



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

42
Rejón

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
CAMPUS ARAGÓN

METODOLOGIA PARA EL CALCULO DE ESPESORES DE
MATERIALES REFRACTARIOS AISLANTES EN
CALENTADORES A FUEGO DIRECTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO MECANICO
ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

FEDERICO GARCIA RODRIGUEZ

A camparado de un disco de 3 1/2

ASESOR : ING. ARQUIMEDES SOLIS TELLEZ

*No entregó disco el
alumno*

MÉXICO

1997. ✓

26/02/98

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS:

A MIS PADRES:

DELFINO Y AGUEDA

Por ver en ellos la unidad y el cariño que se pregonan, el cual se refleja en cada uno de sus hijos, ha sido una motivación que me ayudado a cumplir con esta meta, además por haberme inculcado el hábito de superación y darme un ejemplo de constancia por eso y más, les vivo eternamente agradecido.

A MIS HERMANOS:

CESAR, DAVID, CLAUDIA, MAGDALENA, GASTON, NATALIA.

Agradezco su gran apoyo y ayuda desinteresada, que este gran logro sea también el de ustedes.

A MI NOVIA:

GRACIELA MONTALVO

Por significar mucho en vida motivandome día a día y estar conmigo en los momentos más difíciles; más que una dedicatona quiero compartir contigo esta gran meta.

A MIS AMIGOS:

ANTONIO SOSA, RAUL CANO, DANIEL PEÑA, ALEJANDRO HUERTA, MIGUEL, EMMA.

Por recibir valiosos consejos y compartir conmigo grandes momentos de mi vida que me han ayudado a formarme como persona.

A MI ASESOR DE LA E.N.E.P.

ING. ARQUIMEDES SOLIS TELLES

Por la dedicación y asesoría en el presente trabajo.

A LA E.N.E.P. "ARAGON" Y SUS MAESTROS POR CRISTALIZAR UNO DE MIS MAYORES OBJETIVOS.

AL INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO POR SU NOBLE TAREA DE CONTRIBUIR EN LA FORMACIÓN DE ESPECIALISTAS Y EN ESPECIAL POR DARMÉ LA OPORTUNIDAD DE DESARROLLARME PROFESIONALMENTE Y BRINDARME EL APOYO EN LA REALIZACIÓN DE LA TESIS

La realización de este trabajo es producto de la gran cooperación de compañeros del Departamento de Diseño Mecánico Estructural de Equipo de Combustión del Instituto Mexicano del Petróleo, sinceramente gracias a:

ING. HERMENEGILDO ROJAS CHAVEZ:

Por su gran cooperación en la elaboración de este trabajo, ha sido una puerta abierta al conocimiento.

Al Titular del Departamento de Diseño Mecánico de Equipo de Combustión:

ING. JORGE MEZA PORTILLO:

Por ser una guía y contribuir en la realización de este trabajo de tesis.

DIRECTOR DE TESIS:

ING. TEODORO ALLENDE RIVERO

Por brindarme el apoyo y su dedicación haciendo posible este trabajo.

A todos los que contribuyeron en la realización del presente

MIL GRACIAS.

FEDERICO GARCIA

**METODOLOGIA PARA EL CALCULO DE ESPESORES DE
MATERIALES REFRACTARIOS AISLANTES
EN CALENTADORES A FUEGO DIRECTO**

INDICE

INTRODUCCIÓN

PAG.

CAPITULO I.

GENERALIDADES

1.1. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	1
1.1.2. RADIACIÓN.....	1
1.1.3. CONDUCCIÓN.....	2
1.1.3. CONVECCIÓN.....	5
1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS CALENTADORES A FUEGO DIRECTO.....	8
1.2.3. CLASIFICACIÓN.....	10
1.2.4. COMPONENTES.....	16
1.3. ZONAS TÉRMICAS DE UN CALENTADOR A FUEGO DIRECTO.....	19
1.3.1. ZONA DE RADIACIÓN.....	19
1.3.2. ZONA ESCUDO.....	20
1.3.3. ZONA DE CONVECCIÓN.....	20
1.4 FACTORES DESTRUCTIVOS DE SERVICIO.....	21

CAPITULO II.

CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES REFRACTARIOS AISLANTES

2.1. COMPOSICIÓN.....	27
2.1.2. MATERIALES BÁSICOS PARA REFRACTARIOS	
2.1.3. MATERIALES DE ALTO CONTENIDO DE ALUMINIO	
2.1.4. MATERIALES DE SÍLICE	
2.2. FABRICACIÓN.....	32
2.3. PROPIEDADES.....	35
2.3.4. PRUEBAS DE INSPECCIÓN.....	41
2.4. CLASIFICACIÓN.....	43
2.4.1. DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	43
2.4.2. DE ACUERDO A SU USO.....	45
2.5. FACTORES PARA LA SELECCIÓN.....	51

CAPITULO III.

CÁLCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO

3.1. GUÍA DE SELECCIÓN DE ESPESORES.....	53
3.2. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CALOR SEGÚN A.S.T.M.....	66
3.1.2. EJEMPLO 1 PAREDES CON DOS COMPONENTES.....	74
3.1.3. EJEMPLO 2 PAREDES CON TRES COMPONENTES.....	77

CAPITULO IV.

ANÁLISIS TEÓRICO DE CÁLCULO DEL ESPESOR ECONÓMICO

4.1. CONCEPTO DE ESPESOR ECONÓMICO.....	81
4.2. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR ECONÓMICO.....	83
4.3. ANÁLISIS DE COSTOS.....	85
4.2.4 COSTOS FIJOS DEL AISLANTE.....	85
4.2.5 COSTOS DE OPERACIÓN.....	91
4.6. AHORRO DE ENERGIA.....	92

CAPITULO V.

EJEMPLO DE APLICACIÓN

5.1. CRITERIOS DE INSTALACIÓN DE RECUBRIMIENTO REFRACTARIO.....	93
5.2. CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO.....	97
5.3. CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CALOR.....	99
5.2.4. SELECCIÓN DE MATERIALES Y ESPESORES.....	100
5.2.5. CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CALOR EN DIFERENTES ZONAS.....	102
5.4. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	110
5.5. PROGRAMA DE CÓMPUTO DEL ESPESOR ECONÓMICO.....	114
5.6. PROGRAMA BASE DE DATOS DE PROPIEDADES DE REFRACTARIOS.....	119

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCIÓN

Los calentadores a fuego directo son equipos que se componen de un conjunto de dispositivos en los cuales se libera calor dentro de una cámara aislada y éste es transferido al fluido que esta contenido dentro de un serpentín tubular. Su principal función es producir el calentamiento del fluido de proceso hasta alcanzar temperaturas elevadas en los productos derivados del petróleo con el combustible suficiente; Este último representa el insumo principal en los procesos de transformación de la energía, por lo tanto es necesario su máximo rendimiento en condiciones de eficiencia de operación óptimas de ahí que los materiales refractarios aislantes ocupen un lugar de suma importancia para tal propósito.

La conservación de la energía y su óptimo aprovechamiento han sido un problema a solucionar, por lo que nuevos desarrollos tecnológicos en el uso de materiales refractarios aislantes es vital en un proceso donde existe transferencia de calor, tal como aquellos encontrados en la industria de los hidrocarburos.

El planteamiento de cálculo de la pérdida de calor sugerido por American Society For Testing and Materials; conlleva a efectuar por separado los cálculos de la pérdida de calor (conducción, convección y radiación), e interactuar con las temperaturas supuestas, hasta encontrar las condiciones óptimas de diseño de ahí se parte para el recomendar el espesor de aislamiento.

Es indispensable conocer las propiedades mecánicas y térmicas de diferentes tipos de materiales refractarios que cumpla con las normas y especificaciones aplicables; además, los requerimientos necesarios de calidad que se necesitan para la selección adecuada.

En tiempos actuales, es de suma importancia el aspecto económico es por eso que se efectúa un análisis de costos, en el cuál se ve involucrado el espesor de aislamiento y la pérdida de calor a través de éste, de ahí partiremos para determinar el espesor económico; así podremos contribuir para el ahorro de energéticos.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El estudio de la transferencia de calor ha sido primordial en la industria de la transformación para un mayor ahorro y mejor aprovechamiento de cualquier energético utilizado; de ahí la necesidad de entender los mecanismos que la gobiernan.

1.1.1. RADIACIÓN: El término de radiación generalmente aplicado a todas las clases de fenómenos de ondas electromagnéticas, pero en transferencia de calor únicamente son de interés los fenómenos que son resultado de la temperatura, a través de estos se establece un transporte de energía a un medio transparente o el espacio. La radiación térmica ocupa sólo una pequeña sección del espectro electromagnético en el intervalo de longitudes de onda de 0.1- 100 nanómetros, este incluye todas las longitudes de onda del espectro visible, así como regiones del infrarrojo y ultravioleta.

"Cuando la radiación incide sobre un cuerpo es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y parcialmente transmitida, pero en la mayoría de los materiales sólidos que se encuentran en la práctica, absorben prácticamente toda la radiación en una capa superficial muy delgada, los materiales como el vidrio y otros cristales inorgánicos son los únicos materiales que tienen cierto grado de transparencia a la radiación de ciertas longitudes de onda" ¹.

¹ PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, kreith frank herrero hermanos, sucesores, México 1970, pag. 213, 214.

Las ecuaciones básicas de transferencia de energía radiante se basan en la ley de Stefan - Boltzman para la radiación del llamado cuerpo negro y la razón a la que emite energía radiante está dada por:

$$q = A\sigma T^4 \dots\dots\dots \text{ec. 1.1}$$

donde:

q= Calor: Kcal/hr, (Btu/hr)

A= Area: m², (ft²)

T= Temperatura absoluta: °C, (°R, °K)

σ= Constante de Stefan- Boltzman = [(0.1713)(10⁻⁸)] [(Btu) / (ft²· h· °R⁴)]

1.1.2. CONDUCCIÓN: Si existen gradientes de temperatura dentro de un cuerpo sólido, el flujo de calor se transferirá desde las regiones de mayor temperatura a las de menor temperatura; La energía térmica puede transferirse a través de electrones que poseen libertad de movimiento a lo largo de la estructura reticular del material, además o alternativamente puede transferirse como energía vibracional.

$$q = K [\text{Temperatura inicial} - \text{Temperatura final}] / e \dots\dots\dots \text{ec. 1.2}$$

donde:

K= Constante de conductividad térmica: Kcal/(mhr°C), BTU/(PIE hr °F).

e = espesor de aislamiento: m, ft.

Es importante conocer el comportamiento tanto térmico como electrónico de diferentes tipos de materiales sólidos que aparte de su composición química se distinguen por su proceso de conducción como se describen a continuación en conductor, semiconductor y aislante:

a) CONDUCTOR:

La conductividad térmica dependerá de los defectos de la red, la microestructura y el procesamiento del material; Las contribuciones electrónicas son el factor dominante en la conducción de la energía térmica en los metales y aleaciones.

Los niveles de energía en un conductor (metal) están muy próximos entre sí, los electrones pueden cambiar de estado con mucha facilidad a temperaturas bajas, la mayoría de los electrones ocupan la banda de valencia.

b) SEMICONDUCTOR:

El calor es conducido en los semiconductores tanto por los fonones como los electrones. A bajas temperaturas, los fonones son los principales portadores de energía, pero en temperaturas altas los electrones son excitados a través de la pequeña banda de energía de separación hacia la banda de conducción y la conductividad térmica se incrementa.

"Los semiconductores son una clase de materiales tecnológicamente importantes, con densidades de portadores de carga intermedias entre la de aisladores y la de conductores. En un semiconductor, la banda de valencia por lo general está llena de electrones, y la de conducción de energía más alta comparada con la del aislante. Al aumentar la temperatura, algunos electrones saltan debido a la excitación térmica, y el sólido se vuelve parcialmente conductor, en el cuál los electrones adquieren energía de vibración suficiente como para romper su estructura de enlace covalente y moverse en forma independiente a través del cristal"².

c) AISLANTE:

Las vibraciones en la red, o los fonones, son responsables de la transferencia del calor en los materiales aislantes y cerámicos, estos son el compuesto estructural de los materiales refractarios, la banda de energía de separación es demasiado grande para que muchos de los electrones sean excitados hacia la banda de conducción, excepto a muy altas temperaturas. Normalmente las cerámicas tienen conductividades térmicas mayores en temperaturas altas debido a los fonones(ondas elásticas que transfieren energía a través de un material) de mayor energía y algunas contribuciones electrónicas.

FUENTE: LA CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES, ASKELAND DONALD R., PAG. 465, 469
² FISICA, SERWAY R. A., MCGRAW-HILL INTERAMERICANA DE MEXICO 1990, PAG. 532, e 534

El proceso de conducción se muestra con más detalle en la figura 1.1, en la cuál se diferencia la proximidad de la banda de valencia con la banda de conducción de un material conductor, semiconductor, aislante.

La figura 1.1 " muestran las bandas de energía de material conductor, semiconductor y aislante"²:

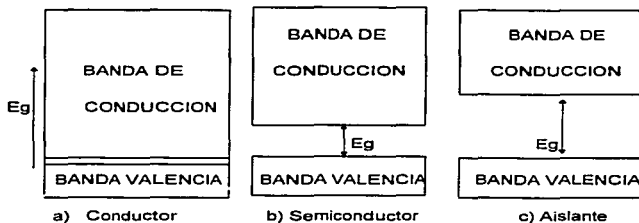


FIG. 1.1 PROCESO DE CONDUCCIÓN (BANDAS DE ENERGIA) EN SÓLIDOS

² FÍSICA. SERWAY R. A.
MCGRAW-HILL INTERAMERICANA DE MEXICO 1990. PAG. 532 - 534

1.1.3. CONVECCIÓN: Es el intercambio de energía efectuado por el movimiento de un fluido donde transfiere calor hacia un sólido. El coeficiente de transferencia de calor "h" es la propiedad del fluido involucrado en el proceso de convección que depende de la geometría del sistema de convección, de la dinámica del flujo y de las condiciones térmicas prevalecientes. La ecuación que nos describe el fenómeno convectivo es:

$$q = hA(\text{Temperatura superficie} - \text{Temperatura fluido}), \dots \text{ec. 1.3}$$

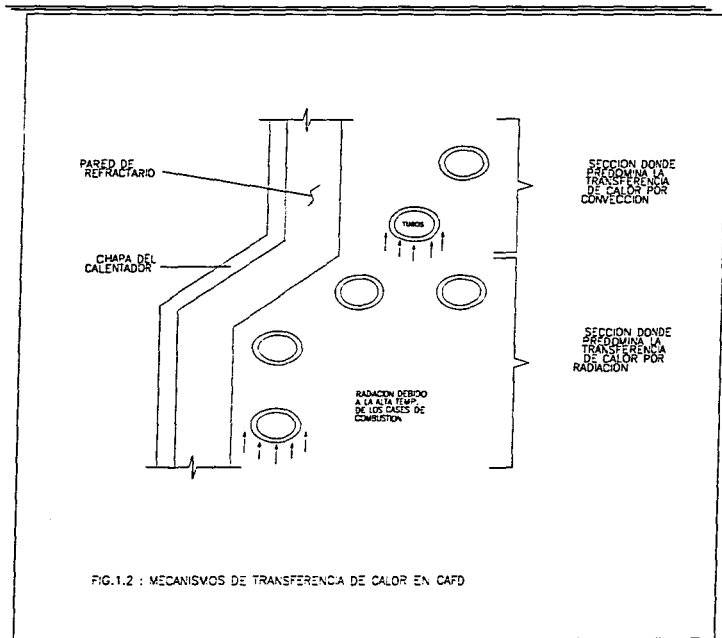
h= coeficiente convectivo: Kcal/(m² hr °C), BTU/(pie² hr °F)

A= Area (m²), (ft²)

La convección puede ser forzada, cuando un agente externo tal como un ventilador o bomba origina el movimiento de un fluido a través de la superficie; y la convección libre se origina por los cambios de densidad en el fluido a consecuencia del intercambio de energía provocando una circulación natural del fluido.

La ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor. Los mecanismos de transferencia de calor son conjuntamente analizados para resolver situaciones reales en problemas de ingeniería, generalmente se realiza el análisis de flujo de calor en paredes compuestas de materiales diversos colocados en serie, tales como en la construcción de recubrimiento en un horno.

GENERALIDADES



1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS CALENTADORES A FUEGO DIRECTO

Un Calentador A Fuego Directo (CAFD) es un equipo de transferencia de calor cuya función es calentar el fluido de proceso que circula por su interior de los tubos, hasta que éste alcance la temperatura requerida para su posterior alimentación a equipos adyacentes de Refinación y/o Petroquímica.

La estructura de los CAFD está concebida como una envolvente metálica de forma cilíndrica o tipo caja rectangular, en cuyo interior se encuentra dispuesto el serpentín de tubos por el que circula el fluido; también se encuentra alojado el sistema de soportería, los materiales refractarios aislantes así como en algunas ocasiones parte del sistema de limpieza.

El término de Calentadores a Fuego Directo se deriva de que parte del serpentín se encuentra localizado en la zona donde se genera la flama, y la mayor parte del calor se transfiere por radiación.

GENERALIDADES

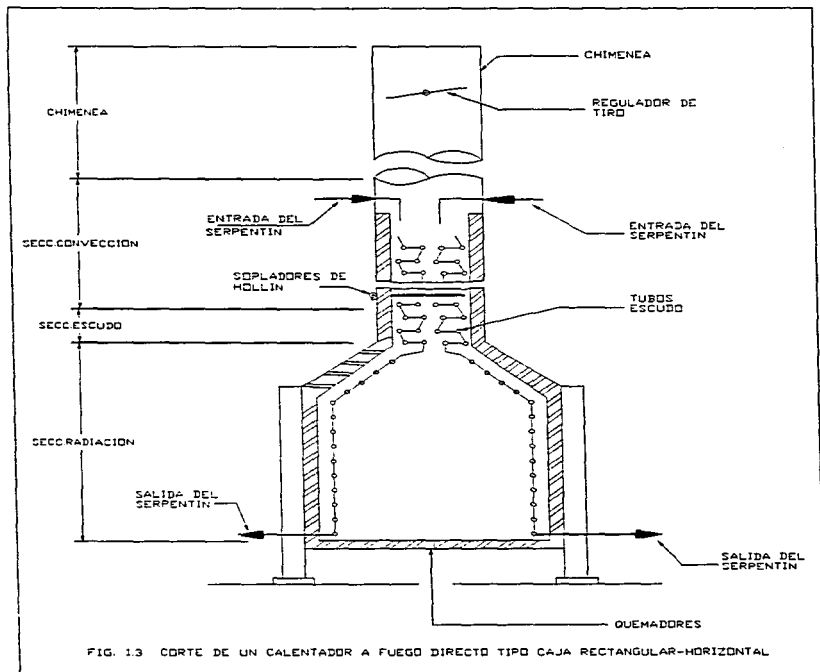


FIG. 1.3 CORTE DE UN CALENTADOR A FUEGO DIRECTO TIPO CAJA RECTANGULAR-HORIZONTAL

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS CALENTADORES A FUEGO DIRECTO

Un calentador incluye un número de dispositivos en los cuales se libera calor por el quemado de algún combustible fósil dentro de un cámara aislada y éste es transferido a un fluido que está contenido dentro de un serpentín tubular. En un calentador a fuego directo los tubos del serpentín están colocados a lo largo de las paredes y el techo de la cámara de combustión, es allí donde ocurre la transferencia de calor por radiación principalmente; estos equipos se conocen como calentadores de proceso, hornos de proceso, y calentadores a fuego directo, los cuales son intercambiadores de calor.

El tamaño del calentador es definido en función de sus condiciones de diseño como es la capacidad de absorción de calor. Este rango va de 150 KW (500 KBTU/hr) que son los más pequeños, hasta unidades gigantescas de 150 MW (500 MBTU/hr) para hornos reformadores o para generación de vapor. La mayoría de los calentadores que se utilizan en la actualidad caen dentro del rango de 3 a 105 MW (10.2 a 358 MBTU/hr.) de capacidad de absorción de calor.

De acuerdo a su servicio, los calentadores se clasifican principalmente en seis categorías que a continuación se mencionan:

- a). Rehervidor de columna.
- b). Precalentador fraccionador de alimentación.
- c). Precalentador reactor de alimentación.
- d). Calentador abastecedor de transferencia media.
- e). Calentador reductor de viscosidad.
- f). Reactor.

GENERALIDADES

Existen muchas variantes en el diseño, disposición y detalles de construcción de los CAFD. Esto es debido a que virtualmente cada calentador es diseñado para una aplicación particular. Sin embargo, podemos hacer una clasificación principal de acuerdo a la orientación de los tubos del serpentín en la zona de radiación, la cual puede ser Horizontal o Vertical.

Los CAFD se clasifican en dos grandes grupos:

- a) CALENTADORES CILÍNDRICO-VERTICAL.
- b) CALENTADORES RECTANGULAR-HORIZONTAL.

CALENTADORES CILÍNDRICO-VERTICAL.

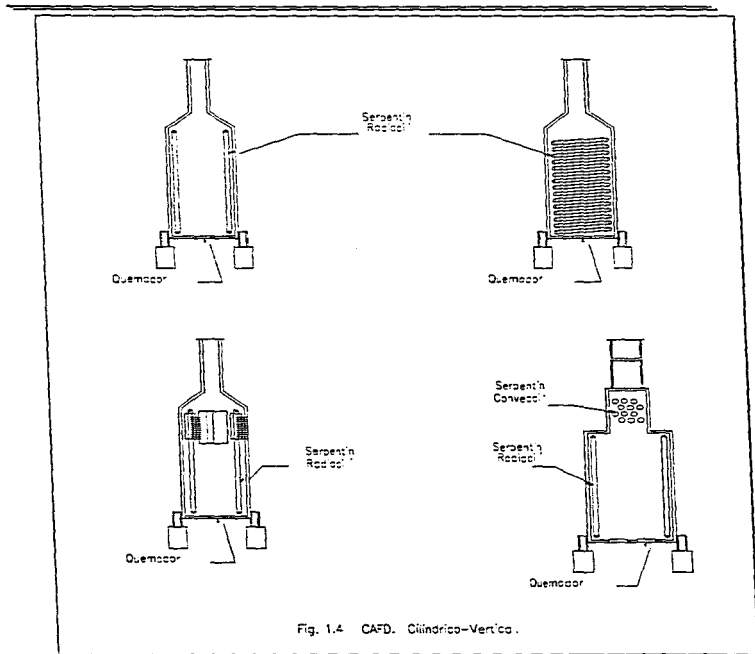
En este tipo de CAFD el serpentín de tubos está dispuesto en forma vertical o helicoidal a lo largo de la cámara de combustión, y su sección transversal es circular, por lo que dicha cámara debido a su orientación sirve de tiro disminuyendo la altura de la chimenea (Fig. 1.4).

GENERALIDADES

Los quemadores se colocan en el piso de la zona de radiación, orientando la flama verticalmente. En la zona de convección el arreglo del serpentín es horizontal, formando un banco de tubos colocados en la parte superior de la cámara de combustión donde proporciona un mayor aprovechamiento de la energía.

Este tipo de CAFD puede prescindir de esta zona adicional de calentamiento cuando el diseño requiere bajas eficiencias, lo cual representa bajo costo del equipo.

GENERALIDADES



CALENTADORES RECTANGULAR-HORIZONTAL.

El serpentín de tubos en la zona de radiación tiene un arreglo horizontal a lo largo de las paredes laterales y el techo, así como horizontal o vertical al centro de la cámara de combustión; a la cual se le conoce como CELDA.

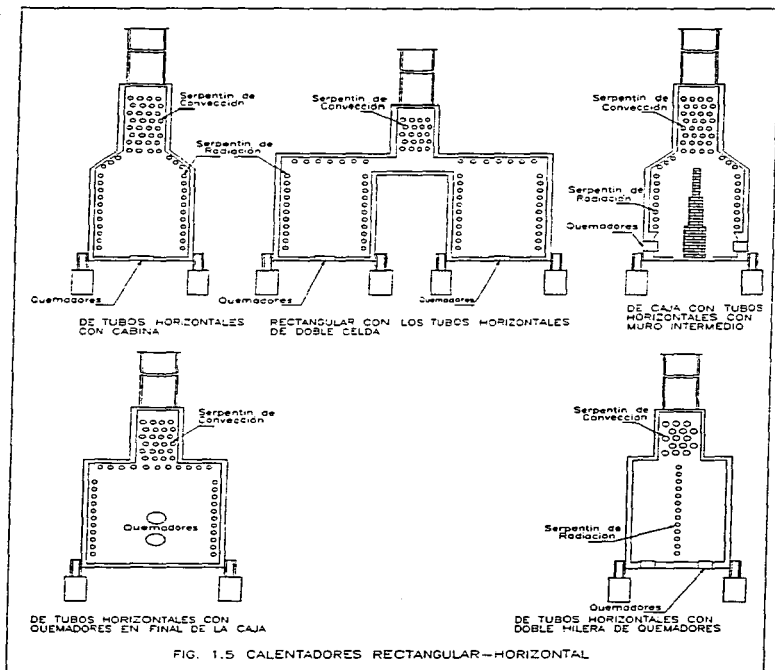
Su sección transversal es rectangular y normalmente los tubos son calentados verticalmente desde el piso y horizontalmente por quemadores montados en las paredes frontales y/o laterales (Fig. 1.5).

Al igual que los calentadores tipo cilíndrico-vertical, en la zona de convección la orientación del serpentín es horizontal, y debido a su rango de carga térmica siempre es justificable el uso de esta zona adicional.

TABLA 1.1.- TABLA DE CARGA TÉRMICA.

TIPO DE CAFD	CARGA MINIMA	CARGA MAXIMA
CILINDRICO- VERTICAL	146 KW (0.5 millones de BTU/hr)	58600 KW (200 millones de BTU/hr)
RECTANGULAR- HORIZONTAL	300 KW (10.2 millones de BTU/hr)	73500 KW (250.8 millones de BTU/hr)

GENERALIDADES



1.2.2 COMPONENTES DE UN CALENTADOR A FUEGO DIRECTO

Los componentes principales de un Calentador a Fuego Directo se enlistan a continuación:

a) Serpentin. Es el conjunto de tubos a través del cual el fluido de proceso circula desde el cabezal (retorno) de entrada hasta el de salida del CAFD. El serpentín es el componente más importante y más costoso de un Calentador a Fuego Directo, los tubos están colocados en serie por medio de retornos o cabezales, los tubos instalados en la sección de radiación son lisos, generalmente de cédula 40 y 80 y en la sección de convección son de superficie extendida.

b) Soportes de tubos. Elemento mecánico utilizado para soportar los tubos del serpentín dentro del CAFD.

c) Paredes. Las paredes del calentador a fuego directo están formadas en su parte exterior por una cubierta de acero y en su parte interior por un material aislante refractario; Los refractarios son definidos como materiales inorgánicos no metálicos como la cerámica, resistentes al calor y que proporcionan la estructura o revestimiento para soportar altas temperaturas, tienen la función de aislante porque son de muy baja conductividad térmica, éstos pueden ser ladrillos y concretos incluyendo las fibras cerámicas.

su finalidad es evitar el sobrecalentamiento de la estructura metálica de acero, mantener una temperatura constante en la sección de radiación y evitar que se presente el fenómeno de corrosión en la cubierta metálica del equipo cuando se quema un combustible que contiene azufre.

d) Quemadores. Un quemador esta compuesto de un conjunto de accesorios que mezclan en forma adecuada cantidades específicas de aire y combustible en forma homogénea, provocando después que el combustible se queme a través de un proceso químico exotérmico estable, los quemadores se clasifican en:

- 1.- Quemadores de combustóleo, que mezclan aire, combustóleo y vapor de atomización.
- 2.- Quemadores de gas que mezclan aire y gas.
- 3.- Quemadores que combinan el manejo de combustóleo y gas.

e) Sopladores de Hollín. Su función es la de dirigir chorros de vapor hacia los tubos de superficie extendida, con la finalidad de eliminar el hollín depositado sobre éstos. Los sopladores de hollín se encuentran localizados a distintas alturas en la zona de convección y son tubos con orificios que cruzan de lado a lado a la misma zona.

f) Ventiladores. Máquina que sirve para mover gases a través de ductos y otros equipos, relativamente a bajas presiones.

g) Compuertas y Mamparas. Dispositivos que se colocan generalmente dentro de ductos de gases de combustión y aire, permitiendo el paso de éstos y regulando su flujo.

h) Chimenea. Conducto que permite desalojar a la atmósfera, los productos de la combustión, además de proveer el jalón o tiro suficiente para mantener circulando el aire, y gases a través del calentador y la propia chimenea.

i) Estructura o Envolvente. Es la cubierta metálica usada para encerrar al CAFD. Todas las cargas de los tubos y cabezales será soportada por la estructura de acero y no por el refractario.

j) Instrumentación. Es el equipo controlador e indicador de las condiciones de operación de un CAFD tales como; registradores, controladores, termopares, indicadores de presión, circuitos de paro por emergencia, indicadores de flujo, de combustible de energía eléctrica y vapor.

1.3 ZONAS TÉRMICAS DE UN CALENTADOR A FUEGO DIRECTO

En el interior del CAFD se presenta con mayor importancia dos mecanismos de transferencia de calor:

- POR RADIACIÓN.
- POR CONVECCIÓN.

En razón al mecanismo de transmisión de calor predominante, podemos clasificar al calentador en tres zonas o secciones diferentes. (fig. 1.3).

- Zona de radiación
- Zona escudo
- Zona de convección

1.3.1. ZONA DE RADIACIÓN.

En cualquier CAFD la mayor parte de calor se transfiere principalmente por radiación. Esto se presenta en los tubos localizados en la cámara de combustión o también llamada zona de radiación del calentador.

En esta zona también se presenta la transferencia de calor por convección, pero con menor significancia, debido a los altos niveles de temperatura que oscilan entre los 700 °C (1300 °F) en adelante, es por ello que se efectúa una predominante transmisión de calor por radiación.

1.3.2. ZONA ESCUDO.

Es la sección intermedia entre la zona de radiación y la zona de convección; también la podemos describir como la sección inicial de la zona de convección, la cual algunas veces queda expuesta a la flama, por lo que predomina la transmisión de calor por radiación; sin embargo, la transmisión de calor por convección también adquiere cierta relevancia. En esta zona se utilizan tubos desnudos colocados horizontalmente, los cuales están expuestos a las más altas densidades de flujo térmico.

1.3.3 ZONA DE CONVECCIÓN.

Con el objeto de aprovechar la energía térmica que poseen los gases de combustión al abandonar la zona de radiación, se instala un banco de tubos dispuestos perpendicularmente a la dirección del flujo de gases, generándose un intercambio térmico por convección.

La zona de convección se utiliza como zona de precalentamiento del fluido que entra al calentador o para algún servicio adicional, como sería la producción de vapor de agua.

En la mayor parte de los CAFD utilizan en esta zona tubos aletados o birtados, con lo cual se tiene mayor superficie expuesta para la transmisión de calor y por lo tanto la eficiencia del equipo se incrementará, además cabe mencionar que es en esta zona donde se colocan los sopiadores de hollín, los cuales efectúan la limpieza de los tubos.

1.4. FACTORES DESTRUCTIVOS DE SERVICIO

a) CALOR

En ocasiones el material es sometido a aplicaciones más allá de su temperatura límite de uso.

b) ESCORIA

Es un producto indeseable en algunos procesos, la escoria a bajas temperaturas se encuentra en sólido en cenizas residuales de aceites sucios o coque, a altas temperaturas es un líquido viscoso. La escoria reacciona químicamente con el refractario y lo destroza gradualmente o causa fractura en el sistema refractario.

Los factores involucrados en el ataque de escoria son la compatibilidad química entre la escoria y el refractario y la porosidad del refractario, esta afecta, debido a que la escoria entra en los poros del material; por esta razón los materiales con baja porosidad son más resistentes.

c) CHOQUE TÉRMICO

El repentino cambio de temperatura el sistema refractario causa esfuerzos en la estructura interna del material y para relevar estos esfuerzos debe haber una fisuración, que se da regularmente en un refractario frágil; los factores involucrados en la resistencia al choque térmico es la densidad, porosidad, resistencia, y composición química del refractario.

d) TIPOS DE ATMOSFERAS

1.- Atmósfera de monóxido de carbono.

La desintegración de monóxido de carbono, ocurre en refractarios con alto contenido de hierro ($Fe_2 O_2$).

Se trata de un óxido férrico que a una temperatura de 752 °F y 1472 °F (400 °C y 800 °C) cataliza la descomposición del monóxido de carbono en carbono.

La desintegración del CO ocurre cuando la reacción química toma lugar $CO \rightarrow C + CO_2$, la reacción es catalizada por partículas de $Fe_2 O_2$ concentradas en el refractario (impurezas de materias primas), el dióxido de carbón (CO_2) existe como un gas, mientras el carbono es depositado alrededor de las partículas de hierro, los depósitos se expanden gradualmente hasta subir bruscamente la presión dentro del recubrimiento (poros del refractario), los efectos son de resquebrajamiento o desintegración debido al excesivo incremento volumétrico

También se ha comprobado que el óxido férrico pierde su función catalítica cuando se ha combinado con la base silico-aluminosa del refractario; en la manufactura esto se puede evitar, con aglomeraciones macroscópicas de óxido férrico o cocerilo a temperaturas suficientemente elevadas para volverlo inocuo.

Los refractarios de bajo contenido de hierro o los que tienen un mínimo de 0.1% de sulfato en la atmósfera evita el problema.

FUENTE. LOS PARAMETROS DE REFRACTARIOS MOLDEABLES Y PREFABRICADOS, IAN KNIZEK BARROMEX, S.A. DE C.V., PAG 84

2.- Atmósfera con Cloro o flúor

El refractario óxido comúnmente atacado es el cemento aglutinante calcio-alumina en concretos refractarios; esta reacción tiene lugar a bajas temperaturas y bajo estas condiciones destruye el concreto. La solución a este problema es utilizar otro material que no sea el concreto refractario en la zona afectada.

3.- Atmósfera con Hidrogeno

Para temperaturas arriba de 1150 °C (2100 °F), el hidrógeno puede atacar el sílice (Si O_2) y reducirlo a Si O , el cuál es lixiviado fuera de la estructura del refractario, esta reacción es reversible a bajas temperaturas, lo cual quiere decir que la sílice será depositado en un lecho catalizador, tubos de intercambiadores de calor, etc.

Para proteger el refractario se deben seleccionar materiales con bajo contenido de sílice, cuando el hidrógeno esta presente en la atmósfera tiene una temperatura arriba de 1150 °C (2100 °F); El hidrogeno aumenta la conductividad térmica del refractario.

FUENTE: LOS PARAMETROS DE REFRACTARIOS MOLDEABLES Y PREFABRICADOS, IAN KNIZEK
BARROMEX. S.A. DE C.V., PAG. 84

e) EROSIÓN Y/O ABRASIÓN

"Las causas de desgaste por abrasión se originan cuando el recubrimiento está en contacto íntimo con una carga sólida en movimiento; esto también sucede en la mayoría de las instalaciones verticales como las de cal, los altos hornos de la industria de hierro y los hornos horizontales rotatorios, el mecanismo de abrasión resulta diferente en todos los conductos diversos, que llevan grandes volúmenes de gases a alta velocidad cargados con partículas sólidas como sucede en ductos de diferentes equipos"³.

La correlación que se ha encontrado entre ciertos parámetros de los refractarios y la resistencia a la abrasión (determinada a temperatura ambiente), probablemente la más importante es la correlación con el módulo de ruptura (resistencia transversal), la coincidencia es muy marcada sobre todo al comprobarse, que arriba del valor umbral determinado de resistencia transversal (o de flexión), el refractario sufre poco desgaste mientras que debajo de él, el mismo aumenta súbitamente de un salto.

A módulos bajos de elasticidad las pérdidas por abrasión aumentan rápidamente y viceversa; con el aumento de la temperatura la resistencia contra la abrasión aumenta hasta alcanzar un máximo; tan pronto como el refractario comienza a ablandarse, es decir que se transforma de un sólido rígido a uno viscoso, la abrasión aumenta rápidamente.

³LOS PARAMETROS DE REFRACTARIOS MOLDEABLES Y PREFABRICADOS, IAN KNIZEK, PAG. 84, 85

f) CORROSIÓN

Se refiere al ataque químico ocasionado por los ácidos hidroclorehídrico y sulfhídrico a las placas de acero del horno; esto sucede cuando los gases de sulfuro o cloro vienen en combinación con los vapores condensados (agua) y hacen contacto con la placa de acero por lo cual inmediatamente forman ácidos hidroclorehídricos y sulfhídricos y la comienzan a corroer, esto sucede sin dañar gravemente el recubrimiento refractario.

Para evitar estos daños se sugiere diseñar el recubrimiento refractario de tal manera que la temperatura de la placa de acero permanezca arriba del punto de rocío de vapor de agua sobre las condiciones involucradas del proceso; la aplicación de una capa de ácido, esta placa debe aplicarse antes de instalar el material refractario.

CAPITULO II

CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES REFRACTARIOS AISLANTES

En principio se utilizaron las piedras naturales como refractario hasta que hubo necesidad de llevar a cabo un proceso artificial para su elaboración, el cual se hizo mediante la combinación de diferentes materiales para crear piedras artificiales llamadas ladrillos, fueron los primeros refractarios de fabricación.

Con el tiempo se fueron determinando las propiedades refractarias de materiales como la sílica y por el año de 1850 se inició la fabricación de ladrillos de sílica. Para 1880 y con el uso de convertidores para la fabricación de acero, se empezaron a usar ladrillos de magnesita y mineral de cromo, que resultaron muy resistentes al ataque químico de las escorias básicas y fueron conocidos como ladrillos básicos.

Definición de materiales refractarios

Un refractario es estable a elevadas temperaturas, sin experimentar cambios físicos y químicos, empleados para contener la energía a través de su superficie. A los materiales refractarios se les abate la densidad con el propósito de darles características aislantes, sin perder su estabilidad física y química a temperaturas altas. "La mayoría de los materiales cerámicos puros de alto punto fusión se califican como materiales refractarios"⁴.

⁴ LA CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES, ASKELAND DONALD R.
GRUPO EDITORIAL IBEROAMERICA, 1987. PAG. 293

Actualmente los materiales refractarios tienen la siguiente presentación:

- a) **LADRILLOS:** Son piezas preformadas listas para usarse.

- b) **MORTEROS:** Son materiales refractarios finamente molidos, en pasta o en polvo, que se usan para pegar ladrillos refractarios.

- c) **CONCRETOS:** Son mezclas de materiales refractarios y aglutinantes hidráulicos que permiten efectuar revestimientos monolíticos en lugar de uso por colado de concreto.

- d) **PLÁSTICOS Y APIZONABLES:** Son materiales especialmente preparados para poder efectuar su instalación. Los plásticos son masas para instalarse mediante apisonado y formar así revestimiento una de sus características más importante es la moldeabilidad.

- e) **FIBRA CERÁMICA:** Es un material sintético, amorfo, producido a partir de la alúmina y sílica de alta calidad y en la proporción adecuada, bajo condiciones altamente controladas.

2.1. COMPOSICIÓN.

2.1.1. MATERIALES BÁSICOS PARA REFRACTARIOS

La corteza terrestre tiene una mezcla variada de materiales para formar refractarios como lo son óxidos de:

sílice(SiO_2), aluminio(Al_2O_3), calcio(CaO), cromo(Cr_2O_2), magnesio(MgO), circonio(ZrO_2).

El óxido de cromo es volátil y el de calcio es inestable en la atmósfera, no obstante, pueden ser combinados dentro de los materiales como el calcio y magnesio para formar dolomita o sea, $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, la base vertebral. El carbono puede usarse después de la grafitación, o combinado con el silicio (Si), para formar carburo de silicato.

Los óxidos mencionados se encuentran en depósitos naturales con una pureza suficiente para poder aplicarlos directamente por ejemplo:

Arcillas (Si, Al), arenisca (Si), magnesia (Mg), dolomita (Mg, Ca) cromita (Cr, Fe, Al), y circonio; el carbono se obtiene de la antracita o carbón de piedra, del chapopote o del grafito nativo. En algunos casos los materiales refractarios se obtienen por tratamiento químico, tales como la magnesia del agua de mar y la alúmina de la bauxita.

La arcilla es el más antiguo y común de los refractarios utilizados, desde la construcción de los primeros hornos de fundición hasta nuestros días en los modernos procesos industriales de hidrocarburos, petroquímica, metalurgia, así como la industria de la cerámica.

Los depósitos de arcilla se encuentran ampliamente sobre la superficie de la tierra con grandes variaciones en su alto punto de fusión, espesor y densidad. Los principales tipos de arcillas son: El caolín, la arcilla horneada, la bauxita y la diáspora. Muchas de las características generalmente asociadas con las arcillas, tales como: la hidratación y la estructura en forma de placa, se encuentran en otros materiales. Por lo tanto una definición aceptable de arcilla es la que un material terroso hidratado, que contiene una considerable porción de alúmina o sílice y tiene la propiedad de la plasticidad.

2.1.2. MATERIALES CON ALTO CONTENIDO DE ALUMINIO

Como las condiciones de servicio para los refractarios de arcilla han llegado a ser mucho más severas, ha aumentado el interés por los materiales de alto contenido de alúmina

a) DIÁSPORA [HAl_2]:

El mejor material se localiza en cavidades aisladas, y aunque se han encontrado nuevos depósitos, este excelente material no es de gran disponibilidad.

Desde el punto de vista de la fabricación, la diáspora es excelente por su gran plasticidad para trabajarse y también por sus excelentes propiedades térmicas.

b) GIBSITA [$\text{Al}(\text{OH})_2$]

El mineral se encuentra solamente en regiones tropicales y sub-tropicales. En realidad, la mayoría de los suelos tropicales contienen este material. Las bauxitas se consideran como una mezcla de gibsita y mineral de caolín. No son tan satisfactorias como la diáspora para la fabricación de refractarios por el alto índice de contracción térmica que tienen.

c) TIPOS DE MINERAL DE SILIMANITA [Al₂SiO₅].

Tienen un contenido de 37% de sílice y un 63% de alúmina. Se descomponen en mulita y sílice a temperaturas arriba de 1555 °C (2830 °F) cuando es pura, y a temperaturas más bajas cuando se presentan impurezas.

Actualmente estos materiales se están usando en una considerable extensión como refractarios, pero comercialmente se confunden con frecuencia uno con otro. El problema principal es concentrar el mineral eficientemente y al mismo tiempo proveerlo en granos gruesos.

1.- TOPASIO Al₂ Si O₂ [F, Oh]₂

Tiene grandes posibilidades de utilizarse como refractario, pues se transforma en mulita con la aplicación de calor.

2.1.3. MATERIALES DE SÍLICE.

a) ARENISCA.

El mineral de sílice más comúnmente usado para refractarios es la arenisca, un nombre para la cuarcita. No todas las cuarcitas se prestan para hacer refractarios, para ello deben tener una gran pureza y una buena resistencia mecánica. Una cuarcita se extrae usualmente de cuerpos de taludes, o de piedras de deslizamiento que se encuentran en las laderas de las montañas.

FUENTE: Norton F. H. Refractories Fourth Edition 1968, Mc. Graw-Hill Book Company.

El punto de fusión de la cuarcita es muy cercana a 1700 °C (3090 °F), y al igual que la mulita, muestra poco ablandamiento debajo de su punto de fusión; esta es su principal propiedad cuando se usa como refractario, ya que conserva su resistencia a la carga a altas temperaturas más que los materiales de arcillas refractarias. Sin embargo, a causa de su alta expansión térmica, los materiales de sílice son muy sensibles a los cambios de temperatura en rangos bajos de temperatura.

b) ARENA.

Una pequeña cantidad de arena de playa se usa en los hornos, como por ejemplo, en el hogar de los hornos para fundición de acero, pero el volumen que se usa es muy pequeño comparado con los refractarios hechos de cuarcita.

c) TIERRA DIATOMACEA.

Este material usado como aislante térmico esta compuesto de los esqueletos de diatomeas, las cuales son microorganismos. Las características deseables de este material son sus celdas cerradas y su alto grado de porosidad, lo cual da una baja densidad y conductividad térmica.

2.2 FABRICACIÓN.

A continuación se describen los procesos de fabricación de los materiales refractarios:

a) TRITURACIÓN Y MOLIENDA.

Los equipos utilizados para la trituration son quebradoras de quijadas o giratorias y la molienda se realiza en los molinos de martillos, de bolas o de impacto que nos dará un acabado fino.

b) CRIBADO.

Es una operación muy importante en la industria de los refractarios, ya que la densidad y porosidad característica del producto terminado dependen del tamaño de partícula. El cribado se realiza en vibradores con cribas de alta capacidad de tamizado en los que el material que no pasa el tamiz, regresa a molienda para reducir su tamaño de partícula. En una misma operación puede obtenerse varios tamaños de partículas.

c) CALCINACIÓN.

La mayoría de las materias primas, necesitan una calcinación o quemado a muerte con el fin de eliminar componentes químicos volátiles, evitar un excesivo encogimiento en el producto final y convertirlas a una forma cristalina de mayor estabilidad. La calcinación se efectúa en hornos rotatorios; Al producto terminado se le denomina GROG.

d) MEZCLA.

Como en la elaboración de un material refractario se utilizan varias materias primas, es necesario producir una mezcla homogénea de los ingredientes; esto es dispersándolo con agua o con cualquier otro agente mezclador que permita que las partículas se recubran. El amasado ayuda al desarrollo de la mezcla y reduce la cantidad de aire atrapado.

e) MOLDEO.

La mayoría de las formas hechas con materiales refractarios se realizan con equipo mecánico (proceso de extrusión), sin embargo, las piezas demasiado grandes o complejas necesitan moldearse manualmente.

El prensado puede ser mecánico o hidráulico. Algunos productos se presentan al alto vacío para obtener refractarios más duros, menos porosos, más densos y obtener un notable aumento en sus propiedades mecánicas y en su resistencia al choque térmico.

f) SECADO.

Las piezas moldeadas se secan en pisos calientes a temperatura controlada. Los pisos pueden calentarse con vapor o con aire que fluye por ductos instalados en su interior. Las piezas pequeñas se secan generalmente en hornos de túnel, colocadas sobre bandas transportadoras en carros que recorren todo lo largo del túnel.

g) QUEMADO.

El paso final en la manufactura de materiales refractarios es el quemado, que se efectúa en hornos especiales y tiene como finalidad impartir al material, las propiedades físicas, químicas y mecánicas deseadas. Tales propiedades están en función de la temperatura y del tiempo de quemado.

2.3. PROPIEDADES.

Las propiedades más importantes que deben ser tomados para el diseño y selección de un sistema de aislamiento a base de materiales refractarios son las siguientes:

- a) Punto de fusión
- b) Rango de temperatura de servicio.
- c) Capacidad de deformación bajo la carga en caliente.
- d) Choque térmico y disgregación.
- e) Resistencia a la penetración de metales fundidos.
- f) Expansión y contracción.
- g) Pérdida y almacenamiento de calor .

a) PUNTO DE FUSIÓN.

El punto de fusión de un material refractario se especifica como la temperatura a la cual una muestra en particular bajo un esfuerzo definido, se hace lo suficientemente líquida para fluir a una razón específica. Esta definición no es aplicable para materiales que no tienen un límite definido entre el estado sólido y el líquido.

La atmósfera en el interior del horno tendrá un efecto sobre el punto de fusión de un material refractario. Los contenidos de carbón, componentes de hierro, vanadio y/o álcalis en la corriente de combustible también tendrán un efecto que generalmente causará una falla prematura en los refractarios.

FUENTE: A. P. Green *Refractories in the Hydrocarbon Processing Industry.*

Un método común para determinar el punto de fusión es por comparación de las características de ablandamiento de una muestra con una serie de conos pirométricos estándares, haciendo la prueba en un mismo horno, en cierto período de tiempo en una atmósfera oxidante de la cual se obtiene una precisión de ± 15 °C (59 °F).

"El punto de ablandamiento se determina calentando una esbelta pirámide hecha del material a probarse, finamente pulverizado y observando su doblamiento comparando el mismo con el de una pirámide normal de igual tamaño. El punto de ablandamiento corresponde al instante cuando la punta (cúspide) llega a tocar la base; y se le asigne al material ensayado el número de la pirámide normal, cuya punta toque la base en el mismo instante. Este punto depende de la temperatura pero queda fuertemente afectado por el tiempo y la velocidad del calentamiento⁵.

La abreviatura CPE significa cono pirométrico equivalente, la palabra pirométrico significa grado de calor y por lo tanto el CPE en nuestro esquema de referencia, es una medida de calor que puede ser alojado por los refractarios. **Notese** que el CPE no es un grado de temperatura, mejor dicho, es una medida de la habilidad de un material para la operación cuando está sujeto a una cierta temperatura a través de un cierto período de tiempo en una atmósfera oxidante. Por ejemplo, la ASTM menciona un calentamiento específico para un rango de 132.2 °C (270 °F) por hora hasta que el punto final sea alcanzado.

El punto final es alcanzado cuando el extremo de un cono hecho de un material ensayado ha sido inclinado desde la posición 3:00 en sentido horario.

⁵LOS PARAMETROS DE REFRACTARIOS MOLDEABLES Y PREFABRICADOS. IAN KNIZEK
BARRO MEX. S.A DE C.V. MEXICO 1989 PAG. 30, 31.

b) RANGO DE TEMPERATURA DE SERVICIO.

El rango de temperatura de servicio es sólo una guía y constituye tan sólo una de las características a ser utilizadas, en la selección de un producto refractario para una aplicación en particular; generalmente el límite inferior es la temperatura bajo la cual el mecanismo se ve afectado y por lo tanto dicho enlace no se efectuará; para refractarios monolíticos se asume que éstos no han seguido el proceso de calcinado.

La temperatura más elevada es aquella en la cual el producto puede funcionar sin una contracción excesiva. Para concretos, la contracción excesiva es dada como 1.5 %, para plástico 2.5% es considerado como un exceso de **contracción**, una cantidad similar será aplicada para fibras cerámicas.

c) CAPACIDAD DE DEFORMACION BAJO CARGA EN CALIENTE.

La resistencia a la deformación bajo carga en caliente es de particular interés para la construcción de paredes, pisos y techos, ya que éstos deben resistir deformación a altas temperaturas bajo carga por periodos prolongados de tiempo, esta propiedad de los refractarios es dada como un porcentaje de deformación sobre carga en caliente.

Los refractarios tienen un comportamiento diferente a elevadas temperaturas, donde se acercan más a la fusión y consecuentemente a una fractura catastrófica más rápidamente bajo carga.

FUENTE: A. P. Green Refractories in the Hydrocarbon Processing Industry.

e) CHOQUE TÉRMICO Y DISGREGACIÓN.

El choque térmico corresponde a un cambio repentino de temperatura debido a un desigual calentamiento o enfriamiento suficiente para elevar el esfuerzo, que ocasiona la disgregación del recubrimiento; el efecto que produce, es la fractura continua de la estructura del refractario, es la mayor causa de fallas en los refractarios, lo cual produce la disgregación.

La disgregación puede ser debido a la penetración de escoria la cual causa una variación en el coeficiente de expansión térmica, entre la capa penetrada y el cuerpo del refractario. La resistencia de un horno al choque térmico y astillamiento puede ser mejorada por la propiedades de diseño del horno y por la selección de los materiales refractarios, los cuales experimentan un cambio lineal mínimo en la operación a un determinado rango de temperatura. Para prever problemas como penetración de sólidos o escoria, la selección del material deberá ser de baja porosidad y/o no ser humedecido por un material derretido. También existe la disgregación mecánica causada por esfuerzos que tienen su origen en el impacto o en la presión.

f) RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE METALES FUNDIDOS, ESCORIA.

La resistencia al ataque químico para productos fundidos, y la degradación física del material refractario causada por la velocidad del fluido, puede ser minimizado con el uso de un material de grano refinado y refractarios químicamente inertes, la formulación de componentes que no reaccionarán al ser humedecidos minimizarán el problema. La resistencia a la penetración de metales fundidos, escoria es una función de la composición de un refractario y de la impermeabilidad.

FUENTE: A. P. Green Refractories in the Hydrocarbon Processing Industry.

g) RESISTENCIA A LA ABRASIÓN.

Entre las causas de desgaste y finalmente de destrucción de los revestimientos refractarios se la atribuye a la abrasión.

Puede ser expresada como la pérdida de un volumen dado de los materiales a una temperatura dada. La resistencia a la abrasión es una característica importante para un refractario que esté instalado donde hay partículas en movimiento o donde las partículas están presentes en una corriente de gas; por ejemplo el cemento en polvo en un ducto.

Un refractario que posee buena resistencia a la abrasión deberá tener una buena fuerza de enlace en su estructura interna y ésta estructura no deberá ser plástica para la temperatura a la cual se supuso resistir. Frecuentemente un refractario que demuestra una buena resistencia a la deformación bajo carga (en caliente o en frío), tendrá una baja pérdida por abrasión, además la estructura de grano fino del refractario y un alto punto de fusión mejorarán la resistencia a la abrasión.

h) EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN TÉRMICA.

Diseñar los cambios de volumen del material a la temperatura de operación del horno. La expansión y contracción reversible deberá ser una característica adaptada para suministrar las juntas de expansión y una protección contra el astillamiento. La temperatura a la cual ocurre un cambio irreversible da cuenta al usuario y constructor del horno de la óptima temperatura, para el uso del refractario bajo esta consideración.

FUENTE: LOS PARAMETROS DE REFRACTARIOS MOLDEABLES Y PREFABRICADOS. IAN KNIZE

i) PÉRDIDA Y ALMACENAMIENTO DE CALOR.

El elevado costo de la energía hace a estas características extremadamente interesantes: la pérdida y acumulación de calor.

La conductividad térmica y el calor acumulado está estrechamente relacionadas con la densidad, para lo cual la pérdida de calor es función de la conductividad térmica.

El calor almacenado se describe en la siguiente fórmula:

$$\text{CALOR ALMACENADO} = \text{DENSIDAD} \times \text{VOLUMEN} \times \text{CALOR ESPECÍFICO} \times \Delta t \dots \dots \dots \text{ec. 2.1}$$

El calor específico es una propiedad de los materiales y es la cantidad de calor requerida para levantar un libra de material un grado Fahrenheit de temperatura.

Δt es la temperatura media menos la temperatura ambiente expresada en grados Fahrenheit. La temperatura media es la temperatura de cara caliente más la temperatura de cara fría dividida entre dos.

La ecuación 2.1 demuestra que el calor almacenado está directamente relacionado con el peso de los refractarios, de esa manera entre más ligero sea el refractario para la construcción de un horno más calor disponible se tendrá para el proceso, la baja acumulación de calor tiene otra consideración, si se necesita que un horno pare un servicio debido a una emergencia, el recubrimiento ligero de material refractario se enfriará más rápidamente.

FUENTE: North American Combustion Handbook, Second Edition

2.3.1. PRUEBAS DE INSPECCIÓN.

Las siguientes pruebas se llevarán a cabo en los refractarios colocados en los Calentadores a Fuego Directo.

PRUEBA	ESPECIFICACIÓN
1. Resistencia a la compresión y Módulo de ruptura para ladrillos y formas.	ASTM C 133 - 84
2. Resistencia a la abrasión de materiales refractarios a temperatura ambiente.	ASTM C 704 - 80
3. Módulo y densidad de volumen de ladrillos refractarios y ladrillos aislantes.	ASTM C 134 - 88
4. Cono pirométrico de arcillas refractarias y materiales refractarios de alta alumina.	ASTM C 124 - 89
5. Cambio lineal permanente en descargas de concretos refractarios.	ASTM C 269 - 76
6. Preparación de muestras de concreto refractario para coladas.	ASTM C 862 - 87
7. Muestras de descargas de concreto refractario	ASTM C 865 - 87

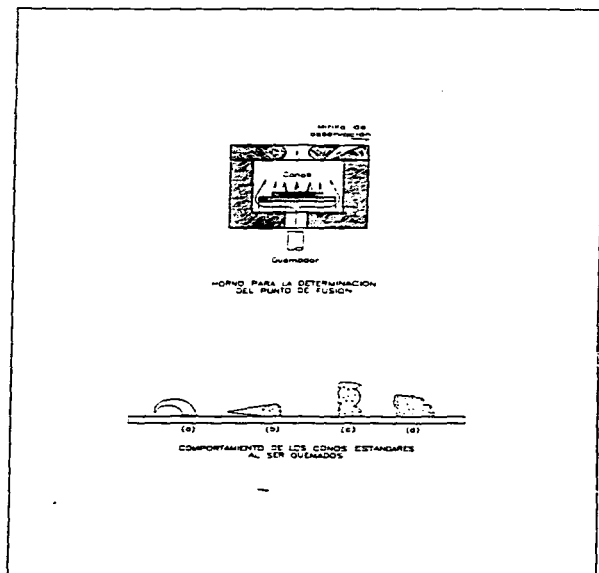


FIG. 2.1 COMPORTAMIENTO DE LOS CONOS ESTÁNDARES AL SER QUEMADOS

2.4. CLASIFICACIÓN.

Se clasifican de acuerdo a su composición química y uso o forma de instalación.

2.4.1. DE ACUERDO A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA

se clasifican en:

a) ARCILLOSOS.

Estos refractarios se emplean poco a causa de su elevado costo. En su composición predomina la arcilla; su contenido de sílice es de 55 a 65% y el de alúmina de 35 a 37% máximo. Las arcillas refractarias consisten esencialmente de caolinita y pequeñas cantidades de coarsita. Hierro, titanio e impurezas alcalinas.

b) ALUMINOSOS.

Están constituidos por alúmina en una proporción de 35 a 45% y arcilla. Resisten temperaturas superiores a 1700 °C (3092 °F); si aumenta su contenido de alúmina, aumenta su resistencia a la temperatura así como sus resistencias mecánica y química, como se observa en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Temperatura limite de uso de Aluminosos

% CONTENIDO DE ALUMINA	TEMP. APROX. DE ABLANDAMIENTO
50	1785 °C (3245 °F)
60	1805 a 1820 °C (3281 a 3308 °F)
70	1820 a 1850 °C (3308 a 3362 °F)
80	1865 °C (3389 °F)
90	1885 a 1970 °C (3425 a 3578 °F)
72 (MULITA)	1850 °C (3362 °F)

c) SILICOS.

Se obtienen principalmente de coarsita, mineral que contiene como mínimo 98% de sílice. Se fabrican comercialmente dos clases de refractarios silícicos: De calidad superior contienen de 0.2 a 0.5% de alúmina, óxido de titanio y óxido alcalino; de calidad regular contienen de 0.5 a 1% de alúmina, óxido de titanio y óxidos alcalinos.

d) BÁSICOS.

En este grupo se incluyen los refractarios a base de magnesita calcinada a muerte, cromita, olivina, dolomita y brucita principalmente.

e) CARBONOSOS.

Se obtiene a base de grafito aglomerado con arcilla cocida, carburo de silicio y coque. Se usan en hornos expuestos a abrasión mecánica severa, en tubos de termopares y en general, donde se requiera alta conductividad térmica y gran resistencia a la abrasión.

f) ESPECIALES.

Son de alúmina y se clasifican como de 50, 60, 70, 80, 90 y 97% de alúmina según su contenido y los que contienen más de 97% de alúmina, se conocen como de 100 % de cromo en los que se usa el mineral de cromo en su estado natural (FeMg) o $(CrAl_2)_2 O_3$; refractarios especiales hechos a base de circonio en forma mineral ($ZrSiO_4$) o de una mezcla circonio-alúmina. Todos estos refractarios se usan para temperaturas mayores de 1960 °C (3560 °F).

2.4.2. DE ACUERDO A SU USO.

Se clasifican en:

- Ladrillos refractarios.
- Ladrillos refractarios aislantes.
- Morteros.
- Refractarios Plásticos.
- Concretos Refractarios-aislantes.
- Fibras cerámica.

1.- LADRILLOS REFRACTARIOS.

Son preformados a base de una mezcla de los refractarios mencionados anteriormente, en diferentes cantidades. Se fabrican de diversos tamaños y formas, pero la que más se usa es la forma rectangular, especialmente para tramos rectos. Sus dimensiones normales son de 228.6 x 114.3 x 76.2 mm. (9" x 4½" x 3"). Se utilizan en calentadores a fuego directo, calderas y reactores en un rango de temperaturas de 870 °C (1598 °F) hasta 1535 °C (2795 °F).

2.- LADRILLOS REFRACTARIOS AISLANTES.

Al igual que los ladrillos refractarios, son preformados compuestos por materiales refractarios, pero además tienen materiales aislantes, tales como la tierra diatomácea, la vermiculita, lana mineral, etc.

Las propiedades más importantes de los ladrillos refractarios y refractarios-aislantes, son:

Punto de fusión, deslizamiento bajo compresión, resistencia al astillamiento o desgajamiento, resistencia a escoriarse, estabilidad contra gases y vapores.

Cada aplicación requiere de la consideración de estas propiedades para obtener un mejor servicio.

3.- MORTEROS.

Se utiliza como recubrimientos a la cara expuesta de las paredes de material refractario, como adherente de ladrillo o de paredes en las juntas y uniones, y en reparaciones, además de dar protección a las mismas paredes contra elementos destructivos.

Existen compuestos de alto porcentaje de alúmina (Al_2O_3), de arcilla ligada químicamente, de material de alúmina-silice calcinado, de arcilla dura y de tipo especial compuestos por magnesita, cromo, sílice, alúmina y de carburo de silicio.

Tienen grandes resistencias mecánicas en rangos de temperatura elevados y en ambientes corrosivos.

Los porcentajes en que intervienen los componentes son determinantes para la calidad del mortero, la norma ASTM C 144-93 (Especificación para agregados de morteros para albañilería) referente a materiales refractarios colados define sus características y usos.

4.- REFRACTARIOS PLÁSTICOS.

Están compuestos de un agregado grueso, de la trituración de ladrillo refractario o de material refractario calcinado y ligado químicamente con material refractario plástico, y se usan para 3 propósitos generales.

El primero, es para hacer formas moldeadas de refractario; el segundo, es para formar paredes monolíticas o estructuras de hornos; el tercero, para reparar y resanar defectos en los trabajos donde se utilizan materiales refractarios.

5.- CONCRETOS REFRACTARIOS AISLANTES.

Contienen agregados y material aglutinante, tal como el cemento hidráulico, para darles propiedades de secado en frío. El agregado puede consistir de arcilla refractaria calcinada, el cual le dará una alta densidad al concreto, o puede consistir de un material refractario poroso de tierra diatomácea, de vermiculita, de haydita u otro material poroso, para darle un peso ligero y una baja conductividad térmica al concreto.

Los agregados y el aglutinante se mezclan junto con una porción de agua y así, adquieren una resistencia estructural por medio del fraguado hidráulico y el secado.

6.- FIBRAS CERÁMICAS.

Muchas fibras aislantes bloquean la radiación parando las corrientes convectivas de calor y, sin embargo, tienen una mínima capacidad de conducción térmica a altas temperatura de (540 - 1650 °C) (1004 a 3002 °F) las fibras clasificadas como cerámicas o refractarias; se dividen en cuatro categorías:

Alto sílice colada y fibras de vidrio cocida.
Flama de sílica simple a base de flama atenuada.
Fibras alúmina-Sílice.
Fibras óxidos simples.

Las fibras de sílice tienen aplicación en la industria aeroespacial; son muy caras y actualmente tienen un uso limitado en el campo industrial. Se obtienen químicamente a través de óxidos por lo que su costo es elevado, por sus características a altas temperaturas son requeridas en casos muy especiales. Por ejemplo las fibras de alúmina simple pueden usarse como aislantes arriba de 1650 °C (3002 °F) de temperatura.

En fibras cerámicas a granel, la de mayor aplicación es la de alúmina-sílice, por ser relativamente la de más bajo costo y buenas propiedades térmicas.

Las características que damos a continuación se refieren principalmente a la fibra de alúmina-sílice, pero aplican en general a los otros tipos de fibra.

La tabla siguiente nos da los rangos de temperatura de aplicación de cada una de las fibras.

Tabla No. 2.2. Temperatura de aplicación

FIBRA	RANGO TEMP. (°F)
alúmina-sílice fluxada.	1598 - 980
alúmina-sílice.	2300 - 2408
alúmina-sílice alta pureza.	2606 - 2696
óxidos simples.	3002 - 3092

PROPIEDADES DE LAS FIBRAS CERÁMICAS.

- Baja conductividad Térmica.
- Bajo calor de almacenamiento.
- Resiliencia Mecánica.
- Resistencia al choque Mecánico.
- Resistencia al choque térmico.
- Resistencia Química.

Las características mas importantes para aplicaciones estándar son el diámetro de la fibra y estabilidad térmica. El diámetro de la fibra es influenciado por consideraciones de manufactura, las fibras de alumina-silica tienen un promedio de diámetro de un rango de 2.2 a 3.5 micrones. La fibra fina de baja densidad produce baja conductividad térmica a temperatura media.

La estabilidad térmica de una fibra cerámica, es en muchos casos la característica mas importante al limite máximo de su temperatura.

Hay varias características inherentes; la conductividad térmica de una fibra refractaria es muy baja comparada con el ladrillo y concreto refractario a un mismo rango de temperatura. La baja densidad permite que la estructura de soporte de acero sea muy ligera en el diseño de un horno. El bajo calor de almacenamiento se debe a un rápido calentamiento y enfriamiento periódico en los hornos. La resiliencia de una fibra permite que sea comprimida y sea colocada en varias capas, además hacer que sea resistente al choque mecánico y la vibración.

Las fibras cerámicas se caracterizan por su propiedad de alta resistencia al choque térmico. Se han usado en diversas aplicaciones para puertas de acceso y usos diversos de hornos y equipo de procesos de transferencia de calor.

Las fibras son químicamente estables con excepción al ataque de ciertos ácidos fluorhídricos, fosfórico y álcalis concentrados. Si la fibra se humedece con aceite, agua o vapor, sus propiedades físicas y térmicas se restablecen al secarse.

2.5. FACTORES PARA LA SELECCIÓN.

La selección adecuada del material refractario para las condiciones de servicio requeridas, es laboriosa y complicada, ya que conjuga la experiencia del diseñador, las condiciones de operación, los detalles del diseño y el importantísimo factor económico.

Se sugiere determinar en primera instancia los siguientes factores relacionados con la operación:

- a). Clase de hornos.
- b). Continuidad de la operación.
- c). Tipo de combustible.
- d). Temperatura del horno.
- e). Temperaturas en las diferentes partes del horno.
- f). Rapidez e intervalo de los cambios de temperatura.
- g). Cantidad de calor liberado por unidad de volumen.
- h). Razón de la disipación del calor
- i). Naturaleza del material que se va a procesar.
- j). Abrasión resultante de la operación de carga.
- k). Impacto causado por la carga fría.
- l). Fluidez del metal o escoria.
- ll). Erosión por metales fundidos.
- n). Velocidad de los gases en contacto con el revestimiento.
- m). Abrasión causada por los gases en movimiento.

- o). Ataque químico por óxidos de metales, escorias, cenizas y cualquier otro agente destructor.
- p). Choque de la flama contra las paredes.
- q). Efectos de las flamas pulsantes, explosiones y vibraciones de máquinas.

Algunos datos del diseño y construcción del horno, que también se deben conocer son las siguientes:

- r). Dimensiones de las paredes y arcos.
- s). Tipos de construcción: de ladrillo ó monolítica.
- t). Naturaleza del mortero utilizado.
- u). Tipo de liga.
- v). Tipo de aislamiento.
- w). Espesor de las juntas.
- x). Carga que soportará el revestimiento.
- y). Condiciones de calentamiento en todas sus caras.
- z). Ventilación de las partes del horno.
- ab). Enfriamiento con agua o con aire.
- ac). Mecánica de las partes en movimiento.

Factor Económico:

- ad). Costo del aislante.
- ae). Estimación de Tiempo de vida del material en condiciones de operación del horno

FUENTE: INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO

CAPITULO III

CALCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO

3.1 GUÍA DE DISEÑO PARA SELECCIÓN DE ESPESOR DE RECUBRIMIENTO

A continuación se establecen los parámetros a utilizar para el diseño de un sistema de aislamiento a base de materiales refractarios en calentadores a fuego directo.

La temperatura de diseño de la cubierta exterior de la superficie de las secciones de radiación y convección no deberán exceder de 82 °C (180 °F), para una temperatura ambiente de 27 °C (80 °F) sin corrientes de aire. Cuando es usado un sistema de Pre calentamiento de aire para la combustión, serán aplicadas las mismas condiciones para los ductos de gases y aire caliente en la superficie exterior.

Las paredes, arcos y pisos serán diseñados para permitir una expansión propia de todas sus partes bajo las condiciones de diseño. Donde sean usadas varias capas de recubrimiento, las juntas de expansión no serán continuas a través de la capa adyacente.

El material refractario y block aislante de la capa externa será conveniente para una temperatura de servicio menor a 167 °C (300 °F), arriba de ésta será calculada como temperatura de cara caliente. La temperatura mínima de servicio de los refractarios será de 982 °C (1800 °F) en las secciones de radiación y escudo.

FUENTE: API STANDARD 560 *Fired Heaters For Refinery Services.*

El aislamiento en pisos será protegido con una capa de 64.0 mm. (2.5 ") de ladrillo refractario de alta calidad o concreto refractario de equivalente densidad y rango de temperatura.

Los block para quemadores serán de una temperatura mínima de servicio de 1482 °C (2700 °F).

Los muros divisorios en la cámara de radiación no excederán de 7.3 m (24 pies) de altura y serán como mínimo de ladrillo refractario de alta calidad. El espesor de la base será como mínimo de un 8% de la altura total. La relación entre la altura y el espesor de cada sección del muro no excederá de 5:1.

Las puertas de acceso serán protegidas de la radicación directa por un material de la misma o mejor calidad que el material adyacente.

FUENTE: API STANDARD 360 Fired Heaters For Refinery Services.

3.1.1. INSTALACIÓN DE PAREDES

a) LADRILLOS.

Todos los recubrimientos de ladrillo en plano vertical a la cubierta serán ligados y soportados por la estructura del marco.

Todas las bases de los soportes y miembros de sujeción serán de un material a base de aleaciones austeníticas (cromo-níquel) con excepción de los soportes localizados en los blocks aislantes que pueden ser de acero al carbono, siempre que la temperatura no exceda de 260 °C (500°F). Un mínimo del 10% del ladrillo será ligado (amarrado).

Los arcos de ladrillo y cerámica se diseñarán en forma suspendida para calentadores cilíndricos verticales, cada elemento del refractario será soportada individualmente por un anclaje de material austenítico (cromo-níquel).

b) CONCRETO REFRACTARIO.

Los pisos, paredes y arcos de construcción monolítica a base de concreto refractario tendrán una composición L:H:V, en proporción volumétrica, de 1:2:4 de lumnita, haydita, vermiculita; esta mezcla tendrá como mínimo una temperatura de servicio de 1038°C (1900°F).

FUENTE: API STANDARD 560 Fired Heaters For Refinery Services.

En las paredes y arcos se utilizará anclas tipo "V" o modificaciones de éstas, soldadas o apernadas a la placa de acero de un diámetro de 3.0-5.0 mm(0.125"-0.187") de acero inoxidable tipo 304 para el anclaje ver fig. 3.1

Para temperaturas mayores a 1038°C (1900°F), usar mezclas de mayor densidad (L:H 1:4) o una construcción con capa doble de concreto refractario, la capa expuesta a la radiación será como mínimo de 76.0 mm(3") de espesor.

Las anclas o sistema de anclaje, será fijado para soportar cada capa.

La penetración del ancla no será menor al 70% del espesor de recubrimiento y de 13.0 mm(0.5") como mínimo dentro de la cara caliente.

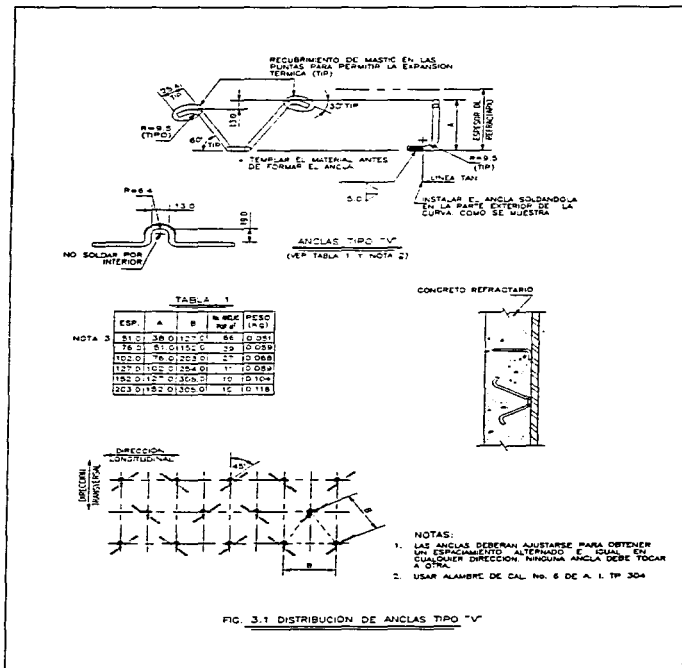
El espaciamiento entre anclas será como máximo de dos veces el espesor del recubrimiento, pero que no exceda de 300.0 mm(12") en un patrón de colocación cuadrado para paredes y de 230.0mm (9") en un patrón de colocación cuadrado para arcos , ver fig. 3.1.

La orientación del ancla será variado, de acuerdo al comportamiento del plano de corte.

Cuando las cajas de cabezales sean aisladas internamente, tendrán un espesor mínimo de 51.0 mm(2"); en esta sección de recubrimiento será sujeto con malla hexagonal de acero al carbón o malla de alambre de acero electrosoldada.

FUENTE: API STANDARD 560 Fired Heaters For Refinery Services.

CALCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO



CALCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO

En los ductos de gases, cámaras de humo y chimeneas cuando sean aislados internamente, éste será de un mínimo de 50.0 mm(2") de espesor con anclas y malla de alambre electrosoldada o malla hexagonal de acero al carbón, ver figs. 3.2 y 3.3.

c) BLOCK AISLANTE

El block aislante será usado solo como material de respaldo en materiales refractarios como productos expuestos a la combustión.

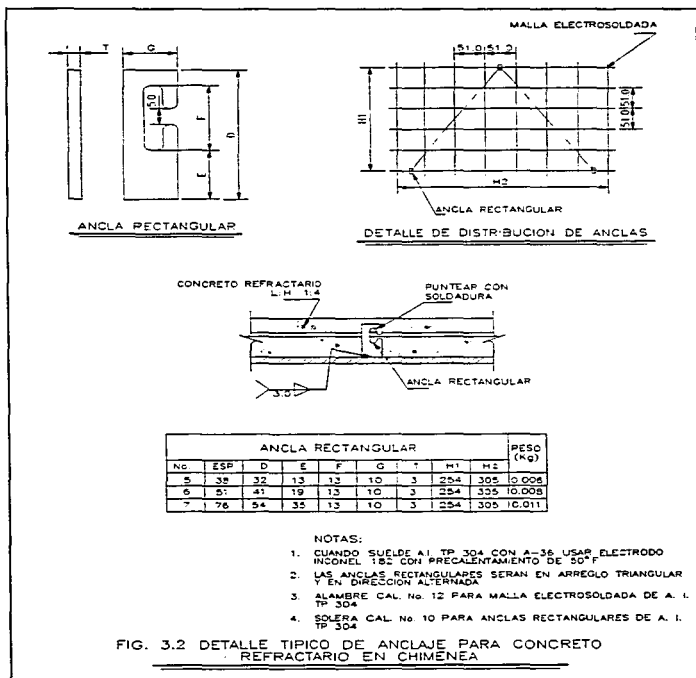
Cuando sea usado concreto refractario como elemento de recubrimiento, el block aislante será a prueba de agua para garantizar un mínimo de penetración de agua en el concreto.

El block aislante no será usado como material de respaldo para ladrillo o fibra cerámica cuando el contenido de azufre en el combustible sea mayor de 1% en peso, para combustible aceitoso, ó 1 ½% en volumen de sulfuro de hidrogeno para gas combustible.

Cuando el block aislante es utilizado como un recubrimiento interno para ductos de aire y plenums(dispositivo que se encuentra en cada quemador para absorber atenuar el ruido que éste produce), será conveniente anclarlo con pernos y sus extremos expuestos protegidos contra la fragmentación, por malla de alambre o metal desplegado.

FUENTE: API STANDARD 560 Fired Heaters For Refinery Services.

CALCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO



CALCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO

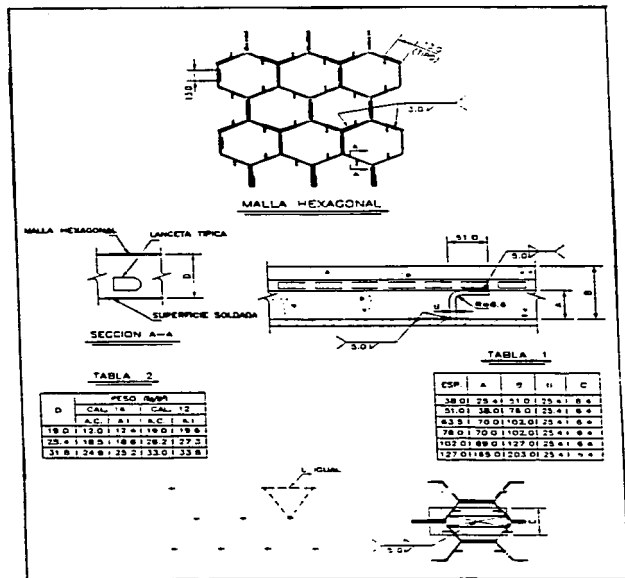


FIG. 3.3. MALLA HEXAGONAL

Cuando el block aislante sea usado con ladrillo o fibra cerámica, la placa la cubierta deberá tener una protección interna de pintura anticorrosiva.

d) FIBRA CERÁMICA

La cara caliente de la capa de fibra cerámica será de un mínimo de 25.0 mm (1") de espesor y de 128 kg/m³ (8lb/pie³) de densidad. El material de respaldo de fibra cerámica será de un mínimo de 25.0 mm(1") de espesor de 64 kg./cm³(4 lb/pie³) de densidad.

Las anclas y sujeciones usadas con recubrimientos de fibra cerámica serán de acero inoxidable con los siguientes límites de temperatura, acero inoxidable tipo 304 para 816°C (1500°F) y acero inoxidable tipo 310 para 982°C (1800°F).

La cara caliente de la capa de fibra cerámica será anclada un máximo de 76.0 mm (3") de todos sus límites.

La distribución de las anclas para arcos no excederá del siguiente patrón rectangular:

TABLA 3.1. Distribución de anclas para arcos

FIBRA CERÁMICA	PATRÓN DISTRIBUCIÓN
300 mm de ancho:	150 x 230 mm (6"x9")
610 mm de ancho:	230 x 230 mm (9"x9")
910 mm de ancho:	230 x 250 mm (9"x10").
1220 de ancho:	230 x 270 mm (9"X10 1/2")

La distribución de las anclas para paredes, no excederá el siguiente patrón rectangular (ver fig.3.4):

TABLA 3.2 . Distribución de anclas para paredes

ANCHO DE COLCHA	PATRON DE DISTRIBUCIÓN
300 mm (12")	150 x 300 mm (6"x12")
610 mm (24")	230 x 300 mm (9"x12")
1220 mm(48")	270 x 300 mm(10 1/2 "x12")

Cuando las velocidades excedan de 12m/seg (40 pie/seg), es recomendable aplicar rigidizante o utilizar fibra cerámica (colchas) tipo humedecidas para incrementar la resistencia a la fragmentación.

Cuando es usada fibra cerámica en la construcción de un recubrimiento, la placa de la cubierta interna será protegida de la corrosión con una capa de pintura anticorrosiva.

En zonas donde son instalados sopladores de hollín o lanzas de vapor, la fibra cerámica sin protección no será usada en la sección de convección.

Las juntas de expansión no serán continuas a través de la capa adyacente de fibra cerámica.

FUENTE: API STANDARD 560 Fired Heaters For Refinery Services.

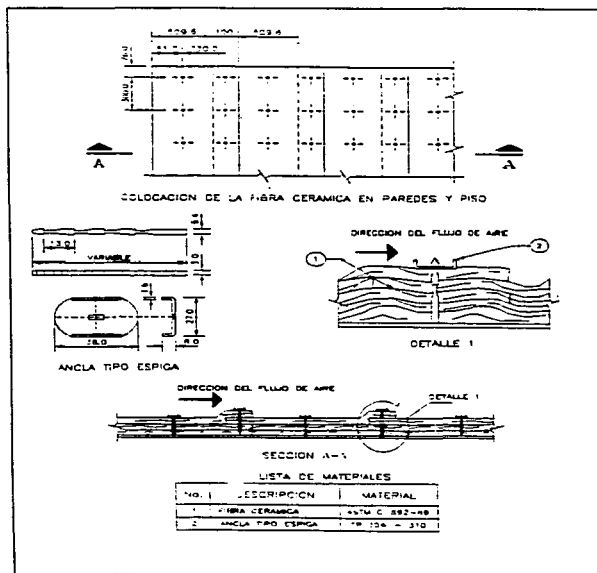


FIG. 3.4. AISLAMIENTO CON FIBRA CERAMICA

e) APLICACIÓN DE JUNTAS DE EXPANSIÓN

Todos los aislamientos refractario (concretos y ladrillos refractarios), deberán ser instaladas contemplando juntas de expansión transversales y longitudinales.

Las dimensiones de la junta deberán ser lo mas pequeñas posible, esto es de 3.0 mm 6.0mm y 13.0 mm.

La máxima área en la cual se debe colocar una junta alrededor es de 9.3 m² (3048.0 mmx3048.0 mm), sin embargo , si el aislamiento se expande mas de 13.0 mm, entonces se debe colocar mas juntas de expansión. Si los gases de combustión son muy corrosivos, se debe procurar tener un menor número de juntas, con la mas pequeña dimensión posible.

Cuando se tienen paredes compuestas con materiales diferentes(con diferentes coeficientes de expansión térmica), por ejemplo: concreto refractario y ladrillo, la pared de ladrillo deberá ser instalada sin que se una a la pared de concreto.

Las juntas de expansión deberán ser rellenadas con cualquiera de los siguientes materiales : fibra cerámica o lana mineral; ambas a granel.

FUENTE: API STANDARD 500 Fired Heaters For Refinery Services.

Especificación del material refractario:

Los materiales refractarios serán conforme a las siguientes especificaciones ASTM:

MATERIAL	ESPECIFICACIÓN
1. Ladrillo de arcilla cerámica.	ASTM C 64.
2. Ladrillo aislante.	ASTM C 155
3. Concreto refractario aislante.	ASTM C 401, Clase O, P ó Q.
4. Vermiculita (Análisis de gramo)	ASTM C 332 Grupo I (densidad).
5. Block aislante (lana mineral, PH neutro).	ASTM C 612 C/32
6. Mortero refractario.	ASTM C 64
7. Haydita.	ASTM C 332 Grupo Aplicación vaciada agregado fino No. 4. pistoleada combinado fino y grueso de 9.5 mm

Los siguientes materiales tendrán una composición de:

1. Lumnita o cemento de alúmina 40 % de Al_2O_3 .
2. Fibra cerámica 45-52 % Al_2O_3 , 46-53% SiO_3 .

3.2 PROCEDIMIENTO DEL CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CALOR A TRAVÉS DE LAS PAREDES DE UN HORNO SEGÚN A.S.T.M.

El procedimiento del cálculo del espesor consiste en considerar el espesor del sistema refractario, que nos lleva a interactuar con valores de temperaturas promedio para las capas de recubrimiento y así evaluar los cálculos de la pérdida de calor y verificar si efectivamente cumple con las condiciones de diseño.

Debido a las condiciones y requerimientos específicos de operación del calentador a fuego directo, se deberán seleccionar los materiales refractarios.

El calor generado en un horno es cedido al fluido de proceso, al contorno de las paredes y la chimenea. En este caso sólo es considerable la transferencia de calor por conducción a través de la pared en condiciones de equilibrio, los efectos de infiltración causados por la presión del horno, juntas de expansión, puertas de acceso, etc. no se toman en cuenta.

El calor es transmitido a través de las paredes del refractario, principalmente por conducción y después transmitido al aire ambiente y objetos cercanos por radiación y convección desde la superficie exterior de la pared, ocurriendo una caída de temperatura en ésta. La caída de temperatura a la superficie exterior del medio ambiente dependerá sobre todo de la resistencia que se ofrezca al flujo de calor.

3.2 PROCEDIMIENTO DEL CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CALOR A TRAVÉS DE LAS PAREDES DE UN HORNO SEGÚN A.S.T.M.

El procedimiento del cálculo del espesor consiste en considerar el espesor del sistema refractario, que nos lleva a interactuar con valores de temperaturas promedio para las capas de recubrimiento y así evaluar los cálculos de la pérdida de calor y verificar si efectivamente cumple con las condiciones de diseño.

Debido a las condiciones y requerimientos específicos de operación del calentador a fuego directo, se deberán seleccionar los materiales refractarios.

El calor generado en un horno es cedido al fluido de proceso, al contorno de las paredes y la chimenea. En este caso sólo es considerable la transferencia de calor por conducción a través de la pared en condiciones de equilibrio, los efectos de infiltración causados por la presión del horno, juntas de expansión, puertas de acceso, etc. no se toman en cuenta.

El calor es transmitido a través de las paredes del refractario, principalmente por conducción y después transmitido al aire ambiente y objetos cercanos por radiación y convección desde la superficie exterior de la pared, ocurriendo una caída de temperatura en ésta. La caída de temperatura a la superficie exterior del medio ambiente dependerá sobre todo de la resistencia que se ofrezca al flujo de calor.

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, PA. 15213.

En el interior del horno hay una caída de temperatura de los gases hacia las paredes, la cual depende de muchas variables tales como: La temperatura, naturaleza y espesor de flama, y si ésta choca o no contra las paredes, las condiciones de presión al interior del horno y otros factores.

La cantidad de calor por unidad de área transmitida por conducción a través de la pared, varía directamente con la diferencia de temperatura entre el exterior e interior de las superficies, la conductividad térmica del refractario y el aislamiento e inversamente con el espesor del mismo.

Las conductividades del refractario y los materiales aislantes son usualmente dados como una función de la temperatura promedio.

En la gráfica de la figura 3.5 se presenta gráficamente los datos de conductividad para tres tipos de materiales diferentes. Los valores dados en estas curvas son propiamente representativos.

El calor que fluye a través de la pared es transferido al aire ambiente y objetos; el valor del calor transferido depende de varios factores tales como: La temperatura de superficie y los alrededores, el porcentaje de circulación del aire a través de la pared, naturaleza de la superficie, etc.

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

CALCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO

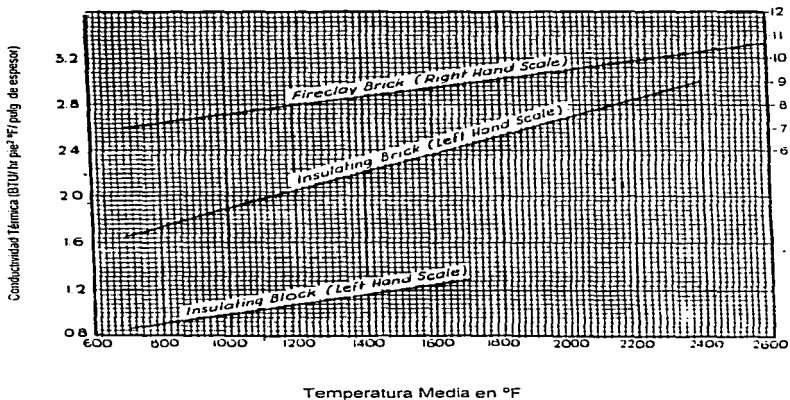


FIG. 3.5 Valores Asumidos de Conductividad Térmica

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

Ya que el valor total del calor transferido a través de la pared depende de la resistencia al flujo de calor de la superficie, es necesario para resolver el flujo simultáneo de calor a través de dos medios que son la pared y la superficie. El valor real del flujo de calor, es obtenido cuando la solución proporciona el mismo flujo de calor, a través de la pared y desde el exterior de la superficie.

El Método sugerido en este procedimiento para el cálculo de calor por las paredes de un horno en condiciones de equilibrio, es asumir una temperatura para la superficie exterior de la pared y calcular el flujo de calor que pasa por las paredes, para una temperatura media asumida de los componentes de la pared y sus conductividades.

El cálculo es comparado después con la pérdida de calor de la superficie exterior, por radiación y convección que ocurrirá cuando la temperatura de la superficie exterior sea la misma que se supuso. Si las pérdidas son iguales y la temperatura promedio de los componentes se aproximan, entonces los cálculos son correctos.

La pérdida por radiación de la superficie al aire del medio ambiente para una temperatura asumida de la superficie y el conocimiento de la temperatura ambiente, puede ser calculada con la fórmula conocida de Stefan-Boltzman.

$$h_r = 17.13 \times 10^{-10} \times \sigma (T_1^4 - T_2^4) \dots \dots \dots \text{ec. 3.1}$$

Donde:

h_r = Pérdida de calor por radiación BTU/hr ft², kcal/ hr m².

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa 15213.

CALCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO

c = Emisividad de la superficie, normalmente 0.95 para superficies de paredes de ladrillo refractario y cemento con acero corrugado (c es equivalente o igual a 0.28 para aluminio recién pintado).

T_1 = Temperatura exterior de la superficie °R(°F + 460).

T_2 = Temperatura del medio exterior en °R(°F + 460).

NOTA: Normalmente la temperatura ambiente es usada como T_2

La pérdida de calor a lo largo de la superficie por convección libre o natural o donde no actúa una corriente de aire sobre la superficie, puede ser obtenida para las mismas condiciones como sigue:

$$h_c = 0.53C(1/T_{avg})^{0.18} dt^{1.27} \dots\dots\dots ec. 3.2$$

Donde:

h_c = Pérdida del calor por convección BTU/hr ft²

C = Constante que depende de la forma de la superficie (para paredes verticales el valor es 1.35, para el arco o puente del horno es 1.79)

T_{avg} = Temperatura promedio entre la superficie y el aire del medio ambiente en °R

dt = Diferencia de temperatura entre la superficie de la pared y el aire del medio ambiente en °F.

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER. R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

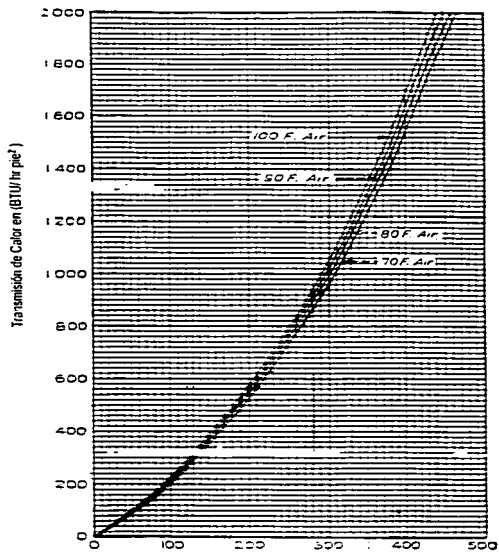


FIG. 3.5 Transmisión de calor sobre Superficies Verticales.

Diferencia de Temperatura entre la Superficie y el Aire en $^{\circ}\text{F}$.

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER. R. H. HELMAN, MILLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213

Para determinar con facilidad la pérdida de calor de la superficie, las fórmulas de radiación y convección para una pared vertical han sido combinadas para una emisividad de 0.95 y una temperatura de aire de 70 °F a 100 °F. Los resultados de los cálculos son mostrados en la gráfica de la figura 3.6.

El trabajo es conducido por transmisión de calor (convección) en varillas y cilindros. La convección forzada en superficies planas largas es especialmente para altas temperaturas. Como se define en la siguiente fórmula.

$$h_{rc} = 1 + 0.225V \dots \dots \dots \text{ec. 3.3}$$

h_{rc} = Transmisión de calor en BTU/hr ft² °F.

V = Velocidad del aire en ft/seg.

La fórmula de convección anterior, ha sido combinada con la fórmula de Stefan-Boltzman de radiación para obtener las curvas mostradas en la gráfica fig. 3.7, para un valor de emisividad de 0.95 y una temperatura de aire de 70 °F. estas curvas serán usadas en la determinación de la resistencia cuando la corriente de aire externo actúa sobre el horno.

Si consideramos la temperatura diferente a 70 °F, nuevas curvas deberán ser calculadas con la fórmula de arriba. La aplicación de los datos anteriores en el cálculo de la pérdida de calor por las paredes de un horno, se ilustra mejor con los siguientes ejemplos.

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

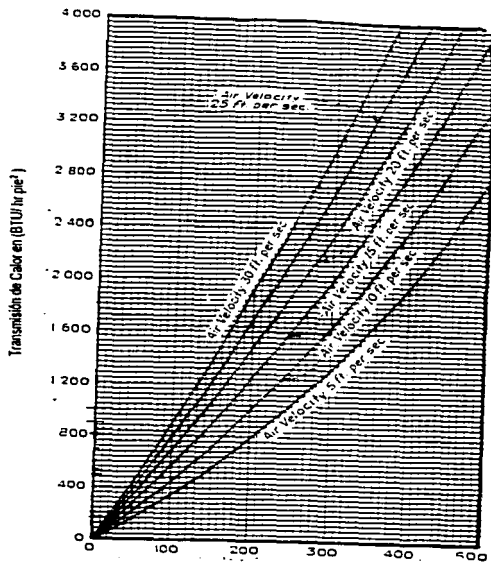


FIG. 3.7. Transmisión de calor en Superficies para Varias Velocidades

Diferencia de Temperatura entre la superficie y el Aire en °F

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

3.1.1. Ejemplo No. 1. Paredes con dos componentes.

Suponemos una pared de un horno construida de 13.5" de ladrillo de arcilla refractaria y 4.5" de ladrillo aislante. La temperatura interior de la pared del horno se supone de 2800 °F y el horno ha sido diseñado y construido de tal forma que las paredes son protegidas de la corriente del aire externo o de la radiación a altas temperaturas. La temperatura del aire será de 70 °F.

La fórmula para el flujo de calor a través de las paredes compuestas de dos o más materiales es la siguiente:

$$q = [t_1 - t_2] / (L_1 / k_1) + (L_2 / k_2) + \dots + (L_n / k_n) \dots \dots \dots \text{ec. 3.4}$$

Donde:

- q = Cantidad de calor conducido en BTU/ft² hr.
- t₁ = Temperatura de la superficie caliente en °F.
- t₂ = Temperatura de la superficie fría en °F.
- L₁, L₂, ...L_n = Espesor de cada capa de material en plgs.
- k₁, k₂, ...k_n = Conductividades de cada material en BTU/ft² hr °F de temperatura diferente por plg. de espesor.

La ecuación descrita anteriormente calcula las pérdidas de calor; es necesario primeramente suponer la temperatura exterior de la superficie (t₂) y la temperatura en la unión de los componentes de la pared, para después tener una estimación preliminar de la temperatura promedio de cada material, y así obtener la conductividad térmica correspondiente para cada temperatura promedio del material.

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa., 15213.

La primera parte del cálculo es realizada sobre suposiciones aproximadas, como si no conociéramos cuál será la temperatura exacta. Dentro de la primera suposición en las temperaturas en la cuales se lleva la unión (empalme) de los materiales; es posible hacer una suposición rápida de estas temperaturas que se están tratando de obtenerse por medio de espesores y conductividades relativas de los materiales. Para aislamiento de las superficies sujetas a altas temperaturas, la temperatura de la superficie exterior puede ser considerada en algunas ocasiones entre 250 °F a 350 °F (121°C a 177°C).

Para una temperatura de cara caliente de 2800 °F y suponiendo una temperatura de 2000 °F entre el ladrillo refractario y el ladrillo aislante, la temperatura promedio correspondiente del ladrillo refractario; deberá ser 2400 °F, mientras que para el ladrillo aislante la temperatura promedio deberá ser (2000 + 350)/2 ó 1175 °F.

La conductividad de ambos ladrillos a estas temperaturas promedio que asumimos, están tomadas de la gráfica de la figura 3.5, y los cálculos de este primer ensayo son los siguientes:

$$q_1 = (2800 - 350) / [(13.5/10.25) + (4.5/2.03)]$$

$$q_1 = 2450 / (1.32 + 2.21) = 694 \text{ BTU/ft}^2 \text{ hr. (1882.54 kcal/m}^2 \text{ hr).}$$

La caída de temperatura desde la superficie exterior de la pared ocasionada por el aire circundante para una pérdida de calor de 694 BTU se obtiene de la gráfica de la figura 3.6, la cual debe ser 242 °F. La temperatura en la superficie es por lo tanto $242 + 70$ °F (Temperatura ambiente) ó 312 °F.

Después de que asumimos una temperatura inicial de 350 °F, deseamos considerar una temperatura más aproximada a 312 °F, digamos 320 °F y realizar los cálculos considerando las bases anteriores; Esto es aconsejable ya que el error obtenido en la estimación original de la temperatura de la superficie no afectó únicamente a la temperatura de la superficie interna, sino también influye al seleccionar el valor de la conductividad térmica por lo que un recálculo ayuda a disminuir estos errores .

Con los valores obtenidos del recálculo se determina que la caída de temperatura a través de la pared será de 2480 °F , (esto es $2800 - 320$ °F) y el flujo térmico para nueva temperatura en la superficie será de 2480 °F, dividida por la resistencia de la pared $[(13.5/10.25) + (4.5/2.03)]$, tal como fue obtenida anteriormente, o sea $2400/3.53 = 702$ BTU, (1904. 17 kcal/m² hr); Entonces si la caída de temperatura a través de cada material es igual al flujo térmico por la resistencia actual de cada material, tenemos que:

Tabla 3.3. Tabla de cálculo de temperaturas obtenidas

Caída de temperatura a través de:	Temperatura De cara caliente °F.	Temperatura De cara fría °F.	Temperatura Promedio °F.
Ladrillo refractano $702 \times 1.32 = 928$ °F	2800	1872	2336
Ladrillo aislante $702 \times 2.21 = 1552$ °F	1872	320	1098

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

Los valores de la conductividad térmica para cada ladrillo fueron obtenidos de la gráfica de la figura 3.5. de acuerdo a las temperaturas promedio obtenidas, por lo tanto el flujo térmico es el siguiente:

$$q_2 = (2800 - 320) / [(13.5 / 10.15) + (4.5/1.96)]$$

$$q_2 = 2600 / (1.29 + 1.76 + 2.18)$$

$$q_2 = 501 \text{ BTU/ft}^2 \text{ hr, (1358.96 kcal/m}^2 \text{ hr).}$$

3.1.2. EJEMPLO NO. 2 PARED DE TRES COMPONENTES.

Considerar una pared de 13.5" de espesor de ladrillo refractario, 4.5" de ladrillo aislante y 2" de block aislante. Se asume una temperatura de superficie en la cara interna de la pared de 2800 °F y la superficie externa la cual está encapsulada por un casco de acero está expuesta a una corriente de aire de 15 ft/s o ligeramente superior a 10 mph. Se considera que el aire tiene una temperatura de 70 °F. Para este caso se tiene una corriente de aire bastante lenta sobre la superficie externa lo cual incrementa la pérdida de calor.

Para la primera parte del cálculo se propone una temperatura externa sobre la superficie de 180 °F y una temperatura de 2200 °F sobre la cara más fría del ladrillo refractario, mientras que para el ladrillo aislante la cara más fría tiene una temperatura de 1500 °F, la temperatura promedio de todos estos materiales asumidas anteriormente son las siguientes:

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

CALCULO DEL ESPESOR PARA EL RECUBRIMIENTO REFRACTARIO

Ladrillo refractario: $(2800 + 2200) / 2 = 2500 \text{ }^\circ\text{F.}$

Ladrillo aislante: $(2200 + 1500) / 2 = 1850 \text{ }^\circ\text{F.}$

Block aislante: $(1500 + 180) / 2 = 840 \text{ }^\circ\text{F.}$

Las conductividades térmicas respectivas para las temperaturas promedio fueron obtenidas de la gráfica de la fig. 3.5 desarrollándose la primera parte del cálculo así:

$$q_1 = (2800 - 180) / [(13.5/10.25) + (4.5/2.26) + (2.0/0.92)]$$

$$q_1 = 2620 / (1.29 + 1.76 + 2.18)$$

$$q_1 = 501 \text{ BTU/ft}^2 \text{ hr. (1358.96 kcal/m}^2 \text{ hr).}$$

La caída de temperatura de la superficie exterior por el aire circundante para una pérdida de calor de 501 BTU, es encontrada por medio de la fig. 3.7 y es de 88 °F de temperatura de la superficie y por lo tanto: $88 + 70 \text{ }^\circ\text{F} = 158 \text{ }^\circ\text{F.}$

Ahora utilizaremos el valor de 158 °F para hacer el recálculo de acuerdo a las bases anteriormente descritas. La caída de temperatura por la pared será ahora de 2642 °F, mientras que el flujo térmico es $2642/5.23 = 505 \text{ BTU.}$ Donde 5.23 representa la resistencia total de la pared.

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

Ya que la caída de temperatura a través de cada material es igual que la del flujo térmico; tenemos los siguientes valores:

Tabla 3.4. Tabla de cálculo de temperaturas obtenidas

Caída de temperatura a través de:	Temperatura de cara caliente °F.	Temperatura de cara fría °F.	Temperatura Promedio °F.
Ladrillo refractario 505 x 1.24 = 652 °F	2800	2148	2474
Ladrillo aislante 505 x 1.76 = 889 °F	2148	1259	1704
Block aislante 505 x 2.18 = 1101 °F	1259	158	708

Los valores de la conductividad térmica de cada material fueron tomadas de la gráfica de la fig. 3.5 de acuerdo a la temperatura promedio, por lo tanto:

$$q_2 = (2800-158) / [(13.5/10.4) + (4.5/2.45) + (2.0/0.86)]$$

$$q_2 = 2642 / (1.3 + 1.84 + 2.33)$$

$$q_2 = 483 \text{ BTU/ft}^2 \text{ hr. (1310.14 kcal/m}^2 \text{ hr.)}$$

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HELLMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

De la gráfica de la figura 3.7 se observa para una pérdida de calor de 483 BTU, la caída de temperatura es de 85 °F, entonces la temperatura de la superficie es 155 °F y una resistencia total de la pared de 5.47, por lo que: $2645/5.47 = 484 \text{ BTU}/\text{ft}^2 \text{ hr}$.

Los gradientes de temperatura y temperaturas promedio para los flujos térmicos (q) anteriores y las resistencias individuales son las siguientes:

Tabla 3.5. Tabla de cálculo de temperaturas obtenidas

Caída de temperatura a través de:	Temperatura de cara caliente °F.	Temperatura De cara fría °F.	Temperatura Promedio °F
Ladrillo refractario $484 \times 1.3 = 628 \text{ °F}$	2800	2172	2486
Ladrillo aislante $484 \times 1.84 = 890 \text{ °F}$	2172	1282	1727
Block aislante $484 \times 2.33 = 1127 \text{ °F}$	1282	155	719

La temperatura promedio asumida anteriormente concuerda muy bien con la temperatura promedio calculada arriba, también la temperatura de la superficie exterior no cambiará por una variación en el flujo térmico de 483 BTU. La pérdida de calor a través de la superficie de la pared es por lo tanto $484 \text{ BTU}/\text{ft}^2 \text{ hr}$.

ESTA PROPUESTA ES BAJO LA JURISDICCION DE ASTM COMMITTEE ON HEAT TRANSFER, R. H. HEILMAN, MELLON INSTITUTE, PITTSBURGH, Pa. 15213.

CAPITULO IV

ANÁLISIS TEÓRICO DEL CÁLCULO DE ESPESOR ECONÓMICO

4.1. CONCEPTO DE ESPESOR ECONÓMICO.

La energía que se consume en la operación de equipos de combustión representa para cualquier empresa los gastos de mayor importancia, por ello se han concertado esfuerzos en la parte industrial para reducir el uso del combustible, de tal manera, en la instalación de material aislante para equipos de combustión, se debe evaluar técnica y económicamente el espesor óptimo para un periodo de tiempo que nos represente el mejor aprovechamiento de la energía, de ahí que se pueda efectuar la mejor selección de aislamiento .

El aislamiento juega un papel preponderante en equipos de combustión, ya que este estará en función del espesor por lo tanto el espesor económico estará en función de los costos de operación por pérdidas de calor y costos fijos de inversión de material aislante.

De esta forma, que al tener menos pérdidas de calor con el óptimo espesor, determinaremos el espesor económico, estas pérdidas pueden ser reducidas por la nueva construcción y la posible reconstrucción para aplicar el material aislante y obtener el máximo beneficio económico.

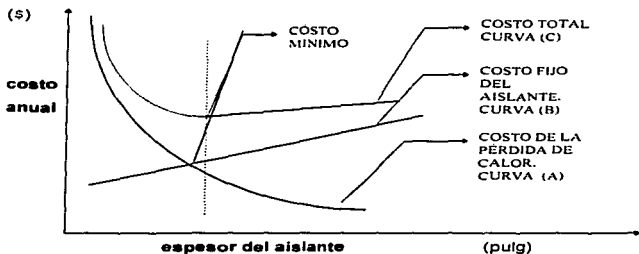


FIGURA 4.1. PUNTOS CRÍTICOS DEL ESPESOR ECONÓMICO

"La figura 4.1 ilustra el problema gráficamente. Se muestra como al aumentar el espesor del material curva (B), en consecuencia, el costo de la pérdida de calor disminuye (A), y viceversa si aumenta el costo de operación por pérdidas de calor decrece el espesor de aislamiento. Si después, se realiza la suma de las dos curvas el resultado es una curva del costo total, es decir, la suma de los costos anuales de operación por pérdidas de calor y de los costos fijos de inversión del aislante"⁹.

El punto del costo mínimo es la intersección entre las curvas (A) y (B) de costos fijos de adquisición y de operación, el cuál representa el equilibrio de los costos anuales de inversión, en otras palabras es la mejor inversión al menor costo.

⁹THE EFFECTIVE USE OF INSULATING, NEAL JAMES E.
Johns-Manville Refractory Products. pag. 5

4.2. DETERMINACIÓN DEL ESPESOR ECONÓMICO

Para determinar el espesor económico del material de aislamiento es necesario conocer los diferentes criterios o variables aplicables:

- Costo del combustible (protegido las unidades a media vida).
- Costo de la moneda.
- Capital invertido.
- Tiempo de depreciación.
- Costo de mantenimiento del sistema de aislamiento.
- Eficiencia del sistema térmico.

Calculando los costos fijos de material y de la pérdida de calor para varios espesores de aislamiento nos permitirá determinar el espesor económico, siendo trivial esta decisión, consiste en elegir el costo total más bajo.

Si queremos calcular el espesor con exactitud, debemos realizar un análisis que podrá manejarse como un problema matemático, del cual la solución de la ecuación que se realice indicará la que tenga el costo anual mínimo; con frecuencia el aumento del espesor de aislamiento tiene el fin de hacer aumentar la eficiencia en los equipos de combustión, por esta razón disminuyen los costos de operación, estas funciones son de la misma variables de diseño.

El espesor es directamente proporcional al costo del material e inversamente proporcional al costo de la pérdida de calor.

$$\text{costo total (anual)} = Ax + B/x \dots \text{ec. 4.7}$$

x = La variable de diseño (espesor).

A, B son constantes.

Puede observarse como el costo de inversión Bx aumenta linealmente con la variable de diseño x y que los costos futuros A/x disminuyen hiperbólicamente con x .

B/x = costo anual de la pérdida de calor en función del espesor.

Ax = costo fijo anual del material en función del espesor.

$$C = Ax + B/x \dots \text{ec. 4.8}$$

Derivando la función con respecto al variable de diseño (x) nos queda:

$$A - B/x^2 = 0 \dots \text{ec. 4.9}$$

Despejando x tenemos:

El despeje nos dará la variable de diseño (espesor más económico)

$$x = [(B/A)]^{1/2} \dots \text{ec. 4.10}$$

Donde x = El mejor espesor económico.

FUENTE: INGENIERIA ECONOMICA, TAYLOR GEORGE A., LIMUSA, PAG. 295-299.

4.2 ANÁLISIS DE COSTOS

4.2.1 ANÁLISIS DE COSTOS FIJOS DEL MATERIAL AISLANTE

"Ciertos costos para cada operación no varían con los cambios de producción; dentro de ciertos límites, son independientes de la actividad y la utilización del equipo. Como puede esperarse, los costos de inversión se clasifican naturalmente como costos fijos; todos los costos generales se ajustan a esta clasificación, debido a que el mantenimiento, mano de obra, impuestos etc. no varían con ciertos cambios en la producción"⁷.

Los costos fijos se refieren a los gastos que se expresan en función de la inversión de adquisición donde se incluyen costos de instalación e indirectos como un porcentaje del costo de aislante, la amortización del capital y deterioro del aislamiento ocasionado por mantenimiento al equipo.

⁸"Para calcular los costos fijos del aislante tenemos las siguientes fórmulas":

$$CF = Cm(1+B)F \dots \dots \dots \text{ec. 4.1}$$

$$B = R+M \dots \dots \dots \text{ec. 4.2}$$

$$R = (r) / [1 - (1+r)^{-n}] \dots \dots \dots \text{ec. 4.3}$$

donde:

F = Factor de porcentaje para costos de fletes, instalación, acabados directos e indirectos.

⁷INGENIERIA ECONOMICA, TAYLOR GEORGE A., LIMUSA, PAG. 283

⁸El seminario de ingeniería mecánica petrolera. Pérez A. Fco., Cardona Roberto. I. M. P., PAG. 104

CF=Costos fijos del aislante

Cm = Costos de material

B = Amortización de capital

R = Deterioro del aislamiento

M = Mantenimiento al equipo

r= Interés anual

El estudio económico comienza con la estimación de los costos de adquisición del material, ya que tanto los costos de la inversión inicial dependen de la tecnología seleccionada. Continúa con la determinación de la depreciación y amortización de la inversión inicial.

A continuación se describe los costos a considerar para el análisis de costos fijos del aislante:

a) COSTOS DE INSTALACIÓN

Cuantificación de los materiales.

Se deben preparar los presupuestos estimados con base en los planos y especificaciones.

Los materiales que se aplican en cada operación como ladrillos aislantes, fibra cerámica, concretos armados o monolíticos, deberán estar catalogados separadamente con sus cantidades correctas de acuerdo con su clasificación y costos unitarios. Si los precios de los materiales no incluyen los costos de transporte, el estimador deberá incluir los costos aproximados para trasladarlos hasta el sitio de la obra.

Especificaciones.

Consideremos como especificación la descripción detallada de características y condiciones mínimas de calidad que debe reunir un producto.

b) Costo de la mano de obra.

El costo de la mano de obra para un proyecto deberá estimarse dividiendo el proyecto en sus diferentes etapas de realización como en construcción pueden ser cimbras para el concreto, tabique común, tabique de recubrimiento etc. Estimando el costo de la mano de obra para cada operación. Todo esto requerirá del cálculo de horas-hombre.

Es o no recurrente a incurrir en altos costos de instalación a favor, esto depende de varios factores que imperan, tales como los presupuestos disponibles, las restricciones de ingeniería, las concesiones de capital, las tasa de interés, y las utilidades anticipadas. En general, mientras más larga es la vida de una instalación de construcción, se justifica más un gasto inicial debido a que el costo de instalación se amortizará durante un periodo mas largo , y por lo tanto se tiene más tiempo para que se pague a sí mismo.

c) Costos del material aislante

Al realizar un proceso productivo, integramos materiales semielaborados como los concretos monolíticos, fibra cerámica a granel , y elaborados como pueden ser ladrillos aislantes, mano de obra y equipo para obtener un producto; por lo tanto los precios base de los materiales, serán componentes de un costo

unitario con valores en función del tiempo y del lugar de aplicación, es muy probable que en el transcurso de ejecución de una obra, los materiales que la integren sufren variaciones en el precio de compra, en caso significativo, deberá realizarse un nuevo análisis y valorar su consecuencia.

d) Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento y reparación incluyen los gastos para partes de repuesto y mano de obra requerida para mantener el equipo en buenas condiciones de trabajo. Estos costos variarán considerablemente de acuerdo al tipo de equipo y el servicio para que se usa. Se incurre en costos de mantenimiento y modificaciones para conservar la planta en su nivel de rendimiento y utilización o actualización con un grado aceptable de fiabilidad: Cuidando el diseño de los componentes se puede obtener una gran reducción en el costo del mantenimiento

e) Costos de depreciación.

La depreciación es la pérdida en el valor del equipo como resultado del uso o desgaste. En el sentido del valor, se refiere a las pérdidas causadas por el deterioro y la obsolescencia. Se deberá amortizar el costo de la instalación durante su vida útil.

Causas físicas:

- a) Avería física: Puede ser por accidentes diversos y desastres.
- b) Envejecimiento debido a: Deterioro físico y desgaste.

El deterioro físico se debe a agentes químicos o mecánicos que dejan sentir sus efectos con el tiempo. Los desgastes se deben a fenómenos de rozamiento, choque, vibración o fatiga de los materiales. En el estado de deterioro influyen principalmente la edad y el uso, predominando este último.

Uso práctico del fondo de amortización.

Los fondos de amortización no se crean con utilidades o reservas de depreciación.

Algunos proyectos públicos requieren que se establezca un fondo de amortización real, independiente de todos los demás ingresos, con el fin de asegurar el reemplazo eventual del equipo y evitar emplear los fondos para otros fines.

Es probable que la tasa de interés pagada sobre el dinero del fondo de amortización no sea la misma que la que deba pagarse sobre el costo inicial

FUENTE: INGENIERIA ECONOMICA, ARBONES EDUARDO., MARCOMBO, PAG. 87

f) Costo del interés o del dinero.

El rendimiento sobre la inversión, consta de dos elementos que son interés y utilidad; el primero representa el costo del dinero, el segundo una recompensa por el riesgo y la incertidumbre.

factor de recuperación de capital por aislamiento

¹²El cálculo para factor recuperación inversión de aislamiento es el siguiente¹²:

$$C_n = [(r) (1+r)^n / ((1+r)^n - 1)] \dots \dots \dots \text{ec. 4.4}$$

Donde r = Porcentaje de interés 12% (varía)

n = Vida del refractario instalado en años

C_n = Factor de recuperación de capital por aislamiento \$/año/\$.

Se toma el 3 % en comisión de mantenimiento al sistema aislante.

El factor total de aislamiento comisionado es:

Donde:

$$\theta = C_n + i \text{ (Factor total)}$$

C_n = Factor de recuperación de capital

i = Comisionado para mantenimiento.

¹²INGENIERIA ECONOMICA . TAYLOR GEORGE A . LIMUSA . PAG. 52

4.2.2. COSTOS DE OPERACIÓN

En la estimación de los costos de operación tomaremos en cuenta sólo los costos de energía por pérdidas de calor sin demeritar los costos de electricidad.

Para los costos de la pérdida de calor se tienen las siguientes fórmulas:

$$\text{Costos de operación} = q \times h \times c \dots \dots \dots \text{ec. 4.5}$$

donde:

q = pérdida de calor

h = horas anuales de operación

c = Costo indirecto de energía para una corriente de proceso, vapor de agua o combustible \$/ mmBtu aprovechados.

$$c = a (1+t)FE \dots \dots \dots \text{ec. 4.6}$$

donde:

a = \$ / mm btu liberados por el combustible

t = % de incremento anual del costo de combustible

FE= Factor de eficiencia del sistema = 1/(eficiencia)

FUENTE: El seminario de ingeniería mecánica petrolera. Pérez A. Fco. Cardona Roberto
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO. PAG. 103

4.5. AHORRO DE ENERGÍA

Cada incremento adicional de material aislante resulta en beneficio del ahorro de energía reduciendo la pérdida de calor por menos cantidad de combustible utilizado.

La adición de espesor de aislante para la cara fría es poco costosa en instalarse, son de larga vida y es de ayuda en la seguridad del personal, sin embargo para un Calentador A Fuego Directo en operación por cada incremento adicional de aislamiento, la temperatura de interface del sistema podría causar algunas fallas en las capas adyacentes ya que se excedería su temperatura límite.

La Adición de aislante en la cara caliente produciría que los elementos del sistema bajarán el rango de temperatura de uso y la resistencia de cada elemento aislante sería incrementada: Sin embargo, reduciría el volumen interior del calentador a fuego directo lo cuál provocaría alterar las condiciones de servicio y esto afectaría al sistema aislante.

Una cantidad dada de resistencias adheridas en diferentes zonas del sistema daría algún mejoramiento a la eficiencia térmica del equipo.

El aislante más caro no es siempre es el óptimo, la solución eficaz para tomar una decisión al elegir el aislamiento son las evaluaciones previas y los resultados puede variar para cada aplicación, en ciertos casos pueden o deben tomarse en consideración varias alternativas al mismo tiempo, para determinar cuál de ellas es la más económica.

FUENTE: THE EFFECTIVE USE OF INSULATING. NEAL JAMES E., Johns-Manville Refractory Products, pag. 5

CAPITULO V

EJEMPLO DE APLICACIÓN

5.1 CRITERIOS DE INSTALACIÓN DE RECUBRIMIENTO REFRACTARIO

Como ejemplo de aplicación y efectos de cálculo se tomó el reemplazo de recubrimiento refractario en un Calentador A Fuego Directo de Pirólisis.

Existen diversas razones para reemplazar el recubrimiento refractario en el equipo, ya que puede presentarse una instalación deficiente o fallas en el refractario por operar el equipo bajo condiciones que sobrepasan las estimadas en el diseño, por procesos impropios de operación o simplemente la eficiencia de operación de los equipos es muy baja, lo que hace muy alto los costos de operación, entonces el cambio de instalación de las zonas dañadas o la reinstalación total total sería de las alternativas a elegir.

El deterioro del recubrimiento refractario podría ser debido a la contracción, la excesiva vitrificación y la escoria producida por el desgajamiento de los materiales; un cambio en el diseño del recubrimiento refractario mejoraría la eficiencia térmica del calentador y eliminaría áreas vulnerables, donde el calor generado por los quemadores no se aprovecha.

El cambio más factible para reemplazar el recubrimiento en los Calentadores A Fuego Directo es efectuar una evaluación previa de las condiciones de operación del Calentador, para seleccionar debidamente los materiales refractarios aislantes.

FUENTE: Neal J. E., Manville Products Corp., Denver, Colo.

A continuación se describen diferentes tópicos de instalación de material refractario y anclaje:

a) LADRILLO AISLANTE:

Un ladrillo poroso producido por la mezcla de aserrín y alta alúmina combinadas con excelente resistencia estructural, tiene buenas características de aislante térmico.

Los muros son sujetados por ángulos de acero colocados horizontalmente, el cuál reciben el nombre de anclas. Otro método de sujeción es por medio de tirantes de acero anclados a la placa de acero exterior del calentador, a través de las perforaciones prediseñadas en los ladrillos a intervalos equidistantes en el área del muro. Usualmente puede aplicarse el acuñamiento en ladrillo, lo cuál se efectúa cuando el ladrillo es usado en las curvaturas de los muros. Estos métodos se pueden eliminar con el respaldo de ganchos y tirantes.

A menudo un respaldo el block aislante de lana mineral es utilizado para mejorar la calidad de aislamiento en los muros de ladrillo aislante refractario y block aislante es aceptado como un estándar en la instalación para una alta temperatura en la instalación en calentadores a fuego como reformadores de flujo de hidrocarburo y calentadores de pirólisis.

b) FIBRAS CERÁMICAS:

El reciente desarrollo de materiales de aislamiento para calentadores a fuego directo, el avance tecnológico en procesos de manufactura en fibras cerámicas donde se mejoran las propiedades mecánicas y térmicas como

resistencia a la abrasión, resistencia al choque térmico y disgregación son utilizadas con éxito en calentadores.

Para que tengan su efecto las propiedades de las fibras cerámicas se humedecen con aceite y agua, este proceso se completa cuando es secado el material; los productos hechos de fibra cerámica tienen un alto porcentaje de fibras entretrejidas.

La fibra cerámica es más porosa que el concreto aislante, esto es para prevenir la protección del revestimiento interno en la cubierta de la placa y para prevenir la corrosión. Otra ventaja inmediatamente disponible para la operación son los procedimientos especiales como el curado, secado o precaución con agua fría.

La instalación de fibra cerámica no podría ser empleada en la sección de convección se quema con el tizne o el lanzamiento de los gases de combustión.

c) CONCRETOS REFRACTARIOS:

Los concretos refractarios son de especial cuidado por la cantidad de agua que debe suministrar para el mezclado de todos los constituyentes para formar el conglomerado en la zona de instalación; el tiempo de mezclado, la temperatura adecuada para calentar el producto, esto nos ayuda a conseguir las propiedades deseadas; La forma de aplicación es en torrencial o en lanzamiento del mezclado del material hacia las paredes del calentador.

FUENTE: Neal J. E., Manville Products Corp., Denver, Colo.

Completando la operación de mezclado por adición de agua con todos los constituyentes para formarlo en la zona y calentar el producto para conseguir las propiedades deseadas; Es muy importante es el control de la consistencia del material a colarse. "La misma se determina mediante el procedimiento 'bola de mano' ; Se toma un puñado sobrado del material y se moldea formando una bola , esta se lanza al aire volviéndola a coger, en esta maniobra la bola no debe resquebrajarse (indicio de falta de agua) ni escurrirse entre los dedos (exceso de humedad). El material dentro de la mano debe formar una bola más o menos redonda y lisa."⁹

Las desventajas del aislamiento de concreto refractario aplicado en torrencial o lanzamiento en paredes de calentadores generalmente son considerados las más comunes.

El concreto refractario en mezcla es de bajo costo y tiene excelente calidad de aislamiento que estriba en la composición de lumnita-haydita-vermiculita.

La función básica del sistema de anclaje en el recubrimiento es para sostener el material en una posición estable y amoldarse a la estructura, ayuda a neutralizar los esfuerzos cíclicos (desgaste) y térmicos (disgregación) en el material, y la vibración mecánica.

Características de aplicación del Concreto Refractario:

- 1.- La selección de un Concreto Aislante.
- 2.- El anclaje en el sistema.
- 3.- la persona que va aplicar el concreto.

⁹LOS PARAMETROS DE REFRACTARIOS MOLDEABLES Y PREFABRICADOS, IAN KNIZEK, BARRO MEX. S.A. DE C.V.

5.2 CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO

Debido a que muchos de estos problemas están en función de las relaciones entre el diseño del equipo y la capacidad del material del refractario, comprendiendo lo básico en campo de materiales refractarios aislantes y la cualidades del horno, así como sus requerimientos y características fundamentales es indispensable.

ESPACIO DE COMBUSTIÓN

El insuficiente espacio de combustión, frecuentemente referido como condición de la presión, es una causa común para la fractura del sistema refractario, esencialmente el promedio de calor que es liberado en el espacio de combustión es absorbido por los tubos, disipando a través de los muros del horno o transportando los gases de la chimenea hacia fuera, inevitablemente bajo tales condiciones de temperatura el muro refractario aprovecha la temperatura de la flama (generalmente hasta 3000 °F) y tal temperatura se disolverá en los refractarios muy rápidamente, especialmente si es emparejado con impurezas o escorias de las cenizas del combustible.

CONTROL DE TEMPERATURA:

El espacio de combustión en teoría opera a temperatura uniforme, esto raramente ocurre en la práctica, se necesitan varios termocoples para controlar la temperatura en la flama

5.2 CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO

Debido a que muchos de estos problemas están en función de las relaciones entre el diseño del equipo y la capacidad del material del refractario, comprendiendo lo básico en campo de materiales refractarios aislantes y la cualidades del horno, así como sus requerimientos y características fundamentales es indispensable.

ESPACIO DE COMBUSTIÓN

El insuficiente espacio de combustión, frecuentemente referido como condición de la presión, es una causa común para la fractura del sistema refractario, esencialmente el promedio de calor que es liberado en el espacio de combustión es absorbido por los tubos, disipando a través de los muros del horno o transportando los gases de la chimenea hacia fuera, inevitablemente bajo tales condiciones de temperatura el muro refractario aprovecha la temperatura de la flama (generalmente hasta 3000 °F) y tal temperatura se disolverá en los refractarios muy rápidamente, especialmente si es emparejado con impurezas o escorias de las cenizas del combustible.

CONTROL DE TEMPERATURA:

El espacio de combustión en teoría opera a temperatura uniforme, esto raramente ocurre en la práctica, se necesitan varios termocoples para controlar la temperatura en la flama

CONDICIONES DE DISEÑO

Las parámetros de diseño que nos permitirán efectuar los cálculos y seleccionar los materiales refractarios aislantes en Calentador A Fuego Directo de Pirólisis son :

Temperatura de diseño del hogar	= 1800 °F
Temperatura de placa exterior	= 200 °F
Temperatura ambiente	= 80 °F
Velocidad del viento	= 70 °F
Tipo de atmósfera en la cámara	= Reductora
Combustible a quemar	= Combustóleo pesado
Ppm de Vanadio	= 386 - 394
% en peso de S ₂	= 3.65
% en peso de cenizas	= 0.25 -3

5.3. CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CALOR

Calcular las pérdidas de calor a través de las paredes del calentador seleccionando los materiales refractarios que permitan un óptimo aprovechamiento del calor generado por los quemadores proporcionando una seguridad en su operación.

Haciendo el cálculo de la pérdida de calor por convección y radiación tenemos:

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}}$$

$$Q_{\text{conv}} = 0.53 C (1/T_{\text{avg}})^{0.18} dt^{1.25} \text{ Btu/hr ft}^2$$

$$Q_{\text{rad}} = 17.13 \times 10^{-10} c (T_1^4 - T_2^4) \text{ Btu/hr ft}^2$$

$$Q_{\text{rad}} = [17.13 \times 10^{-10}] [0.95] [(640)^4 - (540)^4]$$

$$Q_{\text{rad}} = 134.649 \text{ Btu/hr ft}^2, (365.23 \text{ kcal/hr m}^2)$$

$$Q_{\text{conv}} = 0.53 (1.79) [1/130]^{0.18} [180-80]^{1.25}$$

$$Q_{\text{conv}} = 124.922 \text{ Btu/hr ft}^2, (338.85 \text{ kcal/hr m}^2)$$

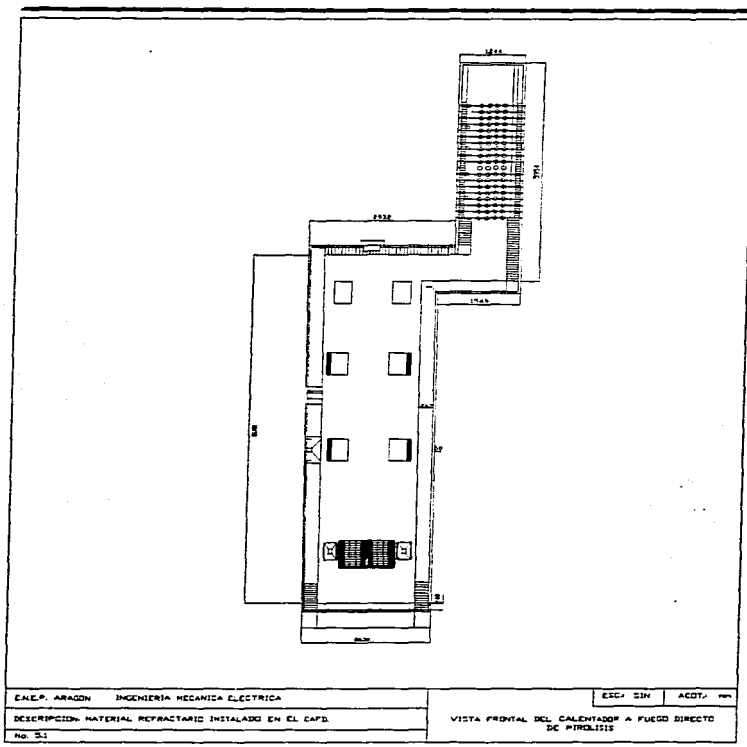
$$Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} = \underline{259.57 \text{ Btu/hr ft}^2}, (704.08 \text{ kcal/hr m}^2)$$

5.3.1. SELECCIÓN DE MATERIALES Y ESPESORES.**Diferentes secciones del calentador a fuego directo:**

1.- Piso	Espesor
Ladrillo Empire Alta Calidad	5"
Ladrillo Refractario Aislante T-20	5"
Block Aislante de Lana Mineral	2"
2.- Paredes laterales	Espesor
Ladrillo refractario Aislante T-23	10.5"
Block Aislante de Lana Mineral	2"
3.- Techo convección	Espesor
Concreto Aislante (composición lumnita-Haydita-Vermiculita)	2"
Block Aislante Lana Mineral	1.5"
4.- Paredes laterales de convección	Espesor
Ladrillo Refractario Aislante T-23	2.5"
Block Aislante Lana Mineral	1.5"

A continuación en la Figura 5.1 se muestran los espesores de material para las diferentes zonas del calentador a fuego directo:

EJEMPLO DE APLICACION



METODOLOGIA PARA EL CALCULO DE ESPESORES DE MTLs. REFRACT. AISL. EN CAPD

5.3.2. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN LAS DIFERENTES ZONAS

Como el Calentador de Pirólisis tiene diferentes espesores en las zonas de radiación (piso, paredes laterales,) y en la zona de convección (paredes laterales, techo) se hicieron los cálculos correspondientes para cada zona.

1.- PISO

Asumimos una temperatura de 200 °F para la superficie exterior y se calcula el flujo de calor que pasa por los espesores de la pared para una temperatura media de los componentes.

Temperatura de diseño del hogar es de 1900 °F

Calculando las temperaturas medias asumidas en base a este dato obtener de la gráfica (fig. 3.1 capítulo III) sus respectivas conductividades.

$$T_{m_1} = (T_1 + T_2) / 2 = (1900 + 1000) / 2 = 1450 \quad .k_1 = 2.9 \quad \text{Ladrillo Refractario}$$

$$T_{m_2} = (T_2 + T_3) / 2 = (1000 + 400) / 2 = 700 \quad .k_2 = 1.65 \quad \text{Ladrillo Aislante}$$

$$T_{m_3} = (T_3 + T_4) / 2 = (400 + 200) / 2 = 300 \quad .k_3 = 1.2 \quad \text{Block Aislante}$$

Calculando el flujo de calor:

$$Q = (1900 - 180) / [(5/2.9) + (5/1.65) + (2/1.2)] = 268.918 \text{ Btu/hr ft}^2, (729.44 \text{ kcal/hr m}^2)$$

Obteniéndose de la gráfica (figura 3.2 capítulo III) el ΔT , para 268.918 Btu/hr ft², se prosigue a calcular la temperatura aproximada de la superficie exterior.

$$\begin{aligned}\Delta T &= 130 \\ 130 &= T - 80 \\ T &= 130 + 80 = 210 \text{ } ^\circ\text{F}\end{aligned}$$

Calculando la temperatura entre capas

$$\begin{aligned}261 &= (1900 - T_2) / (1.7857) \\ \text{Despejando } T_2 & \\ T_2 &= 1432.179 \text{ } ^\circ\text{F}\end{aligned}$$

Recalculando con la nueva temperatura de superficie exterior y sustituyendo en la ec. de transferencia de calor por Conducción tenemos:

$$Q = (1900 - 210) / (6.68) = 252.99 \text{ Btu/hr ft}^2$$

$$\begin{aligned}\Delta T &= 120 \\ 120 &= T - 80 \\ T &= 120 + 80 = 200 \text{ } ^\circ\text{F}\end{aligned}$$

Calculando el flujo de calor para una temperatura de 200 °F

$$Q = (1900 - 200) / (6.68) = \underline{254.49 \text{ Btu/hr ft}^2} \quad (690.304 \text{ kcal/hr m}^2)$$

Calculando la temperatura de entre capas de ladrillo aislante y block aislante.

$$\begin{aligned}254.49 &= (1445.56 - T_3) / (3.2258) \\ T_3 &= \underline{\underline{624.625 \text{ } ^\circ\text{F}}}\end{aligned}$$

2.- PAREDES**MATERIALES PROPUESTOS:**

10.5" de espesor de ladrillo refractario aislante

2" de espesor de block aislante de lana mineral

Cálculo de la pérdida de calor.

Asumimos una temperatura de 200 °F para la superficie exterior y se calcula el flujo de calor que pasa por los espesores de la pared para una temperatura media de los componentes.

Temperatura de diseño del hogar es de 1900 °F

Calculando las temperaturas medias asumidas en base a este dato obtener de la gráfica (fig. 3.1 capítulo III) sus respectivas conductividades.

$$Tm_2 = (T_1 + T_2) / 2 = (2100 + 800) / 2 = 1550 \text{ °F} \quad k_2 = 2.24 \text{ Ladrillo Aislante}$$

$$Tm_3 = (T_2 + T_3) / 2 = (800 + 200) / 2 = 500 \text{ °F} \quad k_3 = 0.75 \text{ Block Aislante}$$

Calculando el flujo de calor.

$$Q = (2100 - 200) / [(10.5 / 2.24) + (2 / 0.75)] = 262.5 \text{ Btu/hr ft}^2 \quad (712.03 \text{ kcal/hr m}^2)$$

Obteniéndose de la gráfica (figura 3.2 capítulo III) el ΔT , para 262.5 Btu/hr ft², se prosigue a calcular la temperatura aproximada de la superficie exterior.

$$\Delta T = 120 \text{ °F}$$

$$\Delta T = T_{\text{SUP}} - T_{\text{amb}}$$

$$120 = T_{\text{SUP}} - 80$$

EJEMPLO DE APLICACION

$$T_{SUP} = 120 + 80 = 200 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Calculando la temperatura entre capas

Recalculando con la nueva temperatura de superficie exterior

$$Q = (2100 - 200) / (7.314) = \underline{259.77 \text{ Btu/hr ft}^2} \text{ , (704.63 kcal/hr m}^2\text{)}$$

Obteniendo el ΔT de la gráfica

$$\Delta T = 120 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\Delta T = T_{SUP} - T_{amb}$$

$$120 = T_{SUP} - 80$$

$$T_{SUP} = 120 + 80 = 200 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Calculando el flujo de calor para una temperatura de 115°F

$$Q = (2100 - 200) / (7.314) = 259.77 \text{ Btu/hr ft}^2 \text{ , (704.63 kcal/hr m}^2\text{)}$$

Calculando la temperatura de entre capas de ladrillo aislante y block aislante.

$$259.77 = (2100 - T_3) / (4.69)$$

$$T_2 = 881.679 \text{ } ^\circ\text{F}$$

3.- PAREDES DE CONVECCIÓN**MATERIALES PROPUESTOS:**

2.5" de espesor de Ladrillo refractario aislante T-23

1.5" de espesor de Block Aislante Lana Mineral

Cálculo de la pérdida de calor.

Asumimos una temperatura de 200 °F para la superficie exterior y se calcula el flujo de calor que pasa por los espesores de la pared para una temperatura media de los componentes.

Temperatura de diseño en la zona de convección es de 1100 °F

Calculando las temperaturas medias asumidas en base a este dato obtener de la gráfica (fig. 3.1 capítulo III) sus respectivas conductividades.

$$Tm_2 = (T_1 + T_2)/2 = (1100 + 500)/2 = 800 \text{ °F}, k_2 = 1.75 \text{ Ladrillo Aislante}$$

$$Tm_3 = (T_2 + T_3)/2 = (500 + 200)/2 = 350 \text{ °F}, k_3 = 0.7 \text{ Block Aislante}$$

Calculando el flujo de calor.

$$Q = (2100 - 200) / [(2.5"/1.75) + (1.5"/0.7)] = 288.83 \text{ Btu/hr ft}^2, (783.45 \text{ kcal/hr m}^2)$$

Obteniéndose de la gráfica (figura 3.2 capítulo III) el ΔT , para 252.1 Btu/hr ft², se prosigue a calcular la temperatura aproximada de la superficie exterior.

$$\Delta T = 140 \text{ °F}$$

$$\Delta T = T_{SUP} - T_{amb}$$

$$140 = T_{SUP} - 80$$

$$T_{SUP} = 140 + 80 = 220 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Calculando la temperatura entre capas

Recalculando con la nueva temperatura de superficie exterior

$$Q = (1100 - 220) / (3.12) = \underline{282.41 \text{ Btu/hr ft}^2}, (766.04 \text{ kcal/hr m}^2)$$

Obteniendo el ΔT de la gráfica

$$\Delta T = 110 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$\Delta T = T_{SUP} - T_{amb}$$

$$110 = T_{SUP} - 80$$

$$T_{SUP} = 140 + 80 = 220 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

Calculando el flujo de calor para una temperatura de 190 °F

$$Q = (1100 - 220) / (3.12) = 282.4 \text{ Btu/hr ft}^2, (766.04 \text{ kcal/hr m}^2)$$

Calculando la temperatura de entre capas de ladrillo aislante y block aislante.

$$282.4 = (1100 - T_3) / (1.12)$$

$$T_3 = 784.83 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

4.- TECHO DE CONVECCIÓN

MATERIALES PROPUESTOS:	Espesor
Concreto Aislante (composición lumnita-Haydita-Vermiculita)	2"
Block Aislante Lana Mineral	1.5"

Cálculo de la pérdida de calor.

Asumimos una temperatura de 200 °F para la superficie exterior, y se prosigue a calcular el flujo de calor a través de los espesores de la pared para una temperatura media de los componentes.

Temperatura de diseño en la zona de convección es de 1000 °F

Calculando las temperaturas medias asumidas; Las conductividad del concreto refractario se obtiene de hojas de datos de los fabricantes, por lo que tenemos:

$$T_{m1} = (T_1 + T_2) / 2 = (1000 + 500) / 2 = 750 \text{ °F} \quad k_2 = 1.22 \text{ Concreto Aislante}$$

$$T_{m2} = (T_2 + T_3) / 2 = (500 + 200) / 2 = 350 \text{ °F} \quad k_3 = 0.7 \text{ Block Aislante}$$

Calculando el flujo de calor.

$$Q = (1000 - 200) / [(2' / 1.22) + (1.5' / 0.7)] = 211.52 \text{ Btu/hr ft}^2, (573.75 \text{ kcal/hr m}^2)$$

Obteniéndose de la gráfica (figura 3.2 capítulo III) el ΔT , para 252.1 Btu/hr ft², se prosigue a calcular la temperatura aproximada de la superficie exterior.

$$\Delta T = 105 \text{ °F}$$

$$\Delta T = T_{SUP} - T_{amb}$$

$$105 = T_{SUP} - 80$$

$$T_{SUP} = 105 + 80 = 185 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Calculando la temperatura entre capas

Recalculando con la nueva temperatura de superficie exterior

$$Q = (1000 - 185) / (3.78) = \underline{215.49 \text{ Btu/hr ft}^2}. \text{ (584.5 kcal/hr m}^2\text{)}$$

Obteniendo el ΔT de la gráfica

$$\Delta T = 110 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\Delta T = T_{SUP} - T_{amb}$$

$$110 = T_{SUP} - 80$$

$$T_{SUP} = 110 + 80 = 190 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Calculando el flujo de calor para una temperatura de 190 °F

$$Q = (1000 - 190) / (3.78) = 214.17 \text{ Btu/hr ft}^2. \text{ (580.94 kcal/hr m}^2\text{)}$$

Calculando la temperatura de entre capas de ladrillo aislante y block aislante.

$$214.17 = (1000 - T_2) / (1.64)$$

$$T_2 = 648.97 \text{ } ^\circ\text{F}$$

La caída de temperatura a través de cada material es igual al flujo térmico por la resistencia actual de cada material.

Aislar adecuadamente el calor en un calentador permitirá una mayor eficiencia y una reducción en el consumo de combustible y como consecuencia una operación más económico.

5.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico comprende el estudio de mercado y criterios para evaluar el costo fijo del material y el costo de operación por pérdidas de calor anuales y así determinar el espesor económico; La evaluación se realizó para costos unitarios, se utilizaron algunos factores para calcular el costo como de instalación, transporte, mano de obra etc.

El costo unitario del material aislante en (pie)² de:

2.5" de espesor de Ladrillo refractario aislante = \$ 13.54 pesos

3" de espesor de Concreto refractario= \$ 24.5 pesos

2" de espesor de Block aislante lana mineral = \$ 4 pesos

NOTA : (Estos precios se obtuvieron en base al precio por tonelada)

Para calcular el costo unitario de instalación por cada pie cuadrado de construcción del material incluyendo transporte, mano de obra e indirectos se tienen los siguientes factores que se basan en el costo del material:

Factores de incremento:

Costo de instalación y mano de obra = Costo del material + costo del material x 0.7

Costo de indirectos incluyendo transporte = Costo del material + costo del material x 0.3

Calculando los Costos Fijos tenemos que:

$$CF = Cm(1+F)B$$

$$B = R+M$$

$$R = (r)/[1-(1+r)^{-n}]$$

donde:

CF= Costos fijos de inversión por aislamiento

B = Factor de Amortización de capital anual del material refractario.

Cm= Costo del material refractario por PIE²

F= Factor de incremento de transporte, instalación, mano de obra, indirectos.

R = Deterioro del aislamiento

M = Mantenimiento anual al sistema aislante basado en el costo del material = 3%

r = Interés anual=12 %

n =Para un periodo de vida (años)

Sustituyendo en la fórmula tenemos:

Costo Fijo de Ladrillo refractario aislante para 2.5" espesor = \$ 38.34

Costo Fijo de Concreto refractario aislante para 3" espesor = \$ 69.58

Costo Fijo Block aislante lana mineral para 2" espesor = \$ 11.36

$$\text{Costos de operación} = q \times h \times c$$

donde:

q = pérdida de calor

h= Horas de operación por año = (365-15)días X 24hrs.= 8400 hrs

c = Costo indirecto de energía para una corriente de proceso, vapor de agua o combustible \$/ mmBtu aprovechados.

c = a (1+t)FE

a= Valor del calor en pesos por millón BTU=\$40.20 pesos

t = % de incremento anual del costo de combustible

FE= Factor de eficiencia del sistema = 1/(eficiencia)

El costo actual aproximado de mmKcal producida vía vapor es de \$ 160.65 mmkal ó \$ 40.20 mmBtu

Calculando costos de operación para varios espesores de recubrimiento:

a).-Para 8.5" de espesor de ladrillo refractario aislante y 2" de block de lana mineral

$$\text{Costos de operación} = (298.6 \text{ BTU/h}) \times 8400 \text{ h} \times 40.20 \times 10^{-6} \text{ mmBtu} (1+0.35) \times (1/0.55) = \$ 247 \text{ por cada BTU}$$

b).-Para 10.5" de ladrillo refractario y 2" de block aislante se tiene el siguiente costo:

$$\text{Costos de operación} = (260 \text{ BTU/h}) \times 8400 \text{ h} \times 40.20 \times 10^{-6} \text{ mmBtu} (1+0.35) \times (1/0.55) = \$ 215.55 \text{ por cada BTU}$$

c).-Para 12.5" de espesor de ladrillo refractario aislante y 2" de block de lana mineral

Costos de operación = $(206 \text{ BTU/h}) \times 8400 \text{ h} \times 40.20 \times 10^{-6} \text{ mm} \text{ BTU} (1+0.35) \times (1/0.55)$
 = \$ 170.74 por cada BTU

Determinando el espesor económico.

Realizando una tabla de resultados de los costos anuales de diferentes espesores de recubrimiento tenemos la tabla 5.1:

TABLA 5.1. Tabla de costos anuales

ESPESOR		COSTOS FIJOS	COSTOS DE OPERACION	COSTOS TOTALES
LADRILLO AISLANTE	BLOCK LANA MINERAL			
7.5	2"	\$ 126.7 pesos	\$ 277 pesos	\$ 403.7 pesos
8.5"	2"	\$ 141.7 pesos	\$ 247 pesos	\$ 388.7 pesos
10.5"	2"	\$ 171.5 pesos	\$ 215 pesos	\$ 386.4 pesos
11.5"	2"	\$ 184 pesos	\$ 200 pesos	\$ 384
12.5"	2"	\$ 203 pesos	\$ 170.7 pesos	\$ 373 pesos
15"	2"	\$ 241.4 pesos	\$ 165.7 pesos	\$ 407 pesos

Como el costo total mínimo es del espesor de recubrimiento de 12.5" de Ladrillo Aislante, 2" de Block de lana mineral éste será el espesor económico.

Nota:

Para el diseño existente no es posible incrementar el espesor más de lo previsto, por el espacio que ocupan los elementos que constituyen el calentador; sin embargo para diseños originales si es aplicable ya que de entrada se preverán las posibles modificaciones futu

5.5 PROGRAMA DE CÓMPUTO DEL CÁLCULO DEL ESPESOR ECONÓMICO

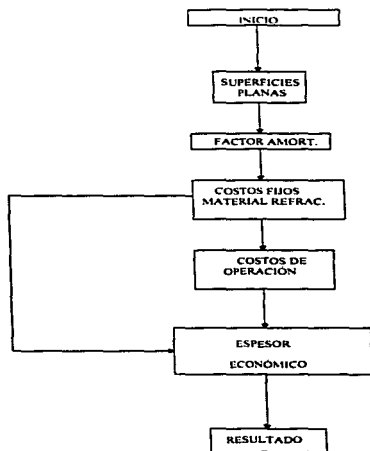
El programa de cómputo calcula costos de adquisición para la instalación y mantenimiento del material aislante y costos de operación por pérdidas de calor; este programa básico también calcula la pérdida de calor por conducción y evalúa económicamente el espesor.

Las variables a utilizar:

- Interés anual
- Vida útil del aislamiento.
- Factor para mantenimiento del material.
- Costo unitario de material en pulgadas de espeso.
- Factor de instalación, transporte e indirectos.

- Temperaturas de superficie y de hogar.
- Conductividades de los materiales.
- Espesores de cada material de recubrimiento.
- Incremento anual del costo de combustible.
- El costo de mmkcal producida via vapor.
- Horas anuales de operación.
- Porcentaje de eficiencia térmica del Calentador.

DIAGRAMA DE FLUJO



CORRIDA DEL PROGRAMA EN LENGUAJE C

```

#include <stdio.h>                                     /*seccion de... */
#include <stdlib.h>                                    /*archivos incluidos*/
#include <math.h>
#include <conio.h>

/*# include "archivo..."*/
/*# define...*/                                     /*constantes simbolicas */
/*# define...*/                                     /* y macroprocesador */

float CM,r,n,m,Cm,B,k2,k1,T2,T1,e2,e1,Fe,p,a,q,E,amt,x,y,w,F,porcentaje
main()
{
clrscr();
/*Calcule el factor de amortizacion de capital*/
printf("Introduzca el valor de r=");
scanf("%f",&r);
printf("Introduzca el valor de n=");
scanf("%f",&n);
printf("La division de amt=%e\n",amt-r/(1-pow('1-r',-n)));
/* CALCULE EL FACTOR DE INSTALACION, FLETES, INDIRECTOS*/
printf("Introduzca el valor de m=");
scanf("%f",&m);
printf("la suma de B=%6.5f\n", B-m-amt);

printf("Introduzca el costo del material: ");
scanf("%f",&CM);

/* Costos de Instalacion de Material Refractario por PIE CUADRADO */
Cm=CM*(0.7-1-0.3);
printf("El costo del material instalado es: %6.5f\n",Cm);

/* Calcular Costo Fijos del Material Refractario Aislante*/
printf("Introduzca el valor de F=");
scanf("%f",&F);
printf("La multiplicacion de w=%6.5f\n", w-(Cm*(1-F)*B)/(3));

```

EJEMPLO DE APLICACION

```

/*Calculo del costo de operacion: Se deben calcular la perdida de calor
por unidad de calor por unidad de area y E que involucra el costo de
MMBtu y la eficiencia termica.*

/*Calculo de la perdida de calor por conduccion*/

printf("Introduzca el valor de k1-");
scanf("%f",&k1);
printf("Introduzca el valor de k2-");
scanf("%f",&k2);
printf("Introduzca el valor de T1-");
scanf("%f",&T1);
printf("Introduzca el valor de T2-");
scanf("%f",&T2);
printf("Introduzca el valor de e1-");
scanf("%f",&e1);
printf("Introduzca el valor de e2-");
scanf("%f",&e2);

printf("La division de q=%6.5f\n",q-(T2-T1)/((e1/k1)+(e2/k2)));

/*Calculo de E*/
printf("Eficiencia de operacion: ");
scanf("%f",&porcentaje);

Fe=1/porcentaje;

printf("Introduzca el valor de p-");
scanf("%f",&p);

printf("Introduzca el valor de a-");
scanf("%f",&a);

printf("La multiplicacion de E=%6.5f\n",E=Fe*(1/p)/(a*pow(10,-6)));

/*Calculo de costos de operacion*/

printf("La multiplicacion de y=%6.5f\n",y=q*8400/E);

/* Calcular espesor economico de tres diferentes espesores
de recubrimiento*/

printf("La suma de de x=%6.5f\n",x=(y+w));
getche();
return 0;

}

```


EJEMPLO DE APLICACION

Introduzca el valor de n=1
La division de de am=1.120000e+00
Introduzca el valor de m=0.3
la suma de B=1.42000
Introduzca el costo del material: 50.5
El costo del material instalado es: 121.00000
Introduzca el valor de F=1
La multiplicacion de w=171.92001
Introduzca el valor de k1=2.4
Introduzca el valor de k2=0.75
Introduzca el valor de T1=200
Introduzca el valor de T2=2100
Introduzca el valor de a1=10.5
Introduzca el valor de a2=2
La division de q=269.82249
Eficiencia de operacion: 0.55
Introduzca el valor de p=.35
Introduzca el valor de a=40.2
La multiplicacion de E=0.00010
La multiplicacion de y=223.64260
La suma de de x=3.954626e+02

5.6. PROGRAMA DE BASE DE DATOS DE PROPIEDADES REFRACTARIOS

La base de datos se obtuvo de pruebas de laboratorio de la empresa A.P. Green que tuvieron a bien proporcionarme: estas propiedades se toman como indicativo promedio y se utilizan para comparar materiales refractarios así poder seleccionar los materiales comerciales o por su especificación A.S.T.M.; De esta manera, la base de datos facilita la consulta de materiales refractarios aislantes para el diseño.

- Instalación de la base de datos en ambiente windows.
- Explicación breve de base de datos en Delphi

Para instalar el programa en cualquier máquina se requiere lo siguiente:

Una de las características que tiene Delphi en comparación con otras aplicaciones o herramientas de este tipo (como Visual Basic) para cualquier aplicación desarrollada, solo se requiere el "Archivo Executable" sin necesidad de copiar otro archivo adjunto a este. Pero cuando se desarrolla una aplicación en donde se manejen base de datos esta metodología cambia, pues sí se requieren otros archivos para poderla ejecutar y estos se enuncian a continuación.

Para la aplicación que se desarrollo, los archivos que se requieren son los siguientes:

IDAPI01.DLL	IDARIO009.DLL
IDQRY01.DLL	ILD01.DLL
IDAPI01.DLL	IDAPT.CFG.

Para estos archivos se requiere que se dirijan al subdirectorio del disco duro llamado IDAPI.

Posteriormente al archivo WIN.INI habria que accesar las siguientes lineas:

[Borland Lenguaje Drivers]

```
LDPATH= C:/DELPHI/IDAPI/LANGDRV  
[IDAPI]  
DLL PATH=C:/IDAPI  
CONFIG FILE01=C:/IDAPI/IDAPI.CFG
```

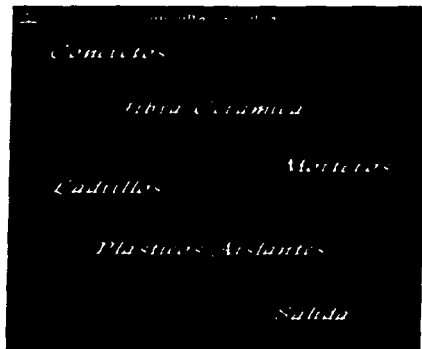
Elo con la finalidad de direccionar dichos archivos de Windows. Por otro parte no hay que olvidar el lugar en donde estarán situadas las base de datos en consulta. En forma de sintaxis los subdirectorios y directorios del programa con la base de datos, los archivos requeridos para ejecutar la aplicación y el archivo ejecutable deben quedar en el disco duro de la siguiente forma:

```
c:/selección-ejecutable (selección.exe)  
bases de datos (Martexes. dbf, concretos. dbf, etc.  
IDAPI----- archivos especiales de DELPHI (Idary01.DLL, etc.)
```

"Programa Consultas"

```
program Constas;
uses
  Forms,
  Principal in 'PRINCIPAL.PAS' {Form1},
  Db_tad in 'DB_LAD.PAS' {Form2},
  Db_conc in 'DB_CONC.PAS' {Form3},
  Db_fbc in 'DB_FIBC.PAS' {Form4},
  Db_mort in 'DB_MORT.PAS' {Form5},
  Db_aisl in 'DB_AISL.PAS' {Form6};
{$R *.RES}

begin
  Application.CreateForm(TForm1, Form1);
  Application.CreateForm(TForm6, Form6);
  Application.CreateForm(TForm5, Form5);
  Application.CreateForm(TForm4, Form4);
  Application.CreateForm(TForm3, Form3);
  Application.CreateForm(TForm2, Form2);
  Application.Run;
end.
```

"Programa Principal"

```
unit Principal;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
  SysUtils, WinTypes, WinProcs, Messages, Classes, Graphics, Controls,  
  Forms, Dialogs, StdCtrls, Db_jad, Db_conc, Db_fibc, Db_mort, Db_aisl;
```

```
type
```

```
  TForm1 = class(TForm)
```

```
    Label1: TLabel;
```

```
    Label2: TLabel;
```

```
    Label3: TLabel;
```

```
    Label4: TLabel;
```

```
    Label5: TLabel;
```

```
    Label6: TLabel;
```

```
    procedure Label6Click(Sender: TObject);
```

```
    procedure Label1Click(Sender: TObject);
```

```
    procedure Label2Click(Sender: TObject);
```

```
    procedure Label3Click(Sender: TObject);
```

```
    procedure Label4Click(Sender: TObject);
```

```
    procedure Label5Click(Sender: TObject);
```

```
    procedure Label1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,  
      Y: Integer);
```

```
procedure FormMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
procedure Label2MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
procedure Label3MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
procedure Label4MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
procedure Label5MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
procedure Label6MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
Y: Integer);
private
{ Private declarations }
public
{ Public declarations }
end;

var
Form1: TForm1;

implementation
{$R *.DFM}

procedure TForm1.Label6Click(Sender: TObject);
begin
if MessageDlg('Deseas salir de la Consulta a la Base de Datos',
mInformation, [mbYes, mbNo], 0) = mrYes then
begin
Release;
Application.Terminate;
end
end;

procedure TForm1.Label1Click(Sender: TObject);
begin
{ Form2:=TForm2(Sender); }
MessageDlg('Consulta a la Base de Datos Concretos.',
mInformation, [mbYes], 0);
Form3.ShowModal;
end;

procedure TForm1.Label2Click(Sender: TObject);
begin
MessageDlg('Consulta a la Base de Datos Ladrillos.',
mInformation, [mbYes], 0);
Form2.ShowModal;
end;

procedure TForm1.Label3Click(Sender: TObject);
begin
MessageDlg('Consulta a la Base de Datos Fibras Cerámicas.',
mInformation, [mbYes], 0);
```

```
Form4.ShowModal;
end;

procedure TForm1.Label4Click(Sender: TObject);
begin
  MessageDlg('Consulta a la Base de Datos Morteros.',
    mtInformation, [mbYes], 0);
  Form5.ShowModal;
end;

procedure TForm1.Label5Click(Sender: TObject);
begin
  MessageDlg('Consulta a la Base de Datos Plasticos Aislantes.',
    mtInformation, [mbYes], 0);
  Form6.ShowModal;
end;

procedure TForm1.Label1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin
  Label1.Font.Color := clRed;
end;

procedure TForm1.FormMouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin
  Label1.Font.Color := clYellow;
  Label2.Font.Color := clYellow;
  Label3.Font.Color := clYellow;
  Label4.Font.Color := clYellow;
  Label5.Font.Color := clYellow;
  Label6.Font.Color := clYellow;
end;

procedure TForm1.Label2MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin
  Label2.Font.Color := clRed;
end;

procedure TForm1.Label3MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin
  Label3.Font.Color := clRed;
end;

procedure TForm1.Label4MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin
  Label4.Font.Color := clRed;
end;

procedure TForm1.Label5MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
```

EJEMPLO DE APLICACION

```
begin
  Label5.Font.Color := clRed
end;

procedure TForm1.Label6MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
  Y: Integer);
begin
  Label6.Font.Color := clRed
end;
```


"Base de Datos Ladrillos"

Nombre: <input type="text" value="REFRACOL 2000"/>		Densidad: <input type="text" value="2.00"/>	g/cc	<input type="text" value="6.00"/>	cm ³	<input type="text" value="12.00"/>	g/cm ³
Equivalente al Curio Pícometrico: <input type="text" value="20.00"/>	Composición en Plato: <input type="text" value="10.00"/>		g/cm ²	<input type="text" value="10.00"/>	LB/plug ²	<input type="text" value="2.00"/>	lb
Equivalente de Temperatura: <input type="text" value="10.00"/>	Modulo de Ructura: <input type="text" value="10.00"/>		g/cm ²	<input type="text" value="10.00"/>	LB/plug ²	<input type="text" value="2.00"/>	lb
Cambio Lineal Permanente: <input type="text" value="10.00"/>		Temperatura Maxima Recomendada: <input type="text" value="10.00"/>		°C	Porosidad Absoluta: <input type="text" value="10.00"/>		
Deformacion Bajo Carga: <input type="text" value="10.00"/>		Conductividad Térmica a Temperaturas:		Kcal/m ² h ² °C	°C	Btu ft/h ² ft ²	°F
Prueba de Disgregación: <input type="text" value="10.00"/>		Composición Química (%)		205°C	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>
Silice: <input type="text" value="65.00"/>	Oxido de Calcio: <input type="text" value="10.00"/>	P.P.C.: <input type="text" value="10.00"/>	315°C	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>
Alumina: <input type="text" value="25.00"/>	Oxido de Magnesio: <input type="text" value="10.00"/>	Alcalis: <input type="text" value="10.00"/>	425°C	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>
Oxido de Hierro: <input type="text" value="10.00"/>	Oxido de Calcio y Magnesio: <input type="text" value="10.00"/>	Oxido de Titanio: <input type="text" value="10.00"/>	540°C	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>
			550°C	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>
			670°C	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>	<input type="text" value="10.00"/>

TIPO	EQ_CON	PIR	EQ_TEMP	TEMP1VAR1	TEMP2VAR2	TEMP3

unit Db: lad;

interface

uses

SysUtils, WinTypes, WinProc, Messages, Classes, Graphics, Controls, StdCtrls, Forms, DBCtrls, DB, DBTables, Mask, ExtCtrls, Buttons, Grids, DBGrids;

type

TForm2 = class TForm0
 ScrollBox: TScrollBox;
 Label1: TLabel;
 EditTIPO: TDBEdit;
 Label2: TLabel;
 EditEQ_CON_PIR: TDBEdit;
 Label3: TLabel;
 MemoEQ_TEMP: TDBMemo;
 Label4: TLabel;
 EditTEMP: TDBEdit;
 EditVAR: TDBEdit;
 Label6: TLabel;

EditTEMP2: TDBEdit;
EditVAR2: TDBEdit;
Label8: TLabel;
EditTEMP3: TDBEdit;
EditVAR3: TDBEdit;
Label10: TLabel;
EditVAR4: TDBEdit;
Label11: TLabel;
EditVAR5: TDBEdit;
Label12: TLabel;
EditVAR6: TDBEdit;
Label13: TLabel;
EditVAR7: TDBEdit;
EditVAR8: TDBEdit;
Label15: TLabel;
EditDEN: TDBEdit;
Label16: TLabel;
EditSIO: TDBEdit;
Label17: TLabel;
EditALO: TDBEdit;
Label18: TLabel;
EditFEO: TDBEdit;
Label19: TLabel;
EditCAO: TDBEdit;
Label20: TLabel;
EditMGO: TDBEdit;
Label21: TLabel;
EditTIO: TDBEdit;
Label22: TLabel;
EditNAO_KO: TDBEdit;
Label23: TLabel;
EditTEMPMAX_C: TDBEdit;
Label24: TLabel;
EditTEMPMAX_F: TDBEdit;
Label25: TLabel;
EditVAR_1: TDBEdit;
EditVAR_2: TDBEdit;
Label27: TLabel;
EditDEN2: TDBEdit;
Label28: TLabel;
EditDEN3: TDBEdit;
EditCTT_C: TDBEdit;
Label30: TLabel;
EditCTT_F: TDBEdit;
Label31: TLabel;
EditCTT_C2: TDBEdit;
EditCTT_F2: TDBEdit;
EditCTT_C3: TDBEdit;
Label34: TLabel;
EditCTT_F3: TDBEdit;
Label35: TLabel;
EditCTT_C4: TDBEdit;
Label36: TLabel;
EditCTT_F4: TDBEdit;

```
Label37: TLabel;
EditCTT_C5: TDBEdit;
Label38: TLabel;
EditCTT_F5: TDBEdit;
Label39: TLabel;
EditCTT_C6: TDBEdit;
Label40: TLabel;
EditCTT_F6: TDBEdit;
Label41: TLabel;
EditCAO_NIGO: TDBEdit;
Label42: TLabel;
EditPPC: TDBEdit;
DBNavigator: TDBNavigator;
Panel1: TPanel;
DataSource1: TDataSource;
Panel2: TPanel;
Table1: TTable;
BitBtn1: TBitBtn;
Label5: TLabel;
Label7: TLabel;
Label9: TLabel;
Label14: TLabel;
Label26: TLabel;
Label43: TLabel;
DBGrid1: TDBGrid;
Label29: TLabel;

procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
private
  [ private declarations ]
public
  [ public declarations ]
end;

var
  Form2: TForm2;

implementation

{$R *.DFM}

procedure TForm2.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Table1.Open;
end;

procedure TForm2.BitBtn1Click(Sender: TObject);
begin
  Release;
  Close;
end;

end.
```

"Base de Datos Concretos"

Nombre: Tiempo Máximo para Empleo después de Mezclado: min

Temperatura Máxima Recomendada: °C Conductividad Térmica Teórica a la Temperatura Promedio de: °C kcal/m²h²°C

Cantidad Aproximada Necesaria: kg/m³ m³

Agua Necesaria para Litro "n" en Peso: %

Cambio Lineal Permanente: mm

Al Secarse a: °C Al Calentarse a: °C

Compresión en Plano: kg/cm² MPa

Al Secarse a: °C Al Calentarse a: °C

650 °C MPa

670 °C MPa

1093 °C MPa

Módulo de Ruptura: kg/cm² (mm) MPa (mm)

Al Secarse a: °C Al Calentarse a: °C

Composición Química: % de Magnesio

Silice: % % de Hierro

Alúmina: % % de Calcio

Alcalí: % % de Tránsito

TIPO	ITM C	TM F	CAN K	CAN L	ANUP	TMEDM	CLP S
PLANTANTE (N LIGHT WEIGHT)	16	670	1500	15	0	0	0
PLANTANTE (MACHETE)	7	670	1500	15	0	0	0
PLANTANTE (PISO)	10	670	1500	15	0	0	0
PLANTANTE (MAYOR)	11	670	1500	15	0	0	0

unit Db con.

interface

uses

Sst, Tls, WinTypes, WinProc, Messages, Classes, Graphics, Controls, StdCtrls, Forms, DBCUnits, DB, DBTables, Mask, ExtCtrls, Buttons, Grids, DBGrids;

type

```
TForm3 = class(TForm)
  ScrollBox: TScrollBox;
  Label1: TLabel;
  EdtTIPO: TDBEdit;
  Label2: TLabel;
  EdtTM_C: TDBEdit;
  Label3: TLabel;
  EdtTM_F: TDBEdit;
  Label4: TLabel;
  EdtCAN_K: TDBEdit;
  Label5: TLabel;
  EdtCAN_L: TDBEdit;
  Label6: TLabel;
```

EditANUP: TDBEdit;
Label7: TLabel;
EditTMEDM: TDBEdit;
EditCLP_S: TDBEdit;
EditCLP_C: TDBEdit;
EditMR_SKG: TDBEdit;
EditMR_SP: TDBEdit;
EditMR_CKG: TDBEdit;
EditMR_CP: TDBEdit;
EditCP_SKG: TDBEdit;
EditCP_SP: TDBEdit;
EditCP_CKG: TDBEdit;
EditCP_CP: TDBEdit;
EditCTTTP_K: TDBEdit;
EditCTTTP_B: TDBEdit;
EditCTTTP_K2: TDBEdit;
EditCTTTP_B2: TDBEdit;
EditCTTTP_K3: TDBEdit;
EditCTTTP_B3: TDBEdit;
EditCTTTP_K4: TDBEdit;
EditCTTTP_B4: TDBEdit;
EditCTTP_K: TDBEdit;
EditCTTP_B: TDBEdit;
Label28: TLabel;
EditSIO: TDBEdit;
Label29: TLabel;
EditALO: TDBEdit;
Label30: TLabel;
EditFEO: TDBEdit;
Label31: TLabel;
EditCAO: TDBEdit;
Label32: TLabel;
EditMGO: TDBEdit;
Label33: TLabel;
EditTIC: TDBEdit;
Label34: TLabel;
EditNAO_KO: TDBEdit;
DBNavigator: TDBNavigator;
Panel1: TPanel;
DataSource1: TDataSource;
Panel2: TPanel;
Table1: TTable;
DBGrid1: TDBGrid;
BitBtn1: TBitBtn;
Label35: TLabel;
Label36: TLabel;
Label37: TLabel;
Label38: TLabel;
Label39: TLabel;
Label40: TLabel;
Label41: TLabel;
Label42: TLabel;
Label43: TLabel;
Label44: TLabel;

```
Label18: TLabel;
Label19: TLabel;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
Label9: TLabel;
Label8: TLabel;
Label22: TLabel;
Label23: TLabel;
Label10: TLabel;
Label11: TLabel;
Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Label14: TLabel;
Label15: TLabel;
Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
Label24: TLabel;
Label25: TLabel;
Label26: TLabel;
Label27: TLabel;
procedure TForm3.FormCreate(Sender: TObject);
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
private
  { private declarations }
public
  { public declarations }
end;

var
  Form3: TForm3;

implementation

{$R *.DFM}

procedure TForm3.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Table1.Open;
end;

procedure TForm3.BitBtn1Click(Sender: TObject);
begin
  Release;
  Close;
end;

end.
```


EJEMPLO DE APLICACION

EditDENSIDAD: TDBEdit;
Label7: TLabel;
EditDIAM_FIB: TDBEdit;
Label8: TLabel;
EditGRAV_ESP: TDBEdit;
Label9: TLabel;
EditLARG_FIB: TDBEdit;
Label10: TLabel;
EditLARG_FIB2: TDBEdit;
Label11: TLabel;
EditRES_TEN: TDBEdit;
Label12: TLabel;
EditPUNT_FUS: TDBEdit;
Label13: TLabel;
EditMOD_RUP: TDBEdit;
Label14: TLabel;
EditRES_COMP: TDBEdit;
Label15: TLabel;
EditRES_COMP2: TDBEdit;
EditCAMB_L: TDBEdit;
EditCAMB_L2: TDBEdit;
EditCAMB_L3: TDBEdit;
EditCAMB_L4: TDBEdit;
EditC_T_K: TDBEdit;
EditC_T_BTU: TDBEdit;
EditC_T_K2: TDBEdit;
EditC_T_BTU2: TDBEdit;
EditC_T_K3: TDBEdit;
EditC_T_BTU3: TDBEdit;
EditC_T_K4: TDBEdit;
EditC_T_BTU4: TDBEdit;
EditC_T_K5: TDBEdit;
EditC_T_BTU5: TDBEdit;
EditC_T_K6: TDBEdit;
EditC_T_BT: TDBEdit;
Label12: TLabel;
EditDEN_COMP: TDBEdit;
Label13: TLabel;
EditDEN_DESCOM: TDBEdit;
Label14: TLabel;
EditALU: TDBEdit;
Label15: TLabel;
EditSIL: TDBEdit;
Label16: TLabel;
EditZIR: TDBEdit;
Label17: TLabel;
EditFEO: TDBEdit;
Label18: TLabel;
EditTIO: TDBEdit;
Label19: TLabel;
EditO_OXID: TDBEdit;
Label10: TLabel;
EditALC: TDBEdit;
DBNavigator: TDBNavigator;

```
Panel1: TPanel;
DataSource1: TDataSource;
Panel2: TPanel;
Table1: TTable;
DBGrid1: TDBGrid;
Label42: TLabel;
Label44: TLabel;
Label41: TLabel;
Label43: TLabel;
Label45: TLabel;
Label46: TLabel;
Label47: TLabel;
Label48: TLabel;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
Label22: TLabel;
Label23: TLabel;
Label24: TLabel;
Label25: TLabel;
BitBtn1: TBitBtn;
Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
Label27: TLabel;
Label18: TLabel;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
private
  { private declarations }
public
  { public declarations }
end;

var
  Form4: TForm4;

implementation

{$R *.DFM}

procedure TForm4.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Table1.Open;
end;

end.
```

"Base de Datos Morteros"

TIPO		EQ CON PIRI TEMP FRAG		EQ TEMP		MIN TAB1000AGUA CU	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							
37							
38							
39							
40							
41							
42							
43							
44							
45							
46							
47							
48							
49							
50							

unit Db_morti;

interface

uses

SxCtrls, WinTypes, WinProc, Messages, Classes, Graphics, Controls,
StdCtrls, Forms, DBCtrls, DB, DBTables, Mask, ExtCtrls, Buttons, Grids,
DBGrids;

type

TForm5 = class TForm1
ScrollBox: TScrollBox;
Label1: TLabel;
EditTIPO: TDBEdit;
Label2: TLabel;
EditEQ_CON_PIR: TDBEdit;
Label3: TLabel;
EditTEMP_FRAG: TDBEdit;
Label4: TLabel;
EditEQ_TEMP: TDBEdit;
Label5: TLabel;
EditMIN_TAB: TDBEdit;
Label6: TLabel;

```
EditAGUA_CUCH: TDBEdit;
Label7: TLabel;
EditAGUA_INM: TDBEdit;
Label8: TLabel;
EditREFR_: TDBEdit;
Label9: TLabel;
EditMR_SEC_K: TDBEdit;
Label10: TLabel;
EditMR_SEC_L: TDBEdit;
Label11: TLabel;
EditMR_OUEM_K: TDBEdit;
Label12: TLabel;
EditMR_OUEM_L: TDBEdit;
Label13: TLabel;
EditRET_AG: TDBEdit;
Label14: TLabel;
EditTAM_P: TDBEdit;
Label15: TLabel;
EditTAM_P2: TDBEdit;
Label16: TLabel;
EditTAM_P3: TDBEdit;
Label17: TLabel;
EditSIO: TDBEdit;
Label18: TLabel;
EditALO: TDBEdit;
Label19: TLabel;
EditFEO: TDBEdit;
Label20: TLabel;
EditCAO: TDBEdit;
Label21: TLabel;
EditMGO: TDBEdit;
Label22: TLabel;
EditTIO: TDBEdit;
Label23: TLabel;
EditNAO_KO: TDBEdit;
Label24: TLabel;
EditCR: TDBEdit;
DBNavigator: TDBNavigator;
Panel1: TPanel;
DataSource1: TDataSource;
Panel2: TPanel;
Table1: TTable;
DBGrid1: TDBGrid;
Label25: TLabel;
Label26: TLabel;
Label27: TLabel;
Label28: TLabel;
BitBtn1: TBitBtn;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
private
  { private declarations }
public
  { public declarations }
end;
```

```
var
  Form5: TForm5;
implementation
{$R *.DFM}
procedure TForm5.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Table1.Open;
end;
```

"Base de Datos Aislantes"

Nombre:

Composición Química

Equivalente al Cono Prometec Orion:

Equivalente de Temperatura: °C

Cantidad Necesaria

Por m3: P2 Por #3: Lb

Prueba de Flexión (Módulo de Ruptura) a:

lb/pulg ²	kg/cm ²
<input type="text" value="225"/>	<input type="text" value="15.24"/>
<input type="text" value="125"/>	<input type="text" value="8.74"/>
<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="35.23"/>

Prueba de Disgregación Térmica Perda en Peso a:

1450 °C	<input type="text" value="0.5"/>
1500 °C	<input type="text" value="0.5"/>

Composición Química

Silice	<input type="text" value="47.2"/>	Oxido de Magnesio	<input type="text" value="0.2"/>
Alumina	<input type="text" value="48.48"/>	Oxido de Calcio	<input type="text" value="0.4"/>
Alcalis	<input type="text" value="2.2"/>	Oxido de Hierro	<input type="text" value="0.2"/>
		Oxido de Titanio	<input type="text" value="0.002"/>

Deformación bajo carga a: °C

Contracción de Secado y Quemado sobre Longitud Original a:

105 °C	<input type="text" value="1.1"/>
815 °C	<input type="text" value="0.175"/>
1400 °C	<input type="text" value="0.175"/>
1500 °C	<input type="text" value="0.175"/>

INOMBRE	EQ. CON PIRIO2 TEMP	CAN. NEC. M3	CAN. NEC. Lb
PLASTICO GRABTADO CALIDAD SUPERIOR GREEN XM	33-34 1745-1760	2245	263.000
PLASTICO REFRACTARIO ALTA CALIDAD QUIK PAK M	31-32 1680-1700	2245	263.000
RESPONABLE DE ALTA ALUMINA GRABTADO GRAPHRAM M	33-34 1865-1885	2600	317.000
RESPONABLE 95P 95% ALUMINA LIGA FOSFORICA	33-34 1865-1885	2600	317.000

unit DB aisl.

interface

uses

SysUtils, WinTypes, WinProc, Messages, Classes, Graphics, Controls, StdCtrls, Forms, DBTables, DB, DBTables, Mask, ExtCtrls, Buttons, Grids, DBGrids;

type

TFormo = class(TForm);
 ScrollBox: TScrollBox;
 Label1: TLabel;
 EdtINOMBRE: TDBEdit;
 Label2: TLabel;
 EdtEQ CON PIR: TDBEdit;
 Label3: TLabel;
 EdtEQ_TEMP: TDBEdit;
 Label4: TLabel;
 EdtCAN_NEC M: TDBEdit;

```
Label5: TLabel;
EditCAN_NEC_FT: TDBEdit;
Label6: TLabel;
EditCON_1: TDBEdit;
Label7: TLabel;
EditCON_2: TDBEdit;
Label8: TLabel;
EditCON_3: TDBEdit;
Label9: TLabel;
EditCON_4: TDBEdit;
Label10: TLabel;
EditDEF_B_CAR: TDBEdit;
Label11: TLabel;
EditPRU_DISG_T: TDBEdit;
EditPR_FLEK: TDBEdit;
EditPR_FLEL: TDBEdit;
EditPR_FLEK2: TDBEdit;
EditPR_FLEL2: TDBEdit;
EditPR_FLK: TDBEdit;
EditPR_FLL: TDBEdit;
Label18: TLabel;
EditSI0: TDBEdit;
Label19: TLabel;
EditALO: TDBEdit;
Label20: TLabel;
EditFEO: TDBEdit;
Label21: TLabel;
EditCAO: TDBEdit;
Label22: TLabel;
EditMGO: TDBEdit;
Label23: TLabel;
EditTIO: TDBEdit;
Label24: TLabel;
EditNAO_KO: TDBEdit;
EditPR_FLK2: TDBEdit;
EditPR_FLL2: TDBEdit;
DBNavigator: TDBNavigator;
Panel1: TPanel;
DataSource1: TDataSource;
Panel2: TPanel;
Table1: TTable;
Label27: TLabel;
Label28: TLabel;
Label29: TLabel;
Label30: TLabel;
Label31: TLabel;
Label32: TLabel;
DBGrid1: TDBGrid;
Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Label14: TLabel;
BitBtn1: TBitBtn;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
private
```

```
{ private declarations }
public
{ public declarations }
end;

var
  Form6: TForm6;

implementation

{$SR *.DFM}

procedure TForm6.FormCreate(Sender: TObject);
begin
  Table1.Open;
end;

end.
```

CONCLUSIONES

La metodología abarca el estudio de los mecanismos de transferencia de calor, ya que juega un papel importantísimo en el cálculo del flujo de calor en las diferentes zonas de los calentadores a fuego directo, cuya clasificación de éstos de acuerdo a su servicio, tamaño (carga térmica) y proceso nos indicarán los parámetros a seguir en su respectivo diseño del sistema refractario aislante, o ya sea teniendo información específica relacionada con la operación datos como: ciclo de funcionamiento, rango de temperatura, tipo de combustible incluyendo sus características e impurezas, estos factores relacionados con el diseño del equipo tipificarán la selección de materiales refractarios aislantes guiándose por las especificaciones de A.S.T.M. y la tecnología más avanzada.

Todos los productos silicos-aluminosos, tienen propiedades aislantes ya que la conductividad es cuestión de grado, el poder aislante además de reducir las pérdidas de calor por conducción y su subsiguiente disipación por radiación, Hace posible la reducción del espesor; Su parámetro más importante es su gran porosidad, necesaria para la obtención de un peso volumétrico reducido, los materiales refractarios aislantes muestran una resistencia mecánica relativamente baja que los hace vulnerables a abusos mecánicos, es por eso que se deben prever los factores destructivos de servicio como el desgaste que se da por erosión, abrasión y corrosión, estos factores son producidos por la escoria en el interior del calentador, el choque térmico debido al repentino cambio de temperatura, tipos de atmósferas como la de monóxido de carbono, la de cloro o fluor, o la atmósfera con Hidrógeno.

En zonas donde el efecto de la escoria o el de la abrasión son severos, es conveniente un material refractario de estructura densa y se debe recurrir a paredes enfriadas por aire o agua. En condiciones que producen agrietamientos por cambios de temperatura es mejor un material de estructura más flexible. Cuando la escoria no se encuentra en condiciones extremas, con frecuencia es más económico usar un refractario aislante.

Un sistema de anclaje acoplado a las características de los materiales refractarios es parte medular en la instalación del recubrimiento, lo cual contribuirá a un periodo más prolongado de vida y una efectiva operación del equipo.

Las características y propiedades de los materiales refractarios deberán ser garantizadas al final de su instalación, por lo que es importante efectuar una inspección estricta de la calidad de los productos adquiridos en base a sus especificaciones, así como, el cumplimiento de los requerimientos técnicos que se especifiquen para su aplicación.

El método sugerido para la pérdida de calor a través de las paredes de un horno por la A. S.T.M es muy confiable debido a su precisión, de ahí que se considere actualmente en la industria petrolera para el diseño en el sistema del material aislante en calentadores a fuego directo; este método se basa en el cálculo del flujo simultáneo de calor de dos medios que son la pared y la superficie, cuando las pérdidas de calor de ambos medios sean iguales los cálculos serán correctos; antes de ésto se deben calcular las temperaturas asumidas promedio de la capas de recubrimiento refractario.

La guía de diseño para selección de espesores del material refractario, es una ayuda para recomendar el espesor, debido a las condiciones de servicio para cada calentador y así considerar el espesor.

El diseño del sistema aislante evaluado para las condiciones de servicio, no lo es todo. El espesor a instalar de aislamiento está en función de las características particulares de cada instalación y deberá calcularse en base a consideraciones económicas; se deberá hacer un estudio económico en cuál calculemos qué espesor de material nos dará mejores resultados en el ahorro de energéticos, de tal manera que el espesor económico nos garantice la mejor inversión para un periodo de vida de la instalación.

La estimación de costos fijos y de operación anuales para la instalación del recubrimiento, y la evaluación del espesor determinará el espesor más económico, de tal manera que el hecho de que se instale un material más barato o un espesor más delgado, sin tomar en cuenta sus propiedades aislantes, no significa la mejor inversión porque esto afectara al consumo de combustible, debido a la excesiva pérdida de calor.

Se realizó un programa de cómputo de consulta de base de datos de las propiedades de materiales refractarios más utilizados en los diseños y un programa de cómputo para calcular el espesor económico; Estos programas ayudan a agilizar los cálculos para el diseño del sistema aislante.

BIBLIOGRAFIA

KREITH FRANK
PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR
HERRERO HERMANOS SUCESTORES

SERWAY R.A.
FISICA.
México. Ed. McGRAW-HILL 1ª edición. 1990

ASKELAND DONALD R.
LA CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES
GRUPO EDITORIAL IBEROAMERICA

IAN KNIZEK
LOS PARAMETROS DE REFRACTARIOS MOLDEABLES Y PREFABRICADOS
BARROMEX, S.A. DE C.V.

NORTON F. H. REFRACTORIES FOURTH
MC. Graw-Hill Book Company, EDITION 1968.

NORTH AMERICAN COMBUSTION HANDBOOK. SECOND EDITION.
API STANDARD 560 FIRED HEATER

JOHNS-MANVILLE Refractory Products.
NEAL E. JAMES, ROGER CLARK
THE EFFECTIVE USE OF INSULATING REFRACTARY
ENERO 1975.

CHEMICAL ENGINEERING,
NEAL E. JAMES, ROGER CLARK
SAVING HEAT ENERGY IN REFRACTARY
JOHNS-MANVILLE Refractory Products; MAYO 4 1981

HYDROCARBON PROCESSING

NEAL E. JAMES

REPLACING REFRACTORY LININGS IN FIRED HEATERS
MANVILLE PRODUCTS CORP.; ENERO 1982.

II SEMINARIO DE INGENIERIA MECANICA PETROLERA
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO

III MESA REDONDA SOBRE EQUIPO PARA TRANSFERENCIA DE CALOR 1978

TAYLOR GEORGE A.

INGENIERIA ECONOMICA
EDITORIAL LIMUSA 1977

A.P. Green Refractories in the Hydrocarbon Processing Industry.

HYDROCARBON PROCESSING

PATEL M.R., MEHTA B. P. S.

OPTIMIZE THERMAL INSULATION

INDIAN FARMERS FERTILIZER COOPERATIVE; OCTOBER 1993

Heat transfer

AHUJA- WALSH

INGENIERIA DE COSTOS Y ADMINISTRACION DE PROYECTOS
EDICIONES ALFAOMEGA

REFMEX

CATALOGOS DE MATERIALES REFRACTARIOS

TLANEPANTLA EDO. DE MEX. ; DIC 96