

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR AERONÁUTICO

CARRERA DE MECÁNICA AERONÁUTICA

**CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO PARA TRATAMIENTOS
TÉRMICOS**

POR:

FLORES DEFAS CRISTIAN SANTIAGO

Proyecto de Grado como requisito para la obtención del Título de:

TECNÓLOGO EN MECÁNICA AERONÁUTICA

2008

HOJA DE VIDA

DATOS PERSONALES:

APELLIDOS: FLORES DEFAS

NOMBRES: CRISTIAN SANTIAGO

FECHA DE NACIMIENTO: 12 DE FEBRERO DE 1984

LUGAR DE NACIMIENTO: QUITO- PICHINCHA

EDAD: 23 AÑOS

ESTADO CIVIL: SOLTERO

ESTUDIOS REALIZADOS

PRIMARIA: HERMANO MIGUEL LA SALLE

SECUNDARIA: INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR ECUADOR

SUPERIOR: INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR AERONÁUTICO-
LATACUNGA

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR:

FLORES DEFAS CRISTIAN SANTIAGO

DIRECTOR DE LA CARRERA DE MECÁNICA AERONÁUTICA

ING. GUILLERMO TRUJILLO

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acritud.- Sin. Aspereza, desabrimiento.

Aislamiento.- Acción o efecto de aislar o aislarse. Pieza de material aislante que sirve para interceptar el paso de la electricidad o y el calor.

Arcilla refractaria.- Materia prima para fabricación de productos refractarios aluminosos y siliciosos, bien directamente como ligante, bien calcinada para obtener chamota.

Arrabio.- Hierro alto en carbono producido en el horno alto, que se trata en el convertidor de oxígeno para obtener acero.

Asténico.- Sin. Fatigado, cansado, agotado.

Calor específico.- Energía requerida para calentar 1 °C o K la unidad de masa del producto. Normalmente se expresa en kJ/ kgK, aunque es frecuente también en Wh/kgK.

Cemento.- Ligante hidráulico utilizado en la preparación de hormigones refractarios densos y aislantes. Se emplean normalmente el cemento fundido y el superaluminoso.

Conductividad térmica.- Característica λ de los cuerpos, fundamentalmente en el cálculo del calor transmitido por conducción. Se expresa en W/mK.

Chamota.- Materia prima procedente de la calcinación de arcillas adecuadas; utilizadas frecuentemente en la fabricación de productos refractarios aluminosos.

Enlucido.- Masa refractaria de grano muy fino que se usa para recubrimiento de otros productos refractarios.

Estratos.- Masa mineral de gran extensión, en forma de capas que conservan cierto paralelismo, en situación horizontal, vertical u oblicua.

Ferroaleaciones.- Compuestos químicos de Fe con Mn, Mo, Cr, Ti, etc., obtenidos por fusión en hornos de arco. Por extensión se aplica el nombre a otros productos, obtenidos de forma semejante en hornos de arco. (SiMn, Si metal, etc.)

Fibras cerámicas.- Productos refractarios obtenidos por fusión en hornos de arco y posterior soplado o centrifugado. Pueden ser de Al_2O_3 , SiO_2 , C, etc., para temperaturas cada vez más elevadas.

Mortero.- Masa refractaria utilizada para unión de ladrillos refractarios en la construcción de paredes, soleras, bóvedas, etc.

Regulación.- Control de una variable en el interior de un horno. La mas frecuente es la temperatura, pero puede ser: la presión, un componente de la atmósfera, el potencial del carbónico, etc.

Resistencia eléctrica.- En esta obra se refiere al elemento del interior del horno que se calienta por el efecto Joule al aplicar una tensión eléctrica adecuada. Las resistencias pueden ser de alambre, de pletina, blindadas, etc.

Revenido.- Tratamiento térmico de los aceros que sigue casi siempre al temple. En las aleaciones ligeras se denominan, a veces, revenido a lo que es realidad maduración o envejecimiento.

Solera.- Parte inferior de la cámara del horno.

Temple.- Tratamiento térmico de los aceros que consta el calentamiento a temperatura y enfriamiento rápido en el tanque de temple en agua, aceite, sales, etc. Se denominan a veces temple de aleaciones ligeras a la, más correspondiente llamada solubilización.

Tratamiento térmico.- Procesos netamente diferenciados a los de la fusión y de calentamiento previo a la deformación plástica.

Tolvas.- Cajas de recolección de materia en los altos hornos.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **FLORES DAFAS CRISTIAN SANTIAGO**, como requerimiento parcial a la obtención del título de **TECNÓLOGO EN MECÁNICA AERONÁUTICA**.

ING. TOMAS IBUJES
DIRECTOR DE PROYECTO

Latacunga, 27 de Noviembre 2007

DEDICATORIA

Este proyecto de grado dedico a mis padres quienes me apoyaron a cada momento y decisión que tome en mi vida, a los cuales estoy agradecido por inculcarme valores de ética y moral que están reflejados en mi persona.

A mi madre quien supo apoyarme desinteresadamente cada instante de mi vida con su sacrificio y palabras de aliento para que sobresalga ante cualquier adversidad, motivo por el cual llegue a dar un paso más de mi vida y culminar mi carrera profesional.

No me queda mas que decirte GRACIAS MAMITA por lo que significas en mi vida.

FLORES DEFAS CRISTIAN SANTIAGO

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por darme la fuerza necesaria para que cada día de un paso en la consecución de mis metas, a mi familia quienes son la voz de aliento que me guía siempre adelante, a mi tío Fabián Defas por servirme de ejemplo de madurez y tranquilidad y sobre todo por apoyarme desinteresadamente a la distancia.

FLORES DEFAS CRISTIAN SANTIAGO

ÍNDICE GENERAL

TEMA PÁGINAS

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

| | |
|---|---|
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2 Definición del problema..... | 1 |
| 1.3 Objetivos..... | 2 |
| 1.3.1 General..... | 2 |
| 1.3.2 Específicos..... | 2 |
| 1.4 Alcance..... | 2 |
| 1.5 Justificación..... | 3 |
| 1.6 Tratamiento térmico..... | 3 |
| 1.6.1 Principios del tratamiento térmico del acero..... | 5 |
| 1.7 Selección del tipo de horno para el I.T.S.A..... | 8 |

CAPÍTULO II

DISEÑO DEL HORNO

| | |
|---|----|
| 2.1 Transferencia de calor..... | 9 |
| 2.2 Conductividad térmica..... | 9 |
| 2.3 Transferencia calorífica..... | 11 |
| 2.4 Conducción..... | 12 |
| 2.5 Convección..... | 13 |
| 2.6 Conducción y convección combinadas..... | 14 |

| | |
|--|----|
| 2.7 Enfoque de bulto..... | 16 |
| 2.8 Cálculo de los tiempos de calentamiento por los gráficos de Heisler..... | 18 |
| 2.9 Materiales a tratar térmicamente..... | 20 |

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE PARTES Y DE COMPONENTES PARA LA ELABORACIÓN DEL HORNO

| | |
|---|----|
| 3.1 Generalidades de las resistencias de calentamiento..... | 21 |
| 3.2 Materiales de las resistencias de calentamiento..... | 22 |
| 3.2.1 Aleaciones de Fe-Cr-Al..... | 22 |
| 3.2.2 Resistencias arrolladas en espiral sobre ranuras cerámicas..... | 23 |
| 3.3 Materiales refractarios y aislantes..... | 24 |
| 3.3.1 Generalidades..... | 24 |
| 3.3.2 Mortero refractario..... | 26 |
| 3.4 Dimensión de la Carcasa..... | 27 |
| 3.5 Dimensión de la Puerta del horno..... | 27 |
| 3.6 Pintura..... | 27 |
| 3.7 Equipo de regulación y control..... | 27 |
| 3.8 Cálculo..... | 30 |
| 3.8.1 Cálculo de áreas de la parte interior de horno..... | 31 |
| 3.8.2 Cálculo de las áreas exteriores del horno..... | 31 |
| 3.8.3 Cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor..... | 31 |
| 3.8.4 Cálculo de la potencia requerida para calentar una probeta..... | 35 |

| | |
|---|----|
| 3.8.5 Análisis de la probeta de acero..... | 38 |
| 3.8.6 Potencia generada por las resistencias..... | 40 |

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN DEL HORNO PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS

| | |
|--|----|
| 4.1 Parámetros generales..... | 41 |
| 4.2 Carcasa..... | 41 |
| 4.3 Preparación de los ladrillos refractarios..... | 42 |
| 4.4 Montaje de los refractarios para formar la cámara interna..... | 43 |
| 4.5 Instalación de las resistencias de calentamiento..... | 44 |
| 4.6 Construcción de la puerta..... | 45 |
| 4.7.- Pruebas de funcionamiento..... | 46 |

CAPÍTULO V

MANUAL DE PROCEDIMIENTOS

| | |
|--|----|
| 5.1 Normas de seguridad y procedimientos de operación del horno..... | 48 |
|--|----|

CAPÍTULO VI

ESTUDIO ECONÓMICO

| | |
|-----------------------------|----|
| 6.1 Presupuesto..... | 53 |
| 6.2 Análisis Económico..... | 53 |
| 6.2.1 Materiales..... | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 6.2.2 Alquiler de maquinaria, herramientas y equipos..... | 54 |
| 6.2.3 Mano de obra..... | 54 |
| 6.2.4.- Otros..... | 54 |

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 7.1 Conclusiones..... | 56 |
| 7.2 Recomendaciones..... | 57 |
| Bibliografía..... | 58 |

ANEXOS

ANEXO A:

A.1. Características de los aceros de la empresa BÖHLER

ANEXO B:

B.1. Descripción del mortero refractario.

B.2. Propiedades del mortero refractario

ANEXO C:

C.1. Descripción del manto refractario.

C.2. Propiedades del manto refractario.

ANEXO D:

D.1. Propiedades de los materiales.

ANEXO E:

E.1. Factores de conversión.

E.2. Factores de conversión.

PLANOS

Plano F.1 Dimensión de la Carcasa

Plano F.2 Dimensión de la carcasa

Plano F.3 Dimensión de la Puerta del horno

Plano F.4 Vista superior y frontal del horno

Plano F.5 Vista frontal de la cámara interna del horno

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Longitud característica que se usa en el número de Biot.....17

Tabla 3.1. Propiedades de las resistencias Fe-Cr-Al.....22

Tabla 3.2 Resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al.....23

Tabla 5.1 Codificación de los manuales de procedimientos.....48

Tabla 6.1 Estudio económico.....55

ÍNDICE DE FIGURAS:

| | |
|---|----|
| Figura 2.1. Conducción..... | 12 |
| Figura 2.2 Temperatura en el centro para placa de espesor $2L$ | 19 |
| Figura 2.3 Temperatura en el centro del cilindro de radio r_0 | 20 |
| Figura 3.1 Resistencia eléctrica..... | 22 |
| Figura 3.2. Disposiciones de espirales sobre ranuras..... | 24 |
| Figura 3.3. Ladrillo refractario..... | 26 |
| Figura 3.6. Tarjeta de control..... | 29 |
| Figura 3.7. Pulsadores..... | 29 |
| Figura 3.8.1. Cámara interna y externa del horno..... | 30 |
| Figura 3.8.2. Estructura de las paredes..... | 31 |
| Figura 3.8.3 Diagrama térmico..... | 32 |
| Figura 3.8.4 Probeta..... | 36 |
| Figura 4.1 Armado de la carcasa..... | 42 |
| Figura 4.2 Preparación de ladrillos refractarios..... | 43 |
| Figura 4.3 Construcción cámara interna..... | 44 |
| Figura 4.4 Instalación de las resistencias..... | 45 |
| Figura 4.5 Construcción de la puerta..... | 46 |
| Figura 4.6 calentamiento probeta..... | 47 |
| Figura 4.7 Durómetro..... | 47 |

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1- Introducción

Este proyecto consiste en la construcción de un horno para tratamientos térmicos, el cual está diseñado para alcanzar una temperatura de trabajo máxima de 1200 °C, capaz de provocar el cambio necesario en la estructura metalográfica del acero a tratar.

El horno es de construcción metálica, electro soldado.

El aislamiento se realiza mediante ladrillos refractarios de baja masa térmica y con un alto poder calorífico, cuidadosamente dispuestos en estratos para reducir las pérdidas de calor. La puerta es de apertura lateral, con cierre por presión al ajustarse, y perfecto ajuste sobre un marco de refractario. En el interior del horno una solera de refractario facilita la colocación de las piezas a tratar y su manejo a altas temperaturas.

1.2.- Definición del problema

El I.T.S.A. cuenta con un laboratorio de Metalurgia, implementado por estudiantes del Instituto, para complementar el estudio teórico con el práctico en la asignatura de Ciencia de los Materiales, la cual es útil en el campo de la mecánica aeronáutica e industria en general.

El laboratorio de Metalurgia cuenta con: dos mesas de desbaste, una pulidora, una máquina de termo-prensado para el montaje en resina, reactivos para el ataque químico, pero no cuenta con un equipo térmico que permita calentar los materiales y estudiar sus propiedades.

1.3.- Objetivos

1.3.1- Objetivo general

Construcción de un horno para tratamientos térmicos.

1.3.2- Objetivos específicos

- Recopilar información de la materia apropiada de hornos para tratamientos térmicos.
- Realizar el diseño térmico el cual va a proporcionar la temperatura y el funcionamiento del horno.
- Realizar planos de la parte estructural del horno mediante el programa de AUTOCAD
- Realizar pruebas para verificar su funcionamiento.

1.4.- Alcance

Este proyecto esta dirigido para la implementación del laboratorio de metalurgia del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico, el cual beneficiara a los alumnos y maestros para el estudio e investigación de los metales y sus transformaciones que estos resisten al ser sometidos a tratamientos térmicos.

1.5.- Justificación

El avance tecnológico actual, nos encamina al uso de equipos industriales apropiados para mejorar y profundizar el estudio de ciertos componentes mediante el tratamiento térmico.

Al ser el Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico un ente de formación de profesionales en Aeronáutica, es necesario el emplear y contar con equipos de laboratorio para el aprendizaje.

Por lo tanto este proyecto esta encaminado a la elaboración de un horno para tratamientos térmicos, el cual ayudara a mejorar los conocimientos sobre las propiedades de los metales y los trabajos que se pueden realizar a temperaturas determinadas.

1.6.- Tratamiento térmico

"Se conoce como tratamiento térmico, al proceso que se somete generalmente a los aceros con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad.

Los tratamientos térmicos lo que hacen es modificar la estructura de los granos que forman los aceros, sin variar la composición química de los mismos.

La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material, tanto en los aceros como en las aleaciones no férreas, y

ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempos establecidos.

Entre los tipos de tratamiento térmico que se realizan a los aceros tenemos los siguientes:

- Temple.- El temple tiene por objeto endurecer y aumentar la resistencia de los aceros. Para ello, se calienta el acero a una temperatura ligeramente más elevada que la crítica superior a (entre 900-950°C) y se enfría luego más o menos rápidamente (según características de la pieza) en un medio como agua, aceite, etc.
- Revenido.- Es un tratamiento habitual a las piezas que han sido previamente templadas. El revenido consigue disminuir la dureza y resistencia de los aceros templados, se eliminan las tensiones creadas en el temple y se mejora la tenacidad, dejando al acero con la dureza o resistencia deseada. Se distingue básicamente del temple en cuanto a temperatura máxima y velocidad de enfriamiento.
- Recocido.- Consiste básicamente en un calentamiento hasta temperatura de austenización (800-925°C) seguido de un enfriamiento lento. Con este tratamiento se logra aumentar la elasticidad, mientras que disminuye la dureza. También facilita el mecanizado de las piezas al homogeneizar la estructura, afinar el grano y ablandar el material, eliminando la acritud que produce el trabajo en frío y las tensiones internas."¹

¹http://es.wikipedia.org/wiki/tratamiento_termico

1.6.1- Principios del tratamiento térmico del acero

"Al tratar térmicamente el acero de una pieza determinada, se tiene que tomar ciertas precauciones para desarrollar las propiedades mecánicas óptimas de ese material. A continuación se bosquejan algunos de los factores principales que deben ser tomados en consideración.

Calentamiento.- El primer paso para el tratamiento térmico es el calentamiento del material a una temperatura superior a la crítica para hacerlo por completo austenítico.

La velocidad del calentamiento.- Debe ser lo suficientemente lenta para evitar que se perjudique el material a causa de excesivos esfuerzos térmicos y de transformación de su estructura.

En general, el acero templado debe calentarse mas lenta y uniformemente que los materiales blandos exentos de esfuerzos.

La temperatura máxima.- Se determinará por la composición química del acero y de acuerdo con sus características de tamaño de grano. En el acero hipoeutectoide (por debajo de 0.80 % de carbono), se toma una temperatura poco mayor al rango critico superior, y en los aceros hipereutectiodes (por encima de 0.80% de carbono), se emplea generalmente una temperatura comprendida entre los limites críticos superior e inferior, para evitar el calentamiento a altas temperaturas con el consiguiente crecimiento del grano.

El tiempo.- Para que la pieza se mantenga a la temperatura máxima debe ser tal que se obtenga una temperatura uniforme en toda la sección transversal del acero.

Debe tenerse cuidado en evitar una prolongación indebida del tiempo a esa temperatura, porque esto puede dar por resultado un crecimiento indeseable del grano, la formación de cascarilla o la descarburización de la superficie. Una cifra práctica que se utiliza con frecuencia para el tiempo total que ha de estar una pieza en el horno caliente es de 12 min/cm. (alrededor de ½ h/pulg.) de espesor de la sección transversal.

La velocidad de enfriamiento.- Debe ser tal que desarrolle la estructura deseada: (enfriado en el horno o al aire) para desarrollar la estructura perlíticas más blandas y rápidas, (enfriado brusco por inmersión) para formar la estructura martensíticas duras. En la sección de un medio para enfriamiento por inmersión es importante elegir ese medio para un trabajo particular con base en el tamaño, forma y deformación admisible, antes de decidir sobre la composición del acero. Es conveniente clasificar los aceros en dos grupos, con base en la profundidad del endurecimiento: temple poco profundo y temple profundo.

Los aceros de temple poco profundo.- Pueden definirse como aquellos que, en la forma de barras redondas de 25mm (1 pulg) de diámetro tienen, después de su inmersión en salmuera, una capa completamente martensítica de profundidad no mayor de 6.4 mm (1/4 pulg.). Los aceros de temple poco profundo son aquellos de bajo o nulo contenido de aleación.

Aceros de temple profundo.- Tienen un contenido sustancial de aquellos elementos de aleación que aumentan la penetración del temple, notablemente el cromo, el manganeso y el níquel. Las altas velocidades de enfriamiento necesarias para templar los aceros de temple poco profundo producen deformaciones severas en todas las piezas que no sean de forma sencilla, simétrica y con una razón pequeña de la longitud al diámetro o al espesor.

Los aceros simples al carbono no pueden emplearse para formas complicadas en la que debe evitarse la deformación. En este caso debe abandonarse la inmersión en agua y emplearse un medio de enfriamiento menos activo que reduzca materialmente el gradiente de temperatura durante el enfriamiento. Ciertos aceites son satisfactorios, pero incapaces de templar los aceros de temple poco profundo de tamaño considerable. Se requiere un cambio en la composición del acero con un cambio de agua a aceite como medio de enfriamiento.

El enfriado en aceite no impide por completo la deformación. Cuando el grado de deformación producido por la inmersión en aceite es objetable, debe recurrirse al templado al aire.

La velocidad de enfriamiento en aire es mucho mas lenta que en el aceite o en el agua y, en consecuencia se requiere un contenido excepcionalmente alto de elementos de aleación. Esto significa que se paga un alto precio por la ventaja lograda, tanto por lo que al respecto al costo del metal como la pérdida en maquinabilidad, aunque dicho precio puede estar bien justificado cuando se aplica el

método de herramientas costosas. En este caso, el peligro de agrietamiento es despreciable."²

1.7.- Selección del tipo de horno para el I.T.S.A.

El horno de resistencias, es el tipo de horno seleccionado para la construcción e implementación el laboratorio de metalurgia del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico, porque cumple con los factores primordiales que se indican a continuación:

El horno seleccionado debe ser de fácil construcción con materiales que se encuentren fácilmente en el mercado local.

Se trabajaría principalmente para tratamientos hasta 1100 °C ya que a esta temperatura se pueden realizar prácticas de laboratorio como son temple, recocido, revenido, etc.

El horno esta programado para emplearse en prácticas de laboratorio dentro del Instituto, es decir se trabajara con probetas o muestras, con una capacidad máxima de 4 Kg.

El horno tiene que presentar las facilidades para movilizarlo de un lugar a otro, es decir su tamaño y su peso deben tener al mínimo posible.

²ASM Metals Handbook. Pagina 6.22-6.23

CAPÍTULO II

TEORIA PARA EL DISEÑO DEL HORNO

En este capítulo se estudia la materia relacionada con el diseño del horno, con el fin de obtener buenos conocimientos y proceder a un diseño que favorezca a la construcción.

2.1.- Transferencia de calor

"La transferencia de calor es el paso de energía térmica de un cuerpo caliente a uno menos caliente. Cuando un cuerpo físico, por ejemplo, un objeto o fluido, está a una temperatura diferente a la que están sus alrededores u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y sus alrededores llegan al equilibrio térmico.

La transferencia de calor siempre ocurre de un cuerpo caliente a otro menos caliente. La transferencia de energía térmica ocurre principalmente a través de conducción, convección y radiación. La transferencia de calor nunca puede ser detenida; sólo se le puede hacer más lenta.

2.2.- Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad intrínseca de los materiales que valora la capacidad de conducir el calor a través de ellos. El valor de la conductividad varía en función de la temperatura a la que se encuentra la

sustancia, por lo que suelen hacerse las mediciones a 300 °K con el objeto de poder comparar unos elementos con otros.

Es elevada en metales y en general en cuerpos continuos, y es baja en los gases (a pesar de que en ellos la transferencia puede hacerse a través de electrones libres) y en materiales iónicos y covalentes, siendo muy baja en algunos materiales especiales como la fibra de vidrio, que se denominan por eso aislantes térmicos. Para que exista conducción térmica hace falta una sustancia, de ahí que es nula en el vacío ideal, y muy baja en ambientes donde se ha practicado un vacío elevado.

En algunos procesos industriales se trabaja para incrementar la conducción de calor, bien utilizando materiales de alta conductividad o configuraciones con un elevado área de contacto. En otros, el efecto buscado es justo el contrario, y se desea minimizar el efecto de la conducción, para lo que se emplean materiales de baja conductividad térmica, vacíos intermedios, y se disponen en configuraciones con poca área de contacto.

El coeficiente de conductividad térmica (K) representa la cantidad de calor necesario por m^2 , para que atravesando durante la unidad de tiempo, $1 m^2$ de material homogéneo obtenga una diferencia de $1 ^\circ C$ de temperatura entre las dos caras. La conductividad térmica se expresa en unidades de $W/m \cdot K$ ($J/s \cdot m \cdot ^\circ C$).

La conductividad térmica es un mecanismo molecular de transferencia de calor que ocurre por la excitación de las moléculas. Se presenta en todos los estados de la materia pero predomina en los sólidos.

2.3.- Transferencia calorífica

En la vida diaria con frecuencia se hace referencia a las formas latente y sensible de la energía interna como calor, y se habla del contenido de calor de los cuerpos. Sin embargo, en la termodinámica a esas formas de energía se las puede mencionar como energía térmica, con el fin de impedir que se tenga una confusión con la transferencia de calor.

El término calor y las frases asociadas, como flujo de calor, adición de calor, rechazo de calor, absorción de calor, ganancia de calor, pérdida de calor, almacenamiento de calor, generación de calor, calentamiento eléctrico, calor latente, calor del cuerpo y fuente de calor, son de uso común hoy en día y el intento de reemplazar el calor en estas frases por energía térmica sólo tuvo un éxito limitado.

Estas frases están profundamente arraigadas en nuestro vocabulario y las usan tanto la gente común como los científicos sin que se tengan confusiones. Por ejemplo, la frase calor del cuerpo se entiende al contenido de energía térmica de un cuerpo. Del mismo modo, se entiende que por flujo de calor se quiere decir la transferencia de energía térmica, no el flujo de una sustancia semejante a un fluido llamado calor. Asimismo, la transferencia de calor hacia un sistema con frecuencia

se menciona como adición de calor y la transferencia de calor hacia fuera de un sistema como rechazo de calor."³

Transferencia de energía al sistema = Aumento de la energía del sistema.

$$Q = \Delta U = m C_{prom} (T_2 - T_1) \quad (2.1)$$

Donde :

Q = Flujo de calor. [W]

ΔU = Aumento de la energía del sistema [W]

m = ρV = masa [kg]

C_{prom} = propiedades según tabla [KJ/kg°C]

T₂ = Temperatura interior [°C]

T₁ = Temperatura exterior [°C]

2.4. - Conducción

"Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacción entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. "⁴

En la siguiente figura 2.1 se indica una conducción de calor a través de una pared plana.

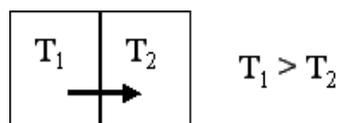


Figura 2.1. Conducción

³ Wikipedia, la enciclopedia libre

⁴ Yanus A. CENGEL, Transferencia de Calor, Edición II Pagina 17 - 18

Primera ley de Fourier:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dx} = \text{flujo de calor, } \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \quad (2.2)$$

k = conductividad térmica, W/m.K

q/A Flujo de calor = [W/m²]

Resolviendo la ecuación diferencial de la primera ley de Fourier para q/A, k constantes:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{(\Delta X/k)} = \frac{\text{Potencial}}{\text{Resistencia}}, \quad \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{q}{A} = \frac{\Delta T}{(\Delta x_1/k_1 + \Delta x_2/k_2 + \Delta x_3/k_3 + \dots \Delta x_n/k_n)} \quad (2.3)$$

2.5.- Convección

En la transferencia de calor por convección, las moléculas se mueven de un punto a otro e intercambian energía con las moléculas que estaban en el otro punto, debido a la diferencia de temperatura.

Cuando hay convección ocurre un movimiento masivo de moléculas.

Convección natural: el movimiento masivo es inducido por cambios de densidad asociados con diferencias de temperatura en distintas partes del fluido, o con vaporización o condensación.

Convección forzada: cuando el fluido es obligado a moverse por medios mecánicos.

La transferencia de calor por convección se mide como la tasa de intercambio de calor en la interfaz entre un fluido y un sólido.

$$q = h A (T_m - T_s) = h A \Delta T \quad (2.4)$$

q = transferencia de calor por convección. [W]

A = área de la interfaz de contacto entre el fluido y el sólido [m²]

h = coeficiente de transferencia de calor por convección [Watt/m².K]

T_m = temperatura media del fluido [°C]

T_s = temperatura de la pared sólida [°C]

$$q = h A \Delta T = \frac{\Delta T}{(1/hA)} = \frac{\text{Potencial}}{\text{Resistencia}}$$

2.6- Conducción y convección combinadas

Considerando una serie de resistencias con n capas de sólidos y n interfaces fluido-sólido

$$q = UA \Delta T = \frac{\Delta T}{R}$$

$$R = \frac{1}{UA}$$

Para n planchas o placas sólidas, la resistencia R se define como:

$$R = \frac{1}{UA} = \sum \left[\frac{1}{h_n A} \right] + \sum \left[\frac{X_n}{k_n A} \right] \quad (2.5)$$

U = coeficiente total de transferencia de calor

n = # interfaces líquidas = # capas de sólidos

A = Áreas

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x_1}{k_1} + \frac{\Delta x_2}{k_2} + \dots + \frac{\Delta x_n}{k_n} + \dots + \frac{1}{h_n}$$

$$U = \frac{1}{\left[\sum 1/h_n + \sum X_n/k_n \right]}; \quad \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

2.7.- Enfoque de bulto

"Se introduce un número sin dimensiones, llamado número de Biot, con el fin de determinar la validez del enfoque del parámetro en bulto. El número de Biot es la razón entre la resistencia interna y la resistencia externa. En consecuencia, un número de Biot pequeño indica un valor bajo de la resistencia interna en relación con la resistencia externa, y por lo tanto satisface el prerrequisito para considerarlo como sistema de resistencia interna despreciable. Como se describe a continuación:

$$Bi = hL_c/k \qquad (2.6)$$

Donde:

Bi = número de Biot.

h = coeficiente convectivo

L_c = Longitud característica.

k = conductividad térmica del sólido.

Se ha encontrado, Bi = para formas geométricas sencillas, como placas, cilindros, y esferas, que si Bi < 0.1, el error que se introduce al suponer que la temperatura es uniforme en el espacio, es un instante dado, es menor que 5%. En la tabla 2.1 se registran algunas de las longitudes características que con más frecuencia son encontradas.

| <i>Geometría</i> | <i>L_c - Longitud característica</i> |
|----------------------------|--|
| Pared plana-espesor $2L$ | L |
| Cilindro largo-radio r_0 | $\frac{r_0}{2}$ |
| Esfera-radio r_0 | $\frac{r_0}{3}$ |
| Cubo-lado a | $\frac{a}{6}$ |

Tabla 2.1. Longitud característica que se usa en el número de Biot

La siguiente ecuación nos da la temperatura como función del tiempo para un cuerpo que inicialmente se encuentra a una temperatura T_0 , y que se encuentra situado en un medio ambiente convectivo a una temperatura T_∞ , para valores del número de Biot menores que 0.1.

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-\frac{hA}{\rho c V} \tau} \quad \text{si } Bi < 0.1 \quad (2.7)$$

La cantidad $(\rho c V/hA)$ que aparece en la ecuación tiene unidades de tiempo y nos referimos con frecuencia a ella como la constante de tiempo del sistema. En el tiempo τ , igual a una constante de tiempo"⁵

⁵B.V. KARLEKAR, R.M. DESMOND, Transferencia de calor, Edición II, Editorial MC Graw Hill

2.8- Cálculo de los tiempos de calentamiento por los gráficos de Heisler

"El cálculo analítico de los tiempos de calentamiento y enfriamiento de cargas en hornos de calentamiento por resistencias, es complejo y, en la práctica, se acude para las formas geométricas sencillas (placa plana, cilindro y esfera) a los gráficos de Heisler.

Las Figuras 2.2 y 2.3 sirven para determinar la temperatura del centro de placa plana y cilindro. La abscisa es el número de Fourier at/L^2 o at/r_0^2 , como parámetro se utiliza el inverso del número de Biot $\lambda/\alpha L$ o $\lambda/\alpha r_0$ y la ordenada es la temperatura en el centro en forma adimensional $(T_0 - T_a)/(T_i - T_a)$, donde T_0 es la temperatura en el centro, T_i la temperatura inicial de la carga uniforme en toda la masa y T_a es la temperatura ambiente del horno en calentamiento o del medio en enfriamiento."⁶

Para determinar la temperatura en cualquier plano o radio se utilizan los gráficos correctores de Heisler que se muestran en las Figuras 3.2 Y 3.3.

⁶ B.V. KARLEKAR, R.M. DESMOND, Transferencia de calor, Edición II, Editorial MC Graw Hill

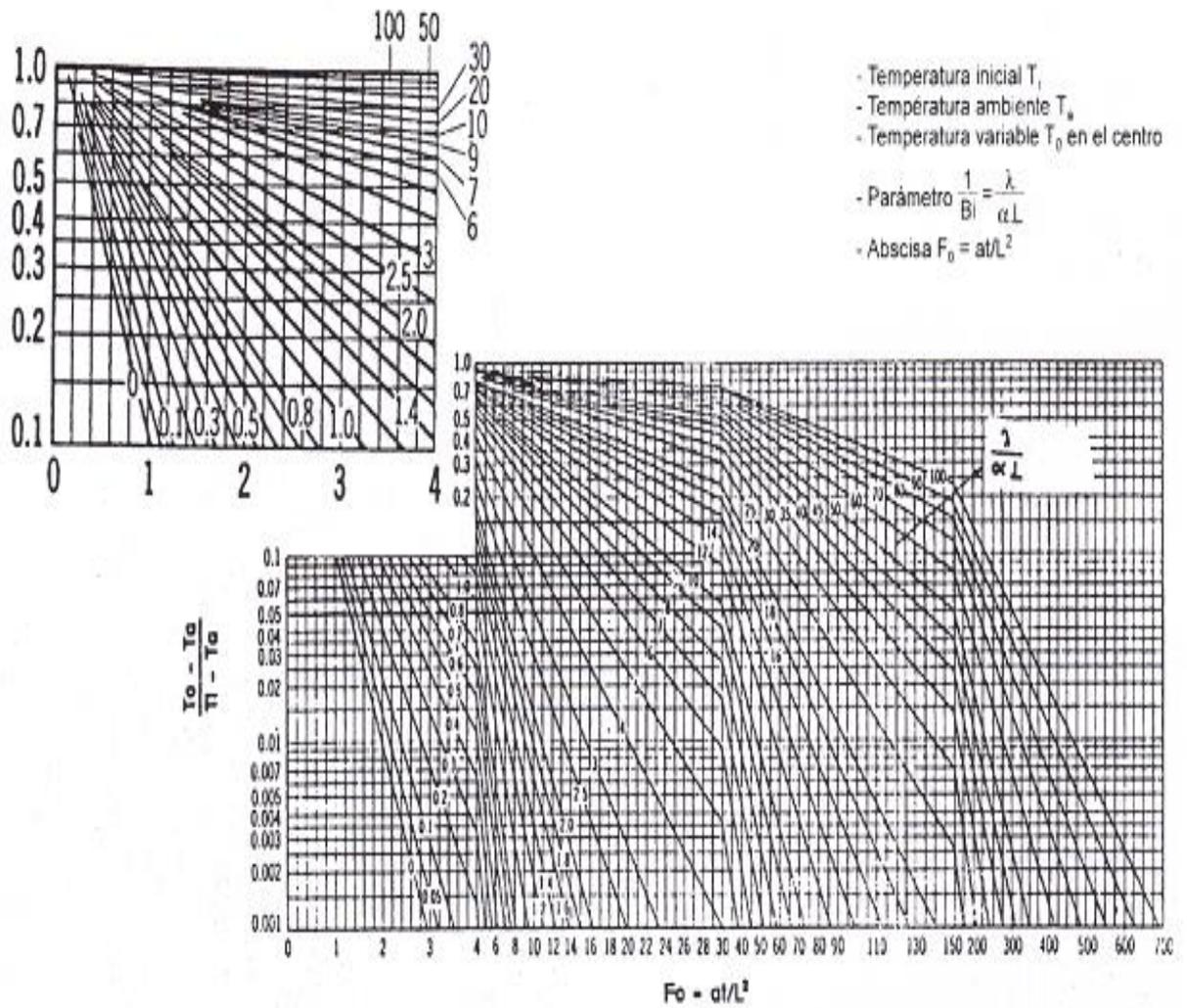


Figura 2.2 Temperatura en el centro para placa plana de espesor $2L$

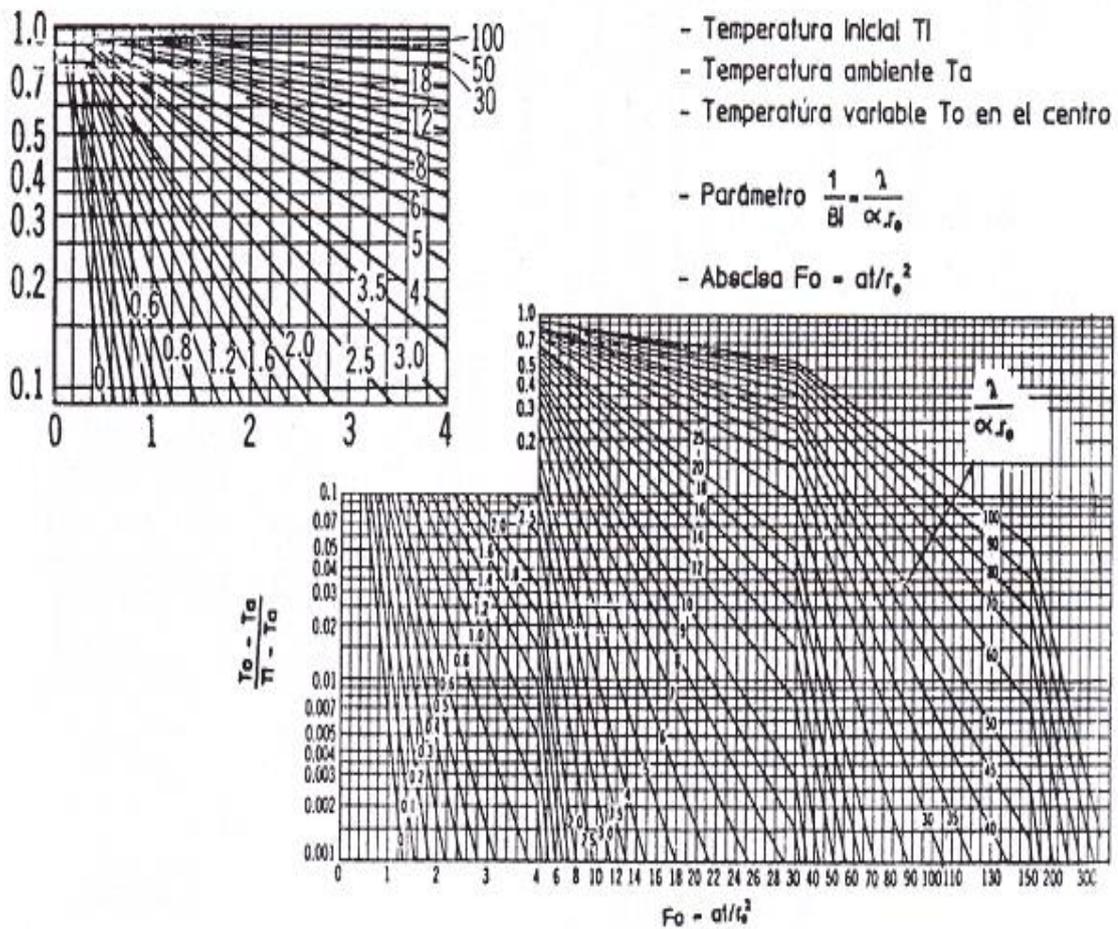


Figura 2.3 Temperatura en el centro del cilindro de radio r_0

2.9- Materiales a tratar térmicamente

Para la construcción del horno para tratamientos térmicos se ha tomado como referencia un gran número de aceros que se encuentran disponibles en una prestigiosa empresa comercial llamada BOHLER S.A., la cual es muy conocida en el país y dispone de un gran número de materiales. (VER ANEXO A)

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE PARTES Y COMPONENTES PARA LA ELABORACIÓN DEL HORNO

En este capítulo se describe las características de todos los componentes que se utilizarán para la construcción del horno para tratamiento térmico.

3.1- Generalidades de las resistencias de calentamiento

El calentamiento de piezas por resistencias eléctricas puede ser indirecto, cuando las piezas se calientan por radiación, convección o una combinación de ambas, procedente de las resistencias propiamente dichas dispuestas en las proximidades de las temperaturas.

En la industria es mucho más frecuente el calentamiento indirecto por resistencias eléctricas. Dichas resistencias pueden ser:

Barras, varillas, alambres o pletinas, dispuestos en las paredes de la cámara de calentamiento del horno, transmitiendo calor a las piezas por radiación.

Paquetes de resistencias de los mismos materiales que transmiten el calor por convección, a las piezas.

Los mismos materiales, dispuestos en el interior de tubos radiantes, cuando la atmósfera interior del horno sea perjudicial para una vida razonable de las resistencias expuestas directamente.

3.2 Materiales de las resistencias de calentamiento

Los materiales empleados para la fabricación de las resistencias de calentamiento del horno para tratamiento térmico son de aleaciones de Fe-Cr-Al. Enrollados como se indica en la figura 3.1.



Figura 3.1 Resistencia eléctrica

3.2.1 Aleaciones de Fe-Cr-Al

En la siguiente tabla se indican las propiedades de las resistencias Fe-Cr-Al.

Tabla 3.1. Propiedades de las resistencias Fe-Cr-Al

| Aleación | 22-6 PM | 22-6 | 22-5 | 22-4 | 14-4 |
|---|---------|-------|-------|-------|-------|
| Composición química aproximada | | | | | |
| Cr % | 22 | 22 | 22 | 22 | 14 |
| Al % | 5,8 | 5,8 | 5,3 | 4,8 | 4 |
| Fe % | 70 | 70 | 72 | 73 | 80 |
| Densidad kg/m ³ | 7.100 | 7.100 | 7.150 | 7.250 | 7.300 |
| Temperatura de fusión °C | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 |
| Temperatura máxima utilización °C | 1.400 | 1.400 | 1.400 | 1.300 | 1.100 |
| Calor específico a 20 °C kJ/kg·K | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,46 | 0,48 |
| Calor específico medio a 0-1.000 °C kJ/kg·K | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,56 |
| Conductividad térmica a 20 °C W/mK | 13 | 13 | 13 | 13 | 15 |
| Coefficiente dilatación lineal 20-1.000 °C 10 ⁶ °C ⁻¹ | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Resistencia a la rotura 20 °C N/mm ² | 750 | 800 | 800 | 800 | 700 |
| 900 °C N/mm ² | 40 | 34 | 37 | 34 | 35 |
| Resistencia al creep 800 °C N/mm ² | 14 | 6 | 8 | 6 | 4 |
| 1.000 °C N/mm ² | 1,8 | 1 | 1,5 | 1 | 0,8 |

JULIO ASTIGARRAGA URQUIZA, Hornos de Resistencias, Editorial Mc. Graw – Hill, 1ª Edición 1994 pag.20.

La siguiente tabla muestra la resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al, que es favorable para en el calculo de las resistencias en hornos eléctricos.

Tabla 3.2 Resistividad eléctrica de las aleaciones Fe-Cr-Al.

| Aleación | 22-6 PM | 22-6 | 22-5 | 22-4 | 14-4 |
|---|---------|------|------|------|------|
| Resistividad eléctrica $\mu\Omega\text{cm}$. | | | | | |
| Coficiente de resistividad: | | | | | |
| 20 °C | 145 | 145 | 139 | 135 | 125 |
| 20 °C | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 100 °C | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,01 |
| 200 °C | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,01 | 1,02 |
| 300 °C | 1,00 | 1,00 | 1,01 | 1,01 | 1,03 |
| 400 °C | 1,00 | 1,00 | 1,02 | 1,02 | 1,04 |
| 500 °C | 1,01 | 1,01 | 1,03 | 1,03 | 1,05 |
| 600 °C | 1,02 | 1,02 | 1,04 | 1,04 | 1,07 |
| 700 °C | 1,02 | 1,02 | 1,04 | 1,05 | 1,09 |
| 800 °C | 1,03 | 1,03 | 1,05 | 1,06 | 1,11 |
| 900 °C | 1,03 | 1,03 | 1,05 | 1,06 | 1,13 |
| 1.000 °C | 1,04 | 1,04 | 1,06 | 1,07 | 1,14 |
| 1.100 °C | 1,04 | 1,04 | 1,06 | 1,07 | 1,15 |
| 1.200 °C | 1,04 | 1,04 | 1,06 | 1,08 | — |
| 1.300 °C | 1,04 | 1,04 | 1,06 | 1,08 | — |
| 1.400 °C | 1,05 | 1,05 | 1,07 | — | — |

JULIO ASTIGARRAGA URQUIZA, Hornos de Resistencias, Editorial Mc. Graw – Hill, 1ª Edición 1994 pag.21.

El diámetro del alambre para fabricación de resistencias de calentamiento varía de 1 a 12 mm, siendo posible elegir entre un gran número de diámetros normalizados.

3.2.2- Resistencias arrolladas en espiral sobre ranuras cerámicas.

Esta es una disposición muy antigua y económica como se indica en la figura 3.2, pero la resistencia no radia libremente, por lo que debe calcularse para una menor carga específica. Las ranuras en las piezas cerámicas deben ser amplias y suficientemente espaciadas para facilitar la radiación pero cubriendo no menos del radio de la espiral.

La temperatura máxima de la resistencia es de 1200 °C. El diámetro d del alambre varía entre 2 y 5 mm, arrollado sobre un diámetro interior $D_i = 4d \div 5d$. El paso mínimo de la espiral es $p = 2d$.

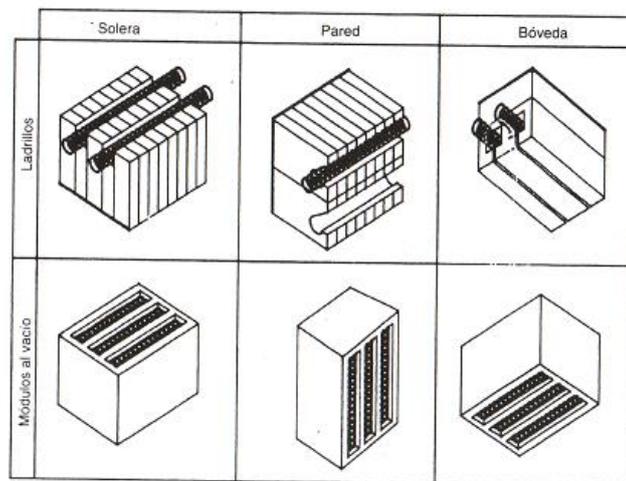


Figura 3.2. Disposiciones de espirales sobre ranuras

3.3- Materiales refractarios y aislantes

3.3.1- Generalidades

El campo de los aislamientos térmicos en hornos industriales es extraordinariamente amplio y complejo. Aparentemente, su único objetivo es aislar el interior de los hornos, estufas, conductos, etc., con un doble propósito:

- Reducir las pérdidas de calor, y

- Conseguir unas condiciones ambientales en el exterior suficientemente aceptables.

Pero, realmente, las condiciones en el interior pueden ser tales que la capa interna del aislamiento térmico deba ser capaz de:

- Soportar el ambiente del horno (humos, aire en circulación gases, reductores, etc.)
- Conseguir sin reacción química, en términos generales, metales o no metales, fundidos en altas temperaturas, etc.

Por ello, el aislamiento térmico, además de sus características de aislamiento, puede requerir resistencias al ataque químico, resistencias a la abrasión, etc., lo que, evidentemente, condiciona la elección del aislamiento no solamente por su temperatura máxima de trabajo.

El tipo de ladrillo refractario escogido fue el extra ligero de materiales silicoaluminosos, por presentar las siguientes características: diseñado para aquellas aplicaciones donde se requieren mayor resistencia a la temperatura. Se usa principalmente para revestir hornos de cal, zonas de calentamiento y calcinación de hornos rotatorios de cementos, calderas de trabajo pesado, techos de hornos de calentamiento de palanquilla, hornos de túneles, distribuidores de colada continua etc.

Tiene una conductividad térmica de $0.6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Sus dimensiones son: $0.21\text{m} \times 0.11\text{m} \times 0.07\text{m}$ y se lo presenta en la figura 4.3.



Figura 3.3. Ladrillo refractario

3.3.2- Mortero refractario

Utilizado para pegar ladrillos refractarios entre si y rellenar las juntas entre ellos.

Están constituidos por una mezcla de áridos refractarios finamente molidos, de arcillas plásticas, aditivos y ligantes especiales.

Un concreto refractario, además de proporcionar estabilidad a la mampostería, debe prevenir la penetración y ser resistente al ataque de escorias, líquidos o gases corrosivos. El concreto refractario debe seleccionarse tan cuidadosamente como el ladrillo con el cual va ser usado y debe ser compatible con la composición química del ladrillo.

La selección del concreto refractario para el recubrimiento, enlucido de la parte interior de la cámara es el SAIRSET. (VER ANEXO B).

3.4- Dimensión de la Carcasa

Denominamos carcasa al revestimiento externo del horno. El material de elaboración es acero negro con un espesor de 1 mm, bajo procedimientos de dobleces y soldado con electrodo E6011 dándole su respectiva forma.

Tomando en cuenta los materiales a utilizar con sus respectivas dimensiones, se realizo el plano de constitución para establecer el tamaño de la carcasa. (VER PLANOS).

3.5- Dimensión de la Puerta del horno

La puerta del horno esta diseñada del mismo material de la carcasa con un marco de ángulo de 1 pulg. X 1/8 sujeta a la carcasa del horno por medio de bisagras motivo por el cual se tomo la decisión de aminorar su peso sustituyendo al ladrillo refractario por un manto cerámico. (VER ANEXO C y PLANOS).

3.6.- Pintura

Para dar un mejor terminado al proyecto se utilizo la pintura, Bucanero epoxico altos sólidos de CONDOR, que soporta hasta 160 °C de temperatura, formado se dos componentes. 2 a 3 mils de anclaje.

3.7.- Equipo de regulación y control

Los hornos para tratamiento térmico deben operara a una temperatura concreta, o seguir un ciclo determinado de calentamiento a lo largo del tiempo. Y realmente es importante que el horno no sobrepase una temperatura prefijada, para proteger debidamente los elementos metálicos y cerámicos de su interior.

El tema de la regulación de temperatura en los hornos, y sobre todo de la precisión, es extraordinariamente importante y fuente, en la práctica de muchos errores. Un elemento constitutivo es el termopar de detección de la temperatura en un punto del interior del horno junto con el aparato de regulación, y otra muy distinta la carga, que ocupa un amplio espacio en el interior del horno, en la que se pretende conseguir una cierta uniformidad de temperatura, no sólo en la superficie, sino en toda su masa.

El aparato de regulación señalará, controlará con precisión y rapidez la temperatura correspondiente que reciba de la termocupla, La termocupla es de tipo K y se la conoce también como la termocupla Chromel-Alumel. El Chromel es una aleación de aproximadamente 90% de níquel y 10% de cromo, el Alumel es una aleación de 95% de níquel, más aluminio, silicio y manganeso, razón por la que la norma IEC la especifica NiCr - Ni. La Tipo K es la termocupla que más se utiliza en la industria, debido a su capacidad de resistir mayores temperaturas

Las termocuplas Tipo K pueden utilizarse en forma continua en atmósferas oxidantes e inertes hasta 1.260° C y constituyen el tipo más satisfactorio de termocupla para uso en atmósferas reductoras o sulfurosas o en vacío.

Por otra parte, el termopar está situado en un punto concreto del interior del horno recibiendo, por ejemplo, radiación no solamente de la carga sino también de las resistencias y de las partes refractarias. Especialmente durante el calentamiento la

diferencia de temperatura entre las resistencias, el refractario y la carga es muy elevada, señalando el termopar una temperatura intermedia entre ellas.

Por lo especificado anteriormente y cumpliendo con las características requeridas, para el sistema de regulación y control del proyecto a realizarse, fue la adquisición de una tarjeta electrónica de fabricación nacional reprogramable con micro controladores. A continuación en las figura 3.6 y 3.7 se indica la tarjeta de control descrita.

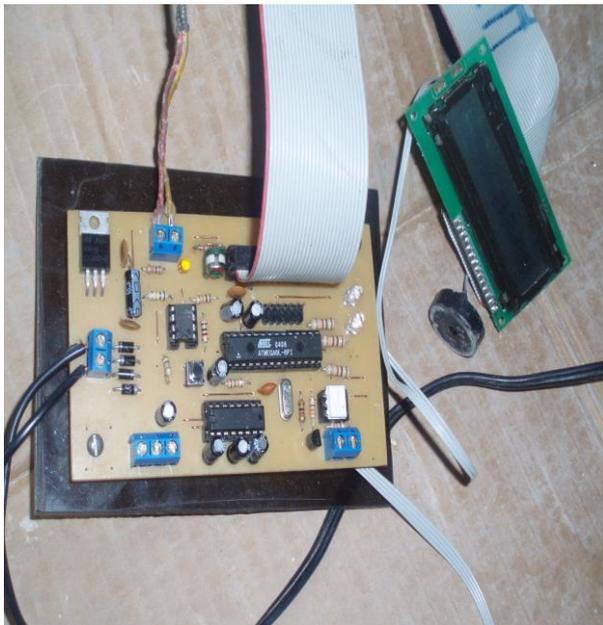


Figura 3.6. Tarjeta de control



Figura 3.7. Pulsadores

3.8.- CÁLCULOS

Para determinar el calor total que va a generar el horno, se requiere conocer las áreas de la cámara interna y el área externa del horno, con las respectivas características de los materiales utilizados, como se describe a continuación.

Calor Total = Calor Perdido en las Paredes + Calor Perdido en la puerta + calor necesario para calentar las probetas

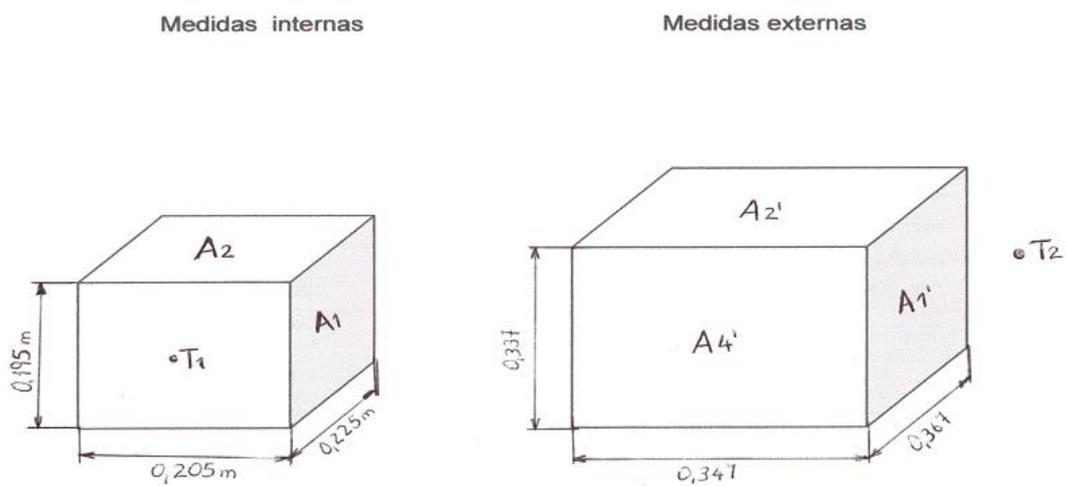


Figura 3.8.1. Cámara interna y externa del horno

T1 = Temperatura al interior del horno

T2 = Temperatura ambiente

3.8.1.- Cálculo de áreas de la parte interior del horno

$$\text{Paredes laterales} = 2xA_1 = 2 \times 0.225\text{m} \times 0.195\text{m} = 0.0877\text{m}^2$$

$$\text{Techo y piso} = 2xA_2 = 2 \times 0.205\text{m} \times 0.225\text{m} = 0.0922\text{m}^2$$

$$\text{Pared posterior} = A_3 = 0.205\text{m} \times 0.195\text{m} = 0.04\text{m}^2$$

$$\text{Puerta} = A_4 = 0.205\text{m} \times 0.195\text{m} = 0.04\text{m}^2$$

3.8.2.- Cálculo de las áreas exteriores del horno

$$\text{Paredes laterales} = 2xA_1' = 2 \times 0.367\text{m} \times 0.337\text{m} = 0.2473\text{m}^2$$

$$\text{Techo y piso} = 2xA_2' = 2 \times 0.347\text{m} \times 0.367\text{m} = 0.2546\text{m}^2$$

$$\text{Pared posterior} = A_3' = 0.347\text{m} \times 0.337\text{m} = 0.1169\text{m}^2$$

$$\text{Puerta} = A_4' = 0.347\text{m} \times 0.337\text{m} = 0.1169\text{m}^2$$

3.8.3.- Cálculo de los coeficientes globales de transferencia de calor

Considerando de que las cinco paredes tienen la misma estructura en su constitución como se indica en el siguiente grafico 3.8.2.

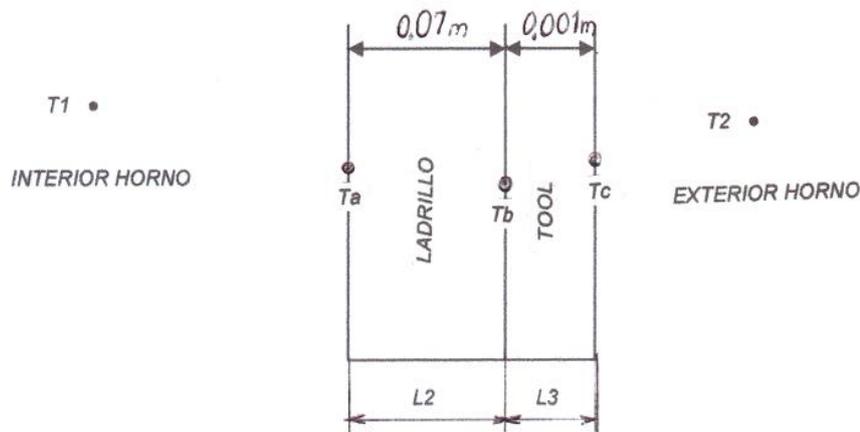


Figura 3.8.2. Estructura de las paredes

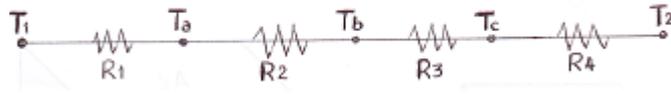


Figura 3.8.3. Diagrama térmico

a.- Cálculo de pérdidas en las paredes

Considerando que no hay generación ni movimiento de calor en las paredes, asumimos que el flujo de calor en cualquier parte de la pared compuesta es la misma.

$$Q = \Delta T / \Sigma R \tag{3.1}$$

Q = Flujo de calor [W]

ΔT = Diferencia de temperaturas [°C]

ΣR = Sumatoria de las resistencias en

Serie [m²°C/W]

Entonces :

$$Q = (T1-T2) / (R1+R2+R3)$$

Donde:

$$R1 = 1/h_i A_i$$

$$h_i = 9.396 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

R1= Resistencia debido a la convección entre el aire del interior del horno y las paredes [m²°C/W]

h_i = coeficiente de convección (aire tranquilo) [W/m²°C]

A_i = Área interior de las paredes [m²]

$$R_2 = L_2 / K_1 A_i$$

$$K_1 = 0.6 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

R_2 = Resistencia debido a la conducción del ladrillo [m²°C/W]

K_1 = coeficiente de conducción [W/m²°C]

A_i = Área de pared [m²]

$$R_3 = L_3 / K_2 A_i$$

$$K_2 = 63.9 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

R_3 = Resistencia debido a la conducción del Tool [m²°C/W]

K_2 = coeficiente de conducción [W/m²°C]

A_i = Área de pared [m²]

$$R_4 = 1 / h_2 A_e$$

$$h_2 = 22.712 \text{ [W/m}^\circ\text{C]}$$

R_4 = Resistencia debido a la convección entre paredes ext. Y el aire en movimiento [m²°C/W]

h_2 = coeficiente de convección [W/m²°C]

A_e = Área exterior de paredes [m²]

Por lo tanto:

$$Q = (T_1 - T_2) / ((1/h_i A_i) + (L_2/K_1 A_i) + (L_3/K_2 A_i) + (1/h_2 A_e)) \quad (3.2)$$

Considerando $T_1 = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$, como la temperatura interna del horno

$T_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, como la temperatura externa del horno

Las paredes tienen la misma construcción, por lo tanto se suma las áreas.

A_i = Área interior de las 5 paredes

$$A_i = 2A_1 + 2A_2 + A_3$$

$$A_i = (0.0877 + 0.0922 + 0.04) \text{ m}^2$$

$$A_i = 0.22 \text{ m}^2$$

A_e = Área exterior de las 5 paredes

$$A_e = 2A_1' + 2A_2' + A_3'$$

$$A_e = (0.2473 + 0.2546 + 0.1169) \text{ m}^2$$

$$A_e = 0.6188 \text{ m}^2$$

Aplicando la formula:

$$Q = (1200^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) / ((1\text{m}^2\text{C}/9.369 \text{ W} \times 0.22\text{m}^2) + (0.07\text{m}^2\text{C} / 0.6 \text{ W} \times 0.22\text{m}^2) + (0.001\text{m}^2\text{C} / 63.9 \text{ W} \times 0.22\text{m}^2) + (1\text{m}^2\text{C} / 22.712 \text{ W} \times 0.6188\text{m}^2))$$

$$Q = 1090.98 \text{ W}$$

b.- Cálculo de pérdidas en las puertas

Tomando en cuenta lo deducido anteriormente que: $A_4 = 0.004 \text{ m}^2$ y

$A_4' = 0.1169 \text{ m}^2$, procedemos a reemplazar en la fórmula (3.2) con los demás datos requeridos.

Entonces:

$$Q = (1200^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}) / ((1\text{m}^2\text{C}/9.369 \text{ W} \times 0.04\text{m}^2) + (0.06\text{m}^2\text{C} / 0.3 \text{ W} \times 0.04\text{m}^2) + (0.001\text{m}^2\text{C} / 63.9 \text{ W} \times 0.04\text{m}^2) + (1\text{m}^2\text{C} / 22.712 \text{ W} \times 0.1169\text{m}^2))$$

$$Q = 147.296$$

3.8.4 Cálculo de la potencia requerida para calentar una probeta.

Considerando que las probetas para prácticas en laboratorio, son de 1 pulgada de diámetro por 1 pulgada de longitud, la potencia requerida para calentar una probeta la encontramos con la siguiente formula:

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2) \tag{3.3}$$

Donde:

Q = Potencia requerida para calentar la probeta. (W)

m = masa de la probeta (Kg)

C_p = Calor específico J/Kg°C

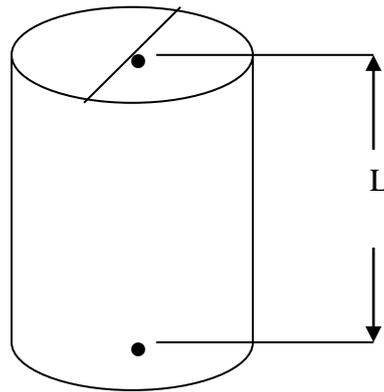


Figura 3.8.4 Probeta

$$\varnothing = 1 \text{ pulg} = 0.0254 \text{ m}$$

$$\rho = 7879 \text{ Kg/m}^3$$

$$r = 0.5 \text{ pulg} = 0.0127 \text{ m}$$

$$C_p = 480 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$L = 1 \text{ pulg} = 0.0254 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$m = \rho \times V \tag{3.4}$$

$$V = \pi \times r^2 \times L \tag{3.5}$$

$$V = 0.00001287 \text{ m}^3$$

Considerando el volumen y la densidad indicadas anteriormente, reemplazar los valores en la formula (3.4) para obtener el valor de m.

$$m = 7879 \text{ Kg/m}^3 \times 0.00001287 \text{ m}^3$$

$$m = 0.1014 \text{ Kg}$$

A continuación reemplazando todos los valores en la formula (3.3) se obtiene la potencia requerida para calentar una probeta.

$$Q = 0.1014 \text{ Kg} \times 480 \text{ J/Kg}^\circ\text{C} \times (1100^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C})$$

$$Q = 57676.32 \text{ J} = 57.676 \text{ KJ} = 0.016 \text{ Kw} = 16.021 \text{ W}$$

Y para 10 probetas su potencia es:

$$Q = 16.021 \text{ W} \times 10$$

$$Q = 160.21 \text{ W.}$$

Por lo tanto: la potencia total es la suma de, pérdidas en las paredes mas perdidas en las puertas y mas la potencia requerida para calentar 10 probetas.

Perdida Total = Calor Perdido en las Paredes + Calor Perdido en la puerta + calor necesario para calentar las probetas

$$\text{Perdida total} = (1090.98 \text{ W} + 147.296 \text{ W} + 160.21 \text{ W})$$

$$\text{Perdida total} = 1398.486 \text{ W}$$

3.8.5.- Análisis de la probeta de acero.

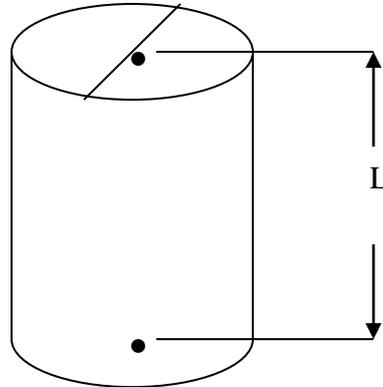


Figura 3.8.4 Probeta

$$\varnothing = 1 \text{ pulg} = 0.0254 \text{ m}$$

$$K = 40 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$r = 0.5 \text{ pulg} = 0.0127 \text{ m}$$

$$h = 9.369 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$L = 1 \text{ pulg} = 0.0254 \text{ m}$$

$$C = 0.00452 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$$

$$L_c = V/A$$

Donde:

L_c = longitud caracteristica

$$V = \text{Volumen} = \pi r^2 h$$

$$A = \text{Area} = 2\pi r^2 + 2\pi r h$$

Por lo tanto:

$$L_c = \pi r^2 h / (2\pi r^2 + 2\pi r h) \tag{3.6}$$

$$L_c = r h / (2r + 2h)$$

$$L_c = 0.0127 \text{ m} \times 0.0254 \text{ m} / 2(0.0127 \text{ m} + 0.0254 \text{ m})$$

$$L_c = 0.00423 \text{ m}$$

$$Bi = hL_c/K \quad (2.6)$$

Donde:

Bi = número de Biot

$$h = 9.369 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

L_c = Longitud característica

$$K = 40 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Reemplazando obtenemos:

$$Bi = (9.369 \text{ W/m}^2\text{°C} \times 0.00423 \text{ m}) / 40 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$Bi = 0.00099 < 0.1 \text{ enfoque de bulto}$$

Ahora se calcula en que tiempo una probeta se calienta a 1100°C

$$(T - T_\infty) / (T_0 - T_\infty) = e^{- (hA/\rho Vc) t} \quad (2.7)$$

$$e^{- (hA/\rho Vc) t} = e^{- (h/\rho L_c C) t}$$

$$h/\rho L_c C = 9.369 \text{ W/m}^2\text{°C} / (7879 \text{ Kg/m}^3 \times 0.00423 \text{ m} \times 0.00452 \text{ J/Kg}^2\text{°C})$$

$$h/\rho L_c C = 0.620 \text{ seg.}$$

$$- (0.620) t/\text{seg}$$

$$(1100 - 1200) / (15 - 1200) = e$$

$$\ln 0.0843 = - 0.620 \text{ t/seg}$$

$$t = \ln 0.0843 / - 0.620$$

$$t = 3.98 \text{ seg.}$$

3.8.6.- Potencia generada por las resistencias

Las resistencias de calentamiento tienen en total 17 amperios, cuyo funcionamiento es a 220 V.

$$P = I \times V$$

$$P = 17 \text{ A} \times 220 \text{ V}$$

$$P = 3740 \text{ W.}$$

Después de haber realizado los cálculos de potencia para el calentamiento del horno, en lo que comprende pérdidas en las paredes, pérdidas en la puerta y potencia para calentar 10 probetas, se llegó a la conclusión que el horno necesita un total de 1398.486 W, y en el mercado solo encontramos resistencias de calentamiento con un total de 3740 W, las cuales los utilizamos.

Por lo tanto el trabajo de calentamiento del horno queda totalmente garantizado y se puede usarlo para una carga de hasta 4 Kg. de masa.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN DEL HORNO PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS

En el siguiente capítulo se describe cada paso realizado en la construcción del horno de tratamiento térmico para prácticas de laboratorio del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico.

4.1.- Parámetros generales

Recopilando todos los factores y decisiones, logradas al final de cada uno de los capítulos, podemos determinar, que el tipo de horno es para laboratorio, el cual tiene una capacidad para tratar térmicamente de 4kg de acero.

El calentamiento es producido por resistencias eléctricas hasta 1200°C de tipo Arrollado en espiral sobre ranuras de tipo Bóveda y debe ser de fácil operación. Considerando estos factores para su construcción necesitamos los siguientes elementos:

4.2.- Carcasa

El material seleccionado para la elaboración del revestimiento del horno, fue una plancha de tool negro de 2 x 1220 x 2440 mm, que previamente es recortado y doblado según sus dimensiones en una dobladora de muelas. VER PLANOS

Obteniendo como resultado de ese proceso la siguiente estructura como se indica en la figura 4.1.



Figura 4.1 Armado de la Carcasa

4.3.- Preparación de los ladrillos refractarios

El ladrillo refractario aparte de disminuir las pérdidas de calor, y de conseguir unas condiciones ambientales en el exterior suficientemente aceptable, fue maquinado especialmente para que cumpla la función de soporte para las resistencias la cual toma el nombre de tipo bóveda como se indica en la figura 4.2.

Su perforación para soporte de las resistencias fue realizada en un taladro de banco con una broca de ½ pulgada y su respectivo corte mediante una sierra como se lo indica en la siguiente figura:



Figura 4.2. Preparación de ladrillos refractarios

4.4.- Montaje de los refractarios para formar la cámara interna

La construcción de la cámara interna del horno para laboratorio, esta diseñada para una masa de 4 Kg., sus dimensiones internas son 205 mm de ancho x 225mm de profundidad x 195 mm de alto.

El montaje de los ladrillos se lo realizó de una manera minuciosa, de tal manera que tomen una forma correcta y precisa, para el soporte de las resistencias y calentamiento.



Figura 4.3 Construcción cámara interna

Como se describe anteriormente los ladrillos son juntados y enlucidos con el cemento refractario de tipo SAIRSET.

4.5.- Instalación de las resistencias de calentamiento

Las cuatro resistencias de calentamiento están diseñadas para ser montadas y desmontadas con gran facilidad de la cámara interna del horno, ya que las perforaciones en los ladrillos son de medida exacta para este procedimiento como se lo indica en la figura 4.4.

Las especificaciones de las resistencias eléctricas de calentamiento son; son de aleación de Fe-Cr-Al, cada resistencia tiene 73 Ohmios las cuales en total suman 17 amperios.



Figura 4.4 Instalación de las resistencias

4.6.- Construcción de la puerta

La puerta del horno tiene un marco de ángulo de 1 pulg. X 1/8, en su interior bajo el procedimiento de soldadura se coloca una tapa que sirve para colocar el manto cerámico sustituyendo al ladrillo refractario para aminorar su peso. VER PLANOS y ANEXO C referente al manto cerámico.

La siguiente figura demuestra el proceso de soldadura y pulida de la puerta del horno para tratamiento térmico.



Figura 4.5 Construcción de la puerta

4.7.- Pruebas de funcionamiento.

A continuación se describe los pasos que fueron realizados en las pruebas de funcionamiento del horno.

- Al realizar la prueba de calentamiento del horno mientras se elevaba la temperatura en el interior, las uniones entre cada ladrillo refractario se producían aberturas, debido a la falta de tiempo de secado del mortero refractario después del montaje de los ladrillos. Razón por la cual se volvió a colocar mortero en las uniones de cada ladrillo.
- Después de haber transportado el horno de un lugar a otro, en el circuito interior se había desconectado el alambre neutro que conecta al toma

corriente de 220 V. Motivo por el cual al momento de conectarlo, se produjo un corto circuito, que averió el transformador y el interruptor de encendido que fueron reemplazados por nuevos.

- Se adquirió para las pruebas de funcionamiento una probeta de acero V945 de la empresa Bohler, de 1 pulg. de diámetro x 2 pulg. de longitud con una Dureza de 7 Rockwell C (HRC). Se procedió a realizar el recocido según las especificaciones del (anexo A) a una temperatura de 700 °C durante 45 minutos, y lo dejamos enfriar a temperatura ambiente. Después se volvió a medir la dureza obteniendo como resultado la perdida total de la misma según el Durómetro en HRC.



Figura 4.6 calentamiento probeta



Figura 4.7 Durómetro

Los resultados de las pruebas son satisfactorios lo que demuestra que el horno esta apto para realizar los trabajos de tratamientos térmicos.

CAPÍTULO V

NORMAS DE SEGURIDAD Y PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN DEL HORNO

5.1 Manual de procedimientos

El presente capítulo contiene las normas de seguridad y procedimientos de operación del horno, a fin de garantizar el funcionamiento del horno de tratamientos térmicos.

A continuación se describe su respectiva codificación.

Tabla 5.1 Codificación de los manuales de procedimientos.

| Nº | DETALLE | CÓDIGO |
|----|---|------------|
| 1 | Normas de seguridad del horno para tratamientos térmicos. | MSHT-SF-01 |
| 2 | Normas de seguridad para el operario del horno para tratamientos térmicos | MSHT-SF-02 |
| 3 | Procedimientos de operación del horno para | MSHT-SF-03 |

| | | |
|--|---------------------|--|
| | tratamiento térmico | |
|--|---------------------|--|

| | | |
|--|---|--------------------------------|
| ITSA  | | Pág. : 1 de 1 |
| | NORMAS DE SEGURIDAD DEL HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO | Código : MSHT-SF-01 |
| | Elaborado por: Cristian S. Flores D. | Revisión Nº. : 1 |
| | Aprobado por: Ing. TOMAS IBUJES V. | Fecha : 20/Feb/08 |

1. OBJETIVO

Dar a conocer al operario las normas de seguridad para la operación del horno.

2. ALCANCE

Para todos los maestros y alumnos del ITSA.

3. NORMAS DE SEGURIDAD

- Asegurarse que el horno se encuentre en un lugar apropiado para que no cause molestias a los demás operarios con la radiación de calor que genera alrededor de el.
- Conocer claramente el funcionamiento y la operación del horno antes de ser operado.
- Conectar el horno a una toma corriente de 220 v.
- Utilizar los equipos de protección personal para evitar accidentes.

| | | |
|--|--|----------------------------|
| ITSA  | | Pág. : 1 de 2 |
| | NORMAS DE SEGURIDAD PARA EL OPERARIO DEL HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO | Código : MSHT-SF-02 |
| | Elaborado por: Cristian S. Flores D. | Revisión N°. : 1 |
| | Aprobado por: Ing. TOMAS IBUJES V. | Fecha :28/Feb/08 |

1. OBJETIVO

Proteger al operario de un accidente dando a conocer el equipo de protección adecuado.

2. ALCANCE

Está dirigida a los estudiantes y profesores que van a operar el horno.

3. NORMAS DE SEGURIDAD

- **Protección visual.-** Usar gafas o máscara de protección para altas temperaturas, como máscaras de fibra de vidrio o máscara de asbestos, para evitar que la radiación cause quemaduras en la cara.



- Usar guantes de maniobra tipo Kevlar que tienen resistencia anticalórica al contacto aproximada de 350°C a 650°C, o los guantes aluminizados que soportan de 315°C a 950°C.



| | | |
|------|--|----------------------------|
| ITSA | | Pág. : 2 de 2 |
| | NORMAS DE SEGURIDAD PARA EL OPERARIO DEL HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO | Código : MSHT-SF-07 |
| | Elaborado por: Cristian S. Flores D. | Revisión N°. : 1 |



Aprobado por: Ing. TOMAS IBUJES V.

Fecha :

- Utilizar overoles o mandiles de resistencia anticalórica Temperatura promedio 315–950 °C



- Utilizar pinzas de sujeción de Distintas formas y tamaños para múltiples aplicaciones y geometrías de la pieza que tienen una Longitud del mango de 600 mm para conseguir una distancia suficiente con el horno caliente y una gran profundidad de inmersión en el baño de enfriamiento



| | | |
|--|---|----------------------------|
|  ITSA | PROCEDIMIENTOS DE OPERACIÓN DEL HORNO PARA TRATAMIENTO TÉRMICO | Pág. : 1 de 1 |
| | | Código : MSHT-SF-07 |
| | Elaborado por: Cristian S. Flores D. | Revisión Nº. : 1 |
| | Aprobado por: Ing. TOMAS IBUJES V. | Fecha : 28/Feb/08 |

1. OBJETIVO

Demostrar los proceso de encendido y operación del horno

2. ALCANCE

Dar a conocer a los operadores el proceso de funcionamiento del horno.

3. Ubicación de los pulsadores

A ● B ● O
C ● □

1. Mediante el interruptor, poner en posición de encendido

Interruptor

2. Presionar **B ●** para seleccionar función (temperatura), y luego

pantalla

A ● mayor, **C ●** menor, para el grado de temperatura.

3. Presionar **B ●** para seleccionar la función (Tiempo), luego

Seleccionar **A ●** mayor, **C ●** menor, para determinar los minutos.

4. Presionar **B ● y C ●** para iniciar el trabajo.

5. Presionar: **A ● y B ●** SALIR DEL PROGRAMA

6. Presionar el interruptor de apagado

CAPÍTULO VI

INFORME ECONÓMICO

En este capítulo se resume la realidad del costo que comprende la construcción del horno de tratamientos térmicos para laboratorio.

6.1.- Presupuesto

Previo la consecución del proyecto, se estipuló en el perfil de grado para la construcción un costo en \$500 americanos.

6.2.- Análisis Económico

Para la construcción del horno se tomo los siguientes rubros:

- Materiales
- Alquiler de maquinaria, herramientas y equipos para la construcción.
- Mano de obra
- Otros

6.2.1.- Materiales

Este rubro lo conforman todos los materiales usados para la elaboración del horno:

- Lámina de tol negro (1 mm)
- Electrodo 6011 Ø
- Ladrillos refractarios (0.21m x 0.11m x 0.07m)

- Tarjeta de control (reprogramable)
- Resistencias eléctricas (Fe, Al, Cr)
- Pintura.
- Tornillos y bisagras.

6.2.2.- Alquiler de maquinaria, herramientas y equipos.

En este se describe todos los necesarios para la construcción del horno de tratamiento térmico.

- Cortadora de tool
- Dobladora de tool.
- Soldadora.
- Taladro.
- Compresor.

6.2.3.- Mano de obra.

El costo de mano de obra comprende, en el valor que se dispone a cancelar por ayuda profesional en caso de necesitarla.

- Asesor para la construcción.
- Ayudante de construcción.

6.2.4.- Otros.

Este rubro se refiere a todo el material no especificado anteriormente, que se usó en la elaboración del proyecto.

- Copias.

- Impresiones.
- Internet
- Gastos varios.

Tabla 6.1 Estudio económico

| DESCRIPCION | CANTIDAD UND | VALOR UND USD | VALOR TOTAL USD |
|-------------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|
| MATERIALES | | | |
| Bisagras | 2 | 0,9 | 1,8 |
| Lámina tool negro 1mm | 1 | 21 | 21 |
| Electrodos E6011 Ø | 50 | 0,06 | 3 |
| Resistencias eléctricas | 4 | 68 | 272 |
| Ladrillos refractarios | 20 | 6,5 | 130 |
| Tarjeta de control | 1 | 120 | 120 |
| Tornillos | 25 | 0,05 | 1,25 |
| Cemento refractario | 1 | 20 | 20 |
| Pintura | 2 | 6 | 12 |
| ALQUILER DE MAQUINARIA | TIEMPO/HORAS | VALOR UNITARIO USD | VALOR TOTAL USD |
| Cortadora de tool | 2 | 3 | 6 |
| Dobladora de tool. | 4 | 6,5 | 13 |
| Soldadora. | 5 | 5 | 25 |
| Taladro. | 10 | 1 | 10 |
| Compresor. | 3 | 8 | 24 |
| MANO DE OBRA | NUMERO HORAS | VALOR HORAS USD | VALOR TOTAL USD |
| Asesor construcción. | 18 | 5 | 90 |
| Ayudante construcción | 5 | 3 | 15 |
| OTROS | CANTIDAD | VALOR UND USD | VALOR TOTAL USD |
| Copias. | 100 | 0,03 | 3 |
| Impresiones. | 700 | 0,1 | 70 |
| Internet | 10h | 0,6 | 6 |
| Gastos varios. | | | 30 |
| TOTAL | | | 873,05 |

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1- Conclusiones:

- La información recopilada para la construcción del horno de tratamiento térmico, fue muy extensa y sirvió como base fundamental para conseguir el objetivo propuesto.
- El diseño térmico se lo realizó de acuerdo a los materiales empleados en la construcción del horno, para ello se tomó en cuenta principalmente la conductividad térmica de los ladrillos refractarios y la potencia generada por las resistencias de calentamiento.
- Los planos de la parte estructural del horno se lo realizó mediante el programa de AUTOCAD, describiendo cada parte del horno e indicando el proceso de ensamble.
- Este proyecto esta diseñado para trabajar con un voltaje de 220, su temperatura máxima es de 1200 °C producida por resistencias eléctricas, fáciles de desmontar y con una tarjeta de control reprogramable con microcontroladores.
- El horno elaborado para el laboratorio de metalurgia es de fácil operación ya que la pantalla indica claramente los procesos de trabajo.

- Realizamos las respectivas pruebas para controlar e inspeccionar el sistema, mediante el proceso de recocido al cero V945. Y determinamos la dureza antes y después del proceso como lo indicamos en las pruebas de funcionamiento.

7.2- Recomendaciones:

- Se recomienda el uso del horno de tratamiento térmico para laboratorio de metalurgia, a los alumnos y maestros del instituto, para incrementar e impartir sus conocimientos acerca del tema referente a los materiales.
- Para el uso del horno se recomienda seguir las normas de seguridad industrial, y los implementos indispensables que los recomienda en el manual de procedimientos del capítulo V para evitar accidentes.
- Antes de empezar a manipular el horno se recomienda tener los conocimientos suficientes del sistema o tarjeta de control indicados en el procedimiento de operación, para no ocasionar el deterioro del equipo por una mala manipulación.
- Seguir los procedimientos de encendido y funcionamiento, descritas en placas en la parte inferior del horno y así tener un fácil manejo del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

- GERÓNIMO CROSETTI, (1982), Tecnología Mecánica, Editorial Hobby, Buenos Aires,
- W. TRINKS, M. H. MAWHINNEY, (1989), Hornos Industriales, Urmo S.A. Ediciones, Bilbao – España, Volumen I
- JULIO ASTIGARRAGA URQUIZA, (1994) Hornos de Resistencias, Editorial Mc. Graw – Hill, 1ª Edición.
- A. MALISHEV, G. NIKOELIEV, Y. SHUVALOV, (1985) Tecnología de los Metales, Editorial Mir, Moscú.
- C. CHAUSSIN, G HILLY, (1975) Metalurgia, Urmo S.A. Ediciones, Bilbao, Tomo I
- Yanus A. CENGEL, (2005) Transferencia de Calor, , México, Edición II.
- B.V. KARLEKAR, R.M. DESMOND, Transferencia de calor, Editorial MC Graw Hill, Edición II
- ASM Metals Handbook.
- Wikipedia, la enciclopedia libre
- http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento_termico

ANEXO E

Tabla E.1. Factores de conversión

| DIMENSIÓN | MÉTRICA | MÉTRICA/INGLESA |
|--|--|--|
| Aceleración | $1 \text{ m/s}^2 = 100 \text{ cm/s}^2$ | $1 \text{ m/s}^2 = 3.2808 \text{ ft/s}^2$ $1 \text{ ft/s}^2 = 0.3048^* \text{ m/s}^2$ |
| Área | $1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2 = 10^6 \text{ mm}^2$ $= 10^{-6} \text{ km}^2$ | $1 \text{ m}^2 = 1.550 \text{ in}^2 = 10.764 \text{ ft}^2$ $1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in}^2 = 0.09290304^* \text{ m}^2$ |
| Densidad | $1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ kg/L} = 1.000 \text{ kg/m}^3$ | $1 \text{ g/cm}^3 = 62.428 \text{ lbm/ft}^3 = 0.036127 \text{ lbm/in}^3$ $1 \text{ lbm/in}^3 = 1.728 \text{ lbm/ft}^3$ $1 \text{ kg/m}^3 = 0.062428 \text{ lbm/ft}^3$ |
| Energía, calor, trabajo, energía interna, entalpía | $1 \text{ kJ} = 1.000 \text{ J} = 1.000 \text{ Nm} = 1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3$ $1 \text{ kJ/kg} = 1.000 \text{ m}^2/\text{s}^2$ $1 \text{ kWh} = 3.600 \text{ kJ}$ $1 \text{ cal}^\dagger = 4.184 \text{ J}$ $1 \text{ IT cal}^\ddagger = 4.1868 \text{ J}$ $1 \text{ Cal}^\dagger = 4.1868 \text{ kJ}$ | $1 \text{ kJ} = 0.94782 \text{ Btu}$ $1 \text{ Btu} = 1.055056 \text{ kJ}$ $= 5.40395 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3 = 778.169 \text{ lbf} \cdot \text{ft}$ $1 \text{ Btu/lbm} = 25.037 \text{ ft}^2/\text{s}^2 = 2.326^* \text{ kJ/kg}$ $1 \text{ kJ/kg} = 0.430 \text{ Btu/lbm}$ $1 \text{ kWh} = 3.412.14 \text{ Btu}$ $1 \text{ therm} = 10^5 \text{ Btu} = 1.055 \times 10^5 \text{ kJ}$ (gas natural) |
| Fuerza | $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 10^5 \text{ dina}$ $1 \text{ kgf} = 9.80665 \text{ N}$ | $1 \text{ lbf} = 32.174 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2 = 4.44822 \text{ N}$ $1 \text{ N} = 0.22481 \text{ lbf}$ |
| Flujo de calor | $1 \text{ W/cm}^2 = 10^4 \text{ W/m}^2$ | $1 \text{ W/m}^2 = 0.3171 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2$ |
| Rapidez de genera- ción de calor | $1 \text{ W/cm}^3 = 10^6 \text{ W/m}^3$ | $1 \text{ W/m}^3 = 0.09665 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^3$ |
| Coefficiente de trans- ferencia de calor | $1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ | $1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} = 0.17612 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$ |
| Longitud | $1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 1.000 \text{ mm}$ $1 \text{ km} = 1.000 \text{ m}$ | $1 \text{ m} = 39.370 \text{ in} = 3.2808 \text{ ft} = 1.0926 \text{ yd}$ $1 \text{ ft} = 12 \text{ in} = 0.3048^* \text{ m}$ $1 \text{ milla} = 5.280 \text{ ft} = 1.6093 \text{ km}$ $1 \text{ in} = 2.54^* \text{ cm}$ |
| Masa | $1 \text{ kg} = 1.000 \text{ g}$ $1 \text{ tonelada métrica} = 1.000 \text{ kg}$ | $1 \text{ kg} = 2.2046226 \text{ lbm}$ $1 \text{ lbm} = 0.45359237^* \text{ kg}$ $1 \text{ onza} = 28.3495 \text{ g}$ $1 \text{ slug} = 32.174 \text{ lbm} = 14.5939 \text{ kg}$ $1 \text{ tonelada corta} = 2.000 \text{ lbm} = 907.1847 \text{ kg}$ |

Tabla E.2. Factores de conversión

| DIMENSIÓN | MÉTRICA | MÉTRICA/INGLESA |
|---|---|--|
| Potencia, rapidez de transferencia de calor | $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ $1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W} = 1.341 \text{ hp}$ $1 \text{ hp}^{\dagger} = 745.7 \text{ W}$ | $1 \text{ kW} = 3\,412.14 \text{ Btu/h}$ $= 737.56 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s}$ $1 \text{ hp} = 550 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s} = 0.7068 \text{ Btu/s}$ $= 42.41 \text{ Btu/min} = 2544.5 \text{ Btu/h}$ $= 0.74570 \text{ kW}$ $1 \text{ hp de caldera} = 33\,475 \text{ Btu/h}$ $1 \text{ Btu/h} = 1.055056 \text{ kJ/h}$ $1 \text{ tonelada de refrigeración} = 200 \text{ Btu/min}$ |
| Presión | $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa} = 10^{-3} \text{ MPa}$ $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars}$ $= 760 \text{ mmHg a } 0^{\circ}\text{C}$ $= 1.03323 \text{ kgf/cm}^2$ $1 \text{ mmHg} = 0.1333 \text{ kPa}$ | $1 \text{ Pa} = 1.4504 \times 10^{-4} \text{ psia}$ $= 0.020886 \text{ lbf/ft}^2$ $1 \text{ psia} = 144 \text{ lbf/ft}^2 = 6.894757 \text{ kPa}$ $1 \text{ atm} = 14.696 \text{ psia} = 29.92 \text{ inHg a } 30^{\circ}\text{F}$ $1 \text{ inHg} = 3.387 \text{ kPa}$ |
| Calor específico | $1 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} = 1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ $= 1 \text{ J/g} \cdot ^{\circ}\text{C}$ | $1 \text{ Btu/lbm} \cdot ^{\circ}\text{F} = 4.1868 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ $1 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R} = 4.1868 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ $1 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} = 0.23885 \text{ Btu/lbm} \cdot ^{\circ}\text{F}$ $= 0.23885 \text{ Btu/lbm} \cdot \text{R}$ |
| Volumen específico | $1 \text{ m}^3/\text{kg} = 1\,000 \text{ L/kg}$ $= 1\,000 \text{ cm}^3/\text{g}$ | $1 \text{ m}^3/\text{kg} = 16.02 \text{ ft}^3/\text{lbm}$ $1 \text{ ft}^3/\text{lbm} = 0.062428 \text{ m}^3/\text{kg}$ |
| Temperatura | $T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$ $\Delta T(\text{K}) = \Delta T(^{\circ}\text{C})$ | $T(\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67 = 1.8T(\text{K})$ $T(^{\circ}\text{F}) = 1.8 T(^{\circ}\text{C}) + 32$ $\Delta T(^{\circ}\text{F}) = \Delta T(\text{R}) = 1.8 \Delta T(\text{K})$ |
| Conductividad térmica | $1 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C} = 1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ | $1 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C} = 0.57782 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft} \cdot ^{\circ}\text{F}$ |
| Resistencia térmica | $1^{\circ}\text{C/W} = 1 \text{ K/W}$ | $1 \text{ K/W} = 0.52750^{\circ}\text{F/h} \cdot \text{Btu}$ |
| Velocidad | $1 \text{ m/s} = 3.60 \text{ km/h}$ | $1 \text{ m/s} = 3.2808 \text{ ft/s} = 2.237 \text{ mi/h}$ $1 \text{ mi/h} = 1.46667 \text{ ft/s}$ $1 \text{ mi/h} = 1.609 \text{ km/h}$ |
| Viscosidad dinámica | $1 \text{ kg/m} \cdot \text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ poise}$ | $1 \text{ kg/m} \cdot \text{s} = 2\,419.1 \text{ lbf/ft} \cdot \text{h}$ $= 0.020886 \text{ lbf} \cdot \text{s/ft}^2$ $= 5.8016 \times 10^{-6} \text{ lbf} \cdot \text{h/ft}^2$ |
| Viscosidad cinemática | $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ $1 \text{ stoke} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ | $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10.764 \text{ ft}^2/\text{s} = 3.875 \times 10^4 \text{ ft}^2/\text{h}$ $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10.764 \text{ ft}^2/\text{s}$ |
| Volumen | $1 \text{ m}^3 = 1\,000 \text{ L} = 10^6 \text{ cm}^3 (\text{cc})$ | $1 \text{ m}^3 = 6.1024 \times 10^4 \text{ in}^3 = 35.315 \text{ ft}^3$ $= 264.17 \text{ gal (U.S.)}$ $1 \text{ galón E.U.} = 231 \text{ in}^3 = 3.7854 \text{ L}$ $1 \text{ onza fluida} = 29.5735 \text{ cm}^3 = 0.0295735 \text{ L}$ $1 \text{ galón E.U.} = 128 \text{ onzas fluidas}$ |

Tabla D.1. Propiedades de los materiales

Propiedades de metales sólidos (continuación)

| Composición | Punto de fusión, K | Propiedades a 300 K | | | | Propiedades a varias temperaturas (K), k(W/m · K)/C _p (J/kg · K) | | | | | |
|--|--------------------|------------------------|----------------------------|--------------|--|--|------|-------|-------|-------|-------|
| | | ρ kg/m ³ | C _p J/kg · K | k W/m · K | α × 10 ⁶ m ² /s | 100 | 200 | 400 | 600 | 800 | 1 000 |
| AISI 1010 | | 7 832 | 434 | 63.9 | 18.8 | | | 58.7 | 48.8 | 39.2 | 31.3 |
| | | | | | | | | 487 | 559 | 685 | 1 168 |
| Al carbono-silicio (Mn ≤ 1%, 0.1% < Si ≤ 0.6%) | | 7 817 | 446 | 51.9 | 14.9 | | | 49.8 | 44.0 | 37.4 | 29.3 |
| Al carbono-manganeso silicio (1% < Mn ≤ 1.65%, 0.1% < Si ≤ 0.6%) | | 8 131 | 434 | 41.0 | 11.6 | | | 501 | 582 | 699 | 971 |
| | | | | | | | | 42.2 | 39.7 | 35.0 | 27.6 |
| | | | | | | | | 487 | 559 | 685 | 1 090 |
| Aceros al cromo (bajo): 1/2 Cr-1/2 Mo-Si (0.18% C, 0.65% Cr, 0.23% Mo, 0.6% Si) | | 7 822 | 444 | 37.7 | 10.9 | | | 38.2 | 36.7 | 33.3 | 26.9 |
| | | | | | | | | 492 | 575 | 688 | 969 |
| 1Cr-1/2 Mo (0.16% C, 1% Cr, 0.54% Mo, 0.39% Si) | | 7 858 | 442 | 42.3 | 12.2 | | | 42.0 | 39.1 | 34.5 | 27.4 |
| | | | | | | | | 492 | 575 | 688 | 969 |
| 1Cr V (0.2% C, 1.02% Cr, 0.15% V) | | 7 836 | 443 | 48.9 | 14.1 | | | 46.8 | 42.1 | 36.3 | 28.2 |
| | | | | | | | | 492 | 575 | 688 | 969 |
| Aceros inoxidables: AISI 302 | | 8 055 | 480 | 15.1 | 3.91 | | | 17.3 | 20.0 | 22.8 | 25.4 |
| | | | | | | | | 512 | 559 | 585 | 606 |
| AISI 304 | 1 670 | 7 900 | 477 | 14.9 | 3.95 | 9.2 | 12.6 | 16.6 | 19.8 | 22.6 | 25.4 |
| | | | | | | 272 | 402 | 515 | 557 | 582 | 611 |
| AISI 316 | | 8 238 | 468 | 13.4 | 3.48 | | | 15.2 | 18.3 | 21.3 | 24.2 |
| | | | | | | | | 504 | 550 | 576 | 602 |
| AISI 347 | | 7 978 | 480 | 14.2 | 3.71 | | | 15.8 | 18.9 | 21.9 | 24.7 |
| | | | | | | | | 513 | 559 | 585 | 606 |
| Ptomo | 601 | 11 340 | 129 | 35.3 | 24.1 | 39.7 | 36.7 | 34.0 | 31.4 | | |
| | | | | | | 118 | 125 | 132 | 142 | | |
| Magnesio | 923 | 1 740 | 1 024 | 156 | 87.6 | 169 | 159 | 153 | 149 | 146 | |
| | | | | | | 649 | 934 | 1 074 | 1 170 | 1 267 | |
| Molibdeno | 2 894 | 10 240 | 251 | 138 | 53.7 | 179 | 143 | 134 | 126 | 118 | 112 |
| | | | | | | 141 | 224 | 261 | 275 | 285 | 295 |
| Niquel: Puro | 1 728 | 8 900 | 444 | 90.7 | 23.0 | 164 | 107 | 80.2 | 65.6 | 67.6 | 71.8 |
| | | | | | | 232 | 383 | 485 | 592 | 530 | 562 |
| Nicromo (80% Ni, 20% Cr) | 1 672 | 8 400 | 420 | 12 | 3.4 | | | 14 | 16 | 21 | |
| Inconel X-750 (73% Ni, 15% Cr, 6.7% Fe) | 1 665 | 8 510 | 439 | 11.7 | 3.1 | 8.7 | 10.3 | 13.5 | 17.0 | 20.5 | 24.0 |
| | | | | | | | 372 | 473 | 510 | 546 | 626 |
| Niobio | 2 741 | 8 570 | 265 | 53.7 | 23.6 | 55.2 | 52.6 | 55.2 | 58.2 | 61.3 | 64.4 |
| | | | | | | 188 | 249 | 274 | 283 | 292 | 301 |
| Paladio | 1 827 | 12 020 | 244 | 71.8 | 24.5 | 76.5 | 71.6 | 73.6 | 79.7 | 86.9 | 94.2 |
| | | | | | | 168 | 227 | 251 | 261 | 271 | 281 |
| Platino: Puro | 2 045 | 21 450 | 133 | 71.6 | 25.1 | 77.5 | 72.6 | 71.8 | 73.2 | 75.6 | 78.7 |
| | | | | | | 100 | 125 | 136 | 141 | 146 | 152 |
| Aleación 60Pt-40Rh (60% Pt, 40% Rh) | 1 800 | 16 630 | 162 | 47 | 17.4 | | | 52 | 59 | 65 | 69 |
| | | | | | | | | — | — | — | — |

ANEXO B

Tabla B.1. Descripción del mortero refractario.

SAIRSET®

Wet, High Strength, High Temperature Bonding Mortar

SAIRSET® is a wet, high strength, air-setting, high temperature mortar. This product was formulated for trowelled mortar joints in brick linings. For dipping consistency, water must be added to the pail. This mortar is used to lay high duty, super duty, high fired super duty, and 50% alumina firebrick. Its maximum operating temperature is 3000°F (1650°C).

CHEMICAL ANALYSIS - Calcined Basis

| | |
|--|--------------|
| Silica - SiO ₂ | 58.0 - 62.0% |
| Alumina - Al ₂ O ₃ | 31.0 - 35.0% |
| Iron Oxide - Fe ₂ O ₃ | 1.0 - 1.7% |
| Lime - CaO..... | 0.1 - 0.4% |
| Magnesia - MgO | 0.1 - 0.4% |
| Titania - TiO ₂ | 1.8 - 2.8% |
| Alkalies - Na ₂ O + K ₂ O..... | 2.5 - 3.2% |

Tabla B.2. Propiedades del mortero refractario

'SAIRSET®

Technical Data

| | | |
|---|---------------------------------|----------------------|
| MAXIMUM RECOMMENDED TEMPERATURE | 3000°F | 1650°C |
| REFRACTORINESS TEST - ASTM C199 | | |
| 2910°F (1600°C) Test Temperature..... | (No Softening or Flowing) | |
| QUANTITY REQUIRED TO LAY 1,000 | | |
| 9x4 1/2x2 1/2" (229x114x63 mm) BRICK | | |
| Dipping Consistency..... | 350 - 400 lb | 159 - 181 kg |
| WATER REQUIRED FOR TEMPERING | | |
| | Approximately | |
| Volume per 100 Pounds (45.4 kg) | <u>gal (U.S.)</u> | <u>liters</u> |
| For Laying Brick | | |
| Trowelling Consistency..... | 1/4 | 0.9 |
| Dipping Consistency..... | 1 1/4 | 4.7 |
| MODULUS OF RUPTURE - ASTM C198 | | |
| On KX-99 Brick with Ends Bonded Together | | |
| Using Mortar in Trowelling Consistency | <u>lb/in²</u> | <u>MPa</u> |
| Dried at 220°F (105°C)..... | 400 - 900 | 2.8 - 6.2 |
| Heated at 1500°F (815°C) and Then Cooled..... | 200 - 650 | 1.4 - 4.5 |
| WATER RETENTION | | |
| A.R.I. Technical Bulletin No. 60..... | 14 Minutes | |
| PARTICLE SIZE - ASTM C92 | | |
| Maximum Retained on 20 Mesh (0.83 mm opening) | 0.5% | |
| Maximum Retained on 35 Mesh (0.42 mm opening) | 5.0% | |

ANEXO C

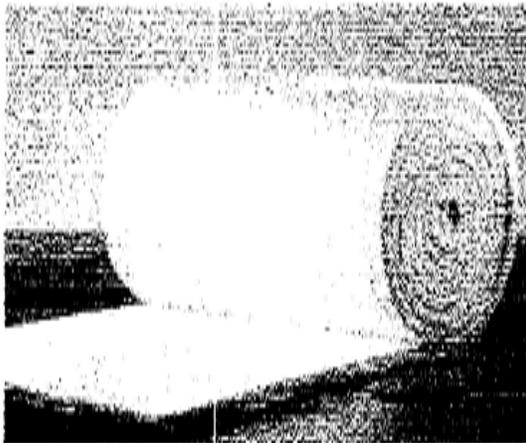
Tabla C.1. Descripción del manto refractario.



Thermal Ceramics

Blanket Products

Product Information



Kaowool Blanket, Kaowool S Blanket, Cerablanket, Cerachem Blanket and Cerachrome Blanket are air laid into a continuous mat and mechanically needled for added strength and surface integrity. Blanket products do not contain organic binders. Thermal Ceramic Blankets provide excellent resistance to chemical attack. Exceptions include hydrofluoric acid, phosphoric acid, and strong alkalies (ie. Na_2O , K_2O). Thermal Ceramic Blankets are unaffected by oil or water. Thermal and physical properties are restored after drying.

Kaowool Blanket

Kaowool blanket is produced from kaolin, a naturally occurring alumina-silica fire clay. Kaowool, the world's most recognizable name in ceramic fiber blanket, is available in a wide variety of densities and sizes. Kaowool blanket offers excellent handleability and high temperature stability. This allows it to meet a wide range of hot face and backup insulation applications in furnaces, kilns and other equipment requiring high temperature heat containment.

Kaowool S Blanket

Kaowool S Blanket is produced from high quality spun fibers. It is available in a wide variety of densities and sizes, and offers a highly cost effective alternative to Cerablanket with its 2300°F (1260°C) maximum temperature rating.

Cerablanket

Cerablanket is produced from exceptionally pure oxides of alumina and silica using the spinning process. The resultant quality spun fibers have been optimized for high handling strength, with on average the highest tensile strength of any Thermal Ceramics ceramic fiber blanket. Cerablanket is available in a wide variety of densities and sizes. Cerablanket offers excellent handleability and high temperature stability which allows it to meet a wide range of hot face and back up insulation applications in furnaces, kilns and other equipment requiring high temperature heat containment.

Cerachem Blanket

Cerachem Blanket is a 2600°F (1427°C) maximum temperature rated refractory blanket formed from a unique, patented, spun alumina-silica-zirconia fiber. It is specially designed for applications where high fiber tensile strength, low thermal conductivity and low shrinkage are required. Cerachem Blanket is used extensively in high temperature units in the ceramic, chemical processing, and ferrous metal industries. Thermal Ceramics Cerachem refractory blankets are ideal for a wide range of hot face lining and backup insulation applications in furnaces, kilns and other high temperature equipment.

Cerachrome Blanket

Made from spun alumina-silica-chromia fiber, Cerachrome Blanket is well suited for hot face lining applications where higher temperatures are encountered, such as soaking pit covers, reheat and forging furnaces. Cerachrome Blanket with its chromia-stabilized chemistry offers improved long term shrinkage characteristics over zirconia containing blankets such as Cerachem. Cerachrome Blanket effectively fills the gap between zirconia blankets and high alumina products.

Tabla C.2. Propiedades del manto refractario.

Blanket Products

Product Information

| Physical Properties | Kaowool | Kaowool 8 | Cerablanket | Cerachem | Cerachrome | |
|--|---|--------------------------|--|--------------------------|--------------------------|------|
| Color | white | white | white | white | blue/green | |
| Density,pcf (kg/m ³) | 3, 4, 6, 8, 10, 12 (148, 64, 96, 128, 192) | 4, 6, 8 (64, 96, 128) | 3, 4, 6, 8 (48, 64, 96, 128) | 4, 6, 8 (64, 96, 128) | 4, 6, 8 (64, 96, 128) | |
| Thickness, in. (mm) | 1/2 - 1 (3, 12.5-50) | 1 - 2 (25-50) | 1/2 - 2 (6.25-50) | 1/2 - 2 (12.5-50) | 1/2 - 2 (12.5-50) | |
| Continuous use limit, °F (°C) | 2000 (1093) | 2000 (1093) | 2150 (1177) | 2400 (1315) | 2300 (1311) | |
| Classification temp. (abng), °F (°C) | 2300 (1260) | 2300 (1260) | 2400 (1315) | 2600 (1428) | 2600 (1428) | |
| Melting point, °F (°C) | 3200 (1760) | 3200 (1760) | 3200 (1760) | 3200 (1760) | 3200 (1760) | |
| Chemical Analysis, Nominal % | | | | | | |
| Alumina, Al ₂ O ₃ | 45 | 35 - 45 | 46 | 35 | 43 | |
| Silica, SiO ₂ | 50 - 55 | 50 - 54 | 54 | 50 | 54 | |
| Ferric oxide, Fe ₂ O ₃ | 1.0 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | - | |
| Titanium oxide, TiO ₂ | 1.7 | - | - | - | - | |
| Calcium oxide, CaO | 0.1 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | - | |
| Magnesium oxide, MgO | trace | 0.05 | 0.05 | 0.05 | - | |
| Alkalies as, Na ₂ O | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | - | |
| Boron Oxide, B ₂ O ₃ | 0.06 | - | - | - | - | |
| Chromium Oxide, Cr ₂ O ₃ | - | - | - | - | 3 | |
| Zirconia | - | 0 - 15 | - | 15 | - | |
| Other | - | 0 - 3 | trace | trace | trace | |
| Thermal Conductivity, BTU-in./hr-ft²-°F (w/mK) (ASTM C 201) | | | | | | |
| Mean temperature, 8pcf | | | | | | |
| ⊙ 500°F (260°C) | 0.44 (0.06) | 0.44 (0.06) | 0.44 (0.06) | 0.44 (0.06) | 0.44 (0.06) | |
| ⊙ 1000°F (538°C) | 0.87 (0.12) | 0.90 (0.13) | 0.93 (0.13) | 0.93 (0.13) | 0.93 (0.13) | |
| ⊙ 1500°F (816°C) | 1.45 (0.21) | 1.60 (0.23) | 1.60 (0.23) | 1.60 (0.23) | 1.60 (0.23) | |
| ⊙ 1800°F (982°C) | 1.85 (0.26) | 2.05 (0.30) | 2.05 (0.30) | 2.05 (0.30) | 2.05 (0.30) | |
| ⊙ 2000°F (1093°C) | 2.09 (0.30) | - | 2.34 (0.34) | 2.34 (0.34) | 2.34 (0.34) | |
| Mean temperature, 6pcf | | | | | | |
| ⊙ 500°F (260°C) | 0.47 (0.07) | 0.47 (0.07) | 0.47 (0.07) | 0.47 (0.07) | 0.47 (0.07) | |
| ⊙ 1000°F (538°C) | 1.01 (0.15) | 1.05 (0.15) | 1.06 (0.15) | 1.06 (0.15) | 1.06 (0.15) | |
| ⊙ 1500°F (816°C) | 1.73 (0.25) | 1.90 (0.27) | 1.90 (0.27) | 1.90 (0.27) | 1.90 (0.27) | |
| ⊙ 1800°F (982°C) | 2.19 (0.32) | 2.45 (0.35) | 2.45 (0.35) | 2.45 (0.35) | 2.45 (0.35) | |
| ⊙ 2000°F (1093°C) | - | 2.83 (0.41) | 2.83 (0.41) | 2.83 (0.41) | 2.83 (0.41) | |
| Mean temperature, 4 pcf | | | | | | |
| ⊙ 500°F (260°C) | 0.54 (0.08) | 0.54 (0.08) | 0.54 (0.08) | 0.54 (0.08) | 0.54 (0.08) | |
| ⊙ 1000°F (538°C) | 1.39 (0.19) | 1.34 (0.19) | 1.34 (0.19) | 1.34 (0.19) | 1.34 (0.19) | |
| ⊙ 1500°F (816°C) | 2.30 (0.33) | 2.48 (0.36) | 2.48 (0.36) | 2.48 (0.36) | 2.48 (0.36) | |
| ⊙ 1800°F (982°C) | 2.55 (0.43) | 3.23 (0.47) | 3.23 (0.47) | 3.23 (0.47) | 3.23 (0.47) | |
| ⊙ 2000°F (1093°C) | - | - | 3.74 (0.54) | 3.74 (0.54) | 3.74 (0.54) | |
| Military Specifications and Approvals | | | Water Leachable Elements on Surface of Fiber, typical quantities, PPM | | | |
| MIL-23128A | 3, 6 pcf blanket | Boron | 40 | Sulfur | 10 | |
| MIL-24284 | AF blankets | Chloride | <10 | Sodium | 40 | |
| MIL-23128B | 6, 8 pcf blanket | Fluorine | <6 | Silicate | 120 | |
| Acoustical performance per ASTM C-423 A and E-795, Sound Absorption Coefficient | | | | | | |
| Kaowool Blanket | 250Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | MRC |
| 1" - 4 pcf | 0.28 | 1.00 | 1.04 | 0.99 | 0.98 | 0.85 |
| 1" - 8 pcf | 0.50 | 0.92 | 0.91 | 0.91 | 0.94 | 0.80 |
| 2" - 4 pcf | 0.92 | 1.01 | 1.01 | 1.03 | 1.10 | 1.00 |
| 2" - 8 pcf | 0.90 | 0.72 | 0.86 | 0.92 | 1.02 | 0.85 |

The values given herein are typical (average) values obtained in accordance with accepted test methods and are subject to normal manufacturing variations. They are supplied as a technical service and are subject to change without notice. Therefore, the data contained herein should not be used for specification purposes. Check with your Thermal Ceramics sales or sales support information.

Thermal Ceramics, Cerachrome, and Cerablanket are trademarks of The Morgan Crucible Company plc. Kaowool is a trademark of Thermal Ceramics Inc.

Marketing Communications Office
Thermal Ceramics Americas
 P.O. Box 208 4200
 P.O. Box 208 4200
Thermal Ceramics Asia Pacific
 P.O. Box 208 4200
 P.O. Box 208 4200
Thermal Ceramics Europe
 P.O. Box 208 4200
 P.O. Box 208 4200

North America - Sales Office
Canada
 T: +1 (416) 223-1414
 F: +1 (416) 223-1140
Mexico
 T: +52 (55) 574 6000
 F: +52 (55) 574 6200
United States of America
 Boston Region
 T: +1 (603) 228 0200
 F: +1 (603) 228 0200

Western Europe
 T: +44 (0) 195 205 2050
 F: +44 (0) 195 205 2050
South America - Sales Office
Argentina
 T: +54 (0) 4372 3331
 F: +54 (0) 4372 3331
Brazil
 T: +55 (21) 2412 1000
 F: +55 (21) 2412 1000

China
 T: +86 (21) 504 1004
 F: +86 (21) 504 1000
Colombia
 T: +57 (0) 201 2000 7000
 F: +57 (0) 201 2000 7000
Guatemala
 T: +502 (0) 4783 2050
 F: +502 (0) 4783 2050
Venezuela
 T: +58 (241) 874 2164
 F: +58 (241) 874 2164

ANEXOS

PLANOS