

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

SEDE LATACUNGA



CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO DE RESISTENCIAS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS”

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ

**JUAN PABLO LÓPEZ PROAÑO
JUAN PABLO SÁNCHEZ JARAMILLO**

Latacunga, Enero 2009

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **LÓPEZ PROAÑO JUAN PABLO,**
SÁNCHEZ JARAMILLO JUAN PABLO

Autorizamos a la Escuela Politécnica del Ejército la publicación, en la Biblioteca Virtual de la Institución del trabajo “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO DE RESISTENCIAS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, 6 de Enero del 2009.

LÓPEZ PROAÑO JUAN PABLO.
CI. No. 1002648812

SÁNCHEZ JARAMILLO JUAN PABLO.
CI. No. 1002642096

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **LÓPEZ PROAÑO JUAN PABLO,**
 SÁNCHEZ JARAMILLO JUAN PABLO

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO DE RESISTENCIAS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS” ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, 6 de Enero del 2009.

LÓPEZ PROAÑO JUAN PABLO. **SÁNCHEZ JARAMILLO JUAN PABLO.**
CI. No. 1002648812 CI. No. 1002642096
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICADO

ING. GUIDO TORRES (DIRECTOR)

ING. OSCAR ARTEAGA (CODIRECTOR)

CERTIFICAN:

Que el trabajo “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO DE RESISTENCIAS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS” realizado por los señores: LÓPEZ PROAÑO JUAN PABLO, SÁNCHEZ JARAMILLO JUAN PABLO ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la ESPE, en el Reglamento de Estudiantes de la Escuela Politécnica del Ejército.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, **SI** recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de UN empastado y UN disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat. Autorizan a los señores: LÓPEZ PROAÑO JUAN PABLO, SÁNCHEZ JARAMILLO JUAN PABLO que lo entregue al ING. JUAN CASTRO, en su calidad de Coordinador de Carrera.

Latacunga, 6 de Enero del 2009.

Ing. Guido Torres

DIRECTOR

Ing. Oscar Arteaga

CODIRECTOR

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Pablo López Proaño y Juan Pablo Sánchez Jaramillo, bajo nuestra supervisión.

ING. GUIDO TORRES
DIRECTOR DE PROYECTO

ING. OSCAR ARTEAGA
CODIRECTOR DE
PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Doy mi más sincero agradecimiento a Dios, que ha sido mi guía espiritual en todo momento, ya que él me ha llevado a consolidar mi meta y todos los anhelos de mi vida.

Quiero agradecer a mis padres pilares fundamentales de amor, responsabilidad y comprensión, a mis hermanos que con su apoyo diario fueron ejemplo de superación, mis abuelos ejemplo de vida y lucha diaria, a mi esposa que con su amor me brindo el apoyo incondicional.

No me puedo olvidar de mis amigos ejemplo de lealtad y cariño, mis sinceros agradecimiento a ellos que siempre compartimos buenos momentos, en especial a mi amigo y hermano Juan Pablo.

Juan Pablo S.

DEDICATORIA

El presente trabajo quiero dedicar a mis padres y hermanos que con su esfuerzo, apoyo, sacrificio y confianza me han guiado por el camino del bien.

Por ser un ejemplo de vida y comprensión, por dejar todo por el cumplimiento de mis metas y por ser la familia ejemplar, es para Ustedes este proyecto, sacrificio suyo y mío diariamente.

“ La familia es pilar fundamental de la sociedad “

Juan Pablo S.

AGRADECIMIENTO

Al culminar esta nueva etapa de mi vida quiero agradecer a Dios por haberme iluminado en todo momento; a mis Padres por haberme dado la vida y la oportunidad de superarme, por haber sido quienes me aconsejaron, me guiaron y no permitieron que descuidé mis objetivos; a mis hermanos porque sin su cariño y su constante apoyo me hicieron sacar las mejores enseñanzas de las circunstancias más difíciles.

A mis profesores, porque aparte de brindarme sus conocimientos, me brindaron su amistad haciendo que mi paso por la universidad sea una de las experiencias más grandes de mi vida, a mis amigos que conformamos el “Tomando Conjunto” que en momentos decisivos como el “Curso de Tabacaidismo” supieron alentarme, además en las buenas y malas estuvieron conmigo y mucho más que eso se convirtieron en mi familia durante toda mi vida universitaria.

A Juan Pablo que siempre me dedicó lo mejor de sí y estuvo conmigo cuando necesité de un hermano y con quien nos propusimos lograr esta meta juntos y con quien salimos siempre adelante.

Juan Pablo V.

DEDICATORIA

Quiero ofrecer éste trabajo a mis Padres, a mis hermanos, a mi familia, y en general a todas las personas que de una manera u otra hicieron posible que cumpla este gran objetivo de mi vida.

También quiero dedicarles a las personas que iniciaron conmigo éste designio pero que por la voluntad de Dios no pudieron quedarse en cuerpo conmigo, convirtiéndose en mis protectores y en mi angelito.

Juan Pablo L.

ÍNDICE

CARÁTULA	i
AUTORIZACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
CERTIFICACIÓN	iv
CERTIFICACIÓN	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
DEDICATORIA	ix
ÍNDICE	x
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xix
PRESENTACIÓN	xx

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 TRATAMIENTO TÉRMICO	1
1.1.1 LIMPIEZA DE LAS PIEZAS ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO	4
1.1.1.1 Antes Del Tratamiento Térmico	4
1.1.1.2 Después Del Tratamiento Térmico	5
1.2 TEMPERATURAS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS	5
1.3 TIPOS DE HORNOS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS	6
1.4 HORNOS DE RESISTENCIA METÁLICA	8
1.5 HORNOS DE COMBUSTIBLE	9
1.6 RESISTENCIAS	10
1.7 VENTAJAS DEL HORNO ELÉCTRICO RESPECTO AL HORNO DE COMBUSTIBLE	12

CAPÍTULO II

PARÁMETROS DE DISEÑO

2.1 USO DEL HORNO ELÉCTRICO	14
2.2 DIMENSIONES DEL HORNO	14
2.2.1 DIMENSIONES INTERIORES DE LA CÁMARA	14
2.3 DIMENSIONES MÁXIMAS DE LA PIEZA DE TRABAJO	15
2.4 TEMPERATURA MÁXIMA DE LA PIEZA DE TRABAJO	15
2.5 TEMPERATURA DE SERVICIO DEL HORNO	17
2.6 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	18
2.7 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A UTILIZARSE EN LAS PAREDES DEL HORNO	20
2.7.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL CONCRETO REFRACTARIO CONCRAX – 1500	22
2.7.2 AISLAMIENTO TÉRMICO	23
2.8 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A UTILIZAR COMO RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	27
2.9 CUBIERTA EXTERIOR	29
2.9.1 FIBROCEMENTO	29
2.9.1.1 Características Técnicas	29
2.10 DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES QUE SE UTILIZARÁN EN EL DISEÑO TÉRMICO	31
2.10.1 ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LAS PAREDES	31
2.10.2 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL CALOR SUMINISTRADO POR EL HORNO PARA UN CICLO DE TRABAJO	32
2.11 ECUACIONES PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS	33
2.11.1 BALANCE TÉRMICO PARA EL PUNTO NODAL 0	33
2.11.2 BALANCE TÉRMICO PARA EL PUNTO NODAL 1	35

2.11.3 BALANCE TÉRMICO PARA EL PUNTO NODAL 5	35
2.11.4 BALANCE TÉRMICO PARA EL PUNTO EXTERIOR DE LA PARED	36
2.11.5 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR ACUMULACIÓN DE CALOR DEBIDO A LA CONDUCCIÓN DE CALOR	39
2.11.6 ECUACIONES PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS POR CONVECCIÓN	39
2.11.7 ECUACIONES PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN	41
2.11.8 ECUACIONES PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE TRATAMIENTO DE LA PIEZA	41
2.11.9 ECUACIONES PARA DETERMINAR LA TRANSMISIÓN DE CALOR A LA PIEZA	43
2.11.10 ECUACIONES PARA EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE CONVECCIÓN	44
2.11.11 RENDIMIENTO TÉRMICO NETO DE OPERACIÓN	45

CAPÍTULO III

DISEÑO TÉRMICO

3.1 CONSIDERACIONES GENERALES	46
3.2 TRANSFERENCIA DE CALOR	46
3.3 DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LAS PAREDES	47
3.3.1 MÉTODO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DURANTE EL CALENTAMIENTO DE LAS PAREDES DEL HORNO	47
3.4 CALOR ACUMULADO EN LAS PAREDES DEL HORNO	52
3.5 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR	52
3.6 PÉRDIDAS DE CALOR POR CONVECCIÓN	55
3.7 PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN	58

3.8 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRATAMIENTO DE LA PIEZA	58
3.9 DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CALOR TRANSFERIDO	59
3.9.1 TRANSMISIÓN DE CALOR A LA PIEZA	60
3.10 CALOR TOTAL SUMINISTRADO POR EL SISTEMA	60
3.11 RENDIMIENTOS TÉRMICOS	60
3.11.1 RENDIMIENTO TÉRMICO DE CONVECCIÓN	60
3.11.2 RENDIMIENTO TÉRMICO NETO DE OPERACIÓN	61
3.12 CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DE RESISTENCIA	62
3.12.1 CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA	62
3.12.2 LA TENSIÓN DE UN HORNO	62
3.12.3 LA TEMPERATURA DE LOS ELEMENTOS	63
3.12.4 CARGA ESPECÍFICA DE SUPERFICIE O CAPACIDAD DE LOS ELEMENTOS DE RESISTENCIA	63
3.12.5 FACTOR DE TEMPERATURA (Ct)	64
3.12.6 ELEMENTOS DE RESISTENCIA	65
3.12.7 DURACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE RESISTENCIA	66
3.12.8 CONEXIÓN SERIE	66
3.12.9 CÁLCULO NUMÉRICO DE LOS ELEMENTOS	67
3.12.9.1 Cálculo Del Diámetro Del Hilo (D) Del Elemento	67
3.12.9.2 Método Rápido Para El Cálculo Del Diámetro Del Hilo (D)	68
3.13 POTENCIA DEL HORNO	72

CAPÍTULO IV

PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

4.1 INTRODUCCIÓN	73
4.2 BOBINADO	74
4.3 ESTIRADO DE LAS ESPIRAS	75
4.4 CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA REFRACTARIA	76
4.4.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS PORTA RESISTENCIAS Y DE LAS PAREDES SECUNDARIAS	76

4.4.1.1 Características De Los Elementos Refractarios Concrax	76
4.5 INDICACIONES PARA LA ELABORACIÓN DE LA MASA REFRACTARIA	77
4.6 PAREDES AISLANTES	81
4.6.1 PAREDES EXTERIORES	81
4.6.2 ENSAMBLAJE DEL CONJUNTO	82
4.6.3 PUERTA DEL HORNO	83
4.7 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL	83
4.8 PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DEL HORNO	85

CONCLUSIONES

107

RECOMENDACIONES

108

BIBLIOGRAFÍA

109

ANEXO 1

110 -

111

ANEXO 2

112

ANEXO 3

113

ANEXO 4

114

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

1.1 VALORES DE TEMPERATURA ORIENTADOS PARA EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS DISTINTAS CALIDADES DE ACEROS	5-
---	----

6

1.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS ALEACIONES KANTHAL	
--	--

12

CAPÍTULO II

2.1 DATOS TÉCNICOS DE MASAS CERÁMICAS DE AISLAMIENTO PARA ELEMENTOS DE RESISTENCIA	19
---	----

2.2 DATOS TÉCNICOS DEL MATERIAL A UTILIZARSE COMO CARGA	20
---	----

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA MASA DE ÓXIDO DE ALUMINIO	20
---	----

2.4 CARACTERÍSTICAS DE LA MASA DE REFRACTARIA	21
---	----

2.5 CARACTERÍSTICAS DE LA MASA DE ÓXIDO DE MAGNESIO	21
---	----

2.6 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL CONCRETO REFRACTARIO CONCRAX – 1500	22 –
--	------

23

2.7 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LA DIATOMITA	24
---	----

2.8 CLASIFICACIÓN DE LOS AISLAMIENTOS DE SOPORTE	25
--	----

2.9 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS AISLANTES $\left(\frac{BTU}{h \cdot pie \cdot ^\circ F} \right)$	26
--	----

2.10 MATERIALES QUE PUEDEN UTILIZARSE COMO RESISTENCIA ELÉCTRICA	
---	--

28

2.11 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL FIBROCEMENTO	30
---	----

2.12 PROPIEDADES DE LA PLACA DE FIBROCEMENTO	30
--	----

CAPÍTULO III

3.1 RESULTADOS OBTENIDOS AL REALIZAR CÁLCULOS

61

3.2 CARGAS DE SUPERFICIE MÁXIMAS ADMISIBLES (WAT/CM²) PARA ELEMENTO KANTHAL

64

3.3 DATOS NUMÉRICOS DEL ELEMENTO RESISTIVO

71

CAPÍTULO IV

4.1 RELAJAMIENTO (F) EN RELACIÓN CON EL DIÁMETRO DEL HILO (D) Y DEL HUSILLO (D') (mm)

74

4.2 DIMENSIONES (DISPOSITIVO GUÍA)

75

4.3. CONSTRUCCIÓN DE LAS BASES DEL HORNO

85

4.4 CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE INFERIOR DE LOS LADRILLOS

85

4.5 CONSTRUCCIÓN DE LA ARMADURA DEL HORNO

86

4.6 PRUEBA PARA LA COLOCACIÓN DE LOS LADRILLOS EN LA BASE

86

4.7 ELABORACIÓN DE LA MEZCLA DEL CEMENTO REFRACTARIO

87

4.8 ENSAMBLADO DE LA BASE DEL HORNO

88

4.9 ENSAMBLADO DE LAS PAREDES DEL HORNO

88

4.10 VERIFICACIÓN DE DETALLES EN EL EXTERIOR DE LAS PAREDES DEL HORNO

89

4.11 ENSAMBLADO DE LA CÁMARA DEL HORNO

89

4.12 VERIFICACIÓN DE DETALLES EN EL INTERIOR DE LAS PAREDES DEL HORNO

90

4.13 SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CALENTAMIENTO

90

4.14 ELABORACIÓN DE LAS GUÍAS DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

91

4.15 PRUEBA PARA LA COLOCACIÓN DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

91

4.16 COLOCACIÓN DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS EN LAS PAREDES DEL HORNO	92
4.17 VERIFICACIÓN DE LA COLOCACIÓN Y UBICACIÓN DE LAS RESISTENCIAS ELÉCTRICAS EN LAS PAREDES DEL HORNO	92
4.18 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DEL TECHO DEL HORNO	93
4.19 PRUEBA DE COLOCACIÓN DE LOS LADRILLOS EN LA ESTRUCTURA DEL TECHO DEL HORNO	93
4.20 CONSTRUCCIÓN TOTAL DEL TECHO DEL HORNO	94
4.21 COLOCACIÓN DE LOS SOPORTES METÁLICOS EN EL TECHO DEL HORNO	94
4.22 MONTAJE DEL TECHO DEL HORNO A LAS PAREDES	95
4.23 UBICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL EN EL HORNO	95
4.24 CONSTRUCCIÓN DE LA CAJA DE PROTECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL	96
4.25 COLOCACIÓN DE LA CAJA DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL	96
4.26 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA PUERTA DEL HORNO	97
4.27 PRUEBA PARA LA COLOCACIÓN DE LOS LADRILLOS EN LA ESTRUCTURA DE LA PUERTA DEL HORNO	97
4.28 CONSTRUCCIÓN DE LA PUERTA DEL HORNO	98
4.29 MONTAJE DE LA PUERTA A LA ESTRUCTURA DEL HORNO	98
4.30 CONSTRUCCIÓN DE LOS SEGUROS DE LA PUERTA DEL HORNO	99
4.31 MEDICIÓN Y CORTE DE LA FIBRA DE CERÁMICA	99
4.32 COLOCACIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE FIBRA DE CERÁMICA	100
4.33 ELABORACIÓN DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS DEL HORNO	100

4.34 COLOCACIÓN DE SELLOS EN LAS CAVIDADES DEL HORNO	
101	
4.35 VERIFICACIÓN DE DETALLES DE SELLOS EN LAS CAVIDADES DEL HORNO	
101	
4.36 INSTALACIÓN DE LA TERMOCUPLA EN LA CÁMARA DEL HORNO	102
4.37 VERIFICACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LA TERMOCUPLA	
102	
4.38 RECUBRIMIENTO DE LA TERMOCUPLA CON FIBRA DE CERÁMICA	103
4.39 MEDICIÓN Y CORTE DE LA LÁMINA DE ACERO INOXIDABLE	
103	
4.40 RECUBRIMIENTO DE DOS PAREDES DEL HORNO CON LA LÁMINA DE ACERO INOXIDABLE	
104	
4.41 RECUBRIMIENTO TOTAL DEL HORNO CON EL ACERO INOXIDABLE	
104	
4.42 SOLDADURA DE LA PARTE POSTERIOR DEL HORNO	
105	
4.43 VERIFICACIÓN DEL SELLADO DE LAS CAVIDADES DEL HORNO	105
4.44 PUESTA A PUNTO DE LOS DETALLES DEL HORNO	
106	

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

1.1 DIAGRAMA HIERRO – CARBONO	3
-------------------------------	---

CAPÍTULO II

2.1 SECCIÓN DE PARED QUE INCLUYE EL PUNTO NODAL 0	33
2.2 SECCIÓN DE PARED QUE INCLUYE EL PUNTO NODAL 1	35
2.3 SECCIÓN DE PARED QUE INCLUYE EL PUNTO DE LA INTERCARA 5	36
2.4 SECCIÓN DE PARED QUE INCLUYE EL PUNTO EXTERIOR 12	36

CAPÍTULO III

3.1 SECCIÓN DE PARED DEL HORNO	47
3.2 PARED PLANA DE CARAS MÚLTIPLES	49
3.3 CORTE TRANSVERSAL DEL HORNO, DIMENSIONES INTERIORES Y ESPEORES DE PARED	51
3.4 DISTRIBUCIÓN FINAL DE TEMPERATURAS EN LAS PAREDES DE LA CÁMARA	52
3.5 DISPOSICIÓN DE LA CARGA EN EL INTERIOR DE LA CÁMARA	59

CAPÍTULO IV

4.1 FIBRA CERÁMICA SÚPER AEROFAX	79
4.2 CONCRETO REFRACTARIO CONCRAX	79
4.3 MEZCLA DEL ERPLAX 40	80

PRESENTACIÓN

Los tratamientos térmicos describe un proceso en el cual una pieza o herramienta se somete intencionalmente a una secuencia específica de tiempo – temperatura. El objetivo del tratamiento térmico es conferirle a la pieza propiedades requeridas para procesos de transformación posteriores o para su aplicación final.

Los tratamientos térmicos son cambios estructurales obtenidos sobre todo en las aleaciones Hierro – Carbono (Fe – C), por medio del calentamiento y enfriamiento, con el fin de conferir determinadas características mecánicas a una pieza. Las propiedades mecánicas de las aleaciones (Fe – C) varían en función de los siguientes parámetros:

- Del porcentaje de carbono que contienen.
- De la temperatura a la que se realiza el tratamiento térmico
- De las condiciones de enfriamiento

Existen diferentes tipos de hornos para los procesos de tratamiento térmico. La elección del horno debe tomarse teniendo en cuenta el tamaño y forma de la pieza, el número de piezas y las temperaturas de tratamiento térmico del material.

En los hornos de resistencia la calefacción se prevé eléctrica para su conexión a 220 V mediante resistencias en forma de U, de la potencia adecuada cada una envolviendo la mufla y una resistencia en el final de la mufla.

Las resistencias son mandadas por uno o más pirómetros con termopar situados en el interior de la mufla instalados en serie con otros cuyo termopar está situado en la zona de calentamiento entre la mufla y las resistencias.

Se ha determinado que las temperaturas recomendadas para la cámara de un horno de un laboratorio estándar varían entre 530°C y 1000°C.

Para la elaboración del horno hemos utilizado ladrillo refractario, concreto refractario que tiene una temperatura de ablandamiento superior a la máxima recomendada para servicio, proveyendo un amplio margen de seguridad a las instalaciones, láminas de asbesto y amianto como también diatomita la cual tiene la propiedad más importante, como naturalmente es la baja conductividad térmica y la capacidad de retención de calor así como también lana de vidrio, acero inoxidable para el recubrimiento, resistencias de tipo Kanthal que nos brinda temperaturas de 1094 a 1233 grados centígrados y elementos de control que nos dan una lectura real de temperatura a la que trabaja el horno.

En las paredes del horno vamos a encontrar diversas formas de pérdidas de calor tanto por factores internos como externos. Las pérdidas de calor que encontramos son perdidas de calor por convección, por radiación y perdidas de calor por acumulación de calor en las paredes.

El diseño de la cámara se ha provisto de tal manera que elementos de resistencia se encuentren aislados en las paredes interiores de la cámara; Con el fin de proteger a los elementos del ataque de las diferentes atmósferas a que pueden estar expuestas (carburantes, atmósferas que contienen cloro, azufre, hidrógeno, vapor de agua, etc.). Estas paredes refractarias son de cemento refractario COCRAX – 1500, selección que se hizo en base a las características que deben reunir las masas cerámicas de aislamiento para elementos de resistencia KANTHAL.

Una vez que se tiene los materiales con las dimensiones específicas se procede al ensamblaje del conjunto; para lo cual se construye una estructura de ángulo Dixon, para darle mayor solidez al conjunto; hecha la estructura se coloca la placa plana inferior la que contiene dos placas longitudinales del mismo material, sobre las cuales irán asentadas las placas refractarias; luego se colocan

las paredes laterales, las placas del frente y la posterior intermedia que contiene el marco interior, además la exterior posterior.

Se masilla las uniones con masilla resistentes a altas temperaturas que preparada con agua adquiere una plasticidad y adherencia muy buena. Se apisona esta superficie con polvo aislante diatomita.

Se ensambla luego las paredes refractarias secundarias; colocando la pared inferior; luego las dos laterales y por último la superior; estas paredes estarán unidas entre sí por alambres de acero, para prevenir que en caso de que se desee cambiar un porta-resistencias estas paredes no tengan en que sujetarse y se viren.

Los porta resistencias se colocarán en el mismo orden junto con la pared refractaria posterior de la cámara. Las uniones interiores de las paredes de la cámara se mancillarán con arcilla.

En los espacios que quedan entre las paredes refractarias secundarias y las paredes de fibrocemento, se apisona el polvo aislante.

Los terminales de los elementos de resistencia serán aislados con mullos cerámicos en el espacio de aislamiento que atraviesan; para luego salir a la parte posterior, donde serán conectadas en serie. Se completa el trabajo colocando la estructura superior (marco) el cual contiene la placa superior de fibrocemento.

Uno de los factores más importantes de la elaboración de este proyecto, es el que los estudiantes puedan realizar prácticas de laboratorio así como también el implementar con materiales de utilidad al laboratorio de Ciencias de los Materiales por tal razón presentamos este trabajo.

I.- INTRODUCCION Y FUNDAMENTO TEÓRICO

1.1 TRATAMIENTO TÉRMICO

El término tratamiento térmico describe un proceso en el cual una herramienta o parte de una herramienta se somete intencionalmente a una secuencia específica de tiempo - temperatura. En algunos casos, la pieza puede ser sometida adicionalmente a otras influencias químicas y/o físicas. El objetivo del tratamiento térmico es conferirle a la pieza propiedades requeridas para procesos de transformación posteriores o para su aplicación final.

Un proceso de tratamiento térmico puede provocar transformaciones de los constituyentes estructurales sin modificar la composición química promedio del material. Al final del tratamiento térmico, los componentes estructurales pueden estar en equilibrio (por ejemplo: ferrita + carburos; después del recocido) o no (por ejemplo: martensita; después del temple). El tratamiento térmico también puede causar cambios en el tamaño, forma o distribución de los componentes estructurales sin cambiar el tipo constituyente (por ejemplo: en el recocido).

También es posible cambiar el contenido de ciertos estructurales en la zona superficial (por ejemplo: cementación), o cambiar la intensidad y distribución de las tensiones internas (por ejemplo: distensionado).

Cada proceso de tratamiento térmico consiste de los siguientes pasos individuales:

- **Calentamiento.-** Eleva la temperatura de un pieza

- **Pre calentamiento.-** Calentamiento seguido de un mantenimiento a una o más temperaturas (pre calentamiento de múltiples etapas) por debajo de la temperatura máxima seleccionada. El objetivo del pre calentamiento es reducir las tensiones de fisuras ocasionadas por tensiones térmicas.

- **Calentamiento superficial.-** Consiste en un calentamiento hasta que la zona superficial de la pieza obtiene una temperatura específica.
- **Calentamiento a Fondo.-** Calentamiento Superficial + igualación de la temperatura.
- **Mantenimiento.-** Consiste en mantener una cierta temperatura sobre toda la sección.
- **Enfriamiento.-** Consiste en disminuir la temperatura de una pieza. Todo enfriamiento que sucede más rápidamente que aquel que se presenta al aire quieto, es denominado temple. (cuando se enfrían austenita con buenas propiedades de tenacidad, el enfriamiento en aire también es denominado temple.)

Los tratamientos térmicos son cambios estructurales obtenidos sobre todo en las aleaciones Hierro – Carbono (Fe – C), por medio del calentamiento y enfriamiento, con el fin de conferir determinadas características mecánicas a una pieza. Las propiedades mecánicas de las aleaciones (Fe – C) varían en función de los siguientes parámetros:

- Del porcentaje de carbono que contienen.
- De la temperatura a la que se realiza el tratamiento térmico
- De las condiciones de enfriamiento

Es necesario saber cómo está constituida una aleación (Fe – C), y por medio de un tratamiento térmico adecuado, variar y mejorar su estructura, con el fin de mejorar las propiedades y la consiguiente funcionalidad de una pieza.

El diagrama Hierro – Carbono de la Fig. 1.1 simplifica la explicación de los tratamientos térmicos que se pueden realizar en función de la temperatura y del porcentaje de carbono.

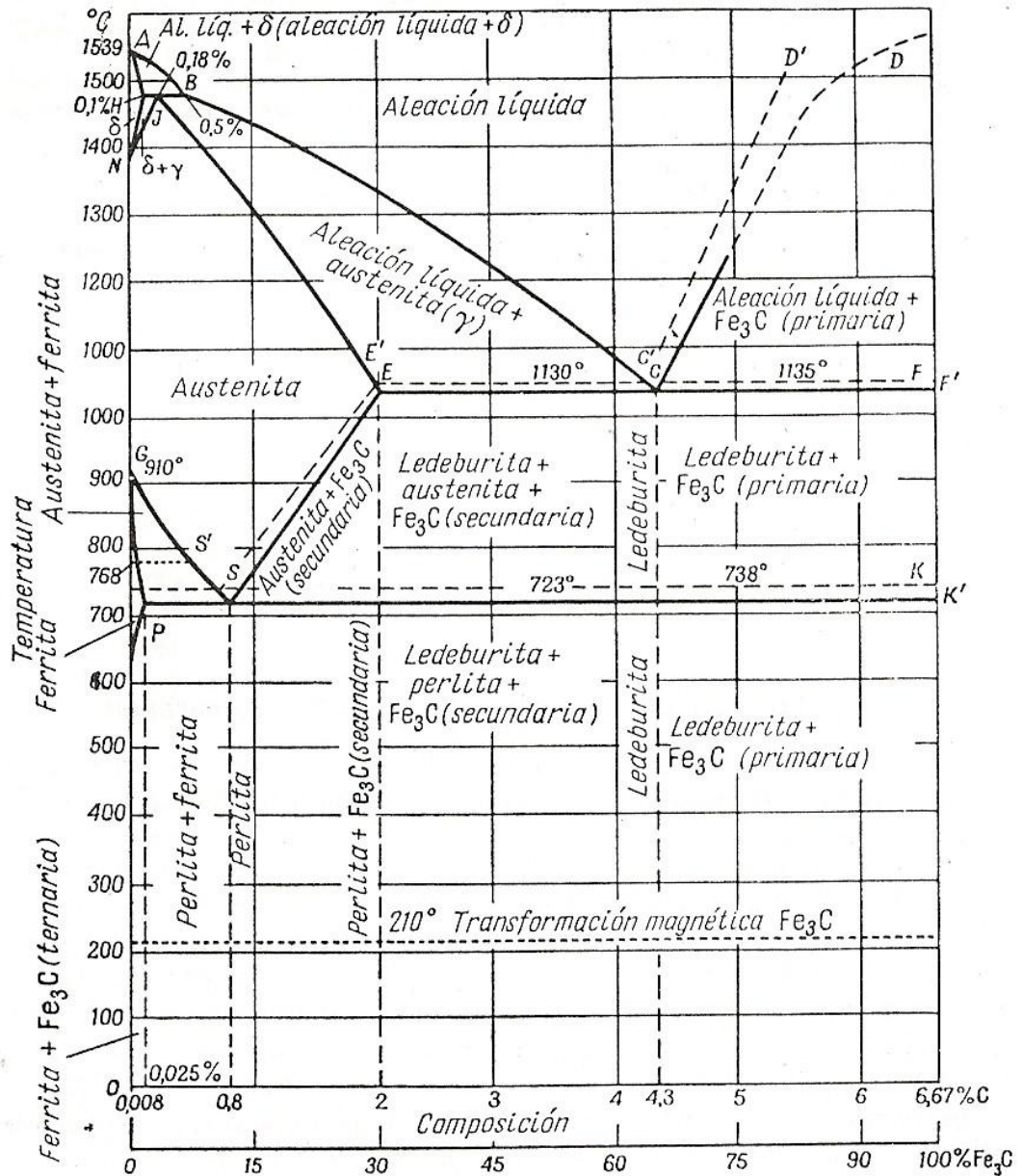


Figura 1.1. Diagrama Hierro – Carbono

1.1.1 LIMPIEZA DE LAS PIEZAS ANTES Y DESPUES DEL TRATAMIENTO

Dependiendo del tipo de tratamiento térmico, medios de enfriamiento y calentamiento y del equipo de tratamiento térmico puede ser necesaria la limpieza de las piezas, particularmente antes del proceso y en algunas ocasiones después.

1.1.1.1 ANTES DEL TRATAMIENTO TÉRMICO:

Solo es posible realizar una correcta inspección dimensional de las piezas si estas están perfectamente limpias.

Las piezas que hayan sido mecanizadas, deben encontrarse libres de grasa, aceite y otras suciedades antes de ir al temple. Con esto se evita que estas sustancias se quemen sobre las superficies mecanizadas, que se presenten reacciones químicas con las resistencias de los hornos eléctricos o que se den influencias indeseadas en la atmósfera del horno.

En un buen número de tratamientos térmicos superficiales, es pre requisito que las piezas tengan una superficie perfectamente limpia para obtener resultados satisfactorios.

Esto es válido también para la aplicación de recubrimientos de protección en el caso de tratamientos térmicos parciales.

Para garantizar la seguridad durante la operación (el agua o residuos de sales con bajo punto de fusión sobre la superficie de la pieza pueden causar explosiones durante la inmersión en el medio de temple) y para evitar el riesgo de polución ambiental o la contaminación del medio de temple, deben evitarse las impurezas sobre la superficie de la pieza. Al escoger un baño de sales debe considerarse la reacción de este baño con otros o con el medio de temple.

1.1.1.2 DESPUÉS DEL TRATAMIENTO TÉRMICO:

La limpieza de las piezas después del tratamiento térmico es requerida principalmente cuando se trabaja con sales y así se evita cualquier corrosión sobre la superficie de las piezas.

Este problema no ocurre en tratamientos térmicos al vacío, en gases inertes o en lechos fluidizados. El temple en aceite requiere también de una limpieza posterior. Para obtener protección contra el óxido, las piezas deben ser tratadas con una emulsión anti óxido después del lavado.

Las operaciones de limpieza pueden ser ejecutadas manualmente pieza por pieza o mediante equipos de lavado automático.

1.2. TEMPERATURAS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

DENOMINACIÓN	EQUIVALENTE	TRATAMIENTO TÉRMICO
ASSAB - DF2 (Trabajo en Frío)	AISI / SAE 01	Forjado: 950 °C – 800 °C Recocido suave: 780 °C Relevado de Tensiones: 675 °C
ASSAB - XW10 (Trabajo en Frío)	AISI / SAE A2	Forjado: 1075 °C – 850 °C Recocido suave: 850 °C Relevado de Tensiones: 675 °C Temple: 940 °C – 960 °C
ASSAB - MA (Trabajo en Frío)	AISI / SAE S1	Forjado: 1000 °C – 800 °C Recocido suave: 780 °C Relevado de Tensiones: 650 °C Temple: 860 °C – 920 °C
ASSAB 720	AISI – C1045 / SAE / 1045	Forjado: 1100 °C – 800 °C Recocido suave: 840 °C – 870 °C Relevado de Tensiones: 550 °C –

		650 °C Temple: 840 °C – 870 °C
ASSAB 705	AISI / SAE 4337	Recocido suave: 690 °C – 720 °C R elevado de Tensiones: 525 °C – 650 °C Temple: 830 °C – 860 °C Revenido: 550 °C – 675 °C

Tabla 1.1. Valores de Temperatura Orientados Para el Tratamiento Térmico de las Distintas Calidades de Aceros¹

De lo anteriormente expuesto se ha deducido que la temperatura máxima del trabajo del horno de resistencias eléctricas para tratamiento térmico, la cual es de 1000 °C es más que suficiente para realizar los tratamientos térmicos de las distintas calidades de aceros.

1.3. TIPOS DE HORNOS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Existen diferentes tipos de hornos para los procesos de tratamiento térmico. La elección del horno debe tomarse teniendo en cuenta el tamaño y forma de la pieza, el número de piezas (tamaño del lote) y las temperaturas de tratamiento térmico del material.

Adicionalmente, debe considerarse el tipo de calentamiento y el medio de enfriamiento que habrán de ser usados. Existen varias maneras de clasificar los hornos.

Según el tipo de proceso de tratamiento térmico, se distingue por ejemplo entre hornos de precalentamiento, hornos de recocido y hornos de temple. Otros factores para la clasificación son el diseño del horno (ejemplo: cámara, campana, chimenea, tubular, de baño, crucible), el medio de tratamiento térmico (ejemplo:

¹ Catálogo Aceros, ASSAB SKF.

aire circulante, gas inerte, vacío, baño de sales, lecho fluidizado) y el tipo de calentamiento (ejemplo: interno o externo, electrodos, inducción o resistencia, gas).

A continuación se describen brevemente los equipos de tratamiento térmico más importantes.

Los hornos de cámara se cuentan entre los diseños más antiguos. Estos equipos se siguen utilizando ampliamente por su sistema de calentamiento variable, su bajo impacto ambiental y su aplicabilidad universal con relación al tamaño de la pieza y al tipo de tratamiento térmico.

En el caso de hornos de atmósfera no controlada, la superficie de la pieza puede reaccionar con la atmósfera no controlada, la superficie (excarnación, carburación o descarburación). Esto significa que las piezas deben protegerse por medio de un recubrimiento o embalaje (ejemplo: papel, polvo de carbón coque quemado).

La influencia negativa de la atmósfera del horno sobre la superficie de la pieza puede evitarse si el tratamiento térmico se realiza en hornos de gas inerte. Los gases inertes pueden ser nitrógeno, gases producidos endotérmica o exotérmicamente. Los gases inertes con contenido de C controlado permiten ser ajustados al contenido de C de los materiales que se vayan a tratar.

La ventaja principal de los equipos de baño de sales es su óptima transferencia térmica y la posibilidad de realizar tratamientos térmicos superficiales o parciales. Su mayor desventaja son los altos costos requeridos para la destoxicación de las sales y la necesaria limpieza de las piezas para el retiro de residuos.

Un proceso que se ha vuelto popular en los últimos años gracias a su bajo impacto ambiental y sus ventajas cualitativas y económicas, es el tratamiento en

hornos al vacío (ejemplo: para precalentamiento, austentización, revenido, recocido y sinterización). El tratamiento térmico en estos hornos se realiza a presiones entre 100°C y 1000°C según los requerimientos específicos. En éste proceso, el contenido de gases reactivos se reduce a tal punto que las piezas mantienen su superficie brillante. La presión en el horno de cámara debe ajustarse a la presión del vapor de los elementos de aleación para prevenir su evaporación. Se han desarrollado equipos al vacío con rápidos tiempos de enfriamiento por gas (nitrógeno o gas inerte a alta presión y velocidad, así como refinamiento del gas) con el ánimo de poder utilizar las ventajas del tratamiento al vacío también en materiales con una alta velocidad crítica de enfriamiento.

1.4. HORNOS DE RESISTENCIA METÁLICA

En este tipo de hornos, la calefacción se prevé eléctrica para su conexión a 230/400 V mediante resistencias en forma de U, de la potencia adecuada cada una envolviendo la mufla, resistencias planas en la parte inferior de la mufla y una resistencia en el final de la mufla.

Las resistencias son mandadas por uno o más pirómetros con termopar situados en el interior de la mufla instalados en serie con otros cuyo termopar está situado en la zona de calentamiento entre la mufla y las resistencias.

La mufla se construye en acero refractario AISI 310 de 6 mm de espesor con refuerzos en la parte superior del mismo material doblado en U cada 300 mm y con la parte inferior ondulada para mejorar la estabilidad dimensional y facilitar el movimiento de la solera mediante bolas que se deslizan sobre el canal formado por las ondulaciones.

La solera, ondulada, se apoyará sobre bolas de cerámica prisioneras de una cuna para facilitar su movimiento alternado que se producirá por la acción de un motor de corriente continua de 1 C.V. de potencia con regulador de velocidad que accionará una excéntrica que mueve una rueda entre dos pasamanos

soldados en la solera, lo que provoca el avance y retroceso alternativo con una amplitud de depende del grado de excentricidad entre los dos ejes.

En la boca hay una antorcha con gas para evitar entradas de aire, y en la zona de salida de las piezas una entrada de metanol. La entrada de gas estará mandada por un pirómetro que activará la entrada cuando la temperatura en la mufla alcance un valor mínimo a prefijar y la impedirá por debajo de este valor.

El aislamiento se ejecutará con lana de fibra cerámica comprimida a 128 Kg/m³ y paneles de fibra mineral de 3 cm de espesor. Los apoyos para la mufla, resistencias y otros elementos con hormigón refractario ligero de 770 Kg/m³. Las resistencias inferiores serán accesibles mediante unas trampillas en los laterales, y las superiores en forma de U desde la parte superior del horno, sin que sea preciso desmontar la mufla para su sustitución. Todas las resistencias se calculan para una vida útil de 5.000 horas de trabajo a 1.000°C.

1.5. HORNOS DE COMBUSTIBLE

Los hornos de crisol con sales fundidas han sido largamente utilizados en el tratamiento térmico de los metales, utilizándose entre otros en los procesos de cementación, nitruración, temple, revenido, sulfinización y salinización. Entre otras ventajas cabe citar la rapidez de tratamiento, la uniformidad de temperaturas, la ausencia de oxidación, y, sobre todo, la facilidad de manejo.

Existen multitud de alternativas para el calentamiento de los crisoles que contienen las sales. Por las características de la serie de hornos de este tipo es recomendable construirse con calefacción a gas o gasóleos.

El control de la temperatura está asegurado por un regulador electrónico con visualizador digital y termopar tipo K sumergido en las sales y un regulador con termopar en la cámara de calentamiento. Debe tenerse en cuenta que para alcanzar una temperatura determinada en las sales la temperatura en la cámara

formada por el crisol debe ser del orden de unos 100°C superior. No es conveniente sobrepasar éste margen por acortarse la vida del crisol ni mantener muy estrecho el margen ya que el tiempo de fusión de las sales se alarga.

En el cuadro eléctrico que acompaña de serie estos hornos se instala un temporizador el cual una vez transcurrido el tiempo de tratamiento a la temperatura deseada proporciona una señal eléctrica para el accionamiento de una alarma acústica y/o luminosa.

En caso de rotura del crisol unos electrodos colocados en la solera del horno detectan la presencia de las sales fundidas y provocan el encendido de un piloto avisador.

1.6. RESISTENCIAS

Las resistencias eléctricas se hacen de aleaciones de composición muy variadas que se encuentran bajo distintos nombres comerciales. Los elementos principales empleados como constituyentes de esas aleaciones son: carbono, cobre, hierro, manganeso, níquel, silicio, zinc y aluminio; muchas de estas resistencias son también resistentes a la temperatura y la corrosión.

- **Aleaciones de níquel.-** Se usan resistencias eléctricas, reóstatos y elementos de calefacción eléctrica; pueden ser divididas en grupos de acuerdo a su composición.
- **Aleaciones níquel – cromo.-** Son usadas generalmente como resistencias para aplicaciones de bajas y medias temperaturas (bajas temperaturas: hasta 400 °C; temperaturas medias: de 400 °C hasta 1150 °C), a éstas aleaciones en las normas ASTM se les han designado como B 82 y B83.
- **Carburo de silicio.-** Es la base de un material para resistencias que trabajando al aire, pueden alcanzar temperaturas hasta 1500 °C

aproximadamente. Dicho material se suministra en forma de varillas de diferentes diámetros y longitudes para poderlas combinar, formando circuitos eléctricos de la potencia requerida. La resistencia del material aumenta con el uso, por lo que es aconsejable el empleo de un transformador con derivaciones para compensar dicho aumento.

- **Molibdeno.-** Son adecuadas para temperaturas hasta 1650 °C. Los aisladores de los arrollamientos deben ser magnesio u óxido de circonio. Estas resistencias no pueden trabajar al aire libre, deben protegerse contra posibles reacciones de la sílice o el carbón.

- **Tungsteno.-** Pueden usarse hasta temperaturas hasta 2000 °C. La temperatura máxima viene limitada por los soportes refractarios de la resistencia.

- **Grafito.-** Son adecuadas para cualquier temperatura que deba usarse. Las resistencias deben protegerse contra la oxidación a temperaturas superiores a los 600 °C. Debido a la actividad química del carbón, debe considerarse especialmente la clase de atmósfera que circunda a las resistencias.

- **KANTHAL.-** Para varias finalidades. Se necesitan temperaturas de 1094 °C hasta 1233 °C. Para dichas temperaturas se han desarrollado aleaciones cuya protección depende de la estanqueidad de la película de óxido formada. Dichos elementos tienen el nombre comercial de KANTHAL. El elemento químico que produce la envolvente protectora de la resistencia es el aluminio (Al). Las resistencias que contienen más de un 20% de Al forman una densa capa en atmósferas oxidantes, pero pierden su protección en atmósferas que contienen hidrógeno húmedo. Éstas aleaciones contienen un 22% de Cr y de un 60% – 70% de Fe. Son quebradizas a temperatura ambiente y deben dárselas forma mientras están calientes.

PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LAS ALEACIONES KANTHAL	
Temperatura máxima de servicio:	1330 °C
Composición nominal:	2% Cr, 5% Al, 53% Fe
Densidad:	$7,15 \frac{gr}{cm^3}$
Resistividad eléctrica a 20 °C:	$1,39 \frac{ohm.mm^2}{m}$
Conductividad térmica a 20 °C:	$16 \frac{W}{m.^{\circ}C}$
Calor específico:	$0,46 \frac{KJ}{Kg.^{\circ}C}$
Punto de fusión:	1500 °C

Tabla 1.2. Propiedades Físicas y Mecánicas de las aleaciones KANTHAL.¹

1.7. VENTAJAS DEL HORNO ELÉCTRICO RESPECTO AL HORNO DE COMBUSTIBLE

- Vigilancia exacta y sencilla de la temperatura, mediante elementos de regulación automáticos relativamente baratos.
- Las temperaturas que pueden alcanzarse no tienen otro límite superior que el determinado por las características del material de la resistencia.
- Mejoramiento de la calidad de los productos sometidos a tratamiento térmico, debido a la uniformidad de distribución de temperatura.
- Ventajas económicas e higiénicas debido a la supresión del acarreo de combustibles, gasógenos, conductos de humo y chimeneas.

¹ VASTRA AROS TRYCHERI, The Kanthal Handbook, Sweden, Resistente Alloys, 1990.

- Buenas condiciones de trabajo, limpieza, funcionamiento silencioso, escasa influencia de la temperatura ambiente.
- Es de respuesta rápida.
- Seguros, ya que se puede trabajar en los puntos exactos que se requieren.
- Otra ventaja es tener siempre noción exacta del consumo útil de energía del horno, dado el rendimiento de éste. Toda la energía se convierte en calor, 1 Kilovatio – Hora da 860 Kilocalorías, cifra que no sufre oscilaciones como sucede con los combustible según su calidad.

II.- PARÁMETROS DE DISEÑO

2.1. USO DEL HORNO ELÉCTRICO

Para el cálculo y la construcción de un horno de resistencias eléctricas para tratamiento térmico, son decisivos el uso a que se destina y las condiciones de servicio reinantes en cada caso.

El horno de resistencias eléctricas será destinado exclusivamente al tratamiento térmico de aceros y aleaciones, por lo tanto es necesaria la justificación de la temperatura máxima de servicio para la cual será diseñado; por lo que en el ítem 1.1. del primer capítulo se explicó los parámetros que influyen en el tratamiento térmico de los aceros.

2.2 DIMENSIONES DEL HORNO

2.2.1 DIMENSIONES INTERIORES DE LA CÁMARA (VOLUMEN INTERIOR)

Las dimensiones de la cámara (volumen Interior) se han tomado considerando que los volúmenes de las cámaras de los hornos de laboratorios de tratamientos térmicos restringen su uso a piezas relativamente pequeñas; por lo tanto es necesario aumentar el volumen de la cámara, de manera que permita tratar piezas de mayor tamaño.

Dimensiones interiores del horno:

Ancho = 300 mm

Alto = 445 mm

Profundidad = 680 mm

Volumen interior = 0,0907 m³

NOTA: Las dimensiones totales del horno se especificarán en el próximo capítulo incluyendo el cálculo del espesor de las paredes.

2.3. DIMENSIONES MÁXIMAS DE LA PIEZA DE TRABAJO

Las dimensiones máximas de la pieza de trabajo vienen determinadas por el volumen de la cámara indicado anteriormente, por lo que el tamaño máximo de la pieza no debe sobrepasar el volumen de la misma, dejando un espacio mínimo entre las paredes del horno y la pieza de 10 mm aproximadamente.

2.4. TEMPERATURA MÁXIMA DE TRABAJO DE LA PIEZA

Para determinar la temperatura máxima de trabajo de la pieza se debe saber qué tipo de tratamiento térmico se va a dar por lo que es necesario analizar los diversos tipos de tratamientos térmicos y sus propósitos.

Revenido.- El propósito principal del mismo es generar una estructura ferrítica y remover perlita y carburos, lográndose así la máxima ductilidad y tenacidad. El recocido puede ser usado para lograr propiedades específicas, como un 15% o más de elongación. El tratamiento puede tener variantes, pero los más comunes son el enfriamiento interrumpido, enfriamiento lento controlado y tratamiento en una sola etapa.

- **Enfriamiento interrumpido:** la primera etapa es homogeneizar el hierro como se ha descrito antes. Esto es seguido por un enfriamiento hasta 680°C - 700°C y mantenido a esta temperatura de 4 - 12hs para desarrollar la ferrita. Cuanto mayor sea la pureza del hierro, más corto será el tiempo requerido. Las fundiciones de forma sencillas pueden ser enfriadas en horno por debajo de los 650°C y enfriadas al aire, pero las fundiciones complejas que pueden desarrollar tensiones residuales deben ser enfriadas en horno de acuerdo a las recomendaciones mencionadas para el alivio de tensiones.

- Enfriamiento lento controlado: la primera etapa es la homogenización como se ha dicho antes; esto es seguido por un enfriamiento a razón de 30°C - 60°C por hora desde los 800°C - 650°C. Hierros de más baja pureza requieren de tasas de enfriamiento más lentas. El enfriamiento a temperatura ambiente se lleva a cabo como el método interrumpido.
- Tratamiento de una sola etapa: la fundición es calentada desde la temperatura ambiente hasta los 680°C - 700°C, sin una austenización previa, es entonces mantenida a esta temperatura por 2 - 16 hs para que grafitice la perlita. El tiempo aumenta con la disminución de la pureza del metal, y generalmente es mayor que para los otros métodos debido a la falta de una homogenización previa. El enfriamiento a temperatura ambiente se lleva a cabo como en el método de enfriamiento interrumpido. Este tratamiento se aplica solo para quitar la perlita en hierros con carburo no eutéctico. Si el hierro contiene carburos debe usarse el método del enfriamiento interrumpido o el del enfriamiento lento controlado.

Recocido.- Los recocidos más rápidos se dan en los hierros de más alto contenido de silicio, bajo Mn, Cu, Sn, As y Sb, y generalmente bajo contenido de partículas de elementos menores. Si el hierro no contiene carburos cualquier método de los explicados se puede usar, pero para una óptima ductilidad debe elegirse el método de enfriamiento interrumpido. Debe remarcarse que con el tratamiento en una sola etapa los granos de ferrita en la estructura serán menores que para los otros tratamientos y también será menor la ductilidad y tenacidad. La temperatura de formación de ferrita de 680°C - 700°C, puede aumentarse con el aumento del contenido de silicio. El ciclo del recocido se puede variar para obtener estructuras de matrices mezcladas de perlita y ferrita, con una alta resistencia y ductilidad intermedia. Un marcado aumento de las dimensiones ocurre durante el recocido debido a la grafitización de la perlita y carburos.

Normalizado.- Consiste en calentar las fundiciones a alta temperatura con lo cual éstas quedan completamente austenizadas, y cualquier carburo

descompuesto, seguido por un enfriamiento al aire en una tasa que produce una matriz de fino grano perlítico con partículas de ferrita y libre de otros productos de la transformación. El normalizado puede aplicarse para conseguir resistencias de 700MPa – 900 MPa, y para mejorar la relación entre el sigma 0.2 y la resistencia a la tracción. Un ciclo típico es como el siguiente: El primer paso del tratamiento es la homogenización. Las fundiciones son luego removidas del horno y enfriadas al aire a temperatura ambiente. La tasa de enfriamiento al aire a través de un rango de 780°C - 650°C debe ser lo suficientemente rápido para obtener una matriz completamente perlítica en la sección de la fundición que es tratada. Esto puede requerir el uso de un soplador de aire especialmente para secciones de mayor espesor.

Temple.- El hierro dúctil de alta resistencia, generalmente superior a 700 MPa y con una baja elongación, se obtiene calentando hasta 875°C - 925°C, manteniendo esa temperatura por 2 – 4 hs o más si se requiere eliminar carburos, apagando en un baño de aceite para producir estructura de martensita, y luego revenido a 400°C – 600°C para producir una matriz de estructura de martensita revenida. Deben tomarse recaudos para evitar fracturas complicadas en las fundiciones durante el apagado, esto se logra apagando en aceite caliente a, por ejemplo 100°C, seguida por un enfriamiento final a temperatura ambiente. Este paso también puede hacerse apagando en aceite caliente a 200°C y luego enfriando a temperatura ambiente, pero en baño de agua para obtener la estructura y propiedades deseadas. Para un buen temple, durante el apagado debe obtenerse una estructura completamente martensítica, y excepto para secciones muy delgadas, esto requiere de aleación con elementos que mejoran la templabilidad: Cu, Ni, Mn y Mo, aumentan la templabilidad con creciente eficiencia.

2.5. TEMPERATURA DE SERVICIO DEL HORNO

Para saber este parámetro se ha realizado un trabajo de campo visitando laboratorios de tratamiento térmico, por lo que según lo observado se pudo

determinar que las temperaturas recomendadas para la cámara de un horno de un laboratorio estándar varían entre 530°C y 1000°C; teniendo en cuenta las temperaturas máximas de trabajo de la pieza que se detallaron en el ítem anterior.

2.6. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Como revestimiento interior de la cámara de un horno, ordinariamente se emplea un material refractario – aislante o un material semirefractario.

Un revestimiento de esta clase tiene menos capacidad calorífica que uno de arcilla refractaria y su empleo hace aumentar los periodos de tiempo de calentamiento y enfriamiento de la cámara o laboratorio y también la pérdida de calor almacenado para un ciclo dado de funcionamiento.

Se ha planteado el diseño de la cámara de modo que los elementos de resistencias se encuentren cubiertos o aislados por la masa cerámica de las paredes interiores de dicha cámara, por lo tanto es necesario hacer un estudio previo de las condiciones generales, datos técnicos y porcentajes de elementos que tienen estas masas térmicas.

La masa no debe atacar a los elementos de resistencia y debe ser de fácil conformación aún con muy poca adición de agua. Además debe ligar muy bien a una presión conveniente y no perder la forma, ser lo menos higroscópica posible, a la vez que un excelente aislante eléctrico, sin por ello dejar de ser también un buen conductor de calor. Los datos técnicos que deben cumplir dichas masas se detallan en la tabla 2.1.:

DESIGNACIÓN DE LA PROPIEDAD	VALORES EN CIFRAS
Contenido en: Al ₂ O ₃ , SiO ₂	Entre 40% - 90%
Contenido en aglutinantes como arcilla aglutinante puro, caolín lavado	Entre 4% - 10%
Contenido en hierro	Entre 0,3% - 1,8%
Contenido de álcalis, sales de Pb, borax, potasa	Lo más reducido posible
Resistencia a las alteraciones de temperatura	Lo más elevado posible
Conductividad de calor	Entre $0,7 \frac{Kcal}{mh^{\circ}C}$ - $1,7 \frac{Kcal}{mh^{\circ}C}$
Calor específico	$0,20 \frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}$, aproximadamente
Peso volumen	$1,6 \frac{Kg}{dm^3}$ - $2,9 \frac{Kg}{dm^3}$
Resistencia eléctrica específica	$4,10^5$ ohmio – cm $4,5 \times 10^6$ ohmio – cm
Constante dieléctrica	5
Higroscopicidad	Lo más reducida posible
Plasticidad: con 4% - 6% de adición de agua y $150 \frac{Kg}{cm^2}$	Buena unión

Tabla 2.1. Datos Técnicos de Masas Cerámicas de Aislamiento Para Elementos de Resistencia¹

Esta tabla ha detallado de manera clara las propiedades que deben cumplir las masas cerámicas.

Éste tipo de masas con éstas características no atacan a los elementos de resistencia garantizando excelentes resultados tanto eléctricos como termoeléctricos, gracias a una buena conductividad térmica, a la par de su

¹ VASTRA AROS TRYCHERI, The Kanthal Handbook, Sweden, Resistente Alloys, 1990

elevada resistencia eléctrica. En síntesis las masas deben contener poco hierro, ninguna sal de plomo, ácido bórico y borax.

Composición química	0,95% C, 1% Mn, 0,5%Cr, 0,5% W, 0,1% V
Dimensiones de la carga	Ancho = 100 mm Alto = 175 mm Espesor = 50 mm
Calor específico (C _p)	0,1129 $\frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}$
Conductividad térmica (K _c)	28,4 $\frac{Kg}{cm^2}$
Densidad (ρ _c)	7800 $\frac{Kg}{m^3}$
Peso de la carga	6,82 Kg
Emisividad (ε _c)	0,32

Tabla 2.2. Datos Técnicos del Material a Utilizarse Como Carga¹

2.7. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A UTILIZARSE EN LAS PAREDES DEL HORNO

MASA DE ÓXIDO DE ALUMINIO (1.200 °C Aproximadamente)	
Óxido de aluminio recocido	90%
Arcilla aglutinante o caolín fino	10%
Agua destilada	4% - 5%

Tabla 2.3. Características de la Masa de Óxido de Aluminio¹

¹ VASTRA AROS TRYCHERI, The Kanthal Handbook, Sweden, Resistente Alloys, 1990

MASA REFRACTARIA (1.100 °C 1.200 °C Aproximadamente)	
Polvo refractario arcilla	60%
Polvo refractario sílice	35%
Agua destilada	4% - 5%

Tabla 2.4. Características de la Masa de Refractaria¹

MASA DE ÓXIDO DE MAGNESIO (1.200 °C Aproximadamente)	
Óxido de magnesio	96%
Caolín fino o arcilla aglutinante	4%
Agua destilada	4% - 5%

Tabla 2.5. Características de la Masa de Óxido de Magnesio¹

Es necesario diferenciar entre lo que es un caolín y lo que es una arcilla.

Caolines.- Son productos naturales que contienen sustancias arcillosas (Al_2O_3 , 2SiO_2 , $2\text{H}_2\text{O}$); se distinguen por su especial plasticidad y capacidad aglutinante; hay que procurar que su contenido de hierro, otros metales e ingredientes ácidos, sean lo más reducidos posibles; deben emplearse en forma lavada.

Arcillas.- Se distinguen del caolín por el hecho de que se encuentra en parte ya lavado. En estado puro la arcilla es generalmente más plástica que el caolín; para usarlo debemos vigilar su pureza y bondad.

Tomando en cuenta las condiciones generales, y las normas para las propiedades eléctricas y termoeléctricas que deben cumplir las masas cerámicas, se ha escogido el concreto refractario CONCRAX – 1500 como material para el revestimiento interior de la cámara.

2.7.1. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DEL CONCRETO REFRACTARIO CONCRAX – 1500

Es un concreto de fraguado hidráulico, diseñado para la construcción rápida y económica de hornos; se emplean también para la construcción de tapas y puertas de hornos.

CARACTERÍSTICAS:

- El concreto refractario CONCRAX – 1500, tiene una temperatura de ablandamiento superior a la máxima recomendada para servicio, proveyendo un amplio margen de seguridad a las instalaciones.
- Poseen excelente resistencia a la desintegración por choque térmico.
- Mediana conductividad térmica.
- Su granulación perfectamente controlada y la alta calidad que sus componentes proporcionan buena resistencia mecánica, y mínima contracción por secamiento.

Composición química	44% Al ₂ O ₃ , 46% Si O ₂ , 1,7% Fe ₂ O ₃ , 2,2% Ti O ₂ , 4,5% Ca O, 0,7% Mg O
Temperatura máxima de servicio recomendada	1540 °C
Máximo tamaño de grano	3 mm
Agua de preparación	0,17 $\frac{lt}{Kg}$ - 0,19 $\frac{lt}{Kg}$
Densidad curado a 100 °C	1,74 $\frac{gr}{cm^3}$ - 1,86 $\frac{gr}{cm^3}$

Módulo de rotura curado a 110 °C	$21 \frac{Kg}{cm^2} - 35 \frac{Kg}{cm^2}$
Resistencia a compresión curado a 110 °C	$55 \frac{Kg}{cm^2} - 110 \frac{Kg}{cm^2}$
Calor específico (Cp ₁)	$0,23 \frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}$
Conductividad térmica (K ₁)	870 °C = $1,24 \frac{Kcal}{hm^{\circ}C}$ 1095 °C = $1,49 \frac{Kg}{cm^2}$
Densidad (ρ ₁)	$2.000 \frac{Kg}{m^3}$
Difusividad térmica (a ₁)	$0,00196 \frac{m^2}{h}$
Emisividad (ε ₁)	0,73

Tabla 2.6. Características y Propiedades del Concreto Refractario CONCRAX – 1500¹

Todas estas propiedades caen dentro de los límites descritos en la tabla 2.1. por lo tanto el material seleccionado para la construcción de la cámara o laboratorio es el adecuado.

2.7.2. AISLAMIENTO TÉRMICO

Cuanto más alta la temperatura de la cámara, tanto mayor es el valor correspondiente a las pérdidas de calor en las paredes; la parte de ellas debido a la conducción, se reduce mucho empleando materiales aislantes con coeficientes de conductividad muy bajos.

La máxima temperatura que puede soportar la cara interior del revestimiento aislante de la cámara de calefacción, determina la naturaleza del

¹ ERECOs, Catálogo de Ladrillos Refractarios, Bogotá

material a emplear como aislamiento. Ésta temperatura dado el trabajo de los hornos, precisa un material inorgánico. Se emplea generalmente para el aislamiento térmico en la construcción de los hornos por resistencias, la tierra de infusorios (un residuo poroso de carácter silíceo dejado por la fosilización de diminutas plantas marinas, diatomeas); es llamado diatomita. El espesor más económico de una capa de aislamiento térmico viene determinado por aquellos factores que hacen disminuir la proporción de calor perdido al aumentar el grueso del aislante, el costo de la energía y el capital invertido en la compra del material.

Composición química	3,85% Al ₂ O ₃ , 81,9% Si O ₂ , 2,57% Fe ₂ O ₃ , 11,6% Volátiles
Temperatura máxima de servicio recomendada	850 °C
Máximo tamaño de grano	3 mm
Conductividad térmica (K ₂)	
T °C	K ₂ $\frac{Kcal}{hm^{\circ}C}$
94	0,062
150	0,065
205	0,071
260	0,076
320	0,080
430	0,095
540	0,101
Densidad (ρ ₂)	288 $\frac{Kg}{m^3}$
Difusividad térmica (a ₂)	0,0016 $\frac{m^2}{h}$

Tabla 2.7. Características y Propiedades de la Diatomita¹

¹ NORTON F. H., Refractarios, Ed. Blume, Barcelona, 1972

PROPIEDADES:

- Una de las propiedades más importantes de los aislantes, naturalmente, es la baja conductividad térmica.
- Otra propiedad importante es la capacidad de retención de calor.

En la siguiente tabla se tiene los tipos generales de aislamiento de soportes, que son los que la industria ha estandarizado:

TIPO	PESO POR PIE²	LÍMITE DE UTILIZACIÓN EN °F
Tierra de infusorios, (diatomita) con asbestos y calizas	23	1.800 °F – 1900 °F
FIBRAS		
Bloques de lana de escoria	15 – 20	1.500 °F – 1.700 °C
Cubiertas de lana de vidrio	3	800 °F – 1.000 °F
Bloque de lana de sílice	12 – 20	2.000 °F – 2.300 °F
Lana de sílice – alúmina ligera (cardada)	3 – 10	2.000 °F – 2.300 °F
VERMICULITA		
Bloques	19	1.500 °F – 1.600 °F
Fibras sueltas	10	1.500 °F – 1.600 °F
Caolín – Yeso	30	1.600 °F
Vidrio espumado	10	1.000 °F

Tabla 2.8. Clasificación de los Aislamientos de Soporte¹

¹ NORTON F. H., Refractarios, Ed. Blume, Barcelona, 1972

TIPO DE AISLAMIENTO	PESO POR PIE ³	TEMPERATURA (°F)		
		200	500	1.000
Capa aislante	8 – 12	0,4	0,6	
Capa aislante de lana de vidrio	3	0,3	0,5	
Capa aislante de lana de caolín	6	0,3	0,4	0,9
Capa aislante a base de diatomita	40	0,7	0,8	0,9
Capa aislante de magnesio al 85%	15	0,5	0,6	
Bloques aislantes de diatomita	23	0,6	0,7	0,8
Aislamiento por bloques de vermiculita	18	0,6	0,7	0,9

Tabla 2.9. Conductividad Térmica de los Aislantes $\left(\frac{BTU}{h.pie.^{\circ}F} \right)^1$

Los bloques aislantes se fabrican comúnmente de diatomita calcinada, mezclada con asbesto. La mezcla se consigue por medio de una suspensión acuosa, filtrándola posteriormente para obtener una pasta que luego puede secarse.

Para el horno se ha tomado como aislante la diatomita en su estado natural, para luego compactarla en los espacios del horno correspondientes al aislamiento.

¹ NORTON F. H., Refractarios, Ed. Blume, Barcelona, 1972

2.8. CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A UTILIZAR COMO RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

Las aleaciones de níquel con cobre tienen una resistividad menor que las de níquel con cromo, su resistencia a la temperatura es inferior pero su coeficiente de temperatura, a las temperaturas ordinarias es despreciable; propiedad que les da muchas aplicaciones en los instrumentos de precisión

- La aleación B 82 está compuesta de 80% Ni, 20% Cr; tiene una temperatura máxima de trabajo de 1160 °C aproximadamente y su punto de fusión es de 1400 °C.
- La aleación B 83 está compuesta de 60% Ni, 15% Cr, 25% Fe; tiene una temperatura máxima de trabajo de 900 °C aproximadamente y su punto de fusión es de 1395 °C

Estas aleaciones no reblandecen si se mantiene la temperatura de las resistencias con un margen razonable bajo el intervalo de fusión. Los coeficientes de dilatación son bajos y la variación de resistencia con la temperatura es también pequeña. Sus resistividades permiten el empleo de secciones y longitudes razonables para usar las tensiones normales de distribución. Estas aleaciones poseen la primordial característica de resistir a la oxidación y la formación de escamas cuando trabajan al aire libre. No obstante esta protección no es perfecta y su valor disminuye al aumentar la temperatura de trabajo, los compuestos de azufre y el óxido de carbono pueden destruirlas. Pueden presentarse inesperadas reacciones químicas en las resistencias de dichas aleaciones, originadas por el desprendimiento de gases de la carga o procedentes del exterior.

La finalidad de crear una aleación que sea eficaz a elevadas temperaturas en las que se utilice el carburo de silicio, sin que se aprecie su envejecimiento, condujo al descubrimiento de siliciuro de molibdeno, que se conoce en el mercado con el nombre de SUPER KANTHAL, el elemento químico silicio produce por

oxidación una capa protectora de sílice. Al calentarse y enfriarse la corteza se agrieta pero no se descostra, el diámetro del alambre de las resistencias es muy pequeño en comparación con el de las barras de carburo de silicio y la temperatura es uniforme en todo el alambre. La temperatura máxima del elemento es 1706 °C. Su funcionamiento requiere un transformador con varias tomas, pues su resistencia a 1640 °C es veinte veces superior a la que tiene a 0 °C. Su punto de fusión está próximo a los 2633 °C. Luego de la teoría sobre las aleaciones utilizadas como resistencias eléctricas, y sabiendo que la temperatura máxima de trabajo del horno es 1100 °C, la aleación conocida como KANTHAL será la adecuada para utilizarse como elementos de resistencia.

MATERIAL	RESISTIVIDAD	PUNTO DE FUSIÓN °C	RESISTENCIA A LA OXIDACIÓN
Nicrom	Elevada	1500	Buena hasta los 1100 °C
Kanthal	Elevada	1500	Buena hasta los 1250 °C
Carburo de silicio	Baja		Buena hasta los 1550 °C
Siliciuro de Molibdeno	Baja		Buena hasta los 1700 °C
Molibdeno	Baja	2600	Nula
Carbón	Baja		Nula
Tungsteno	Baja	3400	Nula
Tántalo	Baja	2850	Nula
Platino y sus aleaciones	Baja	1775	Buena
Mezclas de sales	Media	250	Buena (se volatiliza)

Tabla 2.10. Materiales que Pueden Utilizarse Como Resistencia Eléctrica¹

¹ GILDRICHS A., Metalurgical Furnaces, 2^{da} edición, Ed. Continental S.A., México, 1976

2.9. CUBIERTA EXTERIOR

La cubierta exterior del horno será de chapa de acero inoxidable de $\frac{1}{32} = 0,7$ mm; se ha seleccionado este material debido a sus excelentes propiedades anticorrosivas (resistencia a la oxidación), además ahorrará tiempo y trabajo en la fabricación de la cubierta, ya que con otro material se precisará pintura anticorrosivo y resistente al calor, lo cual implica un costo casi similar al de la chapa de acero inoxidable.

2.9.1 FIBROCEMENTO

La placa plana de fibrocemento es un material impermeable, incombustible, de bajo peso específico que no requiere de equipos especiales para ser instalado. La facilidad para trabajar del fibrocemento es que permite que la placa sea cortada e instalada sin dificultades, utilizando herramientas comunes.

La versatilidad de usos del producto está representada en diferentes formas, por ejemplo funcionando como elemento de revestimiento de muros, aislamientos de hornos, paneles de control eléctrico, torres de enfriamiento de agua, etc.

2.9.1.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS:

- **Peso específico.**- Puede considerarse un peso específico promedio de 1,6

$$\frac{gr}{cm^3}$$

- **Conductividad Térmica.**- El fibrocemento es un mal conductor de calor, el paso del calor a través del material se calcula tomando en cuenta como coeficientes de transmisión térmica los siguientes valores:

ESPESOR mm	COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA K
	$\frac{Kcal}{hm^{\circ}C}$
6	4,85
10	4,58
12	4,46
15	4,30

Tabla 2.11. Conductividad Térmica del Fibrocemento¹

Temperatura máxima de servicio recomendada	500 °C
Calor específico (Cp ₃)	0,086 $\frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}$
Conductividad térmica (K ₃)	0,0485 $\frac{Kg}{cm^2}$
Densidad (ρ ₃)	1.600 $\frac{Kg}{m^3}$
Difusividad térmica (a ₃)	0,00033 $\frac{m^2}{h}$

Tabla 2.12. Propiedades de la Placa de Fibrocemento¹

- **Dilatación por absorción de agua.-** La absorción de agua provoca un pequeño aumento en las dimensiones; éste valor es de $1 \frac{mm}{m}$, fenómeno completamente reversible.
- **Dilatación térmica.-** La dilatación por aumento de temperatura es aproximadamente $0,01 \frac{mm}{m}$ por cada 1 °C de aumento de temperatura.

¹ Catálogo Eternit, Placa Plana, Quito, 1984

- **Resistencia al fuego.-** Sometido a fuego lento continuo, el fibrocemento no sufre alteración alguna hasta los 300 °C.
- **Aislante eléctrico.-** El fibrocemento ofrece seguridad contra la formación del arco voltaico. En estado seco corresponde a grado 3 dentro de la clasificación de materiales eléctricos.
- **Resistencia específica.-** Seca en estufas es de $1,2 \times 10^9$ Ohms.cm.
- **Resistencia contra gases.-** Gracias a su estructura y a la inalterabilidad bien conocida de las fibras de amianto, el fibrocemento ofrece nobles resistencias a la corrosión bajo la influencia del oxígeno y la humedad. No sufre ataques de gases secos o de vapores húmedos (ph – 6). Por estas razones técnicas que garantizan el uso del material en el diseño y la fabricación del horno, se ha escogido la placa de fibrocemento para las paredes exteriores de la cámara

2.10. DETERMINACIÓN DE LAS ECUACIONES QUE SE UTILIZARÁN EN EL DISEÑO TÉRMICO

2.10.1. ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LAS PAREDES

Siendo el régimen estacionario la densidad del flujo calorífico es constante e igual para todas las capas se tiene:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{X_1}{K_1} + \frac{X_2}{K_2} + \frac{X_3}{K_3}} \quad ^1 \text{ (Ecuación 2.1. Calor Acumulado en las Paredes del Horno)}$$

¹ CHAPMAN A., Transmisión de Calor, Madrid, Interciencia, 1965

2.10.2. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL CALOR SUMINISTRADO POR EL HORNO PARA UN CICLO DE TRABAJO.

La cantidad total de calor suministrado por el sistema, es igual a la cantidad de calor absorbido por la carga más las pérdidas de calor producidas durante el tiempo que dura un ciclo de trabajo, es decir:

$$Q_S = Q_P + Q_C \quad \text{¹ (Ecuación 2.2. Calor Suministrado por el Sistema)}$$

Donde:

Q_S = Calor suministrado por el sistema

Q_P = Pérdidas de calor

Q_C = Calor absorbido por la carga

Pero las pérdidas de calor se producen por la acumulación de calor en las paredes de la cámara, debido a la conducción; las pérdidas de calor se deben también a la radiación y convección desde la superficie libre del horno (parte exterior del horno) hacia el medio circulante, por lo tanto tendremos:

$$Q_P = Q_K + Q_C + Q_R \quad \text{¹ (Ecuación 2.3. Pérdidas de Calor)}$$

Donde:

Q_P = Pérdidas de calor

Q_K = Pérdidas por conducción

Q_C = Pérdidas por convección

Q_R = Pérdidas por radiación

¹ CHAPMAN A., Transmisión de Calor, Madrid, Interciencia, 1965

2.11. ECUACIONES PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS

Para obtener las ecuaciones que determinan dicha distribución de temperaturas, se debe establecer un balance energético para cada punto de pared (0, 1, 2, ..., 12) tomando en cuenta las condiciones de borde que presentan dichos puntos (conducción, convección, radiación), de ésta manera se tendrá:

2.11.1. BALANCE TÉRMICO PARA EL PUNTO NODAL 0

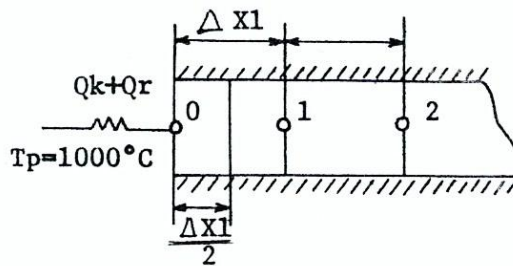


Gráfico 2.1. Sección de Pared que Incluye el Punto Nodal 0

La variación de energía interna en el punto nodal 0, se debe a la transmisión de calor por radiación (elementos de resistencia), más el calor por conducción (elementos de resistencia aislados en la pared), el balance energético es:

$$\rho_o \cdot \frac{\Delta X_1}{2} \cdot C p_o \cdot \frac{\Delta T_o}{\Delta t} = \frac{K}{\Delta X_1} (T_o - T_1) \Delta X_1 + \delta \cdot F_R - p_r (T_o - T_o)$$

(Ecuación 2.4. Balance Térmico en el Punto Nodal 0)

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta t} = \frac{T_o(+\Delta t) - T_o}{\Delta t}$$

¹ HOLMAN S., Heat Transfer, 4^{ta} Edición, Tokyo, Toshoprinting Co., 1976.

Donde:

$F_R - p$ = Factor de forma (Cuantifica la cantidad de energía calorífica que emite la resistencia y que llega a la pared)

δ = Constante universal

T_r = Temperatura de los elementos de resistencia

T_0 = Temperatura en el punto 0

Reduciendo la ecuación 2.4. en función del Módulo Fourier (M) se tiene:

$$M = \frac{\Delta X^2}{a \cdot \Delta t} \quad a = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$$

Donde:

M = Módulo de Fourier

ΔX = Intervalo de distancia [m]

A = Difusividad térmica [$\frac{m^2}{h}$]

Δt = Intervalo de tiempo [h]

K = Conductividad térmica [$\frac{Kcal}{m \cdot h \cdot ^\circ C}$]

ρ = Densidad [$\frac{Kg}{m^3}$]

C_p = Calor específico [$\frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C}$]

$$T_0(+\Delta t) = \frac{2}{M} \cdot T_0 + T_0 - \frac{2}{M} \cdot T_1 + \frac{2}{M} \cdot R_r^4 - T_0^4$$

(Ecuación 2.5. Balance Térmico en el Punto Nodal 0 en Función del Módulo de Fourier)

¹ HOLMAN S., Heat Transfer, 4^{ta} Edición, Tokyo, Toshoprinting Co., 1976.

2.11.2. BALANCE TÉRMICO PARA EL PUNTO NODAL 1

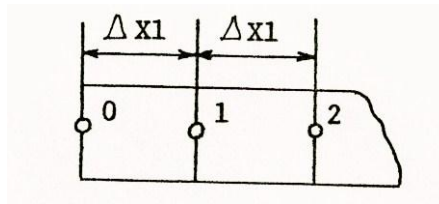


Gráfico 2.2. Sección de Pared que Incluye el Punto Nodal 1

En estos puntos tenemos conducción:

$$\frac{\delta T}{\delta X^2} = \frac{\delta T}{a \delta t}$$

$$\frac{\delta^2 T}{\delta X^2} = \frac{T_0 \leftarrow + T_2 \leftarrow - 2T_1 \leftarrow}{\Delta X^2}$$

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{T_1 \leftarrow + \Delta t \leftarrow - T_1 \leftarrow}{\Delta t}$$

(Ecuación 2.6. Balance Térmico en el Punto Nodal 1)

Reduciendo la ecuación 2.4. en función de M:

$$T_1 \leftarrow + \Delta t \leftarrow = \frac{T_0 \leftarrow - T_2 \leftarrow + T_1 \leftarrow (M - 2) \leftarrow}{M}$$

2.11.3 BALANCE TÉRMICO PARA EL PUNTO NODAL 5

Se supone que el contacto térmico entre las superficies es ideal, es este punto la transmisión de calor imperante es la conducción; se considerará las propiedades de los materiales (refractario y aislante), que están tanto al un extremo como al otro de la intercara.

¹ HOLMAN S., Heat Transfer, 4^{ta} Edición, Tokyo, Toshoprinting Co., 1976.

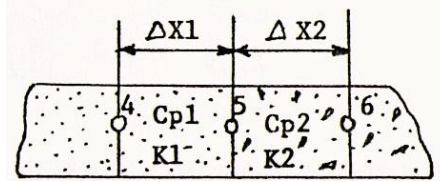


Gráfico 2.3. Sección de Pared que Incluye el Punto de la Intercara 5

$$\left(\rho_1 \cdot C_{p1} \cdot \frac{\Delta X_1}{2} + \rho_2 \cdot C_{p2} \cdot \frac{\Delta X_2}{2} \right) \frac{\Delta T_5}{\Delta t} = \frac{K_1}{\Delta X_1} [4 \leftarrow T_5 \rightarrow] + \frac{K_2}{\Delta X_2} [6 \leftarrow T_5 \rightarrow]$$

$$T_5 \leftarrow + \Delta t \rightarrow = \frac{\frac{K_1}{\Delta X_1} \cdot T_4 \leftarrow + \frac{K_2}{\Delta X_2} \cdot T_6 \leftarrow}{\frac{M}{2} \left(\frac{K_1}{\Delta X_1} + \frac{K_2}{\Delta X_2} \right)} + \frac{M-2}{M} \cdot T_5 \leftarrow$$

(Ecuación 2.7. Balance Térmico en el Punto de la Intercara 5)¹

2.11.4. BALANCE TÉRMICO PARA EL PUNTO EXTERIOR DE LA PARED

En este punto nodal se tiene las tres formas de transferencia de calor; conducción, convección y radiación.

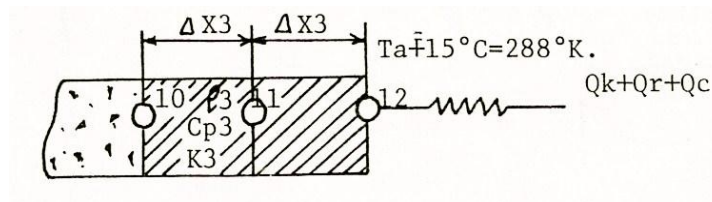


Gráfico 2.4. Sección de Pared que Incluye el Punto Exterior 12

¹ HOLMAN S., Heat Transfer, 4^{ta} Edición, Tokyo, Toshoprinting Co., 1976.

$$\rho_3 \cdot Cp_3 \cdot \frac{\Delta X_3}{2} \cdot \frac{\Delta T_{12}}{\Delta t} = \frac{K_3}{\Delta X_3} [T_{11} - T_{12}] + h [T_{11} - T_{12}]$$

1

$$T_{12} + \Delta t = \frac{2}{M} T_{11} + T_{12} \left(1 - \frac{2}{M} - \frac{2}{M} h \cdot \frac{\Delta X_3}{K_3} \right) + \frac{2}{M} h \cdot \frac{\Delta X_3}{K_3}$$

(Ecuación 2.8. Balance Térmico para el Punto Exterior de Pared)

Donde:

h = Coeficiente de transferencia de calor que considera la convección y radiación hacia el medio circundante.

$$h = 5 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}$$

Las ecuaciones están en función de (M); para establecer el valor de Δt, se debe asumir un valor de M y establecer un incremento de distancia ΔX.

$$M = \frac{\Delta X^2}{a_1 \cdot \Delta t} \quad ; \quad \Delta t = \frac{\Delta X^2}{a_1 \cdot M}$$

Sustituyendo los valores: $\Delta t = 0.2526h = 1.5 \text{ min}$

$$M = M_1 = M_2 = M_3$$

$$M_1 = M_2$$

$$\Delta X_2 = \Delta X_1 \sqrt{2/a_1 \cdot \Delta t}$$

$$\Delta X_2 = 11 \text{ mm}$$

$$\Delta X_3 = \Delta X_2 \sqrt{3/a_2 \cdot \Delta t}$$

$$\Delta X_3 = 5.0 \text{ mm}$$

La ecuación para un punto nodal (0) está en función de R:

$$R = \frac{\tau^* \Delta X_1^* Fr - P}{K_1} \quad 1$$

$$Fr - P = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_r} + \left(\frac{A_r}{A_p}\right) \left(\frac{1}{\epsilon_p} - 1\right)}$$

$$\epsilon_r = \text{Emisividad de los elementos de resistencia} = 0,76$$

$$\epsilon_p = \text{Emisividad de la pared refractaria} = 0.70$$

$$\frac{A_r}{A_p} = \text{Relación de la superficie de la pared cubierta por los elementos} = 3/4$$

$$Fr - p = 0,61 \quad ; \quad R = 0,02^\circ\text{K}^{-3}$$

Las ecuaciones reducidas para el cálculo de la distribución de temperaturas en la pared de la cámara serán:

$$\text{Nodo (0).- } T_0(+\Delta t) = 0,67T_1 - 0,33T_0 - 0,015 \times 10^{-8} \quad (\text{Ecuación 2.9.})$$

$$\text{Nodo (1).- } T_1(+\Delta t) = \frac{T_0(t) + T_2(t) + T_1(t)}{3} \quad (\text{Ecuación 2.10.})$$

$$\text{Nodo (5).- } T_5(+\Delta t) = 0,6T_4(t + 0,073T_6(t)) + 0,33T_5(t) \quad 1 \quad (\text{Ecuación 2.11.})$$

$$\text{Nodo (10).- } T_{10}(+\Delta t) = \frac{T_9(t) + T_{10}(t) + T_{11}(t)}{3} \quad (\text{Ecuación 2.12.})$$

$$\text{Nodo (12).- } T_{12}(+\Delta t) = 0,67T_{11}(t) + 0,37T_a(t) - 0,4T_{12}(t) \quad 1 \quad (\text{Ecuación 2.13.})$$

¹ HOLMAN S., Heat Transfer, 4^{ta} Edición, Tokyo, Toshoprinting Co., 1976.

2.11.5. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR ACUMULACIÓN DE CALOR DEBIDO A LA CONDUCCIÓN DEL CALOR

$$Q_k = m * C_p * \Delta T^1 \quad (\text{Ecuación 2.14.})$$

Donde:

Q_k = Calor acumulado debido a la conducción [Kcal]

m = Masa del cuerpo que acumula el calor [Kg]

C_p = Calor específico del cuerpo $\frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C}$

Δt = Variación de temperatura del cuerpo [$^\circ C$]

2.11.6 ECUACIONES PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS POR CONVECCIÓN

Los procesos de convección libre se expresan en función de los tres parámetros adimensionales U_n , Pr , Gr ; como generalmente se desea calcular el coeficiente de película (h_c), implicado en ($U_n = h_c * L / k$) el proceso de convección libre se presenta mediante:

$$N_u = F(Gr, Pr)$$

$$G_r = (\Delta T x \beta) \frac{L^3 x \rho^2 x \delta}{u^2} \quad (\text{Ecuación 2.15. Proceso de Convección Libre})$$

$$P_r = \frac{u x C_p}{k}$$

¹ HOLMAN S., Heat Transfer, 4^{ta} Edición, Tokyo, Toshoprinting Co., 1976.

En todas las expresiones de convección libre es acostumbrado calcular las propiedades del fluido (aire) a la temperatura media de película.

$$T_m = \frac{T_s + T_f}{2}$$

Donde:

T_m = Temperatura media

T_s = Temperatura de la superficie

T_f = Temperatura del fluido (aire)

Nu = Número de Nusselt (adimensional)

Gr = Número de Grashof (adimensional)

Pr = Número de Prant (adimensional)

Para placas calientes dirigidas hacia arriba

Régimen laminar: $10^5 < Gr * Pr < 2.10^7$

$$Nu = 0.54(Gr * Pr)^{1/4} \quad \text{(Ecuación 2.16.)}$$

Régimen Turbulento.- $2.10^7 < Gr * Pr < 3.10^{10}$

$$Nu = 0.14(Gr * Pr)^{1/3} \quad \text{(Ecuación 2.17)}$$

Coeficiente de película convectivo

$$h_c = \frac{Nu x K}{L} \quad \text{(Ecuación 2.18)}$$

¹HOLMAN S., Heat Transfer, 4^{ta} Edición, Tokyo, Toshoprinting Co., 1976.

Las pérdidas de calor por convección serán:

$$Q_c = hcxA\Delta T \frac{Kcal}{h} \quad (Ecuación 2.19)$$

2.11.7. ECUACIONES PARA DETERMINAR LAS PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN

Las superficies emiten y absorben energía radiante con diferente intensidad, según sea la naturaleza de la propia superficie; la mayor parte de cuerpos sólidos son opacos; la cantidad de calor transmitida por radiación para estos cuerpos viene expresada por:

$$Q_r = \epsilon \cdot \tau \cdot A(T_s^4 - T_a^4) \quad (Ecuación 2.20 \text{ Pérdidas de Calor por Radiación})$$

Q_r = Calor transmitido por radiación [Kcal/h]

ϵ = Emisividad de la superficie emisora 0,074

τ = Constante universal $4.965 \cdot 10^{-8} \left[\frac{kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ K} \right]$

T_s = temperatura de la superficie emisora $100^\circ C = 373^\circ K$

T_a = temperatura ambiente $15^\circ C = 288^\circ K$

A = Área de la superficie emisora $1,25m^2$

2.11.8 ECUACIONES PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE TRATAMIENTO DE LA PIEZA

El balance energético cuya resolución llevará a predecir el cálculo del tiempo de calentamiento de la carga, se ha planteado de la siguiente manera:

¹ CHAPMAN A., Transmisión de Calor, Madrid, Interciencia, 1965.

La energía radiante precedente de las paredes interiores de la cámara y que llega a la carga, provocará un cambio de energía interna, en la misma que se verá reflejada en el aumento de su temperatura.

El balance energético quedará establecido así:

$$Q_{pc} = Q'_c \quad (\text{Ecuación 2.21.})$$

La energía radiante procedente de la pared hacia la carga, es igual al calor absorbido por la carga:

$$\tau * A_p * F_{p-c} (T_p^4 - T^4) = mc * C_{pc} * \frac{dT}{dt} \quad (\text{Ecuación 2.22.})$$

Resolviendo la ecuación diferencial se tendrá el tiempo:

$$\frac{\tau * A_p * F_{p-c} * T_p^4}{mc * C_{pc}} - \frac{\tau * A_p * F_{p-c} * T^4}{mc * C_{pc}} = \frac{dT}{dt}$$

Llamando:

$$K_2 = \frac{\tau * A_p * F_{p-c} * T_p^4}{mc * C_{pc}}; \quad K_1 = \frac{\tau * A_p * F_{p-c}}{mc * C_{pc}}$$

$$K_2 - K_1 T^4 = \frac{dT}{dt} \quad \int_0^t dT = \int_{T_0}^{T_f} \frac{dT}{K_2 - K_1 T^4}$$

Resolviendo la ecuación diferencial e integrando la expresión tendremos:

$$t = \frac{1}{4k_1^{1/4} * k_2^{3/4}} \left[\ln\left(1 + \frac{T}{T_p}\right) - \ln\left(1 - \frac{T}{T_p}\right) + \frac{2\pi}{180} \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{T}{T_p}\right) \right]_{T_0}^{T_f} \quad (\text{Ecuación 2.23.})$$

Valores constantes:

$$\tau = \text{Constante universal} = 4,965 \cdot 10^{-8} \frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

mc = Masa de la carga = 6,82kg = 15 lbs

Cpc = Calor específico de la carga = 0,11297 Kcal/kg°C

To = Temperatura inicial de la carga = 15° C = 288 °K

Tf = Temperatura final de la carga = 1000° C = 1273 ° K

T = Temperatura de la carga (variable con el tiempo)

2.11.9. ECUACIONES PARA DETERMINAR LA TRANSMISIÓN DE CALOR A LA PIEZA

En este caso de transmisión de calor, la superficie interior de la cámara envuelve completamente a la superficie de la carga; además las dos superficies que intercambian calor son superficies grises; para este caso el intercambio neto de energía radiante está dado por la siguiente ecuación.

$$Q_{pc} = \tau \cdot A_p \cdot F_p - c(T_p^4 - T^4)^1 \quad (\text{Ecuación 2.24.})$$

Qpc.- Flujo neto de calor por radiación entre pared carga.

Fp-c.- Factor de forma.- Es el factor que cuantifica la cantidad de energía radiante, que partiendo de las paredes interiores de la cámara, llega o incide sobre la carga.

Tp = Temperatura de la pared de la cámara.

T = Temperatura de la carga (variable con el tiempo).

Para el caso de una superficie gris que envuelve completamente a otra, el factor de forma está dado por la siguiente expresión:

¹ CHAPMAN A., Transmisión de Calor, Madrid, Interciencia, 1965

$$F_{p-c} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_c} \left(\frac{A_p}{A_c} \right) + \left(\frac{1}{\epsilon_p} - 1 \right)} \quad (\text{Ecuación 2.25.})$$

F_{p-c} = Factor de forma (pared – carga)

A_p = Superficie de pared cubierta por los elementos de resistencia = $\frac{3}{4}$ de la superficie interior de la cámara 0,2205m²

A_c = Superficie de carga 0,0615 m²

ϵ_p = Emisividad de la pared (refractario) 0,7

ϵ_c = Emisividad de la carga 0,3

2.11.10. ECUACIONES PARA EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE CONVECCIÓN.

El rendimiento de conversión de un sistema de calefacción viene determinado por la relación entre el calor absorbido por el material, es decir la carga, para una determinada elevación de temperatura y el correspondiente calor suministrado por el sistema

El rendimiento térmico de conversión será:

$$N_{tc} = \frac{Q'_c}{Q_s} \quad (\text{Ecuación 2.26.})$$

¹ CHAPMAN A., Transmisión de Calor, Madrid, Interciencia, 1965

² KNOWLTON A., Manual Standard del Ingeniero Electricista, 3^{ra} Edición, México, Labor S.A., 1965.

2.11.11. RENDIMIENTO TÉRMICO NETO DE OPERACIÓN

Es igual a la relación existente entre el peso de la carga expresado en (kg) y la correspondiente cantidad de calor suministrado al sistema para una determinada elevación de temperatura expresado en Kw-h.

$$N_{to} = \frac{\text{peso} - \text{carga}}{Kw - h} \quad (\text{Ecuación 2.27.})$$

III.- DISEÑO TÉRMICO

3.1. CONSIDERACIONES GENERALES

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. La ley de Fourier de la conducción del calor afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

3.2. TRANSFERENCIA DE CALOR

Transferencia de calor, en física, proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor se transmite a través de la pared de una casa fundamentalmente por conducción, el agua de una cacerola situada sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección, y la Tierra recibe calor del Sol casi exclusivamente por radiación.

La radiación es la forma más importante de transmisión de calor a las temperaturas de los hornos. En las zonas de temperatura del rojo – blanco (900 °C – 1000 °C) casi todo el calor se transmite por radiación, cuanto más bajas son las temperaturas, menor es la radiación y mayor es la convección.

La distribución del calor por radiación se obtiene por la combinación de la radiación directa procedente de los elementos de resistencias y de la re-radiación, procedente de las superficies limitantes interiores de la cámara. Ésta es la regla general para la colocación de las resistencias en la cámara para obtener una radiación a todas las superficies de la carga.

El gradiente de temperatura, entre las resistencias y el espacio formado por la cámara de calefacción, varía en la práctica de 50 °C hasta 100 °C, para temperaturas de la cámara de calefacción de 800 °C hasta 1200 °C. Se hallan gradientes de temperaturas más elevados en las cámaras a temperaturas más bajas.

3.3. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DE LAS PAREDES

3.3.1. MÉTODO DE LAS DIFERENCIAS FINITAS PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS DURANTE EL CALENTAMIENTO DE LAS PAREDES DEL HORNO

Para explicar el método, se tiene un corte de pared como el siguiente, cabe destacar que los datos iniciales se tomaron realizando una investigación de campo en varios talleres de tratamiento térmico, dichos datos son los más recomendados y apropiados para iniciar el diseño del horno:

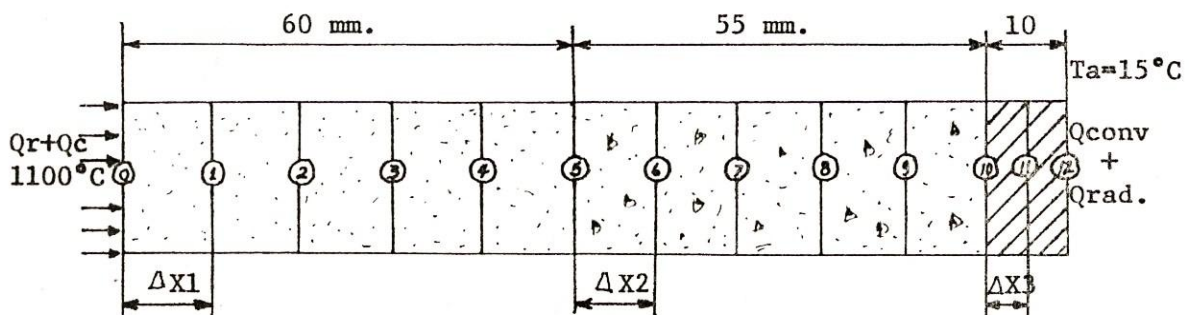


Gráfico 3.1. Sección de Pared del Horno

Al poner en funcionamiento el horno, la potencia absorbida por los elementos de resistencia es disipada en forma de calor, que es transmitido por

radiación y conducción hacia la pared de la cámara (resistencia aislada en el refractario), la pared estará sujeta a un cambio repentino de temperatura y deberá pasar algún tiempo antes de que una condición de equilibrio prevalezca (condición de equilibrio en estado estable). Sin embargo, se produce un proceso de calentamiento transitorio que se lleva a cabo en el periodo intermedio antes que se establezca esa condición.

El método de diferencias determinará los cambios de temperatura de cada uno de los puntos de la pared, el método se basa en asumir intervalos finitos de distancia (Δx) y un módulo de Fourier (M) para determinar los intervalos de tiempo (Δt), y de esta manera calcular la distribución de temperatura en los puntos nodales (puntos de pared) en el tiempo ($t + \Delta t$).

Es decir, si se conoce la distribución de temperatura al tiempo (t) en los puntos de pared, se puede predecir las temperaturas en esos puntos en el tiempo ($t + \Delta t$), hasta obtener la distribución final de temperaturas en un ciclo de funcionamiento.

Mientras mayores sean los valores de Δx y Δt , la solución se obtendrá más rápidamente (menos exacta); cuando los incrementos son más pequeños se alcanzará mayor exactitud en el cálculo.

Las paredes de la cámara de calefacción del horno son paredes multilaminares, formadas por varias capas de material refractario y materiales aislantes.

El cálculo de espesor de las paredes se hará por tanto, asumiendo espesores y temperatura exterior de pared, ya que la temperatura interior de pared de la cámara es de 1000 °C.

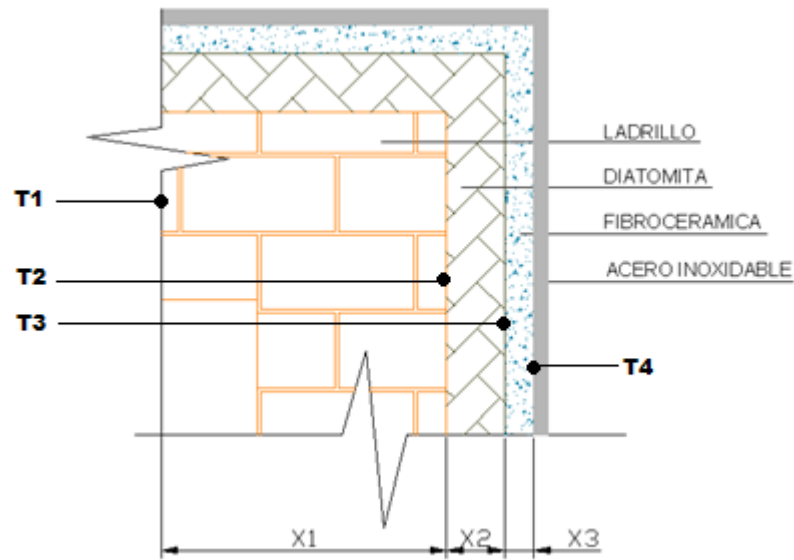


Gráfico 3.2. Pared Plana de Caras Múltiples

Utilizando la ecuación 2.1 y los siguientes datos tenemos:

$$T_1 = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$X_1 = 0,06 \text{ m}$$

$$X_2 = 0,055 \text{ m}$$

$$X_3 = 0,01 \text{ m}$$

$$K_1 = 1,49 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.}^\circ\text{C}}$$

$$K_2 = 0,095 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.}^\circ\text{C}}$$

$$K_3 = 0,0458 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.}^\circ\text{C}}$$

$$q = \frac{900^\circ\text{C}}{\left(\frac{0,06}{1,49} + \frac{0,055}{0,095} + \frac{0,01}{0,0458} \right) \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m.}^\circ\text{C}}}$$

$$q = 1074,4 \frac{\text{Kcal}}{\text{h.m}^2}$$

$$T_2 = 957,14^\circ C$$

$$T_3 = 335,7^\circ C$$

$$T_1 - T_2 = 42,85^\circ C$$

$$T_2 - T_3 = 621,41^\circ C$$

$$T_3 - T_4 = 235,7^\circ C$$

Entonces:

Se aumentará los espesores de las paredes para analizar que sucede:

$$X_1 = 0,1 \text{ m}$$

$$X_2 = 0,1 \text{ m}$$

$$X_3 = 0,01 \text{ m}$$

Tenemos:

$$q = \frac{900^\circ C}{\left(\frac{0,1}{1,49} + \frac{0,1}{0,095} + \frac{0,01}{0,0458} \right) \frac{Kcal}{h.m.^{\circ}C}}$$

$$q = 671,64 \frac{Kcal}{h.m^2}$$

$$T_2 = 953^\circ C$$

$$T_3 = 247,76^\circ C$$

$$T_1 - T_2 = 47^\circ C$$

$$T_2 - T_3 = 705,2^\circ C$$

$$T_3 - T_4 = 147,76^\circ C$$

Si se comparan las temperaturas T_2 y T_3 en los dos casos, se podrá observar que no existe un cambio substancial, pese a que se aumentó el espesor de las paredes casi al doble, aumentando el volumen de la cámara, por lo las pérdidas por acumulación de calor serán mucho mayores, incrementando el gasto de energía del horno.

Razón más que suficiente para decidir las dimensiones de las paredes tomadas en el primer caso, es decir:

$$X_1 = 0,06 \text{ m} = 60 \text{ mm}$$

$$X_2 = 0,055 \text{ m} = 55 \text{ mm}$$

$$X_3 = 0,01 \text{ m} = 10 \text{ mm}$$

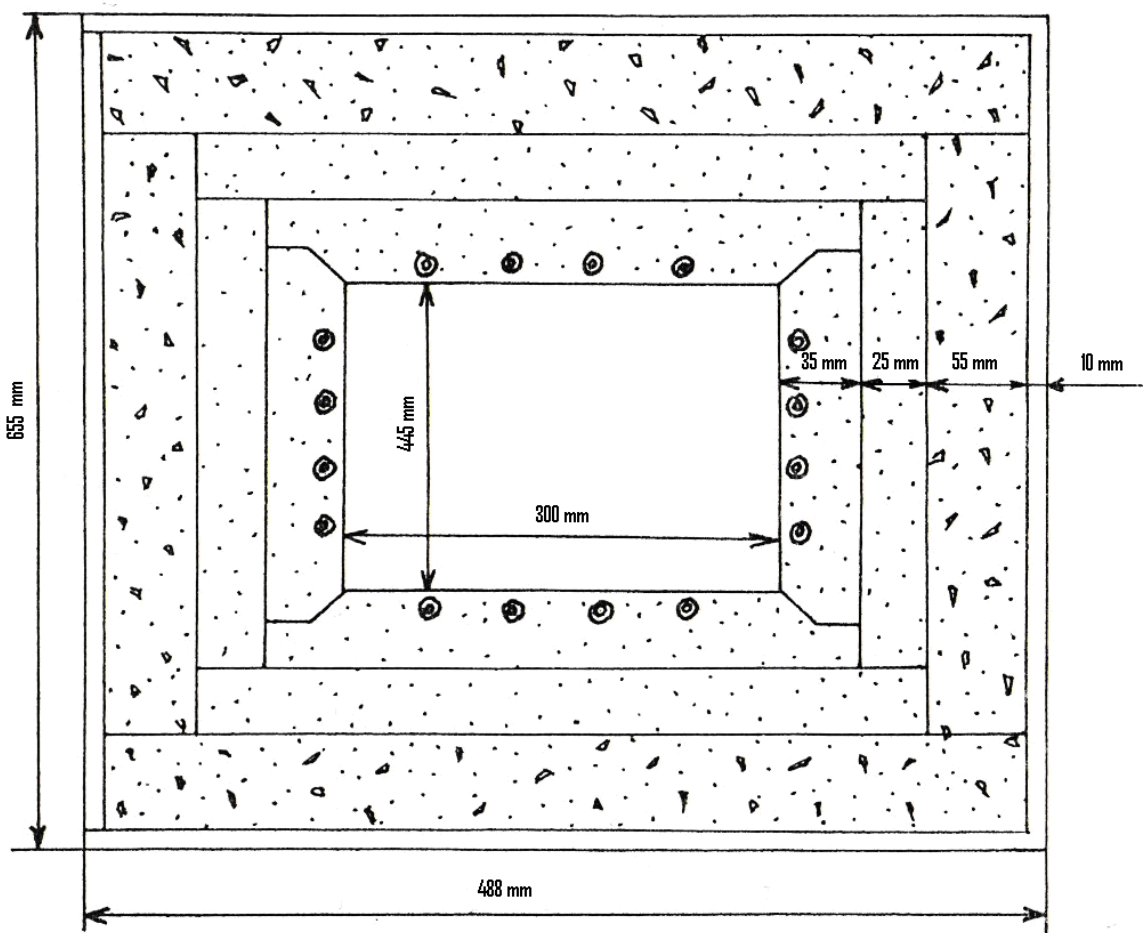


Gráfico 3.3. Corte Transversal del Horno, Dimensiones Internas y Espesores de Pared

3.4. CALOR ACUMULADO EN LAS PAREDES DEL HORNO

El calor desarrollado dentro del horno, se comunica en parte a sus paredes, cuya diferencia de temperatura en la cara interior y exterior mide el calor acumulado por la cámara. Cuanto más frecuentes sean las interrupciones de trabajo, más pesará éste calor acumulado en el consumo de energía del horno, si el trabajo es continuo, la acumulación de trabajo es una sola vez. Como la acumulación de calor en las paredes obliga a un consumo mayor de energía, conviene estimar éstas pérdidas en el diseño del horno con mayor cuidado. En condiciones de aislamiento favorable las pérdidas de calor tendrán un valor pequeño y aumentará muy poco el consumo de energía; por lo que en este caso, debido a que se tienen dichas condiciones favorables, se tomará las pérdidas por calor acumulado en las paredes como nulas.

3.5. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR

La distribución final de temperatura en la pared de la cámara luego de un ciclo de funcionamiento de 1.5 horas, es la siguiente:

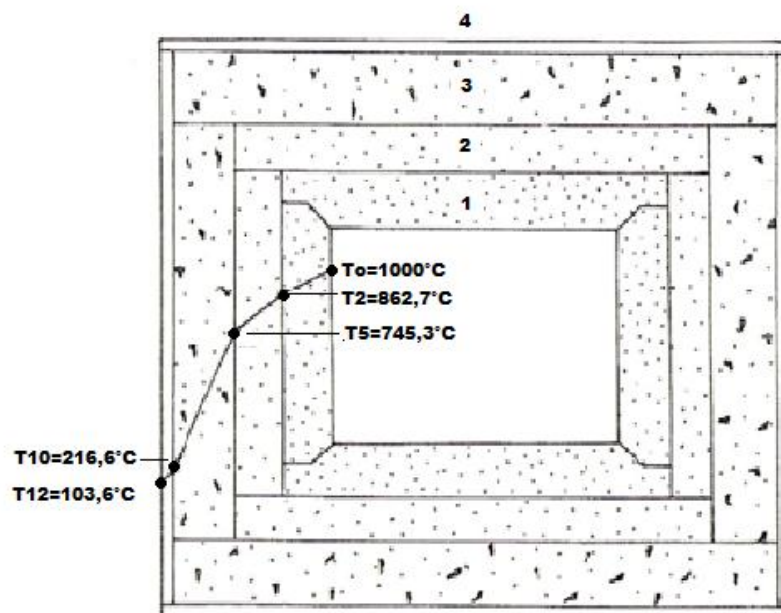


Gráfico 3.4. Distribución Final de Temperaturas en las Paredes de la Cámara

$$T_a = 15^\circ C$$

$$T_o = 1000^\circ C$$

$$T_2 = 862.7^\circ C$$

$$T_5 = 745.3^\circ C$$

$$T_{10} = 216.6^\circ C$$

$$T_{12} = 103.6^\circ C$$

$$T_{m1} = \frac{1000^\circ C + 862,7^\circ C}{2} = 931,35^\circ C$$

$$T_{m2} = \frac{862,7^\circ C + 745,3^\circ C}{2} = 804^\circ C$$

$$T_{m3} = \frac{745,3^\circ C + 216,6^\circ C}{2} = 481^\circ C$$

$$T_{m4} = \frac{216,6^\circ C + 103,6^\circ C}{2} = 160^\circ C$$

$$\Delta_{T1} = T_{m1} - T_a = 916,3^\circ C$$

$$\Delta_{T2} = T_{m2} - T_a = 789^\circ C$$

$$\Delta_{T3} = T_{m3} - T_a = 466^\circ C$$

$$\Delta_{T4} = T_{m4} - T_a = 145^\circ C$$

Ahora se calculará las pérdidas por acumulación de calor debido a la conducción del calor usando la ecuación 2.14:

SECCIÓN1.- (Refractario)

$$Q_{k1} = 25 \times 0,23 \times 916,35$$

$$Q_{k1} = 5269 Kcal$$

SECCIÓN 2.- (Refractario)

$$Q_{k2} = 16 \times 0,23 \times 789$$

$$Q_{k2} = 2903,5 \text{ Kcal}$$

SECCIÓN 3.- (Aislante Diatomita)

$$Q_{k3} = 14 \times 0,22 \times 466$$

$$Q_{k3} = 1435,3 \text{ Kcal}$$

SECCIÓN 4.- (Placa - Fibrocemento)

$$Q_{k4} = 13 \times 0,086 \times 145$$

$$Q_{k4} = 162,1 \text{ Kcal}$$

La acumulación de calor en las paredes de la cámara para un ciclo de funcionamiento de ($t = 1.5 \text{ h}$) es:

$$Q_k = 162,1 + 1435,3 + 2903,5 + 5296 = 9796,5 \text{ Kcal}$$

$$Q_k = 6531,3 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Con este ciclo de ($t = 1.5 \text{ h}$), se obtiene un valor de potencia demasiado elevado en relación al tamaño de la mufla, este originaría la elevación muy rápida de temperatura en los elementos de resistencia que perjudica la duración de dichos elementos, además los aparatos de regulación pueden sufrir daños por la conexión y desconexión muy frecuentes.

Razón por la cual el ciclo de funcionamiento debe ser más real ($t = 4.5$ h)

$$Q_k = 2171.1 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

3.6. PÉRDIDAS DE CALOR POR CONVECCIÓN

En la convección libre o natural, la velocidad del fluido en puntos alejados de la superficie del cuerpo esencialmente nulo.

En las cercanías del cuerpo se registrará un cierto movimiento de aire; en este caso serán diferentes las densidades del aire que se encuentra cerca de la superficie; y del que se encuentra alejado de ésta; esta diferencia de densidad dará lugar a una fuerza de empuje o flotación positiva o negativa (según que la superficie esté más caliente o más fría que el aire) sobre el fluido que se encuentra cerca de la superficie.

Esta fuerza se traduce en un movimiento del aire, substancialmente en dirección vertical, a lo largo de la superficie, con la consiguiente transmisión de calor por convección.

La temperatura de la superficie exterior del horno se ha considerado 100°C , luego de 4.5 horas de operación.

$$T_s = 100^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{aire}} = 15^{\circ}\text{C}$$

$$T_m = \frac{T_s + T_a}{2} = 57,5^{\circ}\text{C}$$

Las propiedades del aire a presión atmosférica y para $t_m = 57,5^{\circ}\text{C}$, son:

Pr = Número de Prandt = 0.697

ΔT = Diferencia de temperatura (superficie-aire) 85 °C = 358 °K

β = Coeficiente de dilatación del aire $\beta = \frac{1}{288^\circ K}$

L = Longitud característica = 0,35m

δ = Densidad del aire = 1,093kg/m³

g = gravedad = 9,8m/s²

u = Viscosidad del aire = 0,1kg/Hm

K = Conductividad del aire = 0,0243 $\frac{Kcal}{h.m.^{\circ}C}$

$$Gr = (\Delta T x \beta) x \frac{L^3 x \rho^2 x g}{u^2}$$

$$Gr = \left(\frac{358}{288}\right) x \frac{0,35^3 x 1,093^2 x 9.8}{0,1^2} x 3600^2$$

$$Gr = 7.5 x 10^8$$

$$Pr = 0,697$$

$$Gr x Pr = 5.25 x 10^8$$

$$Nu = 113$$

Coeficiente de película convectivo:

$$hc = \frac{113 x 0,0243}{0,35}$$

$$hc = 7,85 \frac{Kcal}{h.m^2.^{\circ}C}$$

Las pérdidas de calor por convección serán calculadas usando la ecuación 2.19.:

A = Superficie exterior horizontal = 0,3278m²

ΔT = Gradiente de temperatura (superficie - aire) = 85 °C

Para la superficie horizontal superior:

$$Q_{c_s} = 7,85 \times 0,3278 \times 85$$

$$Q_{c_s} = 218,72 \frac{\text{Kcal}}{h}$$

Para la superficie horizontal inferior (convección dificultada); se considera el 50% menor que la anterior

$$Q_{c_i} = 109.36 \text{ kcal/h}$$

Para las superficies verticales, se considera el coeficiente convectivo hc un 35% inferior que para superficies horizontales encaradas hacia arriba; por lo tanto:

$$Q_{cv} = 0.65hc * A * \Delta T \quad (2 \text{ áreas verticales})$$

$$Q_{cv} = 0.65 * 7.85 * 0.594 * 85$$

$$Q_{cv} = 257.63 \text{ kcal/h}$$

Las pérdidas por convección son: $Q_c = 585.7 \text{ Kcal/h}$

3.7. PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN

Se calculan utilizando la ecuación 2.20:

$$Q_r = 0.074 * 1.25 * 4.965 * 10^{-8} (373^4 - 288^4)$$

$$Q_r = 57.3 \text{ Kcal/h}$$

Las pérdidas por radiación son bajas a estas temperaturas.

Pérdidas totales de calor

$$Q_p = Q_k + Q_c + Q_r$$

$$Q_p = 2171.1 + 585.7 + 57.3 (\text{kccal})$$

$$Q_p = 2814.0 \text{ kcal/hora}$$

3.8 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE TRATAMIENTO DE LA PIEZA

Usando la ecuación 2.23. se tiene:

$$K_1 = 0.11 * 10^{-8} \frac{1}{h^{\circ} k^3}$$

$$K_2 = 3909.1^{\circ} K / h$$

$$t = 0.09h \left[\ln\left(1 + \frac{T}{T_p}\right) - \ln\left(1 - \frac{T}{T_p}\right) + 0.035tg^{-1}\left(\frac{T}{T_p}\right) \right]_{T_0=288^{\circ}K}^{T_f=1273^{\circ}K}$$

$t = 0.40$ horas = 24 min. ; Tiempo durante el cual la carga llega a la temperatura final de $1000^{\circ} C$.

La cantidad de calor absorbida por la carga es:

$$Q'c = mc * Cpc * \Delta T$$

$$Q'c = 6.82 * 0.11297 * 985 = 758.90kcal$$

$$Q'c/t = \frac{758.90kcal}{0.40h} = 1897.25kcal/hora \Rightarrow \text{CALOR SUMINISTRADO}$$

3.9. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE CALOR TRANSFERIDO A LA PIEZA

La disposición de la carga en el interior de la cámara se ha provisto de tal manera que el flujo de calor producido por la radiación de sus paredes sea uniforme, y llegue completamente a todas las superficies de la carga, el gráfico nos demuestra dicha disposición.

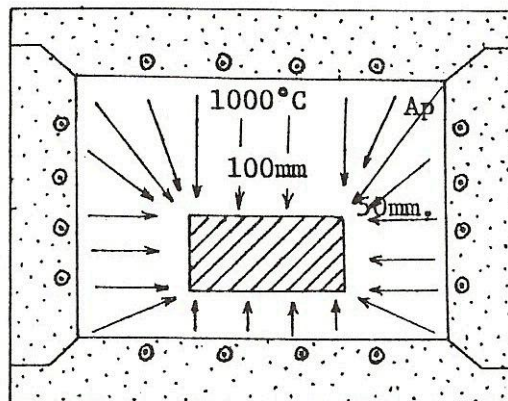


Fig. 3.5.- DISPOSICIÓN DE LA CARGA EN EL INTERIOR DE LA CÁMARA

3.9.1. TRANSMISIÓN DE CALOR A LA PIEZA

Utilizando la ecuación 2.25. tenemos:

$$F_{p-c} = 0.08$$

3.10. CALOR TOTAL SUMINISTRADO POR EL SISTEMA.

Una vez que se conoce el valor de las pérdidas de calor para un ciclo de funcionamiento, y la cantidad de calor absorbido por la carga durante el periodo de calentamiento, el calor total aportado por el sistema es:

$$Q_s = Q_p + Q'c$$

$$Q_s = 2814.0 + 1897.25 = 4711.4 \text{ kcal/h.}$$

$$1 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 1.163 \text{ Watts}$$

Por lo tanto:

$$4713.3 \text{ Kcal/h} = 5479.4 \text{ Wat. Aproximadamente.} - 5500 \text{ Watts}$$

La potencia del horno es igual a 5500 Wat = 5.5 Kw

3.11. RENDIMIENTOS TÉRMICOS

3.11.1 RENDIMIENTO TÉRMICO DE CONVECCIÓN.

Utilizando la ecuación 2.26. tenemos:

$$N_{tc} \frac{1897.25}{4711.3} = 40\%$$

3.11.2 RENDIMIENTO TÉRMICO NETO DE OPERACIÓN

Con la ecuación 2.27. obtenemos:

$$N_{to} = \frac{6.82 \text{ kg}}{5.5 \text{ Kw} - \text{h}} = 1.24 \text{ kg/kw-h}$$

Estos resultados servirán como parámetros de comparación con los resultados reales obtenidos durante las pruebas que se realicen.

Calor Acumulado En Las Paredes	Espesor De Las Paredes		Distribución De Temperaturas
671,64 Kcal/h.m ²	$X_1 = 0,06\text{m}$ $X_2 = 0,055\text{m}$ $X_3 = 0,01\text{m}$		$T_o = 1000^\circ\text{C}$ $T_2 = 862,7^\circ\text{C}$ $T_5 = 745,3^\circ\text{C}$ $T_{10} = 216,6^\circ\text{C}$ $T_{12} = 103,6^\circ\text{C}$
PÉRDIDAS DE CALOR			
Pérdidas De Calor Por Convección	Pérdidas De Calor Por Radiación	Pérdidas De Calor En Las Paredes	Pérdidas Totales De Calor
585,7 Kcal/h	57,3 Kcal/h	2171,1 Kcal/h	2814 Kcal/h
CALOR SUMINISTRADO			
Calor Suministrado A La Pieza		Calor Total Suministrado Por El Sistema	
1897,25 Kcal/h		4713,3 Kcal/h	
RENDIMIENTO TÉRMICO			
Rendimiento Térmico De Convección		Rendimiento Térmico Neto De Operación	
40%		1,24 Kg/Kw-h	

Tabla 3.1. Resultados Obtenidos Al Realizar Cálculos

3.12. CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DE RESISTENCIA

3.12.1. CALENTAMIENTO POR RESISTENCIA: EFECTO JOULE

En los hornos eléctricos de resistencia, la potencia eléctrica absorbida por los elementos (Kw), es disipada en forma de calor (Kcal/h) hacia el medio (cámara); esta transformación de energía eléctrica en calor, se basa en el efecto Joule.

Una corriente eléctrica de intensidad (I) (Amperios) que circula por un conductor de resistencia (R) (Ohmios) produce una disipación de calor (Q) (cal/seg).

$$P = I^2 * R \quad (\text{Wat}) \quad 1\text{Watt} = 0.24 \text{ cal/seg}$$

El equivalente térmico de la entrada en Kw de los elementos es igual al consumo del calor del horno (Kcal/h). Para el cálculo de los elementos para hornos industriales, deben conocerse ante todo, la tensión disponible y la temperatura.

3.12.2. LA TENSIÓN DE UN HORNO

Depende generalmente de la tensión de red local. A excepción de los hornos pequeños de elevada temperatura alimentados por un transformador de elevada intensidad, puede conectarse la mayoría de los hornos directamente a la tensión de la red (110 – 220 V).

3.12.3. LA TEMPERATURA DE LOS ELEMENTOS.

Al calcular los elementos de las resistencias debe tenerse en cuenta la temperatura apropiada del elemento y la sección del material, puesto que estos factores ejercen una influencia decisiva sobre la duración.

La concentración de potencia de la pared del horno (Kw/m^2), la carga específica de superficie (p) del material de resistencia (wat/cm^2), así como las condiciones de transmisión de calor, están en relación directa con la temperatura del elemento. Esta temperatura debe ser elevada para producir la cantidad de calor necesario a transmitir por unidad de superficie de la resistencia. En esta forma, la temperatura de trabajo es función de la densidad superficial de potencia (ρ) (Wat/cm^2) de la resistencia.

3.12.4. CARGA ESPECÍFICA DE SUPERFICIE O CAPACIDAD DE LOS ELEMENTOS DE RESISTENCIA ($P = WATTS/CM^2$).

La carga específica de superficie (p) es lo primero que debe tenerse en cuenta en el cálculo de los elementos. Para una resistencia de determinada forma y dimensiones, la temperatura de trabajo variará con los wat absorbidos, ya que el área de la superficie permanece constante.

La potencia asumida por un elemento de calefacción está limitada por la capacidad de su superficie para emitir calor a su temperatura máxima de operación. En el diseño de horno, los elementos se deben elegir de tal manera que tengan una superficie suficiente para transmitir la energía calorífica a la velocidad que se requiere.

Con el aumento de la carga de superficie sube también el exceso de temperatura del elemento en relación con su ambiente, por lo que la temperatura máxima admisible para el elemento constituye un límite para la carga de superficie. Por consiguiente resulta que el valor máximo admisible para la carga

de superficie baja al subir la temperatura del horno. En el cuadro siguiente se indican las cargas de superficie máximas admisibles en Wat por cm² de superficie del conductor para elementos KANTHAL empleados en hornos industriales.

ALEACIÓN	EJECUCIÓN	TEMPERATURAS DEL HORNO °C							
		600	700	800	900	1000	1100	1250	1300
Kanthal A-1	Cinta					4.0			
Kanthal A	Hilo				2.9	2.3	3.0	2.0	1.5
Kanthal DSD	Cinta e hilo	3.9	3.5	3.0	2.4	1.5	1.6	1.2	

Tabla 3.2. Cargas De Superficie Máximas Admisibles (Wat/Cm²) Para Elemento Kanthal¹

En el apéndice de gráfico y figuras se tiene un gráfico que nos da la carga de superficie p (wat/cm²) en función de la temperatura para los elementos KHANTAL.

3.12.5. Factor de temperatura (Ct).

Es el factor que determina la variación de la resistencia del elemento (ohmios) en función de la temperatura.

Si se quiere calcular el valor de la resistencias del elemento a la temperatura de trabajo, se multiplicará el valor de la resistencia en frío (20°C.) por el factor de temperatura (Ct).

$$R_c = R_f * C_t$$

R_c .- Resistencia en caliente

R_f .- Resistencia en frío (20°C,)

¹ VASTRA AROS TRYCHERI, The Kanthal Handbook, Sweden, Resistance Alloys, 1980.

En el apéndice se encuentra la figura que da los valores de (Ct) para diferentes temperaturas (KANTHAL).

3.12.6 ELEMENTOS DE RESISTENCIA

Forma de elementos de resistencia:

S.- Paso del arrollamiento (mm)

D.- Diámetro de la hélice (mm)

d .- Diámetro del hilo (mm)

a .- Distancia eje – brazos (mm)

L.- Longitud del elemento

Lu.- Longitud de los terminales.

Los elementos usualmente no son rectos, sino arrollados en espiral. Con ello, parte del calor radiado se refleja dentro de la hélice, del modo que, para igual potencia consumida, se alcanza una temperatura más alta con los elementos en el espiral que con los elementos rectos (a igualdad de las demás condiciones) .

En otras palabras, la temperatura del elemento se puede mantener con un consumo de potencia más bajo, o bien, si la temperatura y la potencia se mantienen constantes, puede montarse una longitud mayor de resistencia, con lo que cabe la posibilidad de aumentar la potencia absorbida, si ello fuese necesario en un momento dado.

3.12.7. DURACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE RESISTENCIA

Los elementos calefactores fallan normalmente por pérdidas de sección debidas a oxidación, volatilización o estiramiento.

Si una parte se hace más delgada que el resto, la resistencia se eleva localmente y, sin embargo, la corriente permanece prácticamente sin variación.

Consecuentemente, en la parte más delgada se eleva la potencia disipada por unidad de longitud y la temperatura.

Como la velocidad de oxidación y estiramiento dependen de la temperatura, el adelgazamiento de la zona afectada es un fenómeno auto sostenido.

La resistencia mecánica de todos los materiales metálicos resistentes a altas temperaturas disminuye al aumentar la temperatura.

Dependiendo de la duración también de la sección del material de la resistencia, es preciso elegir el diámetro del hilo (d) no demasiado pequeños. Esto hay que tener en cuenta sobre todo para temperaturas de trabajo elevadas.

El diámetro del hilo de un elemento KANTHAL debe ser siempre que sea posible por lo menos de 2 – 4 mm.

3.12.8. CONEXIÓN SERIE.

Es muy indicado que los elementos para hornos pequeños se conecten a la red en monofásicos y en serie o bien por un transformador de baja tensión. ⁽²⁾

En el circuito de resistencias en serie la intensidad de corriente (I) que circula por los elementos de resistencia es constante.

La caída de tensión o voltaje es igual a la suma de la caída de tensión en cada uno de los elementos.

La resistencia del circuito es igual a la suma de las resistencias de cada elemento.

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 \text{ cte.}$$

$$V = V1 + V2 + V3 + V4$$

$$R = R1 + R2 + R3 + R4$$

El circuito consta de cuatro elementos conectados en serie.

3.12.9. CÁLCULO NUMÉRICO DE LOS ELEMENTOS

Con la teoría expuesta anteriormente se calculará los parámetros que determinan el elemento de resistencia.

3.12.9.1 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE HILO (D) DEL ELEMENTO

Para calcular el diámetro de hilo de los elementos se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 * p * \rho}{10 p * \pi^2 * Rt}} = \frac{1}{2.91} \sqrt[3]{\left(\sqrt[3]{\frac{P}{V}}\right)^2 * \frac{\rho * Ct}{p}}$$

Donde:

D = Diámetro de hilo (mm)

P = Potencia de entrada a los elementos (Wat)

ρ = Resistividad (ohmios mm² /m)

P = Densidad superficial de carga (wat/cm²)

Rt = Resistencia del elemento Ohmios

V = Caída de tensión = Voltios

Ct = Factor de temperatura

3.12.9.2. MÉTODO RÁPIDO PARA EL CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL HILO (D).

Un método rápido es haciendo uso de las tablas; calcular la relación del área del elemento y de la resistencia ($\text{cm}^2/\text{Ohmios}$), y comparar este valor con el dado de las TABLAS para elementos KANTHAL.

$$\frac{\text{cm}^2}{\text{ohmios}} = \frac{I^2 * Ct}{p} = \frac{P * Ct}{p * R}$$

Se calcula el diámetro del elemento mediante este método.

DATOS:

Potencia del horno = 5.5 Kw = 5500 watts

Tensión = 220 V

Temperatura = 1000 °C

$P = V * I = I^2 * R = V^2 / R$ (watts)

$$I = \frac{5500\text{Watts}}{220\text{voltios}} = 25\text{A}; \quad Rt = \frac{V^2}{P} = \frac{220^2}{5500} = 8.8\text{ohmios}$$

Factor de temperatura (Ct) para T = 1000°C = 1.04

Densidad superficial de carga (p) = 2.2 Wat / cm^2 del gráfico KANTHAL A-1

$$\frac{\text{cm}^2}{\text{Ohmios}} = \frac{25^{2*1.04}}{2.2} = 295.45 \quad \Longrightarrow \quad \text{Valor calculado}$$

Comparando con el existente en la tabla se tiene que corresponde a un diámetro $d = 2.2 \text{ mm}$. (diámetro de hilo), cuya resistencia por unidad de longitud es:

0.381 Ohmios/m.

DATOS POR ELEMENTO:

-Resistencia en caliente

$$R_c = \frac{R_t}{4} = \frac{8.8}{4} = 2.2 \text{ Ohmios}$$

- Resistencia en frío (R20°C)

$$R_{20^\circ C} = \frac{R_c}{C_t} = \frac{2.2}{1.04} = 2.12 \text{ Ohmios.}$$

- La longitud radiante de hilo (L)

$$I = \frac{2.2 \text{ Ohmios}}{0.381 \text{ Ohmios/m}} = 5.77 \text{ m.}$$

- Diámetro de la espiral (D).

Para hornos industriales.

Temperatura de los elementos menores a 1000°C * $D/d = 6-8$

Temperatura de los elementos mayores a 1000°C $D/d = 5-6$

$D/d = 5$ implica $D = 5d$; $D = 11-12 \text{ mm}$.

-Número de espiras (n)

$$n = \frac{1000 * 5.77}{\pi * (12 - 2.2)} = 1.87$$

-Longitud de la espiral comprimida (Lw)

$$Lw = n * d = 187 * 2.2 = 411.4 \text{ mm}$$

- Paso del arrollamiento (s)

Se trata de obtener la distancia más grande entre las espiras vecinas, para que sea menor la radiación recíproca.

Los valores recomendados para calcular el paso (s) entre espiras son: $s / d = 2 - 4$.

$S / d = 3$ implica $s = 3d$; $s = 6.6 \text{ mm}$. - 7 mm.

-Longitud de la espiral extendida (L)

$$L = s * n = 6.6 \text{ mm} * 187 = 1234 \text{ mm}.$$

CÁLCULO DEL ELEMENTO						
ANCHO: 245 mm; ALTURA: 175 mm; POTENCIA DEL HORNO : P = 5.5 kw						
TEMP. DEL HORNO : T = 1000°C; PROFUNDIDAD: 350 mm;						
CONECTADO A : Tensión E 220 Voltios						
Conexión						
Número de fase						
Datos por grupo y fase						
Potencia	P	Kw		5.5		
Tensión	E	Volt		220		
Intensidad	I	Amp		25		
Resistencia en caliente	Rt	Ohm		8.8		
Número de elementos en serie				4		
Elementos de espirales de hilo						
Datos por elemento			bóveda	Solera	Lados	
Caída de tensión	E	Volt	55	-	--	
Resistencia en caliente	Rt	Ohm	2.2	-	--	
Resistencia en frío	R 20°C	Ohm	2.12	-	--	
Dimensión del hilo	d	mm.	-	--		
Calidad			KANTHAL	A-1		
Carga de superficie	p	W/cm ²	2.2	-	--	
Longitud radiante del hilo	l	m	5.77	-	--	
Longitud de la espiral	L	m	1.23	-	--	
Diámetro exterior espiral	D	mm	12	-	--	
Número de espiras	n		187	-	--	
Paso	s	mm	6.6	-	--	
Extremos de conexión			2	-	--	
Número total de elementos	4		1	1	2	

Tabla 3.3. Datos Numéricos del Elemento Resistivo

3.13. POTENCIA DEL HORNO.

Se obtiene, como es sabido, por el cálculo de la cantidad de calor necesaria para el calentamiento de una carga determinada, más el cálculo de las pérdidas de calor.

La potencia del horno así determinada es de 5.5 Kw

IV.- PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

4.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo se refiere al desarrollo de la parte tecnológica, aquí se desarrollará cada uno de los pasos seguidos, en cuanto a la construcción del horno; es necesario recordar que el horno está construido de los siguientes elementos:

- 1.- Elementos de resistencia.....KANTHAL A-1
- 2.- Porta resistencias.....Cemento refractario
CONCRAX- 1500
- 3.- Cámara refractaria.....Cemento refractario
CONCRAX – 1500
- 4.-Aislamiento térmico.....Diatomita
- 5.-Placa fibrocemento.....Placa plana de eternit

La base para situar las resistencias, es la radiación a todas las superficies de la carga, ya que la radiación es la forma más importante de transmisión de calor a temperatura de (80° - 1200° C).

La distribución por radiación se obtiene mediante la radiación directa procedente de los elementos de resistencia y de la radiación directa procedente de las superficies interiores de la cámara.

La uniformidad del flujo de calor a la carga, se obtiene mediante una buena distribución de los elementos de resistencia en las paredes interiores de la cámara. (Porta resistencia).

Los elementos de las resistencias van aislados en dichas paredes.

4.2. BOBINADO

A formación de las espirales se afecta sobre un husillo (barra de acero o hierro). El diámetro del husillo debe corresponder al diámetro interior de la espiral, disminuido por el relajamiento del resorte, cuya magnitud aproximada puede estimarse según el cuadro siguiente:

D	D'	F	D'	F	D'	F	D'	F
1.0	3.0	0.2	5.0	0.4	8.0	0.8	12.0	1.6
2.0	6.0	0.3	10.0	0.6	16.0	1.2	24.0	2.4
3.0	9.0	0.4	15.0	0.8	24.0	1.6	36.0	3.2
4.0	12.0	0.5	20.0	1.0	32.0	2.0	48.0	4.0
5.0	15.0	0.6	25.0	1.2	40.0	2.4	60.0	4.8
6.0	18.0	0.7	30.0	1.4	48.0	2.8	72.0	5.6
7.0	21.0	0.8	35.0	1.6	56.0	3.2	84.0	6.4

Tabla 4.1. Relajamiento (F) en Relación con el Diámetro del Hilo (d) y del Husillo (D') (mm)¹

El bobinado se ha realizado utilizando un torno de construcción normal, el diámetro del husillo es de 5/16 (pulg) aproximadamente 8 mm. En las mordazas del mandril del torno se fija un extremo del husillo, junto con uno de los extremos del hilo que es curvado en ángulo recto, de manera que el extremo de conexión pueda mantenerse derecho, el otro extremo del husillo se fija a un contrapunto móvil.

Las primeras espiras se arrollan girando el mandril del torno con la mano; las siguientes se hacen regulando las revoluciones del torno entre 60 – 180 rpm. ,

¹ VASTRA AROS TRYCHERI, The Kanthal Handbook, Sweden, Resistance Alloys, 1980.

debiendo mantener el hilo lo más firme posible; procurando conducir de tal manera, que las espiras resulten muy apretadas.

Para el bobinado de hilos gruesos ($d = 4-7 \text{ mm}$) es necesario un dispositivo – Guía, cuyas dimensiones y forma se dará a continuación.

TAMAÑO	A	B	C	d	e	F	g
1	250	50	15	25	10	2	35
2	300	60	20	35	15	3	35

Tabla 4.2. Dimensiones (Dispositivo Guía)¹

4.3. ESTIRADO DE LAS ESPIRAS

El estirado de las espirales se ha hecho conectando los dos extremos de la espiral a una fuente de corriente proveniente de un transformador variable, cuyo objeto es el de regular el voltaje (caída de tensión en los extremos libres de la espiral) con el fin de controlar la intensidad de corriente que circula por el elemento, y de esta manera suministrar la potencia requerida por dicho elemento, esto es hasta que tenga la capacidad máxima de disipación de calor, lo que se alcanza con un voltaje de (200 V).

El alargamiento debe hacerse lenta y uniformemente bajo corriente conectada, debe añadirse un margen de 1 % de la longitud para la contracción después del estiramiento. La variación es más o menos de 60 A por cada 12 V.

¹ VASTRA AROS TRYCHERI, The Kanthal Handbook, Sweden, Resistance Alloys, 1980.

4.4. CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA REFRACTARIA

4.4.1. CONSTRUCCIÓN DE LOS PORTA RESISTENCIAS Y DE LAS PAREDES SECUNDARIAS.

El diseño de la cámara se ha provisto de tal manera que elementos de resistencia se encuentren aislados en las paredes interiores de la cámara; Con el fin de proteger a los elementos del ataque de las diferentes atmósferas a que pueden estar expuestas (carburantes, atmósferas que contienen cloro, azufre, hidrógeno, vapor de agua, etc.). Estas paredes refractarias son de cemento refractario COCRAX – 1500, selección que se hizo en base a las características que deben reunir las masas cerámicas de aislamiento para elementos de resistencia KANTHAL.

En el gráfico están especificadas las formas y dimensiones de los porta resistencias.

4.4.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS REFRACTARIOS CONCRAX.

Los concretos refractarios CONCRAX son concretos de fraguado hidráulico, diseñados para la construcción rápida y económica de mamposterías de hornos; empleados también para la construcción de puertas y tapas de los mismos.

Los concretos refractarios CONCRAX, poseen excelente resistencia a la desintegración por choque, térmico, conductividad térmica media, su granulación perfectamente controlada, y la alta calidad de sus componentes proporcionan buena resistencia mecánica y mínima contracción por secamiento.

El concreto refractario (CONCRAX – 1500) luego mezclado con agua queda listo para ser apisonado junto con los elementos de resistencia en los

moldes de madera previamente elaborados a las dimensiones anteriormente dadas.

4.5. INDICACIONES PARA LA ELABORACIÓN DE LA MASA REFRACTARIA

El material se suministra seco y antes de agregar agua conviene mezclar el contenido del saco a un cuando solo se vaya a emplear una parte del mismo, con el objeto de obviar cualquier segregación producido durante el almacenamiento y transporte.

El concreto requiere mezclarlo con agua limpia y fría, para ser vaciado en los moldes de madera; no conviene agregar agua en exceso pues la resistencia máxima se obtiene con una mezcla de consistencia gruesa que permita formar una bola en la mano.

- Esta mezcla se lo realiza en el tambor mezclador.
- A la masa (concreto refractario) se le añade un 4 – 5 % de agua.
- Los moldes deben recubrirse con un aceite liviano, para evitar que el concreto se pegue a las paredes del molde.
- Al incrustar, apisonar o prensar los conductores KANTHAL, con la masa, debe observarse una repartición uniforme y cuidadosa de la masa por toda la superficie del conductor.
- Donde sea posible, debe terminarse el proceso de la incrustación con un prensado para la mejor fijación.

- La iniciación del fraguado tiene lugar entre 4 – 5 horas después de su preparación; los moldes no soportantes pueden ser retirados 6 horas después de efectuado el vaciado.
- Los porta resistencias deben ser secados en un horno a una temperatura mínima de 500° C.
- Se procederá luego al cocido, bien en hornos especiales o mediante la misma intensidad de servicio. Las paredes refractarias secundarias se elaboran de la misma manera, estas paredes tienen como finalidad resistir al calor en el interior de la cámara, ya que tienen una conductividad térmica baja.

Sus dimensiones son:

- Para el piso y techo (espesor = 25 mm; ancho = 365 mm; longitud = 370 mm).
- Para las paredes laterales (espesor = 25 mm; ancho = 255 mm; longitud = 370 mm).

El mortero U – SUPER deberá ser mezclado con agua antes de usarse en proporción de diez litros de agua por saco de 25 kilos.

El mortero SUPER AEROFAX no necesita agua viene preparado y solo deberá mezclarse para proceder a usarlo.

Necesita por lo menos 24 horas para secarse antes de aplicar fuego para su completo fraguado.

APLICACIÓN:



Gráfico 4.1. Fibra Cerámica Súper AEROFAX



Gráfico 4.2. Concreto Refractario CONCRAX

Los concretos refractarios de la línea CONCRAX pueden ser fácilmente instalados en la obra, pues requieren solamente mezclarlos con agua limpia y fría para que puedan ser vaciados como un concreto ordinario, o apisonados en formaletas de metal o madera, y aún aplicados con palustre sobre superficies que proporcionen una adherencia necesaria.

El material se suministra seco y antes de agregar agua conviene mezclar el contenido total de la bolsa aún cuando se vaya a emplear solo parte de él para obviar cualquier segregación producida durante el almacenamiento o el transporte. Para la preparación es preferible usar una mezcladora mecánica pero puede hacerse a mano en un recipiente limpio.

No se agregue agua en exceso pues la resistencia máxima se obtiene con una mezcla de consistencia gruesa, que permita formar una bola en la mano. Las formaletas deben mojarse primero con aceite liviano. Si la aplicación se efectúa sobre un material poroso la superficie debe empaparse en agua para impedir que absorba la humedad del concreto.

El concrax debe aplicarse inmediatamente después de mezclado y la inicialización del fraguado tiene lugar entre 4 y 5 horas después de su preparación. Simultáneamente podrá generarse algún calor cuyo escape deberá permitirse rociando las superficies con agua. Las formaletas no soportantes pueden ser retiradas seis horas después de efectuar el vaciado.

Después de 24 horas el secamiento puede realizarse al aire libre y la obra estará entonces en condiciones de recibir la aplicación del calor. El calentamiento inicial deberá ser lento y continuo (50 C por hora) hasta alcanzar una temperatura mínima de 500 C.

MODO DE EMPLEO



Gráfico 4.3. Mezcla del ERPLAX 40

El ERPLAX 40 se suministra en forma de pasta húmeda preparada y lista para su aplicación, de modo que puede usarse tal como viene en los recipientes en los cuales se despecha. Sin embargo, si las condiciones del trabajo lo requieren puede rociarse con agua limpia, para hacer manejable la masa, pero sin que llegue a perder la consistencia necesaria para el apisonado.

Las superficies sobre las cuales se de aplicar el producto deberán estar libres de polvo, grasas, hollín o partículas sueltas; además es conveniente humedecerlas previamente para facilitar la adherencia.

Aplique el ERPLAX en capaz de 1'' a 2'' de espesor, apisonado con un mazo o martillo para lograr una compactación uniforme; de esta manera se coloca capas sucesivas hasta obtener un espesor total de 1'' mayor que el necesario. A continuación se emparejara la superficie cortando el material sobrante con una barra o herramienta similar hasta obtener el espesor final deseado. No debe alisarse con palustre la superficie así obtenida, pues si se tapan los poros se impide que el material seque bien.

No debe aplicarse fuego antes de efectuado el secamiento completo. En reparaciones menores este proceso requiere 16 horas pero en masa cuyos espesores excedan de 4'' serán necesarios periodos de 48 horas. El calentamiento inicial deberá ser paulatino hasta alcanzar la temperatura de trabajo. Si durante el secado o calentamiento se presenta alguna formación de grietas, estas pueden resanarse con el mismo material.

4.6. PAREDES AISLANTES

La pared aislante como ya se explicó es de un material de baja conductividad térmica llamado diatomita; el cual va atacado en el espacio que queda entre las paredes refractarias secundarias y las paredes exteriores de fibrocemento; el espesor del aislamiento es de 55 mm.

4.6.1. PAREDES EXTERIORES

Son hechas de placas planas de fibrocemento, se ha utilizado este material debido a sus excelentes propiedades aislantes tanto térmicas como eléctricas; además por la facilidad de construcción que ofrecen ya que para esto basta a

utilizar herramientas manuales de carpintería; estas placas se han cortado de acuerdo a las medidas y formas correspondientes:

- Placas horizontales (superior inferior) ancho = 745 mm; longitud = 355 mm.
- Placas delanteras (delantera y posterior intermedio) ancho = 745 mm; longitud = 675 mm; además tiene un marco intermedio de 365 mm * 305 mm, el cual sirve como estructura para asentar los porta resistencias y las placas secundarias.

4.6.2. ENSAMBLAJE DEL CONJUNTO.

Una vez que se tiene los materiales con las dimensiones específicas se procede al ensamblaje del conjunto; para lo cual se construye una estructura de ángulo Dixon, para darle mayor solidez al conjunto; hecha la estructura se coloca la placa plana inferior la que contiene dos placas longitudinales del mismo material, sobre las cuales irán asentadas las placas refractarias; luego se colocan las paredes laterales, las placas del frente y la posterior intermedia que contiene el marco interior, además la exterior posterior.

Se masilla las uniones con masilla resistentes a altas temperaturas que preparada con agua adquiere una plasticidad y adherencia muy buena. Se apisona esta superficie con polvo aislante diatomita.

Se ensambla luego las paredes refractarias secundarias; colocando la pared inferior; luego las dos laterales y por último la superior; estas paredes estarán unidas entre sí por alambres de acero, para prevenir que en caso de que se desee cambiar un porta-resistencias estas paredes no tengan en que sujetarse y se viren.

Los porta resistencias se colocarán en el mismo orden junto con la pared refractaria posterior de la cámara.

Las uniones interiores de las paredes de la cámara se mancillarán con arcilla.

En los espacios que quedan entre las paredes refractarias secundarias y las paredes de fibrocemento, se apisona el polvo aislante.

Los terminales de los elementos de resistencia serán aislados con mullos cerámicos en el espacio de aislamiento que atraviesan; para luego salir a la parte posterior, donde serán conectadas en serie. Se completa el trabajo colocando la estructura superior (marco) el cual contiene la placa superior de fibrocemento.

4.6.3. PUERTA DEL HORNO

Está hecha con el mismo procedimiento utilizando para la elaboración de las paredes de la cámara; una vez fraguada y secada a 500°C en el horno, es montada sobre un marco de ángulo el cual sirve como estructura; en este marco va la cubierta de acero inoxidable de la puerta; esta puerta tiene un revestimiento aislante de lana de vidrio.

El mecanismo para abrir la puerta consiste en una barra (eje); este eje tiene dos barras soldadas que giran junto con el eje, mientras los extremos libres de la barras están unidos a la puerta en la cual pivotan por medio de articulaciones, abriendo o cerrando la puerta.

Finalmente el horno es cubierto con lámina de acero inoxidable de 1/32" .

4.7. SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL

Un control de temperatura consta esencialmente de tres partes:

- Un elemento que obra como antena captadora de las variaciones de temperatura y que inicia la regulación.

- Una transmisión continúa por un contacto que activa y desactiva el mecanismo regulador.
- El regulador propiamente dicho, que aumenta o reduce la cantidad de energía aportada al horno.

Los hornos eléctricos pequeño, permiten con relativa facilidad, regular automáticamente la temperatura.

La diferencia de temperatura suele captarse en ellos por medio de un termo – elemento, la regulación se logra por un montaje estrella – triángulo (con la combinación triángulo – estrella la potencia se reduce en un 33%) o también con un montaje que permita pasar de plena carga a vacío.

La regulación de temperatura por control de voltaje es un método más preciso.

El sistema de control más comúnmente empleado en hornos eléctricos pequeños se detallará a continuación.

- **Termocupla (Cupla Termoeléctrica).**- Está constituida por dos alambres de distinto material que unidos entre sí forman la SOLDADURA CALIENTE, ya que la misma está al contacto del calor interno de la cámara.

Esta unión siendo de materiales diferentes, produce una diferencia de potencial o fuerza electromotriz (fem) que pasa al instrumento medidor de temperatura (galvanómetro), el cual señala la temperatura interna de la cámara.

- **Galvanómetro.**- Es el instrumento medidor de temperatura, su escala está graduada en °C ó °F.

- **Regulador.-** Es el sistema que permite pasar por ejemplo, de plena carga a vacío o viceversa (abriendo o cerrando el circuito), manteniendo el nivel de temperatura constante.

4.8. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DEL HORNO

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Medición de las bases del horno. 2. Corte de las bases del horno.

Tabla 4.3. Construcción de las Bases del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corte de los ángulos y varillas para el soporte inferior de los ladrillos refractarios. 2. Soldado de los ángulos y varillas para el soporte inferior de los ladrillos refractarios. 3. Armado del soporte inferior de los ladrillos.

Tabla 4.4. Construcción del Soporte Inferior de los Ladrillos

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corte de los ángulos y varillas para la armadura del horno. 2. Soldado de los ángulos y varillas para la armadura del horno. 3. Armado de la armadura del horno.

Tabla 4.5. Construcción de la Armadura del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Suelda de las bases para los ladrillos con la armadura del horno. 2. Prueba de colocación de los ladrillos en la base del horno.

Tabla 4.6. Prueba Para la colocación de los Ladrillos en la Base

INDICACIONES GENERALES PARA EL PEGADO DE LOS LADRILLOS:

En la construcción de mamposterías las siguientes informaciones son de utilidad:

1. Las juntas horizontales y verticales entre ladrillos deberán ser mínimas y en ningún caso exceder de tres milímetros.
2. La cantidad de mortero necesaria para pegar 1000 ladrillos rectos de 9" * 4 1/2" * 2 1/2" con los morteros secos de fraguado térmico es aproximadamente de 200 kilos si se aplica con palustre, y 150 kilos si se usa el sistema de inmersión.


GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none">1. Use un recipiente limpio.2. Utilice agua limpia, Las instrucciones impresas en el saco indican la cantidad de agua que debe añadirse al cemento.3. Agregue el cemento seco agua, y mezcle hasta que se obtenga una consistencia uniforme y libre de grumos.4. Si el trabajo lo requiere, puede prepararse con anticipación el cemento necesario. Este puede usarse hasta 12 horas después.

Tabla 4.7. Elaboración de la Mezcla del Cemento Refractario

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Colocación del cemento refractario en la base del horno. 2. Pegado de los ladrillos en la base del horno.

Tabla 4.8. Ensamblado de la Base del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Colocación del cemento refractario en las columnas del horno. 2. Pegado de los ladrillos para la construcción de las paredes del horno.

Tabla 4.9. Ensamblado de las Paredes del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eliminación de los excesos de cemento en la parte exterior de las paredes del horno

Tabla 4.10. Verificación de Detalles en el Exterior de las Paredes del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Unión de las 4 paredes del horno entre sí y con el piso. 2. Secado del cemento junto con los ladrillos refractarios.

Tabla 4.11. Ensamblado de la Cámara del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Eliminación de los excesos de cemento en la parte interior de las paredes del horno</p>

Tabla 4.12. Verificación de Detalles en el Interior de las Paredes del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Selección de las resistencias eléctricas utilizadas como elemento de calentamiento del horno DUNCAN KE234</p>

Tabla 4.13. Selección de los Elementos de Calentamiento


GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Medición de las paredes del horno para ubicar correctamente las guías para la colocación de las resistencias eléctricas. 2. Elaboración de las guías para la colocación de las resistencias eléctricas.

Tabla 4.14. Elaboración de las Guías de las Resistencias Eléctricas


GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prueba para la colocación de las resistencias eléctricas en las paredes del horno.

Tabla 4.15. Prueba Para la Colocación de las Resistencias Eléctricas


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Colocación de las resistencias eléctricas en las paredes del horno.</p>

Tabla 4.16. Colocación de las Resistencias Eléctricas en las Paredes del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>3. Verificación de la colocación y ubicación de las resistencias eléctricas en las paredes del horno.</p>

Tabla 4.17. Verificación de la Colocación y Ubicación de las Resistencias Eléctricas en las Paredes del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corte de los ángulos y varillas para la armadura del techo del horno. 2. Soldado de los ángulos y varillas para la armadura del techo del horno.

Tabla 4.18. Construcción de la Estructura Metálica del Techo del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prueba de colocación de los ladrillos en la estructura del techo del horno.

Tabla 4.19. Prueba de Colocación de los Ladrillos en la Estructura del Techo del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pegado de los ladrillos para el techo del horno. 2. Construcción de las guías para los soportes metálicos del techo del horno

Tabla 4.20. Construcción Total del Techo del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Colocación de los soportes metálicos en el techo del horno

Tabla 4.21. Colocación de los Soportes Metálicos en el Techo del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Colocación del techo armado del horno sobre las paredes. 2. Pegado del techo del horno a las paredes del horno.

Tabla 4.22. Montaje del Techo del Horno a las Paredes

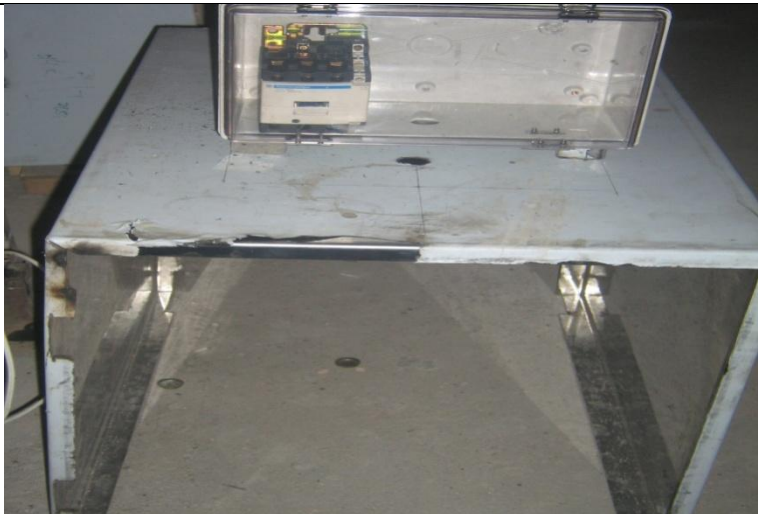
GRÁFICO	PROCESO
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Selección de la ubicación de los elementos de control y su ubicación.

Tabla 4.23. Ubicación de los Elementos de Control en el Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Construcción de la caja metálica para la colocación de los elementos de los elementos de control.</p>

Tabla 4.24. Construcción de la Caja de Protección de los Elementos de Control


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Colocación de los elementos de control en la caja metálica destinada para ello.</p>

Tabla 4.25. Colocación de la Caja de los Elementos de Control

GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Construcción de la estructura de la puerta del horno.</p>

Tabla 4.26. Construcción de la Estructura de la Puerta del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Prueba de colocación de los ladrillos en la estructura de la puerta del horno.</p>

Tabla 4.27. Prueba Para la Colocación de los Ladrillos en la Estructura de la Puerta del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Pegado de los ladrillos refractarios con la estructura de la puerta del horno.</p>

Tabla 4.28. Construcción de la Puerta del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Montaje de la puerta a la estructura del horno.</p>

Tabla 4.29. Montaje de la Puerta a la Estructura del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Construcción de los seguros de la puerta del horno (perno mariposa).</p>

Tabla 4.30. Construcción de los Seguros de la Puerta del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Medición y corte de la de fibra de cerámica.</p>

Tabla 4.31. Medición y Corte de la Fibra de Cerámica


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Colocación del recubrimiento de fibra cerámica para la disipación de calor.</p>

Tabla 4.32. Colocación del Recubrimiento de Fibra de Cerámica


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Colocación del cableado de los elementos de control.</p>

Tabla 4.33. Elaboración de las Instalaciones Eléctricas del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Colocación de sellos en las cavidades del horno.</p>

Tabla 4.34. Colocación de Sellos en las Cavidades del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Eliminación del exceso de cemento refractario en las cavidades del horno.</p>

Tabla 4.35. Verificación de Detalles de Sellos en las Cavidades del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Instalación de la termocupla en el interior de la cámara del horno.</p>

Tabla 4.36. Instalación de la Termocupla en la Cámara del Horno

GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Verificación de la ubicación de la termocupla en la cámara del horno.</p>

Tabla 4.37. Verificación de la Ubicación de la Termocupla


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Recubrimiento de la termocupla con fibra de cerámica.</p>

Tabla 4.38. Recubrimiento de la Termocupla con Fibra de Cerámica

GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Medición de la lámina de acero inoxidable para corte del recubrimiento del horno. 2. Corte de la lámina de acero inoxidable según las medidas del horno.</p>

Tabla 4.39. Medición y Corte de la Lámina de Acero Inoxidable

GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Recubrimiento de dos paredes del horno con la lámina de acero inoxidable.</p>

4.40. Recubrimiento de Dos Paredes del Horno con la Lámina de Acero Inoxidable


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Colocación del recubrimiento de acero inoxidable en el horno.</p>

Tabla 4.41. Recubrimiento Total del horno con el Acero Inoxidable


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Soldadura de la parte posterior del horno.</p>

Tabla 4.42. Soldadura de la Parte Posterior del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	<p>1. Verificación de que todas las cavidades del horno estén selladas.</p>

Tabla 4.43. Verificación del Sellado de las Cavidades del Horno


GRÁFICO	PROCESO
	1. Puesta a punto del horno.

Tabla 4.44. Puesta a Punto de los Detalles del Horno

CONCLUSIONES:

- Con los datos experimentales tomados en las pruebas y que corresponden al tiempo, temperatura, voltaje y los respectivos valores de potencia del horno, se pueden sacar las siguientes conclusiones al comparar con los resultados de potencia y rendimiento térmico neto de operación obtenidos en los cálculos numéricos
- Los datos experimentales satisfactorios obtenidos durante las pruebas de funcionamiento, han demostrado que es factible diseñar, construir e implementar hornos de resistencias eléctricas para tratamientos térmicos de buena calidad.
- Las excelentes características de la masa cerámica utilizada en la elaboración de las placas calefactoras, se ha comprobado durante las pruebas de funcionamiento, ya que las placas soportan altas temperaturas, sin que existan fisuras debido a la dilatación y al choque térmico.
- La distribución apropiada de los elementos de resistencia en la superficie de las placas, ha dado lugar a que se tenga una distribución uniforme de calor en el interior de la cámara de calefacción, requisito indispensable para el mejoramiento de la calidad de las piezas sometidas a tratamiento térmico.
- Todos los elementos constituyentes del horno de resistencias eléctricas; refractario, aislante, fibrocéramica, elementos de resistencia y elementos de control, soportan la temperatura de 1000°C en el interior de la cámara, demostrando que su selección se realizó de acuerdo a las normas que exige un buen diseño.
- La potencia máxima con una carga de 6,82Kg de acero alcanzada durante las pruebas, es de 4263Watts; mientras que la potencia máxima calculada es de 5500Watts; no se ha llegado a ésta potencia ya que el voltaje máximo de la red es de 200V
- El rendimiento térmico neto de operación es la relación entre el peso de la carga [Kg] y los Kw-h consumidos por el sistema; éste rendimiento es:
$$N_{to} = \frac{6,82Kg}{4,263Kg - h} = 1,62 \frac{Kg}{Kw - h}$$
Éste rendimiento es mayor que el calculado, pudiendo alcanzarse un rendimiento mayor con una carga más elevada, para aprovechar la capacidad del horno, es decir su potencia.
- El rendimiento térmico de convección es la relación entre el calor suministrado a la carga y el calor suministrado por el sistema, teniendo que el calor absorbido por la carga es $1897,3 \frac{Kcal}{h} = 2106,5Watts$ y el calor suministrado por el sistema es 4263Watts; entonces:

$N_{tc} = \frac{2106,5}{4263} = 0,49 \approx 50\%$. Éste rendimiento es mayor que el calculado, pudiendo incrementarse al tener una carga de mayor peso.

RECOMENDACIONES:

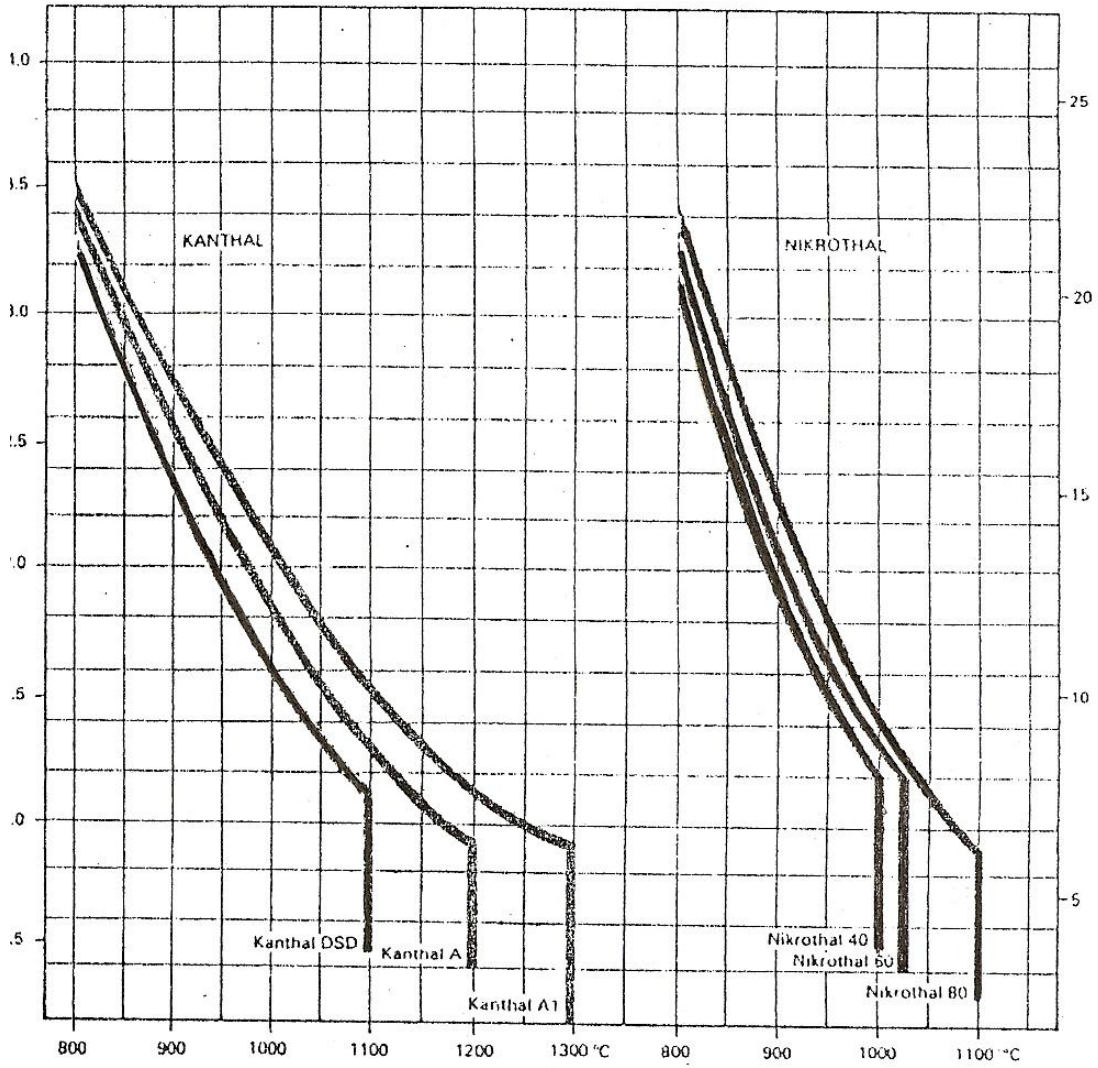
- Es necesario el diseño y selección de los elementos de control de temperatura, que sólo así se habrá desarrollado una técnica propia en el diseño y construcción del horno de resistencias eléctricas, incluido su control de temperatura.
- La elaboración de las placas calefactoras debe hacerse considerando otros tipos de masas cerámicas en su composición y tamaño de grano, para determinar la masa cerámica que da mejores resultados.
- Es necesario aumentar el espesor de la carga de aislamiento térmico tanto en las paredes como en la puerta en 2cm – 3cm, con el objeto de disminuir las pérdidas de calor.
- El prensado y compactación de la masa junto con los elementos de resistencia para formar las placas de calentamiento, debe realizarse a presiones más elevadas $400 \frac{Kg}{cm^2}$, para aumentar la resistencia metálica de las placas.
- Las placas luego de secadas, deben ser cocidas por la misma energía calorífica proveniente de los elementos, con el fin de eliminar la humedad.
- La diatomita aislante debe ser también sometida a un proceso de pre-secado, ya que la humedad contenida retrasa considerablemente el tiempo de calentamiento de la cámara.
- Los terminales de los elementos de resistencia deben ser unidos entre sí (serie) con cable rígido N° 10 AWG x 4 ya que éste cable tiene capacidad de conducir hasta 30A nominales y bien unidos a los conectores, para evitar sobre calentamiento fusión de los conectores que deben ser preferiblemente de material cerámico.
- Se debe tratar de conseguir que el voltaje a los terminales del horno sea 220V, tal que las condiciones de funcionamiento sean idénticas a las del diseño.

BIBLIOGRAFÍA:

- BARRAU M., Hornos Eléctricos, Síntesis, Barcelona, 1960.
- Catálogo ETERNIT, Placa Plana Quito, 1984.
- Catálogo Aceros, ASSAB SKF.
- CHAPMAN A., Transmisión de Calor, Madrid, Interciencia, 1965.
- ERECOS, Catálogo de Ladrillos Refractarios, Bogotá, 1998.
- GILDRICHS A., Metalurgical Furnaces, 2^{da} Edición, Continental S.A., México, 1976.
- HOLMAN S., Transferencia de Calor, 4^{ta} Edición, Toshoprinting Co, Tokyo, 1976.
- KNOWLTON A., Manual Estándar del Ingeniero Electricista, 3^{ra} Edición, Labor S.A., México, 1965.
- MARKS L., Manual del Ingeniero Mecánico, Uthea, México, 1979.
- ADAMS Mc W., Transferencia de Calor, 3^{ra} Edición, Toshoprinting Co, Tokyo, 1965.
- NORTON H., Refractarios, Blume, Barcelona, 1972.
- MIJEEV M.A., Fundamentos de Termo Transferencia, Mir, Moscú, 1979.
- VASTRA AROS TRYCHERI, The Kanthal Handbook, Sweeden, Resistance Alloys, 1980.
- TRINKS W., Hornos Industriales, 5^{ta} Edición, Urmo, Bilbao, 1971.
- WAGANOFF P., Hornos Industriales, 3^{ra} Edición, Mir, Moscú, 1980.

W/cm²

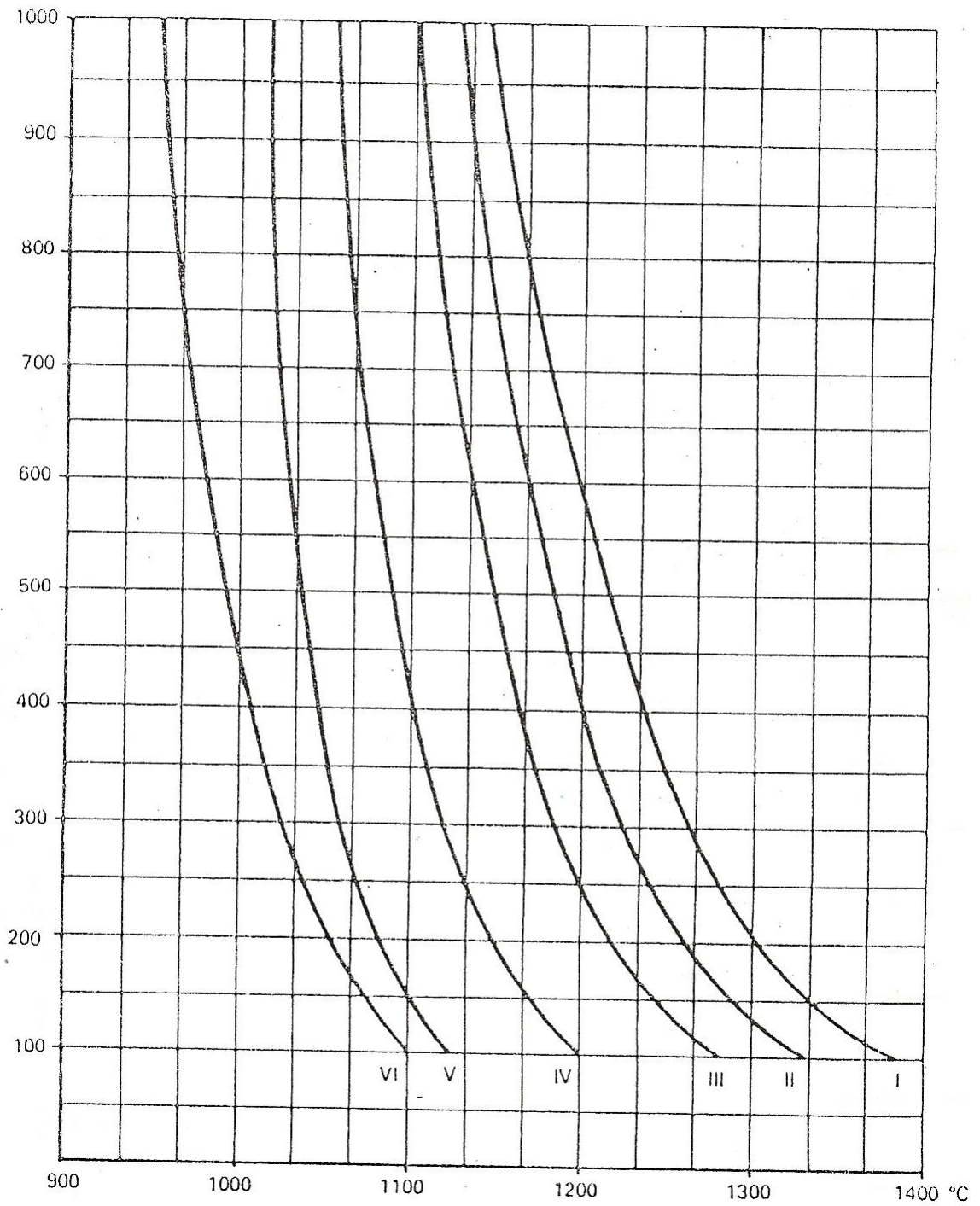
W/sq. in.



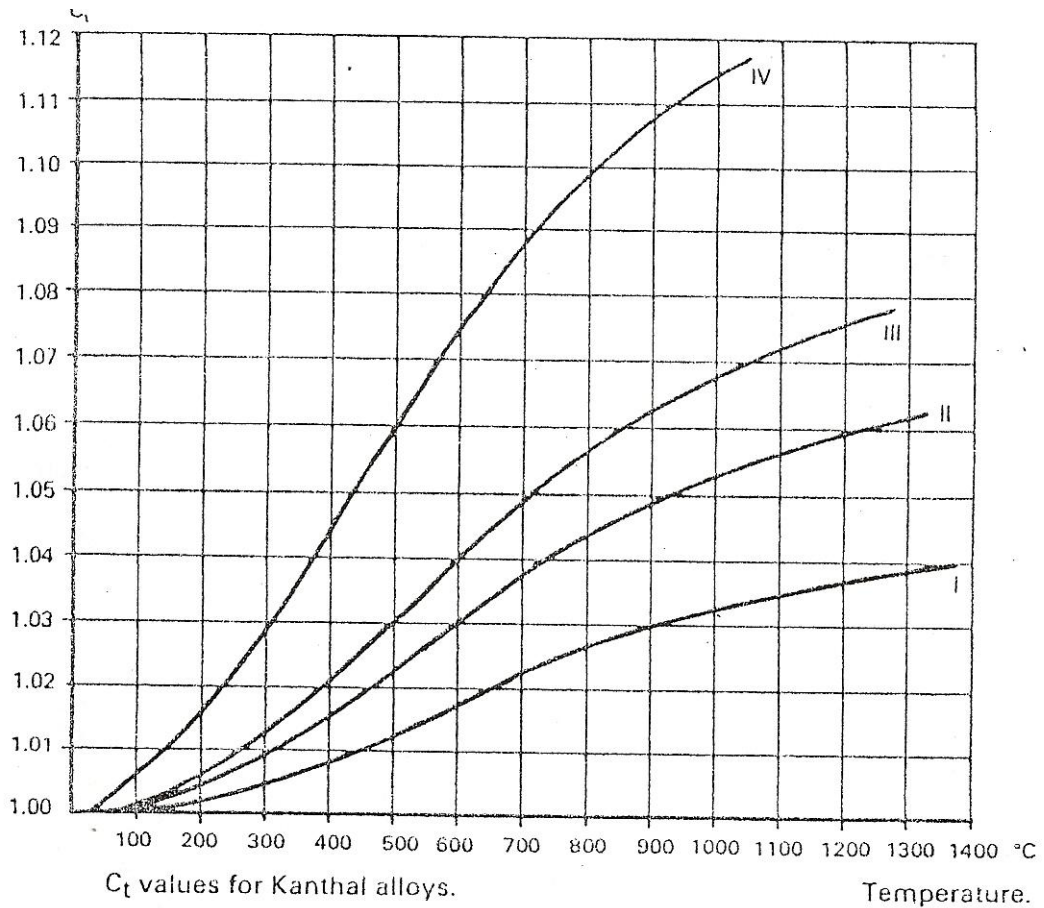
ALEACIÓN	FORMA	TEMPERATURA DEL HORNO °C					
		800	900	1000	1100	1200	1300
Kanthal A - 1	Tira			2.0	1.4	1.1	0.9
	Alambre			1.8	1.3	1.0	0.8
Kanthal A	Alambre		2.3	1.5	1.0	0.8	
Kanthal DSD	Tira	3.5	2.2	1.5	1.0		
	Alambre	3.5	2.1	1.3	0.9		
Nikrothal 80	Tira	3.5	2.0	1.3	0.9		
	Alambre	3.5	2.0	1.2	0.8		
Nikrothal 60	Tira	3.5	2.0	1.3			
	Alambre	3.5	1.8	1.0			
Nikrothal 40	Tira	3.5	2.0	1.2			
	Alambre	3.5	1.8	1.0			

Anexo 1. Carga Específica de Superficie de los Elementos de Resistencia
KANTHAL (P = Watt/cm²)

Lifetime index.

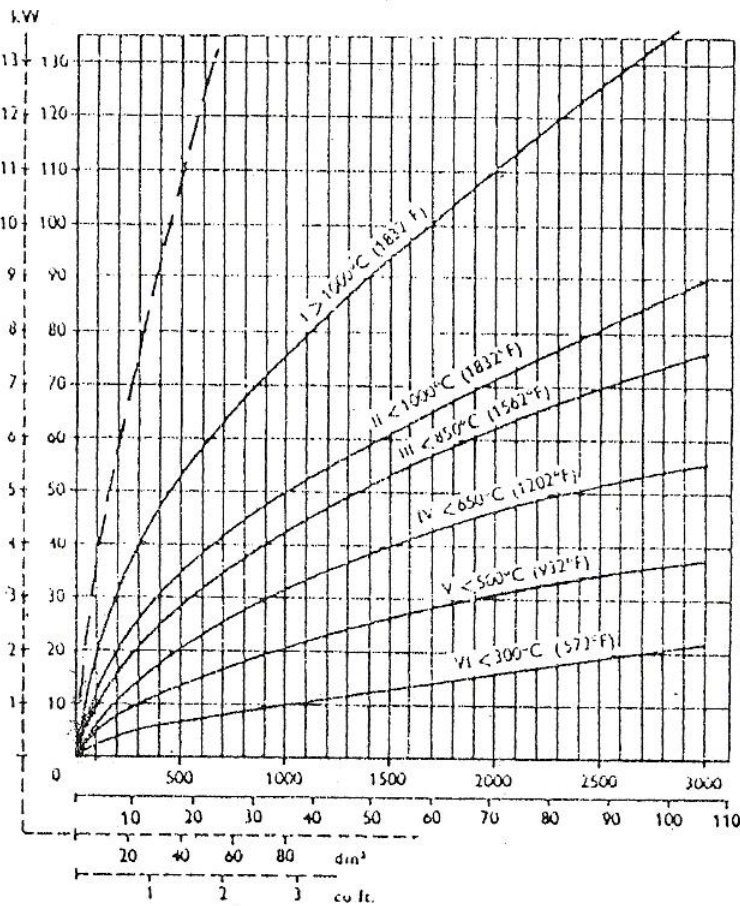
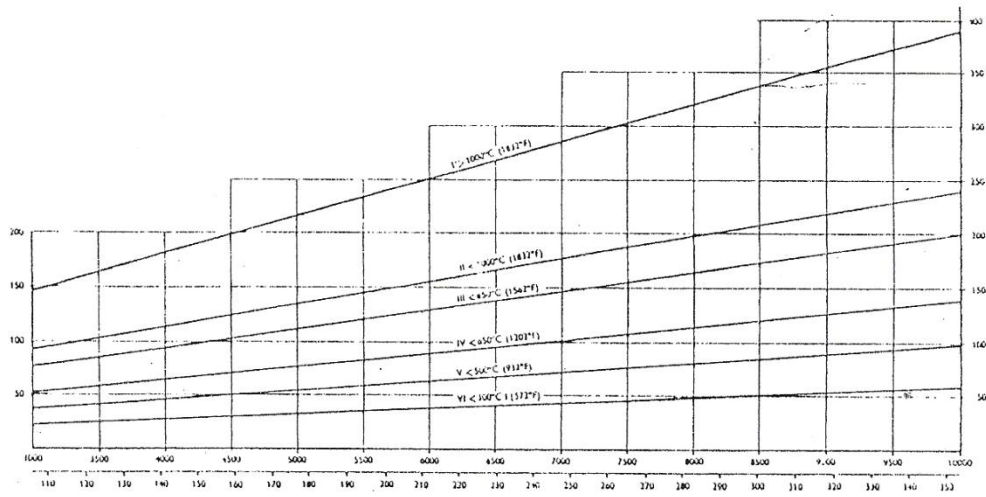


Anexo 2. Tiempo de Duración de los Elementos en Función de la Temperatura de Servicio



Grado	Diámetro (mm)			
	0.15 - 0.4	0.41 - 0.95	1.0 - 3.0	> 3.0
	°C	°C	°C	°C
Kanthal A - 1			1225 - 1350	1375
Kanthal A	925 - 1050	1050 - 1175	1175 - 1300	1330
Kanthal DSD	925 - 1025	1025 - 1100	1100 - 1200	1280
Alkrothal	900 - 950	950 - 1000	1000 - 1050	1050
Nikrothal 80	925 - 1000	1000 - 1075	1075 - 1150	1200
Nikrothal 60	900 - 950	950 - 1000	1000 - 1075	1125
Nikrothal 40	900 - 950	950 - 1000	1000 - 1050	1100
Nikrothal 20			975 - 1025	1050

Anexo 3. Coeficiente de Temperatura Ct



Anexo 4. Volumen (dm³) en Función de Potencia (Kw) y Temperatura (°C) de los Hornos

Latacunga, 6 de Enero del 2009

LOS AUTORES

LÓPEZ PROAÑO JUAN PABLO

SÁNCHEZ JARAMILLO JUAN PABLO

EL DIRECTOR DE CARRERA

ING. JUAN CASTRO

UNIDAD DE ADMISIÓN Y REGISTRTO

DR. RODRIGO VACA