posibilidad de formación de grietas. Se debe tener gran cuidado en la escogencia del lubricante, debido a que una mala escogencia puede resultar en efectos adversos en las durezas del compactado antes y después de sinterizar. Otra precaución que se debe tener en esta etapa del proceso es la de no sobre mezclar. El sobre mezclar aumenta la densidad aparente de la mezcla y reduce la dureza de la pieza antes del sinterizado. [2]

- El compactado: El compactado tiene por objetivo dar forma y consistencia a la masa de polvos metálicos para su manipulación, en esta etapa la mezcla es introducida en un molde de acero o carburo rígido y presionada para obtener la forma deseada (la mezcla debe ser presionada lo suficiente para que soporte la fuerza de la eyección del molde y que pueda ser movida antes del sinterizado). El compactado es una etapa muy importante ya que la forma y las propiedades mecánicas finales de la pieza están fuertemente relacionadas con la densidad al presionar. Debido a que los polvos

metálicos bajo presión no se comportan como líquidos, la presión no es transmitida uniformemente por el molde y hay virtualmente cero flujo lateral. Por esto, la obtención de buenas densidades en la pieza depende en un alto grado del diseño de la herramienta que aplica la presión. El compactado del polvo a temperaturas normales y sin un ambiente controlado es muy útil, por su bajo costo, para la fabricación de muchas piezas; sin embargo tiene grandes limitantes en materia de la densidad del compactado. Por esta razón se han desarrollados varios métodos que mejoran esta y otras propiedades del compactado.[6]

- Compactación semi-caliente (Warm Compaction): La compactación semi-caliente nos permite aumentar la densidad del compactado considerablemente con un costo extra muy bajo. Este método utiliza la maquinaria y el polvo metálico que se usa en el proceso convencional. Lo único que requiere es que la mezcla, el molde y toda la herramienta utilizada para la compactación sea calentada a una temperatura determinada. Los productos en cuya elaboración se incluye este método de compactación tienen una mayor densidad, mejores propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y dureza) y mayor uniformidad. [6]

1.1.3 La Sinterización. La etapa de la sinterización es clave para el proceso de la metalurgia de polvos. Es aquí en donde la pieza adquiere la resistencia y fuerza para realizar su función ingenieril para la cual se ha fabricado. El termino Sinterizado tiene la siguiente definición: 'Es el tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico a una temperatura inferior a la temperatura de fusión de la base de la mezcla. Tiene el propósito de incrementar la fuerza y las resistencias de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

Para describir este proceso basta con decir que ocurre una difusión atómica y las partes unidas durante el proceso de compactación se fortalecen y crecen hasta formar una pieza uniforme. Esto puede inducir a un proceso de recristalización y a un incremento en el tamaño de los granos. Los poros tienden a volverse redondos

y la porosidad en general como porcentaje del volumen total tiende a decrecer. Esta operación, casi siempre, se lleva a cabo dentro de un ambiente de atmósfera controlada y a temperaturas entre el 70 y 90% de la temperatura de fusión del mayor constituyente. En la tabla 1 se muestran temperaturas de sinterización de los elementos metálicos mas utilizados como mayor constituyente.

Tabla 1: Temperaturas y tiempos de sinterizado.

MATERIAL	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (MIN)
Cobre – latón – bronce	760 – 900	10 – 45
Hierro- hierro-grafito	1000 – 1150	8 – 45
Níquel	1000 – 1150	30 – 45
Aceros	1100 – 1300	30 – 60
Aleaciones de alnico	1200 – 1300	120 – 150
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tantalio	2400	480

Tomado de Manufactura, ingeniería y tecnología. Steven R. Schmid, pag 453. Disponible en Google Books

Se debe llevar un control sobre la rata de calentamiento, tiempo, temperatura y atmósfera para obtener resultados que puedan ser reproducidos. El horno eléctrico se usa en la mayoría de los casos pero si se requieren temperaturas superiores (para incrementar la resistencia de las piezas) se puede variar a diferentes tipos de hornos, según la temperatura deseada. [16]

Las atmósferas controladas son una parte esencial en casi cualquier proceso de sintonización ya que previenen la oxidación y otras reacciones que no conviene al proceso. Algunas de las atmósferas más usadas son las compuestas con hidrógeno seco o con hidrocarburos sometidos parcialmente a la combustión. Ya si se requieren usos más especiales y que puedan soportar el incremento en el costo de la atmósfera se pueden utilizar las llamadas atmósferas sintéticas. Debido a que son producidas mezclando cuidadosamente Nitrógeno con Hidrógeno y con gas de hidrocarburos para la sintonización de aceros. Estos tipos de atmósferas tienen las ventajas de ser mucho más limpias, tener mayor adherencia al material sinterizado y un nivel muy bajo de vapor de agua.

Hay diferentes tipos de sinterizado que se pueden aplicar según sea el caso, ya sea que se requiere bajar costo, aumentar propiedades de la pieza, trabajar con un material especial, etc. A continuación se muestra una clasificación de procesos de sinterizados básicamente definidos por las características de funcionamiento del horno:

- Sinterización con micro-ondas: El más reciente desarrollo en el uso de micro-ondas es la utilización de este en la sintonización de polvos metálicos, esta es una aplicación sorprendente si se parte del hecho de que el metal refleja las micro-ondas. Sin embargo la reflexión en los metales ocurre solo si estos están en un estado sólido compacto, mientras que los metales en forma de polvo si absorben las micro-ondas y por este efecto son calentados rápida y eficientemente. El calentamiento y la sintonización por micro-ondas es fundamentalmente diferente a la sintonización convencional, que involucra el calentamiento por resistencias seguido por una transferencia térmica por conducción al interior del cuerpo, mientras que, el calentamiento por micro-ondas es un calentamiento volumétrico que involucra la conversión de la energía electromagnética en energía térmica que es un proceso instantáneo, rápido y altamente eficiente. [12]
- Sinterización por la activación de un campo magnético: este método conocido como FAST por sus siglas en inglés (Field Assisted Sintering Technique) es un método no convencional en el que la densificación del polvo metálico es alcanzada por la aplicación de una descarga eléctrica hecha por pulsos combinada con un calentamiento por resistencias y la aplicación de una presión. Este método de sinterización no convencional tiene como resultado una densificación del metal en menos tiempo pues es menos sensible a los procesos de preparación del polvo (la compactación). [15]
- Sinterización convencional: Es la más utilizada y la mayoría de veces se lleva a cabo en un horno eléctrico mediante el calentamiento por resistencias y una transferencia de energía por conducción al interior de la

pieza. En este tipo de sintonización la atmósfera controlada juega un papel muy importante pues protegen las partes metálicas de contacto con el aire previniendo la oxidación y otras reacciones que no son convenientes para el proceso. La optimización de la atmosfera dentro del horno nos permite tener un control sobre las propiedades del producto terminado, tales como la microestructura, la resistencia a la corrosión, la densidad y la dureza. Algunas de las atmosferas más utilizadas son: de hidrogeno, de nitrógeno, sintéticas (combinación de nitrógeno e hidrogeno) y en vacio. [16]

1.2. HORNOS ELÉCTRICOS

Como se mencionó anteriormente existen diferentes tipos de sinterización definidos básicamente por las características de funcionamiento del horno, sin embargo en este proyecto se ha decidido realizar un horno para realizar un proceso de sinterización convencional (horno eléctrico) dado a la limitación de materiales disponibles en la región. Por otro lado, los hornos eléctricos producen temperaturas muy elevadas y son los más indicados para la obtención de aceros especiales y para la fusión de metales pues ofrecen ventajas tales como:

- Pueden obtener temperaturas muy elevadas hasta de 3500°C.
- Control de la velocidad de elevación de temperatura manteniéndola entre límites muy precisos, con regulaciones completamente automáticas.
- La carga queda por completo libre de contaminación del gas combustible.
- los revestimientos tienen mayor duración que en los demás tipos de hornos.
- Se instalan en espacio reducido.
- Su operación se realiza con mayor higiene que la de los otros tipos.
- Aunque más costosos que los hornos a combustión, los eléctricos son preferidos por la uniformidad de calentamiento y por la pureza y homogeneidad de los aceros obtenidos.

La forma más común para clasificar estos hornos es en hornos de resistencia, de arco y de inducción. En los hornos de arco un flujo de chispas entre dos conductores eléctricos aproximados produce calor incrementando la temperatura en su interior hasta 3000° C. Este método de calentamiento es más frecuente en la fundición de metales. Por otro lado, en los hornos de inducción, el calor se genera por corrientes inducidas por una corriente alterna. Este tipo de horno no es más que un gran transformador en el cual el circuito secundario está constituido por el material a elaborar. Por último están los hornos de resistencias los cuales funcionan bajo el efecto Joule, en donde el calor es producido por un cuerpo conductor atravesado por una corriente eléctrica. Se pueden fabricar para ser usados a temperaturas superiores a los 1800°C.

1.3. MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE HORNOS ELÉCTRICOS.

El horno está constituido básicamente por tres partes: La recámara del horno compuesta por los ladrillos estructurales, los aislantes térmicos y las resistencias; las resistencias y el equipo de regulación y control quien se encarga monitorizar y controlar la temperatura en la cavidad de trabajo, decidiendo la potencia a aplicar a la resistencia en función de la temperatura deseada.

1.3.1. Recámara del horno. Para realizar la recámara del horno, se suelen emplear materiales con buenas propiedades aislantes y refractarias, para así soportar las altas temperaturas, reducir la pérdida de calor a través de las paredes y en muchas ocasiones servir de elemento estructural. Las alternativas son muy numerosas, varían en función de aspectos tales como las temperaturas involucradas, el aislamiento térmico, el tipo de elementos calefactores, los materiales utilizados estructuralmente, etc. Si restringimos dichas alternativas a las brindadas por el mercado local y nacional tendremos las siguientes:

- Fibra mineral en manta: Se caracterizan por tener una baja conductividad térmica y tienen un precio moderado-barato pero tiene la limitación de la temperatura pues solo soporta temperaturas de hasta 750°C.[8]
- Fibra cerámica en manta: Tiene una excelente resistencia al choque térmico, muy baja conductividad térmica, pero requiere algún tipo de estructura de fijación. Tiene un precio moderado-alto y puede llegar a soportar temperaturas de hasta 1400°C. En el mercado local se consigue fácilmente Kaowool Blanket una fibra cerámica una fibra cerámica en manta altamente flexible que ofrece una facilidad para cortarse y producir formas.[8]
- Fibra cerámica en placas: Empeora ligeramente la resistencia al choque térmico y su conductividad térmica, pero se presta muy bien para ser trabajado como elemento estructural para las resistencias eléctricas, es mucho más caro que la fibra cerámica en manta aunque soporta temperaturas muy similares.[8]
- Ladrillos refractarios aislantes: Sirven perfectamente de elemento estructural y para dar soporte a las resistencias basta con hacerles unas acanaladuras. El rango de temperaturas que soportan estos elementos puede extenderse hasta los 1760°C.[8]

1.3.2. Resistencias. Las resistencias eléctricas producen calor por el efecto Joule empleando una corriente eléctrica para ello, lo que permite; al no haber combustión y no necesitar la introducción de aire del exterior, una reducción enorme en el calor desperdiciado en los gases de evacuación; sin embargo, las resistencias suelen ser un material sólido, y por tanto tienen que soportar no solo la temperatura que se desea obtener en el horno, sino también generar una temperatura interna y superficial superior y además deben resistir innumerables ciclos de calentamiento y enfriamiento debido a los controles deseados de temperatura tanto como soportar oxidaciones o reducciones en su superficie.

Debido a ello, se han desarrollado materiales específicos que soporten dichas condiciones de trabajo:

- MoSi_2 : Hasta 1850°C , muy resistente a atmósferas reductoras y oxidantes, los elementos tienen una forma fija, normalmente en lazo, su instalación en el horno es poco flexible.[8]
- SiC : hasta 1600°C , los elementos tienen forma de barras gruesas, y su resistencia depende fuertemente de la temperatura y del envejecimiento, por lo que requiere instalaciones eléctricas especiales.[8]
- Aleaciones ferríticas: basadas en Al-Fe-Cr hasta 1425°C , muy resistentes a atmósferas oxidantes, aunque menos a reductoras. Entre estas encontramos las resistencias hechas con alambre Kanthal.
- Aleaciones austeníticas: basadas en (Ni-Cr y Ni-Cr-Fe), hasta 1250°C , muy poco resistentes a la presencia de azufre, soportan bien las atmósferas oxidantes. Como suele ser habitual, los materiales para mayores temperaturas son (mucho) más caros, esto unido a la flexibilidad que ofrece el poder bobinar a mano las resistencias de las aleaciones ferríticas.[8]

Por otro lado podemos decir que el calentamiento de piezas por resistencias eléctricas puede ser directo cuando la corriente pasa por la pieza e indirecto cuando la pieza se calienta por radiación, convección o una combinación de ambas procedente de las resistencias dispuestas en las proximidades de la pieza; no obstante, en la industria es más frecuente el calentamiento indirecto para el cual se pueden emplear los siguientes tipos de resistencias: metálicas (barras, varillas, alambres o pletinas) dispuestas en las paredes de la cámara de calentamiento del horno, no metálicas (carburo de silicio SiC , grafito en barra, etc.), tubos radiantes cuando la atmósfera del interior del horno es nociva para las resistencias estas son introducidas dentro de un tubo metálico para protegerlas y resistencias blindadas. [3]

1.3.3 Regulación y control. En el mercado hay una amplia variedad de controladores de hornos. Los más básicos son de control manual, no efectúan ninguna medición de temperatura, simplemente dan una potencia de salida constante. En esta categoría estarían los transformadores con múltiples tomas, y los interruptores de banda bimetálica. En el extremo contrario, los más avanzados incluyen algoritmos PID y múltiples zonas de control (varias resistencias calefactoras y sondas de medición independientes).

Sin embargo, la amplia mayoría de controladores de temperatura para hornos de pequeño y medio tamaño son de una sola zona de control (una sola resistencia y una sola sonda de medición), con control de potencia por encendido/apagado, sonda de temperatura (termopar, y un panel frontal.

Un típico controlador de horno eléctrico para tratamientos térmicos presenta conexiones para una entrada de termopar (ver tabla 2) una toma para alimentar la resistencia y una toma de alimentación general.[3]

Tabla 2: Clasificación de las termocuplas.

Type	Combination of metals or alloys	Output ^a at 900°C (mV)	Temperature limit °C	Applications
T	Copper-constantan	20.9 ^b	400	Mild oxidizing, reducing, vacuum, or inert. Good where moisture is present. Low temperature and cryogenic applications.
J	Iron-constantan	21.9 ^b	760	Reducing, vacuum, inert. Limited use in oxidizing at high temperatures. Not recommended for low temperatures.
E	Chromel-constantan	68.8	900	Oxidizing or inert. Limited use in vacuum or reducing. Highest EMF change per degree.
K	Chromel-alumel	37.3	1250	Clean, oxidizing, and inert. Limited use in vacuum or reducing. Wide temperature range. Most popular calibration.
S	Pt-Pt 10% Rh	8.4	1450	Alternative to Type K. More stable at high temperatures. Oxidizing or inert. Do not insert into metal tubes. Beware of contamination. High temperature.
R	Pt-Pt 13% Rh	9.2	1450	Same as Type S.
B	Pt 6% Rh-Pt 30% Rh	4.0	1700	Oxidizing or inert. Do not insert into metal tubes. Beware of contamination. High temperature. Common use in glass industry.
G (W)	W-W 26% Re	12.3	2300	Vacuum, inert, hydrogen. Beware of embrittlement. Not practical below 750°C. Not for oxidizing atmosphere.
C (W5)	W 5% Re-W 26% Re	16.4	2300	Same as Type G. Nonoxidizing atmosphere only
D (W3)	W 3% Re-W 25% Re	15.1	2300	Same as Type G. Nonoxidizing atmosphere only

^aThe higher the output voltage, the simpler the associated circuitry and/or the more accurate the temperature reading.

^bOutput at 400°C.

Tomado de: Ceramics material: science and engineering. C. Barry Carter, M. Grant Lorton. Pag 149

En cuanto a la interfaz de usuario, suele tener un panel de 4 dígitos que muestra temperaturas y tiempos, un panel de botones numérico o de flechas para introducir

las temperaturas, botones para empezar programas predeterminados, y funciones de editar y almacenar nuevos programas. En cuanto al control de la potencia de salida, estos controladores por lo general emplean un relé de estado sólido conmutando en sus cruces por cero, con un ciclo de pocas decenas de segundos de duración.

1.4. OPCIONES COMERCIALES

En la industria de la metalurgia se cuenta con hornos de sinterización continuos en donde las piezas a tratar entran lentamente por un lado mientras otras terminadas van saliendo por otro lado; estos hornos son capaz de alcanzar temperaturas superiores a los 1400°C y tratar enormes cantidades de pieza en poco tiempo. Estos hornos, sin embargo, se alejan mucho de lo que puede tener en un laboratorio de materiales en donde se dispone de espacio reducido para su instalación y en donde la cantidad de las piezas tratadas no es un factor determinante. Los hornos para laboratorio son discontinuos en donde el horno se llena, se realiza el tratamiento térmico requerido y finalmente se vacía.

En la actualidad numerosas compañías a nivel mundial venden hornos completos con capacidades que rondan entre los 8 y 100 litros. Sin embargo, en Colombia este es un mercado poco explorado en donde se encuentran pocas compañías que fabrican estos hornos sobre pedido y no en serie como sucede en otras partes del mundo. En la tabla 3 se muestran algunos modelos de empresas que se dedican a la fabricación de este tipo de hornos.

Tabla 3: Modelos comerciales

MODELO	COMPAÑÍA	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)/ POTENCIA (KW)	PRECIO
HE150PAD	HOBERSAL España	1100/1,7	1800 Euros
Series TM y TL	Emison España	1200/2,4	1930 Euros
FP 1500	Borel Switzerland	1500/10,5	-----

Fuente: Balseiro Ortiz Jeanmadelen, Quintero Yamile.

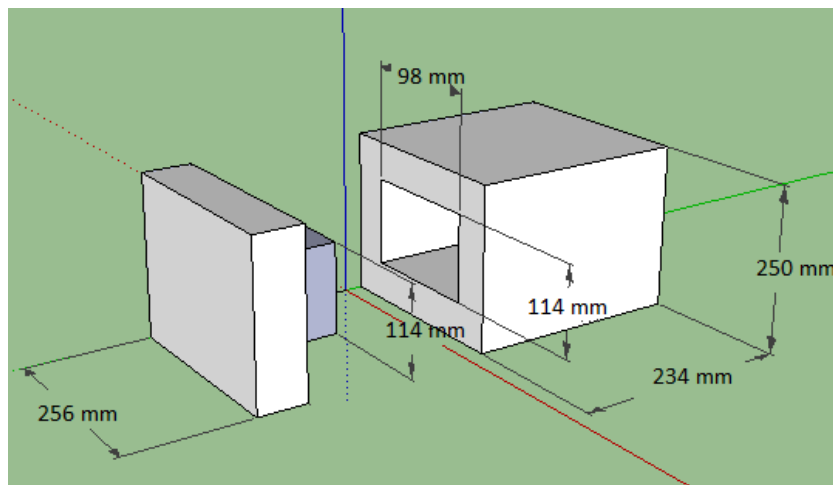
2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

En este capítulo se lleva a cabo el desarrollo del proyecto y se explica cómo se han calculado, decidido y diseñado las partes del horno, justificando los motivos que han impulsado a tomar decisiones importantes.

2.1. DIMENSIONES Y CONDICIONES DE DISEÑO

Para establecer las dimensiones del horno se tuvo en cuenta que va a ser utilizado a nivel de laboratorio en donde generalmente se cuenta con espacios reducidos de trabajo y que la carga de trabajo, según información suministrada por los investigadores del grupo GIM, serán probetas pequeñas (máximo un volumen de 3 cm³). En la figura 1 se muestran las dimensiones del horno.

Figura 1: Dimensiones del horno.



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

2.1.1. Condiciones de diseño: Para el desarrollo de este proyecto se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones de diseño:

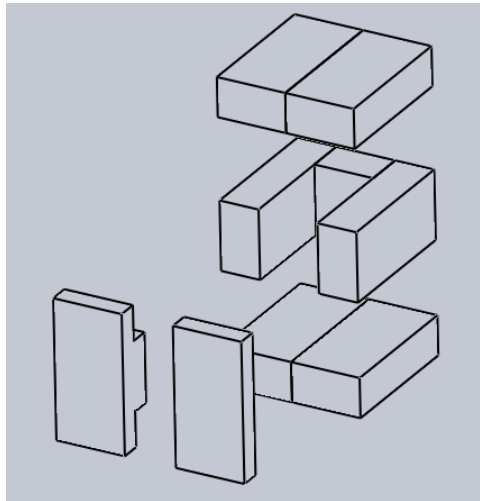
- El horno ha de generar y soportar las altas temperaturas involucradas, que pueden oscilar entre los 700 y 1500°C.

- Debe permitir que el proceso se cumpla bajo una condición de atmosfera controlada ya sea por condiciones de vacío o la inducción dentro de la cavidad de trabajo de un gas inerte (ej. hidrogeno, nitrógeno, argón, entre otros). Cabe aclarar que para el desarrollo de este proyecto solo se tendrá en cuenta este aspecto en el desarrollo del diseño utilizando una atmosfera en condiciones de vacío (10^{-3} bares de presión) y su desarrollo práctico se plantea como un trabajo futuro.
- Debe tener un control sobre la temperatura para garantizar el proceso de sinterizado.
- Debe tener un coste asequible.
- Debe ser un horno eléctrico de resistencias (el uso de combustibles hace muy aparatosa la instalación del horno, además de las medidas de seguridad adicionales que deben tenerse en cuenta)
- Debe ser de fácil instalación.

2.2. RECÁMARA DEL HORNO

La recámara del horno estará formada por una pared de ladrillos refractarios aislantes de tipo JM26 de la empresa Thermal Ceramics de fácil montaje y adquisición y que a su vez, sirven como elemento de soporte para las resistencias. En la figura 2 se muestra la disposición de cada ladrillo refractario a utilizar.

Figura 2: Esquema de las paredes del horno



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Alrededor de la estructura de ladrillos, y para disminuir las pérdidas de calor, se envolverá con una capa de manta de fibra cerámica de media temperatura.

Alrededor de la capa de la fibra cerámica, estará una carcasa hecha en acero inoxidable calibre 18, con el fin de mantener la estructura y la geometría en aras de proteger los materiales utilizados en la construcción del mismo.

2.2.1. Resistencias. Para este horno en particular se decidió utilizar resistencias metálicas de alambre, ya que en el mercado, es el tipo de resistencia mas frecuente entre las resistencias metálicas, siendo posible elegir entre un gran número de diámetros normalizados. Para este tipo de resistencias las disposiciones mas frecuentes son:

- Arrollado en espiral sobre tubos cerámicos que permiten una buena radiación térmica de las resistencias lo que se traduce para una misma carga específica, un menor gradiente de temperatura entre las resistencias y el horno; sin embargo este tipo de resistencias son muy difíciles de conseguir en el mercado local y nacional.
- Arrollado en espiral sobre ranuras cerámicas. Este tipo de adecuación o disposición de las resistencias de alambre es quizá el más antiguo de todos

y el más económico; la desventaja de este tipo de disposición es que la resistencia no radia libremente. Sin embargo, se ha decidido utilizar este tipo de disposición por ser el más fácil de implementar dado que se tiene como elemento estructural un material bastante fácil de trabajar.

2.3. REGULACIÓN Y CONTROL

La termocupla a utilizar es de tipo R debido a la temperatura máxima de trabajo del horno que es de 1500°C y el controlador es un regulador de temperatura digital XMTG 808 mostrado en la figura 3, de fácil adquisición en el mercado local, que brinda buenas condiciones de control (control todo-nada y PID) y que además tiene un precio moderado.

Figura 3: Regulador digital de temperatura XMTG 808



Tomado

de:

http://www.yycj.com/XMT_808_series_Intelligent_PID_temperature_control_measuring_appliance_multi-purpose/1375.html

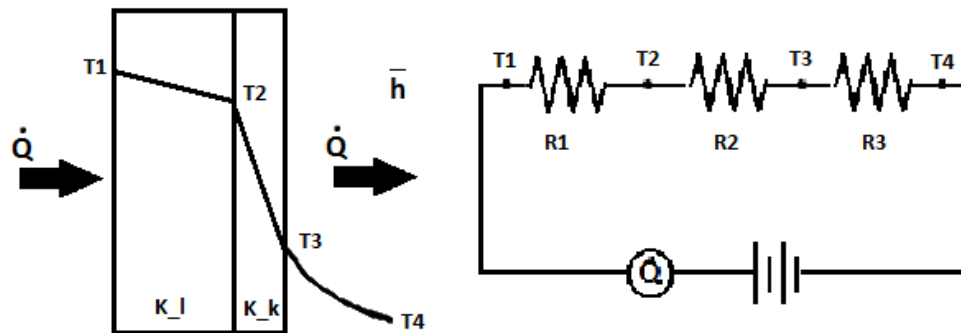
2.4. CALCULOS Y SIMULACIONES

Para analizar el desempeño del horno y de los materiales a utilizar en su fabricación (comportamiento térmico y estructural bajo condiciones extremas de funcionamiento), se realizaron cálculos iterativos con la ayuda de excel como primera aproximación al comportamiento térmico del horno y posteriormente un análisis térmico y estructural en ANSYS. En ambas etapas se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se asume régimen estacionario.
- No se tuvo en cuenta la convección ni la radiación dentro del horno.
- Las paredes en el interior del horno se suponen están a la máxima temperatura de diseño del horno de 1500°C.
- Se trabaja a una temperatura ambiente de 25°C.
- Para el análisis estructural en ANSYS se tiene en consideración una presión de trabajo dentro del horno de 10⁻³ Bares.

2.4.1. Análisis térmico: Aproximación numérica. Para el desarrollo del proceso iterativo en Excel se tuvo en cuenta la analogía de resistencias térmicas (figura 4) y la teoría de transferencia de calor por conducción en estado estacionario unidimensional y multidimensional y las correlaciones empíricas para convección libre.

Figura 4: Distribución de temperatura y circuito térmico equivalente para las paredes del horno



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Como se asume un estado estacionario se puede decir que la transferencia de calor por conducción en las paredes es igual a la transferencia de calor por convección en el exterior de las paredes así:

$$\frac{T1 - T2}{R1} = \frac{T2 - T3}{R2} = \frac{T3 - T4}{R3}$$

En donde:

R1 es la resistencia térmica por conducción en los ladrillos y depende de T1, T2, el factor de forma S_l (figura 5) y el coeficiente de transferencia de calor por conducción K_l .

$$R1 = \frac{1}{S_l * K_l}$$

R2 es la resistencia térmica por conducción en el aislante y depende de T2, T3, el factor de forma S_k (figura 5) y el coeficiente de transferencia de calor por conducción K_k .

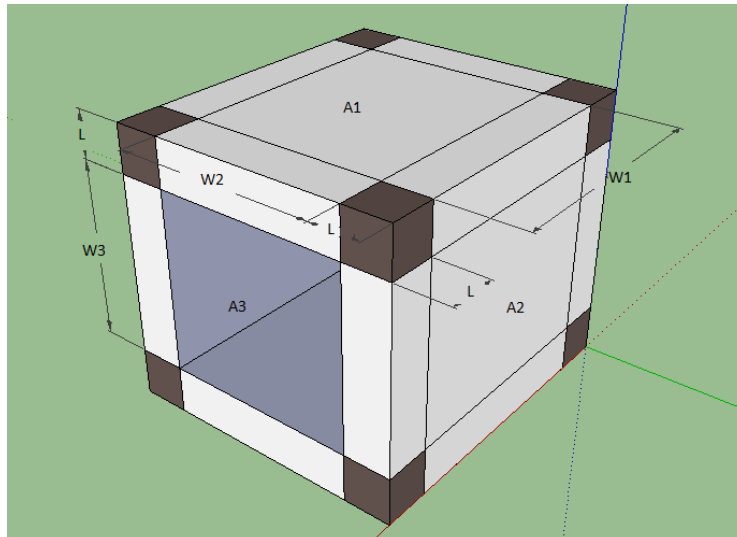
$$R2 = \frac{1}{S_k * K_k}$$

R3 es la resistencia térmica por convección en las paredes exteriores y depende del área convectiva (A_c) y el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_a).

$$R3 = \frac{1}{\bar{h}_i * A} \quad y \quad \bar{h} = \frac{\overline{Nu} * k_a}{L}$$

Y en donde Nusselt (\overline{Nu}) y la conductividad térmica del aire (k_a) dependen de T3 y T4.

Figura 5: Dimensiones tenidas en cuenta en el cálculo del factor de forma



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

En las tablas 4, 5 y 6 se muestra los resultados obtenidos en el proceso iterativo realizado en excel, cada tabla representa una iteración. Las unidades están en el Sistema Internacional de medidas (SI).

Tabla 4: Primera iteración análisis estacionario.

CONVECCION										
propiedades aire		horizontal				vertical				R_aire
α	8,73E-05	Ra_h	Nu_h	h_h	R_h	Ra_v	Nu_v	h_v	R_v1	
v	6,02E-05	689373,13	15,55992	11,063348	0,7544954	29324081	40,51037	8,2514976	0,2845507	1,0390461
Pr	0,69									
K_a	4,97E-02				temp. interior (T_1)	Temp. ambiente (T_4)				
β	0,0015408				1773	298				
					Tprom_aire	Tprom_ladrillo	Tprom_kaowool			
					649	1386,5	750			
					temperaturas para determinar propiedades. Mirar tablas de propiedades de materiales (aire, ladrillo y kaowool)					
1000	T_2	Para esta iteración estos valores son asumidos.								
500	T_3									
CONDUCCION										
		propiedades ladrillo			propiedades kaowool					
		S_l	0,684396 m	S_k	1,934 m					
		K_l	0,3539	K_k	0,1068			R_ladrillo	R_kaowool	
								4,1286871	4,8414146	
		T_2(calculada)				1164,575225				
		T_3(calculada)				451,1192277				

Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Tabla 5: Segunda iteración análisis estacionario

CONVECCION										
propiedades aire		horizontal				vertical				R_aire
α	1,00E-04	Ra_h	Nu_h	h_h	R_h	Ra_v	Nu_v	h_v	R_v1	
v	7,01E-05	564931,37	14,804464	11,126857	0,750189	24030663	38,256821	8,2371325	0,2850469	1,0352359
Pr	0,7									
K_a	5,25E-02					temp. interior (T_1)		Temp. ambiente (T_4)		
β	0,001368					1773		298		
						Tprom_aire		Tprom_ladrillo		Tprom_kaowool
						731		1468,5		807,5
						temperaturas para determinar propiedades. Mirar tablas de propiedades de materiales (aire, ladrillo y kaowool)				
1164	T_2	Para esta iteración estos valores								
451	T_3	son los obtenidos en la anterior.								
CONDUCCION										
		propiedades ladrillo			propiedades kaowool					
		S_l	0,684396 m		S_k	1,934 m				
		K_l(Tprom)	0,37865		K_k(Tprom)	0,1192		R_ladrillo	R_kaowool	
								3,8588205	4,3377775	
		T_2(calculada)				1156,463751				
		T_3(calculada)				463,4029856				

Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Tabla 6: Tercera iteración análisis estacionario

CONVECCION										
propiedades aire		horizontal				vertical				R_aire
α	9,93E-05	Ra_h	Nu_h	h_h	R_h	Ra_v	Nu_v	h_v	R_v1	
v	6,95E-05	573240,56	14,858603	11,013222	0,7579294	24384114	38,42293	8,1585738	0,2877916	1,045721
Pr	0,7									
K_a	5,18E-02					temp. interior (T_1)		Temp. ambiente (T_4)		
β	0,0013755					1773		298		
						Tprom_aire		Tprom_ladrillo		Tprom_kaowool
						727		1464,5		810
						temperaturas para determinar propiedades. Mirar tablas de propiedades de materiales (aire, ladrillo y kaowool)				
1156	T_2	Para esta iteración estos valores								
464	T_3	son los obtenidos en la anterior.								
CONDUCCION										
		propiedades ladrillo			propiedades kaowool					
		S_l	0,684396 m		S_k	1,934 m				
		K_l(Tprom)	0,37865		K_k(Tprom)	0,1192		R_ladrillo	R_kaowool	
								3,8588205	4,3377775	
		T_2(calculada)				1157,163197				
		T_3(calculada)				464,8886913				

Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

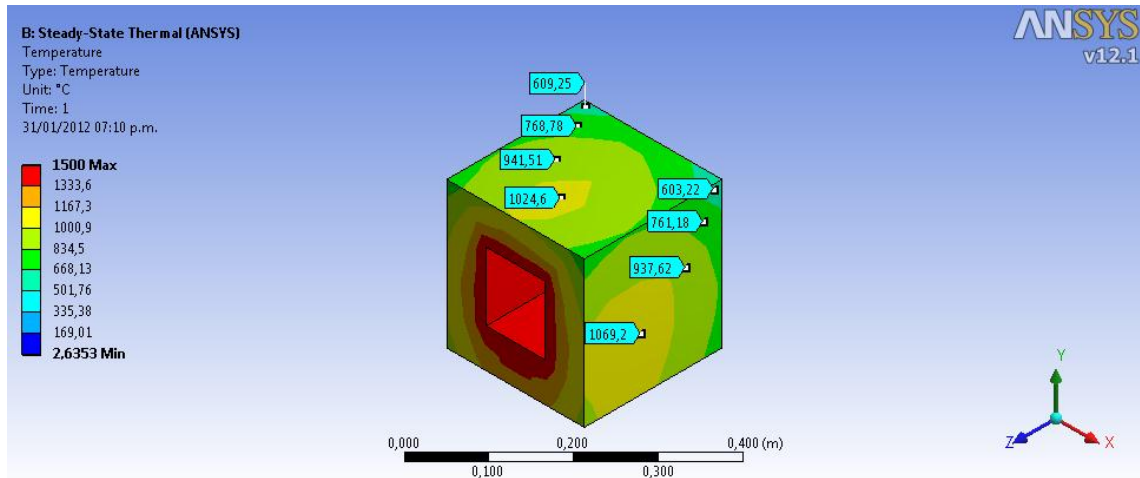
Finalmente, de la aproximación numérica (proceso iterativo) se tiene un estimado para la temperatura de lado frío del ladrillo (T2) de 1156K (883°C) y para la temperatura de lado frío del kaowool (T3) de 464K (191°C); en donde tanto el kaowool como los ladrillos refractarios JM26 tenidos en cuenta en el análisis están bajo condiciones térmicas estables de funcionamiento, es decir, no superan sus límites de temperatura promedio de uso continuo (1093°C para el kaowool y 1430°C para los ladrillos JM26).

2.4.2. Análisis térmico: ANSYS. En el análisis térmico realizado en ANSYS se determinó la distribución de temperaturas en las paredes y el flujo de calor a través de las mismas; para la cual fue necesario hacer un modelo del horno en SolidWorks y posteriormente importarlo a la interfaz de trabajo de ANSYS workbench en donde fue simulado térmicamente bajo las siguientes condiciones:

- Las caras del horno que funcionan como soporte no presentan transferencia de calor.
- La temperatura ambiente tenida en cuenta en el análisis es de 25°C.
- La temperatura en las paredes internas del horno es constante y se supone es la temperatura máxima de funcionamiento del horno 1500°C.
- Se tiene en cuenta la transferencia de calor por conducción a través de las paredes del horno y la convección en estado natural de las paredes externas del horno.

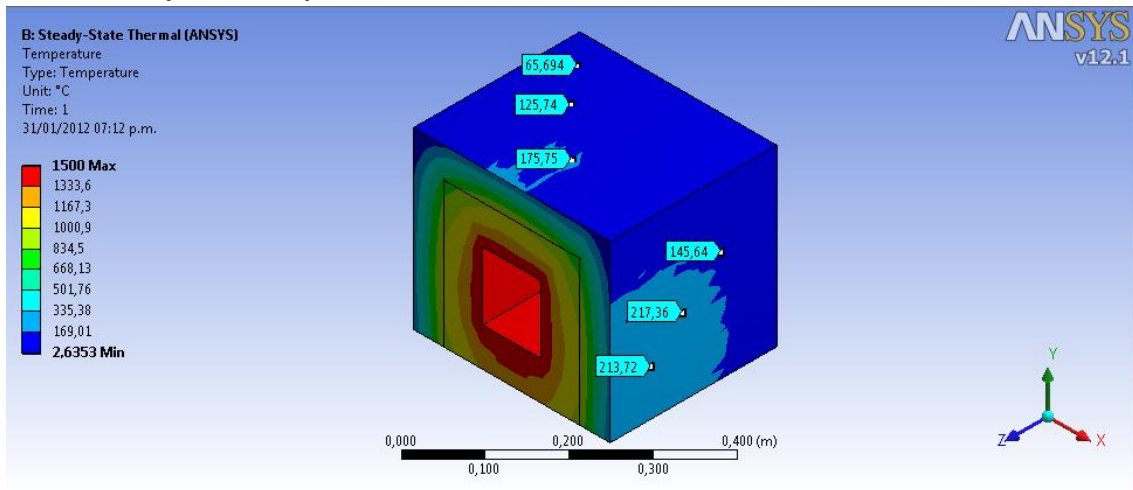
En las figuras 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos para la distribución de temperaturas sobre las paredes del horno, en donde se puede observar que la temperatura promedio de lado frío para el ladrillo (T2) es de 839°C, y la temperatura promedio de lado frío para el kaowool (T3) es de 157°C; valores que se encuentran muy por debajo de las temperaturas límites de uso continuo de ambos materiales y que a su vez se encuentran bastante cercanos a los valores obtenidos en la aproximación numérica, lo que permitió ratificar el uso de los ladrillos refractarios JM26 y del Kaowool, ambos de la empresa Thermal Ceramics, como materiales para la construcción del horno.

Figura 6: Distribución de temperaturas obtenida para las paredes exteriores del horno (Ladrillos refractarios JM26).



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

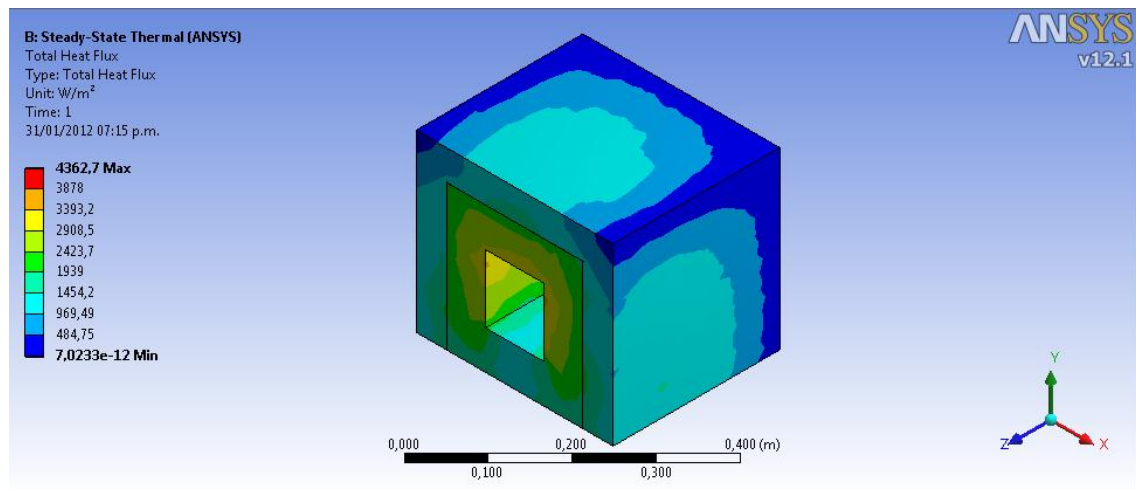
Figura 7: Distribución de temperaturas obtenida para las paredes exteriores del horno (Kaowool).



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Por otro lado, en la figura 8 se muestra el flujo de calor obtenido a través de las paredes del horno y cuyo valor máximo de 4362.7 W/m^2 se presenta en la unión entre la puerta y el cuerpo del horno.

Figura 8: Flujo de calor a través de las paredes del horno



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

2.4.3. Cálculo de las resistencias: Para calcular las resistencias es necesario determinar la potencia requerida para que el horno funcione de manera continua a 1500°C . La potencia necesaria la obtenemos de multiplicar la transferencia de calor máxima obtenida en la simulación que fue de 4362.7 W/m^2 y el área efectiva del horno que es $0,4177\text{m}^2$, así:

$$P = q'' * Aef$$

La potencia requerida será:

$$P = 1822,2997 \text{ W}$$

Tomando en cuenta que en el análisis no se tuvo en cuenta la presencia de cargas dentro del horno se toma una potencia de 2000 watts. Con este valor se calcula la corriente con la cual se alimenta el circuito y a su vez el valor de la resistencia necesario para el funcionamiento óptimo del horno.

Mediante la ley de Ohm tenemos que:

$$P = V * I$$

El circuito será alimentado con 220V, entonces:

$$I = \frac{P}{V} = 9,06 \text{ A}$$

Con el valor de la corriente y también por la ley de Ohm podemos calcular la magnitud de la resistencia así:

$$R = \frac{V}{I} = 24,2 \Omega$$

Finalmente para el horno y teniendo en cuenta los requerimientos anteriores, la potencia de operación del horno y la temperatura máxima de operación del horno, se mandan a hacer 6 resistencias de 4Ω cada una para ser conectadas en serie.

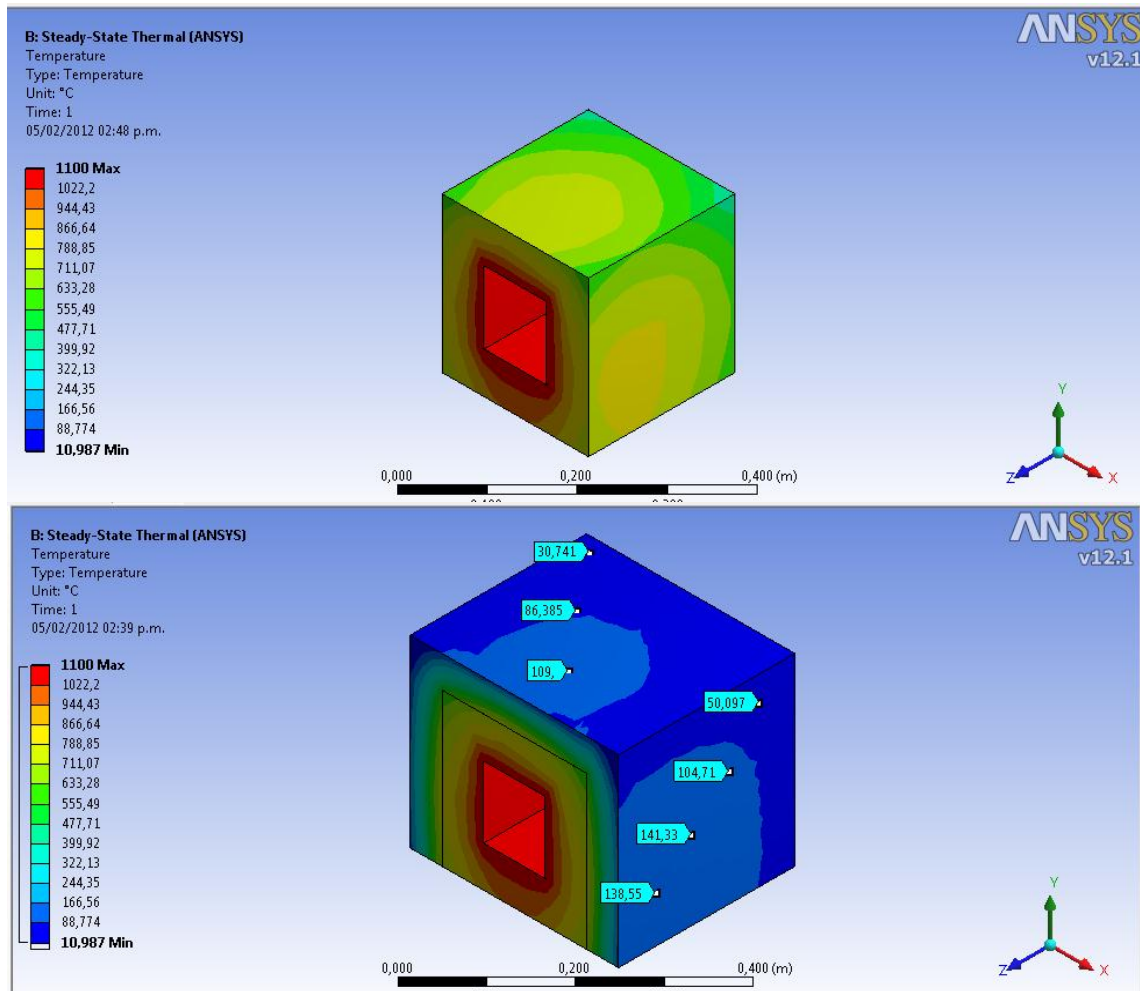
En esta etapa del proyecto se hicieron presentes limitaciones de índole comercial a nivel local y nacional que no permiten que el horno a construir cumpla con su requerimiento de temperatura máxima de operación pues no se consiguen las aleaciones que soporten dicha condición de trabajo (temperatura de operación de hasta 1700°C por lo menos ya que la temperatura de operación de las resistencias eléctricas es más o menos 200°C por encima de la temperatura máxima de operación del horno). Se decide trabajar entonces con el alambre de denominación R13510D 125 FRC de la marca Rescal que tienen una temperatura máxima de trabajo de 1300°C lo que permite alcanzar una temperatura máxima de operación de horno de 1100°C .

Debido a que la temperatura de operación del horno ahora esta comprendida entre 0 y 1100°C se puede cambia también el tipo de termocupla a utilizar por una tipo K ya que una tipo R que fue la contemplada inicialmente es mucho más costosa y no es tan fácil de conseguir en el mercado local.

En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos en ANSYS, del análisis térmico realizado para la temperatura máxima de operación de 1100°C , en donde se puede ver una temperatura promedio para el bajo la condición de temperatura máxima de operación de 1100°C en donde se observar una disminución en la

temperatura promedio de lado frio para los ladrillos y para el kaowool alejándose aun mas dichos materiales de sus temperaturas máximas de operación de uso continuo (temperaturas criticas de funcionamiento).

Figura 9: Distribución de temperaturas para el ladrillo (superior) y para el kaowool (inferior) para una temperatura máxima de operación de 1100°C

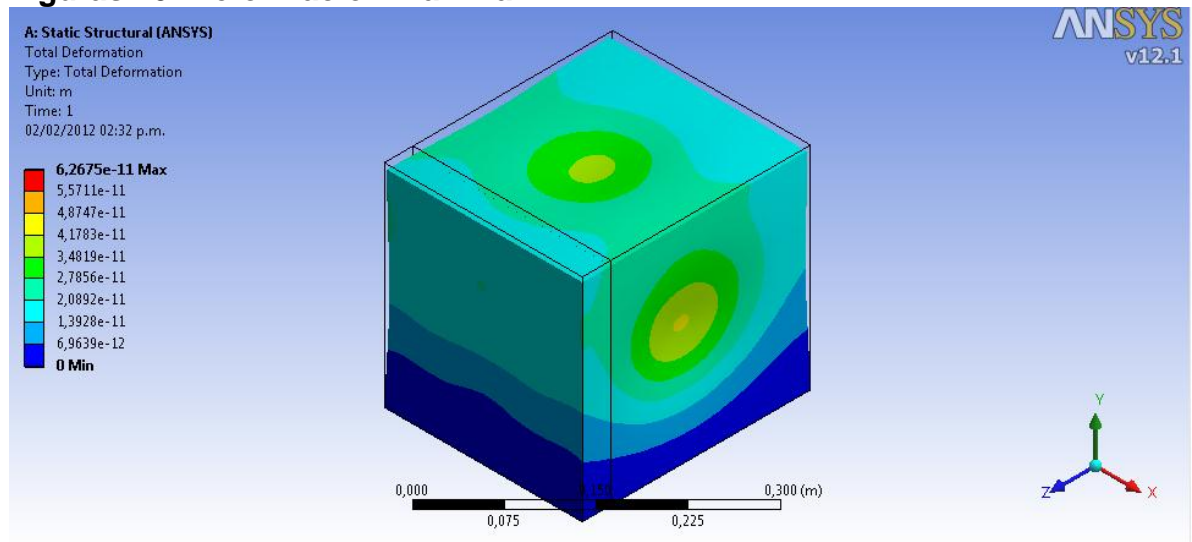


Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

2.4.4. Esfuerzo máximo y Factor de seguridad. Para calcular el esfuerzo máximo y el factor de seguridad del horno se hace en ANSYS un análisis estructural, para esta simulación se tuvo en cuenta que algunos procesos requieren una atmosfera controlada en condiciones de vacio (10^{-3} Bares). En las

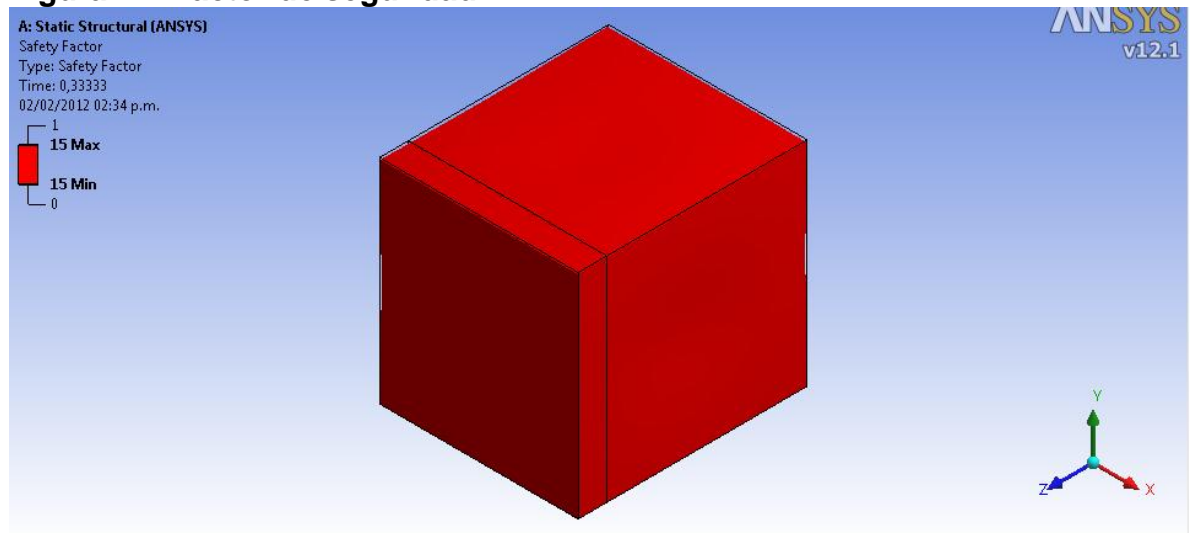
figuras 10 y 11 se muestran los resultados, en donde vale la pena destacar el factor de seguridad obtenido de 15, valor que permite con seguridad utilizar condiciones de vacío en el horno para realizar tratamientos térmicos especiales que requieren este tipo de condiciones.

Figuras 10: Deformación máxima



Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Figura 11: Factor de seguridad



Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

2.5. CONSTRUCCION

En la tabla 5 se muestran los materiales utilizados para llevar a cabo la construcción del horno.

Tabla 7: Materiales utilizados en la construcción del horno

ELEMENTO	CANTIDAD
Ladrillos refractarios	10 unidades
Resistencias eléctricas	10 unidades
Manta Kaowool	1m X 1,50m
Pirometro	1unidad
Termocupla tipo K	1unidad
Lamina de acero inoxidable calibre 18	1m X 1,50 m
Rele de estado solido	1
Contactador	1
Interruptor	2

Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

La carcasa del horno fue construida a partir de una lamina de acero inoxidable calibre 18, la cual fue cortada y posteriormente soldada (con TIG, por las condiciones de limpieza que brinda en la soldadura) para formar una caja y de igual forma se realizo la tapa del horno.

Las dimensiones de los ladrillos refractarios fueron modificadas para que en el momento de formar la cavidad de trabajo encajaran entre sí como un rompecabezas. Posteriormente a los ladrillos que sirven como soporte de las resistencias se les hizo 4 agujeros con una fresa en una fresadora de mesa con el fin de obtener resultados reproducibles ya que las dimensiones de los orificios fueron muy importante pues en ellos debían encajar perfectamente las resistencias.

Antes de armar la tapa y la cavidad de trabajo del horno se hizo un forrado interno con la manta aislante de las dos cajas para que esta quedara en una posición entre los ladrillos y la lamina de acero. Después de tener armada la cavidad de trabajo se dispuso a colocar las resistencias dentro de los orificios de los ladrillos y se conectaron en serie. En la figura 11 está el horno terminado en donde se puede ver la disposición final de los ladrillos, las resistencias y la manta térmica.

Figura 12: horno



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile

Todas las partes involucradas en el control y la alimentación del horno fueron acomodadas dentro de una caja metálica con el fin de proteger los elementos y las conexiones y proteger al operario (Figura 12).

Figura 13: Caja de control

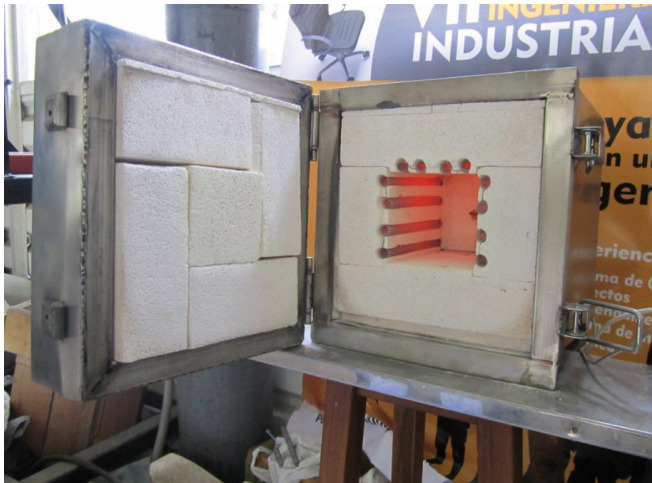


Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile

Finalmente se conecta la caja de control a las resistencias previamente conectadas en serie y la termopila dispuesta en la cavidad de trabajo al

controlador y se prende el equipo con el fin de comprobar las conexiones y el correcto funcionamiento del mismo (ver figura 13). Se obtiene entonces un producto terminado listo para ser probado bajo diferentes condiciones de funcionamiento (Figura 14).

Figura 14: Encendido del horno



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

FIGURA 15: Producto Final



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

3. PRUEBAS

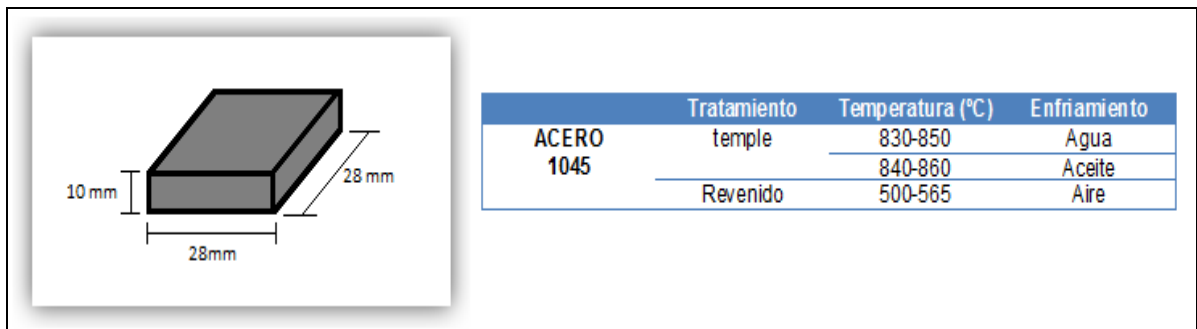
En esta etapa del proyecto se puso a prueba el horno bajo diferentes condiciones de trabajo tales como temperatura y carga. Se hicieron cinco pruebas como se cita a continuación:

- Hasta alcanzar la temperatura máxima de funcionamiento del horno que es de 1100°C y sin carga.
- A 830°C sin carga y durante una hora después de haber alcanzado la temperatura considerada.
- A 500°C sin carga y durante hora y media después de haber alcanzado la temperatura considerada.
- Temple: manteniendo la probeta durante una hora después de haber alcanzado la temperatura considerada (según el material a utilizar). A la probeta se realizara una prueba de dureza Brinell en la maquina universal de ensayos SHIMADZU del laboratorio de materiales de Ing. Civil de la Universidad pontificia Bolivariana antes y después de haber realizado el tratamiento térmico.
- Revenido: con la misma probeta utilizada en el temple y durante una hora después de haber alcanzado la temperatura considerada. La probeta será de igual manera sometida a una prueba de dureza Brinell después de haber realizado el tratamiento térmico.

La probeta a utilizar en las pruebas relacionadas con los tratamientos térmicos será en acero 1045 distribuido por Rodamientos y Aceros con una equivalencia aproximada al acero AISI 1045 con un contenido de carbono mayor a 0,3%, considerado de dureza media y de templabilidad convencional en agua o en aceite ampliamente utilizado para partes de maquinas que requieren dureza y tenacidad tales como pernos, chavetas, engranes, pernos de anclaje, herramientas agrícolas (martillos, porras, barretones, etc.) entre otras aplicaciones.

En la figura 16 se muestran las dimensiones de la probeta y las condiciones recomendadas por el fabricante para realizar los tratamientos térmicos respectivamente.

Figura 16: Dimensiones de la probeta y condiciones de temple y revenido para acero 1045



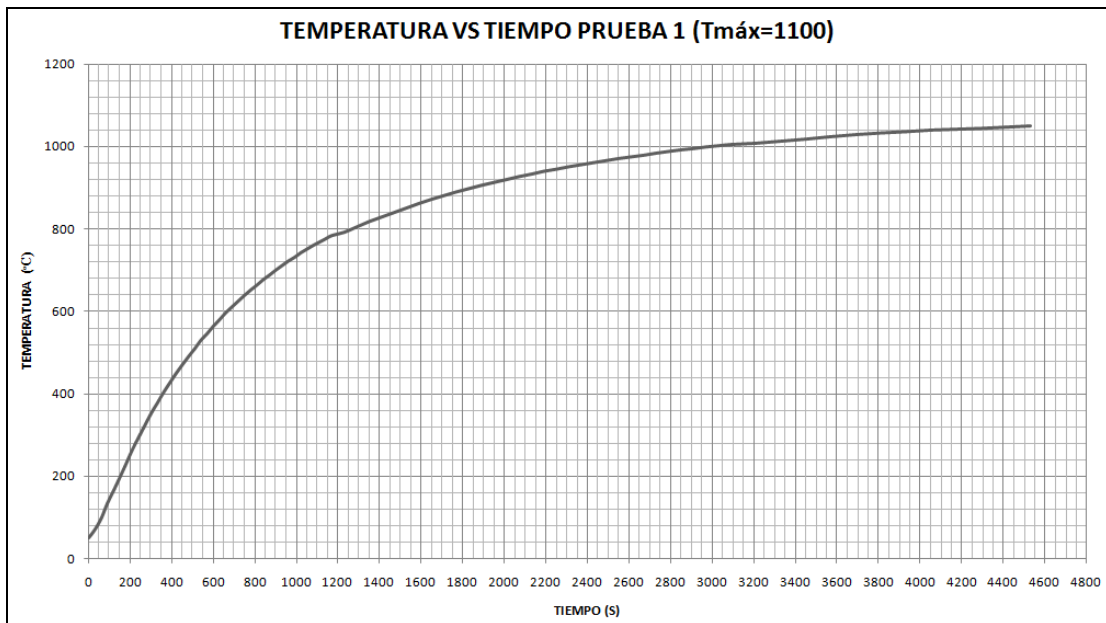
Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

3.1. PRIMERA PRUEBA: TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERACIÓN

Esta prueba consistió en tomar registros de tiempo y temperatura para el horno hasta que este alcanzara una temperatura de 1100°C en su interior. Esta prueba se realizó sin la presencia de carga con el fin de determinar el tiempo necesario para alcanzar la temperatura máxima de operación del horno.

En la figura 17 se muestra los resultados en donde se puede ver que el tiempo empleado para alcanzar la temperatura máxima de operación (1100°C) fue de 75 minutos y 30 segundos (4530 segundos), tiempo que se considera aceptable si se tiene en cuenta la potencia consumida por el equipo.

Figura 17: Grafica temperatura vs tiempo. Primera prueba.



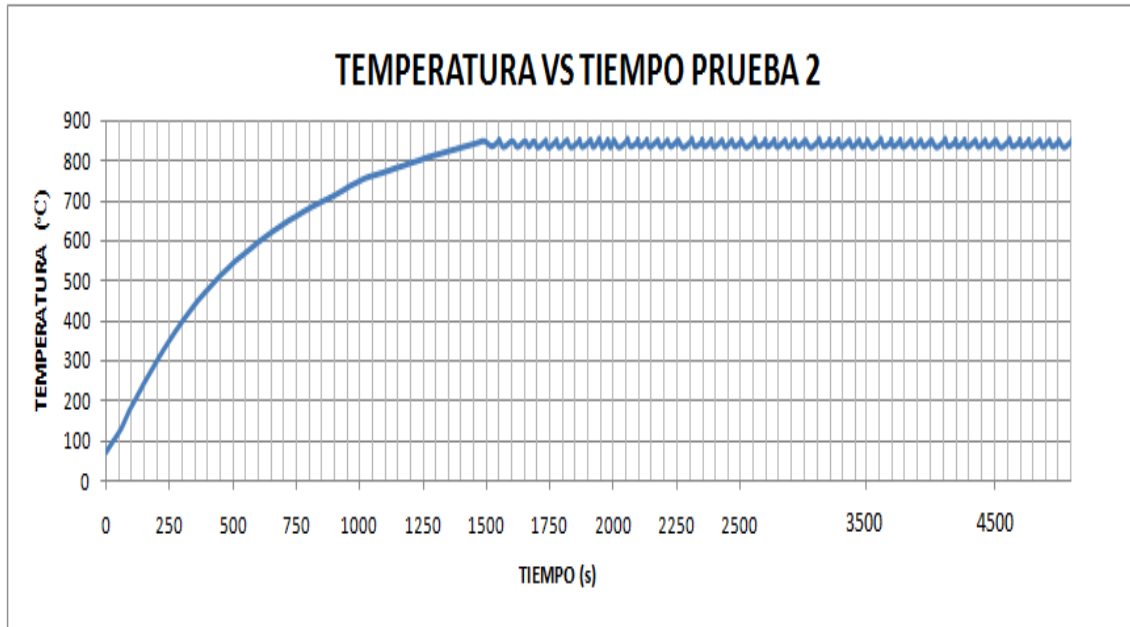
Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

3.2. SEGUNDA PRUEBA: 850°C SIN CARGA Y CONTROL ON/OFF

Para esta prueba se establece una temperatura de operación de 850°C, se trabaja sin carga, con el controlador bajo el parámetro On/Off de control y durante una hora después de haber alcanzado la temperatura de operación.

En la figura 18 se representa gráficamente los resultados obtenidos en donde se puede observar que la temperatura de operación se alcanza en 25 minutos (El mismo tiempo en alcanzar dicha temperatura en la anterior prueba, mirar figura 17). Después de alcanzar la temperatura de operación se tiene una variación promedio de la temperatura de +4°C y -16°C con respecto a la temperatura establecida durante el tiempo que dura la prueba (1 hora); variación que está dentro de lo esperado para este tipo de control que es utilizado normalmente en procesos que no requieren una alta precisión en los parámetros (temperatura, presión, volumen, etc.) a controlar.

Figura 18: Grafico temperatura vs tiempo. Segunda prueba.



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

3.3. TERCERA PRUEBA: 850°C Y CONTROL PID (AUTO-AJUSTE)

Para esta prueba se establece una temperatura de operación de 850°C y se trabaja con el controlador bajo la función de auto ajuste, función bajo la cual el controlador auto establece los parámetros P, I y D (proporcional, integral y derivativo respectivamente) óptimos para realizar un control PID sobre la temperatura de operación; una vez establecidos, estos valores permanecen constantes hasta que sea cambiada la temperatura de operación del horno.

Esta prueba se hace con el fin de sintonizar el controlador para realizar un control PID en la prueba de temple que se realizará a la misma temperatura de operación y consiste prácticamente en registrar el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de operación y permitir que el controlador establezca los parámetros P, I y D.

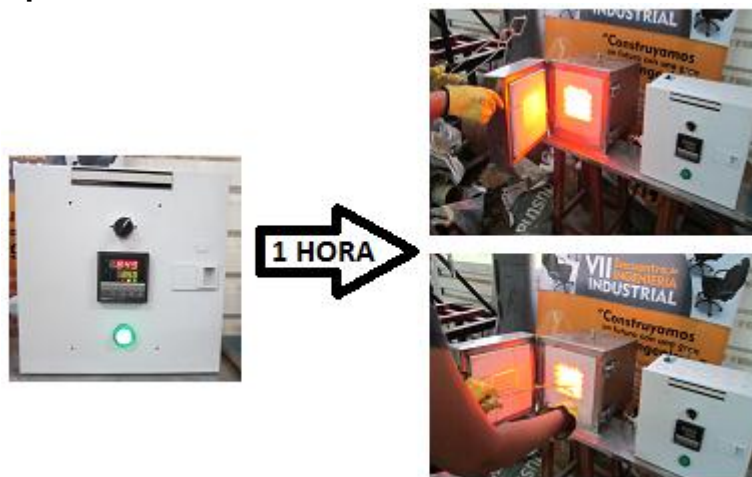
Finalmente se obtiene que el tiempo empleado para alcanzar los 850°C fue de 25 minutos y 5 segundos (muy cercano a los tiempos registrados para esta temperatura en las dos pruebas anteriores) y que los parámetros P, I y D establecidos por el controlador fueron 22,471 y 21 respectivamente.

3.4. TEMPLE Y REVENIDO

El temple y el revenido son tratamientos térmicos complementarios que al ser aplicados en conjunto también se conoce como bonificado; se utilizan ampliamente para mejorar las propiedades de resistencia de los aceros de construcción e impartirles dureza y altas propiedades cortantes a los aceros de herramientas.

El temple consiste en calentar el acero hasta una temperatura de austenización, seguido de un tiempo de sostenimiento a dicha temperatura y luego someterlo a un enfriamiento brusco proporcionado por el medio de enfriamiento que se vaya a utilizar. Los medios de enfriamiento más utilizados son: agua, aceites, y soluciones salinas. El objetivo principal del temple es endurecer el acero. El temple de la probeta se realizó a una temperatura de 850°C, sometiendo a la probeta durante una hora a esta temperatura y enfriándola bruscamente utilizando agua como medio de enfriamiento (ver figura 19).

Figura 19: Temple



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Después del temple se efectúa el revenido, en donde se somete al acero a una temperatura de transformación que produce un cambio de fase en el acero. El enfriamiento en este tratamiento es progresivo y usualmente se usa el aire como medio de enfriamiento. Este tratamiento se hace con el fin neutralizar lentamente

las tensiones internas del acero (disminuir la fragilidad) con una reducción mínima de la dureza adquirida durante el temple.

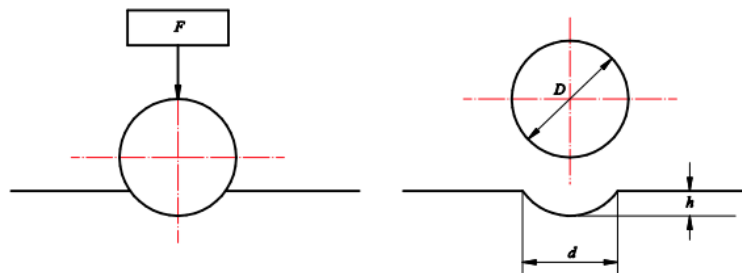
En esta prueba el tratamiento térmico se realizó a una temperatura de 530°C y manteniendo la probeta a esta temperatura durante una hora y después dejarla enfriarla progresivamente con el aire.

Por otro lado y después de realizar cada tratamiento térmico se realiza una prueba de dureza Brinell con el fin de evaluar los resultados obtenidos en cada tratamiento.

3.5. ENSAYO DE DUREZA BRINELL

Este ensayo consiste en aplicar una carga F a la superficie del material a ensayar por intermedio de una esfera de material apropiado durante un tiempo determinado midiendo el diámetro de la huella dejada en el material ensayado después de retirar la carga (Figura 20).

Figura 20: Principio básico del ensayo de dureza Brinell.



Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

3.5.1. Equipo. El ensayo se realiza en la maquina universal de ensayos SHIMADZU del laboratorio de materiales de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

3.5.2. Procedimiento.

- Instalar la mordaza para ensayo de dureza Brinell en la maquina universal de ensayos.
- Colocar la probeta de ensayo sobre el soporte rígido.

- Ubicar la probeta de ensayo a una distancia de 2 cm de la esfera de la mordaza.
- Aplicar lentamente carga sobre la probeta hasta alcanzar una fuerza de 10KN en un intervalo de 15 segundos. Es importante respetar el tiempo de aplicación de la carga para no alterar el resultado final del ensayo y no maltratar la esfera empleada para modelar la carga estática.
- Descargar la carga aplicada.
- Medir con el micrómetro el diámetro obtenido por penetración de la esfera.

En las tablas 7, 8 y 9 se muestran los datos obtenidos en las pruebas de dureza realizadas a la probeta antes del temple, después del temple, antes del revenido y después del revenido respectivamente, en donde se puede observar un aumento en la dureza de las probetas después de realizar los tratamientos térmicos.

Tabla 8: Ensayo de dureza Brinell antes de realizar el temple.

ENSAYO DE DUREZA BRINELL	
Material:	Carga aplicada (kg):
Prueba número	Diámetro (mm)
1	2,6
2	2,6
3	2,5
4	2,5
5	2,5
Diámetro promedio	2,54
Número de Dureza Brinell	196,85 Kg/mm ²

Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Tabla 9: Ensayo de dureza Brinell después de realizar el temple.

ENSAYO DE DUREZA BRINELL	
Material:	Carga aplicada (kg):
Prueba número	Diámetro (mm)
1	2,2
	2,2
2	2,3
	2,3
3	2,3
	2,2

Diámetro promedio	2,23
Número de Dureza Brinell	257,808 Kg/mm ²

Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Tabla 10: Ensayo de dureza Brinell después de realizar el revenido.

ENSAYO DE DUREZA BRINELL	
Material:	Carga aplicada (kg):
Prueba número	Diámetro (mm)
1	2,5
	2,4
2	2,5
	2,4
3	2,4
	2,5
Diámetro promedio	2,45
Número de Dureza Brinell	209,53 Kg/mm ²

Fuente: Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

4. CONCLUSIONES

Las herramientas CAD (Solid Works) – CAE (ANSYS) permiten evaluar las características y las propiedades de un diseño bajo condiciones críticas, permitiendo de una manera indirecta evaluar la viabilidad y rentabilidad del mismo antes de una construcción física lo que a su vez se ve reflejado en la reducción de costos de fabricación de prototipos y modelos para la obtención de los productos deseados. En el desarrollo de este proyecto se pudo observar dicha característica de estas herramientas computacionales pues con un análisis térmico realizado en ANSYS se pudo determinar si era posible la utilización de Kaowool como material aislante, sin la necesidad de haber construido un prototipo, o haber realizado pruebas de ensayo que hubiesen podido resultar demasiado costosas.

La estimación de las necesidades de potencia de un horno, en función de su construcción, es una parte muy importante del diseño, por tanto, ha de cuidarse que tengan la mejor precisión posible. En este proyecto dicha estimación fue realizada a través de ANSYS, aproximación que fue bastante efectiva pues aunque fue realizada bajo condiciones ideales (estado térmico estable) se obtuvieron resultados muy cercanos a la realidad.

Durante el desarrollo aparecieron numerosos problemas, muchos de ellos se hicieron presentes durante las pruebas y no se pudieron prever en etapas anteriores, por lo que la mejor manera de afrontarlos es suponer que en un momento u otro van a aparecer y estar preparado para detectarlos, analizarlos y corregirlos si es posible. Dentro de estos problemas se cita el que se considera fue el más relevante pues fue la causa para el incumplimiento del requerimiento de la temperatura máxima de operación, que fue establecida en 1500°C. El mercado local y nacional fue la principal barrera con la que se encontró la etapa de construcción del horno, pues aún se encuentra con muchas limitantes comerciales en lo que respecta al área de la construcción de equipos eléctricos de altas

temperaturas, como lo son los hornos utilizados para los tratamientos térmicos de materiales más exigentes tales como el tungsteno. Se espera este tipo de limitantes sea superado con los recientes tratados sobre aperturas económicas en los que se está involucrando el país.

Se ha descrito el proceso de desarrollo de un producto completo, desde la concepción hasta la construcción. A pesar de no haber cumplido con las expectativas de temperatura límite, se ha cumplido bastante bien con el resto de los objetivos y se ha demostrado que es un equipo bastante funcional en el que se puede llevar a cabo diferentes tipos de tratamientos térmicos que pueden ser tenidos en cuenta dentro de las actividades de laboratorio de algunas materias presentes en el pensum de la carrera.

Se entrega un equipo totalmente funcional, con una temperatura máxima de operación de 1100°C y control de temperatura que puede ser de tipo on/off y de tipo PID con una función de auto-sintonización para determinar los parámetros propios de este tipo de control.

Es importante, en el momento de desarrollar este tipo de proyectos que involucran materiales especiales, tener en cuenta las limitaciones de tipo comercial a las que se pueden ver enfrentados en la etapa de desarrollo debido a que pueden ser materiales que no son comerciales en el país y no se consiguen.

Al realizar las pruebas de temple y revenido se logro aumentar la dureza Brinell del material utilizados (acero AISI 1045) lo que nos permite comprobar el buen funcionamiento del equipo en cuanto al control de la temperatura y la estabilidad de la temperatura dentro de la recámara; aspectos que son muy importantes para todos los procesos que se pueden llevar a cabo en el horno.

A pesar de ser este un proyecto de ingeniería mecánica, el diseño no es más que una pequeña parte de las disciplinas involucradas, por ende, podemos decir que este ha sido un proyecto integrador de áreas para el cual es posible, en el futuro, profundizar en aspectos como el control del proceso, generando mejoras que permita llevar a cabo procesos más exactos y reproducibles.

Aunque el desarrollo de este proyecto estuvo enfocado hacia el proceso de sinterización cabe mencionar que en el mercado local hay una amplia demanda de equipos con condiciones de funcionamiento muy similares en el campo de la joyería; por lo que se propone la investigación en los procesos llevados a cabo en este campo con el fin de desarrollar equipos en los que se puedan llevar a cabo dichos procesos y es así como de este proyecto de grado sale una oportunidad de negocio tangible y realizable.

La pulvimetalurgia es una ciencia bastante amplia en la que todavía hay mucho por investigar y desarrollar; se espera que este horno sea el primer paso hacia este punto que permita ver las diferentes posibilidades de mercado que genera el desarrollo y la investigación en esta área.

Por último queda abierta la posibilidad de diseñar, construir y adaptar el sistema de control de atmosfera, ya sea por vacío o por la inducción de gases inertes como el neón y el argón para que en un futuro se puedan hacer mas estudios sobre la influencia de las atmosferas controladas en diferentes procesos y tratamientos térmicos tales como el temple, el revenido y la sinterización.

5. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque la temperatura de concepción de este horno fue de 1500°C cabe recalcar que debido a limitaciones comerciales el horno aquí desarrollado solo puede ser operado a una temperatura máxima de 1100°C.

Antes de utilizar el equipo se sugiere hacer una inspección rápida del funcionamiento de todas sus partes eléctricas, con el fin de verificar que estén en excelentes condiciones de trabajo y que las conexiones eléctricas se encuentren de la manera correcta.

Para una manipulación adecuada del controlador se sugiere al operario leer el manual de funcionamiento del mismo, que se encuentra en este libro en el anexo 4, con el fin de poder realizar un buen control sobre la temperatura del proceso deseado.

El equipo es entregado con elementos básicos de seguridad tales como pinzas y guantes, que deben ser utilizados para su manipulación y la de las probetas que allí se trabajen con el fin de evitar daños sobre la salud del operador.

Aunque este sea un equipo compacto y fácil de manejar se requiere que el funcionamiento del mismo se lleve bajo la supervisión de personal autorizado, dado que es un equipo que maneja altos niveles de temperatura (hasta 1100°C) y voltaje (220 V).

Para evitar que las probetas tratadas en el horno se contaminen y se adhieran a las paredes del horno, es necesaria una bandeja cerámica en donde se dispone la probeta para cualquier tratamiento a realizar dentro del horno.

El equipo tiene partes críticas en las cuales el desgaste por uso es mucho más fuerte y son aquellas que deben ser evaluadas primero ante un posible fallo del equipo. Dichas partes son citadas a continuación:

- Resistencias: Con el equipo des-energizado se debe medir la resistencia total del circuito y esta debe ser aproximadamente (debido al desgaste por uso) de 24 ohmios.
- Contactor: Este es quizás el elemento de control que sufre mayor desgaste debido a la función que cumple, por tanto, en un eventual fallo del equipo debe ser considerado como la posible causa del mismo.
- Termocupla: Cuando la termocupla falle se generará un error en la pantalla del controlador de modo que es un fallo fácil de detectar. Por el uso, los materiales con los que está hecha tienden a separarse generando un error de continuidad, si esto llega a ocurrir se sugiere retirar la termocupla (cuando esta este a una temperatura aceptable) de la cavidad del horno, recortar la punta para retirar la sección dañada, limpiar ambas puntas y volver a soldar. Se recomienda soldadura TIG para evitar contaminaciones y sin aporte para no cambiar las propiedades de la termocupla que están prácticamente definidas por los dos materiales de la cual está formada.

Los elementos de conexión (cables y terminales) también deben ser tenidos en cuenta ante una falla del equipo, ya que dicha falla puede estar reflejada en un terminal suelto o en un cable quemado por el uso frecuente del equipo.

El análisis micro-estructural propuesto en los objetivos del proyecto no fue posible de realizar debido al alto costo que este tiene en el mercado de 560.000 pesos por probeta. Como alternativa se realizaron ensayos de dureza Brinell antes y después de cada tratamiento con el fin de poder cuantificar la dureza y determinar y determinar si hubo un cambio en su valor después de realizar los tratamientos térmicos. Esta alternativa es bastante fiable debido a que los tratamientos térmicos

que se les realizaron a las probetas influyen directamente sobre la dureza del material tratado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.F. MILLS. Transferencia de Calor. Mc Graw Hill 1997. P. 140-152.
- [2] CAMILO MARIN VILLAR. Pulvimetalurgia: En busca de nuevos materiales. Internet: <http://metalactual.com/revista/14/pulvimetalurgia.pdf>
- [3] C. BARRY CARTER. Ceramics materials: Science and Engineering. M. Grant Lorton. P. 139-153
- [4] Energy Efficiency Guide for Industry. Thermal Energy Equipment: Furnace and Refractories. Internet: www.energyefficiencyasia.org
- [5] FRANK ICOPERA. Fundamentos de Tranferencia de Calor. Prentice Hall. P. 74-79 y 492-501.
- [6] F.R. Morral. Metalurgia General. Vol 2. Editorial Reverté S.A. P. 980-999
- [7] ING. MARIA F. SERRANO. Manual de laboratorio de Resistencias de Materiales. Universidad Pontificia Bolivariana. P.17-19
- [8] JULIO ASTIGARRAGA URQUIZA. Hornos Industriales de Resistencias. Iberdrola. P.11-77.
- [9] KANTHAL CATALOGUE. Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnace. Internet: www.kanthal.com/catalogue/resistance_heating_alloys.pdf
- [10] Kaowool. Información del producto. Thermal Ceramics. Internet: www.thermalceramics.com
- [11] Ladrillos refractarios aislantes JM: Información del producto. Thermal Ceramics Internet: www.thermalceramics.com
- [12] Materials World. Vol. 7 No. 11. Nov. 1999. P. 672-673

[13] MatWeb, Your Source for Materials Information. Internet:
<http://www.matweb.com/>

[14] PETER MUILINGER. Industrial and Process Furnace: Principles, design and operation. 2008 Elsevier.

[15] Science and Engineering. A 287(2000) P. 171-177

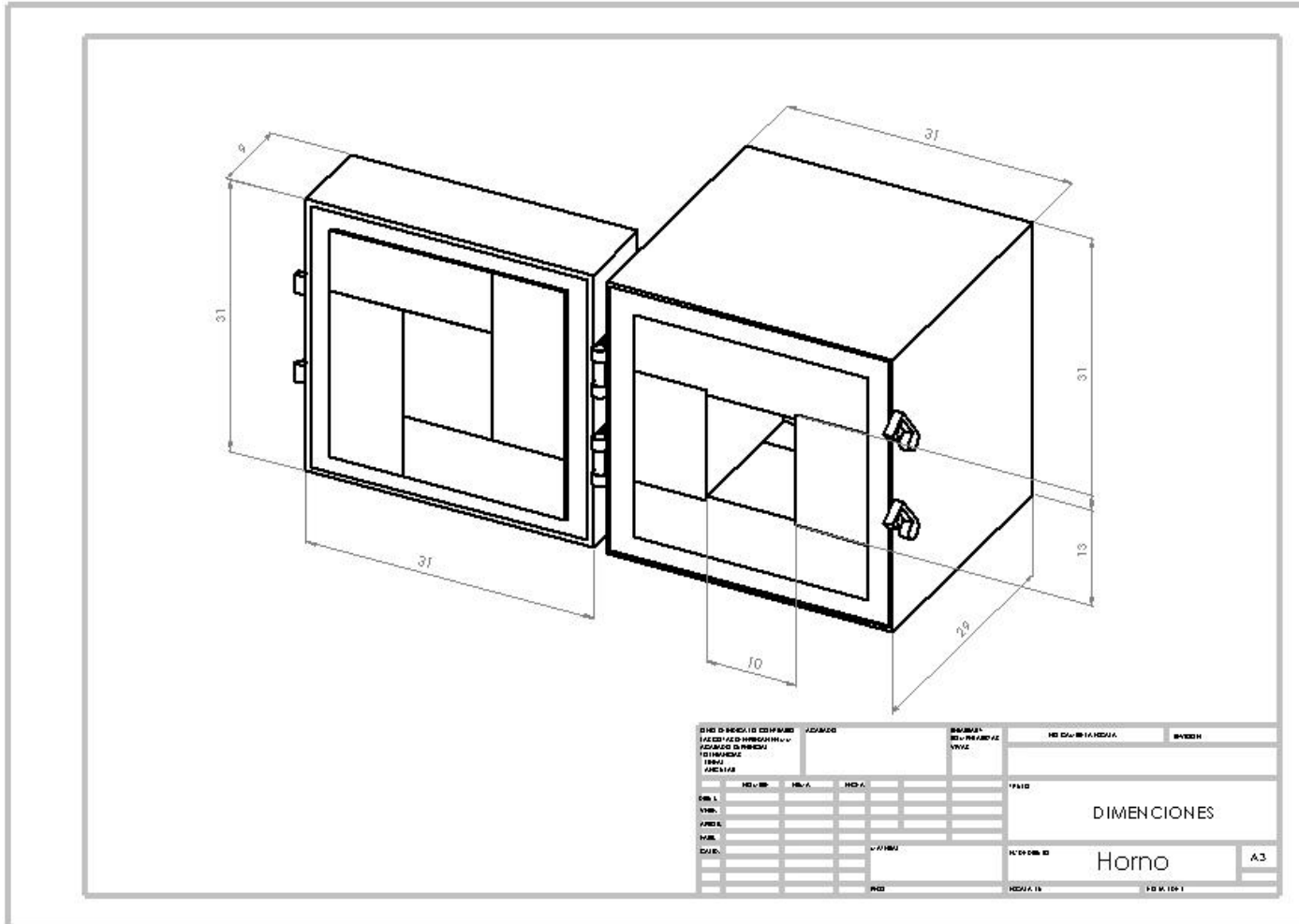
[16] STEVEN R. SCHIMID. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. Prentice Hall. P. 453-454

[15] Tratamientos térmicos. Internet:
<http://www.sabelotodo.org/metalurgia/tratatermacero.html>

[16] Temple y Revenido. Internet:
<http://www.utp.edu.co/~publio17/laboratorio/temple.htm>

ANEXO 1. PLANOS

Plano 1. Dimensiones del Horno



Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

Plano 2. Vista explosionada-materiales

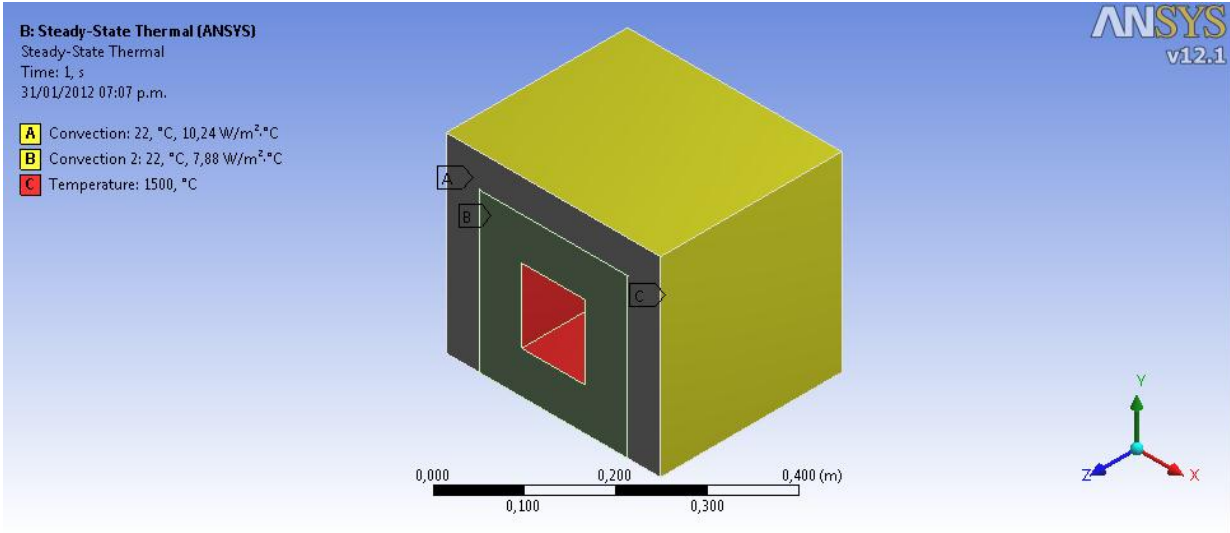
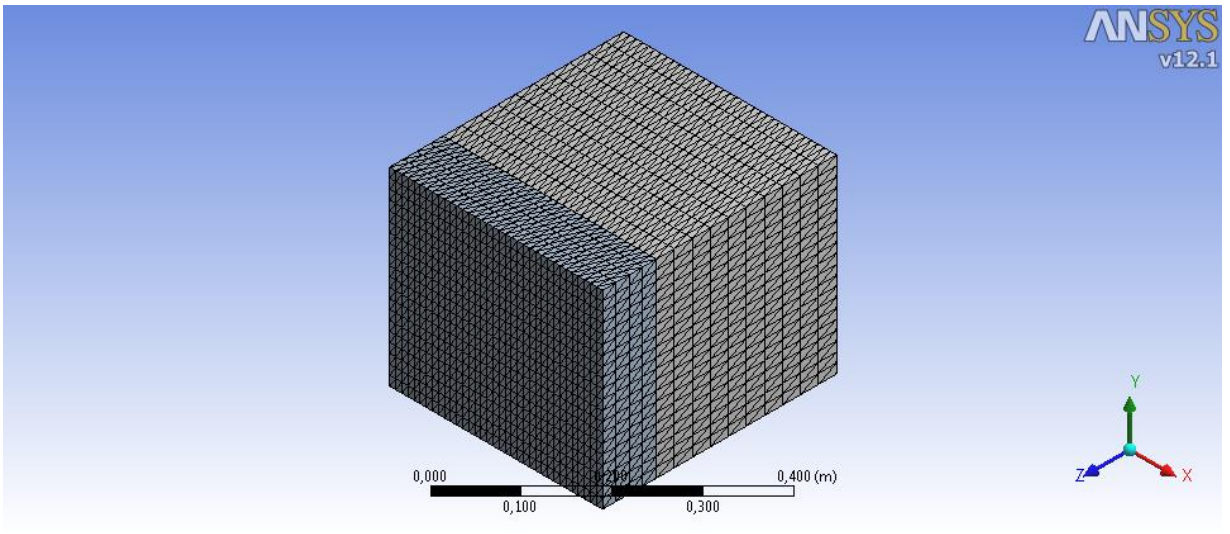
N.º DE ELEMENTO	MATERIAL	CANTIDAD
1	Acero Inox	1
2	Kaowool	1
3	Ladrillo Refractario JM 26	1

DISEÑO		AUTOR		FECHA	
REVISIÓN		PROYECTO		MATERIALES	
OBJ. 1		NO. 1		Horno	
OBJ. 2		NO. 2		A3	
OBJ. 3		NO. 3		10 X 10 X 1	

Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

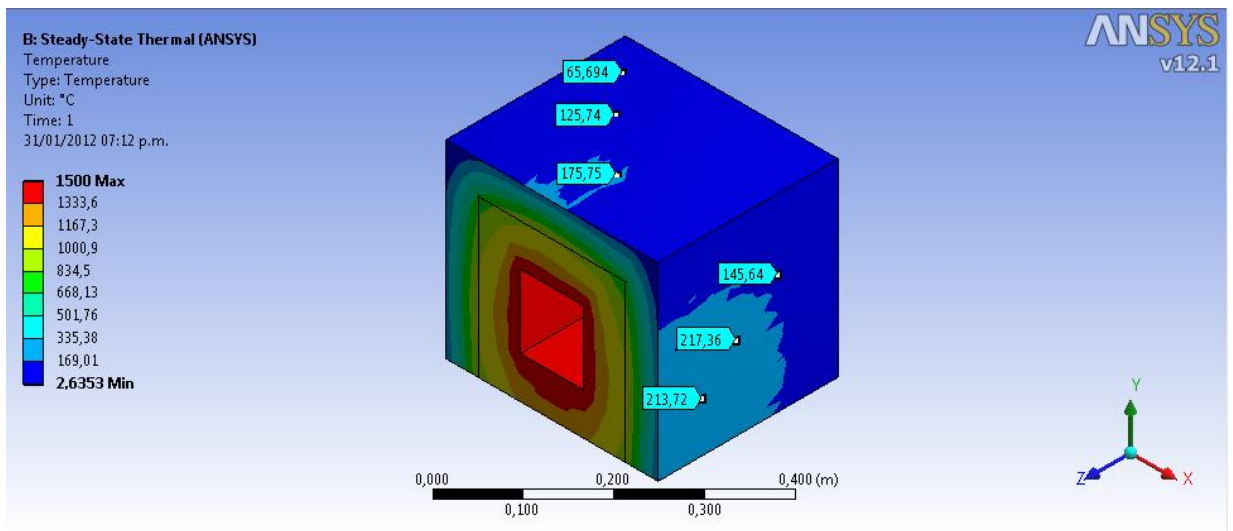
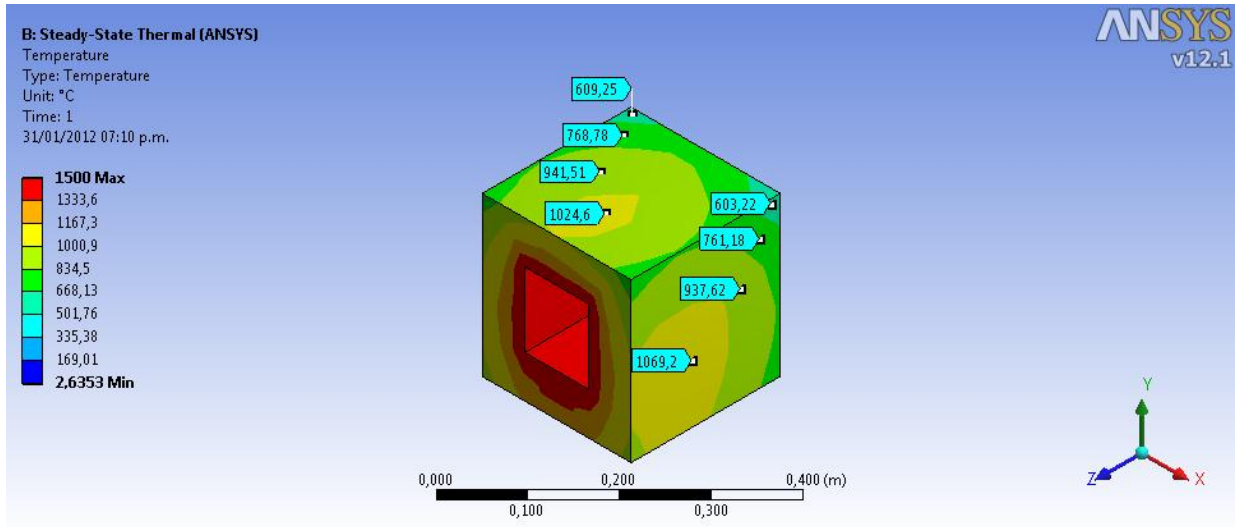
ANEXO 2. SIMULACION EN ANSYS

FIGURA: MALLA (SUPERIOR) Y CARGAS TERMICAS (INFERIOR) PARA ANALISIS TERMICO EN ESTADO ESTACIONARIO.



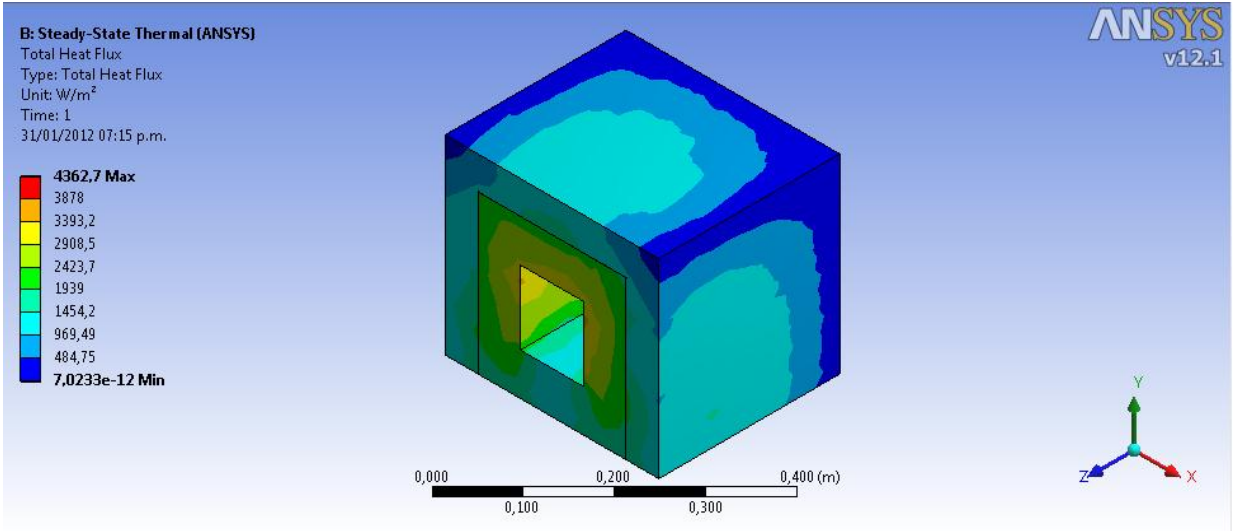
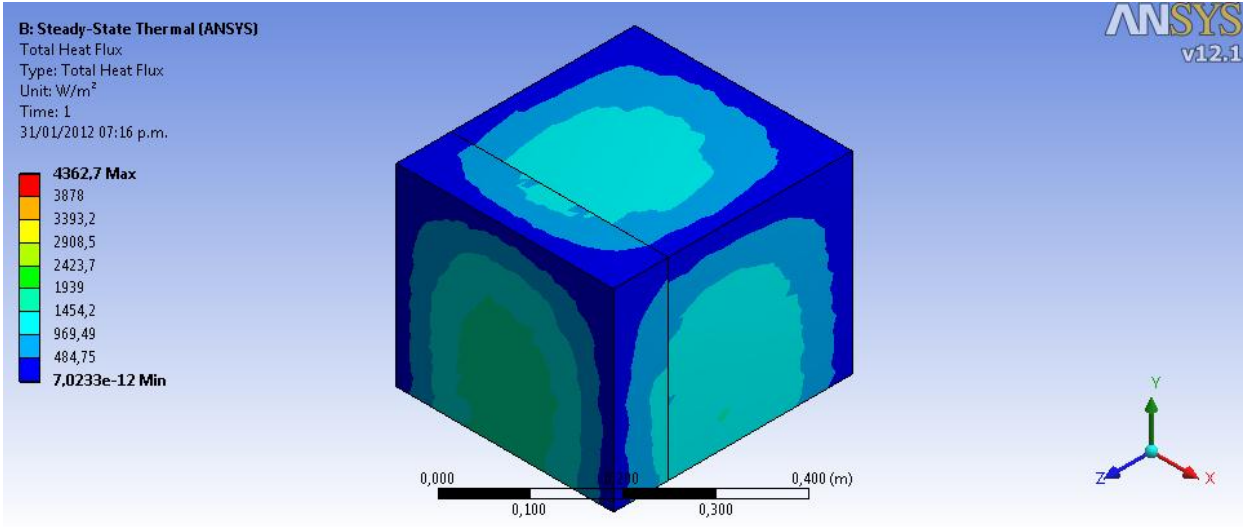
Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

FIGURA: DISTRIBUCION DE TEMPERATURA LADRILLO (SUPERIOR) Y KAOWOOL (INFERIOR) OBTENIDAS DEL ANALISIS TERMICO ESTADO ESTACIONARIO



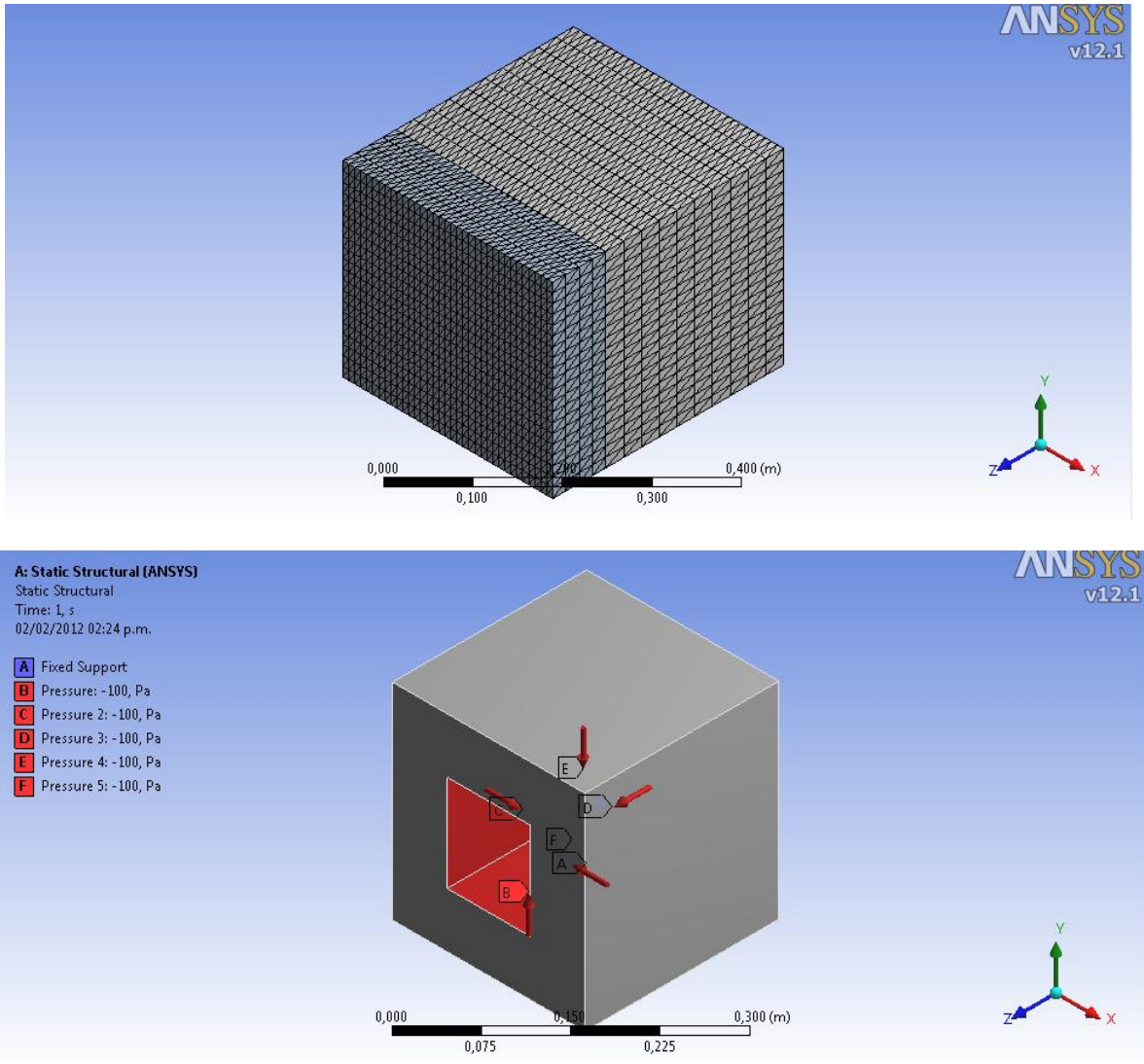
Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

FIGURA: FLUJO TOTAL A TRAVES DE LAS PAREDES DEL HORNO CON TAPA (SUPERIOR) Y SIN TAPA (INFERIOR) OBTENIDAS DEL ANALISIS TERMICO ESTADO ESTACIONARIO



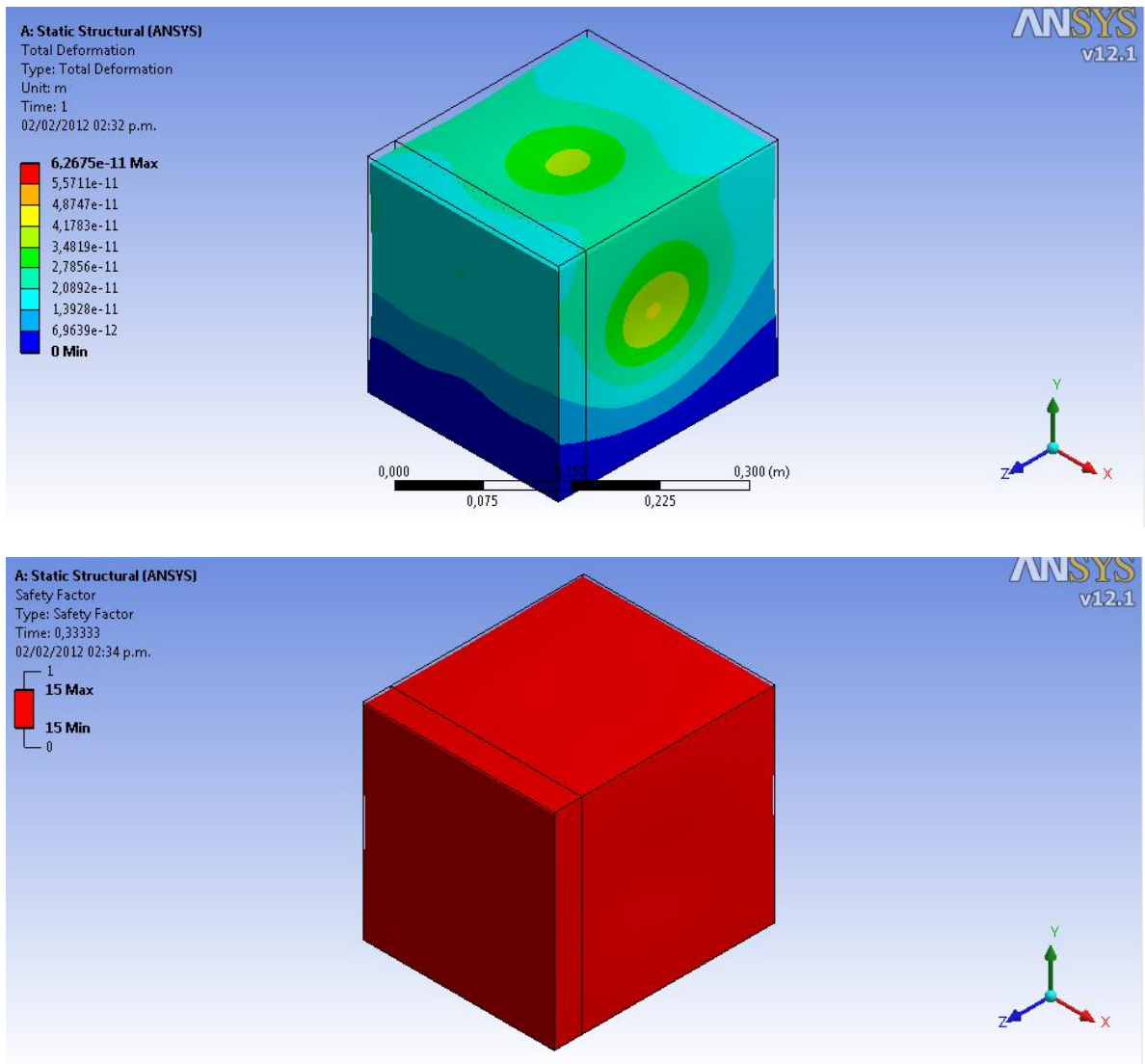
Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

FIGURA: MALLA (SUPERIOR) Y CARGAS (INFERIOR) PARA EL ANALISIS ESTRUCTURAL.



Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

FIGURA: DEFORMACION MAXIMA (SUPERIOR) Y FACTOR DE SEGURIDAD (INFERIOR) OBTENIDO EN EL ANALISIS ESTRUCTURAL.



Balseiro Jeanmadelen, Quintero Yamile.

ANEXO 3. PROPIEDADES DE MATERIALES

KAOWOOL

Blanket Products

Product Information

Physical Properties	Kaowool
Color	white
Density, pcf (<i>kg/m³</i>)	3, 4, 6, 8, 10, 12 (48, 64, 96, 128, 192)
Thickness, in. (<i>mm</i>)	½ - 1 (3.125-50)
Continuous use limit, °F (°C)	2000 (1093)
Classification temp. rating, °F (°C)	2300 (1260)
Melting point, °F(°C)	3200 (1760)

Chemical Analysis, Nominal %

Alumina, Al ₂ O ₃	45
Silica, SiO ₂	50 - 55
Ferric oxide, Fe ₂ O ₃	1.0
Titanium oxide, TiO ₂	1.7
Calcium oxide, CaO	0.1
Magnesium oxide, MgO	trace
Alkalies as, Na ₂ O	0.2
Boron Oxide, B ₂ O ₃	0.08
Chromium Oxide, Cr ₂ O ₃	–
Zirconia	–
Other	–
Leachable chlorides	1 - 2

Thermal Conductivity, BTU•in./hr•ft²•°F (w/mK) (ASTM C 201)

Mean temperature, 8pcf	
@ 500°F (260°C)	0.44 (0.06)
@ 1000°F (538°C)	0.87 (0.12)
@ 1500°F (816°C)	1.45 (0.21)
@ 1800°F (982°C)	1.83 (0.26)
@ 2000°F (1093°C)	2.09 (0.30)
Mean temperature, 6pcf	
@ 500°F (260°C)	0.47 (0.07)
@ 1000°F (538°C)	1.01 (0.15)
@ 1500°F (816°C)	1.73 (0.25)
@ 1800°F (982°C)	2.19 (0.32)
@ 2000°F (1093°C)	–
Mean temperature, 4 pcf	
@ 500°F (260°C)	0.54 (0.08)
@ 1000°F (538°C)	1.29 (0.19)
@ 1500°F (816°C)	2.30 (0.33)
@ 1800°F (982°C)	2.96 (0.43)
@ 2000°F (1093°C)	–

LADRILLOS REFRACTARIOS

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

		JM 23	JM 26
• Clasificación ISO 2245		125 0.5L	140 0.8L
• Temperatura de clasificación	°C	1260	1430

Características a temperatura ambiente (23°C/50% humedad relativa)

• Densidad media (ASTM C-134-84)	kg/m ³	480	800
• Módulo de rotura (ASTM C-93-84)	MPa	1.0	1.5
• Resistencia a la compresión (ASTM C-93-84)	MPa	1.2	1.6

Prestaciones a alta temperatura

• Contracción lineal permanente inmerso durante 24 h a la temperatura de (ASTM C-210)			
1230°C	%	0.2	-
1400°C	%	-	0.1
1510°C	%	-	-
1620°C	%	-	-
1730°C	%	-	-
• Expansión lineal reversible máxima	%	0.5	0.7
• Resistencia a la compresión en caliente durante 90 min (% de deformación) (ASTM C-16)			
1100°C at 0.034 MPa (5psi)	%	0.1	-
1260°C at 0.069 MPa (10psi)	%	-	0.2
1320°C at 0.069 MPa (10psi)	%	-	-
1370°C at 0.069 MPa (10psi)	%	-	-
• Conductividad térmica (ASTM C-182) a la temperatura media de:			
400°C	W/m.K	0.12	0.25
600°C	W/m.K	0.14	0.27
800°C	W/m.K	0.17	0.30
1000°C	W/m.K	0.19	0.33
1200°C	W/m.K	-	0.35
1400°C	W/m.K	-	-
• Calor específico 1000°C	kJ/kg.K	1.05	1.10
• Composición química (sobre producto calcinado) (tr = trazas)			
Al ₂ O ₃	%	37.0	58.0
SiO ₂	%	44.4	39.1
Fe ₂ O ₃	%	0.7	0.7
TiO ₂	%	1.2	0.1
CaO	%	15.2	0.1
MgO	%	0.3	0.2
Na ₂ O + K ₂ O	%	1.1	1.7

ANEXO 4. TROUBLESHOOTING
Guía rápida para la solución de problemas

En la siguiente tabla se muestra una guía rápida para la solución de problemas generales que puede presentar el equipo.

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCION
No hay registro de aumento en la tempera de la recámara	Problemas con la alimentación	Revisar conexiones y la fuente de alimentación.
	Las resistencias están quemadas	Reemplazar elementos dañados
	La termocupla presenta discontinuidad	Reemplazar sensor.
	Falla en el interruptor independiente (energiza las resistencias) de energía.	Reemplazar interruptor
La recámara no alcanza la temperatura deseada.	Alguna resistencia esta quemada.	Reemplazar elemento dañado
	Falla en el controlador.	Revisar parámetros en el controlador.
La temperatura de la recámara excede la temperatura requerida	La carga o material a ser calentado se encuentra en contacto con la termocupla	Asegúrese de que la carga se encuentre distante de la termocupla
	Contactador magnético o relé de estado sólido defectuoso	Reemplazar elemento defectuoso
	Falla en el controlador	Revisar parámetros en el controlador
Error en la lectura de la temperatura en el controlador	Termocupla defectuosa	Reemplazar elemento
	La termocupla no está correctamente conectada al controlador	Asegurarse que la termocupla esté conectada correctamente
	Los cables o las conexiones de la termocupla están quemado	Cambiar elementos dañados

