

DISEÑO, CONSTRUCCION Y ANALISIS DE 4  
HORNOS DE ALIMENTACION MANUAL  
PARA EL RELEVADO DE ESFUERZOS EN  
RESORTES

# TESIS



QUE PARA OBTENER EL GRADO  
ACADEMICO DE

004221

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGIA  
EN LA ESPECIALIDAD DE

**DISEÑO MECANICO**

PRESENTA

**ING. JOSE LUIS SANCHEZ GAYTAN**

QUERETARO, QRO. OCTUBRE 2000.



CIENCIA Y TECNOLOGIA

*[Handwritten signatures and marks in blue ink, including a large signature on the right and several smaller ones at the bottom.]*

HAGO PATENTE MI AGRADECIMIENTO Y RECONOCIMIENTO AL **SISTEMA DE INVESTIGACION MIGUEL HIDALGO (SIHGO)**, **DEL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA (CONACYT)** POR LA CONFIANZA BRINDADA PARA APOYAR A LAS MICROEMPRESAS PARTICIPANTES EN LA REALIZACION DE ESTE PROYECTO DE TESIS.

ADEMAS MI AGRADECIMIENTO Y RECONOCIMIENTO AL **ING. ANGEL RAMIREZ VAZQUEZ** DIRECTOR GENERAL DEL **CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL**, POR EL APOYO EN TIEMPO Y PERSONAL HUMANO, QUE ME FUE PROPORCIONADO DURANTE EL DESARROLLO DE ESTE PROYECTO DE TESIS.

## AGRADECIMIENTOS

Toda investigación llevada a cabo para desarrollar tecnología propia con el fin de crear equipo y maquinaria para nuestro propio progreso, es una tarea lenta y con un sin número de dificultades, por tal razón quiero hacer patente mi gratitud a todas aquellas personas que me ayudaron en la realización de este trabajo, por mencionar algunas tenemos:

Los ingenieros:

**Luis del Llano Vizcaya, Alfredo Manzo Preciado, Jesús Andrade, Manolo Andrade, Rodolfo Coria Silva, Joel AVECILLA Martínez, Horacio de Labra, Gustavo Martínez, Manuel Andrade, Carlos Tovar, Niels Giovani, Eduardo Hernández Gómez, Miguel Gruniert, y Juan Manuel Rodríguez Rodríguez**, por sus sugerencias y recomendaciones en los momentos críticos del desarrollo de esta tesis.

Además quiero agradecer en particular a los Doctores:

**Dr. en Térmica Armando Gallegos Muñoz, Director Académico del Proyecto, al Dr. en Ciencias Carlos Rubio González asesor en Elemento Finito y en el Software de ANSYS, al Dr. en Materiales Oscar Barcénas Sánchez asesor en materiales refractarios, al Dr. en Térmica Alejandro Zaleta, asesor en térmica y al Dr. en Metalurgia Guillermo Rodríguez Vilomara Director del Proyecto ante el SIHGO.**

**Al Maestro en Ingeniería Alfredo Manzo Preciado asesor en Diseño del Horno, y al Contador Público Genaro Hernández Tutor en Planta por parte de la empresa Industrial de Resortes S.A. de C.V.**

Todos nuestros logros presentes y futuros se los debemos a las personas que se esforzaron para que yo adquiriera los conocimientos necesarios para mi formación, es por esto que deseo hacer ni mayor reconocimiento a nuestros profesores, parientes y amigos pero principalmente a quienes debo lo que soy y seré.

Todo esfuerzo llevado a cabo para lograr un fin determinado muestra la decisión y el carácter de las personas involucradas. Unificando esfuerzos podemos llevar a la realización proyectos que parecen imposibles de realizar.

*A mi madre*

*Catalina Gaytán Osio*

**A quien debo lo que soy**

*A mis hermanos*

*Javier, Raquel, Salvador, Rosa María, Enrique y Fermín*

**Por estar siempre a mi lado cuando lo he necesitado**

**A los Doctores**

*Dr. Armando Gallegos Muñoz, Dr. Carlos Rubio González y Dr. Oscar Barceñas Sánchez*

**Gracias a su valiosa ayuda y conocimientos fue posible la realización y culminación de este proyecto.**

**A mi futura esposa**

*Srita. Sandra Zárate García*

**Gracias por su comprensión, amor incondicional y ser el pilar fundamental para seguir adelante.**

## CONTENIDO

**RESUMEN**

**INTRODUCCIÓN**

**JUSTIFICACIÓN**

**NOMENCLATURA**

### **CAPITULO 1 DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS HORNOS**

<b>1.1 Antecedentes</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Definición de un horno</b>	<b>1</b>
<b>1.3 Elementos que componen un horno</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Clasificación de los hornos según su fuente de calor</b>	<b>2</b>
<b>1.4.1 Horno de Combustión</b>	<b>3</b>
<b>1.4.2 Hornos eléctricos</b>	<b>3</b>
1.4.2.1 Hornos de resistencias metálicas	4
1.4.2.2 Hornos de resistencias no metálicas	5
1.4.2.3 Hornos de Arco	5
1.4.2.4 Hornos de Inducción	6
1.4.2.5 Hornos con circulación de aire caliente	6
<b>1.4.3 Hornos Nucleares</b>	<b>6</b>
<b>1.4.4 Hornos Solares</b>	<b>7</b>

<b>1.5 Utilización de los hornos</b>	<b>7</b>
<b>1.6 Hornos usados en tratamientos térmicos</b>	<b>8</b>

## **CAPITULO 2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

<b>2.1 Proceso de relevado de Esfuerzos</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Descripción del problema</b>	<b>13</b>
<b>2.3 Diseño conceptual</b>	<b>15</b>
<b>2.3.1 Lamina de acero inoxidable cal. 20</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2 Del aislante</b>	<b>19</b>
2.3.2.1 Fibra de Vidrio	21
2.3.2.2 Lana Mineral	22
2.3.2.3 Cerámicos	22
2.3.2.4 Fibra Cerámica Kaowool	23
2.3.2.5 Colcha de fibra cerámica Alumina-Sílice	23
<b>2.4 Estructura del horno</b>	<b>26</b>
<b>2.5 Dibujo de Conjunto</b>	<b>28</b>
<b>2.6 Selección del Aislante</b>	<b>29</b>
<b>2.7 Características técnicas del horno</b>	<b>32</b>

## **CAPITULO 3 ANALISIS TERMICO DEL HORNO**

<b>3.1 Balance de energía</b>	<b>35</b>
<b>3.2 Determinación de la temperatura de la pared interna del horno.</b>	<b>36</b>
<b>3.3 Determinación de los Coeficientes de Transferencia de Calor Convectivos en las paredes interior y exterior del horno por Convección Natural</b>	<b>40</b>
<b>3.4 Determinación de los Coeficientes de Transferencia de Calor Convectivos en las paredes interior y exterior del horno por Convección Forzada</b>	<b>44</b>
<b>3.5 Determinación del flujo de calor (Q) que disipa el horno al exterior por convección, esto cuando el ventilador esta en funcionamiento</b>	<b>48</b>

<b>3.6 Determinación del flujo de calor (Q) que disipa el horno al exterior a través de las paredes por Conducción</b>	<b>50</b>
<b>3.7 Determinación de la cantidad de calor (Q) que se disipa el horno al exterior a través de sus esquinas y hendiduras</b>	<b>51</b>
<b>3.8 Determinación del calor en el interior del horno</b>	<b>55</b>
<b>3.9 Selección de la resistencia</b>	<b>57</b>

## **CAPITULO 4 MODELACION MATEMATICA DEL HORNO**

<b>4.1 Conducción de Calor en Estado Estable</b>	<b>63</b>
<b>4.2 Método de Diferencias Finitas</b>	<b>63</b>
<b>4.3 Método de Elementos Finitos</b>	<b>65</b>
<b>4.4 Funciones de Forma</b>	<b>65</b>
<b>4.4.1 Ensamble y Solución</b>	<b>66</b>
<b>4.5 Formulación del MEF del problema de la Transferencia de Calor en el horno</b>	<b>67</b>
<b>4.6 Implementación del MEF</b>	<b>75</b>
<b>4.6.1 Aproximación Lineal</b>	<b>79</b>
<b>4.7 Verificación Numérica por Elemento Finito y ANSYS del Problema de Transferencia de Calor</b>	<b>80</b>
<b>4.8 Conducción de Calor en Estado Transitorio</b>	<b>85</b>

## **CAPITULO 5 CONSTRUCCION, ENSAMBLE Y PRUEBAS DEL HORNO**

<b>5.1 Descripción del proceso de fabricación</b>	<b>92</b>
<b>5.2 Pruebas</b>	<b>96</b>
<b>5.2.1 Pruebas de funcionamiento</b>	<b>96</b>
<b>5.2.2 Prueba en estado transitorio con carga</b>	<b>96</b>

<b>5.3 Determinación de la constante de proporcionalidad “K” del Resorte AN20</b>	<b>97</b>
<b>5.3.1 Resultados</b>	<b>98</b>
<b>5.4 Prueba de Dureza al resorte AN20 antes de ser tratado térmicamente</b>	<b>102</b>
<b>5.4.1 Resultados</b>	<b>103</b>
<b>5.5 Prueba de Dureza al resorte AN20 después de haber sido tratado térmicamente</b>	<b>104</b>
<b>5.5.1 Resultados</b>	<b>105</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>106</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>108</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>119</b>



## **RESUMEN**

En el presente documento se efectúa el diseño, construcción y análisis de un horno para el relevado de esfuerzos de resorte. El horno se incorpora en el proceso de manufactura de los resortes eliminando, mediante tratamiento térmico, los esfuerzos residuales generados en los resortes durante su formado.

En el diseño del presente horno se han incluido algunas innovaciones técnicas que contribuyen a mejorar su desempeño. Por ejemplo se ha incorporado una turbina (para generar el flujo de aire) y una placa deflectora (para orientarlo), lo que da como resultado una más rápida transferencia de calor.

Esto permite que los resortes alcancen la temperatura de relevado en tiempos menores que los observados en hornos convencionales.

Una completa caracterización del funcionamiento del horno se lleva a cabo empleando para ello resortes de prueba. Donde se ha observado que éstos presentan una textura homogénea y uniforme a lo largo de su longitud, disminuyendo los defectos de los mismos y aumentando su producción.

## **INTRODUCCION**

Las pequeñas y medianas empresas dedicadas a la fabricación de resortes en México, tienen la necesidad de construir hornos para el tratamiento térmico, con tecnología nacional, a un costo de adquisición bajo y mantenimiento mínimo, pero al mismo tiempo con calidad y una alta eficiencia energética.

Actualmente el tratamiento térmico para el relevado de esfuerzos se hace en base a conocimientos empíricos, encontrándose diferencias importantes en el tratamiento térmico para los mismos tipos de resortes, en diferentes empresas, variando substancialmente los costos.

Por lo tanto, es necesario conocer los parámetros del tratamiento térmico de resortes, por ejemplo: la temperatura máxima, el tiempo de exposición, la velocidad de enfriamiento, etc., que permita a los empresarios optimizar sus procesos y disminuir sus costos. Para poder conocer estos parámetros, dentro de una amplia gama de resortes, como podrían ser los de torsión, compresión y tensión, es necesario una gran labor de experimentación sistemática.

Con un horno de tamaño industrial sería difícil realizar la experimentación por sus dimensiones considerables que causarían un importante gasto de energía, por lo tanto se propone la construcción de un horno especial para esta labor; relativamente pequeño, con el que se pueda experimentar y definir los parámetros para el tratamiento térmico de resortes sin un costo excesivo.

En el presente trabajo de tesis se desarrolla el Diseño y Construcción de un Horno para el Relevado de Esfuerzos en Resortes, se presenta a continuación una breve reseña de los capítulos que comprende este documento.

En el Capítulo 1 se describen brevemente los diferentes tipos de hornos existentes en el mercado internacional como en el nacional a la fecha.

En el Capítulo 2 se presenta la definición del problema que tienen los empresarios respecto al relevado de esfuerzos de los resortes, además se describe el proceso del relevado de esfuerzos de los resortes, selección del tipo de horno y dibujo de conjunto.

De manera subsecuente, se habla de los diferentes tipos de aislantes térmicos que existen actualmente en el mercado nacional, y se realiza la selección del aislante requerido para el horno. También se describen las características generales del horno y sus aplicaciones generales.

En el capítulo 3 se describe la forma de como se determinaron las temperaturas de las paredes tanto en el interior como en el exterior, el cálculo de los coeficientes de convección tanto interno y externo para una convección forzada y natural. Además se describe la manera de cómo fue realizado el cálculo de la selección de las resistencias que han de proporcionar el calor dentro de la cámara del horno.

El Capítulo 4 se da una breve introducción de los diferentes tipos de soluciones numéricas que existen, pero en la cual se basó el análisis es en la numérica del elemento finito, posteriormente se realizó el mismo problema que el capítulo 3 pero ahora con elementos finitos. Posteriormente se realiza una modelación y simulación matemática en estado estable y transitorio de la pared que compone el horno, dicho análisis se realiza en el paquete comercial de ANSYS, el cual servirá como un soporte para respaldar el análisis analítico realizado en el capítulo 3.

En el Capítulo 5 se presenta una breve descripción de la forma de como se fue construyendo el horno, también se enuncian algunas de las pruebas que se le realizaron, las cuales sirvieron para observar el comportamiento del horno, las cuales fueron en estado estable y en estado transitorio; dicho análisis se realizó desde la temperatura inicial hasta su temperatura de trabajo. También se realizaron 2 pruebas al resorte AN20 las cuales fueron para determinar la constante de proporcionalidad del mismo, después de haber sido tratado térmicamente. Y la otra fue para determinar su dureza antes y después de haber sido tratado térmicamente.

Además se describen las conclusiones a las que se llegó después de haber concluido el trabajo de construcción del horno.

## **JUSTIFICACION**

La necesidad de desarrollar una tecnología que nos permita utilizar equipos que impulsen la planta productiva del país, es lo que nos lleva al desarrollo de esta tesis.

Se encamina principalmente a obtener un procedimiento de cálculo para diseñar un horno para el relevado de esfuerzos en resortes, que cumpla con los requerimientos de los pequeños empresarios fabricante de resortes.

Se tomaron en cuenta factores técnico-económicos, así como también los factores analíticos que lo benefician, como puede ser la decisión del espacio; el horno ocupará un espacio que podrá ser un poco menor que el construido en otros países, debido a la calidad de materiales como la lámina de acero, aislantes y materiales refractarios; al final la capacidad del horno deberá ser equivalente a los hornos fabricados en el exterior, para que pueda sustituir con ventajas económicas la importación de éstos.

Este proyecto se enfoca directamente al diseño y la construcción de un horno de capacidad pequeña del orden de 20 kg. de material, que puede ser usado en las empresas, escuelas o laboratorios pequeños.

Actualmente, es muy difícil la importación de un horno que cumpla con las necesidades de un pequeño empresario, ya que un equipo de estas características tiene un precio alto, el cual es muy difícil que pueda ser pagar éste. Por lo que se busca desarrollar las bases para diseñar y construir un equipo eficiente, seguro, de bajo costo y por tanto, al alcance de usuarios con poder adquisitivo limitado.

El resultado proporcionará una tecnología propia para aplicarla al desarrollo de este tipo de hornos.

## NOMENCLATURA

A	Area perpendicular al flujo de calor, $m^2$
$c_p$	Calor específico del material (fibra cerámica), $J/kg \cdot K$
$\cos\theta$	Factor de potencia y el cual lo considero igual a 1.
$\Delta T$	Diferencia de temperatura, $^{\circ}K$
dt	Diferencia de la temperaturas entre el interior del horno y la temperatura a la cual entran los resortes, $^{\circ}K$
$e_1$	Espesor de la pared del aislante, m
$e_2$	Espesor de la pared de acero, m
g	Aceleración de la gravedad, $9.81 \text{ m/seg}^2$
Gr	Número de Grashof
h	Coefficiente de transferencia de calor, $W/m^2 \cdot K$
$h_1$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo en el interior del horno, $W/m^2 \cdot K$
$h_2$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo en el exterior del horno, $W/m^2 \cdot K$
$h_{prom}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo promedio en la parte exterior del horno, $W/m^2 \cdot K$
$I_L$	Corriente de Línea, Ampers
$k_a$	Conductividad térmica del aire, $W/m \cdot K$
$k_1$	Conductividad térmica de la fibra cerámica, $W/m \cdot K$
$k_2$	Conductividad térmica de la lámina de acero, $W/m \cdot K$
L	Longitud vertical de la pared, m

$m$	Cantidad de materia que debe ser calentada por unidad de tiempo, kg/s
$Nu$	Número de Nusselt
$Pr$	Número de Prandtl
$P_t$	Potencia total, W
$Q$	Flujo de Calor a través de la pared, Watts
$Q_{pzas}$	Calor que absorben las piezas, W
$Q_t$	Flujo de calor total a través de la pared, Watts
$Ra$	Número de Rayleigh
$Re$	Número de Reynolds
$R_{tot}$	Resistencia que opone la pared al paso del calor, °K/Watts
$St$	Factor de forma total, m
$Sw_t$	Es el factor de forma total para una pared, m
$Se_t$	Es el factor de forma total para una orilla, m
$Sc_t$	Factor de forma total para una esquina, m
$T_0$	Temperatura ambiente del aire exterior, °K
$T_1$	Temperatura de la pared interior, °K
$T_2$	Temperatura de en la interface fibra cerámica- acero, °K
$T_3$	Temperatura de la pared exterior, °K
$T_4$	Temperatura ambiente del aire interior, °K
$T_f$	Temperatura de película, °K
$t$	Tiempo, seg.
$V_t$	Velocidad del aire a la salida del ventilador, m/seg
$V_L$	Voltaje de Línea, Volts

$V$	Volumen $m^3$
$\dot{v}$	Gasto en Volumen $m^3/\text{seg}$

### **SIMBOLOS GRIEGOS**

$\beta$	Coefficiente de expansión térmica, $1 / ^\circ K$
$\mu$	Viscosidad Dinámica, $kg/ m \text{ seg}$
$\nu$	Viscosidad Cinemática, $m^2/\text{seg}$
$\rho$	Densidad del aire, $kg/m^3$

# **- CAPITULO 1-**

## **DESCRIPCION Y CLASIFICACION DE LOS HORNOS**

### **1.1 Antecedentes**

Las aplicaciones comerciales más importantes de la transferencia del calor radiante, se encuentran en el cálculo y diseño de calderas, generadoras de vapor y hornos usados en múltiples procesos industriales. Ya que el arte de la construcción de estas unidades se desarrolló antes que la teoría, el cálculo de la transferencia de calor radiante en hornos evolucionó a partir de métodos empíricos. La contribución de varios investigadores a la resolución de problemas de transferencia de calor radiante, tanto en tipo específico, como general, especialmente aquellas de H. C. Hootec, [1], han hecho posible que el diseño de los hornos se hagan en función a bases bien fundamentadas.

La principal dificultad a la que se enfrentó el hombre durante largo tiempo, en lo referente a los hornos, fue a la de conseguir y controlar la temperatura necesaria para la fusión de los aceros.

Las temperaturas para el presente proyecto fluctúan alrededor de 25 °C en el exterior hasta los 540 °C en el interior del horno, donde se puede observar que las temperaturas no son muy elevadas pero es muy importante considerar el tiempo que tarda en llegar a su temperatura de trabajo, cómo conservar la estabilidad de la temperatura requerida por el proceso dentro de la cámara del horno.

### **1.2 Definición de un horno**

La definición más sencilla y elemental de un horno es: Un dispositivo térmico cuya función principal es la de suministrar calor a una carga determinada con diferentes objetivos. Pero la definición técnica que nos ocupa se puede expresar de la siguiente manera:



*“Un horno, es un aparato que genera calor con el fin de calentar una materia que se introduce en su interior y que ha de sufrir alguna transformación física o química”.*

### **1.3 Elementos que componen un horno**

1.- La carga térmica.- Se le conoce así al producto que durante el proceso que realiza el horno, recibe la cantidad de calor especificada.

2.- Régimen térmico.- Aquí, se analiza la forma en la que se realiza la transferencia de calor durante el proceso que realiza el equipo.

3.- Calefacción.- Componente que se refiere a la forma en que se produce el calor requerido para el proceso, también es denominado fuente generadora de calor.

4.- Cámara de calentamiento.- Es el lugar o recinto en donde se realiza la transferencia de calor de la calefacción a la carga térmica.

### **1.4 Clasificación de los hornos según su fuente de calor**

Los hornos desempeñan un papel muy importante en la industria, ya que la mayoría de las reacciones químicas que afectan a los principales procesos industriales se desarrollan con absorción de calor. La fuente suministradora de energía calorífica es el calor desprendido en la oxidación de un combustible o en la circulación de corriente eléctrica a través de resistencias o de la masa que debe calentarse. Ultimamente también se han desplegado esfuerzos científicos y técnicos para utilizar la energía nuclear y solar con fines de calentamiento. Por consiguiente, según la fuente suministradora de calor y el procedimiento de su aplicación, los hornos pueden clasificarse en las cuatro categorías siguientes:

\* *Combustión*

\* *Eléctricos*

\* *Nucleares*

\* *Solares*

Siguiendo el orden de su importancia comercial e industrial.

### 1.4.1 Hornos de Combustión

Estos hornos emplean combustibles sólidos (carbón vegetal, madera, hulla, coque, antracita, etc.), *liquidos* (butano, gasolina, gasoil, fuel-oil, etc.) o gaseosos (gas natural, gas de agua, gas de aire, etc.).

El calor procede de la energía desprendida en la reacción con el oxígeno (comburente) de los elementos combustibles: carbono, hidrógeno y azufre. En general el calor desprendido en la última de las reacciones no se considera ya desprendible frente a los otros dos. Una clasificación bastante extendida para distinguir la gran variedad de hornos de combustión se basa en el tipo de combustible usado para obtener el calentamiento; sin embargo parece más racional una subdivisión de los hornos, según las modalidades de producción del calor y de su transmisión a las sustancias que reaccionan, en los tres grupos siguientes:

- *Horno de calentamiento directo*
- *Alto Horno*
- *Hornos de calentamiento indirecto.*

### 1.4.2 Hornos Eléctricos

Existe gran variedad de tipos de hornos eléctricos, como existe una gran variedad en otros tipos de calentamiento.

1.- Hornos de solera con resistencias metálicas.

- a) Hornos de resistencias metálicas exteriores al crisol.
- b) Hornos con resistencias metálicas sumergibles en el crisol (éstos están destinados a baños que trabajen bajas temperaturas: 500°C máximo).

2.- Hornos con resistencias no metálicas.

- a) Hornos con electrodos, sumergidos en el crisol, haciendo la sal de resistencia.

### 1.4.2.1 Las resistencias metálicas

Existen aleaciones numerosas para tal finalidad, como se muestra en tabla 1.1, siguiente, la cual indica las más utilizadas:

**Tabla 1.1 Diferentes resistencias metálicas comerciales y sus temperaturas máximas de operación [3].**

Denominación	Porcentaje en			Temperatura máxima °C
	Ni	Cr	Fe	
Nicrom	80	20	--	1150
Tophet-A	60	15	25	1150
Colido	65	12	23	1000
Kanthal-A	--	23	69	1250- 1300

Debemos considerar un punto muy importante: las temperaturas máximas de trabajo indicadas por cada fabricante de resistencias, no deberán ser confundidas con las temperaturas reinantes en el horno; ejemplo; supongamos un horno donde la temperatura indicada es de 1000° C. Las resistencias seleccionadas para lograr los 1000°C en el horno tendrán una temperatura máxima de operación muy superior, en la mayoría de los casos hasta de 1200°C o más.

Los constructores de hornos tienen la precaución de elegir la forma de la resistencia, la manera de suspenderla, las posibilidades máximas de radiación de la resistencia, la resistencia para evitar los sobrecalentamientos locales y también la carga específica en W por m<sup>2</sup>.

La atmósfera reinante dentro del horno y sus condiciones de utilización, tienen una gran influencia en la duración de las resistencias. En hornos donde se requieren altas temperaturas, no es recomendable resistencias en forma de hilo espiral, sea cual fuere su aleación, si deben ser soportadas en toda su longitud. Esta disposición disminuye la radiación del elemento calefactor, creando, además a menudo, sobrecalentamientos localizados,

formando por la oxidación y el refractario del soporte, un nudo fusible que origina la rotura de la resistencia.

La tendencia actual es la de aplicar para este tipo de hornos, tubos radiantes, donde los elementos calefactores no sufren alteración alguna, estando totalmente protegidas de los efectos que puedan originar las atmósferas reinantes dentro del horno. Otra ventaja de este sistema es la de poderse intercambiar cualquier tubo, en muy poco tiempo.

#### *1.4.2.2 Hornos de resistencia no metálicas*

La carga de estos hornos recibe indirectamente el calor producido por el paso de la corriente eléctrica a través de una resistencia metálica o no metálica. En el primer caso se emplean hilos o cintas de aleaciones metálicas enrolladas en espiral.

En el segundo el calentamiento se efectúa por medio de una resistencia de grafito colocada en la cámara de fusión del horno. Los hornos eléctricos de resistencia no metálica pueden clasificarse, según la disposición de la resistencia, en:

- *De crisol fijo u oscilante*
- *De reverbedero.*

#### *1.4.2.3 Hornos de arco.*

Estos hornos aprovechan el calor irradiado por el arco voltaico que salta entre dos electrodos conectados a un generador de corriente eléctrica. Se pueden distinguir los siguientes tipos:

- *De arco indirecto.*
- *De arco directo*

#### 1.4.2.4 Hornos de inducción.

En este tipo de hornos el calentamiento lo producen las corrientes inducidas, en la carga metálica, por una bobina con núcleo magnético o sin éste, alimentada por una corriente eléctrica alterna. Según la frecuencia de la corriente que alimenta el horno se distinguen los dos tipos de hornos siguientes:

- *Hornos de inducción para baja frecuencia.*
- *Hornos de inducción para alta frecuencia*

#### 1.4.2.5 Hornos con circulación de aire caliente

Estos hornos, realizan con gran precisión, calentamientos comprendidos entre los 100 y 650°C. La circulación del aire es provocada por una turbina adaptada en la tapa de cierre o bien en el fondo de la cámara.

La regularidad de la temperatura en toda la masa de piezas a tratar térmicamente; donde son colocadas en paneles adecuados depende en gran parte de la velocidad del paso del aire caliente. Una velocidad débil da como resultados una regularidad menor de temperaturas. Una convección forzada adecuada, garantiza una completa homogeneidad de temperaturas en toda la carga. Estos hornos, se utilizan entre otras cosas, para el tratamiento de aleaciones ligeras y para revenidos de los diversos aceros. La introducción de una atmósfera protectora, permite revenidos a elevadas temperaturas sin oxidación.

### 1. 4.3 Hornos Nucleares

El funcionamiento de estos hornos está basado en el calor desprendido en el proceso de fisión del átomo, es decir, en la desintegración nuclear de los elementos pesados (uranio y plutonio) por el bombardeo con neutrones.

Los hornos nucleares son de constitución muy parecida a los reactores nucleares, desarrollándose la fisión en forma de reacción en cadena, de modo que una vez iniciado el proceso por medio de una fuente exterior de neutrones se mantiene indefinidamente a causa de los neutrones que se producen durante la fisión.

### ***1.4.4 Hornos Solares***

Estos hornos están constituidos por un conjunto de superficies metálicas o de vidrio que reflejan los rayos solares y concentran el calor en un punto (foco) o línea imaginaria (línea focal). Los hornos solares permiten alcanzar temperaturas de hasta  $6000^{\circ}\text{C}$ , que se utilizan con fines experimentales (resistencia de materiales al calor, fisión de metales, etc.). Se han construido hornos solares en Egipto, China, EE.UU., Francia e Inglaterra.

### ***1.5 Utilización de los Hornos.***

Cada tipo de horno se utiliza en determinadas técnicas según sus particulares características de funcionamiento y rendimiento. En siderurgia se emplea el alto horno, para la obtención de la fundición, a partir de la cual se produce el acero.

En la obtención del cemento se emplean hornos rotatorios, formados por un gran tubo giratorio de hasta 100 m de longitud y 2 a 3 m de diámetro, revestido totalmente por material refractario y con una ligera inclinación respecto a la horizontal. El material que se debe cocer (cemento bruto) se introduce por la boca superior, y por efecto de la rotación del tubo desciende hacia la boca inferior, en donde se encuentra el quemador.

Otro tipo de hornos son los hornos continuos empleados en la industria cerámica para la fabricación de ladrillos. Estos hornos están constituidos por una ancha galería recorrida por rieles sobre los que discurren vagonetas cargadas con el material a cocer. El fuego se activa desde un extremo de la galería, y los gases salientes atraviesan los ladrillos a contracorriente, obteniéndose así el calentamiento necesario. Los hornos descritos convenientemente adaptados, se emplean también en otras industrias (tales como la de los metales no ferrosos, vidrio, cal, panificación) y en diversos usos.

## ***1.6 Hornos usados en los tratamientos térmicos***

El gas y la electricidad son agentes calefactores que permiten que el calor sea más preciso en los hornos de tratamiento térmico y, consecuentemente, son los más usados. Los hornos de gas pueden ser de tipo de fuego directo, en el cual los productos de la combustión entran a la cámara de calentamiento. Alternativamente pueden ser de combustión indirecta de manera que la cámara del horno quede aislada de los productos de la combustión. Naturalmente, este tipo de horno habrá de tener una eficiencia de combustión menor; pero en cambio, se evitarán reacciones inconvenientes en la superficie de la carga y los productos de la combustión.

Un tercer tipo de horno calentado por gas, es el de tubo radiante en el cual un gas en combustión dentro de tubos metálicos, que se proyectan dentro de la cámara de calentamiento, y que constituyen la fuente de calor radiante. Igual que en los hornos calentados indirectamente, la carga se encuentra aislada de los productos de la combustión.

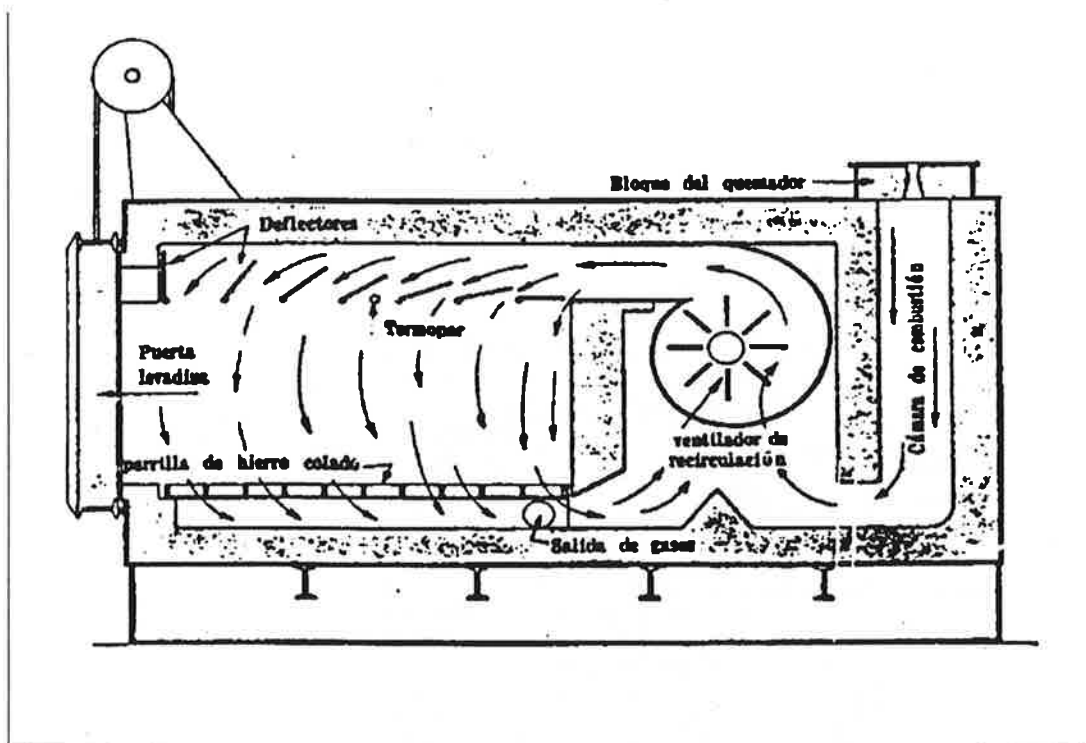
Los hornos eléctricos son generalmente del tipo de resistencia, en los cuales se genera el calor por una corriente que pasa a través de un conductor de alta resistencia, construido generalmente de metal o de carburo de silicio.

Los hornos de tipo intermitente de alto rendimiento son del tipo horizontal, es decir se cargan horizontalmente a través de una puerta que se encuentra a un extremo de la cámara de calentamiento. Estos hornos que son calentados por gas o electricidad, varían en tamaño desde unidades pequeñas, utilizados para varios procesos de recocido, normalización, endurecimiento y revenido, sobre la base de producción a gran escala.

Algunos hornos intermitentes horizontales, como se muestra en la Figura 1.1 diseñados para ser usados con una atmósfera protectora, están provistos de una cámara de enfriamiento en el extremo más alejado a la puerta de carga. Cuando el periodo de tratamiento térmico se ha terminado, la carga, contenida en charolas adecuadas, se empuja a la cámara de enfriamiento de manera que puede enfriarse en una atmósfera no oxidante.

Los tratamientos térmicos más usados en los hornos son:

- Recocidos isotérmicos
- Normalizados
- Revenidos
- Temple
- Cementaciones



**Fig. 1.1 Horno intermitente con carga horizontal.**

Uno de los hornos más conocidos para el tratamiento térmico, del tipo vertical intermitente, es un horno pequeño calentado estrictamente con circulación de aire que se usa mucho para procesos de revenido a temperaturas hasta de  $700^{\circ}\text{C}$  (ver Figura 1.2). En este horno, la circulación de la atmósfera ayuda a la uniformidad del control preciso de la temperatura así como a la rápida transferencia de calor de elementos calefactores de níquel-cromo a la carga.



Los hornos verticales de gran tamaño, del tipo de *foso*, que generalmente se calientan eléctricamente, se usan para varios procesos de tratamiento térmico, hasta 1000°C. Los hornos verticales del tipo de campana se usan a veces cuando es necesario un estricto control de la atmósfera del horno.

En estos hornos la carga se coloca sobre una plataforma, y sobre ésta se encuentra una cubierta de acero resistente al calor. Luego, se hace circular una atmósfera protectora a través de la cubierta, antes de hacer descender la campana del calentador eléctrico sobre la unidad.

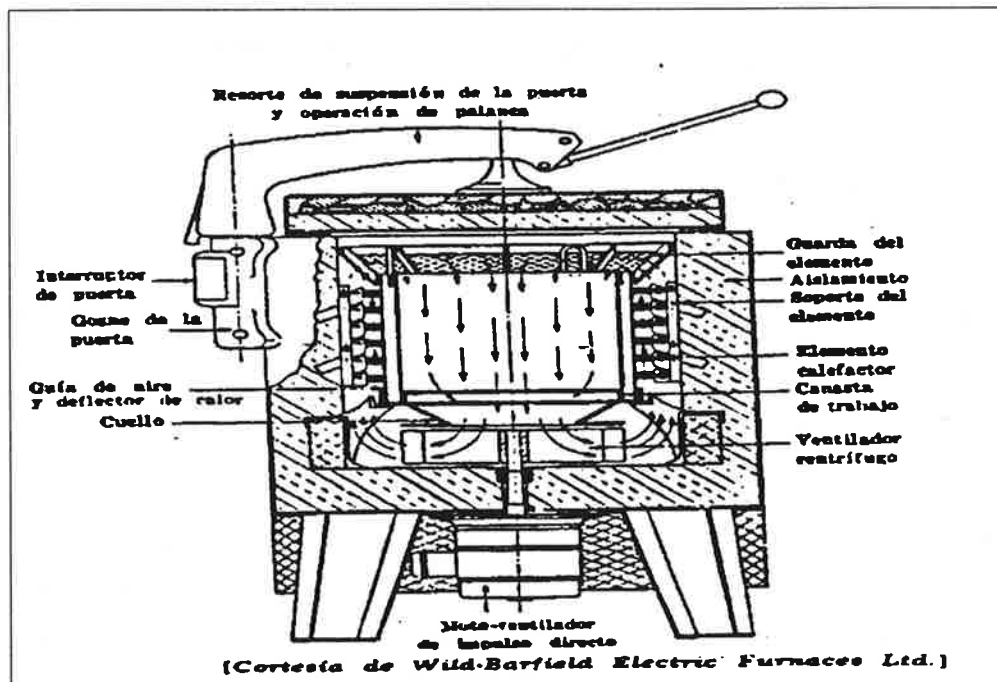


Fig. 1.2 Horno intermitente horizontal con resistencia eléctrica con ventilador de impulso directo con carga vertical.

En este capítulo se presentó una clasificación general de las diferentes clases de hornos que existen actualmente, haciendo más énfasis en los hornos eléctricos ya que el proyecto en desarrollo es el diseño y la construcción de un horno eléctrico para el relevado de esfuerzos en resortes.

En el capítulo siguiente, se describe el problema que tienen los empresarios que se dedican a la fabricación de resortes, se describe el proceso del relevado de esfuerzos. Además se describen los diferentes tipos de aislantes que existen actualmente en el mercado, y la selección del aislante requerido para el horno en cuestión. También se muestra la forma de sujeción de la turbina dentro de la cámara del horno así como un dibujo de conjunto de la forma como quedará el horno a fabricar. Se describe en este mismo capítulo las características técnicas del horno y sus aplicaciones generales.

## **- CAPITULO 2 -**

### **DESCRIPCION DEL PROYECTO**

El objetivo principal de este trabajo es el diseño del horno apropiado, así como también la definición en el tamaño y dispositivos secundarios que servirán para el funcionamiento del horno. Parte importante será la selección de los materiales que formarán el mismo.

Como se mencionó anteriormente, el establecimiento de todos los tipos de hornos industriales implicaría una serie de trabajos más amplios que el presente. Por lo que se puede diseñar, entonces un equipo de acuerdo a los requerimientos y características específicas del equipo que se requiere. Primeramente debemos de realizar un análisis del mismo, por lo que el problema será planteado de la siguiente manera:

#### **2.1 Proceso de relevado de esfuerzos**

Los esfuerzos residuales son los esfuerzos introducidos en el material durante su fabricación, los cuales en lugar de causar deformación del mismo, se conservan almacenados en su estructura.

Por lo cual para eliminar los esfuerzos residuales, sin reducir las propiedades mecánicas del material, se requiere aumentar la temperatura del material mediante un tratamiento térmico a una cierta temperatura, la cual se determina de acuerdo a las magnitudes físicas del resorte (longitud, diámetro y número de espiras).

Ya que es muy importante que se les de un tratamiento térmico a los resortes después de ser fabricados, dicho tratamiento ayuda al resorte a tener la flexibilidad de elongarse o contraerse cuando se le aplica una carga de tensión o de compresión, y regresar a su posición original, sin tener problema alguno en la aplicación de la carga.

## 2.2 Descripción del problema

Para poder ser competitivos en el ámbito industrial, se tienen que controlar variables especiales, como la calidad de la materia prima, la adquisición de equipo y maquinaria que permita brindar cada día mejor calidad en el producto terminado; capacitar y calificar la mano de obra, procurar la continuidad del proceso productivo, entre otras cosas.

En la actualidad un método de relevar los esfuerzos de los resortes es como se muestra en la figura 2.1, y 2.2 el cual se describe de la manera siguiente: Se comienzan a calentar de manera aleatoria los resortes con soplete, cuando el operador en base, a su experiencia considera que los resortes tienen la temperatura suficiente, los va separando del resto, y vuelve a tomar otros resortes y repite la operación. Como se observa, los resortes no reciben en ningún momento la misma cantidad de calor, el operador, pierde tiempo en el precalentado, lo cual provoca que no se pueda obtener un certificación de calidad.

Lo cual trae como consecuencia las siguientes desventajas del proceso actual:

- Falta de control de temperatura.
- El tiempo de calentamiento.
- Falta de control en el proceso del relevado de esfuerzos.
- La calidad en los resortes no es igual en todos ellos.
- Es muy pobre la producción que se genera con este método.



**Figura 2.1** Resortes que están siendo Relevados a fuego directo con un soplete.



**Figura 2.2 Persona encargada de realizar el Relevado de esfuerzos de resortes a fuego directo con soplete en la actualidad.**

Por lo que la descripción del problema es la siguiente:

*“Se desea diseñar un horno eléctrico para el relevado de esfuerzos en resortes; el rango de temperatura deberá comprender desde una temperatura ambiente de 26°C hasta una temperatura de alrededor de los 540°C dentro de la cámara del horno; las dimensiones del horno deberán ser tales que tenga una capacidad de 20 kilogramos de material en cada carga.*

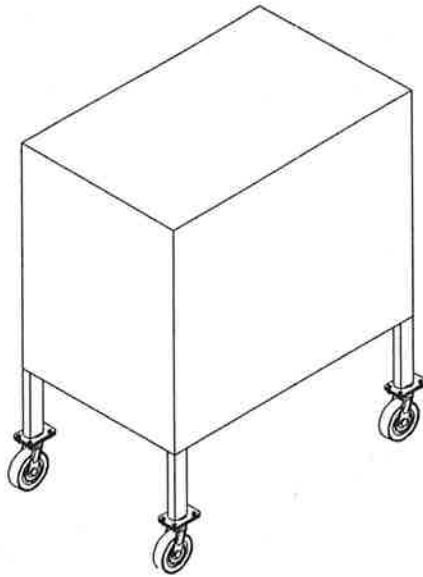
*Se requiere que dentro de la cámara de calentamiento del horno haya una diferencia de temperatura de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , por lo que requerimos de un control adecuado para mantener así esa condición, además de un aislante, que tenga la capacidad de mantener la placa exterior del horno a una temperatura inferior a los 70°C, cuando la temperatura de operación del horno esté alrededor de los 300°C”.*

### ***2.3 Diseño Conceptual***

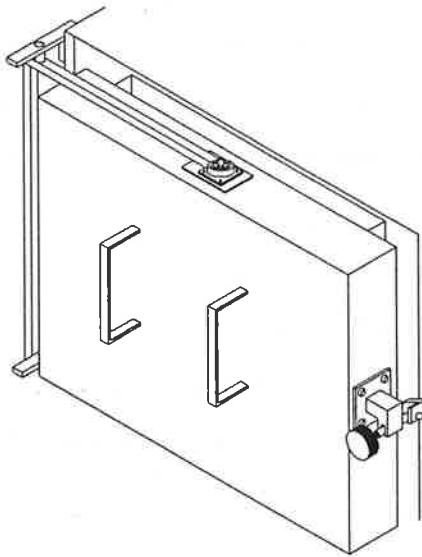
Primeramente se parte de las dimensiones de acuerdo a las necesidades de cada uno de los empresarios fabricantes de resortes. Ya que los diseños de algunos hornos existentes en el mercado son demasiados grandes para las necesidades de los pequeños empresarios; esto repercute en un valor económico excesivo para el mismo; por otro lado algunos hornos son demasiado pequeños, y no cubren sus necesidades de producción. Como podría ser la cantidad de material que ha de calentarse por hora, la temperatura a la cual los resortes ya están relevados, el tamaño de las piezas que han de calentarse, y de la cantidad de calor que pueda liberarse sin pérdidas excesivas para el horno.

Por lo cual, revisando la literatura de los diferentes fabricantes de hornos que existen en el mercado, [2], se seleccionó algunas partes de una cierta compañía fabricante de hornos, como se muestra en la Figura 2.3 y varias partes más de otras compañías, esto con el fin de desarrollar un horno el cual cumpla con la finalidad de satisfacer las necesidades del empresario, la Figura 2.4 muestra el diseño de la puerta, la cual fue sugerida por los empresarios para un mejor manejo a la hora de realizar el cambio de los resortes tratados térmicamente.

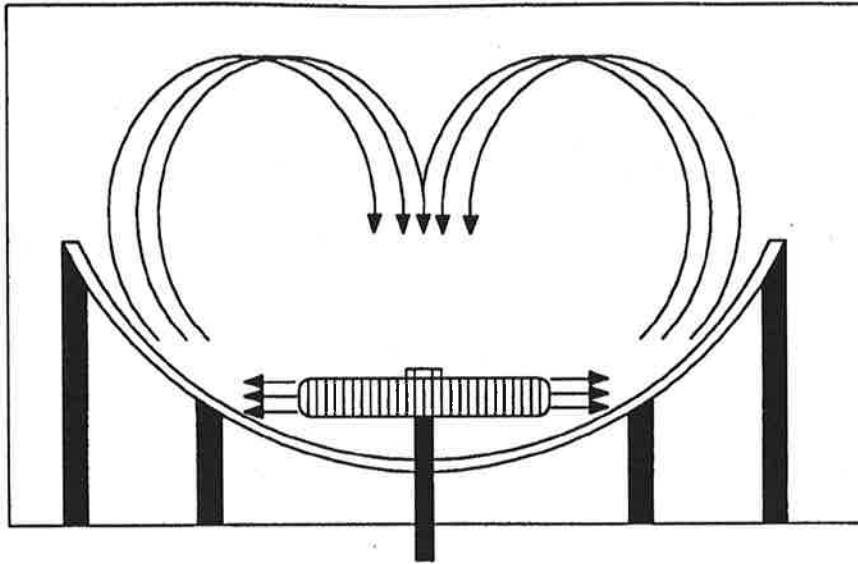
Una parte muy importante para el diseño del horno que se propuso fue la forma de colocación de la turbina dentro de la cámara del horno, como se muestra en la Figura 2.5. En ninguno de los diseños actuales se cuenta con este dispositivo, lo cual permite una mejor circulación del aire dentro de la cámara en un menor tiempo, además se reduce el tiempo para la homogeneización dentro de la cámara y por lo tanto reduce el consumo de la energía.



**Figura 2.3 Esquema de la forma como se construirá el horno de relevado de esfuerzos.**



**Figura 2.4 Dibujo de la puerta del horno de relevado de esfuerzos.**



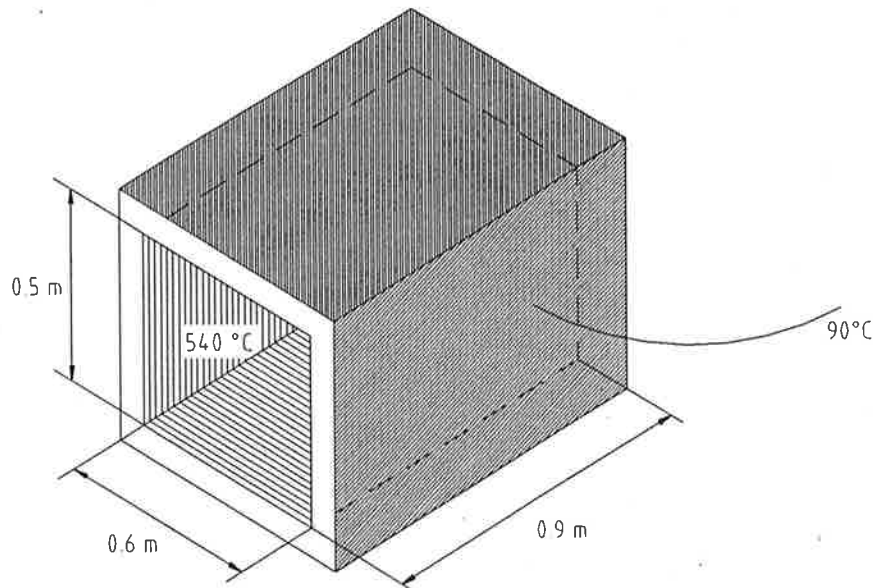
**Figura 2.5 Dibujo del flujo de la turbina dentro de la cámara del horno de relevado de esfuerzos.**

Una característica de diseño que comparten casi todos los hornos, es la forma sencilla y compacta con la cual están hechos. Una buena manera de compensar cualquier diseño de horno es dibujar un cubo; la forma final del horno puede ser una ampliación y variación de este cubo, para satisfacer las exigencias funcionales concretas. El cubo incluye más espacio por unidad de superficie de pared que cualquier otra forma rectilínea.

Además, una cámara de calentamiento compacta y sencilla favorece a la circulación del calor dentro de ella. Por ello, un diseño compacto tenderá a calentar más eficazmente, y habrá menos desigualdades de temperatura en la cámara de calentamiento.

Por lo anterior, definimos la cámara de calentamiento como una medida principal considerando un volumen aproximado de  $0.270 \text{ m}^3$ , como se muestra en la Figura 2.6





**Figura 2.6 Volumen de la cámara de calentamiento  $0.270 \text{ m}^3$ .**

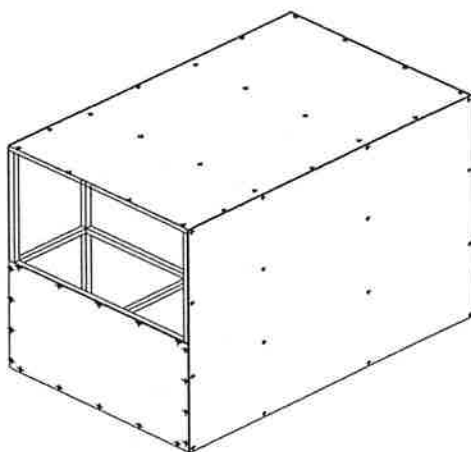
Los materiales compiten unos con otros por su existencia y los nuevos mercados. En periodos cortos de tiempo, aparecen muchos factores que hacen posible la sustitución de un material por otro para ciertas aplicaciones, por lo que evidentemente el costo es un factor.

Principalmente, los materiales que componen el horno fueron seleccionados bajo condiciones generales de funcionalidad, estética, costos y dentro de las normas oficiales Mexicanas para hornos eléctricos, [3], [4], [5], [6] y [7].

### *2.3.1 Lámina de acero inoxidable cal. 20.*

La lámina de acero inoxidable se produce comercialmente del calibre 10 (3.47 mm) al 30 (0.35 mm), y en anchos de 0.91 a 1.21 metros, pudiéndose entregar en hojas, rollos o cintas de acuerdo a las especificaciones requeridas, como se muestra en la Figura 2.7 El avanzado sistema de tratamiento térmico, permite ofrecer diversos grados de dureza o troquelabilidad para responder adecuadamente a los más variados procesos industriales tales como: dobleces, engargolados, punzonados, embutidos y estampados.

La protección del acero mediante la galvanización se ha convertido en todo el mundo en un importante método para conservar energía y materiales en ambiente agresivo, el mantenimiento de las estructuras instaladas se hace más difícil y costoso, debido a los efectos nocivos de la corrosión. El galvanizado de partes es la respuesta efectiva para dar solución a dicho problema.



**Figura 2.7** Dibujo de las láminas de acero inoxidable que se colocarán en la parte exterior del horno de relevado de esfuerzos.

### 2.3.2 *Aislante*

Para la selección del aislante, se tomaron en cuenta las propiedades físicas reportadas por los fabricantes, considerando la temperatura de trabajo, su costo y primordialmente su conductividad térmica. En base a lo anterior se comparan y seleccionan un cierto número de aislantes que cumplan con los requisitos, de tal manera que al cotizarlos suponiendo ya todo el volumen de él que se requerirá, se puede seleccionar adecuadamente el que se debe de utilizar. En base a lo anterior, se concluyó que la fibra de vidrio era la mejor opción.

En este punto se definirá brevemente lo que es un aislador térmico, mencionando sus nombres, composición y características físicas proporcionadas directamente por el fabricante. Un aislamiento térmico propiamente aplicado, asegura un funcionamiento óptimo del equipo de proceso y conserva el calor, con los beneficios económicos que ello implica. Para una situación o problema dado, siempre hay una gran variedad de aislantes que pueden satisfacer

las necesidades requeridas, por ello, a cada uno se le debe dar una consideración cuidadosa para poder seleccionar el mejor aislante que satisfaga las necesidades planteadas.

Los aislantes térmicos son los materiales empleados para no permitir el paso del calor a través de ellos. Todas las sustancias ofrecen cierta resistencia al paso del calor, pero este nombre designa a los materiales que oponen alta resistencia al paso del flujo de calor a través de ellos, esto es, que poseen una baja conductividad térmica, por lo que se usan como aislamiento protector contra el frío o el calor. Comúnmente son llamados aislantes del calor o aislantes térmicos.

Se usa una gran variedad de materiales como aislantes térmicos en forma de polvo o granos para relleno suelto, bloques de material fibroso en capas para aislamiento de paredes y láminas. Los aislantes de altas temperaturas son utilizados para hornos y calderas, se hacen generalmente de cerámica refractaria como cromita [8]. Para temperaturas intermedias se utiliza generalmente fibra de vidrio expandida [8]. Los bloques de fibra de vidrio expandida soportan calores de hasta  $540^{\circ}\text{C}$  y tienen una resistencia a la compresión de  $1035\text{ kPa}$ .

El número de “identificación de grupo”, multiplicado por 100 representa la temperatura máxima a la que puede trabajar el ladrillo con sus caras expuestas, como se muestra en la tabla 2.1, siguiente.

**Tabla 2.1 Clasificación de los ladrillos aislantes.**

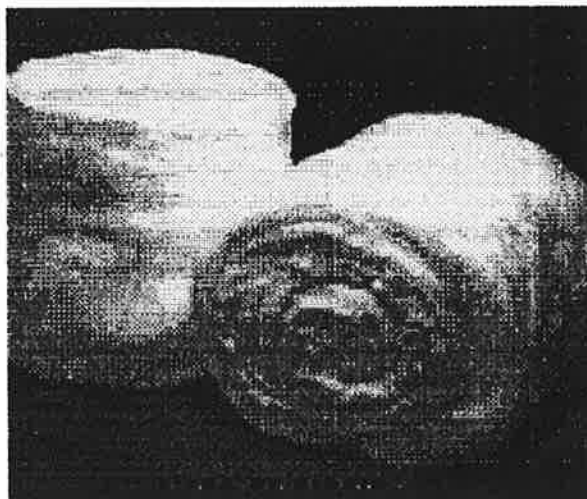
Identificación De grupo	El cambio lineal no debe de ser mayor del 2%, la Temperatura es en $^{\circ}\text{C}$	Peso específico en $\text{gr}/\text{cm}^3$
16	845	0.54
20	1065	0.64
23	1230	0.77
26	1400	0.83
28	1510	0.96
30	1620	1.09

Además de los grupos que aparecen en la tabla de los ladrillo refractarios, se pueden surtir ladrillos aislantes, que resistan temperaturas arriba de  $1982^{\circ}\text{C}$  ( $3600^{\circ}\text{F}$ ), existen también ladrillos de bajo peso hechos a base de sílice y ladrillos ligeros de magnesita. Los ladrillos aislantes se colocan esencialmente en la parte posterior de los ladrillos de alta capacidad refractaria y de altas conductividades térmicas. Existen muchos ladrillos aislantes que al ser usados en los revestimientos internos de hornos (donde no existe abrasión mecánica o contacto con metales fundidos, escorias o gases corrosivos); funcionan correctamente.

### 2.3.2.1 *Fibra de vidrio*

La baja conductividad térmica, incombustibilidad y una nula reactividad química del vidrio, son características deseables de los aislamientos. El vidrio fundido puede ser hilado en fibras similares a las de la lana mineral (en forma de filamentos) y fibras que pueden convertirse en mantas, cubiertas moldeadas para tubos o bloques.

El aislamiento de fibra de vidrio, como se muestra en la Figura 2.8 generalmente es bueno hasta una temperatura menor de  $600^{\circ}\text{C}$  ( $1112^{\circ}\text{F}$ ), aunque ciertos diseños especiales soportan hasta  $1000^{\circ}\text{C}$  ( $1832^{\circ}\text{F}$ ).



**Figura 2.8** Fibra de vidrio.

### 2.3.2.2 Lana mineral

La lana mineral se presenta en forma de colchonetas armadas en rollos, a granel, cubiertas y en bloques. Por su flexibilidad y entre lazado perfecto, puede aplicarse sobre superficies curvas, planas e irregulares. En ocasiones se le agrega materiales adhesivos, de tal manera que cuando se usa un adhesivo a prueba de agua, se puede producir un aislamiento efectivo de baja temperatura, el cual es altamente resistente a la humedad y a la putrefacción microbiana. Cuando está en dicha forma, el mencionado aislamiento por lo general se llama corcho mineral o roca mineral. La lana mineral se usa también para aislar casas y edificios. De acuerdo a recomendaciones del fabricante, como se muestra en la tabla 2.2, recomienda algunos espesores en función de la temperatura límite de trabajo.

**Tabla 2.2 Espesores recomendados para ciertas temperaturas.**

TEMPERATURA, °C	ESPESOR EN MM
Hasta 93	25.4
94 a 149	38.1
150 a 260	50.8
261 a 371	63.5
372 a 482	76.2
483 a 583	88.9
584 a 650	101.6

### 2.3.2.3 Cerámicos

Los aislantes cerámicos están disponibles en una gran variedad de configuraciones de tuberías y formas. Ofrecen excelentes características aislantes, gran resistencia al choque térmico y mucha dureza en una amplia gama de aplicaciones. Estos factores permiten que los productos moldeados puedan adaptarse a los requerimientos específicos de los clientes.

Sus aplicaciones típicas se encuentran en la industria siderúrgica, cerámica, empresas comerciales y en la construcción de hornos; también se usa en procesos donde se tiene contacto con aluminio licuado y aceros especiales.

Las propiedades típicas de estos aislantes cerámicos se muestran en la tabla 2.3 siguiente.

**Tabla 2.3 Propiedades típicas de los cerámicos**

Densidad, kg/m <sup>3</sup>	96-720
Temperatura límite de utilización, °C	1649
Temperatura de fusión, °C	1760
Gama de espesor, mm	6 a 102
Resistencia al choque térmico	Es excelente

#### 2.3.2.4 Fibra cerámica Kaowool

La fibra cerámica Kaowool es conocida como un material de amplio campo de aplicaciones, [8]. Se puede empaquetar a granel, como manta formada con aire, plegar en módulos, convertir en placas y perfiles, troquelar en empaquetaduras, retorcer en hilos, tejer en sogas y telas, mezclar con aglutinantes líquidos para enchapes y cementos.

Todas estas diversas formas de Kaowool han ido evolucionando en respuesta a la necesidad de la industria para resolver los problemas relacionados con el calor.

Los productos Kaowool son efectivos en costos y ofrecen excelentes propiedades aislantes; además son livianos, tienen baja conductividad térmica y baja acumulación de calor, excelente resistencia al choque térmico, excepcional resistividad eléctrica, buenas propiedades elásticas y se le puede manipular y fabricar en una gran variedad de productos diversos.

#### 2.3.2.5 Colcha de Fibra Cerámica de Alúmina-Sílice

La colcha cerámica INSWOOL es un producto de fibra cerámica más económico, con propiedades refractarias menores, de bajo peso, fabricada a partir de fibras cerámicas de alúmina y sílice térmicamente estables.

Se recomienda para utilizarse en temperaturas hasta 1040°C (1904°F) en condiciones normales de oxidación, lo que la hace un material ideal para aplicaciones de baja temperatura. Aún los cambios más extremos de temperatura no afectarán su capacidad de aislar y de mantenerse en su lugar. La colcha cerámica INSWOOL almacena 95% menos calor que el ladrillo refractario denso y aproximadamente 75% menos que el ladrillo aislante.

Tiene excelente resistencia en frío y caliente, aún después de estar expuesta por largos periodos a altas temperaturas se mantiene en posición en el anclaje del horno. Tiene magnífica resistencia antes de calentarse, permitiéndole resistir el maltrato normal de manejo y embarque.

Además resiste el ataque de la mayor parte de los agentes corrosivos con excepción de los ácidos fluorhídrico, fosfórico y álcalis concentrados. Es también resistente a las atmósferas reductoras y oxidantes.

Si ésta se humedece con agua, vapor, o aceite caliente sus propiedades físicas y térmicas se restablecen al secarse. Su capacidad para absorber el sonido es mayor que la de otros refractarios. Además se fabrica en anchos de 24" y 48" y en una variedad de espesores y densidades, se embarca en rollos de 25 pies. El empaque normal contiene 50 o 100 pies<sup>2</sup>.

### **Ventajas de la colcha cerámica *INSWOOL***

- \* Ahorro en combustible
- \* Pronta recuperación de la inversión
- \* Costos de construcción menores
- \* Fácil de reparar
- \* Permite la fabricación de los hornos más ligeros

***Temperatura máxima recomendada***

Para uso intermitente	1040°C (1900°F)
Para uso continuo	900°C (1650°F)
Color	Blanco opaco
Fibra	3 - 6 Micrones
Longitud de la fibra	20 cm. prom. 8 plg. prom.
Colcha de 128 kg/m <sup>3</sup> (8 lb/pie <sup>3</sup> )	30 - 40 cm. m x. 2 -16 plg. m x.

***Cambio lineal permanente******Porciento de contracción***

24 hrs. a 815°C (1 500°F)	0.5 - 1.0%
24 hrs. a 925°C (1 700°F)	1.0 - 2.0%
24 hrs. a 1040°C (1900°F)	2.0 - 3.0%

***Análisis químico***

Alúmina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40.0 - 45.0%
Sílice (Si O <sub>2</sub> )	55.0 - 60.0%
Oxido de Fierro ( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Hasta el 1%
Dióxido de Titanio ( Ti O <sub>2</sub> )	Hasta el 1.5%
Alcalis ( Na <sub>2</sub> - K <sub>2</sub> C )	Hasta el 1.0%



En la figura 2.9 se muestra la forma de colocación del aislante para una pared compuesta, para el horno de relevado de esfuerzos de resortes.

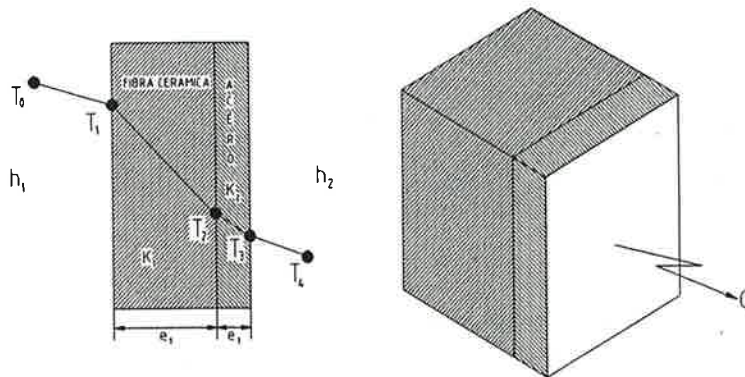
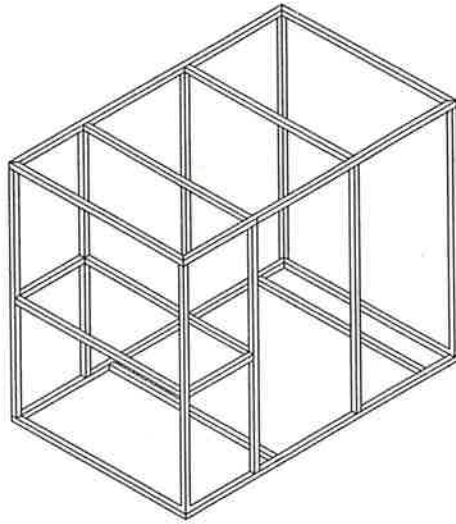


Figura 2.9 Distribución de una pared compuesta del horno de relevado de esfuerzos.

## 2.4 Estructura del horno

La estructura del horno esta formada por PTR verde de 1" X 1", el cual por su baja resistencia y facilidad de manejo, se optó por ser la mejor opción para realizar la estructura, como se muestra en la Figura 2.10. Ya que como se pretende forrar la parte exterior con lámina de acero inoxidable, el PTR ofrece un mejor soporte a la lámina y no así si la estructura fuese de ángulo con las mismas dimensiones. También si se selecciona una lámina al carbón o una lámina galvanizada, se formarán grandes cantidades de carbones y óxidos, por tal motivo se ha decidido que el material que puede suplir mejor esta función sin propiciar algún trabajo extra es el acero inoxidable.

En lo que respecta a la parte exterior del horno, por presentación y estética se decidió que el acero inoxidable es la mejor solución, esto como se mostró en la Figura 2.7.



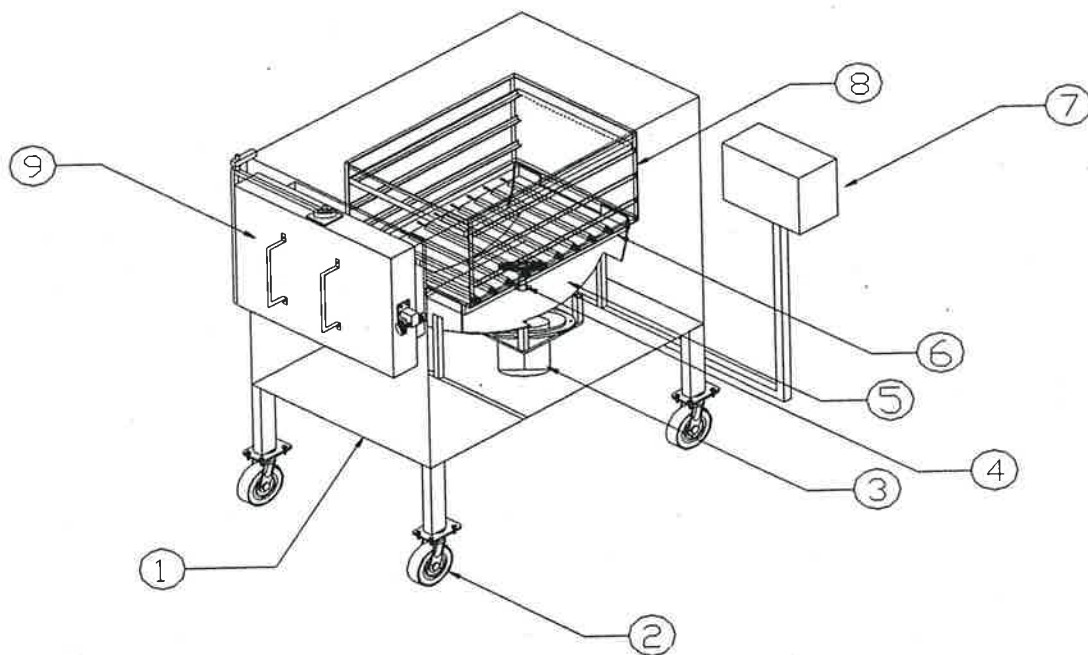
**Figura 2.10 Dibujo que muestra la construcción de la base del horno de relevado de esfuerzos.**

Por lo anteriormente escrito se optó por el diseño del horno como se muestra en la Figura 2.11, que es dibujo general de la forma como se construirá el horno del proyecto.

## 2.5 Dibujo de Conjunto

PARTES PRINCIPALES DEL HORNO:

- 1.- BASE
- 2.- PATAS
- 3.- MOTOR
- 4.- FLECHA
- 5.- DEFLECTOR
- 6.- RESISTENCIA
- 7.- CAJA DE CONTROLES
- 8.- CHAROLAS
- 9.- PUERTA



**Figura 2.11 Dibujo de conjunto donde se muestran todas las partes que componen al horno de relevado de esfuerzos de resortes.**

## 2.6 Selección del Aislante

La conductividad térmica de los sólidos tiene un amplio rango de valores numéricos dependiendo de la capacidad que tenga para conducir calor, tal como un metal o un asbesto. Estos últimos sirven como aislantes. La mayoría de los materiales no metálicos tienen una estructura básica en las cuales hay numerosas celdas que contienen aire u otros gases. Cuando aumenta la temperatura, la conductividad térmica también se incrementa y en muchos casos este incremento puede ser debido, principalmente, al aumento de la actividad molecular que se tiene dentro de las celdas del material. Si las celdas son extremadamente pequeñas, los efectos de convección no son significativos.

Aun cuando la conducción de calor se asocia, generalmente, con la transferencia de calor a través de sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus limitaciones. Por otra parte, se tiene también un límite superior en el tamaño de la celda que, si este es cedido, se tendrá una deficiencia en la efectividad del aislamiento. Por ejemplo, carbón vegetal o grafito en piezas de 0.0127 m., y empaquetados en un espacio, no resultan ser aislantes efectivos, debido a la gran actividad gaseosa que se tiene en los intersticios, con los gases moviéndose de un espacio a otro.

El problema del aislamiento está relacionado con la característica de la densidad del material. Una sustancia compresible, como la lana de fibra de vidrio, aísla mejor si se encuentra flojamente empaquetada que si se encuentra comprimida a una densidad mayor.

Puede entonces generalizarse diciendo que la efectividad del aislamiento de un material se aumenta al disminuir la densidad en el mismo.

El grueso óptimo del aislante se puede determinar por consideraciones puramente económicas y de diseño. Por ejemplo, si un tubo descubierto fuera a inducir un fluido caliente, habría cierta pérdida de calor por hora, cuyo valor podría determinarse del costo de producir los Watts en la planta generadora.

A menor pérdida de calor, mayor grueso del aislante y mayor costo inicial, y mayores cargos fijos anuales de mantenimiento y depreciación, éstos deben añadirse a la pérdida anual de calor.

Los cargos fijos en el aislante de la tubería serán de un 15 a un 20% del costo inicial del aislante utilizado. Suponiendo cierto número de gruesos de aislante y sumando los cargos fijos al valor de la pérdida de calor, se obtendrá un costo mínimo y el grueso correspondiente a él será el grueso óptimo económico del aislante. La forma de este análisis se muestra en la siguiente gráfica, Figura 2.12

La parte más difícil es obtener datos contables de costos iniciales de instalación, puesto que varían ampliamente dependiendo del proveedor y la cantidad de aislante que se aplique.

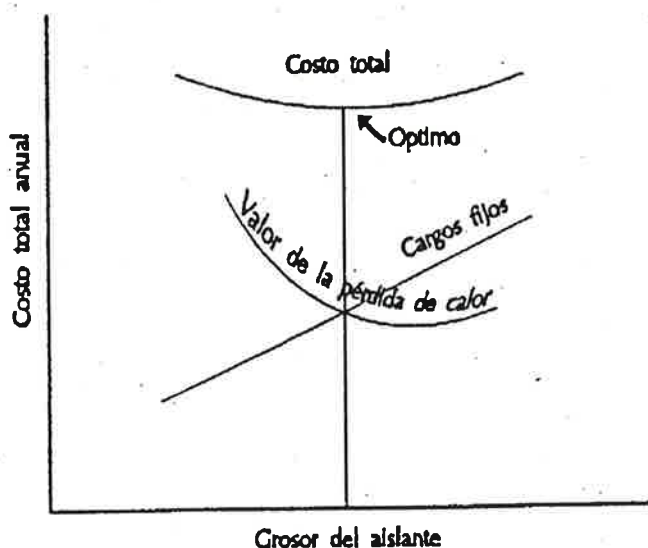


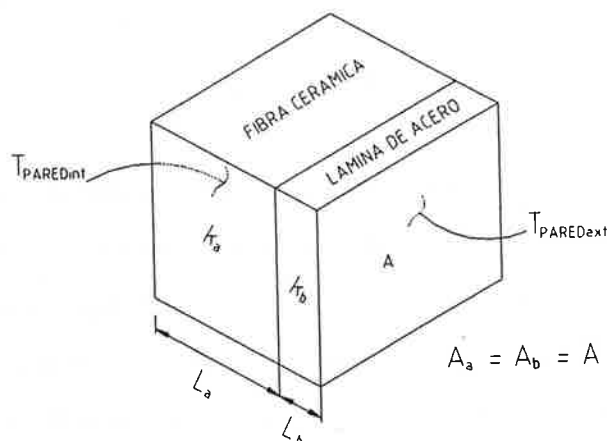
Figura 2.12 Grosor óptimo del aislante

De tal forma contemplando todas las consideraciones anteriormente descritas, el material aislante seleccionado es **LA COLCHA CERAMICA INSWOOL** (Alúmina - Sílice)

Las características y propiedades de este material se enunciaron anteriormente en la sección 2.3.2.5.

Otro de los factores importantes en la decisión del material aislante, es la consulta técnica que nos proporciona el proveedor, considerando que la colcha cerámica *INSWOOL* estaría dentro de una pared de lámina de acero, por lo cual dicho proveedor recomienda usar la colcha, ya que dicha colcha ha sido utilizada a temperaturas más altas que la que requiere para este proyecto, obteniendo resultados muy satisfactorios con la misma. El mantenimiento de este material es mínimo y el tiempo de utilización es bastante amplio dado que no se forma humedad dentro del aislante.

El rendimiento de ésta depende de las temperaturas de las superficies que rodean al aislamiento, de su resistencia térmica, densidad, del fluido caliente, contenido de humedad, resistencia a los choques térmicos y a la acción de las cargas y vibraciones mecánicas. La selección de este aislamiento la dictaminó la gama de temperaturas de servicio que se pueden manejar, así como los criterios de diseño del proyecto y las consideraciones económicas. La figura 2.13 muestra la configuración de la pared compuesta del horno.



**Figura 2.13 Pared compuesta para el horno formada por fibra cerámica – acero.**

## 2.7 Características Técnicas del horno

Horno eléctrico marca CIDESI

Calentamiento por resistencias eléctricas, para temperatura máxima de 540°C.

Con sistema de control de temperatura digital, velocidad de calentamiento ajustable mediante la aplicación de una turbina y un deflector y sistema de seguridad.

### *Especificaciones técnicas*

- Dimensiones de la cámara: Aproximadamente 600 x 900 x 500 mm (ancho x profundidad. x altura)
- Dimensiones exteriores: Aproximadamente 910 x 1337 x 1442 mm
- Capacidad del horno: 3 Bandejas de 900 x 600 mm
- Volumen de la cámara: Aproximadamente 0.270 m<sup>3</sup>
- Temperatura máxima: 540°C
- Rango de temperatura: 26°C a 540°C
- Potencia: 14.4 Kw. (Durante el ciclo inicial)
- Voltaje: 220 V Trifásico
- Precisión del pirómetro:  $\pm 2^\circ\text{C}$

### *Aplicaciones generales*

El horno está diseñado para aplicaciones universales de tratamiento térmico para diferentes materiales. No es posible para el fabricante enlistar todas las posibles aplicaciones y dar instrucciones específicas al respecto.

No se deben de tratar en el horno materiales que emitan gases combustibles, explosivos o que ataquen a la fibra cerámica (por ejemplo ácido fluorhídrico, clorhídrico, etc.). En estos casos avisar al fabricante previamente para hacer las adaptaciones correspondientes. Es deber del usuario examinar los riesgos de dar tratamiento térmico a los respectivos materiales y sus reacciones correspondientes para así evitar daños a personas, equipo, instalaciones y materiales. El uso del horno para aplicaciones indebidas y no analizadas previamente puede causar problemas y daños de los cuales no es responsable el fabricante

*Las ventajas que se tendrían con la utilización de este horno son:*

- *Un aumento en la producción*
- *Una mejor calidad en el acabado de los resortes*
- *Menos piezas rechazadas*
- *Un mejor control de la temperatura*
- *La temperatura dentro de la cámara se mantiene constante y homogénea*
- *La utilización de un deflector el cual tiene la función de mover circularmente el flujo del aire dentro de la cámara*
- *El consumo energético se reduce, ya que cuando llega se llega a la temperatura deseada en su primer ciclo el sensor tipo "J" manda una señal a pirómetro para que este apague a las resistencias, después de haber concluido este primer ciclo, el consumo de la energía disminuye, de manera que la potencia requerida para volver a llegar a la temperatura nuevamente requerida sería menor.*



En este capítulo se describió el problema a resolver, además se muestra el dibujo del diseño general del horno, describiendo las partes principales que componen al horno para el relevado de esfuerzos en resortes. También en este capítulo se describieron los diferentes tipos de aislantes que existen en el mercado

Posteriormente se seleccionó el aislante requerido, esto con la ayuda y la experiencia de los proveedores de cerámicos, además de las propiedades de la fibra cerámica que fueron descritas en punto 2.3.2 .5 del presente capítulo. Además en este capítulo se describieron las características generales del horno para el relevado de esfuerzos de los resortes y sus aplicaciones generales.

En el siguiente capítulo se calculará el flujo de calor, por conducción y por convección, así como la temperatura de las paredes tanto interior y exterior del horno, además se describe la manera de obtener los coeficientes de transferencia de calor tanto interior por convección forzada, así como el exterior, en cuyo caso el aire no está en movimiento.

También se seleccionarán las resistencias adecuadas para la generación de calor dentro de la cámara del horno.

## -CAPITULO 3-

### ANALISIS TERMICO DEL HORNO

#### 3.1 Balance de Energía.

El estudio de la transferencia de energía calorífica puede considerarse como un estudio profundo de la termodinámica, ya que en ésta, se establecen los principios que rigen a los procesos termodinámicos. Muestra de ello, es que la ecuación utilizada para realizar un estudio de balance de energía de transferencia de calor, no es sino una forma matemática de la primera ley de la termodinámica, la cual establece que la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma. Dicha transformación se realiza en cantidades fijas y definidas. Para hacer un análisis, es necesario aislar la región que se está estudiando, a lo cual se le llama sistema, los pasos que se describen a continuación, se siguen en general cuando se aplica la primera ley a un sistema con masa fija, con el propósito de hacer análisis de transferencia de calor.

A) - Designar la razón con respecto al tiempo de transferencia de calor con

$$\left( \dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} \right)$$

B) - La razón, con respecto al tiempo, del trabajo hecho para sistemas sólidos y líquidos es muy pequeña, ya que el cambio de volumen es pequeño pudiéndose despreciar con ello el término de trabajo.

C) - La razón, con respecto al tiempo del cambio de energía interna del sistema se puede escribir como

$$\frac{dU}{dt}$$

Entonces, para efectuar un balance de energía en el análisis de transferencia de calor para un sistema con masa fija, [9], se tiene:

$$\sum \dot{Q}_{int} - \sum \dot{Q}_{ext} = \frac{du}{dt} \quad (3.1)$$

En la ecuación anterior  $\dot{Q}_{int} - \dot{Q}_{ext}$ , son la razón de transferencia de calor dentro del sistema y la razón de transferencia de calor fuera del sistema, respectivamente. Además en dichos términos intervienen los tres tipos de transferencia de calor que son conducción, convección y radiación. Para una situación de estado estacionario, el balance de energía para un sistema con masa fija, [9], se define como:

$$\sum \dot{Q}_{int} = \sum \dot{Q}_{ext} \quad (3.2)$$

### 3.2 Determinación de la temperatura de la pared interna del horno

Para determinar la temperatura se utilizó el programa de cálculo MAHT-CAD, donde se realizan las operaciones matemáticas necesarias para el análisis.

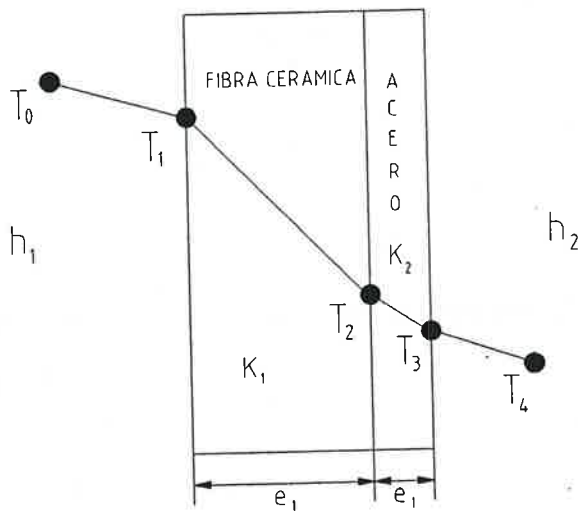


Figura 3.1 Forma de la distribución de la pared compuesta del horno.

Para determinar la temperatura de la pared interna del horno, como se muestra en la Figura 3.1, se determina la cantidad de calor que se disipa a través de la pared aplicando la siguiente ecuación, [10] y [11].

$$Q_{tot} = \frac{(T_0 - T_4)}{R_{tot}} \quad (3.3)$$

Además  $R_{tot}$  es igual a la suma de las siguientes resistencias:

$$R_1 = \frac{1}{h_1 * A} \quad (3.4)$$

$$R_2 = \frac{1}{k_1 * A} \quad (3.5)$$

$$R_3 = \frac{1}{k_2 * A} \quad (3.6)$$

$$R_4 = \frac{1}{h_2 * A} \quad (3.7)$$

Por que se realiza una sumatoria de todas las resistencias, esto para obtener la resistencia total se tiene que  $R_{tot}$ :

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (3.8)$$

Teniendo los valores de las temperaturas del aire interno y externo como:

$$T_0 = 813 \text{ °K} \quad \text{y} \quad T_4 = 299 \text{ °K}$$

Además los valores requeridos de la pared compuesta son:

$$A = 0.45 \text{ m}^2$$

$$h_1 = 16.492 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

$$h_2 = 5.519 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$e_1 = 0.127 \text{ m}$$

$$e_2 = 0.0020 \text{ m}$$

$$k_1 = 0.1018 \text{ W/m K}$$

$$k_2 = 43 \text{ W/m K}$$

El valor de la Conductividad térmica para el acero fue tomado de la tabla del anexo I del apéndice 1.

El valor de la Conductividad térmica para la fibra cerámica fue tomado de la gráfica de la tabla 3 del Anexo II.

El valor para la  $R_{\text{tot}}$  es :

$$\underline{R_{\text{tot}} = 3.31 \text{ °K/W}}$$

Por lo que el calor que se disipa a través de una de las paredes es:

$$\underline{Q_{\text{tot}} = 155.295 \text{ W}}$$

La temperatura en la pared interna del horno la cual se llamará  $T_1$ , como se muestra en Figura. 3.3, se obtiene con la expresión,

$$T_1 = T_0 - (Q_{\text{tot}} * R_1) \quad (3.9)$$

[10], Donde:

$$\underline{T_1 = 519.075 \text{ °C}}$$

La temperatura en la interface Fibra de Cerámica-Acero del horno  $T_2$ , será:

$$T_2 = T_1 - (Q_{\text{tot}} * R_2) \quad (3.10)$$

Donde:

$$\underline{T_2 = 88.546^\circ\text{C}}$$

La temperatura en la pared externa del horno  $T_3$ , será:

$$T_3 = T_2 - (Q_{tot} * R_3) \quad (3.11)$$

Donde:

$$\underline{T_3 = 88.530^\circ\text{C}}$$

Con el procedimiento anterior, se determinó el espesor del aislante más adecuado para obtener la eficiencia de diseño ideal en la parte exterior del horno, donde los resultados se muestran en la tabla 3.1 siguiente.

**Tabla 3.1 Resultados de las temperaturas a diferentes espesores de la fibra cerámica.**

ESPESOR DE LA FIBRA CERAMICA mm	CANTIDAD DE CALOR DISIPADO Watts	TEMPERATURA INTERIOR $T_1$ °C	TEMPERATURA EXTERIOR $T_3$ °C
0.0254 m	470.711	476.574	215.532
0.0508 m	312.191	497.934	151.703
0.0762 m	233.542	508.531	120.035
0.1016 m	186.546	514.864	101.113
0.1270 m	155.295	519.075	88.530
0.1524 m	133.013	522.077	79.558
0.1778 m	116.323	524.326	72.837
0.2032 m	103.354	526.074	67.615
0.2286 m	92.987	527.470	63.441
0.2540 m	84.510	528.613	60.023

En la tabla anterior se puede observar como la temperatura externa del horno va disminuyendo a medida que se va incrementando el espesor del aislante, por lo que mientras más grande sea el espesor de la fibra cerámica, el costo por el espesor de aislante aumentará considerablemente, por lo tanto se determinó que el espesor óptimo requerido para obtener una temperatura inferior a los 70 °C, en la pared exterior será con un espesor de 12.7 cm., ya que la temperatura de trabajo del horno fluctuará entre los 200° y 300 °C.

### **3.3 Determinación de los Coeficientes de Transferencia de Calor, en las paredes tanto externa e interna del horno por convección natural.**

El coeficiente convectivo de la transferencia de calor permite evaluar el flujo de calor que pasa a través de la paredes del horno, de la parte interior hacia el exterior. En este punto la turbina no esta en funcionamiento.

Para esto se cuenta con una temperatura de la pared exterior del horno la cual fue determinada en el punto 3.3 de este capítulo y tiene un valor de:

$$T_3 = 361.530^{\circ}\text{K}$$

Además con la temperatura del medio ambiente en el exterior del horno, la cual es de:

$$T_4 = 299^{\circ}\text{K}$$

Con los valores de las temperaturas anteriores se puede determinar el valor de la temperatura de película  $T_f$  real, realizando un promedio de las mismas.

Con el valor de  $T_f$  se encuentran las propiedades del aire a esta temperatura como son;  $k_a$ ,  $Pr$ ,  $\nu$ ,  $\mu$  y  $\beta$  por la tabla G-2, del Anexo III, los cuales se muestran en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Valores de las propiedades requeridas para obtener el coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h_2$ , por convección natural.**

PROPIEDADES	RESULTADOS
$T_f$	330.265 °K
$k_a$	0.02785 W/m*°K
$Pr$	0.70360
$\nu$	18.088 X 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /seg
$\beta$	0.003 °K <sup>-1</sup>
$\Delta T$	62.530 °K
$L$	0.50 m
$A$	0.45 m <sup>2</sup>

Para obtener el Número de Rayleigh, [10], se tiene la siguiente ecuación:

$$Ra = \frac{g * \beta * DT * L^3}{\nu^2} * Pr \quad (3.12)$$

Al sustituir valores en la ecuación (3.12) se obtiene lo siguiente:

$$Ra = 4.993 \times 10^8$$



Ahora para la obtención del Número de Nusselt, [10], se tiene la siguiente ecuación:

$$Nu = \left[ 0.825 + \left[ 0.837 * \frac{Ra_a^{0.1667}}{\left[ 1 + \left[ \frac{0.492}{Pr} \right]^{0.5625} \right]^{0.2963}} \right] \right]^2 \quad (3.13)$$

Por lo que sustituyendo todos los valores obtenidos en la ecuación (3.13) se obtiene que el Número de Nusselt es:

$$Nu = 99.251$$

Ahora para poder determinar el coeficiente de transferencia de calor, [2] se tiene la siguiente ecuación:

$$h_2 = \frac{Nu * K_a}{L} \quad (3.14)$$

Por lo que sustituyendo valores en la ecuación (3.14) se obtiene que el valor del coeficiente de transferencia de calor en el exterior del horno es de:

$$h_2 = 5.519 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

Ahora para determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor real en la pared interna del horno se realiza el mismo procedimiento que para la pared exterior, pero

ahora lo que cambian son las temperaturas internas del horno, para lo cual se tiene que la temperatura de la pared interna y la temperatura del medio ambiente en el interior del horno son de:

$$T_0 = 813 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_1 = 792.075^\circ\text{K}$$

Con los valores de las temperaturas anteriores se puede determinar el valor de la temperatura de película  $T_f$  real, realizando un promedio de las mismas.

Con el valor de  $T_f$  se encuentran las propiedades del aire a esta temperatura como son;

$k_a$ ,  $Pr$ ,  $\nu$ ,  $\mu$  y  $\beta$  por la tabla G-2, del Anexo III, como se muestra en la Tabla 3.3 siguiente.

**Tabla 3.3 Valores de las propiedades requeridas para obtener el coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h_1$ , por convección natural.**

<b>PROPIEDADES</b>	<b>RESULTADOS</b>
<b><math>T_f</math></b>	<b>802.537°K</b>
<b><math>k_a</math></b>	<b>0.05779 W/m*°K</b>
<b><math>Pr</math></b>	<b>0.689</b>
<b><math>\nu</math></b>	<b>82.29 X 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/seg</b>
<b><math>\beta</math></b>	<b>0.001 °K<sup>-1</sup></b>
<b><math>\Delta T</math></b>	<b>20.925°K</b>
<b>L</b>	<b>0.50 m</b>
<b>A</b>	<b>0.45 m<sup>2</sup></b>
<b>Ra</b>	<b>Ra = 3.253 X 10<sup>6</sup></b>
<b>Nu</b>	<b>22.725</b>

Por lo tanto el valor del coeficiente de convección natural  $h_1$  para la parte interior del horno tiene un valor de

$$h_1 = 2.627 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### 3.4 Determinación de los Coeficientes de Transferencia de Calor, en las paredes interna y externa del horno por Convección Forzada.

Para poder determinar el coeficiente convectivo de transferencia de calor al cual llamaremos ( $h_{\text{prom}}$ ), para una convección forzada tenemos que primeramente determinar la temperatura de película a la cual esta expuesto el aire.

Por lo tanto, se tiene que volver a realizar una gran parte del procedimiento que previamente se hizo, esto es, sabemos que la temperatura de la pared interna y la temperatura del medio ambiente en el interior del horno son de:

$$T_0 = 813 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$T_1 = 792.075 \text{ }^\circ\text{K}$$

El valor de la temperatura de película  $T_f$  real es el siguiente:

$$T_f = 802.537 \text{ }^\circ\text{K}$$

Con el valor de  $T_f$  se encuentran las propiedades del aire a esta temperatura como son;  $k_a$ ,  $Pr$ ,  $\nu$ ,  $\mu$  y  $\beta$  por la tabla G-2, del Anexo III, como se muestra en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Valores las propiedades requeridas para obtener el coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h_{prom}$  por convección forzada.**

<b>PROPIEDADES</b>	<b>RESULTADOS</b>
<b><math>k_a</math></b>	<b>0.05779 W/m*°K</b>
<b>Pr</b>	<b>0.689</b>
<b><math>v_1</math></b>	<b>82.29 X 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/seg</b>
<b><math>\mu</math></b>	<b>3.625X10<sup>-5</sup> kg/m*seg</b>
<b><math>\beta</math></b>	<b>0.001 °K<sup>-1</sup></b>
<b><math>\rho</math></b>	<b>0.4405 kg/m<sup>3</sup></b>
<b><math>\Delta T</math></b>	<b>20.925°K</b>
<b>L</b>	<b>0.50 m</b>
<b><math>V_t</math></b>	<b>9.8 m/s</b>
<b>A</b>	<b>0.45 m<sup>2</sup></b>

Donde la velocidad del aire  $V_t$ , fue determinada experimentalmente con la ayuda de un anemómetro, el cual se colocó frente a la turbina, esto para determinar la cantidad de flujo de aire que es desplazado por ésta, dentro de la cámara del horno. La figura 3.2 muestra el anemómetro que se utilizó para tal efecto.



**Figura 3.2 Anemómetro utilizado para medir el flujo de la turbina.**

Ahora en este punto vamos a evaluar al Número de Reynolds, ya que se cuenta con los valores determinados anteriormente, por la siguiente ecuación es, [10],

$$\text{Re} = \frac{Vt * L}{\nu_1} \quad (3.15)$$

Ya sustituyendo valores en la ecuación (3.15) se tiene:

$$\text{Re} = 5.955 \times 10^4$$

Otra forma de calcular el Número de Reynolds, [10], es por la ecuación (3.16):

$$\text{Re} = \frac{\rho * Vt * L}{\mu} \quad (3.16)$$

sustituyendo valores se obtiene:

$$Re = 5.954 \times 10^4$$

La expresión para determinar el Coeficiente convectivo de transferencia de calor promedio ( $h_{prom}$ ), [10], para una placa plana que se mantiene a una temperatura uniforme, es:

$$h_{prom} = 0.662 * Re^{0.5} * Pr^{0.333} * \left(\frac{ka}{L}\right) \quad (3.17)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (3.17), se tiene que el valor del  $h_{prom}$  es:

$$h_{prom} = 16.492 \text{ Watts/m}^2 \cdot \text{K}$$

El valor del coeficiente convectivo de transferencia de calor  $h_2$  para la parte exterior del horno, es de 5.519 Watts/m<sup>2</sup>\*°K, tiene el mismo valor que el calculado para la convección natural, ya que el aire no esta en movimiento.

### 3.5 Determinación del flujo de calor (Q) que disipa el horno al exterior por Convección, esto cuando el ventilador esta en funcionamiento.

Para determinar el flujo de calor (Q) que disipa el horno al exterior a través de sus paredes por convección forzada, como se muestra en la Figura 3.3 tenemos que por la ecuación (3.3), [10], la cual, se puede escribir también de la siguiente forma:

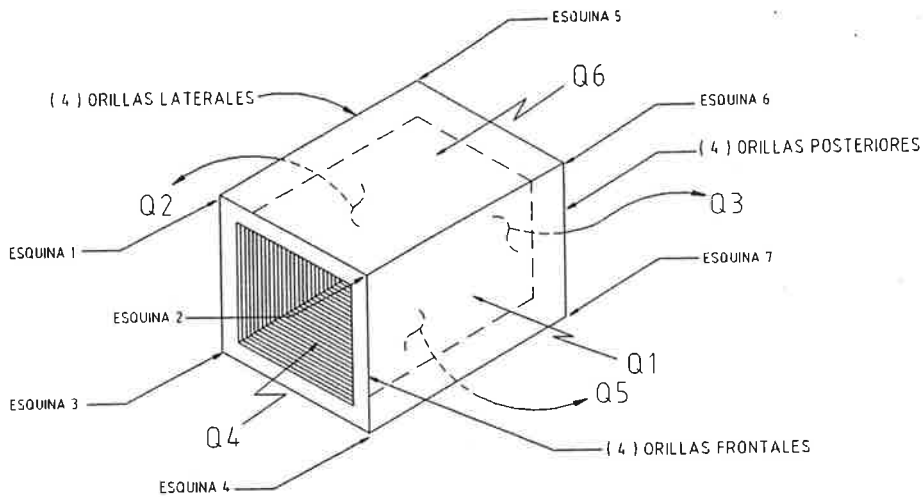
$$Q_1 = \frac{T_0 - T_4}{\left[ \frac{1}{h_1 * A} \right] + \left[ \frac{e_1}{k_1 * A} \right] + \left[ \frac{e_2}{k_2 * A} \right] + \left[ \frac{1}{h_2 * A} \right]} \quad (3.18)$$

Sustituyendo valores en la ecuación (3.18) tenemos que el valor del calor que sale por una de las paredes es:

$$Q_1 = 155.296 \text{ W}$$

Ahora para determinar el flujo de calor total, (Qt), que disipa el horno por convección forzada a través de sus paredes, procederemos a realizar una suma del calor que se disipa por cada una de ellas, por lo que utilizando la expresión (3.19), se obtiene el calor total. En la tabla 3.5 aparecen todos los valores del flujo de calor a través de cada una de las paredes.

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (3.19)$$



**Figura 3.3** Muestra las paredes que componen al horno de relevado de esfuerzos.

**Tabla 3.5** Valores del flujo de calor a través de cada una de las paredes, con la turbina encendida.

No. DE PARED	AREA DE LA PARED	FLUJO DE CALOR DISIPADO
1	0.45 m <sup>2</sup>	Q <sub>1</sub> = 155.296 W
2	0.45 m <sup>2</sup>	Q <sub>2</sub> = 155.296 W
3	0.30 m <sup>2</sup>	Q <sub>3</sub> = 103.530 W
4	0.30 m <sup>2</sup>	Q <sub>4</sub> = 103.530 W
5	0.54 m <sup>2</sup>	Q <sub>5</sub> = 186.355 W
6	0.54 m <sup>2</sup>	Q <sub>6</sub> = 186.355 W



Por lo tanto el flujo de calor total ( $Q_t$ ) disipado por convección forzada a través de todas las paredes es la suma de los valores que fueron calculados anteriormente, entonces por la ecuación (3.19) se tiene:

$$Q_t = (155.296 + 155.296 + 103.530 + 103.530 + 186.355 + 186.355) \text{ W}$$

$$Q_t = 890.361 \text{ W}$$

### 3.6 Determinación del flujo de calor ( $Q$ ) que disipa el horno al exterior a través de sus paredes por Conducción.

Utilizando la ecuación de la conducción, (3.20), [10], para las paredes lo único va ir variando es el área de cada una de ellas, por lo que en la tabla 3.6 aparecen todos los valores del flujo de calor a través de cada una de las paredes.

$$Q_1 = \frac{DT}{\left[ \frac{e_1}{k_1 * A} \right] + \left[ \frac{e_2}{k_2 * A} \right]} \quad (3.20)$$

La diferencia de la temperatura entre la pared interior y la exterior se determina mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta T = (T_1 - T_3) \quad (3.21)$$

Por lo que la diferencia de temperatura es:

$$\Delta T = 430.545 \text{ } ^\circ\text{K}$$

**Tabla 3.6 Valores del flujo de calor a través de cada una de las paredes, con la turbina apagada.**

No. DE PARED	AREA DE LA PARED	FLUJO DE CALOR DISIPADO
1	0.45 m <sup>2</sup>	Q <sub>1</sub> = 86.275 W
2	0.45 m <sup>2</sup>	Q <sub>2</sub> = 86.275 W
3	0.30 m <sup>2</sup>	Q <sub>3</sub> = 103.530 W
4	0.30 m <sup>2</sup>	Q <sub>4</sub> = 103.530 W
5	0.54 m <sup>2</sup>	Q <sub>5</sub> = 186.354 W
6	0.54 m <sup>2</sup>	Q <sub>6</sub> = 186.354 W

Por lo tanto para obtener el flujo de calor total que el horno pierde a través de sus paredes es de acuerdo a una sumatoria de cada una de ellas, esto es mediante la ecuación (3.19), se tiene:

$$Q_t = 752.32 \text{ W}$$

### 3.7 Determinación de la cantidad de calor (Q) que disipa el horno al exterior a través de sus esquinas y hendiduras.

Para determinar la cantidad de calor que disipa el horno por sus hendiduras, [10], se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_e = k_1 * St * DT \quad (3.22)$$

Por la tabla del Anexo IV se tienen los siguientes tipos de forma, [10]:

Para una pared el factor de forma es:  $S_w = A/L_w$  (3.23)

Para una orilla el factor de forma es:  $S_e = 0.54*L$  (3.24)

Para una esquina el factor de forma es:  $S_c = 0.15*\Delta x$  (3.25)

Sabemos que para una de las paredes, por ejemplo la de la derecha, como se mostró en la Figura 3.3 tenemos que los factores de forma son los que se muestran en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7 Valores de los factores de forma para cada una de las paredes del horno.**

PARED	AREA	L <sub>w</sub>	DT	S <sub>w</sub>
1	0.45 m <sup>2</sup>	0.127 m	430.545°K	3.543 m
2	0.45 m <sup>2</sup>	0.127 m	430.545°K	3.543 m
3	0.30 m <sup>2</sup>	0.127 m	430.545°K	2.362 m
4	0.30 m <sup>2</sup>	0.127 m	430.545°K	2.362 m
5	0.54 m <sup>2</sup>	0.127 m	430.545°K	4.252 m
6	0.54 m <sup>2</sup>	0.127 m	430.545°K	4.252 m

Para determinar el factor total  $S_{w_t}$  para las paredes del horno se realiza una sumatoria total del factor  $S_w$ , los cuales fueron determinados anteriormente, por lo que utilizando la siguiente expresión: se tiene que:

$$S_{w_t} = S_{w_1} + S_{w_2} + S_{w_3} + S_{w_4} + S_{w_5} + S_{w_6} \quad (3.26)$$

Donde:

$$S_{wt} = 20.315 \text{ m}$$

Ahora para determinar el factor total  $Se_t$  para las orillas tenemos que determinar los factores de forma de las orillas de cada una de las paredes del horno, la figura 3.3 muestra las orillas del horno, y los resultados se muestran en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8 Valores de los factores de forma para las orillas del horno.**

Pared	Le	$0.54 * Le$	No. de orillas	Se
LATERAL	0.90 m	0.486 m	4	1.944 m
FRONTAL	0.50 m	0.27 m	4	1.080 m
SUPERIOR	0.60 m	0.324 m	4	1.296 m

Por lo tanto la suma total del factor Se es determinó por la siguiente ecuación:

$$Se_t = Se_1 + Se_3 + Se_5 \quad (3.27)$$

Donde:

$$Se_t = 4.32 \text{ m}$$

Ahora para determinar el factor de forma total  $S_{ct}$ , para las esquinas tenemos que determinar primeramente los factores de forma para cada una de las esquinas, como se muestran en la Figura 3.3 antes mencionada, y los resultados se muestran en la tabla 3.9.

Se tiene que el espesor del aislante es de:

$$\Delta x = e_1 = 0.127 \text{ m}$$

**Tabla 3.9 Valor de los Factores de forma para las esquinas del horno.**

Pared	Le	$0.15 * \Delta x$	No. de esquinas	Se
LATERAL	0.90 m	0.019 m	8	0.152 m

Por lo tanto sustituyendo valores tenemos

$$S_{c_1} = 0.152 \text{ m}$$

Entonces se tiene que  $S_{c_t} = S_{c_1}$

Por lo que  $S_{c_t} = 0.152 \text{ m}$

Ahora tenemos que el factor de forma total  $S_t$  es la suma de los factores totales anteriormente determinados, esto es:

$$S_t = S_{w_t} + S_{e_t} + S_{c_t} \quad (3.28)$$

Por lo que sustituyendo los valores respectivamente se tiene que:

$$S_t = 24.787 \text{ m}$$

De acuerdo con la ecuación (3.22), se tiene que la cantidad de calor que disipa el horno a través de sus hendiduras y esquinas es de:

$$Q = 1.086 \times 10^3 \text{ W}$$

### 3.8 Determinación del calor en el interior del horno.

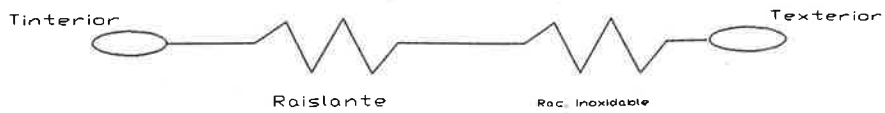
El calor esta relacionado con la temperatura, en nuestro análisis el calor generado en el interior del horno debe ser tal que permita a las piezas alcanzar la temperatura de trabajo para ser relevados, la cual debe ser de 238°C. Por tanto, se tiene que calcular el calor que se genera en el interior del horno.

Por otra parte, el calor generado en el interior del horno ( $Q_{\text{generado}}$ ) se utiliza para calentar las piezas y para mantener caliente al interior del horno, en otras palabras, para compensar el calor perdido; entonces

$$Q_{\text{generado}} = Q_{\text{perdido}} + Q_{\text{pzas.}} \quad (3.29)$$

La ecuación (3.29) se puede resolver para un estado permanente no transitorio. Además se conoce que el calor perdido es la suma del calor que sale por todas y cada una de las paredes del horno.

El calor fluye del interior del horno (parte caliente) al exterior de este (parte fría), superando la resistencia al paso de calor que presentan los elementos, de la figura 3.3 se puede obtener un circuito térmico, como se muestra en la Figura 3.4, el cual se representa como:



**Figura 3.4** Forma de transferencia del calor de la pared interior al exterior similar a un circuito eléctrico.

De acuerdo con la figura anterior, el calor perdido a través de las paredes se determina por medio de la ecuación (3.18).

El calor que absorben los resortes, se determina con la ecuación:

$$Q_{pzas} = (m) (cp) (Dt) \quad (3.30)$$

Teniendo un total de 25 kg de resortes, de material entonces, la cantidad de masa total se determina mediante la expresión siguiente:

$$m = \frac{\text{masa total de los resortes}}{\text{Tiempo de permanencia en el horno}}$$

Por lo tanto se tiene que:

$$m = \frac{25}{900} = 0.02777 \frac{kg}{s}$$

De la ecuación 3.30 se tiene que el calor que absorben las piezas es:

$$Q_{pzas} = (0.02777) (0.465 \times 10^3) (213) = 2750 \text{ W}$$

Por lo que el calor generado es:

$$Q_{\text{generado}} = ( 84.525 + 2750 ) \text{ W}$$

$$Q_{\text{generado}} = 2834.525 \text{ W}$$

Este calor será proporcionado por las resistencias, las cuales deberán ser capaces de generar el suficiente calor para calentar a los resortes, en un tiempo de 15 minutos.

### 3.9 Selección de la resistencia.

La selección de la resistencia depende de las características del proceso, como la temperatura de trabajo, el tiempo de calentamiento del horno, de las propiedades físicas de los materiales a calentar, del costo económico, entre otras cosas, pero la más importante es la cantidad de calor que se requiere para que la etapa del proceso al cual pertenece el calentamiento se realice de manera factible.

La cantidad de calor que necesita proporcionar la resistencia, en Watts. El análisis de la potencia requerida, se hará con un razonamiento muy similar al realizado para determinar el calor en el interior del horno, analizándolo desde que el horno comienza a calentarse, estando a una temperatura inicial de 26°C, y llegando hasta la temperatura de trabajo de 238°C. Esta situación de análisis se conoce como transferencia de calor en estado transitorio ya que se tiene un proceso de calentamiento, en el cual debe transcurrir cierto tiempo antes que se establezca una condición de temperatura en equilibrio.

Para un análisis de este tipo se consideran las temperaturas desde la cual parte el material a calentar hasta la temperatura final a la que se calentó, la cantidad de materia que tiene el material a calentar y sus respectivos calores específicos y de la velocidad de calentamiento que requiera, es decir, si se quiere que llegue a su temperatura de operación en 15 minutos.



El tipo de conexión que se utilizará será la del tipo delta, [12], con 3 arreglos de 3 resistencias cada uno, como se muestra en la figura 3.5. Ya que con este tipo de conexión se consume menos amperaje.

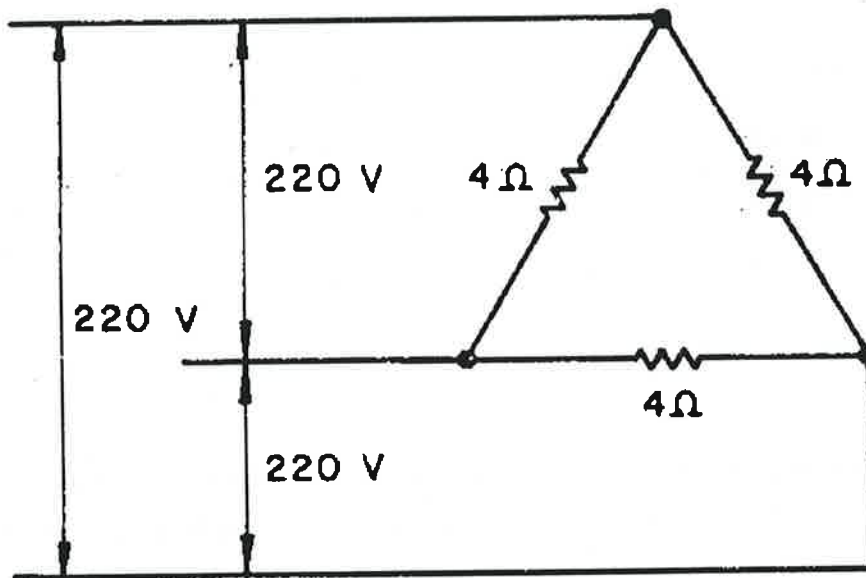


Figura 3.5 Conexión delta seleccionada para las resistencias.

De acuerdo al tipo de conexión la potencia y demás datos requeridos son los que se muestran en la tabla 3.10, [12].

**Tabla 3.10 Valores requeridos para obtener la potencia en una sola resistencia.**

<b>Dato requerido</b>	<b>Ecuación utilizada</b>	<b>Resultado</b>
$P_t$	$(3)^{1/2} V_L * I_L * \cos \theta$	<b>12,000 W</b>
$V_L = V_F$		<b>220 V</b>
$I_L$	$P_t / (3)^{1/2} V_L * \cos \theta$	<b>31.49 Amp.</b>
$I_F$	$I_L / (3)^{1/2}$	<b>18.18 Amp.</b>
$R_F$	$V_F / I_F$	<b>12.10 Ohms</b>
$R_F$	$1 / (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3) = 1 / (1/R_e)$	<b>36.30 Ohms</b>
$P_1$	$V^2 / R_e$	<b>1333.33 Watts</b>

*Por lo que las resistencias que se requieren deben de ser aproximadamente 1300 WATTS cada una con un amperaje aproximado de 18.18 Amp.*

En el calculo anterior se consideró que la potencia total era de 12,000 Watts, para obtener en cada una de las resistencias un consumo de 1,300 Watts, pero como faltaba considerar la carga del material que se pretende relevar, en un tiempo de 15 minutos, este calor tiende a aumentar la potencia de cada una de las resistencia requeridas, por lo cual el calor total necesario es determinado por la siguiente ecuación:

$$Q_{TOTAL} = Q_{RESISTENCIAS} + Q_{PZAS} \quad (3.31)$$

Por lo tanto sustituyendo valores en la ecuación anterior se tiene:

$$Q_{TOTAL} = 9(1300) W + (2750) W$$

$$\underline{Q_{TOTAL} = 14,450 W}$$

Realizando nuevamente los cálculos, pero en esta vez para una consumo total de 14,450 Watts, esto hace que la potencia total requerida para cada una de las 9 resistencias sea de 1600 W, con un Amperaje de 7.27, con 30.25 Ohms, y a un voltaje de 220 V, sean capaces de levantar en 15 minutos una temperatura de 238 °C.

Un tiempo de calentamiento para un horno de estas características que se encuentre entre 15 y 20 minutos es razonable, por lo tanto, se concluye que con un arreglo de resistencias conectadas en delta y que proporcionan una potencia de 14,450 W cumpliendo con el valor deseado, así pues cada una de las resistencias debe proporcionar una potencia de 1600 W.

Por otra parte, los fabricantes recomiendan, dependiendo del proceso y características del medio de trabajo, el tipo de resistencia, para este caso se ha seleccionado un calefactor resistente a la oxidación y a la degradación, cuyos elementos se conocen como hierro-constantan, que implican a los elementos cromo y níquel principalmente.

La resistencia seleccionada se muestra en las Figuras 3.6 y 3.7, [3].

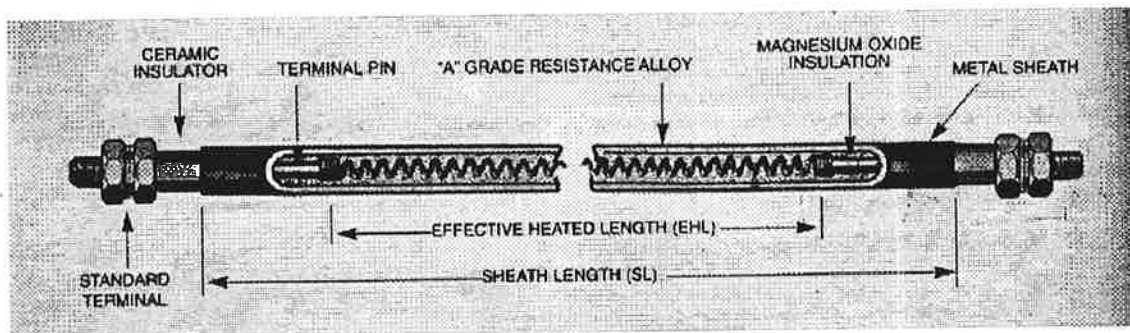


Figura 3.6 Esquema donde se muestran las partes principales de la resistencia seleccionada para generar el calor requerido por el horno.

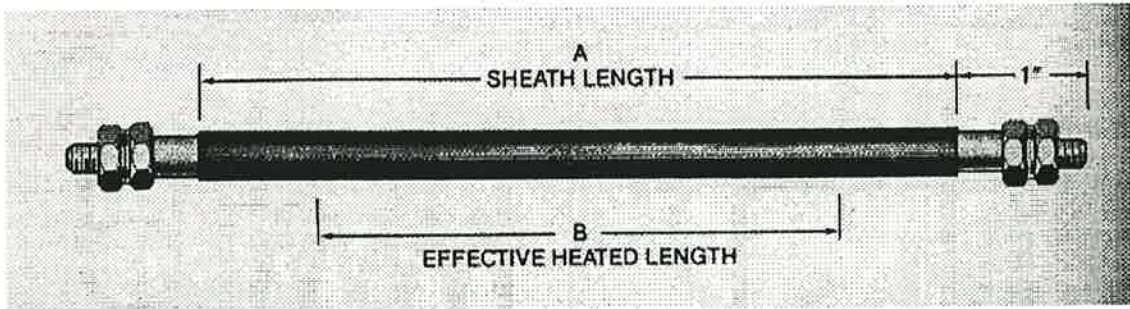


Figura 3.7 Esquema donde se muestra la longitud total, la longitud del área efectiva de calentamiento y la longitud de la conexión *bushing* para la sujeción de la misma.

En este capítulo se describió la forma de calcular las temperaturas de las paredes tanto interior y exterior, así como la forma de obtener los coeficientes de transferencia de calor interior y exterior del horno.

Además de determinar la cantidad de calor que disipa el horno por convección natural, esto cuando la turbina se encuentra apagada, y la cantidad de calor que se disipa por convección forzada esto cuando la turbina se haya en operación.

También se describe la forma de calcular la cantidad de calor que se pierde por las hendiduras y esquinas del horno.

Aunado a lo anterior se describe la manera de cómo fue realizado el cálculo de la capacidad de las resistencias y la selección de las mismas.

En el capítulo siguiente se realizará una breve introducción de los diferentes tipos de soluciones numéricas que existen, pero en la cual se basó el análisis térmico es en la numérica de elementos finitos, posteriormente con la ayuda de las ecuaciones de elementos finitos se calculan las temperaturas de la pared interior y exterior del horno, verificándose los resultados encontrados anteriormente en la sección 3.2 del capítulo 3.

También se realizará una modelación y simulación numérica en estado estable y transitorio de la pared que compone al horno, dicho análisis de realizará en el software de ANSYS, esto con la finalidad de respaldar el análisis analítico realizado en la sección 3.2 del capítulo 3.

## **-CAPITULO 4-**

### **MODELACION MATEMATICA DEL HORNO**

#### **4.1 Conducción de Calor en Estado Estable**

Existe una gran variedad de problemas de conducción en estado estable en donde la transferencia de calor se lleva a cabo en más de una dimensión.

Tal es el caso en gasoductos u oleoductos cuyas líneas de transmisión se encuentran enterradas, en superficies extendidas de espesor considerable, en la intersección de paredes de hornos y chimeneas, etc. En todos estos casos la temperatura depende de más de una coordenada.

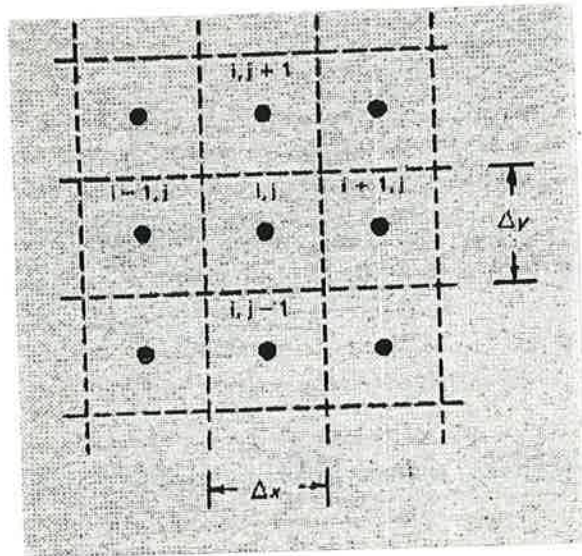
Existen en general varias técnicas o métodos de solución para resolver un problema de conducción en estado estable en donde la temperatura es función de dos y hasta tres coordenadas. Usualmente estos métodos de solución se clasifican en: *Analíticos, Numéricos, Gráficos y Analógicos*, [13]. Dentro de esta clasificación, los métodos numéricos son los de más amplia aplicación cuando se tienen geometrías o condiciones de frontera irregulares, dados los procesos sorprendentes en la computación digital. En este trabajo nos referiremos principalmente al método numérico. La simulación se realizará con la ayuda del software *ANSYS* de elementos finitos.

#### **4.2 Método de Diferencias Finitas**

Como se mencionó anteriormente, muchos problemas complejos de conducción no son susceptibles a una solución analítica. Sin embargo, el uso cada vez más generalizado de la computadora digital ha dado como resultado que los métodos de elementos finitos sean extremadamente importantes para resolver este tipo de problemas.

A diferencia de la formulación analítica, en el análisis de diferencias finitas se considera que el sistema en cuestión está constituido por elementos de volumen muy pequeño pero finitos.

Es decir, los elementos finitos empleados para obtener el modelo matemático son una aproximación de los elementos diferenciales usados en la formulación analítica. Al hacer el tamaño de estos elementos cada vez más pequeños, la diferencia en los resultados obtenidos usando el modelo de diferencias finitas y el modelo diferencial disminuye. En el análisis de conducción bidimensional por diferencias finitas, el principio de conservación de energía se aplica a un elemento de profundidad unitaria, de ancho  $\Delta x$  altura  $\Delta y$ . El conjunto de todos estos elementos constituye una red como se muestra en la Figura 4.1, [13].



**Figura 4.1 Red en análisis de diferencias finitas.**

El centro de cada volumen finito se conoce como nodo y se supone en el análisis que la temperatura de este representa la temperatura de todo elemento.

El problema será resuelto por elementos finitos y simulado en el software de ANSYS, que continuación se enuncia.

### 4.3 Método de Elementos Finitos

En problemas de dos dimensiones el dominio total es dividido en triángulos o paralelogramos de lados rectos, o bien triángulos o cuadriláteros de lados curvos. Con elementos de lados rectos se puede lograr una buena aproximación del dominio con una discretización fina; sin embargo, con elementos de lados curvos la aproximación del dominio es mejor.

En problemas de tres dimensiones el dominio es discretizado con elementos en forma de tetraedros, cubos o elementos con superficies curvas. Algunos de éstos elementos se muestran en las Figuras 4.2 y 4.3, [14].

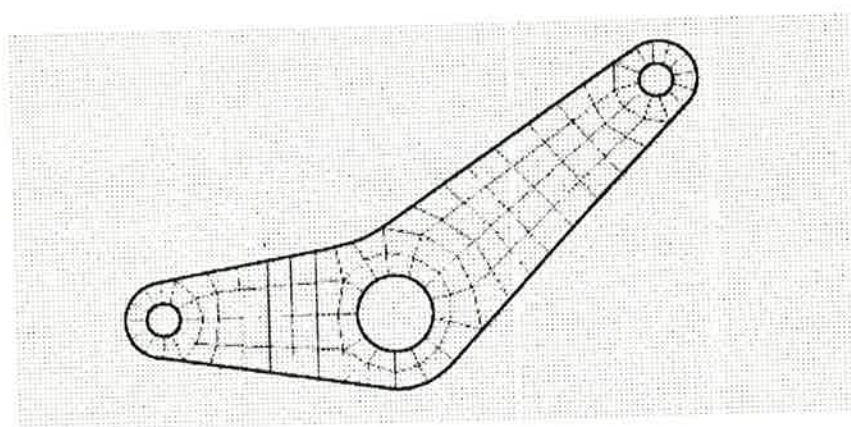


Figura 4.2 Discretización del continuo en elementos finitos.

### 4.4 Funciones de forma

Para cada elemento se selecciona una aproximación de la función buscada. La función buscada puede ser la distribución de temperatura en problemas de transferencia del calor, o bien, el campo de desplazamientos en elasticidad. Para problemas unidimensionales las funciones de forma  $N^e(x)$  son polinomios de primero, segundo o tercer orden.



Para problemas de dos dimensiones, las funciones de forma  $N^e(x, y)$  son polinomios lineales, cuadráticos o de mayor orden. La función por aproximar  $u(x, y)$ , (por ejemplo la distribución de temperatura en una región dada) puede expresarse a través de las variables nodales del elemento mediante una combinación lineal de las funciones de forma con las variables nodales como coeficientes. Si sólo los valores de la función en los nodos,  $u_i^{(e)}$ , son tomados como variables, la aproximación para el elemento bidimensional  $e$  con  $n$  nodos tiene la forma, [14].

$$u^{(e)}(x, y) = \sum_{i=1}^n u_i^{(e)} N_i^{(e)}(x, y) \quad (4.1)$$

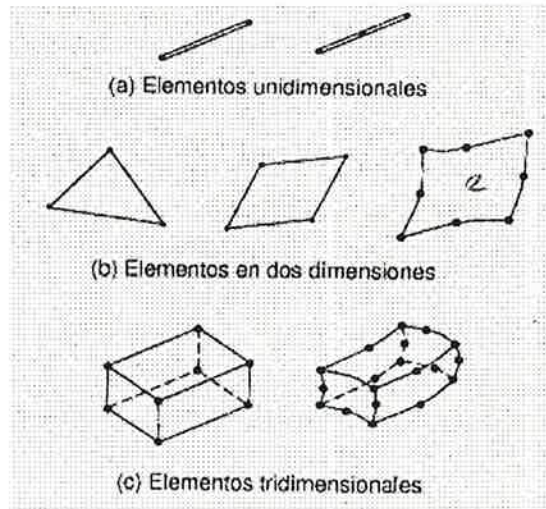


Figura 4.3 Algunos tipos comunes de elementos.

#### 4.4.1 Ensamble y solución

El *MEF* trabaja con la formulación variacional del problema, esto es, una expresión matemáticamente equivalente a la ecuación diferencial que gobierna el problema. Sustituyendo la ecuación (4.1), [14] y [15], en la formulación variacional obtenemos un sistema lineal de ecuaciones de la forma:

$$[K^e]\{u\} = \{b\}$$

para el elemento e.

Considerando la contribución de cada uno de los elementos en que se ha dividido el dominio original se obtiene el sistema global de ecuaciones:

$$[K]\{u\} = \{b\} \quad (4.2)$$

Donde  $[K]$  es llamada matriz de rigidez y  $\{b\}$  es el vector de fuerzas; el vector de incógnitas  $\{u\}$  son las variables nodales y contienen el valor de la función en los nodales.

Una vez aplicadas las condiciones de frontera podemos resolver la ecuación (4.2) para obtener nuestra solución aproximada de  $u(x, y)$  en los puntos nodales.

Para enfatizar, diremos que el *MEF* nos dará como solución una aproximación de la función  $u(x)$  solo en los puntos nodales, es decir, nuestro objetivo será encontrar los coeficientes  $u^e$ ; Si se desea conocer  $u(x)$  en un punto que no sea nodo, tendremos que interpolar a través de él usando los valores nodales previamente calculados del elemento que contiene tal punto.

## 4.5 Formulación con el MEF del problema de la Transferencia de

### Calor en el horno

Enseguida se formulará un problema típico de transferencia de calor unidimensional en estado estable, [14], [15], [16] y [17], Considerando una placa vertical de sección transversal uniforme como se muestra en la Figura 4.4 sujeta a una temperatura  $T_1$  en la pared interna y disipando calor por conducción y convección al medio ambiente, por el otro lado de la pared. La temperatura del medio ambiente es  $T_2$  y  $h$  es el coeficiente de transferencia del

calor por convección. Iniciamos aplicando un balance de energía en un elemento diferencial de longitud  $dx$ , de esta forma:

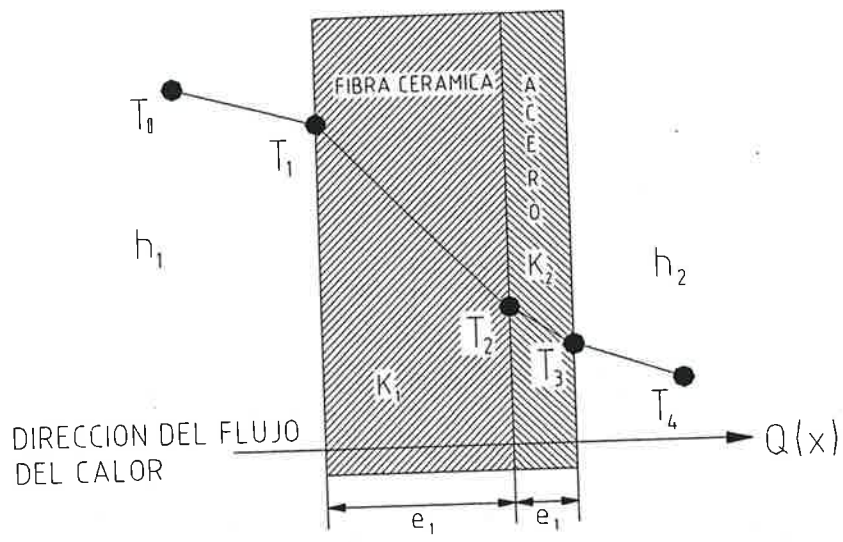


Figura 4.4 Transferencia de calor por convección y por conducción.

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{conv}$$

$$q_x = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx + dq_{conv} \tag{4.3}$$

De acuerdo a la ley de Fourier, [10], [11] y [13]

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \tag{4.4}$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica del material y  $A$  es el área de la sección transversal al flujo de calor. Usando la ley de enfriamiento de Newton podemos escribir la fracción de calor disipada por convección como

$$dq_{conv} = h(dA_s)(T_1 - T_4) \quad (4.5)$$

Donde  $dA_s$  es el área del elemento diferencial sujeta a convección, la cual puede escribirse como  $dA_s = p dx$  siendo  $p$  el perímetro de la sección transversal de la pared.

Sustituyendo las ecuaciones (4.5) y (4.4) en la ecuación (4.3) tenemos que:

$$\frac{dq_x}{dx} dx + dq_{conv} = \frac{d}{dx} \left( -kA \frac{dT}{dx} \right) dx + h(dA_s)(T_1 - T_4) = 0$$

o bien, usando  $dA_s = p dx$ , esta ecuación se reduce a

$$kA \frac{d^2 T}{dx^2} - hp(T_1 - T_4) = 0 \quad (4.6)$$

La ecuación (4.6) es la ecuación diferencial que describe el problema de conducción de calor unidimensional en la pared. Esta sujeta a dos condiciones de frontera. Estas condiciones pueden determinarse recurriendo a las temperaturas en ambas superficies de la placa. Es decir, es la temperatura de la pared interna, la cual es generalmente conocida, esto es

$$T_1(0) = T_b \quad \text{en} \quad x = 0 \quad (4.7)$$

La otra condición de frontera es alguna de las siguientes tres opciones:

1.- La pared es lo suficientemente larga tal que la temperatura en uno de los extremos es igual a la temperatura del medio ambiente, es decir,

$$T(L) = T_4 \quad \text{en} \quad x = L \quad (4.8)$$

2.- El flujo de calor en la pared derecha puede ser despreciado, de manera que

$$-kA \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = 0 \quad (4.9)$$

3.- El flujo de calor en el extremo derecho debe incluirse en el análisis, por lo que

$$-kA \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = hA(T_L - T_4) \quad (4.10)$$

En resumen, podemos decir que la formulación diferencial del problema de conducción de calor unidimensional para una placa con las condiciones de frontera (4.7) y (4.9) es:

$$kA \frac{d^2T}{dx^2} - hp(T_1 - T_4) = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (4.11)$$

$$T(0) = T_1$$

$$-kA \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = 0$$

Es posible demostrar que la solución de la ecuación (4.11) esta dada por

$$\frac{T - T_4}{T_1 - T_4} = \frac{\cosh \alpha L (1 - x/L)}{\cosh \alpha L} \quad (4.12)$$

Donde  $\alpha^2 = hp/kA$ . Cuando el espesor de la placa,  $t$ , es muy pequeño comparado con el ancho  $W$ , se puede escribir  $\alpha^2 \cong 2h/kt$ . Así mismo, se puede demostrar que para valores de  $\alpha L$  muy grandes ( $\alpha L \geq 4$ ), la temperatura en uno de los extremos se aproxima a  $T_4$ .

Con el objeto de simplificar la manipulación algebraica de las ecuaciones, introduzcamos el siguiente cambio de variable  $\theta = T_1 - T_4$ . De esta forma, la ecuación (4.11) se transforma en:

$$\begin{aligned} \theta''(x) - \alpha^2 \theta(x) &= 0 & 0 \leq x \leq L & \quad (4.13) \\ \theta(0) &= \theta_0 \\ \theta'(L) &= 0 \end{aligned}$$

Donde  $\theta_0 = T_1 - T_4$  y las primeras primas derivadas, es decir,  $\theta'(x) = d\theta/dx$ .

Para el problema de transferencia de calor existe un funcional  $\Pi(\theta)$ , tal que la función  $\theta(x)$  que hace que  $\Pi$  tome un valor extremo satisface también la ecuación diferencial (4.13). Sin embargo, en este caso,  $\Pi(\theta)$  no tiene un significado físico como en el problema de una barra elástica. Es posible demostrar que el funcional asociado al problema de transferencia de calor unidimensional de la placa, ecuación (4.13), es:

$$\Pi = \int_0^L \left\{ \frac{1}{2} k [\theta'(x)]^2 + \frac{1}{2} \frac{hp}{A} [\theta(x)]^2 \right\} dx \quad (4.14)$$

Para demostrarlo supongamos que  $\theta(x)$  hace que el funcional  $\Pi$  dado por la ecuación (4.14) tome un valor extremo, es decir,  $\delta\Pi = 0$ , con  $\delta\theta(0) = 0$  entonces tomando la primera variación de (4.14) e igualándola a cero, obtenemos

$$\delta\Pi = \int_0^L k\theta' \delta\theta' dx + \int_0^L \frac{hp}{A} \theta \delta\theta dx = 0$$

o bien,

$$\int_0^L \theta' \delta\theta' dx = -\alpha^2 \int_0^L \theta \delta\theta dx = 0 \quad (4.15)$$

Esta ecuación se denomina el principio de las temperaturas virtuales. Integrando por partes la primera integral tenemos:

$$\int_0^L \theta' \delta\theta' dx = \theta' \delta\theta \Big|_0^L - \int_0^L \theta'' \delta\theta dx = 0$$

Pero como  $\delta\theta(0) = 0$  entonces

$$\int_0^L \theta' \delta\theta' dx = \theta(L) \delta\theta(L) - \int_0^L \theta'' \delta\theta dx = 0 \quad (4.16)$$

Sustituyendo (4.16) en (4.15), obtenemos

$$\int_0^L [\theta'' - \alpha^2 \theta] \delta\theta dx + \theta'(L) \delta\theta(L) = 0,$$

como  $\delta\theta$  es arbitrario, entonces de esta ecuación se desprende que

$$\theta''(x) - \alpha^2\theta(x) = 0$$

$$\theta(0) = \theta_0$$

$$\theta'(L) = 0$$

Por lo tanto, podemos escribir las tres formulaciones para el problema de transferencia de calor unidimensional de una placa como sigue:

- P1. Se desea encontrar  $\theta(x)$  tal que se satisfaga

formulación  
diferencial

$$\theta''(x) - \alpha^2\theta(x) = 0, \quad 0 \leq x \leq L$$

$$\theta(0) = \theta_0$$

$$\theta'(L) = 0_{[P1]}$$

- P2 Encontrar  $\theta(x)$  tal que

principio de temperaturas  
virtuales

$$\int_0^L \theta' \delta\theta' dx = -\alpha^2 \int_0^L \theta \delta\theta dx$$

$$\text{con } \delta\theta(0) = 0; \theta(0) = \theta_0$$

para todo  $\delta\theta$



•P3 Encontrar  $\theta(x)$  (con  $\theta(0) = \theta_0$ ) tal que el siguiente funcional tomo un valor extremo, es decir, la primera variación de  $\Pi$  sea cero,  $\delta\Pi = 0$

P3. Minimización de  
Funcional

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ k[\theta'(x)]^2 + \frac{hp}{A} [\theta(x)]^2 \right\} dx$$

$$\delta\Pi = 0$$

$$\text{Con } \delta\theta(0) = 0; \theta(0) = \theta_0$$

Podemos escribir P2 en términos de la variable original  $T(x)$  de la forma siguiente. Recuérdese que  $\theta = T - T_f$ , por lo tanto  $\delta\theta = \delta T$  y  $\theta' = T'$ . Finalmente P2 se puede escribir como:

$$\int_0^L T' \delta T' dx = -\alpha^2 \int_0^L (T - T_f) \delta T dx$$

con  $\delta T(0) = 0$  y  $T(0) = T_b$ . O bien, en forma alternativa, P2 sería

• P2. Encontrar  $T(x)$  tal que

$$kA \int_0^L T' \delta T' dx + hp \int_0^L T \delta T dx = hp \int_0^L T_f \delta T dx$$

$$\text{con } \delta T(0) = 0; T(0) = T_b$$

para todo  $\delta T$

## 4.6 Implementación del MEF

Una vez formulado el problema se puede proceder a su implementación con el método del elemento finito, [14], [15], [16], [17] y [18]. Sea  $m$  el número de elementos de la barra los cuales tienen  $n$  nodos cada uno. La función de distribución de temperatura  $T(x)$  se aproxima en cada elemento mediante polinomios de interpolación en la siguiente forma:

$$T^e(x) = T_1^e N_1^e(x) + T_2^e N_2^e(x) + \dots + T_n^e N_n^e(x) \quad (4.17)$$

donde  $T_i^e$  son las temperaturas nodales y  $N_i^e(x)$  son las funciones de forma. Nótese que (4.17) puede escribirse en forma matricial como

$$T^e(x) = N^e T^e = T^{eT} N^{eT} \quad (4.18)$$

con

$$N^e = \{N_1^e, N_2^e, \dots, N_n^e\} \quad y \quad T^e = \begin{Bmatrix} T_1^e \\ T_2^e \\ \vdots \\ T_n^e \end{Bmatrix}$$

Ahora, sustituyendo (4.30) en P2 obtenemos:

$$kA \int_0^L T' \delta T' dx + hp \int_0^L T \delta T dx = hp \int_0^L T_f \delta T dx$$

de la primera integral,

$$\begin{aligned}
kA \int_0^L T' \delta T' dx &= \sum_e kA \int_{x_1^e}^{x_n^e} T'^e \delta T'^e dx \\
&= \sum_e \delta T^{eT} \left( \int_{x_1^e}^{x_n^e} N'^{eT} kA N'^e dx \right) T^e \\
&= \sum_e \delta T^{eT} R^e T^e = \delta T^T R T
\end{aligned} \tag{4.19}$$

de la segunda integral,

$$\begin{aligned}
hp \int_0^L T \delta T dx &= \sum_e hp \int_{x_1^e}^{x_n^e} T^e \delta T^e dx \\
&= \sum_e \delta T^{eT} \left( \int_{x_1^e}^{x_n^e} N^{eT} hp N^e dx \right) T^e \\
&= \sum_e \delta T^{eT} S^e T^e = \delta T^T S T
\end{aligned} \tag{4.20}$$

y finalmente, de la tercera integral,

$$\begin{aligned}
hp \int_0^L T_f \delta T dx &= \sum_e hp \int_{x_1^e}^{x_n^e} T_f \delta T^e dx = \sum_e \delta T^{eT} \int_{x_1^e}^{x_n^e} (hp T_f N^{eT}) dx \\
&= \sum_e \delta T^{eT} b^e = \delta T^T b
\end{aligned} \tag{4.21}$$

con

$$R^e = \int_{x_1^e}^{x_2^e} N^{1eT} k A N^{1e} dx \quad (4.22)$$

$$S^e = \int_{x_1^e}^{x_2^e} N^{1eT} k A N^{1e} dx \quad (4.23)$$

$$b^e = \int_{x_1^e}^{x_2^e} N^{eT} h p T_f^e N^{eT} dx \quad (4.24)$$

Donde  $R^e$  y  $S^e$  son llamadas matrices de conductancia elementales y  $b^e$  de cargas térmicas elemental. Finalmente, sumando las contribuciones (4.19), (4.20) y (4.21), de acuerdo a P2, tenemos que:

$$\delta T^T [(R + S)T - b] = 0$$

y como  $\delta T$  es arbitrario, entonces obtenemos;

$$(R+S) T = b \quad \text{o bien} \quad K T = b$$

Este es el sistema lineal de ecuaciones que debemos resolver imponiendo previamente las condiciones de frontera. El resultado será el vector  $T$  que contiene las temperaturas nodales de la placa.

#### 4.6.1 Aproximación Lineal

La Figura 4.5 muestra un elemento  $e$  cuyos nodos en los extremos tienen coordenadas  $x_1^e$  y  $x_2^e$ . En este caso  $n=2$ , es decir tenemos dos nodos por elemento y dos ecuaciones de forma. Para este elemento lineal la expresión general (4.17), [14], [15], [16] y [17], se reduce a:

$$T^e(x) = T_1^e N_1^e(x) + T_2^e N_2^e(x) \quad (4.25)$$

Y de acuerdo a (4.22), (4.23) y (4.24), los elementos de la matriz de rigidez elemental y del vector de fuerzas elemental del elemento e son:

$$K_{ij}^e = R_{ij}^e + S_{ij}^e \quad (4.26)$$

$$R_{ij}^e = \int_{x_1^e}^{x_2^e} N_i^e k A N_j^e(x) dx \quad (4.27)$$

$$S_{ij}^e = \int_{x_1^e}^{x_2^e} N_i^e h p N_j^e(x) dx \quad (4.28)$$

$$b_i^e = \int_{x_1^e}^{x_2^e} h p T_f N_i^e(x) dx \quad i, j = 1, 2 \quad (4.29)$$

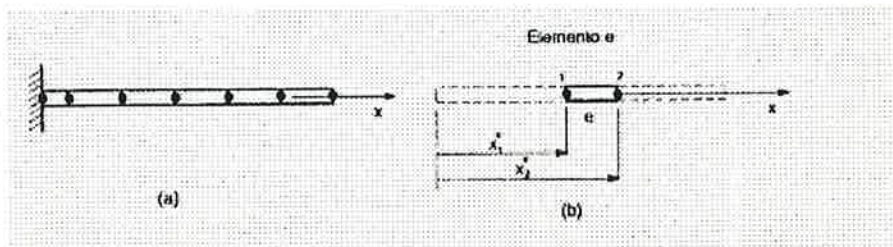


Figura 4.5 (a) Discretización de la barra en elementos, (b) elemento general e de longitud  $h_e$ .

Las funciones de forma para el elemento lineal están dadas por

$$N_1^e(x) = \frac{1}{h_e}(x_2^e - x) \quad (4.30)$$

$$N_2^e(x) = \frac{1}{h_e}(x - x_1^e) \quad (4.31)$$

Donde  $h_e$  es la longitud del elemento  $e$ .

Sabemos que  $R_{ij}$  es igual a la ecuación de una viga elástica, solo cambiamos  $EA$  por  $kA$  por lo tanto tenemos que:

$$[R^e] = \frac{kA}{h_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Similarmente, en la ecuación de una viga elástica se puede escribir cambiando  $q$  por  $hpTf$ , de manera que;

$$\{b^e\} = \frac{hpT_f h_e}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4.33)$$

Por lo que es posible demostrar que;

$$[S^e] = \frac{hph_e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

De manera que en resumen se puede escribir

$$[K^e] = \frac{kA}{h_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{hph_e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad \{b^e\} = \frac{hpT_f h_e}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

donde se ha usado el hecho de que  $h_e = x_2^e - x_1^e$ , [14] y [15].

#### 4.7 Solución Numérica por Elemento Finito y ANSYS del problema de transferencia de Calor

En este punto se realizó un cálculo con elementos finitos, esto para comparar el cálculo analítico realizado en el punto 3.3 del capítulo 3 de este trabajo, que fue la determinación de la temperatura de las paredes tanto interior y exterior del horno.

Para lo cual se están considerando las siguientes condiciones de frontera, como se muestra en la figura 4.6, en dicha figura se muestra a la pared dividida en 2 elementos lineales, para lo cual contamos con los siguientes datos:

*Primeramente se hizo un cálculo para un espesor de pared de 2" de fibra cerámica, cuyos resultados se muestran en la tabla 4.1.*

*Luego se realizó éste mismo, pero ahora para un espesor de 5" de ésta, el cual se muestra en el punto 3.2 del capítulo 3, en donde se verifica que los cálculos encontrados en ese punto coinciden con el resultado obtenido con el elemento finito, cuyos valores se muestran en la tabla 4.2.*

*Por último fue para un espesor de 10" de fibra cerámica. Cuyos valores obtenidos se muestran en la tabla 4.3.*

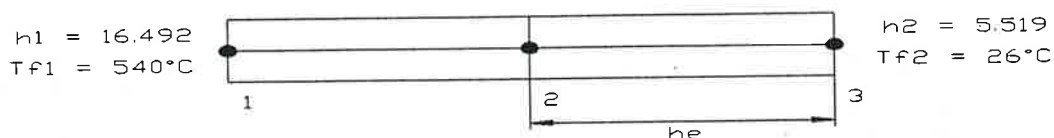


Figura 4.6 Pared del horno que será evaluada por elementos finitos.

Tabla 4. 1 Valores obtenidos para las temperaturas en la pared interior y exterior del horno.

VALORES CONOCIDOS	ECUACIONES REQUERIDAS	CALCULADOS OBTENIDOS	TEMPERATURA EN PAREDES
$K = 0.1018 \text{ W/m}^\circ\text{K}$			
$e = 0.0508 \text{ m}$	$h_e = e/2$	$0.0254 \text{ m}$	
$h_1 = 16.492 \text{ W/m}^2\text{K}$	$k/h_e$	$4.0078 \text{ W/}^\circ\text{K}$	
$T_{\Pi} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$	$(h_1)(T_{\Pi})$	$8905.68 \text{ W/m}$	
$h_2 = 5.519 \text{ W/m}^2 \text{ K}$			
$T_{\Omega} = 26^\circ\text{C}$	$(h_2)(T_{\Omega})$	$143.494 \text{ W/m}$	
			$T_1 = 497.931 \text{ }^\circ\text{C}$
			$T_2 = 324.831 \text{ }^\circ\text{C}$
			$T_3 = 151.711 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabla 4. 2 Valores obtenidos para las temperaturas en la pared interior y exterior del horno.

VALORES CONOCIDOS	ECUACIONES REQUERIDAS	CALCULADOS OBTENIDOS	TEMPERATURA EN PAREDES
$k = 0.1018 \text{ W/m}^\circ\text{K}$			
$e = 0.1270 \text{ m}$	$h_e = e/2$	$0.0635 \text{ m}$	
$h_1 = 16.492 \text{ W/m}^2\text{K}$	$k/h_e$	$1.6031 \text{ W/}^\circ\text{K}$	
$T_{\Pi} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$	$(h_1)(T_{\Pi})$	$8905.68 \text{ W/m}$	
$h_2 = 5.519 \text{ W/m}^2 \text{ K}$			
$T_{\Omega} = 26^\circ\text{C}$	$(h_2)(T_{\Omega})$	$143.494 \text{ W/m}$	
			$T_1 = 519.074 \text{ }^\circ\text{C}$
			$T_2 = 303.802 \text{ }^\circ\text{C}$
			$T_3 = 88.531 \text{ }^\circ\text{C}$



Tabla 4. 3 Valores obtenidos para las temperaturas en la pared interior y exterior del horno.

VALORES CONOCIDOS	ECUACIONES REQUERIDAS	CALCULADOS OBTENIDOS	TEMPERATURA EN PAREDES
$k = 0.1018 \text{ W/m}^\circ\text{K}$			
$e = 0.2540 \text{ m}$	$h_e = e/2$	$0.1270 \text{ m}$	
$h_1 = 16.492 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{K}$	$k/h_e$	$0.8015 \text{ W/ }^\circ\text{K}$	
$T_n = 540 \text{ }^\circ\text{C}$	$(h_1)(T_n)$	$8905.68 \text{ W/m}$	
$h_2 = 5.519 \text{ W/m}^2 \text{ K}$			
$T_{\text{R}} = 26^\circ\text{C}$	$(h_2)(T_{\text{R}})$	$143.494 \text{ W/m}$	
			$T_1 = 528.612^\circ\text{C}$
			$T_2 = 294.320^\circ\text{C}$
			$T_3 = 60.028^\circ\text{C}$

De los resultados obtenidos la conclusión es la siguiente; si se tiene un espesor de fibra cerámica de 2" (0.0508 m), la temperatura de la pared interior disminuye considerablemente; esto por que el calor se fuga a través de la pared y por consiguiente la temperatura de la pared exterior se incrementa, debido a que el grosor de la pared no es adecuado para mantener a la temperatura dentro de la cámara del horno.

Ahora si se cuenta con un espesor de fibra cerámica de 5" (0.127 m), la temperatura de la pared interior disminuye, pero no es muy baja ya que el aislante la tiende a mantener, esto hace que la temperatura de la pared exterior sea relativamente mas baja de los 90°C, cuando la temperatura del horno en el interior sea de aproximadamente 540°C, lo cual quiere decir que este espesor de aislante tiene la capacidad de mantener la temperatura dentro de la cámara del horno.

Ahora el análisis se realiza con un espesor de fibra aislante de 10" (0.254 m), la temperatura de la pared interior disminuye pero tiende a mantener la misma temperatura de la cámara del horno lo cual quiere decir que este espesor de aislante no deja fugarse el calor de la parte interior del horno hacia el exterior, por lo cual la temperatura de la pared exterior es de alrededor de 60°C, cuando la temperatura de la cámara del horno es de alrededor de 540°C.

El espesor de 10”(0.254 m) es el que mantiene mejor la temperatura dentro de la cámara del horno, pero colocar un espesor de estas dimensiones no es el adecuado ni factible, ya que por sus dimensiones es inapropiado, y por estética no sería correcto realizar una pared de este espesor.

Por otro lado, este espesor de aislante sería muy costoso para poder dar las dimensiones de éste. Por lo tanto, de acuerdo a los cálculos con los diferentes espesores de refractarios se llegó a la conclusión que el espesor mejor recomendado es el de 5” (0.0508 m), ya que además como el horno esta diseñado para alcanzar una temperatura de 540 C, el horno trabajaría perfectamente a una menor temperatura.

Por lo cual si se pretende reducir el espesor del aislante, y el costo del mismo, la mejor solución sería colocar otro tipo de refractario, de acuerdo a sus propiedades y condiciones de trabajo.

La figura 4.7 muestra el modelo y la simulación de la placa del horno eléctrico para el relevado de esfuerzos para resortes, y la figura 4.8 es la gráfica de la temperatura contra el espesor de aislante en estado estable, dicha simulación fue realizada en el paquete de computación ANSYS, [18] y [19] y [20], , dicho paquete es una herramienta que ayuda a modelar y a simular el comportamiento de la temperatura que va a tener la pared del horno en el interior y en el exterior, esto dependiendo del espesor de la fibra cerámica que se este considerando en el análisis.

Para la realización del modelado primeramente se definió que tipo de análisis era con el que se iba a trabajar, para este problema en particular es un análisis térmico. Después se seleccionó el tipo de elemento a utilizar y se introdujeron las propiedades físicas de la fibra cerámica. Posteriormente se modeló el área de la pared, se discretizó y se mallo en elementos finitos; teniendo ya el mallado, se procedió a aplicar las condiciones de frontera como se muestra en la figura 4.6.

Habiendo ya aplicado las condiciones de frontera el paquete realiza la solución del problema, y lo que muestra en la pantalla como resultado es la distribución de la temperatura a través de la pared.

1

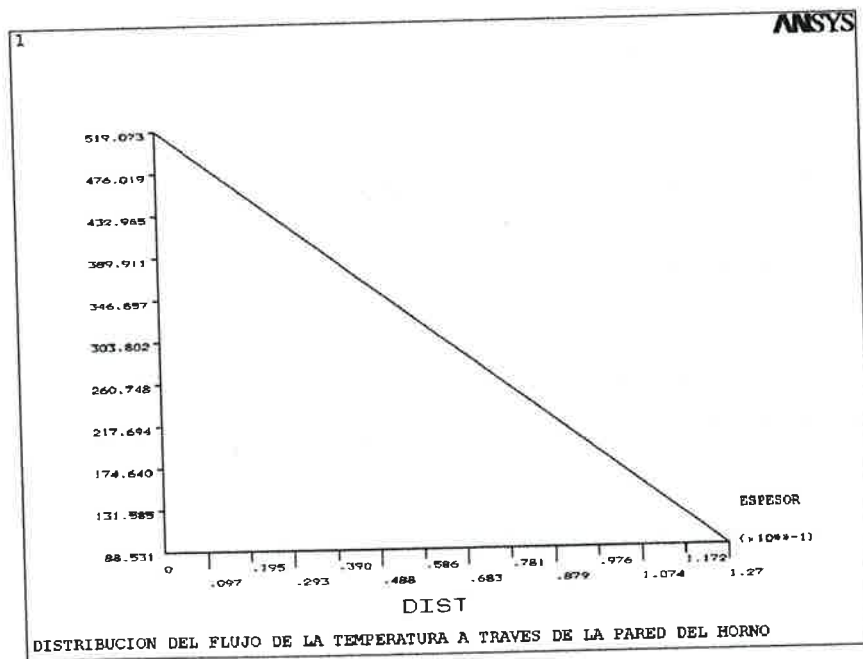


```

ANSYS 5.5.3
SEP 29 2000
16:29:58
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
TEMP (AVG)
RSYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN =88.532
SMX =519.074
88.532
136.37
184.208
232.046
279.884
327.722
375.56
423.398
471.236
519.074
    
```

DISTRIBUCION DEL FLUJO DE LA TEMPERATURA A TRAVES DE LA PARED DEL HORNO

Figura 4.7 Distribución del flujo de la temperatura a través de la pared del horno.



DISTRIBUCION DEL FLUJO DE LA TEMPERATURA A TRAVES DE LA PARED DEL HORNO

Figura 4.8 Distribución de la temperatura en función del espesor de la pared.

## 4.8 Conducción de Calor en estado Transitorio

En muchos procesos de transferencia de calor la temperatura del sistema depende del tiempo. Tal es el caso durante el calentamiento y enfriamiento del techo de una casa expuesta a la radiación solar; durante el calentamiento y enfriamiento de los refractarios que constituyen la matriz de un generador, etc. En estos casos la temperatura no sólo depende de la distancia, sino también del tiempo. A diferencia con los procesos de conducción de calor en estado estable, en todos los de tipo transitorio existe un aumento o disminución de la energía interna del sistema mientras ocurre el proceso.

El tratamiento analítico de los procesos de transferencia de calor en estado transitorio ha encontrado múltiples aplicaciones en la simulación digital de sistemas. Mediante un análisis de simulación puede predecirse el comportamiento de un sistema dado sin tener que recurrir a la experimentación muchas veces costosa.

Considere un sistema como el mostrado en el esquema de la Figura. 4.9, el cual se encuentra inicialmente a una temperatura uniforme  $T_0$ . Suponga que repentinamente se sumerge el cuerpo en un fluido a menor temperatura  $T_\infty$  cuyo valor es constante. Si se supone que la resistencia interna a la convección, la temperatura del cuerpo depende únicamente del tiempo, es decir;  $T = T(t)$ .

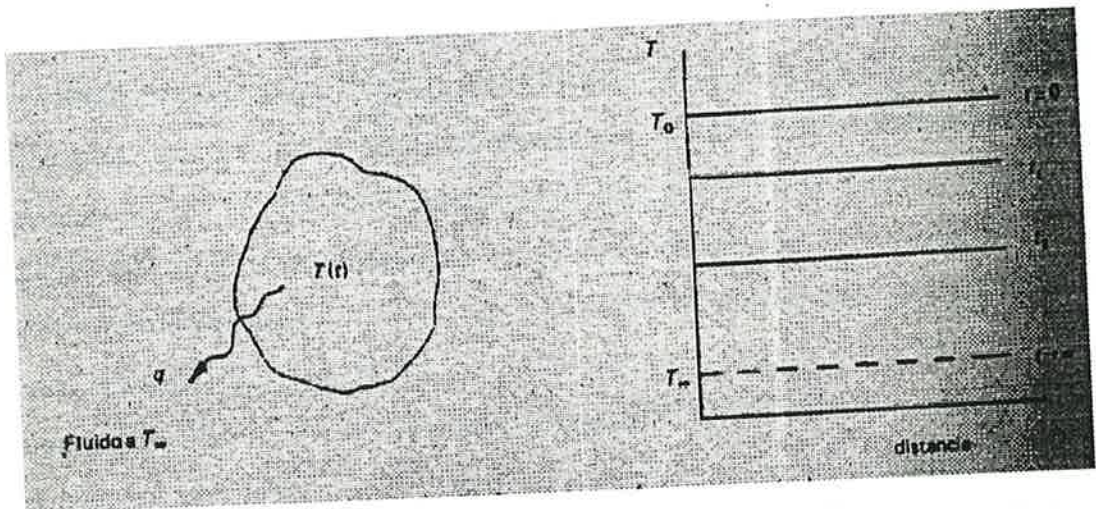


Figura 4.9 Sistema con parámetros concentrados

Aplicando la primera ley de la termodinámica a todo el cuerpo, el calor disipado por convección en cualquier instante de tiempo se refleja en una disminución en la energía interna de este. Analíticamente, tenemos que;

$$hA(T - T_{\infty}) = -\rho cV \frac{dT}{dt} \quad (4.35)$$

La ecuación anterior se puede también escribirse como

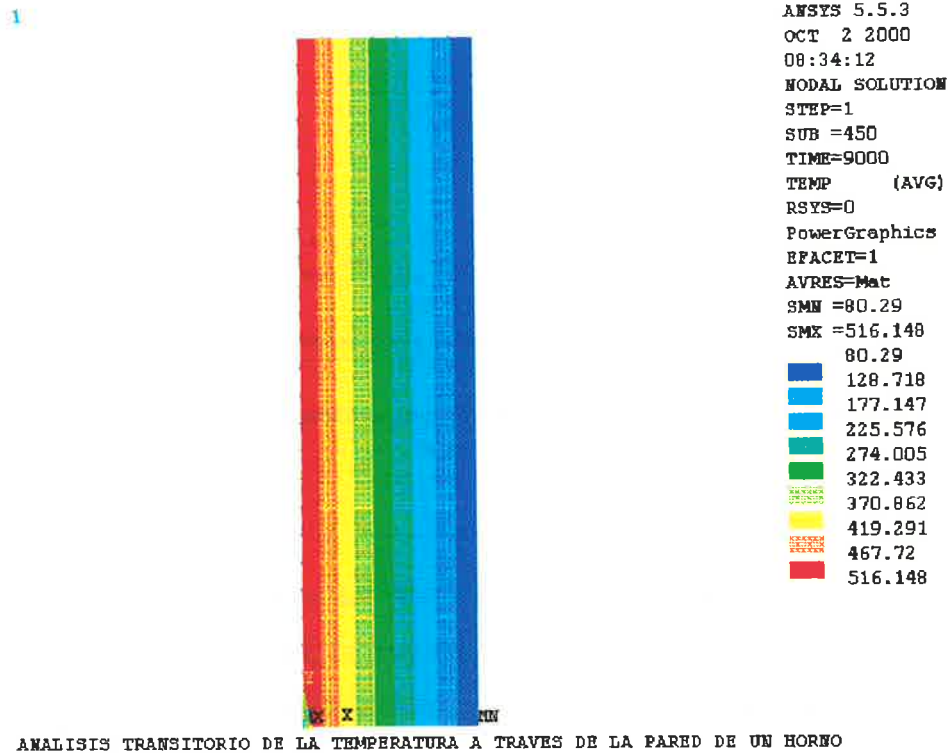
$$\frac{dT}{dt} + \frac{hA}{\rho cV} (T - T_{\infty}) = 0 \quad (4.36)$$

Para hacer homogénea a esta ecuación diferencia, puede definirse la diferencia de temperaturas  $\theta = T - T_{\infty}$ , que constituye la diferencia de potencial para transferencia de calor por convección

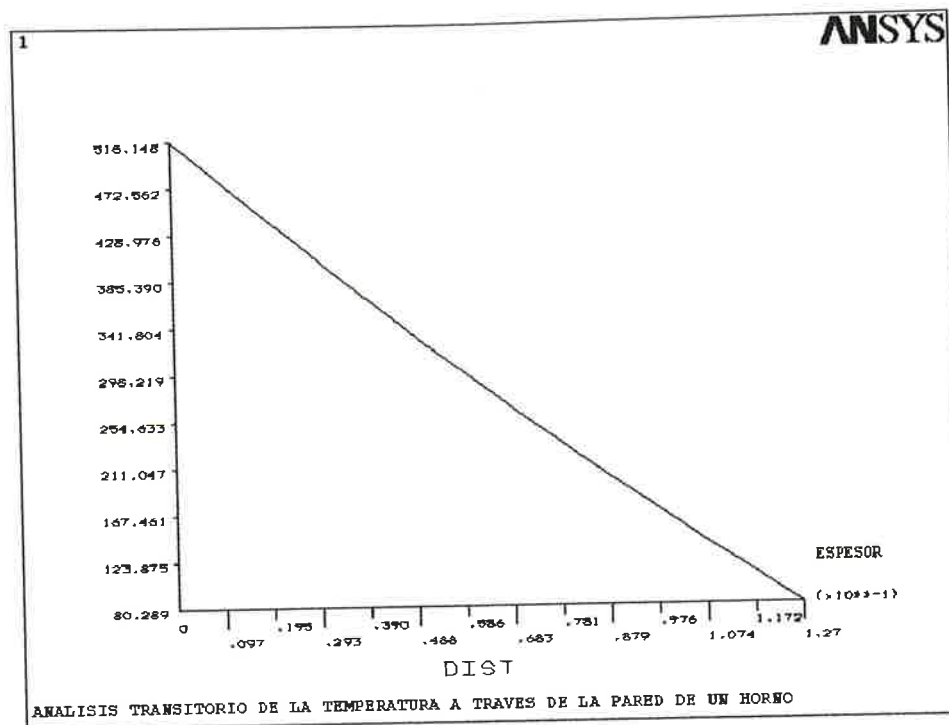
La figura 4.10 muestra el modelo y la simulación de la placa del horno eléctrico para el relevado de esfuerzos de resortes, y la figura 4.11 es la gráfica de la temperatura contra el espesor de aislante, la cual fue tomada al transcurrir un tiempo de 2 horas y media (9000 segundos) en estado transitorio, lo anterior se realizó en el paquete de computación ANSYS, [18], [19] y [20], ya que éste es una herramienta que simula del comportamiento de la temperatura que tiende a tener la pared del horno en el interior y en el exterior, obviamente dependiendo del espesor de la fibra refractaria que se esté considerando en el análisis.

Primeramente se define que el tipo de análisis que se quiera, para este problema en particular será térmico. Ahora se define el tipo de elemento y las propiedades de la fibra refractaria, ya que se seleccionó las propiedades del material, se comienza con modelar el área de la pared que se quiere simular, se discretiza el área de la pared en pequeños elementos finitos, después de haber mallado el área se activa el estado transitorio y se le aplican las condiciones iniciales, posteriormente se aplican los pasos de carga los cuales definen el tiempo y la frecuencia que se quiere analizar, ahora se prosigue con aplicar las condiciones de frontera como se muestra en la figura 4.6. Como siguiente paso se guarda el paso de carga y se realiza

otro paso de carga, teniendo estos dos pasos de carga se procede a correr los pasos y se obtiene la solución del problema para el estado transitorio que se pretendía modelar y simular en este paquete.



**Figura 4.10** Distribución del flujo de la temperatura a través de la pared del horno, transitoriamente al transcurrir un tiempo de 9000 segundos (2.5 horas).



**Figura 4.11 Distribución de la temperatura en función del espesor de la pared del horno, en un análisis transitorio.**

Además en el análisis transitorio se observa como es que va cambiando la temperatura a través de la pared, la cual esta compuesta de aislante de fibra de cerámica y acero inoxidable, al ir transcurriendo el tiempo de operación del horno, tal como se muestra en la gráfica de la figura 4.12. Esta va tendiendo poco a poco a descender, hasta llegar a su estado estable de trabajo, en el cual la temperatura en la pared exterior del horno ya no puede incrementarse.

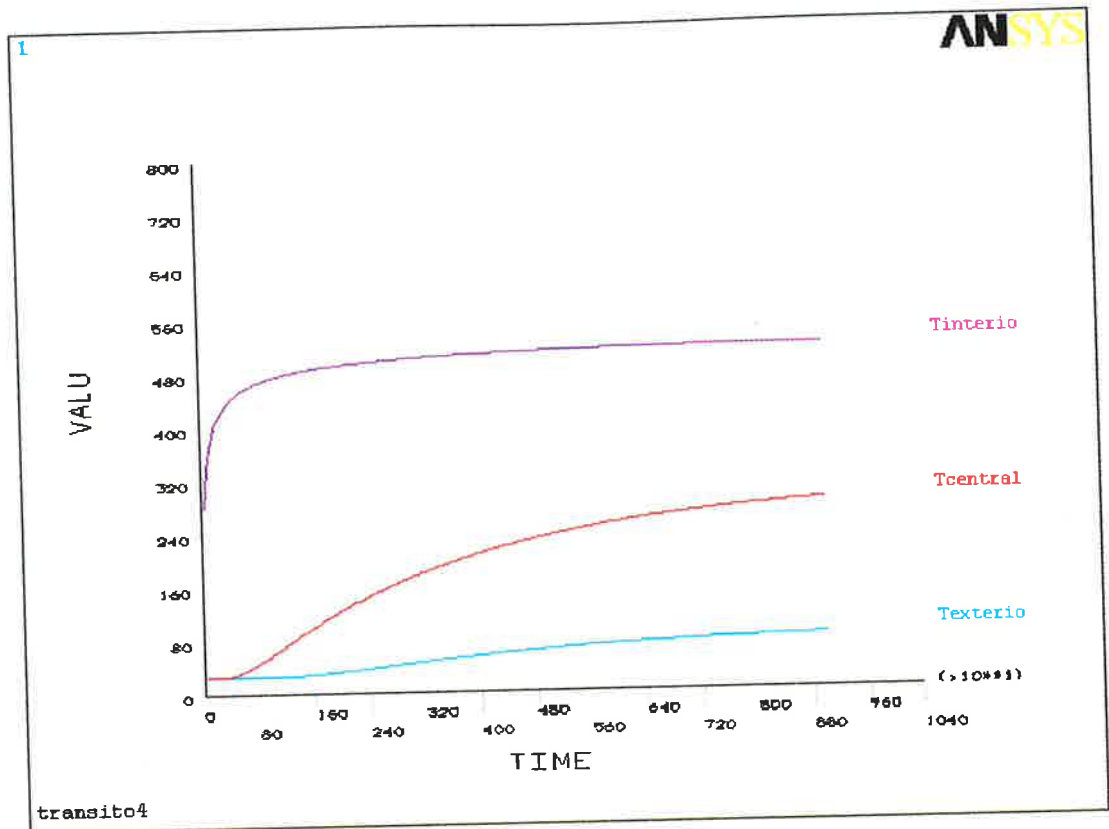


Figura 4.12 Gráfica donde se muestra como es que se va incrementando la temperatura al ir transcurriendo el tiempo. La temperatura esta tomada en tres puntos, parte interna, en el centro y en el lado exterior de la pared.



En la tabla 4.4 se muestran los valores de las temperaturas obtenidas en el capítulo 3 sección 3.2 y valores de las temperaturas obtenidas en el capítulo 4 sección 4.7

**Tabla 4.4 Comparación de los valores de las temperaturas obtenidas.**

<i>SOLUCION ANALITICA</i>	<i>SOLUCION NUMERICA</i>
En la sección 3.2 del capítulo 3	En la sección 4.7 del capítulo 4
Temperatura en la pared interior:	Temperatura en la pared interior:
<u><math>T_1 = 519.075 \text{ }^\circ\text{C}</math></u>	<u><math>T_1 = 519.074 \text{ }^\circ\text{C}</math></u>
Temperatura en la pared exterior:	Temperatura en la pared exterior:
<u><math>T_3 = 88.530 \text{ }^\circ\text{C}</math></u>	<u><math>T_3 = 88.531 \text{ }^\circ\text{C}</math></u>

En el capítulo anterior se describió brevemente lo que es el elemento finito, y la forma de ser utilizado esto para respaldar los resultados obtenidos en la sección 3.2 del capítulo 3..

También se realizó una simulación para obtener las temperaturas tanto de la pared interior como de la pared exterior, dicha simulación fue realizada en ANSYS, y con los resultados obtenidos en la misma se validaron los cálculos realizados analíticamente en el punto 3.3 del capítulo 3, los cuales eran determinar la temperatura de las paredes tanto interior y exterior del horno para el relevado de esfuerzos en resortes.

En el capítulo siguiente se presenta una breve descripción de la forma de cómo se fue construyendo el horno, además se enuncian algunas de las pruebas que se le realizaron, las cuales sirvieron para observar el comportamiento del horno. Unas de las cuales fueron en estado estable y en estado transitorio; dicho análisis se realizó desde una temperatura inicial hasta su temperatura de trabajo. Además se realizaron 2 pruebas al resorte AN20, una de las cuales fue determinar su constante de proporcionalidad después de haber sido sometido al tratamiento térmico. La otra fue para determinar su dureza antes y después de haber sido tratado térmicamente.

Además se describen las conclusiones a las que se llegó después de haber concluido el trabajo de construcción del horno.

## **-CAPITULO 5-**

# **CONSTRUCCION, ENSAMBLE Y PRUEBAS DEL HORNO**

En este capítulo, se describe la manera de como fue construido el horno, las máquinas empleadas para ello y las pruebas de funcionamiento que se le realizaron.

### **5.1 Descripción del proceso de fabricación.**

La construcción del horno fue realizada en tres etapas: Diseño, compra de materiales y fabricación. En la primera etapa se realizó el diseño general como se mostró en la figura 2.11 en la sección 2.5 del capítulo 2, donde se dibujó cada una de las partes que componen al horno. En la segunda etapa, se encuentra todo aquello que ya existe en el mercado, donde únicamente se seleccionó el material adecuado. Como tornillos, tuercas, aislante refractario, aceros, resistencias, ruedas, pirómetros y material eléctrico.

El trabajo más intenso fue el diseño y fabricación de los mecanismos y sus elementos, los cuales se fabricaron en máquinas herramientas, principalmente en torno y fresadora, mientras que la estructura y la puerta se fabricaron en pailería y soldadura. El diseño de los mecanismos no implicó estudio de esfuerzos ni resistencia de materiales, ya que en realidad no están sometidos a grandes cargas ni esfuerzos serios, lo que si implicó un poco de trabajo fue idearlos, pero gracias a la lluvia de ideas por parte de compañeros del trabajo así como de algunos proveedores se pudieron generar. Una vez generado el mecanismo, se procuró utilizar material económico y resistente a la oxidación, por ello la parte exterior del horno así como la puerta se hicieron de acero inoxidable.

Una vez definido el diseño de la estructura del horno y de los mecanismos, se fue despiezando el horno, de tal forma que se mandaron algunas piezas a producción y otras piezas fueron fabricadas por el autor del trabajo, en el taller del CIDESI. Esto con la ayuda de los técnicos del taller, indicándoles en los planos el tipo de material y las tolerancias requeridas. Cuando ya se contó con la estructura y con los elementos previamente fabricados, se dio paso al ensamble, el cual se realizó de la siguiente manera:

Primeramente, a la estructura se le ensamblaron sus 4 ruedas, como se muestra en la figura 5.1, posteriormente se monto el deflector junto con la turbina y el motor en su parte interna.

Tiempo después se procedió a pintar la estructura interna del horno con una pintura especial para alta temperatura, la cual no es flamable, así mismo también se pintaron las piezas correspondientes a cada mecanismo, junto con las patas del horno, como se observa en la figura 5.2.

Acto seguido se reunieron todas y cada las piezas de cada mecanismo para llevar acabo su ensamble en su posición adecuada. Se colocó la puerta en la posición a la cual había sido previamente diseñada. Una vez instalada la puerta, se conectaron las resistencias al tablero de control, el cual ya había sido previamente conectado internamente. Colocadas las resistencias en su posición correspondiente, se procedió a la colocación de la fibra aislante formando las paredes internas del horno, fijando éstas con seguros cerámicos y anclas, esto se aprecia en la figura 5.3. Por último se colocaron las láminas de acero inoxidable en la parte exterior del horno, las cuales fueron fijadas a la estructura del horno con tornillos esto con la finalidad de poder realizar un rápido mantenimiento al horno. Todo esto se muestra en las figuras 5.4, y 5.5 donde se puede apreciar en forma general al horno en su proceso final.



**Figura 5.1 Estructura del horno.**



**Figura 5.2** Estructura del horno con pintura de aluminio resistente a alta temperatura.



**Figura 5.3** Forma de colocación de la fibra cerámica en la estructura del horno.



**Figura 5.4** Cámara del horno eléctrico de relevado de esfuerzos en resortes.



**Figura 5.5** Horno eléctrico de relevado de esfuerzos en resortes.

## 5.2 Pruebas

Cuando se comenzó a desarrollar el diseño del horno, todos los cálculos y suposiciones se realizaron en papel, una vez realizados todo lo anterior, se paso a la etapa de construcción y ensamble, donde se llevó el diseño del horno del papel a la realidad, por lo cual es necesario experimentar y medir la capacidad física que presenta el horno. En este punto se presentan algunas de las pruebas más relevantes con sus resultados obtenidos.

### 5.2.1 Prueba de funcionamiento

En esta prueba lo que se verificó primordialmente fue que las resistencias funcionaran correctamente, que el sensor tipo "J" estuviera detectando la temperatura, que el pirómetro que controla la temperatura cortara el paso de la corriente a las resistencias cuando llegará a la temperatura a la cual fue programado, que el motor de la turbina estuviera girando correctamente, esta prueba se realizó sin carga alguna.

### 5.2.2 Prueba en estado transitorio con carga.

En esta prueba lo que se pudo comprobar fue que al introducir la carga dentro de la cámara del horno, y al poner en funcionamiento a la turbina el horno alcanzó la temperatura de 238°C, en un tiempo de 15.5 minutos, dicho tiempo esta dentro de los límites requeridos en el cálculo del diseño del horno.

Luego de haber alcanzado la temperatura a la cual se relevan los resortes, (dicha temperatura se establece de acuerdo al tamaño, al diámetro y al número de espiras del resorte a relevar), los resortes permanece dentro de la cámara por un lapso de 7 minutos, después de éste tiempo transcurrido, se sacan las charolas de los resortes ya relevados. La temperatura dentro de la cámara desciende unos 50°C, esto mientras dure el tiempo en que se realiza un cambio de material a relevar. Habiendo introducido una nueva cantidad de resortes a relevar, se pone a funcionar la turbina y el tiempo en alcanzar nuevamente la temperatura de 238°C es muy rápido, esto se debe a que la temperatura dentro de la cámara del horno tiende a homogeneizarse mas rápidamente con la ayuda de la turbina.

Esta ayuda a que el horno permanezca menos tiempo en funcionamiento y más tiempo de reposo. En los resortes tratados térmicamente en esta prueba se observó que tenían una mejor textura a los que en la actualidad son relevados por ellos.

### 5.3 Determinación de la constante de proporcionalidad “K” del resorte AN20

En esta prueba fue realizada en los Laboratorios de pruebas Mecánicas del CIDESI. En la cual lo que se evalúa es la fuerza que se requiere para comprimir el resorte AN20 en 1” de longitud, el cual tiene las siguiente datos:

- Longitud aproximada: 6”
- Diámetro del alambre: 0.237”
- Peso aproximado: 0.250 Kg.
- Número de espiras: 9

El cual se muestra en la figura 5.6 a continuación.

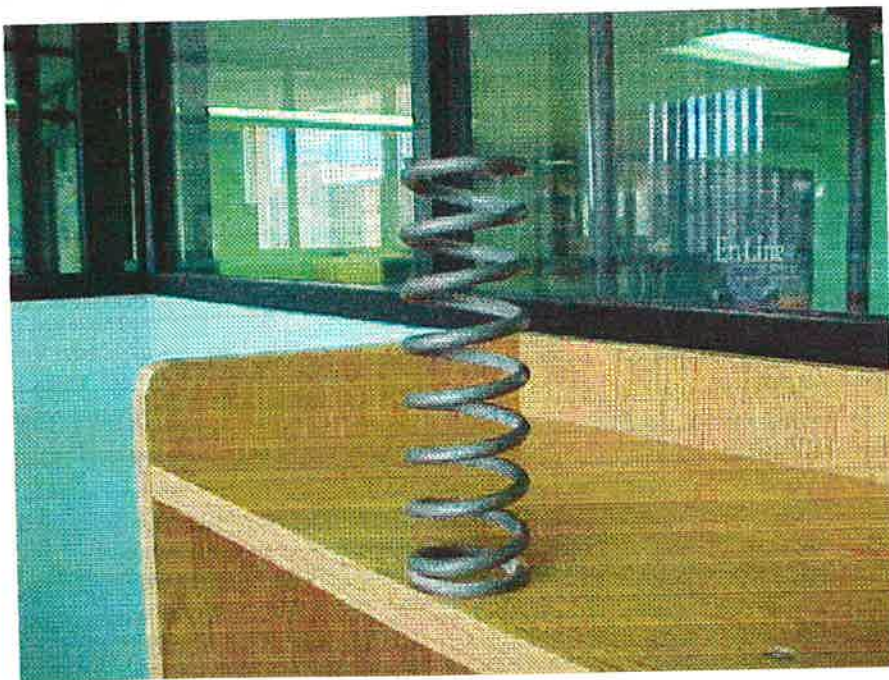


Figura 5.6 Resorte AN20.



### 5.3.1 Resultados

El reporte del laboratorio de pruebas mecánicas se muestra a continuación.



**CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL**

**SNP CONACYT**

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



**LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS**

REG. No. PM-00201

HOJA 1 DE 4

O. S. POSGRA-01

CLIENTE: ING. JOSE LUIS GAYTAN RECIBIDA: 28 DE SEPTIEMBRE DE 2000  
 INFORME: ENSAYO DE COMPRESIÓN ENTREGADO: 29 DE SEPTIEMBRE DE 2000  
 DIRECCIÓN: CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL QUERÉTARO QRO. TEL 2206426

#### MATERIAL RECIBIDO

DESCRIPCIÓN MUESTRAS DE RESORTES AN20

ESPECIFICACIONES SIN ESPECIFICACIONES

PROBETAS DOS

NORMA DEL ENSAYO SEGÚN INDICACIONES DEL CLIENTE

#### MAQUINAS E IMPLEMENTOS

MAQUINA UNIVERSAL INSTRON

MODELO 4482

No. DE SERIE C3911

FECHA DE CALIBRACION ABRIL DE 2000



Este documento es válido sólo en original y con las correspondientes firmas y sello.  
 No es autorizada la reproducción parcial o total de este documento sin el permiso expreso del laboratorio.

Av. Playa Pie de la Cuesta 702, Desarrollo Habitacional San Pablo, Santiago de Querétaro, Qro., 76130  
 Tels. (4) 220 64 26, 220 64 60, 220 63 64, 220 63 16 Fax: 220 72 99

Nº **11271**



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS  
**REPORTE DE ENSAYOS  
DE COMPRESIÓN**

REG. No. PM-00201  
HOJA 2 DE 4  
O. S. POSGRA-01

REPORTE DE LA MUESTRA				
IDENTIFICACION DEL LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE	LONGITUD mm	FUERZA Kgf	K Kgf/mm
1	AN20-1	25.4	65.24	2.56
2	AN20-2	38.1	104.20	2.73

OBSERVACIONES \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_


  
Q.A. MA. CONCEPCION OBREGÓN ZEPECA ANALISTA
  
DR. JOEL CHAPARRO GONZALEZ RESPONSABLE

ESTE REGISTRO NO ES VALIDO SIN LAS CORRESPONDIENTES FIRMAS Y SELLO  
ESTE INFORME AMPARA ÚNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENVIADAS  
NO SE AUTORIZA SU REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL SIN EL PERMISO EXPRESO DEL LABORATORIO  
AV. PLAYA PIE DE LA CUESTA No. 702 DESARROLLO HABITACIONAL SAN PABLO, QUERETANO, QRO. C.P. 78190 FAX 20-83-66



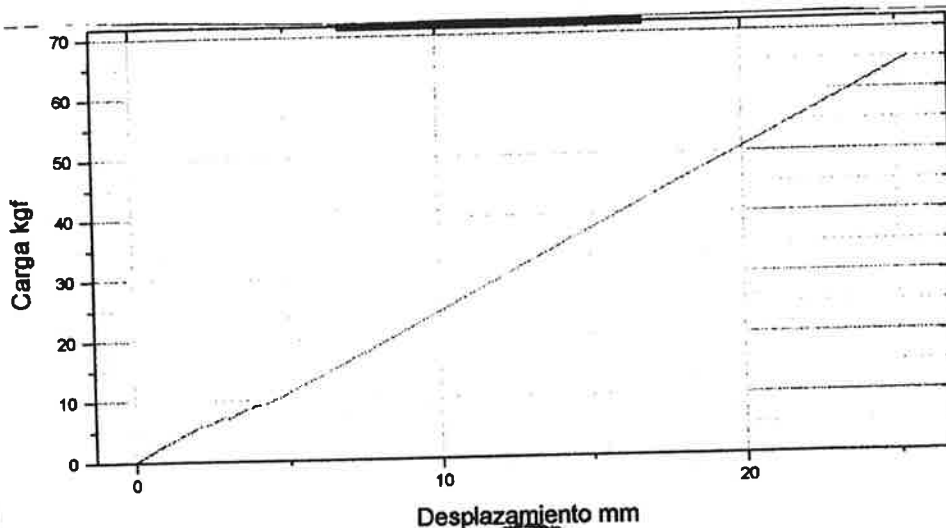
CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-00201  
 HOJA 3 DE 4  
 O. S. POSGRA-01



Desplazamiento mm

OBSERVACIONES

RESORTE N° 1



*M.C. Concepción Obregón*  
 M.C. CONCEPCION OBREGÓN

ANALISTA

*M.C. Joel Chaparro González*  
 M.C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ

RESPONSABLE

ESTE REGISTRO NO ES VALIDO SIN LAS CORRESPONDIENTES FIRMAS Y SELLO  
 ESTE INFORME AMPLIA UNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS  
 NO SE AUTORIZA SU REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL SIN EL PERMISO EXPRESO DEL LABORATORIO  
 AV. PLAYA PIE DE LA CUESTA No. 702 DESARROLLO HABITACIONAL SAN PABLO, QUERETARO, QRO, C.P. 78130 FAX 20-43-06

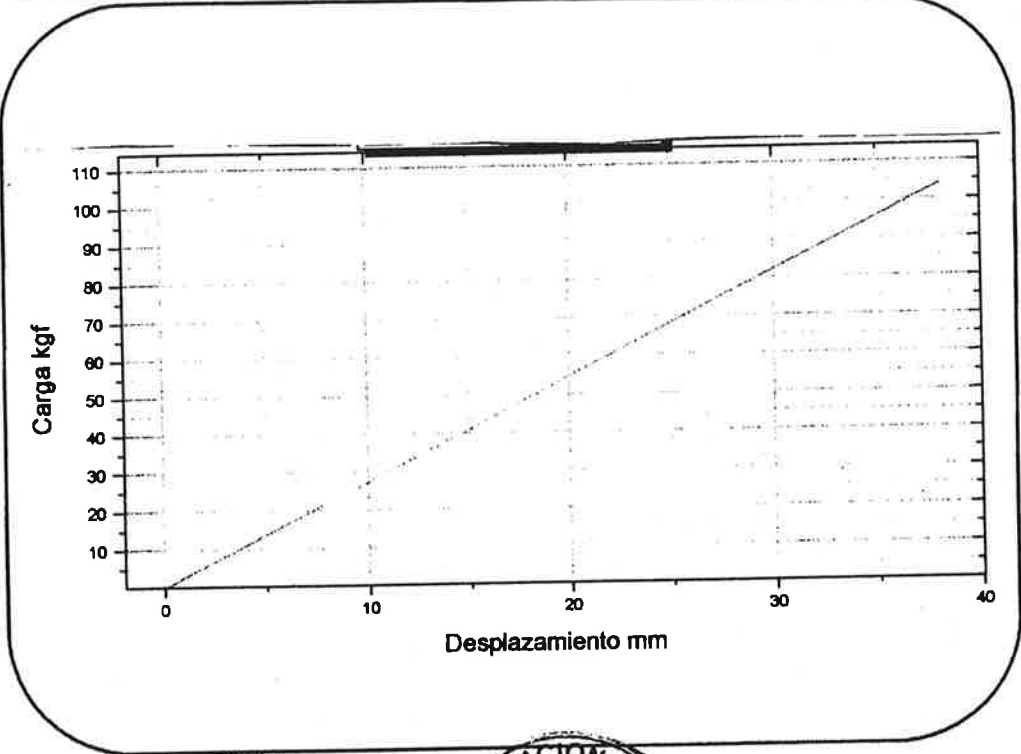


CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS  
GRAFICO DEL ENSAYO

REG. No. PM-00201  
HOJA 4 DE 4  
O. S. POSGRA-01



OBSERVACIONES RESORTE N° 2

*M. Concepción Obregón*  
O.A. MA. CONCEPCION OBREGÓN  
ANALISTA



*M.C. Joel Chaparro González*  
M.C. JOEL CHAPARRO GONZALEZ  
RESPONSABLE

ESTE REGISTRO NO ES VALIDO SIN LAS CORRESPONDIENTES FIRMAS Y SELLO  
ESTE INFORME AMPARA UNICAMENTE A LAS MUESTRAS ENSAYADAS  
NO SE AUTORIZA SU REPRODUCCION PARCIAL O TOTAL SIN EL PERMISO EXPRESO DEL LABORATORIO  
AV. PLAYA PIE DE LA CUESTA No. 102 DESARROLLO HABITACIONAL SAN PABLO, QUERETARO, QRO, C.P. 78130 FAX 20-83-86

## 5.4 Prueba de Dureza al resorte AN20 antes de ser tratado térmicamente



CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

REG. No. PM-00201  
 HOJA 1 DE 2  
 O. S. POSGRADO

CLIENTE: ING. JOSE LUIS SANCHEZ RECIBIDA: 26/08/2000  
 INFORME: ENSAYO DE DUREZA ENTREGADO: 2/10/2000  
 DIRECCIÓN: CIDESI TEL. \_\_\_\_\_

### MATERIAL RECIBIDO

DESCRIPCIÓN RESORTE CON TRATAMIENTO Y RESORTE SIN TRATAMIENTO

ESPECIFICACIONES SEGÚN ESPECIFICACIONES DADAS POR EL CLIENTE

PROBETAS DOS

NORMA DEL ENSAYO ASTM E 92

### MAQUINAS E IMPLEMENTOS

MAQUINA DUROMETRO VICKERS

MODELO LIMITED

No. DE SERIE HTM-4771

FECHA DE CALIBRACION ABRIL DEL 2000



Este documento es válido sólo en original y con las correspondientes firmas y sello.  
 No se autoriza la reproducción parcial o total de este documento sin el permiso expreso del laboratorio.

Av. Playa Ple de la Cuesta 702, Desarrollo Habitacional San Pablo, Santiago de Querétaro, Qro., 76130  
 Tels. (4) 220 64 26, 220 64 60, 220 63 64, 220 63 16 Fax: 220 72 98

Nº 11275

### 5.4.1 Resultados



CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL



LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

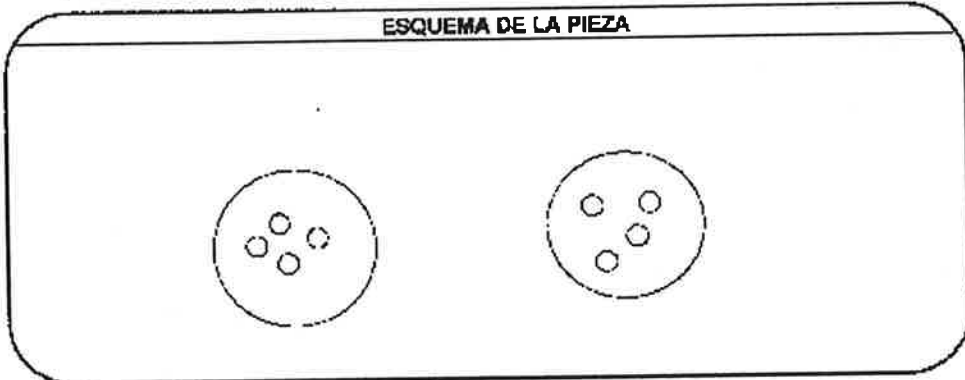
ENSAYO DE DUREZA

REG. No. PM0221

HOJA 2 DE 2

O. S. INDUSTRIAL

ESQUEMA DE LA PIEZA



DUREZA		RESULTADOS OBTENIDOS	
PUNTO	DUREZA RESORTE CON TRAT.	PUNTO	DUREZA RESORTE SIN TRAT.
1	946.0 HV10 (68.0 HRC)	1	945.0 HV10 (68.0 HRC)
2	946.0 HV10 (68.0 HRC)	2	949.0 HV10 (68.0 HRC)
3	946.0 HV10 (68.0 HRC)	3	943.0 HV10 (68.0 HRC)
4	946.0 HV10 (68.0 HRC)	4	945.0 HV10 (68.0 HRC)
5	946.0 HV10 (68.0 HRC)	5	945.0 HV10 (68.0 HRC)

COMENTARIOS

*(Faint handwritten notes and a circular stamp are visible in this section.)*

TEC. GERARDO CAMPILLO PEREZ

ANALISTA

O. A. M. CONCEPCION OBREGON ZEPEDA

RESPONSABLE

ESTE DOCUMENTO ES UNO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS DEL CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL DEL CONACYT. SE DEBE LEER EN SU CONJUNTO CON EL REPORTE DE RESULTADOS Y EL REPORTE DE CALIBRACION DEL EQUIPO DE PRUEBAS MECANICAS PARA OBTENER LA INFORMACION COMPLETA DEL RESULTADO DE LA PRUEBA.

## 5.5 Prueba de Dureza al resorte AN20 después de haber sido tratado térmicamente



CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

SNP CONACYT



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS

REG. No. PM-00201

HOJA 1 DE 2

O. S. POSGRADO

CLIENTE: ING. JOSE LUIS SANCHEZ RECIBIDA: 26/09/2000  
 INFORME: ENSAYO DE DUREZA ENTREGADO: 2/10/2000  
 DIRECCIÓN: CIDESI TEL. \_\_\_\_\_

## MATERIAL RECIBIDO

DESCRIPCIÓN RESORTE CON TRATAMIENTO Y RESORTE SIN TRATAMIENTOESPECIFICACIONES SEGÚN ESPECIFICACIONES DADAS POR EL CLIENTEPROBETAS DOSNORMA DEL ENSAYO ASTM E 92

## MAQUINAS E IMPLEMENTOS

MAQUINA DUROMETRO VICKERSMODELO LIMITEDNo. DE SERIE HTM-4771FECHA DE CALIBRACION ABRIL DEL 2000

Este documento es válido sólo en original y con las correspondientes firmas y sello.  
 No se autoriza la reproducción parcial o total de este documento sin el permiso expreso del laboratorio.

Av. Playa Pie de la Cuesta 702, Desarrollo Habitacional San Pablo, Santiago de Querétaro, Qro., 76130  
 Tels. (4) 220 64 26, 220 64 66, 220 63 64, 220 63 16 Fax: 220 72 99

Nº 11275

# 5.5.1 Resultados

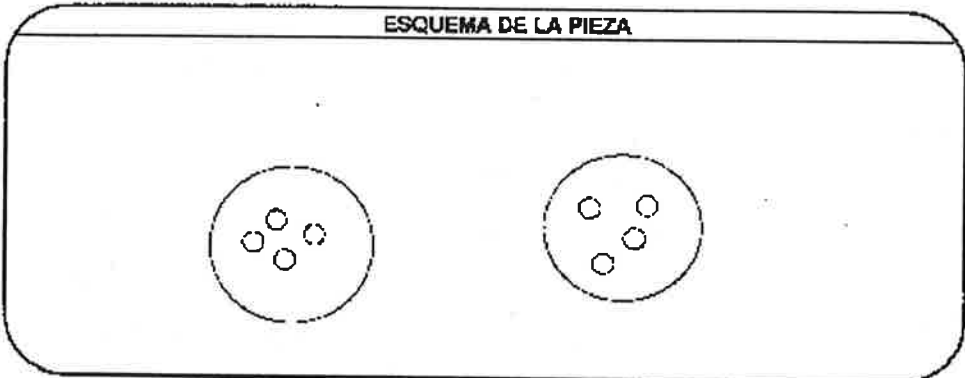


CENTRO DE INGENIERIA Y DESARROLLO INDUSTRIAL



**LABORATORIO DE PRUEBAS MECANICAS**  
**ENSAYO DE DUREZA**

REG. No. PM 00221  
HOJA 2 DE 2  
O. S. °DEGRADO



**RESULTADOS OBTENIDOS**

PUNTO	DUREZA RESORTE CON TRAT.	PUNTO	DUREZA RESORTE SIN TRAT.
1	946.0 HV10 (68.0 HRC)	1	945.0 HV10 (68.0 HRC)
2	946.0 HV10 (68.0 HRC)	2	949.0 HV10 (68.0 HRC)
3	946.0 HV10 (68.0 HRC)	3	948.0 HV10 (68.0 HRC)
4	946.0 HV10 (68.0 HRC)	4	948.0 HV10 (68.0 HRC)
5	946.0 HV10 (68.0 HRC)	5	948.0 HV10 (68.0 HRC)

**COMENTARIOS**

TEC. GERARDO [Signature] PEREZ  
ANALISTA

QA. VIVIANA [Signature] GONZALEZ  
RESPONSABLE

SENER - SERVICIO NACIONAL DE EMPLEO ESPECIAL - INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CALABAZAS DE LA VIEJA - CALABAZAS DE LA VIEJA, VERACRUZ  
CALLE TOLUCA 1000 - P.O. BOX 1000 - CALABAZAS DE LA VIEJA, VERACRUZ  
TEL: (01) 228 111 1111 - FAX: (01) 228 111 1111 - E-MAIL: SERVICIO@SENER.COM.VM  
SENER VERACRUZ - CALABAZAS DE LA VIEJA - VERACRUZ - MÉXICO



## CONCLUSIONES

El trabajo de tesis fue el diseñar y construir un horno para el relevado de esfuerzos en resortes, que contribuya a una metodología que permita la realización de nuevos y mejores hornos, los cuales se construirán en México con material y mano de obra nacional, para con ello reducir la importación de hornos industriales y desarrollar una propia tecnología dentro del país.

Las ventajas que tiene el horno contra los procesos actual

- *Una ventaja que tiene la utilización de este horno, es el aumento de la producción, ya que en la actualidad la producción de los empresarios es de aproximadamente 100 piezas de resorte por hora, cuyas características son: Alambre MB de diámetro 0.237", de 9 espiras (Aproximadamente 6" de longitud), cuyo peso es de aproximadamente 0.250 kg. Mientras que la producción en el horno diseñado es de aproximadamente 240 piezas de resortes por hora, los cuales han de ser relevados a una temperatura de 238 °C. Obviamente esta producción se reducirá o se aumentará de acuerdo a la temperatura y tiempo de permanencia los resortes dentro de la cámara.*
- *La disminución de piezas rechazadas, lo cual se ve reflejado en el aumento de la productividad y aumento en la producción lo que trae consigo un aumento en las utilidades para la empresa.*
- *Facilidad de manejo, ya que el operador solamente selecciona el valor de la temperatura a la cual deberán ser relevados los resortes, y esperar el tiempo necesario cuando el pirómetro llegue a la temperatura señalada, esto para dar tiempo a que los resortes estén bien bañados homogéneamente a la misma temperatura.*
- *Además la ventaja más importante que tiene este horno con respecto a otros hornos que existen en el mercado en la actualidad es la utilización de un deflector en la parte inferior de la cámara del horno, la cual junto con la turbina tienen la función de homogeneizar a la misma temperatura el interior de toda la cámara del horno.*
- *Una ventaja importante mas, digna de mencionar, es que la temperatura dentro de la cámara del horno se controla por medio de un pirómetro, el cual tiene la función de medir la temperatura que se tiene en la cámara del horno, por lo tanto, conocer el calor*

*proporcionado por las resistencias conectadas en delta, esto para disminuir el amperaje y proporcionar una mayor potencia. Lo que trae consigo es que el horno permanecerá encendido solamente el tiempo requerido y permanecerá apagado más tiempo, ya que la temperatura dentro de la cámara del horno permanece constante, mientras la puerta no permanezca abierta.*

*- Aunado a lo anterior se cuenta con la facilidad de operación, por parte de las personas que se dedican a la fabricación de resortes.*

**ANEXO I****PROPIEDADES FISICAS DE LOS METALES**



**ANEXO II****CONDUCTIVIDAD TERMICA Y COEFICIENTE  
CONVECTICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE  
ALGUNOS MATERIALES**

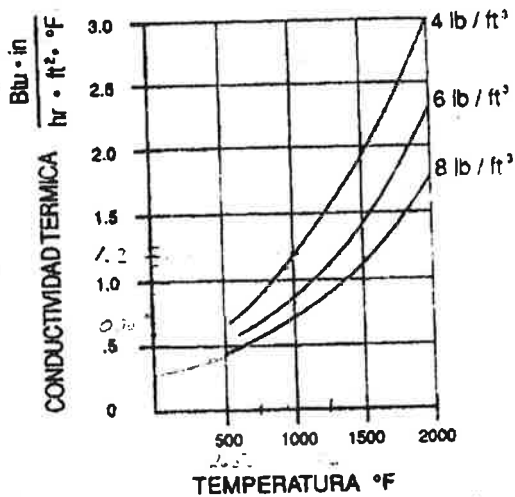
**Tabla 1-1 Conductividad térmica de diversos materiales en 0 °C**

<i>Material</i>	Conductividad térmica <i>k</i>	
	W/m °C	Btu/h·pie· °F
<b>Metales:</b>		
Plata (pura)	410	237
Cobre (puro)	385	223
Aluminio (puro)	202	117
Níquel (puro)	93	54
Hierro (puro)	73	42
Acero al carbón, 1% C	43	25
Plomo (puro)	35	20.3
Acero cromo-níquel (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
<b>Sólidos no metálicos:</b>		
Cuarzo, paralelo al eje	41.6	24
Magnesita	4.15	2.4
Mármol	2.08–2.94	1.2–1.7
Arena	1.83	1.06
Vidrio de ventana	0.78	0.45
Arce o roble	0.17	0.096
Aserrín	0.059	0.034
Fibra de vidrio	0.038	0.022
<b>Líquidos:</b>		
Mercurio	8.21	4.74
Agua	0.556	0.327
Amoníaco	0.540	0.312
Aceite lubricante, SAE 50	0.147	0.085
Freón 12, CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	0.073	0.042
<b>Gases:</b>		
Hidrógeno	0.175	0.101
Helio	0.141	0.081
Aire	0.024	0.0139
Vapor de agua (saturado)	0.0206	0.0119
Bióxido de carbono	0.0146	0.00844

**Tabla 1-2** Valores aproximados de los coeficientes de transferencia de calor por convección

<i>Modo</i>	<i>h</i>	
	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$Btu/h \cdot pie^2 \cdot ^\circ F$
<b>Convección libre, <math>\Delta T = 30^\circ C</math></b>		
Placa vertical 0.3 m [1 pie] de altura en el aire	4.5	0.79
Cilindro horizontal, 5 cm de diámetro, en el aire	6.5	1.14
Cilindro horizontal, 2 cm de diámetro, en agua	890	157
<b>Convección forzada</b>		
Flujo de aire a 2 m/s sobre placa cuadrada de 0.2 m	12	2.1
Flujo de aire a 35 m/s sobre placa cuadrada a 0.75 m	75	13.2
Aire a 2 atm soplando en tubo de 2.5 cm de diámetro a 10 m/s	65	11.4
Agua a 0.5 kg/s fluyendo en tubo de 2.5 cm de diámetro	3500	616
Flujo de aire a través de un cilindro de 5 cm de diámetro con velocidad de 50 m/s	180	32
<b>Agua hirviendo</b>		
En una piscina o recipiente	2500–35 000	440–6200
Fluyendo en un tubo	5000–100 000	880–17 600
<b>Condensación de vapor de agua, 1 atm</b>		
Superficies verticales	4000–11 300	700–2000
Tubos horizontales al exterior	9500–25 000	1700–4400

TABLA 1.3 PROPIEDADES FISICAS DE LA FIBRA CERÁMICA INSWOOL



■ **PRESENTACION:**

Densidad: 4, 6 y 8 lbs/ft<sup>3</sup> (64, 96 y 128 kg/m<sup>3</sup>)  
 Espesor: 1/4", 1/2", 1", 1 1/2" y 2" (6, 13, 25, 38 y 51 mm)  
 Ancho: 24" y 48" (0.6 y 1.2 m)  
 Largo: 12 1/2, 25 y 50 ft (3.8, 7.6 y 15.2 m)

■ Los datos técnicos están basados en el promedio de pruebas de laboratorio y sujetos a variaciones individuales.

■ La fibra HP y HTZ son producidas por el proceso "spun" Este proceso produce fibras largas que dan a nuestros productos una mayor resistencia a la tensión.

■ Las fibras LT, RT y HT son producidas por el proceso "blown" Este proceso produce una fibra fina y suave ideal para aplicaciones como el aislamiento de moldes de fundición.



**ANEXO III****VALORES DE PROPIEDADES DE GASES A PRESION  
ATMOSFERICA**

**APENDICE G-1.** Valores de propiedades de gases a presión atmosférica (Sistema inglés de unidades)\*

$T$ , F	$\rho$ , lb/pie <sup>3</sup>	$c_p$ , Btu/lb F	$\mu$ , lb/seg pie	$\nu$ , pie <sup>2</sup> /seg	$k$ , Btu/h pie <sup>2</sup> F	$\alpha$ , pie <sup>2</sup> /h	Pr
Aire							
-280	0.2248	0.2452	0.4653	2.070	0.005342	0.09691	0.770
-190	0.1478	0.2412	0.6910	4.675	0.007936	0.2226	0.753
-100	0.1104	0.2403	0.8930	8.062	0.01045	0.3939	0.739
-10	0.0882	0.2401	1.074	10.22	0.01287	0.5100	0.722
80	0.0735	0.2402	1.241	16.88	0.01516	0.8587	0.708
170	0.0623	0.2410	1.394	22.38	0.01735	1.156	0.697
260	0.0551	0.2422	1.536	27.88	0.01944	1.457	0.689
350	0.0489	0.2438	1.669	31.06	0.02142	1.636	0.683
440	0.0440	0.2459	1.795	40.80	0.02333	2.156	0.680
530	0.0401	0.2482	1.914	47.73	0.02519	2.531	0.680
620	0.0367	0.2520	2.028	55.26	0.02692	2.911	0.680
710	0.0339	0.2540	2.135	62.98	0.02862	3.324	0.682
800	0.0314	0.2568	2.239	71.31	0.03022	3.748	0.684
890	0.0294	0.2593	2.339	79.56	0.03183	4.175	0.686
980	0.0275	0.2622	2.436	88.58	0.03339	4.631	0.689
1070	0.0259	0.2650	2.530	97.68	0.03483	5.075	0.692
1160	0.0245	0.2678	2.620	106.9	0.03628	5.530	0.696
1250	0.0232	0.2704	2.703	116.5	0.03770	6.010	0.699
1340	0.0220	0.2727	2.790	126.8	0.03901	6.502	0.702
1520	0.0200	0.2772	2.955	147.8	0.04178	7.536	0.706
1700	0.0184	0.2815	3.109	169.0	0.04410	8.514	0.714
1880	0.0169	0.2860	3.258	192.8	0.04641	9.602	0.722
2060	0.0157	0.2900	3.398	216.4	0.04880	10.72	0.726
2240	0.0147	0.2939	3.533	240.3	0.05098	11.80	0.734
2420	0.0138	0.2982	3.668	265.8	0.05348	12.88	0.741
2600	0.0130	0.3028	3.792	291.7	0.05550	14.00	0.749
2780	0.0123	0.3075	3.915	318.3	0.05750	15.09	0.759
2960	0.0116	0.3128	4.029	347.1	0.0591	16.40	0.767
3140	0.0110	0.3196	4.168	378.8	0.0612	17.41	0.783
3320	0.0105	0.3278	4.301	409.9	0.0632	18.36	0.803
3500	0.0100	0.3390	4.398	439.8	0.0646	19.05	0.831
3680	0.0096	0.3541	4.513	470.1	0.0663	19.61	0.863
3860	0.0091	0.3759	4.611	506.9	0.0681	19.92	0.916
4160	0.0087	0.4031	4.750	546.0	0.0709	20.21	0.972
Helio							
-456		1.242	5.66		0.0061		
-400	0.0915	1.242	33.7	3.68	0.0204	0.1792	0.74
-200	0.211	1.242	84.3	39.95	0.0536	2.044	0.70
-100	0.0152	1.242	105.2	69.30	0.0680	3.599	0.694
0	0.0119	1.242	122.1	102.8	0.0784	5.299	0.70
200	0.00829	1.242	154.9	186.9	0.0977	9.490	0.71

**APENDICE G-2. Valores de propiedades de gases a presión atmosférica  
(Sistema de unidades SI)\***

T, K	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ , J/kg K	$\mu$ , kg/m·s	$\nu$ , m <sup>2</sup> /s	$k$ , W/m K	$\alpha$ , m <sup>2</sup> /s	Pr
------	----------------------------	----------------	----------------	---------------------------	-------------	------------------------------	----

**Aire**

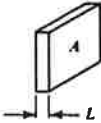
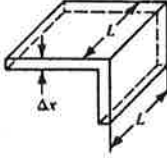
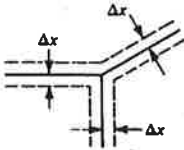
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3678	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.018009	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.488	9.49	0.02227	0.13161	0.722
300	1.1774	1.0057	1.983	15.68	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	28.86	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5584	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.674	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

**Helio**

3		5.200	8.42		0.0106		
33	1.4657	5.200	50.2	3.42	0.0353	0.04625	0.74
144	3.3799	5.200	125.5	37.11	0.0928	0.5275	0.70
200	0.2435	5.200	166.6	64.38	0.1177	0.9288	0.694
253	0.1906	5.200	181.7	95.50	0.1357	1.3675	0.70
366	0.13280	5.200	230.5	173.6	0.1691	2.449	0.71
477	0.10204	5.200	275.0	269.3	0.197	3.716	0.72
589	0.08282	5.200	311.3	375.8	0.225	5.215	0.72
700	0.07032	5.200	347.5	494.2	0.251	6.661	0.72
800	0.06023	5.200	381.7	634.1	0.275	8.774	0.72
900	0.05286	5.200	413.6	781.3	0.298	10.834	0.72

**ANEXO IV****FACTORES DE FORMA DE CONDUCCION**

Tabla 3-1. Factores de forma de conducción†

Sistema físico	Esquema	Factor de forma	Restricciones
Pared plana		$\frac{A}{L}$	Flujo de calor unidimensional
Conducción a través del filo de la sección de dos paredes —temperaturas uniformes en la superficie interior y exterior		0.54L	La dimensión interior debe ser mayor que (1/5)Δx
Conducción a través de la esquina de la sección de tres paredes homogéneas —temperaturas uniformes en la superficie interior y exterior		0.15Δx	$\Delta x \ll L$ $L$ es la longitud de la pared

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] *Diccionario Enciclopédico "Salvat", (1979) Editorial Salvat Editores.*
- [2] *Catálogos de Hornos Eléctricos de Diferentes Fabricantes*
- [3] *Catalogo de OGDEN 1998 "Process Electric Heat and Control Productsc",.*
- [4] *Catalogo de Continental Industries, Inc. 1997, "Solid State Relays and I/O Modules".*
- [5] *Manual de ruedas de la empresa RODACARGA*
- [6] *Manual de motores ABB estándar de la empresa ABB SISTEMAS S.A. DE C.V.*
- [7] *Manual de motores BALDOR*
- [8] *Productos de Fibra Cerámica Kaowool, 1997 "Thermal Ceramics".*
- [9] *J.R. Welty, C.E. Wicks and R.E. Wilson, 1991, "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", Editorial Limusa S.A. DE C.V.*
- [10] *B.V. Karlekar, R.M. Desmond, 1995, 2ª. Edición, "Transferencia de Calor", Editorial McGraw Hill, Interamericana de México, S.A. de C.V.*
- [11] *J.P. Holman, 1991 "Heat Transfer", Editorial C.E.C.S.A.*
- [12] *Enríquez Harper, 1994, 7ª Impresión, "El ABC de las Instalaciones Eléctricas", Editorial Limusa S.A. de C.V. Noriega Editores México D.F.*

- [13] *José A. Manrique, 1981, "Transferencia de Calor", Editorial Harla S.A. de C.V. Impreso en México.*
- [14] *Rubio González Carlos, 1999 " Apuntes de Elemento Finito Teoría y Aplicaciones con ANSYS", Impreso en Querétaro, Qro. México.*
- [15] *George R. Buchanan, 1995, Second Edition, "Finite Element Analysis", Editorial McGrawHill.*
- [16] *J.N. Reddy, " An introduction to the Finite Element Method", 1993, Editorial McGraw Hill, Inc.*
- [17] *Comini, J. Hardback, 1994, "Finite Element Analysis Heat Transfer", Editorial Taylor & Francis, Inc.*
- [18] *Saeed Maveeni, Minesota State University "Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS", 1999, Editorial Prantice Hall Inc.*
- [19] *Seminario de "Transferencia de Calor con ANSYS", Versión 5.5, 2000 Sistemas y Servicios de Consultoría de México S.A. de C.V.*
- [20] *"ANSYS User's Manual For Revision 5.5" Swason Analisis Systems, Inc. Houston, Pa.*
- [21] *Donald R. Askeland, 1998, "Ciencia e ingeniería de los materiales, 3<sup>er</sup> ed.", Editorial International Thomsom Editores, S.A. de C. V. Printed in México.*

