

3  
2 Gener



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

CALCULO, SELECCION E INSTALACION DE AISLA-  
MIENTOS TERMICOS PARA EQUIPOS Y TUBERIA

## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A N  
CURIEL RODRIGUEZ JUAN  
MARIN MARTINEZ NORBERTO

DIRECTOR DE TESIS: HECTOR J BECERRA RIOS



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## INDICE

### INTRODUCCION

#### CAPITULO I.- PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

- 1.1.- Generalidades
- 1.2.- Mecanismos de transferencia de calor
- 1.3.- Transferencia de calor por convección
- 1.4.- Transferencia de calor por radiación
- 1.5.- Transferencia de calor por conducción

#### CAPITULO II.- MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

- 2.1.- Conductividad térmica
- 2.2.- Conductividad térmica en sólidos
- 2.3.- Conductividad térmica en fluidos
- 2.4.- Conductividad térmica en gases
- 2.5.- Ecuación general de Fourier
- 2.6.- Flujo de calor a través de una pared
- 2.7.- Flujo de calor a través de una pared compuesta
- 2.8.- Conducción de calor a través de paredes compuestas, uso de coordenadas cilíndricas.
- 2.9.- Flujo de calor a través de paredes de geometrias circulares.

#### CAPITULO III.- CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

- 3.1.- Características de un aislante.

3.2.- Clasificación de los materiales aislantes

#### CAPITULO IV.- SELECCION DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO

4.1.- Importancia de los sistemas de aislamiento térmico

4.2.- Datos de aplicación

4.3.- Procedimiento de diseño

4.4.- Método de selección de aislantes

4.5.- Identificación de los sistemas de aislamiento

4.6.- Criterios adicionales de diseño de los sistemas de aislamiento.

#### CAPITULO V.- ESPESOR ECONOMICO

5.1.- Balance económico

5.2.- Costos variables

5.3.- Costos fijos

5.4.- Ejemplo numérico

#### CAPITULO VI.- INSTALACION DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO TERMICO

6.1.- Recomendaciones para instalación de aislamientos térmicos.

6.2.- Especificaciones para instalación de un aislamiento térmico.

#### CAPITULO VII.- CONCLUSIONES

## INTRODUCCION

La finalidad principal que se persigue con éste trabajo es la de recabar, seleccionar, ordenar y sistematizar la información necesaria que permita a cualquier grupo o persona dedicada a efectuar trabajos de Ingeniería en plantas de proceso, contar con los elementos suficientes para seleccionar un sistema de aislamiento térmico que cumpla con los requerimientos del proceso y que de acuerdo al análisis térmico y económico sea óptimamente elegido. Así mismo, proporcionar los criterios más importantes en la instalación de los diferentes sistemas de aislamiento.

No obstante que en la actualidad en México existe gran cantidad de información referente a los sistemas de aislamiento térmico, la mayoría de ésta información se encuentra dispersa y en ocasiones totalmente desconocida; por esta razón, los métodos usados por los diferentes grupos de Ingeniería resultan incompletos o generalmente no son publicados externamente lo que complica el acceso a dicha información y genera la necesidad de que cada grupo desarrolle sus propios métodos de selección, existiendo una gran variedad de ellos, sin que hasta la fecha se hayan resumido y complementado en uno sólo para que sea usa-

do en forma generalizada, eliminando la diferencia de criterios y disminuyendo el tiempo empleado en la obtención de la información. Con el trabajo que presentamos creemos que por lo menos a nivel de estudiantes de Ingeniería en áreas relacionadas con -- procesos de transferencia de calor, la consideración anterior -- puede ser aplicada si se considera el uso de ésta tesis sirviendo como libro de consulta y de estudio para el cálculo, selección e instalación de los sistemas de aislamiento térmico para equipos y tubería.

Esta tesis esta formada por una recopilación de información publicada en revistas y libros extranjeros y en folletos -- aparecidos en el país referentes al tema.

En el primer capítulo se presentan las consideraciones más importantes de los tres mecanismos de transferencia de calor y se mencionan las relaciones matemáticas usadas en determinados procesos de transferencia de calor. En el capítulo dos se muestra el desarrollo y obtención de los modelos matemáticos que -- predicen el comportamiento del mecanismo de transferencia de calor por conducción en sistemas con geometrías distintas, éstos modelos son la basa para el cálculo del espesor de un aislante. El capítulo tres incluye la clasificación de los aislamientos --

térmicos y las características generales de cada clase de aislamiento. Los criterios de diseño y las consideraciones de selección de los sistemas de aislamiento térmico se mencionan en el capítulo cuatro, en el que también se incluyen algunas tablas que resumen las características de los materiales aislantes y de los sistemas de protección, así como la identificación de los mismos en dibujos y diagramas de Ingeniería. Como complemento a las consideraciones de selección del capítulo cuatro, en el capítulo siguiente se presenta el método para calcular el espesor económico, que representa un paso importante en la selección del sistema de aislamiento. Finalmente, en el capítulo seis hemos incluido los criterios más importantes a tomar en cuenta durante la instalación de los sistemas de aislamiento térmico, que en conjunto con los criterios y resultados obtenidos de las consideraciones de los capítulos dos, cuatro y cinco nos permitirán hacer la selección óptima de cualquier sistema de aislamiento térmico.

## CAPITULO I

### PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

#### 1.1.- GENERALIDADES

Uno de los fenómenos que reviste importancia considerable dentro del estudio de la Termodinámica es el relacionado con la propiedad que tiene la materia de transferir energía en forma de calor entre dos cuerpos: caliente y frío respectivamente, o de una parte de un cuerpo a otra que se encuentra a menor temperatura.

En general, puede decirse que donde exista diferencia de temperaturas, ocurrirá una transmisión de calor, llevándose a efecto mediante mecanismos complejos de transferencia.

#### 1.2.- MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El mecanismo por el cual el calor es transferido de un cuerpo caliente (fuente de calor) hacia un cuerpo frío (receptor) es verdaderamente complejo; sin embargo en estudios de ingeniería se acostumbra clasificar a los mecanismos de transferencia en: conducción, convección y radiación; aunque la mayoría de los procesos de transferencia son combinaciones de dos o tres de éstos mecanismos.

### 1.3.- TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCION

La convección es un proceso que comprende movimiento de masa de un fluido. Cuando una diferencia de temperatura produce - una porción de masa del fluido con diferente densidad. se produce un movimiento de masa de las porciones más densas hacia las menos densas; conociéndose este proceso como convección natural o libre. Cuando una bomba, un agitador o cualquier otro dispositivo causa el movimiento de masa el proceso es llamado convección forzada.

El mecanismo de transferencia de calor puede ser descrito por una ecuación parecida a la ecuación de conducción y es dada por:  $d Q = h A d t$  (1.1)

La constante de proporcionalidad  $h$  depende de la naturaleza del fluido y la forma de agitación siendo evaluada experimentalmente. A esta constante se le conoce como coeficiente de ---transferencia de calor por convección. La ecuación anterior puede integrarse, conociéndose como la ley del enfriamiento de Newton:  $Q = h A \Delta T$  (1.2)

#### 1.3.1. COEFICIENTE DE PELICULA

Para explicar el significado del término coeficiente de película será considerado el siguiente proceso de transferencia -

de calor: un líquido caliente fluye dentro de una tubería, intercambiando calor con el aire del medio ambiente a través de la pared del tubo.

Como es sabido, en el caso de que un fluido viaja en régimen turbulento en contacto con una pared sólida, en la vecindad inmediata de la superficie está clasificada una zona tranquila de fluido conocida como película, en la cual tiene lugar una caída considerable de temperatura.

En la práctica se ha visto que para una corriente en régimen turbulento, el movimiento de la película es de carácter laminar

En la mayoría de los procesos de transferencia de calor por convección es muy difícil medir el espesor de la película de fluido, y la temperatura en la superficie que separa la película de la masa principal del fluido; el flujo de calor transferido del fluido al sólido se calcula por medio de la ecuación:

$$d Q = h A d t.$$

Siendo  $h$  el coeficiente de película o coeficiente de superficie, e incluye las resistencias térmicas de la película laminar, la capa límite entre la película y el seno del fluido turbulento. Este coeficiente, como se menciona anteriormente, se determina experimentalmente y depende de la naturaleza del

fluido, de la pared sólida y de la agitación del fluido.

### 1.3.2.- DIFERENCIA MEDIA DE TEMPERATURA

Para la evaluación del coeficiente de película en cualquier proceso de transferencia por convección, es importante definir como son los perfiles de temperatura a lo largo del tubo — considerado; es decir, a medida que el líquido fluye a lo largo del tubo, absorbe o transmite calor sensible, por lo cual la temperatura del líquido varía con la longitud del tubo. En el caso de dos fluidos que viajan separados por una pared metálica el perfil de temperaturas respecto a la longitud  $L$  se representa en la figura 1.3.1.

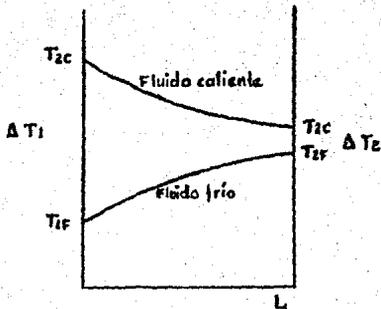


Fig. 1.3.1.

El fluido caliente de entrada, se enfría hasta una temperatura  $T_{2c}$  a la salida del sistema y el fluido frío a la entrada con una temperatura  $T_{1f}$  se calienta hasta una temperatura  $T_{2f}$  teniéndose un gradiente entre ambos fluidos a lo largo de la longitud considerada, siendo  $\Delta T_1$  el gradiente de temperatura a la entrada y  $\Delta T_2$  el

gradiente de temperatura a la salida del proceso.

La expresión  $\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \Delta T_2 / \Delta T_1}$  es la media logarítmica de la diferencia de temperaturas y se abrevia MLDT y representa un valor medio del perfil de diferencias de temperatura, usándose en la ecuación de calor, en la forma siguiente:

$$Q = \frac{h A (\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \Delta T_2 / \Delta T_1} \quad (1.3)$$

### 1.3.3.- CORRELACIONES IMPORTANTES

El proceso de transferencia de calor por convección ha sido estudiado ampliamente, teniéndose como resultado algunas correlaciones específicas para determinadas condiciones de flujo, geometrías y tipos de fluidos. A continuación se presentan ecuaciones empíricas que describen el comportamiento de algunos casos en los que se transfiere calor por convección.

#### 1.- Líquidos de baja viscosidad dentro de tubos

Para líquidos cuya viscosidad no sea mayor que el doble de la viscosidad del agua, se puede usar la ecuación adimensional de Colburn:

$$\frac{h}{C_p G} \left( \frac{C_p M_f}{K} \right)^{2/3} = 0.023 \left( \frac{D_G}{M_f} \right)^{-0.2} \quad (1.4)$$

#### 2.- Para agua en flujo turbulento dentro de tubos

$$h = \frac{3344 (1 + 0.0161 t_f) (V_S)^{0.8}}{(D_f)^{0.2}} \quad (1.5)$$

### 3.- Flujo o corriente laminar

$$\frac{h_{lm} D}{K} = 2.0 \left( \frac{\dot{W} C_p}{K L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{M_s} \right)^{0.14} \quad (1.6)$$

4.- Líquidos que circulan perpendicularmente a un haz de tubos a tresbolillo.

Para  $Re > 2100$  se aplica la ecuación:

$$\left( \frac{h_m}{C_p G \text{ máx}} \right) \left( \frac{C_p M_f}{K} \right)^{2/3} = 0.33 \left( \frac{D_o G \text{ máx}}{M_f} \right)^{-0.4} \quad (1.7)$$

Y para el agua, la ecuación.

$$h_m = \frac{1.147 (1 + 0.05625 t_f) (V_g^{0.6})}{(D_o')^{0.4}} \quad (1.8)$$

### 5.- Gases en tubos largos y rectos.

Para corrientes turbulentas de gases dentro de tubos se recomienda la ecuación:

$$h = \frac{28 C_p (G')^{0.8}}{(D_i')^{0.2}} \quad (=) \frac{\text{Kcal}}{h \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad (1.9)$$

#### 1.3.4.- CONVECCION LIBRE O NATURAL

El mecanismo de la convección libre fuera de tubos es diferente al mecanismo dentro de los tubos. Las corrientes de convección fuera de los tubos no están restringidas, teniendo libertad de avanzar hacia afuera de los tubos. Las investigaciones realizadas en tubos calientes, muestran que el aire frío de la atmósfera que rodea al tubo, se mueve hacia éste, calentándose por consiguiente y luego asciende aumentando con esto la convección

ción. De acuerdo con los resultados de las investigaciones, el coeficiente de película para la convección libre de gases desde cilindros horizontales se puede calcular por

$$\frac{hcD}{K_f} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{D^3 \rho_f^2 g \beta \Delta t}{M_f^2} \right)^n \left( \frac{C_p M_f}{K_f} \right)^m \quad (1.10)$$

Donde  $hc$  es el coeficiente de convección libre y todas las propiedades se evalúan a la temperatura de la película ficticia  $t_f$ , tomada como la media de la temperatura de la superficie caliente y la temperatura del fluido que se va a calentar.

$$t_f = \frac{t_w - t_a}{2}$$

Para superficies externas de diferentes formas, Mc Adams <sup>4</sup> ha sintetizado las formas dimensionales para convección libre al aire.

Tubos horizontales :  $hc = 3.56 (\Delta t_s / D_o')^{0.25} \quad (1.11)$

Tubos verticales largos:  $hc = 3.56 (\Delta t_s / D_o')^{0.25} \quad (1.12)$

Placas verticales de menos

de dos pies de altura:  $hc = 2.0 (\Delta t_s / H)^{0.25} \quad (1.13)$

Placas verticales de más

de tres pies de altura:  $hc = 1.53 (\Delta t_s)^{0.25} \quad (1.14)$

Placas horizontales hacia

abajo:  $hc = 1.13 \Delta t_s^{0.25} \quad (1.15)$

Hacia arriba:  $hc = 2.16 \Delta t_s^{0.25} \quad (1.16)$

### 1.4.- MECANISMOS DE CALOR POR RADIACION

La energía radiante emitida por un cuerpo va desde longitudes de onda extremadamente cortas (rayos cósmicos) hasta longitudes de onda muy largas como las ondas de radio.

La radiación térmica es una parte de la emisión electromagnética de una sustancia y se manifiesta como luz o como calor. La banda térmica importante ocupa longitudes de onda intermedias generalmente entre 0.1 y 100  $\mu$ . El espectro completo está representado en la figura 1.4.1 .

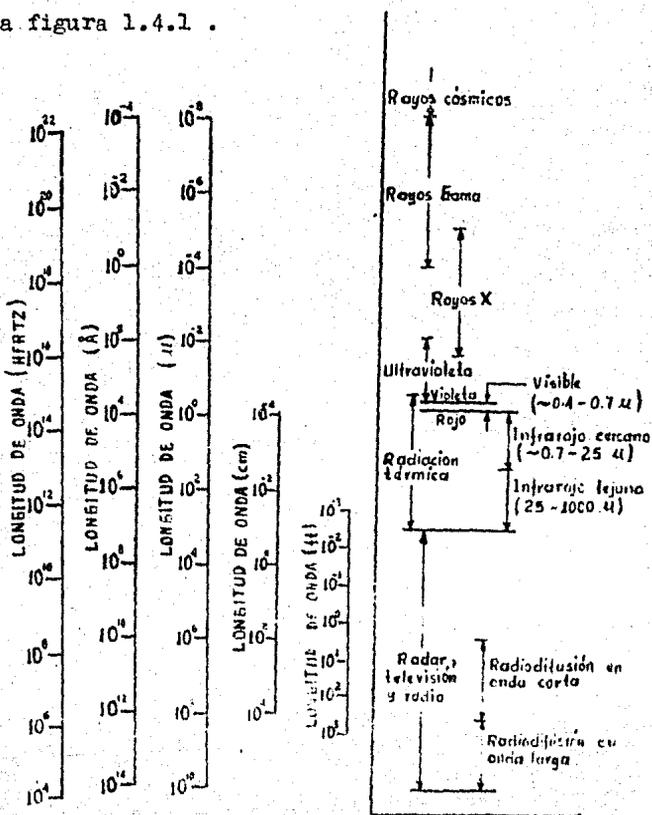


Fig 1.4.1

Realmente existe radiación térmica a lo largo de todo el espectro, pero resulta cuantitativamente importante entre los límites mostrados en la figura.

A diferencia de los mecanismos de transferencia de calor - por conducción y convección, en donde el transporte de energía requiere de un medio para llevarse a cabo, el calor se propaga por radiación, aún en el vacío.

Teorías modernas explican la energía radiante en base a la teoría cuántica y la teoría de la onda electromagnética. Una de las teorías, considera que el origen de la energía radiante puede atribuirse a los cambios en las energías de átomos y moléculas conjugado con los cambios de energía, producto del cambio de los electrones del átomo de una a otra órbita. El primer caso - se explica en base al cambio del contenido de energía debido al cambio de amplitud de la vibración de un núcleo de una molécula con respecto a otro. La energía de la molécula puede cambiarse por una alteración de su energía cinética de traslación o rotación y esto resultará en emisión de energía radiante. El segundo caso considera el paso de electrones de una a otra órbita de energía diferente. Si el electrón pasa de una órbita de menor - energía a otra de mayor, el electrón necesariamente capta energía

para cambiar de órbita; por el contrario, si se pasa de una órbita de mayor a otra de menor energía, el átomo irradia el exceso de energía en forma de radiación térmica (puede ser en forma de luz también).

#### 1.4.1. EL CUERPO NEGRO

En un cuerpo cualquiera puede absorber parcial o totalmente, o reflejar la radiación térmica; por lo cual, para un cuerpo receptor se tiene:

$$a + r + \tau = 1 \quad (1.17)$$

Dónde  $a$  es la fracción absorbida (absorbancia),  $r$  la reflectividad y  $\tau$  es la fracción reflejada y la transmisividad  $\tau$ , la fracción transmitida.

Las sustancias que absorben casi por completo la energía radiante son el negro de humo, el negro de platino y el negro de bismuto.

Si un cuerpo emite radiación a otro cuerpo y ninguna fracción de la energía emitida es devuelta, los cuerpos tienen transmisividad cero y tienen cero de reflectividad. Este concepto se conoce como cuerpo negro perfecto y es una idealización del comportamiento de intercambio de energía radiante, puesto que en la práctica no existen cuerpos que absorban por completo toda

la energía radiante: ( $a = 1$ ).

#### 1.4.2.- RADIACION DESDE SUPERFICIES NEGRAS

Una superficie negra, emite y absorbe a cualquier longitud de onda y a cualquier temperatura la máxima cantidad posible de radiación. Si un cuerpo negro perfecto irradia energía, la radiación total puede determinarse usando la ecuación desarrollada por Max Planck en 1900, donde considera una relación para el flujo emisor monocromático de un cuerpo negro, en función de la longitud de onda:

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (1.18)$$

Donde:

$E_{\lambda}$  = flujo emisor monocromático de un cuerpo a temp. T.

$\lambda$  = longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )

T = temperatura ( $^{\circ}\text{R}$ )

$C_1 = 1.187 \times 10^8 \text{ BTU } \mu\text{m}^4 / \text{ft}^2 \text{ hr}$

$C_2 = 2.5896 \times 10^4 \mu\text{m } ^{\circ}\text{R}$

De la ecuación anterior, mediante un tratamiento matemático, se obtiene la ecuación conocida como la ley de Stefan-Boltzmann para un flujo emisor de un cuerpo negro:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (1.19)$$

Donde:

$E_b(T)$  = flujo emisorio de un cuerpo negro

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann =  $0.1714 \times 10^{-8}$  BTU/hft<sup>2</sup> °R

$T$  = Temperatura (°R).

Una de las aplicaciones importantes de esta ecuación se tiene en el cálculo de las pérdidas por radiación hacia el exterior de tubos o recipientes, usándose la siguiente ecuación para dichos casos:

$$h_r = 0.173 E \left[ (T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right] / T_1 - T_2 \quad (1.20)$$

#### 1.4.3.- RADIACION DESDE SUPERFICIES NO NEGRAS

El cuerpo negro representa un estandar contra el cual se puede comparar el comportamiento de superficies reales. Algunos de los factores que deben considerarse cuando se estudian superficies no negras son: Temperatura, longitud de onda de la radiación, acabado de la superficie, composición, ángulo de incidencia de la radiación.

Para cada condición particular de radiación de superficies no negras se han deducido ecuaciones que describen el comportamiento, sin embargo no serán considerados dentro de este estudio.

## 1.5.- MECANISMO DE CALOR POR CONDUCCION

La conducción es la transferencia de calor por movimiento molecular, desde una parte de un cuerpo a otra parte del mismo o entre un cuerpo y otro en contacto físico con él.

La teoría de la conducción de calor en sólidos considera que el calor es conducido por ondas causadas por el movimiento atómico a través de la estructura molecular del sólido. La teoría microscópica de conducción está basada en la definición de conductividad térmica, la cual expresa simplemente una proporción entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura independientemente de los diversos mecanismos de conducción. En el siguiente capítulo será estudiado a detalle este mecanismo de transferencia.

## NOMENCLATURA DE ESTE CAPITULO

- $A$  = Area de la superficie de transmisión de calor ,  $m^2$   
 $C_p$  = Calor específico a presión constante ,  $Kcal/Kg\ ^\circ C$   
 $D$  = Diámetro , m  
 $D_o$  = Diámetro externo , m ;  $D_i$  = diámetro interno , m  
 $D'$  = Diámetro , cm  
 $D'_o$  = Diámetro externo, cm ;  $D'_i$  = diámetro interno, cm  
 $g_L$  = Aceleración de la gravedad ,  $1.271 \times 10^8\ m/h^2$   
 $G$  = Masa velocidad = masa/área  $\times$  tiempo ,  $Kgm/m^2\ h$  ,  $G' = Kgm/m^2$   
 seg.  
 $G_{m\acute{a}x}$  = Masa velocidad a través del área mínima libre en una fila de tubos, normal a la corriente del fluido ,  $Kgm/h\ m^2$ .  
 $h$  = Coeficiente de película individual de transmisión de calor,  $Kcal/h\ m^2\ ^\circ C$   
 $h_c$  = Coeficiente de convección libre ,  $Kcal/h\ m^2\ ^\circ C$   
 $h_m$  = Valor medio de  $h$  basado en  $\Delta T_m$   
 $h_{a,m}$  = Promedio de  $h$  basado en las medias aritméticas de las temperaturas.  
 $h_r$  = Coeficiente de radiación al aire  
 $H$  = Altura , m  
 $k$  = Conductividad térmica ,  $\frac{K\ cal\ m}{h\ m^2\ ^\circ C}$

$k_f = k$  a la temperatura de la película

$L =$  Longitud de la superficie de transmisión de calor , m

$Q =$  Cantidad de calor , K cal

$q =$  Flujo o velocidad de transmisión del calor Kcal/hr

$T =$  Temperatura  $^{\circ}K = t + 273$

$t =$  Temperatura del fluido  $^{\circ}C$

$t_w =$  Temperatura de la pared  $^{\circ}C$

$t_f = (t + t_w)/2$

$V_s =$  Velocidad media m/seg

$W =$  Flujo másico por tubo , Kgm/hr

$\Delta t =$  Diferencia de temperatura en  $^{\circ}C$

$\Delta T =$  Diferencia de temperatura en  $^{\circ}K$

$\Delta t_s =$  Diferencia de temperatura entre la superficie y el ambiente ,  $^{\circ}C$

$\mu =$  Viscosidad absoluta a la temperatura de la masa Kgm/hr m  
 $= 3.6 \times C_p = 35\ 316 \text{ (Kgf seg/m}^2\text{)}$

$\mu_f =$  Viscosidad, Kgm/hr m a  $t_f$ .

$\alpha =$  Constante

$\rho_f =$  Densidad a  $t_f$ , Kgm/m<sup>3</sup>

$\beta =$  Coeficiente volumétrico de dilatación térmica  $^{\circ}K^{-1}$

## CAPITULO II

### MECANISMO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCION

#### 2.1- CONDUCTIVIDAD TERMICA

En casi todos los sistemas que involucran flujo, tal como flujo de calor, flujo de fluidos, o flujo de electricidad, se ha observado que la cantidad que fluye es directamente proporcional a la diferencia de potencial (fuerza impulsora) e inversamente proporcional a la resistencia que presenta el sistema. Esta ley se puede expresar en la siguiente forma:

$$\text{Flujo} \propto \frac{\text{Potencial}}{\text{Resistencia}}$$

En un circuito eléctrico esta ley toma la forma de la ley de Ohm, el voltaje en el circuito es el potencial y la dificultad con la que los electrones fluyen por el alambre es la resistencia. Para flujo de fluidos, la presión en un circuito hidráulico es el potencial (fuerza impulsora) y la rugosidad de la tubería es la resistencia al flujo. En flujo de calor a través de un medio determinado (puede ser una pared), el flujo se lleva a cabo por la diferencia de temperatura entre el punto caliente y frío constituyendo la fuerza impulsora, y el medio a través del cual se tiene el flujo de calor opone una resistencia a

dicho flujo. La conductancia es la recíproca de la resistencia (conductancia = 1/resistencia), e indica la facilidad para transmitir el flujo, con lo cual la ecuación anterior puede expresarse como :

$$\text{Flujo} \propto \text{conductancia} \times \text{potencial}$$

La conductancia tiene las dimensiones de BTU/(hr) (°F) ---- (Cal/hr °C). La conductancia es una propiedad general dependiente del espesor y área a través de la cual se tiene el flujo de calor por lo cual no es útil para caracterizar los materiales -- con respecto al flujo de calor. Por lo anterior se ha convenido reportar la conductancia únicamente cuando todas las dimensiones se refieran a valores unitarios. Cuando la conductancia se reporta para una cantidad de material de un pie de grueso con un área de flujo de un pie cuadrado, la unidad de tiempo de 1 hora y la diferencia de temperatura de 1 °F, se llama conductividad térmica K. La conductividad térmica K tiene las unidades de BTU/hrft<sup>2</sup> °F (Cal/hr m<sup>2</sup> °C).

#### 2.1.1.- DETERMINACION EXPERIMENTAL DE K EN SOLIDOS

El aparato para determinar la conductividad térmica de sólidos no metálicos (fig. 2.1), consiste de una placa calefactora eléctrica, 2 especímenes idénticos de prueba a través de los cuales

fluye el calor y dos chaquetas de agua con las cuales se elimina el calor.

La temperatura en ambos lados del espécimen se mide por medio de termocoples. Este aparato está provisto de un anillo protector para asegurar que todo el calor medido que entra a las placas pase a través de las muestras con una pérdida despreciable por sus lados. El anillo protector rodea el conjunto de prueba y consiste de un calentador auxiliar intercalado entre las porciones del material que se prueba. Mientras la corriente entra a la placa protectora, la entrada al calentador auxiliar se ajusta hasta que no haya diferencia de temperatura entre la muestra y los puntos adyacentes en el anillo protector.

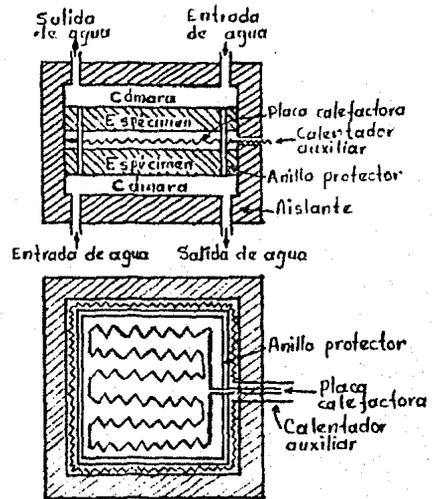


Fig. 2.1. Aparato para determinar la conductividad de sólidos

Las observaciones se hacen cuando la entrada de calor y las temperaturas en ambas fases del material de prueba permanecen estables. Puesto que la mitad del gasto eléctrico medido fluye a través de cada espécimen y la diferencia de temperaturas y dimensiones del espécimen se conocen, K se puede calcular directamente mediante la ecuación:

$$Q = K A \Delta T / L. \quad (2.1)$$

### 2.1.2.- DETERMINACION EXPERIMENTAL DE K EN LIQUIDOS Y GASES.

Existen grandes dificultades en la determinación de conductividad de líquidos y gases puesto que si el calor fluye a través de una película gruesa de líquido o gas se origina convección libre y la conductividad resulta bastante alta. Para reducir la convección es necesario usar películas muy delgadas y diferencia de temperatura muy reducida lo cual representa bastantes

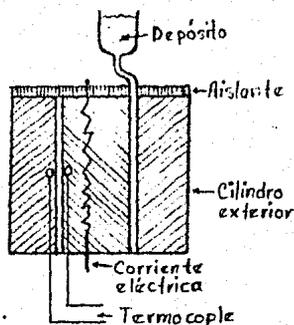


fig. 22 Aparato para determinar la conductividad de líquidos

problemas

El método de Bridgman y Smith permite hacer determinaciones de conductividad y consiste de un anulo de fluidos muy pequeño entre dos cilindros de cobre sumergidos en un baño a temperatura constante, como se muestra en la fig. 2.2. El calor suministrado al cilindro interior por la resistencia, fluye a través de la película al cilindro exterior, donde se elimina por el baño. Este aparato a través del uso del depósito, asegura que el anulo esté lleno de líquido y se adapta también a gases. La película es de 1/64 plg. de grueso, y la diferencia de temperatura se mantiene muy reducida.

### 2.1.3.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA PRESION SOBRE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA K.

Para la mayoría de los problemas prácticos no hay necesidad de introducir algún factor de corrección para las variaciones de la conductividad térmica con la temperatura. Sin embargo, la variación puede expresarse por la ecuación lineal siguiente:

$$K = k_0 + \gamma t \quad (2.2)$$

Donde  $k_0$  es la conductividad a  $T_0$  y  $\gamma$  es una constante que denota el cambio en la conductividad por grado de cambio en la temperatura. La conductividad para muchos líquidos decrece con el

aumento de la temperatura, aunque el agua es una excepción notable. Para todos los gases y vapores comunes, la conductividad aumenta con el aumento de la temperatura. Sutherland dedujo una ecuación a partir de la teoría cinética para la variación de la conductividad con la temperatura para gases:

$$K = K_{32} \frac{492 + Ck}{T + Ck} \left( \frac{T}{492} \right)^{3/2} \quad (2.3)$$

Donde:

$Ck$  = constante de Sutherland

$T$  = temperatura absoluta del gas,  $^{\circ}R$

$K_{32}$  = conductividad del gas a  $32^{\circ}F$

La influencia de la presión en la conductividad de los sólidos y líquidos es despreciable. Los datos reportados sobre gases son muy inexactos debido a los efectos de la convección libre y radiación, que no permiten hacer generalizaciones.

Pero a partir de la teoría cinética de los gases, se puede concluir que la influencia de la presión deberá ser pequeña, excepto a vacíos muy altos.

## 2.2.- CONDUCTIVIDAD TERMICA EN SOLIDOS

La conductividad térmica de los sólidos es mayor que la de los líquidos, la que a su vez es mayor que la de los gases. Es más fácil transmitir calor a través de un sólido que a través -

de un líquido y más fácil por un líquido que por un gas. Algunos sólidos, tales como los metales, tienen altas conductividades térmicas y son llamados conductores térmicos; otros tienen bajas conductividades térmicas y son malos conductores del calor a estos se les conoce como aislantes. Las conductividades térmicas de algunos materiales sólidos se representan en las tablas de conductividad del capítulo IV y anexo I.

### 2.3.- CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN FLUIDOS

La conductividad térmica para líquidos generalmente es pequeña comparada con la conductividad de los sólidos; es difícil transmitir calor en líquidos, aunque más bien, la transmisión de calor en los líquidos se efectúa por convección (capítulo I).

En el anexo II se muestra una tabla de conductividad térmica para varios líquidos.

### 2.4.- CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN GASES

La relación de la conductividad térmica a la viscosidad es de interés teórico particular, así como las relaciones teóricas deducidas a partir de la teoría cinética. Maxwell desarrolló el siguiente grupo adimensional para gases:

$$\frac{K}{\mu C_v} = NML \quad (2.4)$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad absoluta del gas,  $C_v$  es el calor específico

fico a volumen constante y  $N_{ML}$  es el módulo adimensional de Maxwell.

Fuken sugirió una relación empírica:

$$N_{ML} = 0.25 (9\gamma - 5) \quad (2.5)$$

Donde  $\gamma$  es la relación del calor específico a presión constante.

Eliminando  $N_{ML}$  de la ecuación 2.4.1 obtenemos la relación recomendada para estimar el módulo de Prandtl  $N_{Pr}$ , un grupo adimensional  $C_p M / K$  de importancia en convección:

$$N_{Pr} = \frac{C_p M}{K} = \frac{4}{(9-5/\gamma)} \quad (2.6)$$

## 2.5.- ECUACION GENERAL DE FOURIER

De la definición de conductividad del capítulo 2.1 y sabiendo que para flujo de calor, el potencial o fuerza impulsora lo constituye el gradiente de temperatura, se obtiene entonces la ecuación:

$$Q = K \frac{A}{L} \Delta T \quad (2.7)$$

Esta ecuación puede escribirse en forma diferencial:

$$\frac{dQ}{d\theta} = K d A \frac{dt}{dx} \quad (2.8)$$

De acuerdo a la fig. 2.5.1, el cubo de volumen elemental  $d v = dx dy dz$  recibe una cantidad diferencial de calor  $d Q_1$  (BTU) a --

través de su cara Y Z en un intervalo de tiempo  $d\theta$ . Todas las caras excepto las caras Y Z están aisladas. En el mismo intervalo de tiempo, la cantidad de calor  $dQ_2$  abandona el cubo por la cara opuesta. Pueden existir tres casos en la forma de transferencia:  $dQ_1 > dQ_2$  el cubo almacena calor,  $dQ_1 < dQ_2$  el cubo pierde calor y  $dQ_1 = dQ_2$  no hay almacenamiento ni pérdida de calor. Considerando cualquiera de los dos primeros casos, se puede definir un término de almacenamiento o pérdida  $dQ$  como la diferencia entre el calor que entra y el calor que sale,

$$dQ = dQ_1 - dQ_2 \quad (2.9)$$

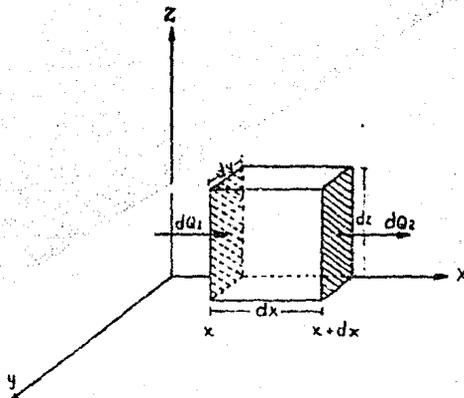


Fig. 2.5.1 Flujo de calor unidireccional

El calor que entra en la cara ZY, de acuerdo a la ecuación ---

(2.8) está dado por:

$$\frac{dQ_1}{d\theta} = K dy dz \left( -\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.10)$$

El gradiente de temperatura  $\left(-\frac{\partial T}{\partial x}\right)$  puede variar, con el tiempo

o la posición en el cubo. La variación de  $\left(-\frac{\partial T}{\partial x}\right)$  como  $f(x)$  —

únicamente es  $-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)$ . Sobre la salida del cubo de  $x$  a  $x + dx$ ,

si  $dQ_2 > dQ_1$  el cambio total en el gradiente de temperatura será

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) dx = -\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx$$

Entonces a  $x$ , el gradiente es  $-\frac{\partial T}{\partial x}$  y a  $x + dx$  el gradiente de —

temperatura es:  $-\frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx$

$dQ_2$  a la salida del cubo y en la misma forma como la ecuación —

$$(2.10) \text{ es dado por: } \frac{dQ_2}{dt} = K dA \left[ -\frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dx \right] \quad (2.11)$$

$$\text{De la cual se obtiene: } \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_1}{dt} - \frac{dQ_2}{dt} = K dy dz \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) dx \quad (2.12)$$

Puesto que el análisis se basa en un volumen elemental, es necesario definir el calor específico volumétrico,  $C_v$  (BTU/pie<sup>3</sup> °F)

obtenido al multiplicar el calor específico  $C$  (BTU/lb °F) por —

la densidad  $\rho$ . Para aumentar el volumen  $dx dy dz$  por  $\frac{dT}{dt} dt$  (°F)

se requiere un cambio de calor en el cubo de :

$$\frac{dQ}{dt} = C_v dx dy dz \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.13)$$

Combinando las ecuaciones. (2.13 ) y (2.12 ) tenemos

$$C\varphi \, dx \, dy \, dz \, \frac{\partial T}{\partial \theta} = K \, dy \, dz \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) dx$$

De la cual 
$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{K}{C\varphi} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (2.14)$$

Que es conocida como la ecuación general de Fourier. El término  $K/C\varphi$  constituye la difusividad térmica, ya que contiene todas las propiedades involucradas en la conducción de calor y tiene las dimensiones de  $\text{pie}^2/\text{h}$  ( $\text{m}^2/\text{h}$  ).

## 2.6.- FLUJO DE CALOR A TRAVES DE UNA PARED

De los problemas de flujo de calor, el caso de conducción de calor a través de una pared plana constituye uno de los problemas más simples.

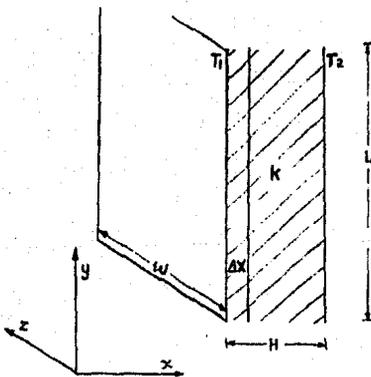


Fig. 2.6.1

La figura 2.6.1 muestra una placa metálica de espesor H, longitud L y anchura W, siendo K la conductividad térmica del material. Las paredes a lo largo de L, prácticamente tienen temperaturas constantes  $T_1$  y  $T_2$ .

### 2.6.1.- OBTENCION DEL MODELO

MATEMATICO

Para la obtención del modelo matemático adecuado, el tratamiento estará reflejado a la descripción anterior y considerará los siguientes postulados:

- 1).- Sólo es considerable la conducción del calor en la dirección X, es decir, se tiene el caso de flujo unidireccional de energía.
- 2).- La propiedad importante del medio, la conductividad térmica, se mantiene constante con la temperatura.
- 3).- No hay variación de la temperatura con el tiempo, es decir se tiene el estado estacionario.

Para la obtención del modelo es necesario el planteamiento de la ecuación que corresponde al principio de la conservación de la energía:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Velocidad} \\ \text{de entrada} \\ \text{de energía} \\ \text{calorífica} \\ \text{al sistema} \end{array} \right\} - \left. \begin{array}{l} \text{Velocidad} \\ \text{de salida} \\ \text{de energía} \\ \text{calorífica} \\ \text{al sistema} \end{array} \right\} + \left. \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{producción} \\ \text{de energía} \\ \text{calorífica} \\ \text{en el sistema} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación} \\ \text{de energía} \\ \text{calorífica} \\ \text{en el sistema} \end{array} \right\}$$

(2.15)

Con referencia a la figura 2.6.1, se considera como sistema un elemento de espesor  $\Delta x$ , longitud L y espesor W, de tal forma que

el elemento de volumen es ( $LW \Delta x$ ).

$q_x |_x$  representa la energía que entra en el punto  $x$ , y la energía que sale en el punto  $(x + \Delta x)$  es representada como:

$$q_x |_{x + \Delta x} .$$

De acuerdo a los postulados considerados para la obtención del modelo, no existe producción de energía, tampoco existe acumulación, ya que se tiene estado estacionario. En general,  $q_x$  tiene unidades de ENERGIA/AREA. TIEMPO

De lo anterior, la ecuación (1) se transforma en:

$$(LW) q_x |_x - (LW) q_x |_{x + \Delta x} = 0 \quad (2.16)$$

donde  $LW$  representa el área normal a la dirección de la conducción de calor.

Dividiendo la ecuación (2.16) entre el volumen del elemento ( $LW \Delta x$ ) y reorganizando:

$$\frac{q_x |_{x + \Delta x} - q_x |_x}{\Delta x} = 0$$

tomando el límite cuando  $\Delta x$  tiende a cero y aplicando el concepto de derivada.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{q_x |_{x + \Delta x} - q_x |_x}{\Delta x} = \frac{d q_x}{dx} = 0 \quad (2.17)$$

La ley de Fourier de la conducción del calor, en forma unidireccional, expresa:

$$q_x = -K \frac{dt}{dx} \quad (2.18)$$

substituyendo (2.18) en (2.17) se obtiene finalmente:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (2.19)$$

Hasta aquí se ha llegado a la formulación del modelo para la conducción del calor a través de una pared de espesor finito y longitud L muy larga.

#### 2.6.2.- SOLUCION DEL MODELO

Para resolver el modelo, únicamente se integra dos veces - llegando a la siguiente solución:

$$T = B X + C \quad (2.20)$$

Para evaluar las constantes B y C se necesitan dos valores en - la frontera:

$$\text{C.F.1 en } X = X_1, T = T_1$$

$$\text{C.F.2 en } X = X_2, T = T_2$$

Aplicando estas condiciones en la solución general, se obtiene:

$$T_1 = B X_1 + C$$

$$T_2 = B X_2 + C$$

Resolviendo para B y C y substituyendo en (2.20), se obtiene finalmente la solución particular del modelo:

$$T = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{X_2 - X_1} (X - X_1) \quad (2.21)$$

De esta ecuación puede observarse que la temperatura  $T$  es una función lineal de la dirección  $X$ . En forma funcional  $T = f(x)$ .

## 2.7.- FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE UNA PARED COMPUESTA

En este punto se tratará el problema de la conducción de calor a través de paredes compuestas, las cuales se encuentran limitadas por fluidos con diferentes temperaturas como es el caso de las paredes de un horno, una línea de vapor (teniendo en este caso una geometría cilíndrica), las paredes de una cámara frigorífica, etc.

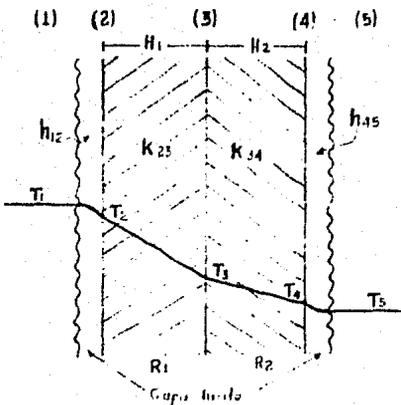


Fig. 2.7.1

La figura 2.7.1 corresponde a una pared compuesta por dos materiales cuyas conductividades térmicas son  $K_{23}$  y  $K_{34}$ . Las paredes están limitadas por fluidos con los cuales intercambian calor por convección, siendo  $h_{12}$  y  $h_{45}$  los coeficientes de película respectivos.

El flujo de calor  $q$  de (1) a (2) a través del material con

conductividad  $K_{23}$ , debe vencer la resistencia  $R_1$ , pero al pasar por este material, el calor también pasa a través del material de conductividad  $K_{34}$  para intercambiarse con el fluido de coeficiente de película  $h_{45}$ , venciendo previamente la resistencia  $R_2$ .

### 2.7.1.- OBTENCION DEL MODELO MATEMATICO

De acuerdo a la figura 2.7.2 se tomará un elemento de espesor  $\Delta x$  y volumen  $WL\Delta x$ .

Aplicando el principio de conservación de la energía, ecuación 2.15; considerando previamente los siguientes postulados:

- 1.- El calor se conduce fundamentalmente en una sola dirección,  $x$ .
- 2.- La conductividad térmica se mantiene constante con la temperatura.
- 3.- Se considera que se tiene estado estacionario

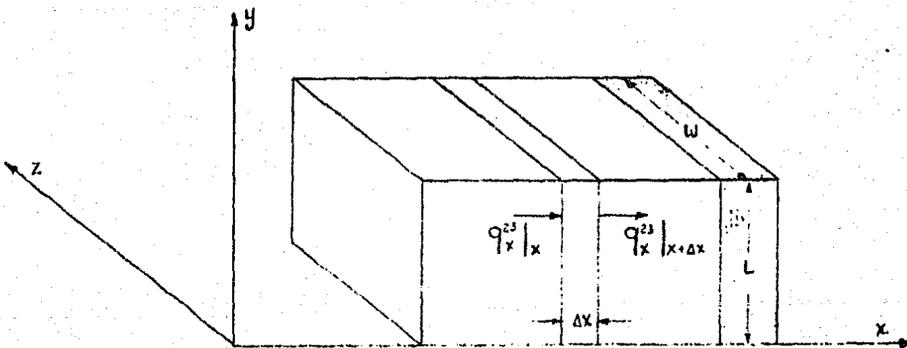


Fig. 2.7.2

Tomando los postulados anteriores y sabiendo que no hay producción de energía en las paredes, la ecuación 2.15 se transforma en:

$$(WL) q_x^{23} \Big|_x - (WL) q_x^{23} \Big|_{x + \Delta x} = 0 \quad (2.22)$$

WL es el área perpendicular al flujo de energía y  $q_x$  es la cantidad de calor que se conduce por unidad de área y de tiempo.

Dividiendo la ec. (2.22) entre el volumen  $WL \Delta x$  del elemento diferencial, se obtiene:

$$\frac{q_x^{23} \Big|_{x + \Delta x} - q_x^{23} \Big|_x}{\Delta x} = 0$$

Tomando el límite cuando  $\Delta x \rightarrow 0$ , se tiene:

$$\frac{d q_x^{23}}{d x} = 0 \quad (2.23)$$

Esta ecuación se puede considerar como el modelo matemático.

### 2.7.2.- SOLUCION DEL MODELO

Condiciones a la frontera: Como condiciones a la frontera se puede considerar tanto a las temperaturas especificadas en las dos fronteras, como la "Ley del enfriamiento de Newton" en ambos lados de la pared compuesta.

$$C.F.1 \quad \text{en } X = X_2, \quad T = T_2$$

$$C.F.2 \quad \text{en } X = X_4, \quad T = T_4$$

$$\text{C.F.3 en } x = x_2, \quad q_2 = h_{12} (T_1 - T_2)$$

$$\text{C.F.4 en } x = x_4, \quad q_2 = h_{45} (T_4 - T_5)$$

Para resolver el modelo simplemente se integra la ec. (2.23), -  
 teniéndose el resultado:

$$q_x^{23} = q_2 = \text{Constante} \quad (2.24)$$

La constante  $q_2$  corresponde a  $q$  en el plano  $x = x_2$ , y debi-  
 do a que en el estado estacionario  $q$  es igual en las dos paredes  
 se tiene:

$$q_x^{23} = q_x^{34} = q_2 = \text{Constante} \quad (2.25)$$

Aplicando enseguida la Ley de Fourier de la conducción del  
 calor en una sola dirección se obtiene:

$$q_x^{23} = -k^{23} \frac{d T^{23}}{d x} \quad (2.26a)$$

$$q_x^{34} = -k^{34} \frac{d T^{34}}{d x} \quad (2.26b)$$

Y de acuerdo con la ec. (2.25)

$$-k \frac{d T^{23}}{d x} = q_2 \quad (2.26c)$$

$$-k \frac{d T^{34}}{d x} = q_2 \quad (2.26d)$$

Integrando las últimas ecuaciones teniendo presente que --  
 las conductividades térmicas son constantes, y empleando a la -  
 vez las dos primeras condiciones a la frontera se obtiene:

$$T_2 - T_3 = -q_2 \left( \frac{x_2 - x_3}{k_{23}} \right) \quad (2.27)$$

$$T_3 - T_4 = -q_2 \left( \frac{x_3 - x_4}{k_{34}} \right) \quad (2.28)$$

De las condiciones a la frontera 3 y 4 se tiene:

$$T_1 - T_2 = \frac{q_2}{h_{12}} \quad (2.29)$$

$$T_4 - T_5 = \frac{q_2}{h_{45}} \quad (2.30)$$

Sumando las cuatro últimas ecuaciones, llegamos a la ecuación siguiente:

$$T_1 - T_2 = q_2 \left\{ \frac{1}{h_{12}} + \frac{(x_3 - x_2)}{k_{23}} + \frac{(x_4 - x_3)}{k_{34}} + \frac{1}{h_{45}} \right\} \quad (2.31)$$

ó bien:

$$q_2 = \frac{T_1 - T_2}{\left\{ \frac{1}{h_{12}} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - x_{i-1}}{k_{i-1,i}} \right) + \frac{1}{h_{45}} \right\}} \quad (2.31a)$$

De la ecuación anterior puede definirse el coeficiente global U de transmisión de calor:

$$U = \left\{ \frac{1}{h_{12}} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - x_{i-1}}{k_{i-1,i}} \right) + \frac{1}{h_{45}} \right\}^{-1}$$

de donde:

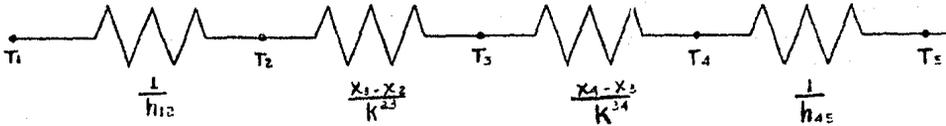
$$q_2 = U (T_1 - T_2)$$

ó bien:

$$Q_2 = U (WL) (T_1 - T_2)$$

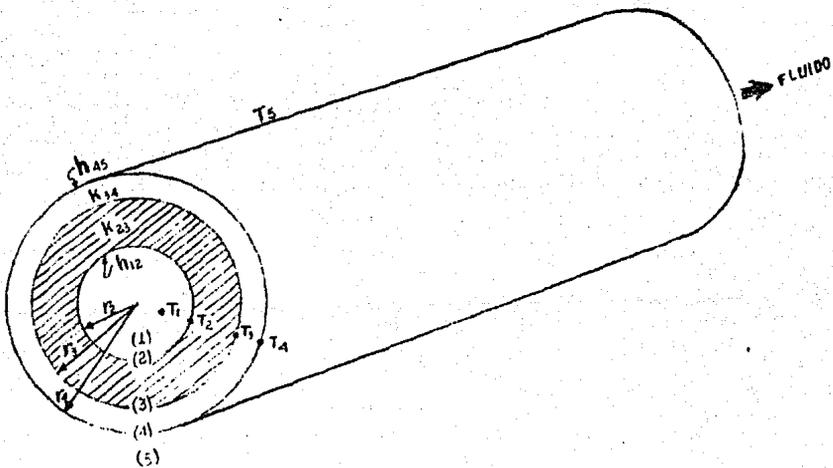
Como ha podido observarse, la pared compuesta considerada

en este capítulo, puede representarse simplemente como una suma de resistencias en serie.



La ecuación (2.31) puede desarrollarse para  $n$  paredes.

2.8.- CONDUCCION DE CALOR A TRAVES DE PAREDES COMPUESTAS, LAS CUALES SE ENCUENTRAN LIMITADAS POR FLUIDOS CON DIFERENTES TEMPERATURAS. USO DE COORDENADAS CILINDRICAS.



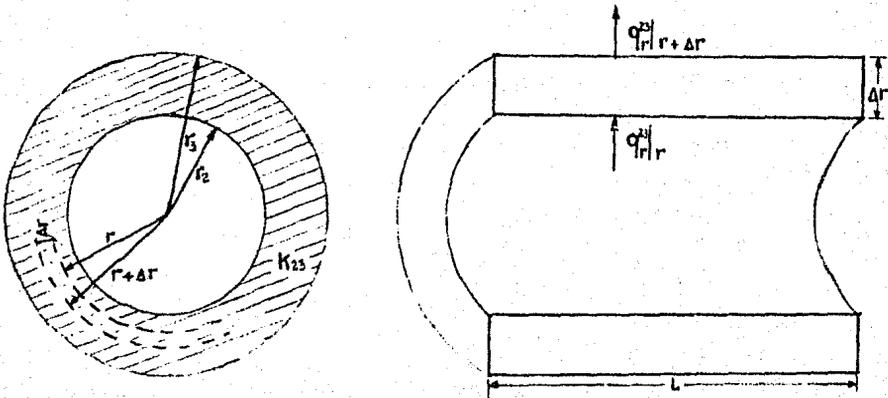
Este problema es similar al considerado en la sección 2.7, solo que ahora se trata de un sistema cilíndrico. El sistema -- consiste de un tubo cilíndrico cuyas paredes están formadas de

dos capas sólidas con conductividades térmicas  $K_{23}$  y  $K_{34}$ . Dentro del tubo circula un fluido que intercambia calor con la pared interior del mismo, siendo  $h_{12}$  el coeficiente de película.- La pared exterior del tubo intercambia calor con el fluido ambiental (por ejemplo, aire), existiendo en la interfase el coeficiente  $h_{45}$ .

Este ejemplo tiene una importancia práctica enorme, abarcando casos de calentamiento, enfriamiento, evaporación y condensación en ductos y recipientes cilíndricos en general.

### 2.8.1.- OBTENCION DEL MODELO MATEMATICO

Los postulados son idénticos a los de la sección 2.7. El balance de energía para obtener el modelo, con base en la ec. (2.15), puede obtenerse considerando la conducción de calor sobre un elemento  $\Delta r$  de una de las capas:



Sustituyendo en la ec.(2.15) se obtiene:

$$(2 \pi r L) q_r^{23} \Big|_r - (2 \pi (r + \Delta r) L) q_r^{23} \Big|_{r + \Delta r} = 0 \quad (2.32)$$

Dividiendo entre  $2 \pi L \Delta r$  :

$$\frac{(r + \Delta r) q_r^{23} \Big|_{r + \Delta r} - r q_r^{23} \Big|_r}{\Delta r} = 0$$

Al tomar el lim.  $\Delta r \rightarrow 0$  , se obtiene el modelo para este problema:

$$\frac{d}{dr} \left( r q_r^{23} \right) = 0 \quad (2.33)$$

### 2.8.2.- SOLUCION DEL MODELO

Condiciones a la Frontera: De igual forma que en la sección anterior se considerarán como condiciones a la frontera, las temperaturas especificadas en las fronteras y la "Ley del enfriamiento de Newton".

C.F.1 en  $r = r_2$  ,  $T = T_2$

C.F.2 en  $r = r_3$  ,  $T = T_3$

C.F.3 en  $r = r_2$  (interfase interna),  $q_2 = (T_1 - T_2) h_{12}$

C.F.4 en  $r = r_4$  (interfase externa),  $q_2 \frac{r_2}{r_4} = (T_4 - T_5) h_{45}$

Integrando la ecuación (2.33) resulta:

$$r q_r^{23} = r_2 q_2 = \text{Constante} \quad (2.34)$$

En forma similar, si el balance se hiciera para la pared externa se obtendría:

$$r \dot{q}_r^{34} = r_2 \dot{q}_2 = \text{Constante} \quad (2.35)$$

Substituyendo la Ley de Fourier en (2.34) y (2.35)

$$- r K^{23} \frac{dT^{23}}{dr} = r_2 \dot{q}_2 \quad (2.36)$$

$$- r K^{34} \frac{dT^{34}}{dr} = r_2 \dot{q}_2 \quad (2.37)$$

Puesto que las conductividades térmicas son constantes, al integrar (2.36) y (2.37) y aplicar las C.F.(1) y (2) respectivamente se obtiene:

$$T_2 - T_3 = r_2 \dot{q}_2 \frac{\ln(r_3/r_2)}{K^{23}} \quad (2.38)$$

$$\text{y } T_3 - T_4 = r_2 \dot{q}_2 \frac{\ln(r_4/r_2)}{K^{34}} \quad (2.39)$$

En las interfases, de acuerdo con la Ley de Newton del enfriamiento y aplicando las C.F (3) y (4)

$$T_1 - T_2 = \frac{\dot{q}_2}{h_{12}} \quad (2.40)$$

$$T_4 - T_5 = \frac{\dot{q}_2}{h_{45}} (r_2/r_4) \quad (2.41)$$

Al hacer la suma de las ecuaciones (2.38), (2.39), (2.40) y (2.41), se obtiene:

$$T_1 - T_5 = \dot{q}_2 \left\{ \frac{1}{h_{12}} + r_2 \frac{\ln(r_3/r_2)}{K^{23}} + r_2 \frac{\ln(r_4/r_2)}{K^{34}} + \frac{1}{h_{45}} (r_2/r_4) \right\}$$

Multiplicando por  $2\pi L$

$$Q_2 = 2\pi L r_2 q_2 = \frac{2\pi L (T_1 - T_5)}{\frac{1}{r_2 h_{12}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{K^{23}} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{K^{34}} + \frac{1}{r_4 h_{45}}} \quad (2.42)$$

Donde  $Q_2 = q_2$  (AREA) [=] cal/seg ó BTU/hr.

De (2.42) se deduce que el coeficiente global de transmisión de calor  $U$  queda expresado por:

$$U = \left[ r_2 \left( \frac{1}{r_2 h_{12}} \right) + \frac{\ln(r_3/r_2)}{K^{23}} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{K^{34}} + \dots + \frac{1}{r_4 h_{45}} \right]^{-1} \quad (2.43)$$

Cuando la tubería o el recipiente circular tienen más de dos paredes, la ec.(2.42) usualmente se expresa como:

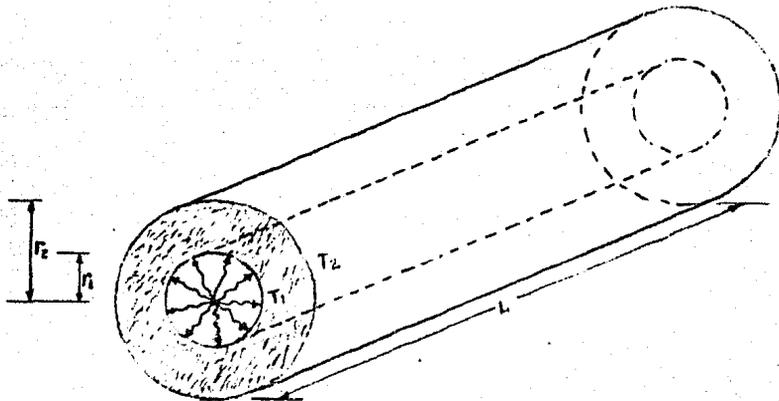
$$Q = 2\pi r L U (T_1 - T_f) \quad (2.44)$$

## 2.9.- FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DE PAREDES DE GEOMETRIAS

### CIRCULARES.

En esta sección se resumen las ecuaciones que son aplicables en los distintos casos de conducción de calor a través de paredes con geometrías circulares siendo su tratamiento matemático muy similar al considerado en los ejemplos de las secciones anteriores.

1.- CILINDRO CIRCULAR HUECO Y ESFERA. Con flujo radial y flujo axial despreciable.



Temperatura media ( $T_m$ )

- .) Para entrada a la superficie interior

$$T_m = T_2 + \frac{q}{4\pi K L} \left[ 1 - \frac{2 \ln(r_2/r_1)}{(r_2/r_1)^2 - 1} \right]$$

- .) Para entrada a la superficie exterior.

$$T_m = T_1 + \frac{q}{4\pi K L} \left[ \frac{2 \ln(r_2/r_1)}{1 - (r_1/r_2)^2} - 1 \right]$$

Temperatura máxima ( $T_{\max}$ ) (a  $r_1$  ó  $r_2$ )

- .) Valor exacto

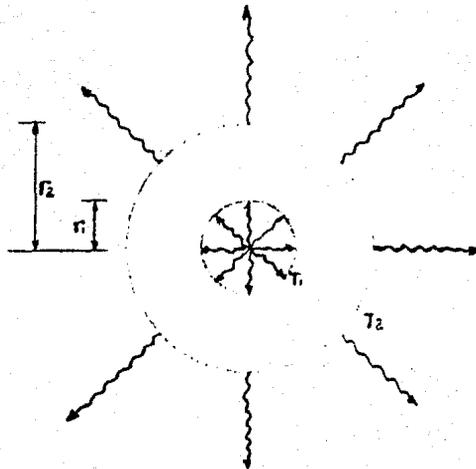
$$T_{\max} = T_2 + \frac{q}{2\pi K L} \ln r_2/r_1$$

ó en términos del área media logarítmica

$$T_{\max} = T_2 + \frac{q(r_2 - r_1)}{K(AL)}$$

- .) Valor aproximado

$$T_{\max} = T_2 + \frac{q(r_2 - r_1)}{K(AL)}$$



Temperatura máxima (a  $r_1$ )

•) Valor exacto

$$T_{\text{máx}} = T_2 + \frac{q(r_2 - r_1)}{4\pi K r_1 r_2} = T_1 + \frac{q}{4\pi K} \left( \frac{1 - r_1/r_2}{r_1} \right)$$

ó, en términos del área media geométrica

$$T_{\text{máx}} = T_2 + \frac{q(r_2 - r_1)}{K A G}$$

•) Valor aproximado

$$T_{\text{máx}} = T_2 + \frac{q(r_2 - r_1)}{K A L}$$

## CAPITULO III

### CLASIFICACION DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

Un sistema de aislamiento térmico está constituido básicamente por el material aislante, sus accesorios de sujeción y cubierta de protección.

El campo de aplicación de los materiales aislantes está restringido por sus propias características; un aislante es un material de muy baja conductividad térmica y existe una relación de esta propiedad con la densidad según se muestra en la fig. 3.1. En donde se puede observar un punto de inflexión que es debido básicamente a la porosidad del material y tamaño de los poros, es decir, existe un punto a partir del cual las dimensiones del poro y su conexión con poros próximos dan lugar a movimientos convectivos del aire capturado, que eleva la transferencia de calor a través del aislante.

#### 3.1. CARACTERISTICAS DE UN AISLANTE

Debido a las características del servicio que prestan los materiales aislantes, es necesario conjugar su baja conductividad térmica con otras propiedades que le permitan dar un buen servicio por largo tiempo, sin causar problemas secundarios ni constituir en si mismos riesgos industriales de otra índole. -

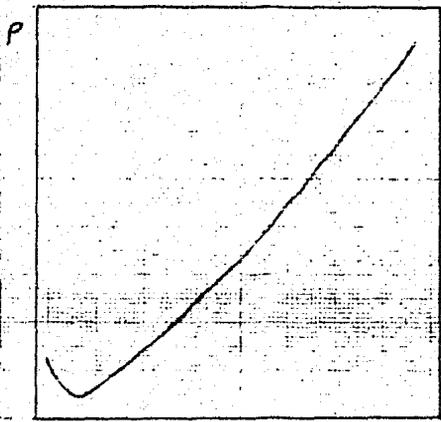


FIG. 3.1

RELACION ENTRE CONDUCTIVIDAD TERMICA  
Y LA DENSIDAD EN UN MATERIAL  
AISLANTE

Se pueden agrupar estas características como factores de selección de un material aislante como sigue.

CARACTERISTICAS BASICAS  
EN LA SELECCION  
DE UN AISLANTE

Comportamiento al abuso mecánico  
Estabilidad dimensional  
Combustibilidad (y desprendimiento de gases tóxicos)  
Propiciación de microorganismos  
Corrosividad  
Temperatura límite de trabajo  
Forma de manejo, almacenaje y colocación  
Densidad  
Conductividad térmica

Es importante considerar estos factores tanto por el tipo de servicio y ambiente predominante como por el tipo de acabado adecuado para dar protección al aislante.

3.2.- CLASIFICACION DE LOS MATERIALES AISLANTES POR SUS  
CARACTERISTICAS FISICAS,

GRANULARES	{ Silicato de calcio Perlita expandida aglutinada con silicato de sodio o con material cerámico Vermiculita exfoliada Aglutinado de tierras diato- maceas con silicato de sodio Loose-Fill de perlita
FIBROSOS	{ Fibra de vidrio Lana mineral Fibra de asbesto
ESPUMOSOS	{ Poliestireno Poliuretano Foamglass (vidrio celular) Espumas de P.V.C.
REFRACTARIOS	{ Paredes pulidas metálicas de alta superficie

### 3.2.1. - FIBROSOS

Estos materiales son los más versátiles, se pueden fabricar como rígidos, semirígidos, y flexibles; su principal limitante es la temperatura de operación ya que los materiales aglutinantes se queman a temperaturas mayores a las especificadas para su aplicación.

#### FIBRA DE VIDRIO

La fibra de vidrio se obtiene a partir de arena fundida, - existe gran variedad de productos dependiendo del uso a que se destina.

El diámetro de la fibra varía de 1 a 15 micrones, y ésta tiene un rango de operación de  $- 84$  a  $232^{\circ}$  C y hasta de  $538^{\circ}$  C ( $1000^{\circ}$  F) como fibra blanca (RW - 4000) sin aglutinante.

#### LANA MINERAL

Se obtiene a partir de escoria metálica fundida en forma - similar a la fibra de vidrio, se presenta como colchonetas armadas, placas y a granel ó como block de alta temperatura, tiene un rango de operación de  $38^{\circ}$  hasta  $648^{\circ}$  C ( $1200^{\circ}$  F) como colcha; de  $38^{\circ}$  hasta  $316^{\circ}$  C ( $600^{\circ}$  F) como placa y hasta  $1038^{\circ}$  C ( $1900^{\circ}$  F) como block.

## ASBESTO

Actualmente no existe en el mercado, fué un material aislante muy usado por sus insuperables características.

Dependiendo del tamaño de la fibra, se le conoce como amosite, - amianto o asbesto, este último de fibras rígidas y duras.

Comercialmente cualquier fibra de origen mineral se le conoce - como asbesto.

La razón de haber caído en desuso es el haberse clasificado como sustancia cancerígena.

Su temperatura máxima de operación es de  $1000^{\circ}$  F.

### 3.2.2.- GRANULARES

La presentación de estos materiales se hace en placas o -- preformados rígidos; a continuación se mencionan algunas de sus características.

## SILICATO DE CALCIO

El silicato de calcio lleva como fibras de refuerzo asbesto amosite o fibras de nylon, es de estructura porosa e insoluble en agua, tiene buena resistencia a la tensión y a la compresión.

Su temperatura máxima de operación es de  $1300^{\circ}$  F.

#### PERLITA EXPANDIDA AGLUTINADA CON SILICATO DE SODIO

Este material se fabrica en forma y presentación igual al silicato de calcio, su principal desventaja es que el aglutinante es soluble en agua, lo que lo hace aislante de características corrosivas. Existen tratamientos que la hacen repelente e insoluble al agua, por lo que se debe verificar este aspecto.

Su temperatura límite de operación es 1400° F.

#### PERLITA EXPANDIDA CON AGLUTINANTE CERAMICO

Es un material de reciente aparición en el mercado, tiene magníficas características, pero su conductividad térmica es ligeramente superior a la del silicato de calcio, su nombre comercial es Good-Temp y se puede usar a temperaturas de hasta ----- 1500° F.

#### VERMICULITA EXFOLIADA

La vermiculita es un material que se encuentra nativo en la naturaleza en forma de mica, está formado por grandes cadenas de silicio y magnesio.

Su exfoliado consiste en un proceso de separación de las láminas de mica formando pequeños "Libros" que permitan la formación de celdas de aire seguido de un aglutinado y moldeado.

Por su condición y características no es muy usado como aislante. Su aplicación más común es cuando va en proporción adecuada con aglutinante, bajo la forma de cemento aislante ya sea seco o en pasta. Para usarse se mezcla con agua y se aplica como cemento portland; su apariencia es la de una superficie lisa y se puede emplear en esta forma a temperaturas de hasta 1800° F

#### TIERRAS DIATOMACEAS CON SILICATO DE SODIO

Como aislante tiene las mismas desventajas de solubilidad del silicato de sodio en agua; como cemento aislante o refracta-rio-aislante. se prepara formulado con un aglutinante resistente al calor y agua, proporcionando una pasta que puede aplicarse a temperaturas de hasta 1800° F.

#### LOOSR - PILL DE PERLITA

No se fabrica en México, se obtiene expandiendo térmicamente la perlita natural, tratándola para hacerla repelente al agua, se obtiene suelta para relleno y se aplica en servicios fríos y calientes.

#### 3.2.3.- CELULARES O ESPUMOSOS

Los aislantes espumosos son materiales producto de una reacción química de polimerización, en presencia de espumantes co-

mo los freones (flouros - carbonos) o  $CO_2$ .

Por sus características de "celda cerrada" son recomendados para bajas temperaturas, su presentación es rígida con la facilidad de poderse aplicar en el campo espreado sobre la superficie por aislar con lo que queda prácticamente monolítico.

Su principal desventaja es ser materiales combustibles por lo que se debe tener la precaución de ponerles un recubrimiento -- contra fuego.

A temperaturas cercanas a los  $200^{\circ}$  F sufren degradación, por lo que no se usan nunca en servicios a altas temperaturas, entre el poliestireno y el polierutano la principal diferencia es la conductividad térmica, siendo mejor aislante el poliuretano.

El Foam Glass era un producto de importación hasta hace poco, actualmente se fabrica en México como placa y preformado. Esta formado por compuestos de silicio y magnesio en forma de vidrio de alta durabilidad, procesados por fusión para formar una masa de celulosa homogénea y rígida de celdas selladas herméticamente con permeabilidad de 0.005 perms. Lo que lo hace un material idóneo para baja temperatura.

Las espumas de P.V.C. son de reciente uso en los Estados Unidos; en México no se fabrica. Su presentación es similar a --

las espumas de estireno o uretano, con la característica de ser no combustible, a diferencia de los demás plásticos espumados.

### 3.2.4.- REFRACTARIOS

Son aislantes constituidos por láminas metálicas pulidas y tratadas para conservar su alta reflectividad, de diseños especiales que le dan características de flexibilidad y de estructura que permiten absorber expansiones y contracciones por temperatura.

El material separador entre las láminas puede ser madera, fibra de vidrio, fibra de nylon o poliestireno, etc.

Las conductividades térmicas pueden tener del orden de 1/5 respecto a conductividades de los mejores aislantes convencionales en igualdad de condiciones.

Pueden aplicarse a altas y bajas temperaturas. En servicios a alta temperatura pueden trabajar con valores cercanos a la temperatura de ablandamiento del metal empleado.

En servicios a baja temperatura se diseñan como sandwiches de metal y material separador con separaciones de 5 milésimas a 2 diezmilésimas de pulgada.

Actualmente su alto costo los hace incompetitivos y su uso está restringido a reactores nucleares de potencia, cohetes espacia-

les o en servicios criogénicos con temperaturas cercanas al cero absoluto.

Pueden fabricarse de aluminio, acero inoxidable, de cobre, oro, cadmio, plomo, níquel, bronce, etc., dependiendo del servicio y las condiciones de operación.

En servicios criogénicos se les conoce como super aislantes, ya que su conductividad térmica total, alcanza valores entre  $1/10$  y  $1/50$  de la conductividad térmica de los aislantes convencionales para baja temperatura.

## CAPITULO IV

### SELECCION DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO

En este capítulo se exponen las consideraciones generales de los procedimientos de diseño, así como una metodología sencilla explicada por etapas para llegar a la selección más adecuada de un sistema de aislamiento.

También, se discuten algunos factores importantes en el proceso de selección que determinan el buen funcionamiento del aislamiento.

### CONSIDERACIONES GENERALES

#### 4.1.- IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO TERMICO

Un sistema de aislamiento térmico se define como aquel sistema diseñado especialmente para ofrecer alta resistencia a la transferencia de calor.

##### 1.1. Función del aislamiento térmico.

El aislamiento térmico simplemente reduce el flujo de calor hacia afuera de las superficies calientes y hacia dentro de las superficies frías.

Existen varias razones fundamentales que justifican el uso de sistemas de aislamiento térmico en instalaciones industriales,

el entenderlas conducirá a una comprensión adecuada de la importancia de dichos sistemas . Las razones mencionadas son:

a).- Aumento de utilidades: Todo flujo de calor que se dicepa - representa una pérdida de energía; la mayoría de estas pérdidas representan un incremento en combustible, electricidad, agua de enfriamiento; lo que representa una pérdida de utilidades que - puede ser controlada con la instalación de un sistema de aislamiento térmico.

b).- Disminución del tamaño de equipo: Las pérdidas de calor no deseadas pueden originar que el equipo de transferencia de calor (cambiadores de calor, columnas de destilación, líneas de tubería calientes, etc.) resulte demasiado grande al ser diseñado; simplemente por que en algunos casos, la pérdida puede ser una fracción importante del flujo de calor del proceso.

c).- Protección de los procesos: El flujo de calor en cualquier proceso, determina gradientes de temperatura entre el fluido contenido y las paredes del equipo, lo que da como resultado que - se presenten efectos indeseables en el proceso, como los que a continuación se menciona:

•) Cristalización o formación de depósitos de material procesado sobre las paredes del equipo.

•).- Cambios de viscosidad y formación de productos de degrada-

ción.

c).- Pérdidas por evaporación (en servicios de enfriamiento).

En algunos puntos de un proceso, es necesario tener un control riguroso de la temperatura, ya que de esto puede depender la calidad del producto o el grado de conversión de una reacción; se pueden evitar reacciones secundarias indeseables, la reversibilidad de una reacción o la degradación de algún producto. En estas situaciones la instrumentación será muy especializada, por lo cual se hace necesario diseñar un sistema de aislamiento térmico que garantice el control de la temperatura evitando cambios bruscos en el proceso.

d).- Protección al fuego: El aislamiento térmico en algunos casos puede servir como protector de equipo durante un incendio, evitando sobrecalentamiento rápido de mezclas y sustancias peligrosas contenidas en los equipos aislados; al menos lo suficiente para permitir combatir el incendio hasta tenerlo bajo control.

e).- Protección al personal: En la industria de la transformación, las plantas de proceso y refinación, la elaboración de un producto involucra cambios de presión, temperatura y composición de los materiales entre otras variables, que implican una generación, transformación y transferencia de energía y --

por consiguiente, una serie de riesgos potenciales para las personas que laboran en el área. Por esta razón, el aislamiento -- tiene que ser instalado en aquellas áreas donde el personal de operación y mantenimiento tiene la posibilidad de tocar las superficies calientes.

f).- Aislamiento y protección del equipo: El aislamiento también tiene la función de prevenir deterioro y fallas prematuras del equipo metálico debido al ataque de la humedad, ocasionado por goteras o por la humedad del medio.

g).- Disminución del ruido: El ruido emitido por el flujo de -- los fluidos en tuberías o el ruido transmitido por vibración a los equipos, en ciertos casos es absorbido por los materiales -- aislantes.

#### 4.2.- DATOS DE APLICACION

Antes de desarrollar cualquier procedimiento de selección de aislamiento térmico, resulta conveniente analizar la información y datos sobre aislamiento térmico con que se cuente, así -- como las consideraciones de condiciones de proceso, ambientales, de operación de la planta y los datos de costos relativos de -- los sistemas de aislamiento. La revisión y definición de los datos siguientes ayudarán a minimizar el riesgo de una mala selecc

ción de un sistema de aislamiento.

1).- Definición del rango de temperatura adecuado en la superficie. Generalmente el rango de temperatura en la superficie que requiere aislamiento, es especificado de acuerdo a las condiciones del proceso. Cuando existan cambios bruscos, fluctuaciones o temperaturas cíclicas, deberán ser especificadas claramente para que sean consideradas en la definición del rango de temperatura en la superficie. Para aplicaciones de baja temperatura, determinar si en alguna situación el sistema será calentado y enlistar las máximas y mínimas temperaturas.

2).- Límites permisibles de flujo de calor. Estos límites están en función de los requerimientos propios del proceso y serán especificados en las condiciones a las cuales será operado el proceso. En algunas ocasiones dichos límites no se especifican teniéndose la necesidad de suponerlos.

3).- Límites críticos de temperatura. Estos límites son fijadas de acuerdo a los requerimientos del proceso. Si no existe especificación para estos límites, normalmente se fijan considerando los riesgos existentes.

4).- Condiciones ambientales críticas. El conocimiento y definición de estas condiciones es importante para el diseño de los sistemas de aislamiento y dentro de ellos se incluyen temperatu

ras y humedades relativas normales, condiciones críticas de entrada y salida de servicios de enfriamiento y calentamiento (discutidas en la parte siguiente de este capítulo).

5).- Datos de operación de la planta. Considerar las condiciones de operación del área para la selección del aislamiento.

Considerar peligro de fuego, posibles escapes de materiales que afecten el sistema de aislamiento, prácticas de limpieza del equipo (lavado con agua, limpieza con solventes u otros materiales), posibilidad de choques de vapor durante un incendio, etc. De igual manera, considerar posible mal uso de caminos, tráfico de vehículos y vibraciones y choques mecánicos.

6).- Datos económicos. Un análisis de selección económicamente óptima se presenta en el capítulo V, que junto con los catálogos y listas de precios de los fabricantes de aislamiento, permiten hacer una selección óptima y segura de un sistema de aislamiento.

#### 4.3.- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Para poder seleccionar en forma adecuada un sistema de aislamiento, es recomendable tomar como guía un procedimiento de diseño y selección que permita organizar la información y los criterios de diseño, así como la identificación del aislamiento

seleccionado; y permita fijar los detalles de construcción.

A continuación se enlistan las etapas esenciales que incluye el procedimiento general de selección y diseño de los sistemas de aislamiento térmico. Dependiendo de la complejidad, tipo de sistema de aislamiento y condiciones de operación (críticas o no críticas); el procedimiento en algunas ocasiones no alcanzará a cubrir todas las etapas de diseño, sin embargo, representa una buena guía para este tipo de situaciones.

1.- Primeramente, determinar en que parte del proceso el aislamiento es requerido (este aspecto se discute en el primer punto de este capítulo ).

2.- Obtener y definir adecuadamente los datos de aplicación (punto 4.2).

3.- Seleccionar apropiadamente el material del aislamiento. De acuerdo a las condiciones de diseño y características de los materiales aislantes (punto 4.4).

4.- Determinar el espesor del aislamiento requerido. En el capítulo II se presentan las ecuaciones de diseño para el espesor del aislamiento, o bien en el punto 4.4.2. de este capítulo se muestra un método para determinación rápida de espesores aproximados recomendados para las condiciones que se mencionan en las tablas.

5.- Verificar la elección del material, seleccionando distintos materiales y comparando sus ventajas y desventajas (punto - 4.4.).

6.- Identificar apropiadamente el sistema de aislamiento seleccionado con dibujos y catálogos y resumiendo toda la información generada durante el proceso de selección.

7.- Establecer detalles de instalación (en el capítulo VI se discuten algunos detalles de construcción e instalación de los sistemas de aislamiento).

#### 4.4.- METODO DE SELECCION DE AISLANTES

##### 4.4.1.- SELECCION DEL MATERIAL AISLANTE

Partiendo de la suposición de que ha sido hecha una determinación preliminar de requerimiento de aislamiento tomando como base cualquiera de las funciones del aislamiento discutidas en el punto 4.1. de este capítulo; una selección preliminar puede hacerse en base al rango de temperatura que se tiene en el proceso y considerando las observaciones sobre el uso y limitaciones de los sistemas de aislamientos que se presentan en la tabla I.

Posteriormente, revisar la información que contiene la tabla II sobre características de aislamientos y comparar las con

diciones de operación de cada uno, con las condiciones de operación que se tienen en el proceso definiendo los posibles problemas que puedan presentarse con el uso de cada aislamiento. Durante la revisión de la tabla II, tomar en cuenta las consideraciones del punto 4.1 para realizar una comparación efectiva teniendo una mayor seguridad en la selección final. Normalmente el material escogido es el más económico a menos que, una o más consideraciones importantes influyan de manera determinante para evaluar una selección alternativa.

Se recomienda que todos los aislamientos seleccionados sean claramente revisados por los especialistas en aislamiento térmico, la selección será más adecuada y las consideraciones serán evaluadas dentro de un amplio margen de experiencia.

a).- Consideraciones generales .- En la tabla II, cada material está caracterizado con respecto a seis consideraciones importantes que sirven como base, en la mayoría de los casos, para la selección del sistema de aislamiento. En general, cuando dos sistemas de aislamiento son comparados, las características de seguridad y economía de cada sistema juegan un papel preponderante en el criterio de selección. En seguida se discuten las seis consideraciones mencionadas y se exponen detalles que se deben tomar en cuenta al analizar la información de la tabla II

1.- **Objetivo térmico.**- El primer aspecto que se enlista en la tabla II, son las consideraciones térmicas donde se presenta la conductividad térmica tabulada para una sola temperatura y los máximos límites de temperatura en los casos en los que estos sean significativos. También se menciona la estabilidad de la conductividad térmica con respecto a la edad del aislamiento y al contenido de humedad. Cuando se tienen casos especiales, poco frecuentes, donde se especifica calor, difusividad o movimiento térmico; se mencionan las limitaciones que corresponden a dichos casos.

2.- **Interacciones químicas.**- Es recomendable considerar tres tipos de interacciones en el análisis del comportamiento químico del material aislante; estas consideraciones son las siguientes

a.- Efectos entre el material aislante y la superficie aislada.

b.- Procesos de deterioro del aislamiento.

c.- Materiales flamables que son degradados por el aislamiento (riesgos de combustión espontánea).

Un gran número de materiales aislantes al estar en contacto con superficies de aleaciones austeníticas de acero pueden producir esfuerzos de corrosión y quebrado de dichas superficies, sin que este efecto sea notado hasta que ocurra la falla. Algunos aislamientos alcalinos pueden atacar al aluminio, espe-

cialmente cuando está húmedo.

Casi todos los materiales aislantes son atacados por ácidos y bases fuertes principalmente en los contornos del aislamiento. De igual forma en la tabla II se especifican los casos en los cuales algún tipo de solvente deteriora el aislamiento.

Una situación de especial cuidado debe ser prevista cuando el aislamiento está expuesto a goteos de líquidos inflamables, puesto que con frecuencia se reportan casos en donde el aislamiento que absorbió el líquido inflamable como consecuencia del goteo; al estar expuesto a calentamiento durante trabajos de reparación, se presentó la combustión espontánea de dicho material aislante. Por esta razón, debe tenerse en cuenta el uso de los materiales aislantes sobre líneas y equipos conteniendo líquidos inflamables en áreas clasificadas como división I con respecto a instalaciones eléctricas.

3.- Durabilidad mecánica.- En algunas aplicaciones, el sistema completo de aislamiento estará sujeto a cargas o golpes mecánicos; en tales casos, y cuando por alguna razón un aislamiento mecánicamente durable no puede ser usado, el uso de protectores o guardas es indispensable. En aplicaciones donde el levantamiento puede ser considerable, se requiere soportes y ataduras especiales para contrarrestar las fuerzas del viento. La vibra---

ción y choques mecánicos del equipo aislado también implica soportes especiales y problemas de atadura del aislante, particularmente en equipo en movimiento, como son: secadores rotatorios, equipos de secado oscilantes tales como cribas y tolvas, -- conductos inclinados o ductos adaptados con vibradores para facilitar mayor flujo de material.

4.- Economía.- El análisis que se presenta en el capítulo V permite obtener el sistema de aislamiento económicamente óptimo. -- Esta consideración es muy importante en el proceso de selección siempre y cuando no exista otra consideración que en esas condiciones sea determinante para el criterio de selección.

5.- Problemas de humedad.- Muchos de los sistemas de aislamiento térmico presentan alta absorción de agua por lo que en -- ciertas circunstancias se requiere el uso de cubiertas protectoras y en casos especiales, construcción de celdas cerradas para evitar por completo que el material aislante pueda absorber -- agua. Para servicio a altas temperaturas, el sistema será suficientemente permeable para que el vapor, producto de la evaporación del agua en forma de humedad absorbida por el sistema, pueda ser eliminado hacia el exterior cuando se eleva la temperatura de la superficie aislada; sin embargo, este sistema de aislamiento, debe resistir el paso del agua líquida.

En servicios de baja temperatura, la humedad en cualquiera de sus formas, tiene que ser evitada por una cubierta impermeable mecánicamente durable. Las líneas de baja temperatura, si es posible, deben ser llevadas dentro de túneles de servicio para evitar cambios bruscos de humedad producidos por cambios en las condiciones climatológicas. Las líneas de alta temperatura, aisladas, pueden ser llevadas por arriba usando soportes o bien en drenajes, zanjias ventiladas o túneles. Se recomienda no llevar las líneas aisladas de alta temperatura directamente enterradas en el piso.

6.- Consideraciones de seguridad.- Una consideración de seguridad es mencionada en el punto 2 anterior, respecto al cuidado para evitar goteras de líquidos flamables, sin embargo esto no representa el mayor riesgo, puesto que de acuerdo a los casos reportados, existen otros casos de riesgos más frecuentes, entre ellos:

- 1).- Daños por incendio. El sistema de aislamiento sirve de protección al equipo en casos de incendio, pero se abate su vida útil.
- 2).- Protección para el control de la superficie en las superficies de exposición al personal de operación.
- 3).- Contaminación tóxica.

El primer problema debe ser considerado en casos donde el aislamiento ha sido expuesto a altas temperaturas, a fuego directo o en el caso de incendio, sirviendo éste como medida de seguridad para el control del incendio. En estos casos, se recomienda que el sistema de aislamiento sea cambiado todo o en partes.

La segunda consideración se aplica cuando el personal de operación puede llegar a tocar inadvertidamente las superficies calientes, requiriéndose un control de las condiciones críticas de temperatura superficial. Experimentos informales indican que la temperatura de la superficie del equipo o el aislamiento será de 140° F máxima. En áreas de exposición al personal será de 130° F Máxima. En tuberías no metálicas puede permitirse hasta 160° F. Para superficies metálicas en áreas de bajo riesgo y de poco contacto del personal, se permiten 160° F. Superficies con temperaturas por arriba de las mencionadas serán controladas -- con aislamiento.

Finalmente, el último riesgo que se menciona, se refiere a la contaminación del aislamiento por derrames o goteras de líquidos tóxicos debiéndose tener máximo cuidado para evitar este tipo de riesgo.

TABLA I. SELECCION PRELIMINAR DE AISLAMIENTOS

TEMPERATURA EN LA SUPERFICIE		OBSERVACIONES SOBRE SU USO Y LIMITACIONES	TABLA DE REFERENCIA
°F	°C		
A bajo de -100	A bajo de -73	Sistemas de aislamiento no estandar, su diseño generalmente es especial (1).	
de -100 a -50	de -73 a -46	Los métodos de diseño y construcción son críticos (1).	II A
de -50 a 0	de -46 a -18	Sistemas totalmente ensados u los detalles de construcción son esenciales para evitar el rápido deterioro.	II B
de 0 a 40	de -18 a 4	Las mismas consideraciones que el anterior. Ocasionalmente cuando la temp. exterior está por arriba de 32°F (0°C) el aislamiento puede omitirse.	II C
de 40 a 140	de 4 a 50	Se usa aislamiento si el proceso específico lo requiere o si tiene una función, proteger al personal o a la planta.	II D
de 140 a 450	de 60 a 235	La aplicación y óptima selección conducen a una reducción en el costo.	II E
de 450 a 1200	de 235 a 650	Por arriba de 600°F (305°C) generalmente se requiere una capa doble de aislamiento.	II F
Arriba de 1200	Arriba de 650	Sistemas de aislamiento no estandar, su diseño en la mayoría de los casos es especial y complicado (1).	

(1) Se recomienda consultar a un especialista en aislamiento térmico.

TABLA IIA

TABLA IIB

	Rango de temperatura: -100 a -50°F (-73 a -45°C)	Rango de temperatura: -50 a 0°F (-46 a -18°C)	
	POLIURETANO	POLIURETANO	ESPONJA DE VIDRIO
CONSIDERACIONES TERMIAS	k=0.17 a -25°F. Excelentes propiedades térmicas. 200°F es el límite cuando el sistema es calentado.	k=0.36 a -25°F. Excelentes propiedades térmicas. 200°F es el límite cuando el sistema es calentado.	k=0.35 a -25°F. Requiere 2 o 3 veces el espesor del aislamiento comparado con el sistema de poliuretano.
CONSIDERACIONES QUÍMICAS	No hay reacción entre el aislamiento y el sustrato.	No hay reacción entre el aislamiento y el sustrato.	No hay reacción entre el aislamiento y el sustrato.
CONSIDERACIONES MECÁNICAS	Es fuerza de compresión media, puede requerir cubierta de metal para dar la resistencia a fuerzas mecánicas externas (pisadas y golpes).	Es fuerza de compresión media, puede requerir cubierta de metal para dar la resistencia a fuerzas mecánicas externas (pisadas y golpes).	Alta, esfuerzo de compresión.
CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	Uso de secciones prefabricadas para tubería, la construcción de blocks es aplicable cuando el aislamiento total es menor que 500 ft <sup>2</sup> y espreado para áreas más grandes de 500 ft <sup>2</sup> .	Uso de secciones prefabricadas para tubería. Los secciones (blocks) se usan donde se requiere aislar menos de 500 ft <sup>2</sup> y espreado, para áreas mayores.	El costo de instalación de los sistemas de espuma de vidrio son de 50 a 100% más altos que el poliuretano.
CONSIDERACIONES DE HUMEDAD	Donde sea posible, colocar protección contra lluvia con el fin de aumentar la vida del aislamiento e impedir el flujo de calor hacia dentro del sistema.	Donde sea posible, colocar protección contra lluvia con el fin de aumentar la vida del aislamiento y disminuir el flujo de calor hacia el sistema.	Donde sea posible, colocar protección contra lluvia con el fin de aumentar la vida del aislamiento y disminuir el flujo de calor hacia el sistema.
CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	Este material es combustible y autoextinguible. Las aplicaciones de espreado interior requieren ventilación o equipo de respiración autónoma.	Este material es combustible y autoextinguible. Las aplicaciones de espreado interior requieren ventilación o equipo de aire autónomo.	No es combustible.
OBSERVACIONES	El uso de prefabricados en recipientes requiere soportes. El poliuretano espreado no requiere soportes.	El uso de prefabricados en recipientes requiere soportes. El poliuretano espreado no requiere soportes.	No se usa en recipientes ultrabajas.

La conductividad térmica (k) tiene unidades de BTU in/hr ft<sup>2</sup> °F

TABLA III

Rango de temperatura: 0 a 40 °C (32 a 104 °F)

	POLIURETANO	ESPONJA PLÁSTICA	ESPONJA DE VIDRIO
CONSIDERACIONES TÉCNICAS	K = 0.17 a 20°F Excelentes propiedades térmicas: 200°F en el límite cuando el sistema es calentado.	K = 0.24 a 20°F	K = 0.35 a 20°F Requiere 2 a 3 veces el espesor de aislamiento para pararse con el poliuretano y es de espesor similar comparado con la esponja plástica.
CONSIDERACIONES QUÍMICAS	No hay reacción entre el aislamiento y el sustrato.	No hay reacción entre el aislamiento y el sustrato. Cualquier ácido en el medio ambiente destruye el aislamiento.	No hay reacción entre el aislamiento y el sustrato.
CONSIDERACIONES MECÁNICAS	Fuente de compresión rápida, puede requerir cubierta de metal para dar resistencia a fuerzas mecánicas externas (pisadas y golpes).	La esponja plástica se construye con baja esfuerzo de compresión.	Alto esfuerzo de compresión.
CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	Uso de versiones preformadas para tuberías. Las secciones (bloques) se usan donde se requieren áreas menos de 500 ft <sup>2</sup> y espreado, para áreas mayores.	Las tuberías para tuberías de hasta 6 pulgadas de diámetro nominal tienen costo bajo.	Eficiencia de instalación de la espuma de vidrio es 50 a 100% mayor que el del poliuretano o la esponja plástica.
CONSIDERACIONES DE HUMEDAD	Donde sea posible, colocar protección contra lluvia con el fin de aumentar la vida del aislamiento y disminuir el flujo de calor hacia el sistema.	Donde sea posible, colocar protección contra lluvia con el fin de aumentar la vida del aislamiento y disminuir el flujo de calor hacia el sistema.	Donde sea posible, colocar protección contra lluvia con el fin de aumentar la vida del aislamiento y disminuir el flujo de calor hacia el sistema.
CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	Este material es combustible y autoextinguible. Las aplicaciones de espreado interno requieren ventilación o equipo de aire acondicionado.	Este material es combustible y autoextinguible.	No combustible.
RESERVACIONES	El uso de preformas en superficies requiere soportes. El poliuretano es predecible requiere soportes.	Disponibles en hojas para los tipos irregulares (refrigeración, congeladores, aislamiento, etc.).	No usar en equipos vibratorios.

TABLA II E

Rango de temperatura : 140 a 450°F (60 a 235°C)

	FIBRA DE VIDRIO	SILICATO DE CALCIO	FIBRA MINERAL	ESPONJA DE VIDRIO	SILICA EXPANDIDA
CONSIDERACIONES QUÍMICAS	K = 0.31 a 250°F	K = 0.4 a 250°F Microscópica. K aumentada con la humedad.	K = 0.28 a 250°F	K = 0.5 a 250°F Si existen otros tipos termios, la sufrir un espesor hasta en aislamientos.	K = 0.4 a 250°F
CONSIDERACIONES MECÁNICAS	Adecuado esfuerzo de compresión.	Buen esfuerzo de compresión.	Adecuado esfuerzo de compresión.	Alto esfuerzo de compresión.	Buen esfuerzo de compresión.
CONSIDERACIONES ECONÓMICAS	Bajo costo en el rango de temperatura.	Al costo de instalación es mayor que el de la fibra de vidrio y fibra mineral igual en costo a la silica expandida y menor a la esponja.	El costo de instalación es mayor que el de la fibra de vidrio pero menor que el costo de las silica expandida y menor de este rango.	El costo de instalación es de 50 a 100% mayor que el de las otras aislantes de este rango de temperatura.	El costo de instalación es parecido al costo del silicato de calcio.
CONSIDERACIONES DE HUMEDAD	Alta absorción de agua.	Alta absorción de agua.	Alta absorción de agua.	Muy baja absorción de agua.	Baja absorción de agua a 300°F. Contiene un repelente al agua que se degrada arriba de 300°F.
CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	Las fibras de vidrio no son combustibles, contienen pequeña cantidad de resina la cual las hace combustible.	No combustible.	No combustible.	No combustible.	No combustible.
OBSERVACIONES				Si el agua entra al sistema, puede causar severa corrosión.	Si el agua entra al sistema, puede causar severa corrosión.

TABLE II D

Rango de temperatura: 40 a 140 °F (4 a 60 °C)

	FIBRA DE VIDRIO	ESPONJA PLASTICA	POLIURETANO	ESPONJA DE VIDRIO
CONSIDERACIONES TERMICAS	K = 0.23 a 70°F	K = 0.26 a 70°F	K = 0.17 a 70°F. Excelentes propiedades termicas	K = 0.37 a 70°F
CONSIDERACIONES QUIMICAS		No hay reaccion entre el aislamiento y el sustrato. Cualquiera solvente en el medio ambiente destruye el aislamiento.	No hay reaccion entre el aislamiento y el sustrato.	No hay reaccion entre el aislamiento y el sustrato.
CONSIDERACIONES MECANICAS		La esponja plastica se construye con bajo esfuerzo de compresion.	Esfuerzo de compresion medio, puede requerir cubierta de metal para dar resistencia a fuerzas sismicas o termicas (pesadas y golpes)	Alto esfuerzo de compresion.
CONSIDERACIONES ELECTRICAS	Sistema de bajo costo.	Los sistemas para tuberia de hasta 2 pulgadas de diametro minimal tienen un costo bajo.	Reservorios mejorados para tuberias, secciones (elbow) para aislar secciones de 50 a 100 y espaldas de placa arts mayores. El poliuretano es mas caro que la fibra de vidrio.	El costo de aislamiento es de 50 a 100 mas alto que otros materiales aislantes en este rango de temperatura.
CONSIDERACIONES DE HUMEDAD	Para operas a temperaturas de 30 a 70°F y un rango de humedad relativa de 70 a 100%, usar poliuretano o esponja plastica.	Buen funcionamiento en ambientes de alta humedad.	Buen funcionamiento en ambientes de alta humedad.	
CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	Las fibras de vidrio son combustibles, contienen pequeñas cantidades de resina, lo cual es combustible.	Materiales combustibles y autoextinguible.	Materiales combustibles y autoextinguible. Aplicaciones en lugares secos, requiereo ventilacion o equip de aire acondicionado.	No combustible.
OBSERVACIONES		Disponibles en hojas para aislar a pu no irregular (re fugas, juntas, compresiones, in. fuertiles, etc).	Preforman en recipientes, requieren soportes. Espuma no requiere soportes. No exceder de 200°F.	No usar en equipos vibratorios.

TABLA II F

Rango de temperatura : 450 a 1200°F (235 a 650°C)

	FIBRA MINERAL	SILICATO DE CALCIO	SILICA EXPANDIDA
CONSIDERACIONES TERMICAS	$k = 0.4$ a $500^{\circ}\text{F}$	$k = 0.5$ a $500^{\circ}\text{F}$ Higroscópico; $k$ aumenta con la humedad	$k = 0.52$ a $500^{\circ}\text{F}$
CONSIDERACIONES QUIMICAS			
CONSIDERACIONES MECANICAS	Buena resistencia de compresión adecuada.	Buena resistencia de compresión.	Buena resistencia de compresión.
CONSIDERACIONES ECONOMICAS	Bajo costo en este rango de temperatura.	El costo de instalación es mayor que el costo de la fibra mineral.	El costo de instalación es parecido al costo del silicato de calcio.
CONSIDERACIONES DE HUMEDAD	Alta absorbtividad de agua.	Alta absorbtividad de agua.	Muy alta absorbtividad de agua. El repelente al agua se degrada encima de $300^{\circ}\text{F}$ .
CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	No combustible.	No combustible.	No combustible.
OBSERVACIONES			

#### 4.4.2.- ESPESOR DEL AISLANTE

Las especificaciones de espesores para sistemas de aislamiento térmico son mostrados en la tabla III como una facilidad cuando se requiera contar rápidamente con datos aproximados. Cada tabulación muestra las condiciones de diseño. Las condiciones de diseño para servicios de temperatura elevada están basadas sobre una máxima temperatura superficial de  $140^{\circ}$  F con una temperatura del ambiente de  $70^{\circ}$  F y una velocidad del aire de 3 m/h. Las condiciones de diseño para servicios de baja temperatura son presentadas en las tablas de espesores de aislante. Cuando se requiera mayor precisión en el cálculo del espesor del aislante y no se pueda hacer uso de la tabla III, se recomienda aplicar la metodología del capítulo II para cálculo del espesor y junto con las consideraciones del capítulo V, determinar el espesor económicamente óptimo.

TABLA III.A ESPESOR DE AISLAMIENTO. (in)

Fibra de vidrio rígida

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería °F							
	30	100	150	200	250	300	350	400
	99	149	199	249	299	349	399	450
1/2								
3/4								
1								
1 1/2								
2								
3								
4								
6								
8								
10								
12								
14								
16								
18								
20								
22								
24								

Espe sor de aislamiento de 1" para todos los diámetros de tubería a las temps. indicadas.

NOTA: El espesor del aislamiento está basado sobre las siguientes condiciones de diseño: La temperatura de la superficie del aislante a 140°F máxima, temperatura del ambiente de 70°F y una velocidad del viento de 3 m/h, para un rango de temperatura de 150 a 450°F.

TABLA III. ESPESOR DE AISLAMIENTO (IN)  
Sistema de aceite

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería, °F										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
1/2	1	1	1	1	1 1/2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
3/4	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3
1	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	3	3
1 1/2	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	3	3
2	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2	3	3	3 1/2
3	1	1	1	1 1/2	2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	3 1/2
4	1	1	1	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2	3	3	3 1/2	4
6	1	1	1	1 1/2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4	4 1/2
8	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4	4 1/2
10	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
12	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
14	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
16	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	5	5
18	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4 1/2	5	5
20	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4 1/2	5	5
24	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4 1/2	5	5

Nota: El espesor del aislante está basado en las condiciones de diseño: temperatura de la superficie del aislante, 140°F máxima; condiciones del ambiente a 70°F y 3 mts/hr de velocidad del viento.

TABLA III. ESPESOR DE AISLAMIENTO (IN)  
Españija plástica

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería, °F						
	0	15	30	45	60	75	90
	14	29	44	59	74	89	105
1/2	3/4	3/4	1/2	3/8			
3/4	3/4	3/4	1/2	3/8			
1	3/4	3/4	1/2	3/8			
1 1/2	3/4	3/4	1/2	3/8			
2	3/4	3/4	1/2	3/8			
3	3/4	3/4	1/2	3/8			
4	3/4	3/4	1/2	1/2			
6	3/4	3/4	1/2	1/2			
Superficie plana	1	1	3/4	1/2			

El espesor del aislamiento está basado en el criterio de prevenir la condensación en la tubería a condiciones del ambiente de 85 °F y 70% de humedad relativa.

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería, °F						
	0	15	30	45	60	75	90
	14	29	44	59	74	89	105
1/2	1/2	3/8	3/8	3/8			
3/4	1/2	3/8	3/8	3/8			
1	1/2	3/8	3/8	3/8			
1 1/2	1/2	3/8	3/8	3/8			
2	1/2	3/8	3/8	3/8			
3	1/2	1/2	1/2	1/2			
4	1/2	1/2	1/2	1/2			
6	1/2	1/2	1/2	1/2			
Superficie plana	1/2	3/2	3/8	3/8			

El espesor del aislamiento está basado en el criterio de prevenir la condensación en la tubería a condiciones del ambiente de 60 °F y 50% de humedad relativa.

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería, °F						
	0	15	30	45	60	75	90
	14	29	44	59	74	89	105
1/2	-	-	3/4	3/4			
3/4	-	-	3/4	3/4			
1	-	-	3/4	3/4			
1 1/2	-	-	3/4	3/4			
2	-	-	3/4	3/4			
3	-	-	3/4	3/4			
4	-	-	3/4	3/4			
6	-	-	3/4	3/4			
Superficie plana	-	-	1	3/4			

El espesor del aislamiento está basado en el criterio de prevenir la condensación en la tubería a condiciones del ambiente de 90 °F y 80% de humedad relativa.

TABLA III D. ESPESOR DE AISLAMIENTO (IN)  
Poliuretano

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería, °F							
	-100 -76	-75 -51	-50 -26	-25 -1	0 24	25 49	50 74	75 100
1/2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1	1	1
3/4	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1	1
1	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1	1
1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1	1
2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1	1
3	2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1
4	2	2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1
6	2	2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1
8	2 1/2	2	2	1 1/2	1 1/2	1	1	1
10	2 1/2	2	2	1 1/2	1 1/2	1	1	1
12	2 1/2	2 1/2	2	1 1/2	1 1/2	1	1	1
14	2 1/2	2	2	1 1/2	1 1/2	1	1	1
16	2 1/2	2	2	2	1 1/2	1	1	1
Superficie plana	2 1/2	2 1/2	2	2	1 1/2	1	1	1

NOTA: Para aplicaciones a baja temperatura, el espesor del aislamiento está basado en el criterio de prevenir la condensación en una velocidad local máxima ambiental de 300 y 800% de humedad relativa.

(a) El espesor mostrado es de doble capa construido separadas en forma de capas.

TABLA III E. ESPESOR DE AISLAMIENTO (IN)  
Fibra mineral rígida

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería, °F										
	180 199	200 299	300 399	400 499	500 599	600 699	700 799	800 899	900 999	1000 1099	1100 1200
2	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2	3	5	3 1/2
3	1	1	1	1 1/2	2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	3 1/2
4	1	1	1	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2	3	3	3 1/2	4
6	1	1	1	1 1/2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4	4 1/2
8	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4	4 1/2
10	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
12	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
14	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
16	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	5	5
18	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4 1/2	5	5
Superficie plana	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4 1/2	5	5

NOTA: El espesor del aislamiento está basado en el criterio de mantener 140°F máximo en su superficie a condiciones ambientales de 70°F y 3 mil/hr. de velocidad del aire.

TABLA III. ESPESOR DE AISLAMIENTO (IN)  
Espuma de vidrio.

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería, °F											
	-50	-25	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225
	24	1	24	49	74	99	124	149	174	199	224	250
1/2	2 1/2	2	1 1/2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3/4	3	2 1/2	2	1 1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
1	3	2 1/2	2	1 1/2	1	1	1	1	1	1	1	1
1 1/2	3	3	2 1/2	2	1 1/2	1	1	1	1	1	1	1
2	3	3	2 1/2	2	1 1/2	1	1	1	1	1	1	1
3	3 1/2	3	2 1/2	2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1	1	1
4	3 1/2	3	2 1/2	2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1	1	1	1	1
6	3 1/2	3	2 1/2	2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
8	3 1/2	3	2 1/2	2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
10	3 1/2	3	2 1/2	2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
12	3 1/2	3	2 1/2	2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
14	3 1/2	3	2 1/2	2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
Superficie Plana	1 1/2	1 1/2	3	2 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2

NOTA: Para aplicaciones a baja temperatura, el espesor del aislamiento está basado en el criterio de prevenir la condensación a una máxima severidad del ambiente de 90°F y 80% de humedad relativa. Para alta temperatura se toma el criterio de que el aislamiento tenga 140°F máxima en su superficie a condiciones del ambiente de 70°F y 3 m/1hr de velocidad del viento. (2) El espesor especificado es de doble capa construido en unidades en forma de panel.

TABLA III-B. ESPESOR DE AISLAMIENTO (IN)  
Silica expandida

Diámetro nominal de la tubería (in)	Temperatura de la tubería, °F										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
	199	299	399	499	599	699	799	899	999	1099	1200
1/2	1	1	1	1	1 1/2	2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
3/4	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	3
1	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	3	3
1 1/2	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2	2 1/2	2 1/2	3	3
2	1	1	1	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2	3	3	3 1/2
3	1	1	1	1 1/2	2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	3 1/2
4	1	1	1	1 1/2	2	2 1/2	2 1/2	3	3	3 1/2	4
6	1	1	1	1 1/2	2	2 1/2	3	3	3 1/2	4	4 1/2
8	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4	4 1/2
10	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
12	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
14	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	4 1/2	5
16	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4	5	5
18	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4 1/2	5	5
Superficie Plana	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	2	2 1/2	3	3 1/2	4-1/2	5	5

NOTA: El espesor del aislamiento está basado en el criterio de mantener 140°F máxima en su superficie a condiciones del ambiente de 70°F y 3 m/1hr de velocidad del viento.

#### 4.4.3.- SELECCION DE PROTECTORES

Los sistemas de aislamiento térmico contienen materiales de protección, identificados con símbolos. Los símbolos de identificación son más usados para materiales de construcción para las tuberías o tanques, y por el contrario menos usados en materiales de construcción para accesorios, válvulas, bombas, etc. Los símbolos y correspondientes materiales protectores son enlistados en la tabla IV. El uso y aplicación de los protectores, la simbología para dibujos y dimensiones están descritas en la tabla V, VI, VII y el anexo 4.

La tabla V, de materiales protectores, muestra la selección de protectores para sistemas de aislamiento térmico específicos. Las tablas están desarrolladas en base a los estándares de manufactura disponible y la experiencia en el manejo de tubería, equipo y ductos. Una lista de costos numéricos es mostrada donde se compara el costo de varios sistemas de protección para cada sistema de aislamiento térmico. Los protectores de bajo costo están identificados por el número I y conforme aumenta el costo, los números se incrementan. La lista de costo es únicamente una guía relativa y no será usada para comparación del costo directo. La selección de protectores de bajo costo para el cual una "X" aparece en las columnas representando las condi-

TABLA IV. MATERIALES Y SÍMBOLOS DE PROTECTORES

FABRICACION DE TELAS Y PROTECTORES.		PROTECTORES METALICOS	
Símbolo	Material	Símbolo	Material
CE	Telas de 8 onzas	MB	Hoja de 0.010" de aluminio
GE	Telas de vidrio de tamaño específico de 7.8 onzas por yarda cuadrada.	MC	Hoja de aluminio de 0.016"
GD	Telas de vidrio de tamaño específico de 7.9 onzas por yarda cuadrada fabricada como protector de vapor.	MD	Hoja de aluminio de 0.016" con cubierta de acrílico.
		ME	Hoja de aluminio de 0.016" con forro protector contra el vapor.
		MW	Hoja de acero galvanizado de 0.016" con resina de látex en la superficie y película de fibra de 1 mm y la interior de 2 mm.
HOJAS Y PAPELES PROTECTORES		RESINAS PROTECTORAS	
Símbolo	Material	Símbolo	Material
FA	Papel de asfalto-asbesto de 50%	RA	Asfalto cortado, protecto. de vap.
FB	Hojas de 125 mm de asfalto, tela de vidrio y aluminio	RC	Asfalto cortado, rez fijador
FL	Hoja de aluminio, polvo de vidrio y papel de estrasa de 0.001"	RE	Asfalto cortado con aluminio
EM	Hoja de aluminio, polvo de vidrio y papel de estrasa blanco de 0.001"	RP	Latex, PVA ó acrílico.
		RS	Hule clorinado.

**TABLA V. MATERIALES PROTECTORES**

(Eleccionar la alternativa de menor costo de acuerdo a la marca "X".)

**FIBRA DE VIDRIO**

**SILICATO DE CALCIO**

Índice de costos  
Tuberías  
Tuberías - olla  
Tuberías - bajo temperatura  
Formas cilíndricas (1)  
Formas irregulares (1)  
Ductos

Índice de costos  
Tuberías  
Tuberías - olla  
Tuberías - bajo temperatura  
Formas cilíndricas  
Formas irregulares  
Ductos

	FL	FM	CE	CJ	FA	MB	MR	MR	ME	MB	RP	RP
1	X							X				
1	X	X	X									
2	X	X	X									
3	X			X								
4	X	X	X									
5	X	X	X									
6	X	X	X		X							
7	X	X	X		X							
8	X	X		X								
9	X	X	X		X							
10	X	X				X						
10	X	X			X							

	CF	FA	MB	MC	MD	MB	RE	RP
1	X	X						
2	X	X	X					
3	X	X	X					
4	X	X	X		X			
5	X	X	X		X			
6	X	X	X		X		X	
7	X	X					X	
7	X	X					X	

(1) Únicamente para olla temperatura

**ESPUMA PLÁSTICA**

**POLIURETANO**

Índice de costos  
Tuberías  
Tuberías - olla temperatura  
Tuberías - bajo temperatura  
Formas cilíndricas  
Formas irregulares  
Ductos

Índice de costos  
Tuberías  
Tuberías - olla temperatura  
Tuberías - bajo temperatura  
Formas cilíndricas  
Formas irregulares  
Ductos

	NB (1)	EA	RS
1	X		
2	X	X	X
3	X	X	X

	EM	EA	MB	RA	RE	RP
1	X		X			
2	X	X	X			
3	X	X	X	X		
4	X	X		X	X	
4	X	X		X	X	
4	X	X		X	X	

(1) NB es no protector

TAULA V. MATERIALS PROTECTIUS (Continuació)

FIBRA MINERAL

Índex de color	Protector			
	1	2	3	4
1	X	X	X	
2	X	X	X	X
3	X	X	X	X
4	X	X		X
4	X	X		X

ESPONJA DE VIDRIU

Índex de color	Protector			
	1	2	3	4
1	X	X		
2	X	X	X	
3	X	X	X	X
3	X	X	X	X
4	X	X	X	X
4	X	X		X
4	X	X		X
4	X	X		X

- (1) Únicament per a baixa temperatura
- (2) Únicament per a alta temperatura
- (3) Per a alta i baixa temperatura

SILICA EXPANDIDA

Índex de color	Protector			
	1	2	3	4
1	X		X	
2	X	X	X	
3	X	X	X	
4	X	X	X	X
5	X	X	X	X
6	X	X	X	X
7	X	X		X
7	X	X		X

ciones de diseño particulares.

#### 4.5.- IDENTIFICACION DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO, SIMBOLOGIA

Una vez que el sistema de aislamiento se escogió mediante un procedimiento adecuado de selección, resulta conveniente clasificar e identificar en forma ordenada, dicho sistema de aislamiento. Cuando en el diseño del aislamiento del equipo - líneas - de un proceso determinado se presenta la necesidad del uso - de más de dos tipos de aislante, es indispensable contar con -- una simbología que permita identificar en forma sencilla y confiable cualquier tipo de aislamiento que se requiera usar. Otra de las ventajas del uso de una simbología para identificación - de los sistemas de aislamiento, es que los símbolos son fáciles de escribir en los diagramas de tubería o equipo ya que son pocos números y letras, ocupando muy poco espacio en su representación, a diferencia de escribir el nombre del aislante en los diagramas. También, cuando se cuenta con una simbología para -- identificación de los sistemas de aislamiento; más fácilmente - se pueden ordenar y resumir en listas y tablas de información, - las características generales de los sistemas de aislamiento, - siendo esto de gran utilidad cuando el diseño abarca gran canti- dad de líneas y equipos por aislar y cuando se incluyen diferen

tes tipos de aislantes.

A continuación se describe y discute uno de los tantos métodos que son usados para identificar los sistemas de aislamiento, incluyendo la representación sobre los diagramas de tubería y equipo, una lista completa de los números empleados para identificar cada aislante que junto con las claves dadas para los diferentes materiales de las cubiertas protectoras, nos permiten identificar plenamente cualquier sistema de aislamiento. Cabe mencionar el hecho de que únicamente se expone un sistema de identificación, debido a que generalmente, cada compañía que fabrica aislantes y cada firma de ingeniería que diseña aislamientos utilizan su propia simbología, tornándose inadecuado y de suma dificultad presentar la explicación de todos los métodos de identificación.

Este método de identificación servirá como una guía para conocer la forma de utilizar la simbología y poder entender cualquier identificación de aislamiento.

#### 1.- Identificación de sistemas de aislamiento.

El método de identificación que se presenta, utiliza exclusivamente números para indicar el tipo de aislantes y letras pa

ra indicar el tipo de material de la cubierta protectora. La lista de aislantes con sus números de identificación y usos se muestra en la tabla VI y VII, de igual forma, las claves para denotar el tipo de material de las cubiertas protectoras se explica en la tabla VI de este capítulo. En la figura 4.1 y 4.2 se muestra la representación en dibujos del ordenamiento de los símbolos para completar la identificación de los sistemas de aislamiento, teniendo cada parte de la identificación el siguiente significado:

1.1.- Primera parte: La primera parte del símbolo de identificación indica el espesor del aislamiento y el tipo de material aislante, por ejemplo: 1 1/2" - 130 indica que el sistema de aislamiento consta de lana mineral con espesor de 1 1/2" como material aislante. Para ésta primera parte, las siguientes reglas son aplicadas:

(1).- No usar décimas de pulgada para indicar el espesor del aislamiento. Al usar el sistema métrico el espesor es indicado en milímetros.

(2).- El espesor del aislamiento no incluye el espesor del protector.

(3).- Para indicar un aislamiento terminal en tuberías y ductos se expresa de igual forma que en la fig. 4.1.

(4).- La letra "D" colocada después del espesor del aislamiento (como por ejemplo 5" - D 20) indica una capa doble de aislamiento.

(5).- Cuando por condiciones de diseño son requeridos dos o más diferentes tipos de aislamientos, son indicados en la siguiente forma 1/2" - 160, 1 1/2" - 210 lo cual designa 1/2" de esponja de vidrio y 1 1/2" de fibra de vidrio. Los materiales se especifican por orden alfabético.

1.2.- Segunda parte: La segunda parte colocada inmediatamente junto a la primera, indica el material del protector aplicado encima del aislamiento, ejemplo: 1 1/2" - 100 MC significa 1 1/2" de silicato de calcio cubierto con una lámina protectora de aluminio. Los materiales protectores son denotados por dos letras (ver tabla VI de este capítulo).

Las letras "N B" (como 2" - 110 N B) indica que el material aislante no lleva protector. Para aislamientos compuestos, el símbolo del protector es colocado siguiendo la última designación del aislante, 2" - 130, 1" - 210 M C.

## 2.- Identificación en diagramas y dibujos.

En la fig. 4.1 se muestra la identificación usada en los diagramas de flujo de ingeniería y diagramas de tubería, para -

denotar el aislante.

En la fig. 4.2 se presenta la forma de identificar los sistemas de aislamiento en dibujos de detalles de tubería y equipos, o en diagramas de levantamiento de tuberías.

3.- Sumarios y listas de aislamientos térmicos de equipo y tuberías.

Las compañías que se dedican al diseño o fabricación de -- aislamientos normalmente cuentan con formas especiales para enlistar los sistemas de aislamiento requeridos para los equipos. En forma similar, existen listas de tuberías en donde se incluyen también los sistemas de aislamiento requeridos para cada -- tubería.

La información contenida en las listas de aislamiento térmico de equipo y tuberías es muy útil e indispensable en el proceso de diseño y construcción de cualquier planta de proceso; -- de allí la ventaja de contar con listas adecuadas de aislamiento térmico.

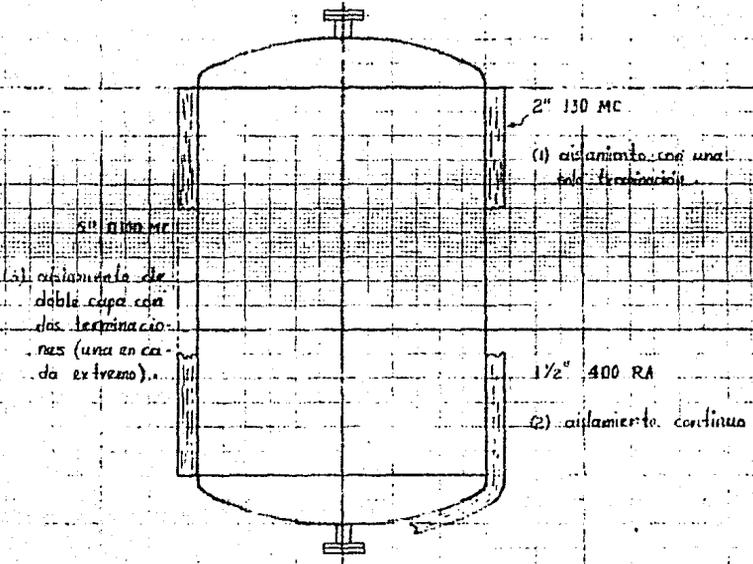
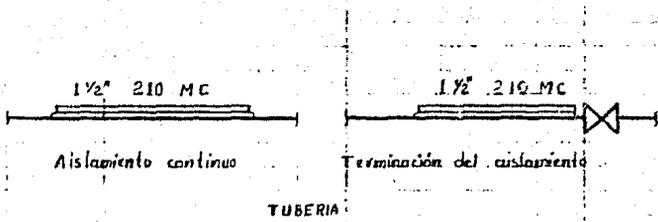


FIG. 4.1. SIMBOLOS TÍPICOS DE IDENTIFICACION EN DIAGRAMAS DE INGENIERIA

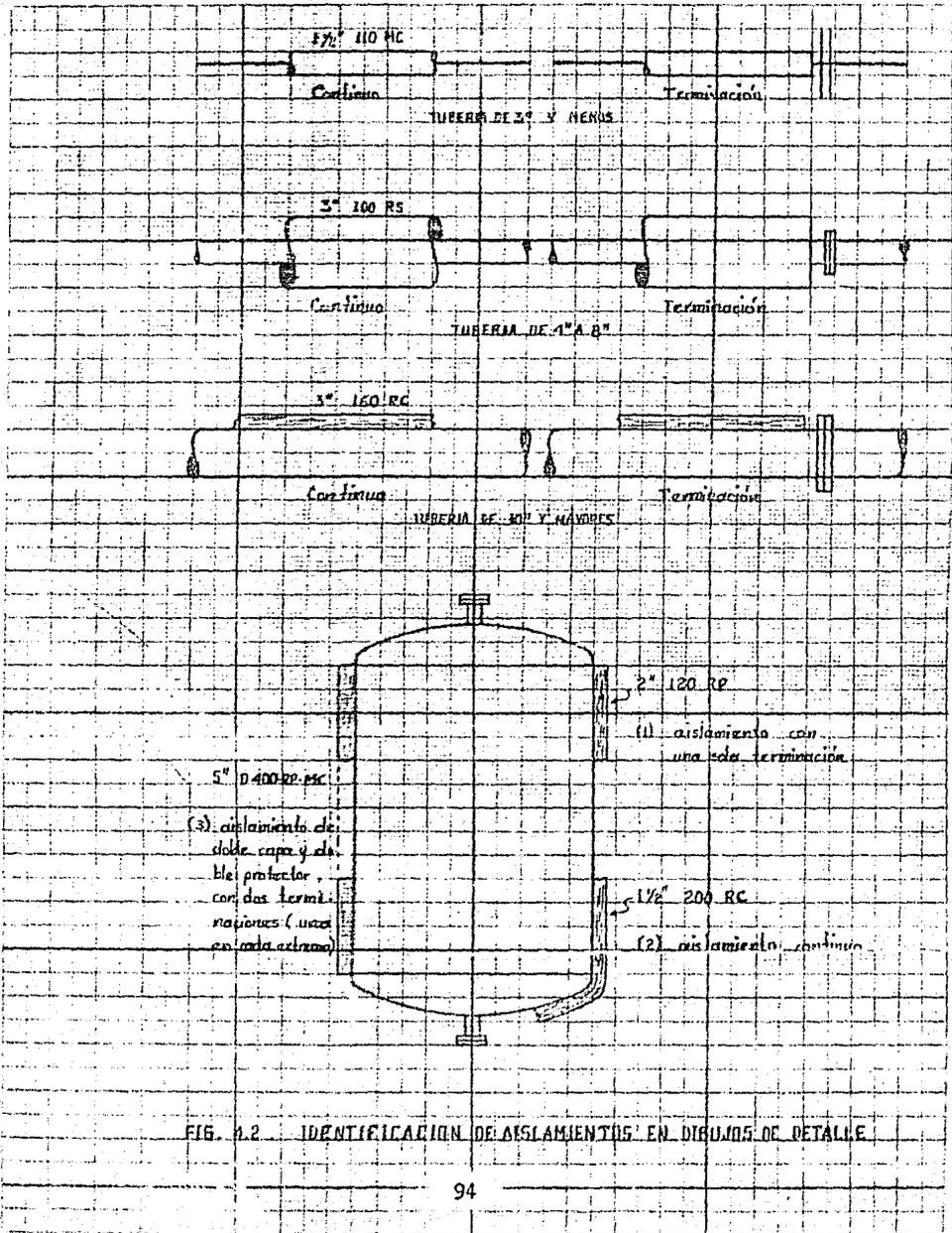


FIG. 2.2 IDENTIFICACION DE AISLAMIENTOS EN DIBUJOS DE DETALLE

**TABLA VI.- LISTA DE SÍMBOLOS DE IDENTIFICACION  
DE LOS AISLANTES Y PROTECTORES**

**1.- AISLAMIENTOS**

NUMERO DE IDENTIFICACION	MATERIAL
100	Silicato de calcio
110	Sílica expandida
120	Asbestos amosite
130	Lana mineral (alta densidad)
140	Fibra de vidrio (baja densidad)
141	Fibra de vidrio (alta densidad)
150	Fibra de cerámica rígida
160	Esponja de vidrio (temperatura alta)
170	Tierras diatomaceas
180	Esponja Plástica
200	Lana mineral (baja densidad)
210	Fibra de vidrio
300	Asbestos blancos
310	Asbestos azules
400	Esponja de vidrio
410	Poliestireno
420	Poliester bajo P.M.
430	Poliester
500	Polierutano rígido
620	Polierutano
700	Asfalto
800	Esponja de vidrio (baja temperatura)

## 2.- PROTECTORES

### CLAVE DE IDENTIFICACION

### MATERIAL

#### 1.- Telas protectoras

CF	Telas de 8 onzas
CG	Tela de vidrio
CJ	Tela de vidrio, protector contra vapor

#### 2.- Hojas de papel protector

FA	Papel de 50 lb de asfaltos-asbestos
FB	Hoja de 0.125" de asfalto-tela de vidrio- aluminio
FL	Hoja de papel de estrasa con vidrio y Al
FM	Hoja de papel de estrasa con vidrio

#### 3.- Protectores metálicos

MB	Hoja de 0.01" de aluminio
MC	Hoja de 0.016" de aluminio
MD	Hoja de 0.016" de aluminio recubierto con acrílico
ME	Chaqueta de vapor y 0.016" de aluminio
MW	0.016 de acero galvanizado recubierto con resina vinílica; película exterior de 4 - milésimas y película interior de 2 milési- mas de pulgada.

#### 4.- Resinas protectoras

RA	Asfalto cortado, protector contra vapor
RC	Asfalto cortado, con ligaduras
RE	Asfalto cortado, aluminio
RP	Latex, EVA o acrílico
RS	Gule clorinado.

**TABLA VII. MATERIALES DE MAYOR USO**

(Los materiales recomendados en letra itálica)

CLASIFICACION	NUMERO DE IDENTIFICACION	MATERIAL	USOS Y LIMITACIONES
MATERIALES AISLANTES PARA TEMPERATURAS ELEVADAS	100	SILICATO DE CALCIO	Block rígido, cubiertas de tubería, uso rango de temperatura de 100 a 1800°F. Buena resistencia de compresión y excelente permeabilidad. Se aplica sobre acero inoxidable.
	110	Silica expandida	Block rígido, cubiertas de tubería para rango de temperatura 100 a 1800°F. Excelente permeabilidad.
	120	ASBESTOS ANOSITE	Block rígido, cubiertas de tubería para rango de temperatura de 110 a 1200°F. Alta resistencia de compresión, buena permeabilidad.
	150	Lana mineral	Block rígido, servicios especiales de alta temperatura (600 a 1800°F).
	160	España de vidrio	Block rígido, cubiertas de tubería de alta resistencia de compresión. Se utiliza arriba de 800°F.
	200	Lana mineral	Envolturas de aislamiento. Baja costo inicial pero de incierta duración. No se usa arriba de 1300°F.
	210	Fibra de vidrio	
	300	Asbestos Negro	Materiales recomendados para servicios aislantes combinados. Probados al fuego en rango de temperatura de 150 a 1200°F.
	310	Asbestos azules	
MATERIALES AISLANTES PARA BAJAS TEMPERATURAS	400	ESPONJA DE VIDRIO	Block rígido, cubiertas de tubería para servicios de temperatura dual, de -300 a 400°F. Alta resistencia de compresión, excelente grado de permeabilidad. Es práctico para usarse en tanques de almacenamiento.
	410	Poliestireno	Block rígido, cubiertas de tubería para rango de temperatura de 100 a 32°F. Los solventes en agua causan deterioro.
	420	POLIESTER	Block rígido, cubiertas de tubería para rango de temp. de 400 a 32°F. Resistencia al fuego, Excelente K y permeabilidad.
	500	POLIURETANO	
	430	POLIESTER	Block rígido, cubiertas de tubería para rango de temperatura de -250 a 32°F.
	620	POLIURETANO	

**TABLA VIIo. PROTECTORES DE MAYOR USO**

(Los materiales recomendados en letra mayúscula)

CLASIFICACION	NUMERO DE IDENTIFICACION	MATERIAL	USOS Y LIMITACIONES
MATERIALES DE LOS PROTECTORES PARA TEMPERATURAS ELEVADAS	RA	Asfalto espesado	Resinas aplicadas por espesado o con trulla como protectores contra agua. E.I.
	RP	ACETATO DE POLIVINILO	PVA blanca protege una superficie reflectiva.
PROTECTORES PARA Bajas TEMPERATURAS	RQ	ASEFALTO CORTADO	Resinas aplicadas por espesado o con trulla
MATERIALES USADOS EN ENCHUQUETADO	RE	TEJIDO DE ASBESTOS	Cubiertas protectoras para tubería y equipo. No aplicable para servicios de alta temperatura.
	RC	Alumina	Cubiertas de tubería, enchuquetado de tanques
		ACERO INOXIDABLE	Cubiertas de tubería, enchuquetado de tanques. Alta costo inicial, pero económico en servicios a largo plazo.

#### 4.6.- CRITERIOS ADICIONALES DE DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO.

Como un complemento al tratamiento desarrollado anteriormente para la explicación del método de selección discutido en este capítulo, se incluye la presentación y discusión de algunas consideraciones importantes acerca de los criterios de diseño de los sistemas de aislamiento térmico. Dichas consideraciones deben ser tomadas en cuenta en la mayoría de los procesos de diseño de aislamientos y en algunos casos, es indispensable el conocimiento de los criterios adicionales que aquí se presentan.

Tres diferentes disposiciones de criterio son válidas para la determinación de espesores de aislante y varían de acuerdo a las condiciones del proceso por aislar, ellas son:

- 1.- Las limitaciones de los procesos imponen una máxima velocidad permisible de intercambio de calor con los alrededores.
- 2.- Un balance económico, tal que la combinación de costos de aislamiento y pérdidas de calor, sean mínimos.
- 3.- Limitaciones por seguridad de la temperatura de la superficie externa del aislante.

Las tres consideraciones son importantes y el diseño de los sistemas de aislamiento estará sujeto a ellas, siendo usado

el espesor de aislamiento que cumpla con las tres consideraciones mencionadas. Cuando en algún proceso una de ellas reviste una importancia crítica, ésta determinará totalmente el diseño del sistema de aislamiento.

Las variaciones en los criterios expuestos arriba, están determinadas básicamente por las diferencias entre los requerimientos para procesos de baja y alta temperatura. En los siguientes párrafos se discuten las consideraciones sobre las variaciones.

#### 4.6.1.- LIMITACIONES DEL PROCESO

Una función primordial del aislamiento es guardar el calor o frío suficientemente para mantener las condiciones de operación requeridas. Estos requerimientos tienen preferencia sobre todos los demás, cuando las condiciones siguientes son los factores controlantes en el diseño del aislamiento:

1.- Para procesos con temperaturas arriba de la ambiente (temperaturas elevadas).

a).- Separación no adecuada de los componentes de mezclas volátiles causada por la condensación de los componentes más volátiles, en equipos de destilación.

b).- Cristalización de sólidos, soluciones o vapores.

c).- Cambios de viscosidad no deseables en los productos, en tanques o dentro de tuberías.

d).- Pérdida de utilidades por deterioro de productos o incremento de presión causados por excesiva entrada de calor.

2.- Para procesos de temperatura menor que la ambiente (bajas temperaturas).

a).- Excesiva ebullición de los componentes volátiles por alto flujo de entrada de calor en equipos de congelación.

b).- Pérdida de producto por evaporación debido a la entrada de calor.

c).- Incremento de la presión o deterioro del producto causado por la entrada de calor dentro del sistema de refrigeración.

#### 4.6.2.- ESPESOR ECONOMICO

Las consideraciones usuales en la determinación del espesor económico están basados en la premisa de que el calor es producido por una planta de generación de vapor y es distribuido por líneas hacia los equipos de intercambio, y que las pérdidas de calor son esencialmente pérdidas de vapor (al condensarse el vapor). Estas suposiciones son válidas en todos aquellos equipos de intercambio que consumen vapor (cambiadores, evaporadores, etc.), así como en calefactores de vapor y bombas, y para

muchos otros procesos en los cuales el calentamiento se realiza con el uso de vapor.

#### 1.- Condiciones no usuales.

Se requiere un análisis especial cuando prevalece alguna - de las condiciones siguientes:

a).- Cuando los procesos que requieren calor, son abastecidos - por una fuente de calor diferente a vapor (calor directo, aceite térmico, o electricidad).

b).- Cuando el proceso de transferencia es muy caro, principalmente en equipos de diseño complicado, el aislamiento debe comprender un diseño especial.

c).- Cuando se usa el aislamiento en equipo de transferencia -- muy caro (por ejemplo: una torre de destilación al vacío) el -- aislamiento, de igual forma se diseñará en forma especial.

Alguno de los factores antes mencionados puede incrementar gradualmente el valor de la energía calorífica generada por --- aceite térmico o electricidad, comparada con la energía calorífica generada con vapor; por consiguiente, el costo del aislamiento térmico óptimo será incrementado correspondientemente al aumentar el espesor requerido.

#### 2.- Refrigeración.

Para servicios a baja temperatura, el diseño de aislamien-

to térmico es generalmente muy especial. Una variable sustancial - no significativa en servicios de altas temperaturas, es el incremento directo del costo de un BTU de refrigeración, requiriéndose consecuentemente un aumento en el espesor de aislante para evitar pérdidas de BTU's de refrigeración, aumentando el costo del aislamiento.

#### 4.6.3.- LIMITES DE TEMPERATURA SUPERFICIAL

Las tablas de espesores recomendados, publicadas por fabricantes de aislamientos, normalmente están basados en una temperatura superficial constante o en un flujo de calor por unidad de superficie constante fijadas por cada compañía fabricante de aislamiento de ahí que existan diferentes criterios de diseño, aún cuando la mayoría de dichas empresas han comenzado a tomar como base las siguientes consideraciones aplicables.

1.- Temperaturas elevadas: Las condiciones de diseño que más se aceptan para servicios de alta temperatura son, temperatura de la superficie exterior del aislamiento de  $120^{\circ}$  F con aire quieto a  $80^{\circ}$  F en contacto con esta superficie. Esta condición de diseño es equivalente a un flujo de calor de aproximadamente 50 BTU/hrft<sup>2</sup> de superficie externa del aislante.

El límite de  $120^{\circ}$  F como temperatura máxima de la superfi-

cie del aislante obedece principalmente a la prevención de quemaduras hacia el personal de operación al tener la posibilidad de tocar superficies demasiado calientes.

2.- Bajas temperaturas: La premisa básica considerada para el diseño de aislamientos para servicios con temperaturas menores a la ambiente es que el aislamiento pueda evitar la formación de escarcha o la condensación sobre la superficie, previniendo con ésto los siguientes riesgos:

a).- Agua o hielo sobre tuberías presenta un riesgo para el personal de operación puesto que fácilmente pueden sufrir un resbalón en esas condiciones.

b).- Si la humedad penetra en alguna imperfección del aislamiento causará fallas que se extenderán debido a la saturación y congelamiento posterior del agua.

Dos condiciones de diseño diferentes tienen que ser consideradas para servicios de baja temperatura, para limitar la temperatura superficial. La primera para temperaturas menores a la temperatura ambiente y hasta  $-10^{\circ}$  F y la segunda más crítica para temperaturas abajo de  $-10^{\circ}$  F.

2.1.- Para procesos con temperaturas mayores a  $-10^{\circ}$  F las condiciones ambientales son  $90^{\circ}$  F y 80 % de humedad relativa de aire quieto. El máximo calor ganado en la superficie exterior del aislante es cerca de 9 BTU/hr, ft<sup>2</sup>.

2.2.- Para procesos de temperaturas abajo de  $-10^{\circ}$  F, las condiciones ambientales del aire son  $40^{\circ}$  F, 80 % de humedad relativa y un viento suave de 2 m p h. El máximo flujo de calor basado en la superficie exterior del aislante es cerca de 4 BTU/hr ft<sup>2</sup>

#### 4.6.4.- CONSIDERACIONES PARA LA SELECCION DE LOS MATERIALES

A continuación se presentan algunas consideraciones importantes involucradas en la selección de los materiales aislantes

##### 1.- Reducción del flujo de calor.

Como ya se dijo anteriormente, el material aislante debe impedir las pérdidas de calor del equipo que se pretende aislar.

##### 2.- Control de humedad.

El material aislante deberá prevenir la penetración del agua y el control del paso de humedad en forma de vapor.

Esta consideración es diferente para servicios de alta o baja temperatura.

a).- Los sistemas de aislamiento para temperaturas elevadas, deberá impedir la entrada de agua, pero a su vez; deberá permitir que el vapor atrapado dentro del aislamiento pueda salir hacia la atmósfera, cuando la superficie aislada es calentada.

b).- Los sistemas para bajas temperaturas deberán construirse - de materiales aislantes que sean resistentes a la transmisión - de vapor, y deberán prevenir el paso de humedad en forma líquida o en forma de vapor, hacia dentro del sistema.

### 3.- Propiedades físicas y mecánicas.

Los materiales aislantes deben estar de acuerdo con varios criterios básicos con respecto a sus propiedades mecánicas y físicas, estos criterios son:

a).- Aislamiento adecuado.

b).- No debe causar o intensificar la corrosión del acero o aleaciones.

c).- Resistente a la humedad y a la exposición a atmósferas químicas.

d).- Fácil manejo y aplicación.

e).- Disponibilidad en varios tipos y formas.

f).- Los materiales deben estar de acuerdo a las dimensiones fijadas por estándares reconocidos.

### 4.- Otras consideraciones.

4.1.- Materiales para temperaturas elevadas: Los materiales para altas temperaturas pueden ser rígidos (en forma de blocks), - láminas o telas, y materiales esparcidos. Los materiales rígidos y en forma de lámina pueden ser asegurados, en el sitio donde -

se encuentre el equipo, mediante abrazaderas o fijados con cemento.

Los materiales protectores para temperaturas elevadas pueden aplicarse como resinas o en forma de hojas.

Estos materiales no son considerados como una parte integral -- del aislamiento, y se especifican aparte.

4.2.- Materiales para bajas temperaturas: Los materiales aislantes para bajas temperaturas, usualmente son rígidos y segmentados, y son fijados al equipo con alambre o bandas de metal.

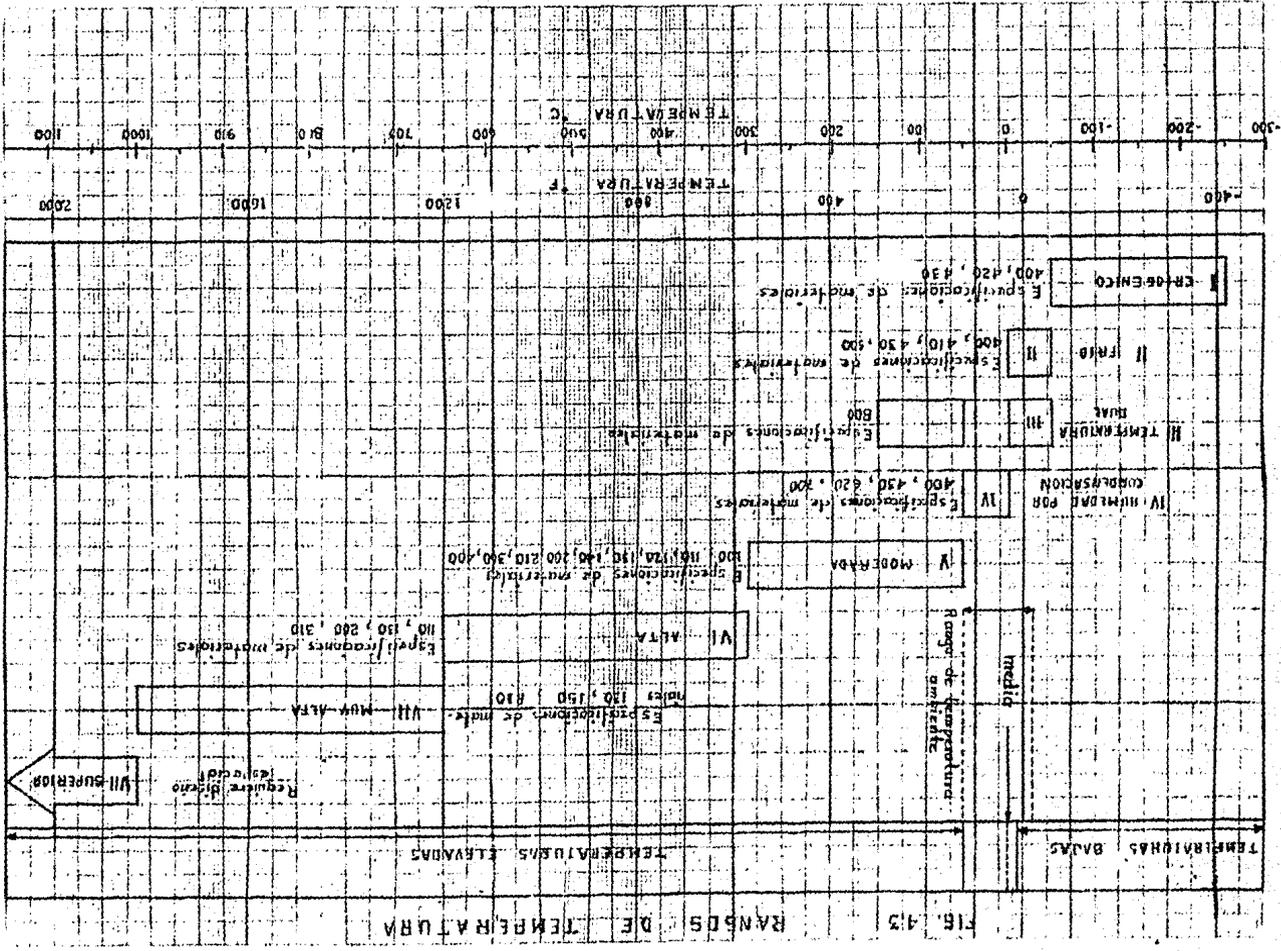
Materiales en forma de espuma y láminas pueden ser usados en -- los rangos menos rigurosos de baja temperatura.

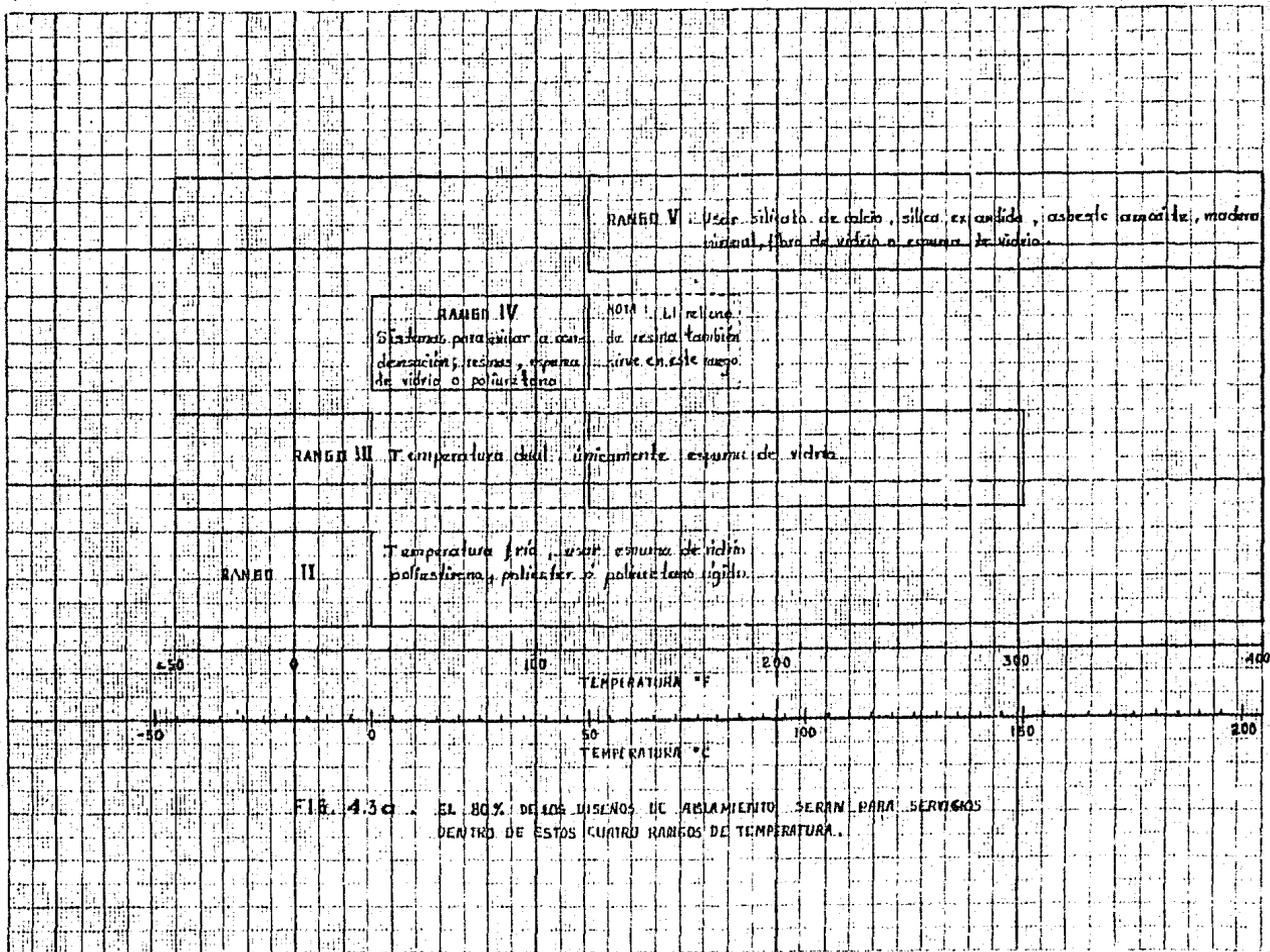
Los materiales para bajas temperaturas pueden ser resinas aplicadas con sumo cuidado de manera tal que encapsulen al aislamiento sin que éstas resinas disminuyan su calidad de resistencia a la humedad; sirviendo como materiales protectores, aunque cuando es requerida una protección mecánica, las resinas -- son insuficientes. En tales casos, se usa un protector metálico o en forma de espuma. Los materiales protectores se especifican independientes del aislamiento.

#### 4.6.5.- RANGOS DE TEMPERATURA

De acuerdo a algunas estadísticas muy recientes, la mayo--

ría de las plantas de proceso operan dentro del rango de temperatura de  $-425^{\circ}$  F hasta  $2000^{\circ}$  F, y hasta el momento no se conoce algún aislamiento que pueda operar en forma adecuada a lo largo de este rango. Por esta razón, en la figura 4.3 se presentan 8 rangos de temperatura, los cuales engloban la mayoría de los rangos de operación de las plantas de proceso. Junto con los rangos de temperatura, se enlistan las especificaciones de los materiales que pueden ser usados en forma segura y económica dentro de los límites de cada rango.





4.6.6. COMPARACION DE ESPESORES DE AISLAMIENTO. Las figuras 4.4 y 4.5 muestran el espesor del aislamiento requerido para cumplir la misma función, usando diferentes materiales.

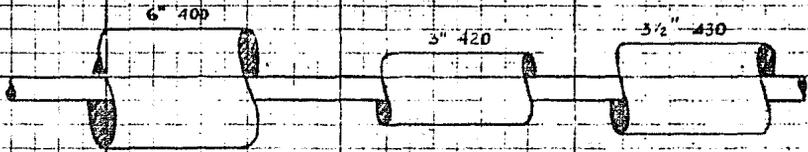


Fig. 4.4.a. materiales recomendados para el rango I.  
Comparación relativa de espesores para una tubería de 4" IPS a -100°F.

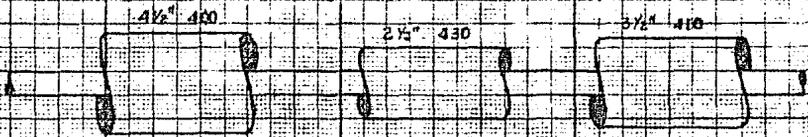


Fig. 4.4.b. materiales recomendados para el rango II.  
Comparación relativa de espesores para una tubería de 4" IPS a -50°F.

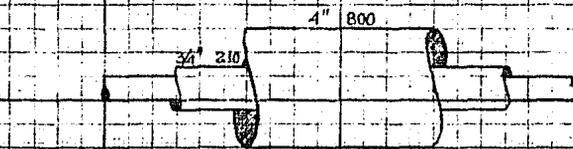


Fig. 4.4.c. materiales recomendados para el rango III.  
Comparación relativa de espesores para una tubería de 4" IPS a -50°F.

FIG. 4.4. MATERIALES AISLANTES PARA BAJA TEMPERATURA.



Fig. 4.5.a. materiales recomendados para el rango V.  
Comparación relativa de espesores para una tubería de 4" IPS a 450°F

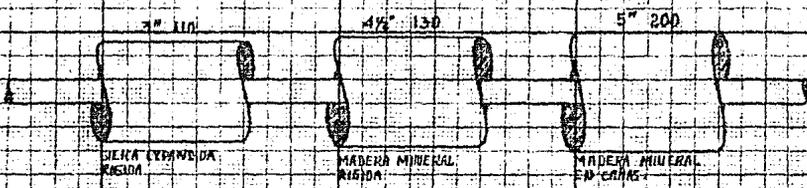


Fig. 4.5.b. materiales recomendados para el rango VI.  
Comparación relativa de espesores para una tubería de 4" IPS a 1000°F

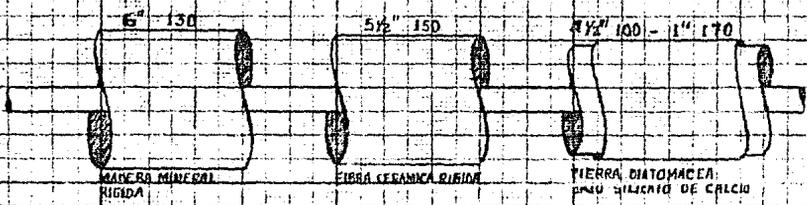


Fig. 4.5.c. materiales recomendados para el rango VII.  
Comparación relativa de espesores para una tubería de 4" IPS a 1600°F

FIG. 4.5. MATERIALES AISLANTES PARA TEMPERATURAS ELEVADAS

## CAPITULO V

### ESPESOR ECONOMICO

En el capítulo anterior se presentaron criterios de selección de aislamiento térmico considerando las aplicaciones en base a las características físicas de los sistemas de aislamiento, las condiciones de operación, el servicio que presta (alta o baja temperatura) y los casos especiales de diseño.

Del mismo modo, en el capítulo II se muestra el cálculo para obtener el calor en la superficie, en función del espesor del aislante para varios sistemas de aislamiento. En este capítulo se presentan algunos criterios de gran ayuda para la determinación del espesor económico.

#### 5.1.- BALANCE ECONOMICO

La determinación del espesor económico básicamente se efectúa usando técnicas de balance económico. El balance económico consiste en encontrar un costo óptimo cuando en un proceso de análisis económico existen costos que tengan variación ascendente y descendente con respecto a una o varias variables comunes.

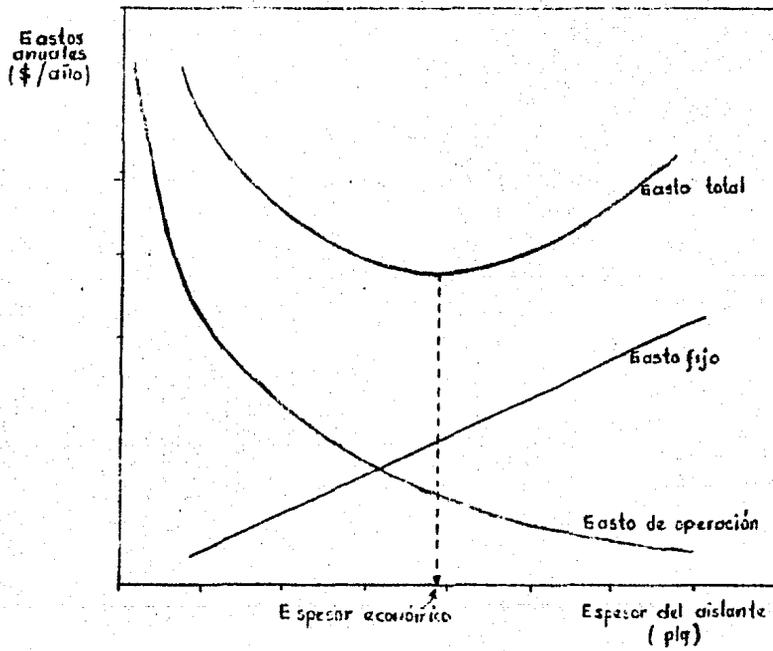
En el caso de la optimización de sistemas de aislamiento -

térmico, el espesor del aislante es la variable común, los costos ascendentes son función de la inversión los cuales se incrementan al aumentar el espesor, estos costos son llamados costos fijos; y los costos descendentes son función del ahorro de energía que se logra con el aislamiento, a estos costos se les denomina costos variables. La variación de ambos costos (fijos y variables) se muestra en la fig. 5.1 en la cual se pueden apreciar varios detalles importantes; en la curva de costos de operación variable se aprecia que las primeras pulgadas de espesor van a retener la mayor parte del calor, el espesor puede seguir aumentando sin que se logre controlar el paso del calor sensible, la curva se hace asintótica. Por otra parte, el incremento del espesor aumenta la inversión en la adquisición del aislante. Un balance entre estos dos factores conducirá a la selección óptima del espesor del aislante.

## 5.2.- COSTOS VARIABLES

Los costos variables son aquellos que se tienen durante la operación y representan los costos para hacer funcionar un proceso determinado. En el caso de un sistema de intercambio de calor los costos variables pueden ser calculados de la forma siguiente.

Fig. 5.1 Balance económico



$$\begin{aligned} E_f &= f(a) \\ E_{op} &= f(1/a) \\ E_t &= f(a) + f(1/a) \end{aligned}$$

$$C_{op} = (q) (\theta) (E)$$

Siendo  $q$  el calor cedido o ganado por el sistema hacia o del ambiente y es calculado de acuerdo al procedimiento mostrado en el capítulo II.

$\theta$  son las horas totales anuales de operación del equipo por año.  $E$  representa el costo indirecto de energía para una corriente de proceso, combustible, electricidad, vapor etc., en dólares por MM de BTU aprovechados.  $E$  puede calcularse por:

$$E = a (1 + i)^P / Fe$$

Donde:

$a$  = dlrs/MM BTU liberados por el combustible, fig. 5.2

$i$  = incremento anual del costo del combustible en %, fig. 5.2

$Fe$  = factor de eficiencia del sistema =  $1/\text{eficiencia}$

$P$  = periodo de tiempo para amortizar la inversión

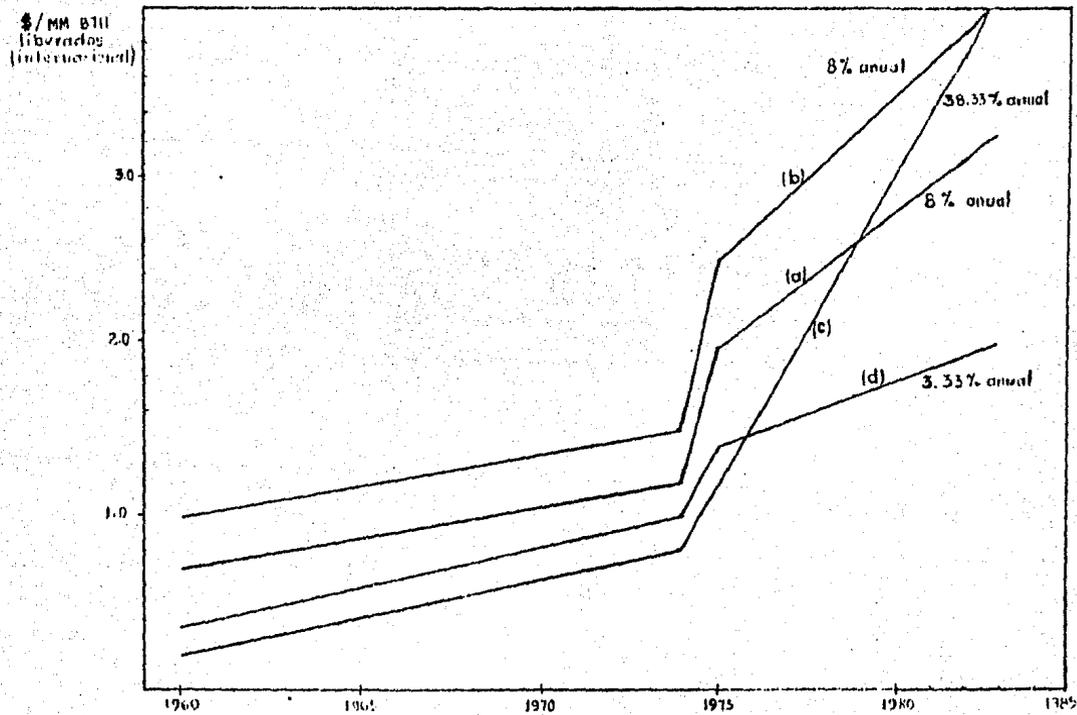
### 5.3.- COSTOS FIJOS

Dentro de estos costos se incluye la inversión en la adquisición, transporte, instalación y mantenimiento del sistema de aislamiento.

para expresar los costos fijos en función de la inversión de adquisición se usa la siguiente ecuación:

$$C_f = I a (1 + F) A$$

Fig. 5.2



- (a) aceite combustible
- (b) hidrocarburos ligeros-combustible
- (c) gas combustible
- (d) boniles de cinda

Donde  $F$  es un factor que involucra todos los costos por fletes, instalación, acabados e indirectos como un porcentaje del costo del aislante,  $F = \text{fletes} + \text{instalación} + \text{acabados} + \text{indirectos}$ .  $I_a$  es la inversión de adquisición.

$A$  es un factor que involucra la amortización del capital  $C$  y el deterioro del sistema de aislamiento ocasionado por mantenimiento al equipo o líneas aisladas ( $M$ ).

$$A = C + M$$

$$C = \frac{I_a}{1 - (1 + I_a)^{-P}}$$

$M$  Normalmente se considera un 3 % de la inversión total -- del sistema instalado.

$i_a$  es el interés anual capitalizable semestral o anualmente y  $P$  el período considerado para amortizar la inversión.

#### 5.4.- EJEMPLO NUMERICO

5.4.1. Calcular el espesor económico del sistema de aislamiento requerido para un cambiador de calor horizontal de 60" de diámetro y 15' de longitud construido en lámina de 1/4" de acero al carbón. La máxima temperatura por el lado de la coraza es de 220° F y de la información para este cambiador se obtiene un coeficiente de película  $h_f = 200 \text{ BTU/a pie}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$ , la temperatura

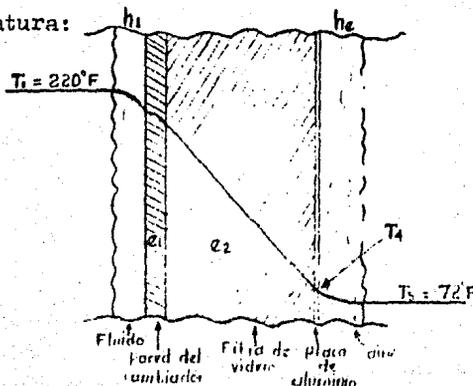
ra promedio del ambiente al año es de  $72^{\circ}\text{F}$ . El aislamiento que se usará es fibra de vidrio cuya conductividad térmica es:  $k = 0.3 \text{ BTU} \cdot \text{plg}/\text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^{\circ}\text{F}$  y su precio por pulgada de espesor es  $\$41.00/\text{pulg.} \cdot \text{pie}^2$ ; la fibra de vidrio llevará una cubierta protectora de placa áspera de aluminio con un coeficiente de emisividad de 0.10

5.4.2.- Determinar el espesor requerido para dar protección al personal (temperatura máxima de las paredes metálicas =  $140^{\circ}\text{F}$ ). Calcular la temperatura exterior que se tendría con este aislamiento.

Para el cálculo del espesor económico se considerará un periodo de amortización de cinco años con un interés anual del 20 % capitalizable semestralmente, el equipo operará 341 días al año.

Solución a 5.4.2

Para el sistema que se plantea, se tiene el siguiente perfil de temperatura:



Del capítulo II para transferencia de calor a través de pa  
redes:

$$q_1 = \frac{T_1 - T_5}{\frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{K_1} + \frac{e_2}{K_2} + \frac{1}{h_e}}$$

y del capítulo I :

$$q_2 = h_e (T_4 - T_5) , h_e = h_c + h_r$$

Cuando se requiere protección al personal  $T_4 = 140^\circ \text{ F}$

$$h_c = 0.29 (T_4 - T_5)^{0.25} \text{ para recipientes horizontales de } D > 3'$$

$$h_r = 0.173 E \left[ \frac{(T_4/100)^4 - (T_5/100)^4}{T_4 - T_5} \right]$$

$$h_c = 0.29 (140 - 72)^{0.25} = 0.8327$$

$$h_r = \frac{0.173 (0.10) \left[ (140+460/100)^4 - (72+460/100)^4 \right]}{140 - 72} = 0.1259$$

$$h_e = 0.8327 + 0.1259 = 0.9586$$

Con  $h_e$  en  $q_2 = h_e (T_4 - T_5)$

$$q_2 = 0.9586 (140 - 72) = 65.183$$

de acuerdo a la ley de la conservación de energía  $q_1 = q_2$

$$q_1 = q_2 = 65.183 = \frac{220 - 72}{\frac{1}{200} + \frac{0.25}{12} + \frac{e_2}{(26)} + \frac{1}{0.30} + \frac{1}{0.9586}}$$

$$65.183 = \frac{148}{0.005 + 0.0008013 + \frac{e_2}{0.30} + 1.0432}$$

despejando :  $e_2 = \frac{(148 - 68.377) 0.3}{65.183} = 0.3665" = 1/2" \text{ comercial}$

El espesor de fibra de vidrio requerido para cumplir con -

la protección al personal (T máx de la superficie, 140° F) es de 1/2".

Para:

$$e_2 = \frac{1}{2} \text{ se tiene } q_1 = \frac{220-72}{\frac{1}{200} + \frac{0.25}{12} + \frac{0.5}{(26) 0.30} + \frac{1}{0.9586}}$$

$$q_2 = 54.498$$

Para calcular T4 es estas condiciones :

$$q_2 = (hc + hr) (T_4 - T_5) = \left\{ 0.29 (T_4 - 72)^{0.25} + \frac{0.173 (0.1) \left[ (T_4 + 460/100)^4 - (72 + 460/100)^4 \right]}{T_4 - 72} \right\} (T_4 - 72)$$

$$q_2 = \left[ 0.29 (T_4 - 72)^{0.25} + \frac{0.0173 (T_4 + 460/100)^4 - 11.8577}{T_4 - 72} \right] \times$$

$$(T_4 - 72) = 54.498 .$$

Resolviendo por prueba y error encontramos que:

$$T_4 = 130.86^\circ \text{ F}$$

Solución a 5.4.1

a).- Cálculo de costos variables:

$$C_{op} = q (\theta) (E)$$

$$\theta = 341 \text{ días/año}$$

$$E = a (1 + i)^P F_e$$

Ef = 0.85 si el suministro de calor es por vapor provenien

te de calderas, Fe = 1/Ef = 1/0.85 = 1.176

$$P = 5 \text{ años}$$

De la figura 5.2 y considerando que la caldera quemara gas natural, se tiene  $i = 38.33 \%$

De la misma figura 5.2 se obtiene  $a = 3.76 \text{ \$/MM BTU liberados}$ , considerando un tipo de cambio de  $\$80.00/\text{\$}$

$$a = 3.76 (80) = \$300.00/\text{MM BTU liberados}$$

$$E = 300.80 (1 + 0.3833)^3 (1.176) = 936.34$$

Es de suma importancia para el cálculo de los costos de operación, obtener varios valores del calor perdido en la superficie correspondientes a varios espesores de aislante.

$$q_2 = \frac{220 - 72}{\frac{1}{200} + \frac{0.25}{12(26)} + \frac{e_2}{0.30} + 1.0432} = \frac{148}{1.090013 + \frac{e_2}{0.30}}$$

$$\text{Para } e = \frac{1}{4} \text{ " , } q_2 = \frac{148}{1.0490013 + \frac{0.25}{0.30}} = 78.626$$

$$\text{Para } e = \frac{1}{2} \text{ " , } q_2 = \frac{148}{1.0490013 + \frac{0.5}{0.30}} = 54.498$$

de igual forma:

$$\text{Para } e = 3/4 \text{ " , } q_2 = 41.702$$

$$\text{Para } e = 1 \text{ " , } q_2 = 33.772$$

$$\text{Para } e = 1 \ 1/2 \text{ " , } q_2 = 24.467$$

$$\text{Para } e = 2 \text{ " , } q_2 = 19.182$$

$$\text{Para } e = 3 \text{ " , } q_2 = 13.395$$

Para  $e = 4''$  ,  $q_2 = 10.290$

Para  $e = 6''$  ,  $q_2 = 7.031$

Para cada valor de  $q_2$  obtenido para cada espesor, usando la ecuación:

$$q_2 = \left[ 0.29(T_4 - 72)^{0.25} + \frac{0.0173(T_4 + 460/100)^4 - 13.8577}{T_4 - 72} \right] (T_4 - 72)$$

Se encuentra  $T_4$  que es la temperatura en la superficie del aislante y es diferente para cada espesor.

Para  $e = 1/4''$  ,  $T_4 = 151.07$

Para  $e = 1/2''$  ,  $T_4 = 130.86$

Para  $e = 3/4''$  ,  $T_4 = 119.41$

Para  $e = 1''$  ,  $T_4 = 111.84$

Para  $e = 1 1/2''$  ,  $T_4 = 102.72$

Para  $e = 2''$  ,  $T_4 = 97.2$

Para  $e = 3''$  ,  $T_4 = 90.78$

Para  $e = 4''$  ,  $T_4 = 87.14$

Para  $e = 6''$  ,  $T_4 = 83.05$

Con los valores de  $q_2$  en la ecuación de costos de operación:

$$\text{Cop} = q_2 (24\text{hr}) (341) (936.34/10^6)$$

$$\text{Para } e = \frac{1}{4}'' , \text{Cop} = 78.626 (24) (341) (936.34/10^6) = 602.51$$

$$\text{Para } e = \frac{1}{2}'' , \text{Cop} = 417.62 \text{ \$/año} - \text{pie}^2$$

Para  $e = \frac{3}{4}$ " , Cop = 319.56 \$/año - pie<sup>2</sup>

Para  $e = 1$ " , Cop = 258.79 \$/año - Pie<sup>2</sup>

Para  $e = 1 \frac{1}{2}$ " , Cop = 187.49 \$/año - pie<sup>2</sup>

Para  $e = 2$ " , Cop = 146.99 \$/año - pie<sup>2</sup>

Para  $e = 3$ " , Cop = 102.64 \$/año - pie<sup>2</sup>

Para  $e = 4$ " , Cop = 78.85 \$/año - pie<sup>2</sup>

Para  $e = 6$ " , Cop = 53.88 \$/año - pie<sup>2</sup>

b).- Cálculo de costos fijos:

$$Cf = I a (1 + F) A$$

$$A = C + M$$

$$C = \frac{ia}{1 - (1 + ia)^{-P}} \text{ Donde } ia = 20 \%/10 \text{ semestres} = 2\%$$

$$P = 10 \text{ semestres}$$

$$C = \frac{0.02}{1 - (1 + 0.02)^{-10}} = 0.111326$$

$$M \text{ se considera} = 0.03$$

F = fletes + instalación + acabados + indirectos

F se estima actualmente = 1.0 (Ia)

Ia = \$41 00/pulg. pie<sup>2</sup> para fibra de vidrio.

$$A = 0.111326 (5 \text{ años}) + 0.03 = 0.5866$$

$$\text{finalmente } Cf = Ia (1 + 1.0) (0.5866)$$

Calculando Cf para cada espesor de aislamiento.

$$\text{Para } e = \frac{1}{4}'' , I_a = \frac{\$41.00}{2 \text{ pulg pie}} (0.25 \text{ pulg.}) = \$10.25/\text{pie}^2$$

$$C_f = 10.25 (2) (0.5866) = 12.02$$

$$\text{Para } e = \frac{1}{2}'' , I_a = \$20.50 , C_f = \$24.05$$

$$\text{Para } e = \frac{3}{4}'' , I_a = \$30.75 , C_f = 36.08$$

$$\text{Para } e = 1'' , I_a = \$41.00 , C_f = 48.10 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = 1 \frac{1}{2}'' , I_a = \$61.50 , C_f = 72.15 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = 2'' , I_a = \$82.00 , C_f = 96.20 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = 3'' , I_a = \$123.00 , C_f = 144.30 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = 4'' , I_a = \$164.00 , C_f = 192.40 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = 6'' , I_a = \$246.00 , C_f = 228.61 \text{ \$/año - pie}^2$$

c).- Cálculo de los costos totales anuales.

$$CT = Cop + C_f$$

$$\text{Para } e = \frac{1}{4}'' , CT = 614.53 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = \frac{1}{2}'' , CT = 441.70 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = \frac{3}{4}'' , CT = 355.63 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = 1'' , CT = 306.90 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = 1 \frac{1}{2}'' , CT = 259.64 \text{ \$/año - pie}^2$$

$$\text{Para } e = 2'' , CT = 242.00 \text{ \$/año - pie}^2$$

Para  $e = 3''$  ,  $CT = 246.94$   $\$/año - pie^2$

Para  $e = 4''$  ,  $CT = 271.25$   $\$/año - pie^2$

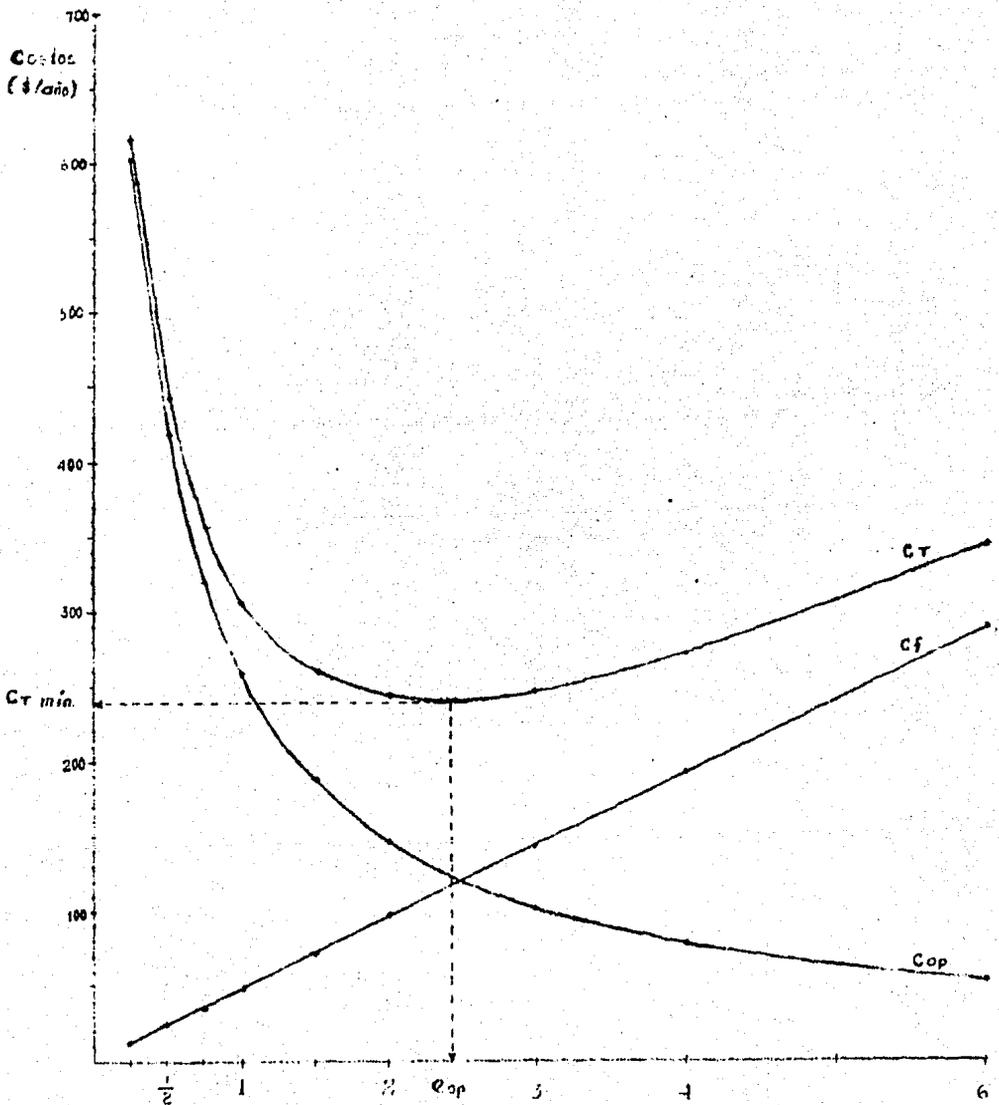
Para  $e = 6''$  ,  $CT = 342.50$   $\$/año - pie^2$

Tabulando todos los valores obtenidos se tiene:

$e$ (in)	$q$ (BTU/h-ft <sup>2</sup> )	$T_4$ (°F)	$Cop$ ( $\$/año-ft^2$ )	$Cf$ ( $\$/año-ft^2$ )	$Ct$ ( $\$/añoft^2$ )
1/4"	78.626	151.07	602.51	12.02	614.53
1/2"	54.498	130.86	417.62	24.05	441.70
3/4"	41.702	119.41	319.56	36.08	355.63
1"	33.772	111.84	258.79	48.10	306.90
1 1/2"	24.467	102.72	187.49	72.15	259.64
2"	19.182	97.20	146.99	96.20	243.20
3"	13.395	90.78	102.64	144.30	246.94
4"	10.290	87.14	78.85	192.40	271.25
6"	7.031	83.05	53.88	288.61	342.50

Con estos valores se construye la grafica 5.3 que representa la variación de los costos fijos, variables y totales - respecto del espesor del aislante y en la cual se obtiene el costo total mínimo que corresponde al espesor económico.

De la figura, se obtiene un espesor económico de 2.4" --- aproximadamente, sin embargo se usará el aislante con un espe-



$C_{\phi} = 2.5$

Expend. (€)  
(1/yr)

sor de 2 1/2" puesto que comercialmente no se fabrican aislamientos de 2.4". Finalmente, para cubrir los requerimientos de -- aislamiento del cambiador de calor considerado en el ejemplo se usará el siguiente sistema de aislamiento:

2 1/2" de fibra de vidrio con una cubierta protectora de humedad, consistente en una placa de aluminio de 3/16" (anexo II) -- identificándose el sistema completo como sigue: 2 1/2" - 140 MC (sección 4.5).

## CAPITULO VI

### INSTALACION DE LOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO TERMICO

#### 6.1.- RECOMENDACIONES PARA INSTALACION DE AISLAMIENTOS TERMICOS

En la descripción del presente capítulo se pretende dar algunas recomendaciones de instalación de aislamientos térmicos, así como también su manejo, ya que teniendo en consideración estos términos se tendrá un rendimiento o eficiencia óptima del - aislante, ya sea en equipo, tubería o accesorios, dependiendo - del gradiente de temperatura.

#### 6.2.- ESPECIFICACIONES PARA INSTALACION DE UN AISLAMIENTO TERMICO.

Esta especificación dependerá si el servicio del aislamiento será sometido a alta o baja temperatura.

SERVICIOS CALIENTES	{	a) PRELIMINARES	{	1.- TUBERIA .
		b) INSTALACION DEL AISLANTE		2.- EQUIPO
		c) INSTALACION DEL ACABADO		1.- METALICO
				2.- NO METALICO

SERVICIOS FRIOS

- a) PRELIMINARES
- b) INSTALACION DEL AISLANTE { 1.- TUBERIA  
2.- EQUIPO
- c) INSTALACION DE BARRERA DE VAPORES
- d) INSTALACION DE ACABADO { 1.- METALICO  
2.- NO METALICO

6.2.1.- PRELIMINARES

Para cualquier servicio frío ó caliente es de vital importancia efectuar de manera adecuada los trabajos preliminares a la aplicación del aislamiento térmico.

Para tener una noción más clara del tratamiento previo a la instalación, se muestra en el siguiente cuadro sinóptico.

PRELIMINARES PARA  
SERVICIOS FRIOS O  
CALIENTES.

- 1.- Verificar que las tuberías o --  
equipos esten debidamente instala--  
dos y probados.
- 2.- Efectuar la limpieza de la su--  
perficie que va a ser aislada --  
ya sea mecánica (chorro de are--  
na, cepillo, etc), o química --  
(con solventes o removedores)
- 3.- Aplicar pintura anticorrosiva

## 6.2.2. INSTALACION DEL AISLAMIENTO TERMICO EN TUBERIAS

### A ALTAS TEMPERATURAS.

Una vez cubiertos los requisitos anteriores, el procedimiento es instalar el aislante adecuado de acuerdo con las necesidades siguientes:

a) Instalación del aislamiento en tubería horizontal.

Se procede juntar a presión las medias cañas sobre la tubería, cuatrapeando las uniones entre tramos de forma inclinada y se sujetan con flejes o cinchos de alambre con las puntas ocultas sobre el aislante, generalmente cada pieza mide 90 cm. de longitud lo cual implica poner solamente 2 flejes por pieza — fig. 6.1 . Con la tabla, seleccionar el tipo de material.

TIPO DE AISLANTE	TUBERIAS	RECIPIENTES	ACCESORIOS	PARTES
RIGIDOS	*	*	(1)	
FLEXIBLES	*	* (2)	* (3)	* (3)
CEMENTOS		(4)	*	*

- 1) Mandados a hacer sobre medida, ya no es muy comercial.
- 2) Cuando por relevado de esfuerzos no se pueden soldar pernos, es el mejor.
- 3) En codos y válvulas requiere de malla para refuerzo, flejes y cemento monolítico.

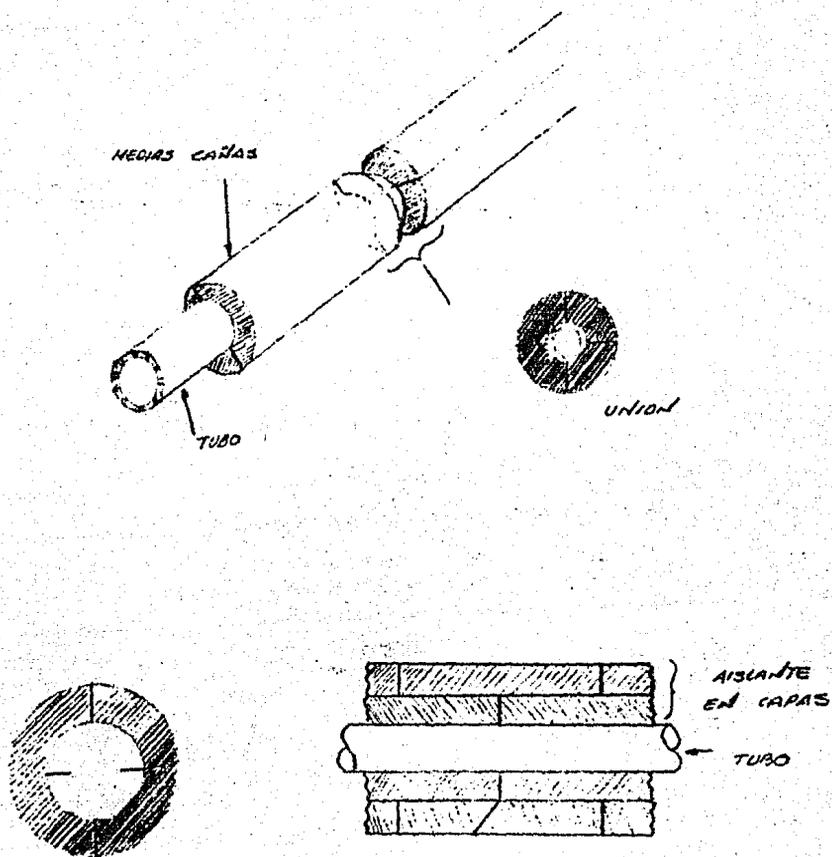


FIG. 6.1

CUADREO DE PIEZAS EN UNIONES A LO LARGO y EN MULTICAPAS PARA ROMPER CONTINUIDAD y EVITAR PUNTOS CALENTES

4) Usado en tapas y accesorios.

b) Aislamiento en tubería vertical.

Es necesario poner soportes en tubería vertical si las condiciones de la tubería lo permiten. Si tiene relevado de esfuerzos se sujetará con aprietes a la línea entre 4 y 6 metros para preformado, ver fig. 6.2., si no los hay puede ser punteado.

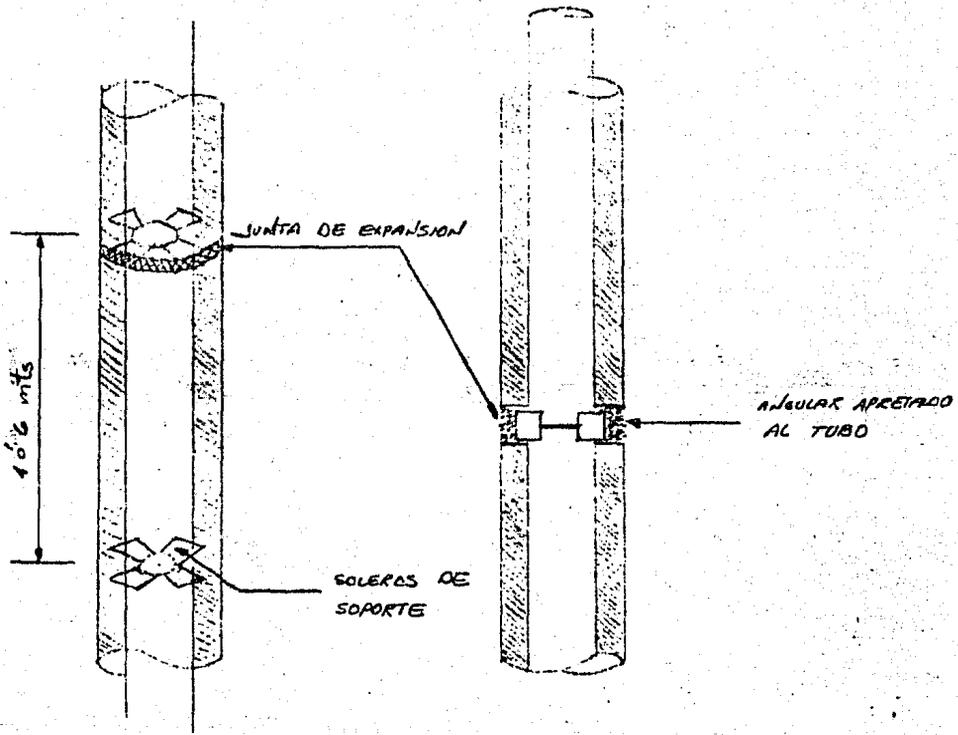
c) Aislamiento para venas de vapor.

Si las tuberías tienen venas de vapor, ya sea en forma recta o como serpentina, el diámetro interior del preformado se seleccionará considerando la vena; en un material semirígido se puede poner un relleno algodónado y con el apriete de los cinchos queda bien instalado, como se muestra en la fig. 6.3.

d) Aislamiento en juntas de expansión.

Las juntas de expansión se instalan de acuerdo al material de la tubería, es decir al calentarse se dilata ocasionando rompimiento del aislante, se evita este problema dejando una separación de 2" cada 2 ó 3 metros con temperaturas en la línea hasta 500° F, y cada 5 ó 6 metros hasta de 300° F.

Estas separaciones se rellenan con fibra algodónosa que servirá como muelle en las expansiones o contracciones de la tubería ver figuras 6.2 y 6.4 .

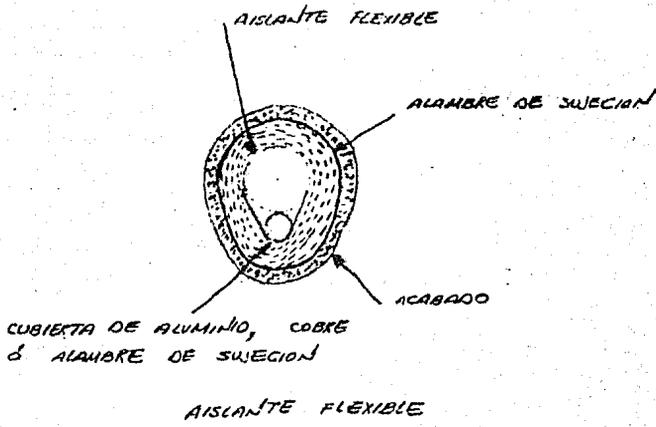


A) SOPORTES SOLDADOS AL TUBO

B) CUANDO POR RELEVADO DE ESFUERZOS O TEMPERATURA DE OPERACION NO SE PUEDE APLICAR SOLDADURA.

FIG. 6.2

SOPORTES DE AISLAMIENTO EN TUBERIA VERTICAL



AISLANTE FLEXIBLE

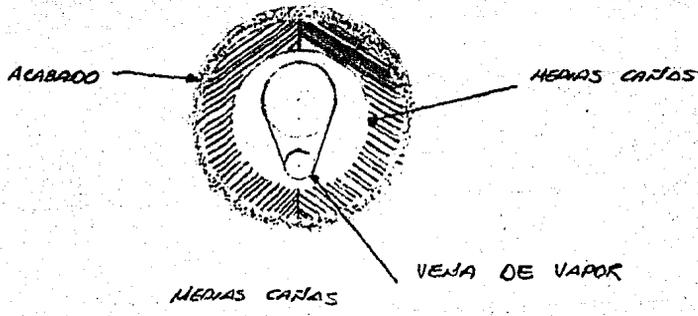
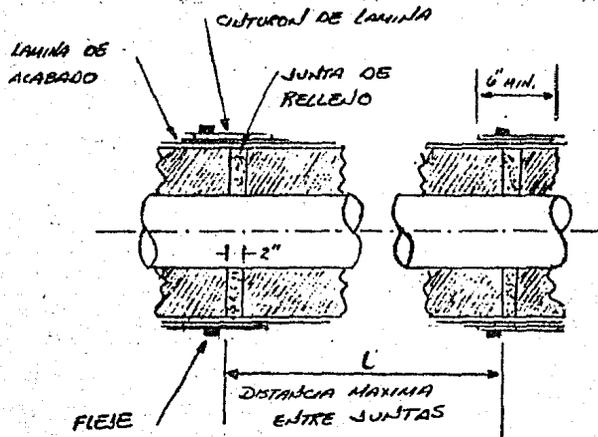


FIG. 6.3

AISLAMIENTO EN LINEAS CON VEJAS DE VAPOR



TEMP. OP. °C		L <sup>1</sup> EN METROS
65 A 150		12
151 A 205		8
206 A 315		5
316 A 425		3
426 A 540		2.5
541 A 650		2

FIG. 6.4

JUNTAS DE EXPANSION - CONTRACCION EN TUBERIA  
(ALTA TEMPERATURA)

e) Aislamiento en bridas.

Para el aislamiento de las bridas se pueden usar cementos aislantes como se muestra en las figuras 6.5. y 6.6, debiendo tener precaución de que el aislante de la tubería tenga un acabado independiente, con la finalidad de no deteriorarlo cuando se requiera quitar los espárragos, en este caso solo se tendrá que retirar el aislante de la brida.

f) Aislamiento de accesorios.

En aislamiento de codos y accesorios, existe la opción de usar colchoneta o fibra algodonosa armada con malla de gallinero y costuras de alambre de calibre # 16 .

Se puede usar también el preformado, seccionado en pequeños tramos para dar la forma de las partes aisladas ver fig. 6.7 .

Si se llega a aislar alguna línea con colchoneta ( $\varnothing$  12" ) - se tendrá que cortar en secciones de acuerdo a la ruta de tubería y efectuar costuras con alambre de calibre # 16 en todas las uniones (ancho de colchoneta 61 Cm) dos cinchos por tramo.

g) Aislamiento de equipo a alta temperatura.

SISTEMA FIJO

Se le llama así al sistema que lleva algún tipo de anclaje para el aislante, soldado a la superficie del equipo por aislar

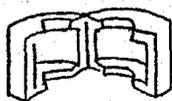
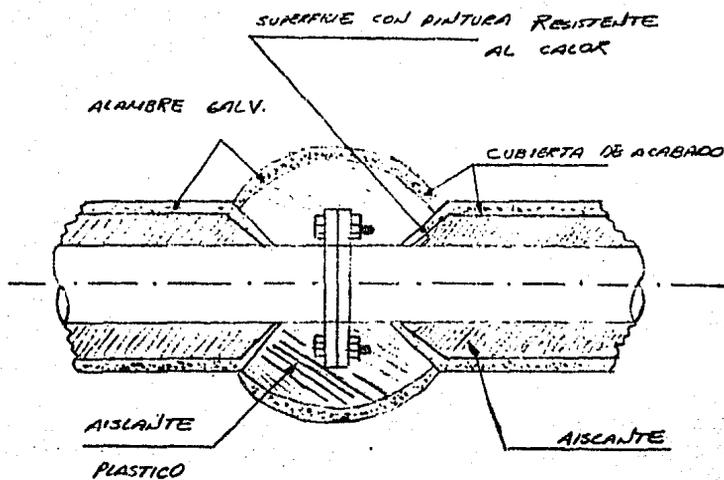


FIG. 65

AISLAMIENTO EN BRIDAS CON AISLANTE PLASTICO

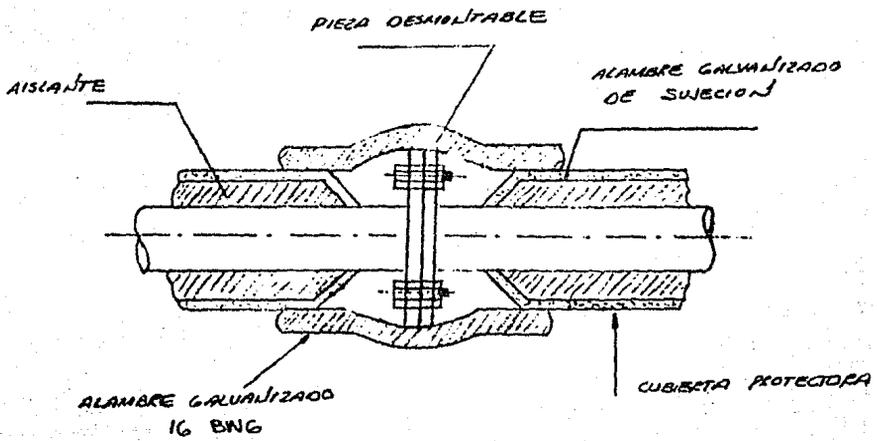


FIG. 6.6

AISLAMIENTO DE UNA BRIDA CON CUBIERTA DESMONTABLE

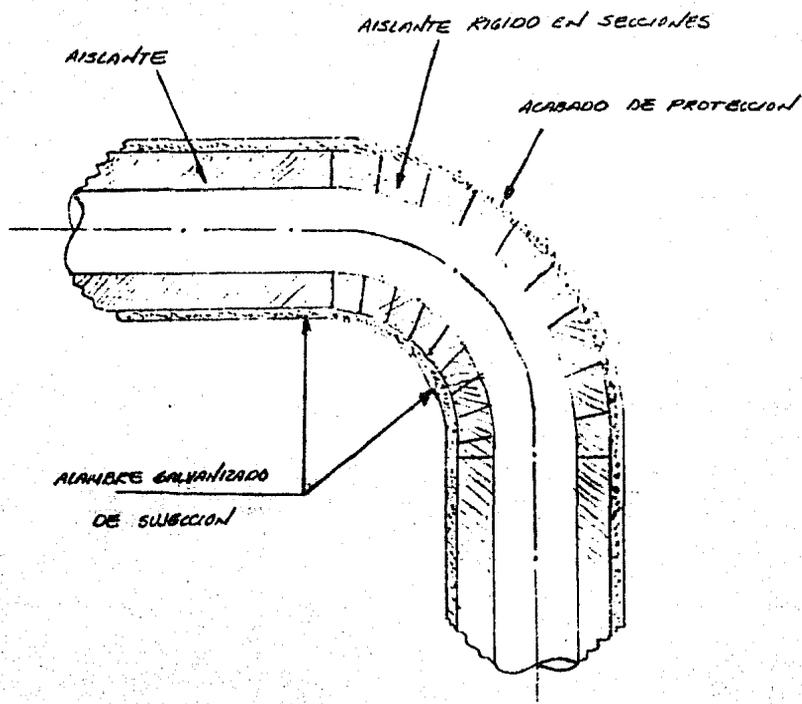


FIG. 6.7

AISLAMIENTO RIGIDO DE Codos EN TUBERIA

el cual puede ser cualquiera de los mostrados en la fig. 6.8 . La recomendación es soldar 9 anclas/M<sup>2</sup>, sobre las cuales se encaja el aislante, ya sea en forma de placa o colchoneta y se engrapen las puntas presionando el aislante, fig. 6.9; también se pueden alambrear las puntas de manera que el aislante quede fuertemente sujeto. Una buena instalación de placas requiere que sus bordes estén achaflanados con objeto de evitar posibles puntos calientes en las uniones; en colchonetas se debe realizar un cosido con alambre en todas las uniones.

#### CABEZAS DE RECIPIENTES

Se puede seguir el mismo procedimiento o bien efectuar la sujeción como se muestra en la fig. 6.10, es decir, soldando tuercas sin rosca a la cabeza del recipiente a las cuales se les coloca alambre de amarre, se inserta el aislante y se fleja sobre de él, de manera que las puntas del alambre puedan amarrarse al fleje, quedando de esta manera el sistema firmemente instalado.

Este tipo de instalación se puede efectuar en equipo que no opere con temperaturas superiores a 568° F o en el caso de que éstos lleven relevado de esfuerzos, es necesario recurrir al sistema de instalación suspendida.

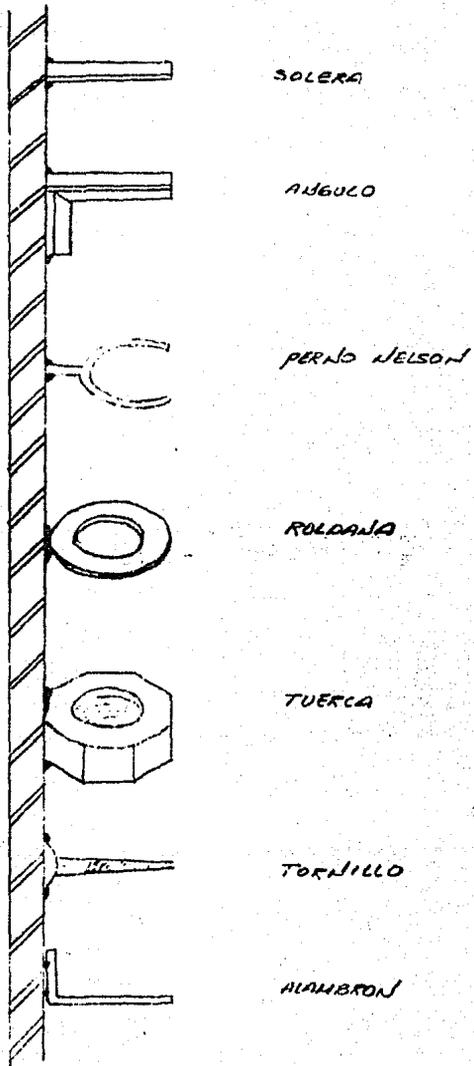


FIG. 6.8

TIPOS DE SUJERTERIA PARA FIJAR AL ASBESTO

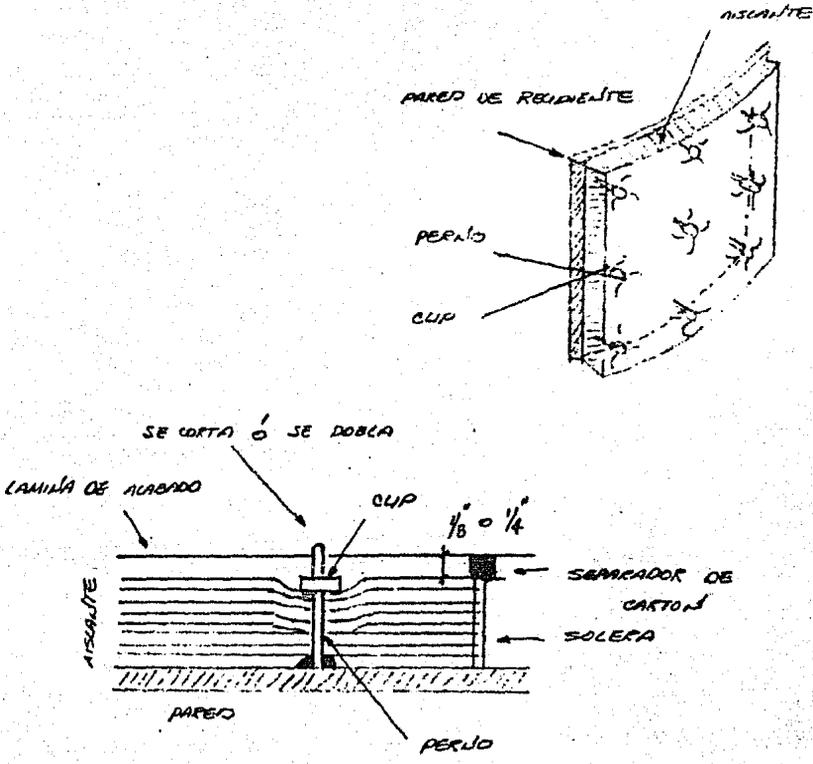


FIG. 6.9

SUSPENSION FIJA DE ASBESTO EN RECIPIENTES

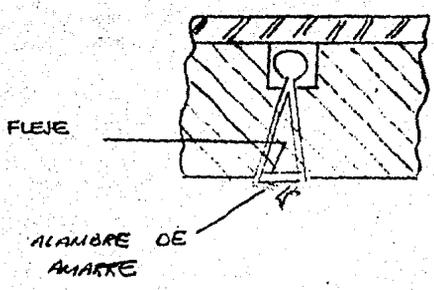
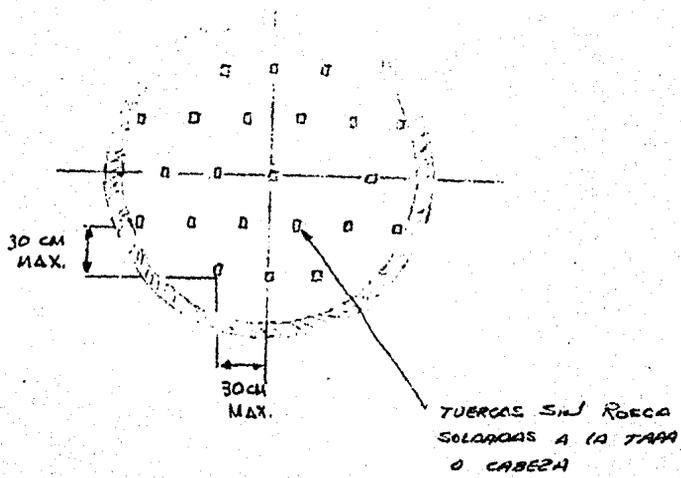


FIG. 6.10

SOPORTE PARA EL AISLAMIENTO PARA CABEZAS DE  
 RECUBIERTOS VERTICALES Y HORIZONTALES  
 (ALTA TEMPERATURA)

Una precaución importante es aislar las puntas del anclaje, ya que son importantes puntos de fuga de calor, esto se consigue con un masticado aplicado sobre los "botones del colchón" -- hasta conseguir un espesor uniforme; o bien, usando un cartón de asbesto que separe estas puntas del acabado.

#### SISTEMA SUSPENDIDO

Es también denominado sistema flotante, debido a que no -- lleva ningún tipo de anclaje sobre la superficie del equipo por aislar. Cuando se ha seleccionado este tipo de instalación es -- conveniente observar las siguientes recomendaciones que se ilustran en la fig. 6.11 .

- 1) Con alambón y una cámara de bicicleta se improvisa un aro -- de diámetro un poco menor al del recipiente por aislar.
- 2) Empezando por la parte superior se coloca el aro en el recipiente y estirando la cámara se coloca la primera placa de aislante, efectuando la misma operación hasta cubrir el desarrollo del recipiente (cuando es fibra de vidrio la unión se hace presionando una placa con otra), cuando es otro aislante se precisa un material adherente para evitar "juntas calientes"; con -- flejes o cinchos se sujeta fuertemente el aislante al recipiente permitiendo desplazar el aro para aislar la siguiente sección; los flejes se colocan mínimo uno cada pie de longitud.

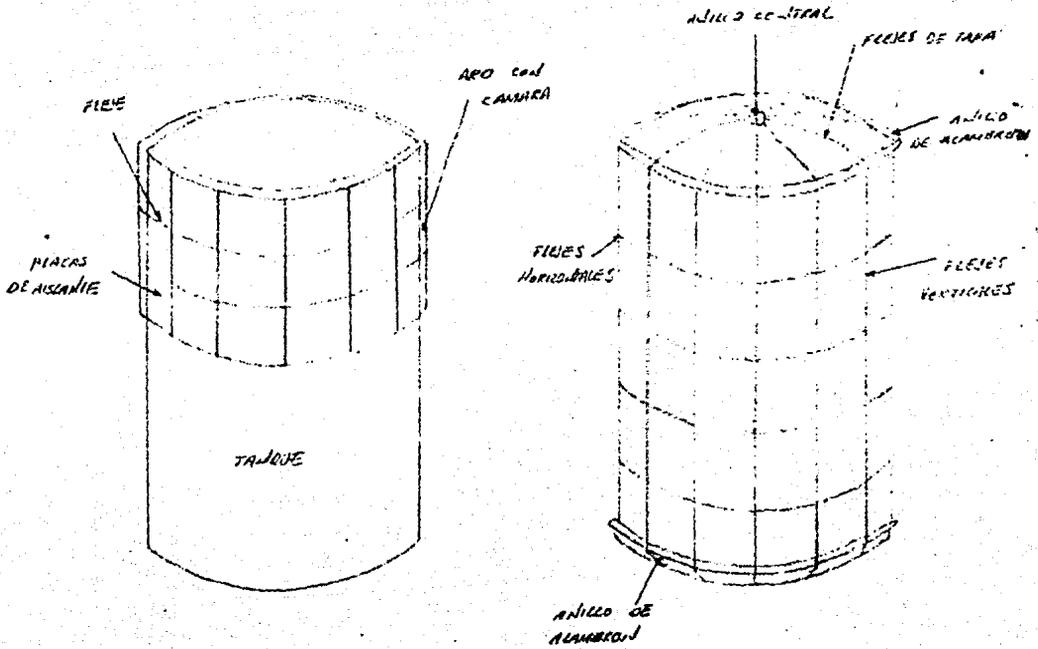


FIG. 6.11

SISTEMA FLOTANTE (JAUJA DE PERICO)  
 CUIDADO POR RELEVADO DE ESFUERZOS O TEMPERATURA NO SE  
 PUEDE APLICAR SOLDADURA AL RECIPIENTE.

3) Para el aislamiento de las tapas es necesario instalar en cada extremo del recipiente en la unión tapa - cuerpo, unos anillos de alambón o flejes, de manera que sobre de ellos se puedan tensar los que sujetan las placas de aislante a la tapa, finalmente se ponen flejes entre los anillos de alambón con el objeto de darle un armado total a la instalación, a esto se le conoce como "jaula de perico" fig. 6.12 .

Tanto en tuberías como en recipientes todos los soportes y patas son puntas de fuga de calor por lo que es necesario aislarlos, para tuberías, es normal aislar 2" a partir de la superficie del aislamiento (para altas temperaturas) y en recipientes 2, 3 o más pulgadas dependiendo de la temperatura de operación.

Las juntas de expansión requeridas en recipientes se instalarán de acuerdo a lo mostrado en la fig. 6.13 ; el remate del sistema en boquillas se puede aplicar de acuerdo a lo mostrado en la fig. 6.14 .

### 6.2.3.- INSTALACION DE AISLAMIENTO EN EQUIPO SUJETO

#### A BAJA TEMPERATURA.

Los lineamientos para instalación del sistema de aislamiento térmico sujetos a bajas temperaturas son prácticamente los mismos con algunas excepciones.

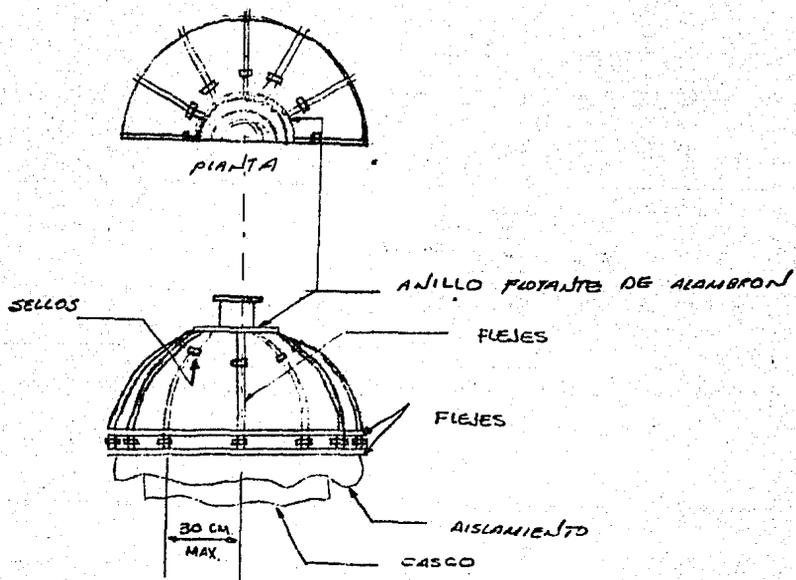


FIG. 6.12

AISLAMIENTO EN TAPAS DE RECIPIENTES

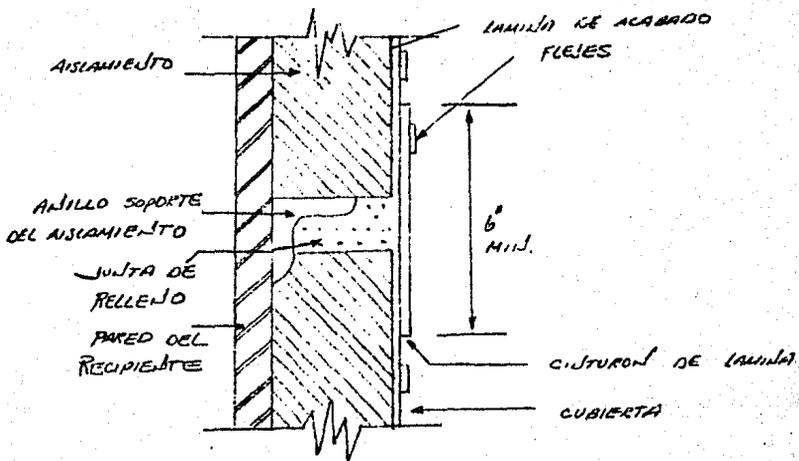


FIG. 6.13

JUNTAS DE EXPANSION - CONTRACCION EN AISLAMIENTO  
 DE RECIPIENTES  
 (ALTA TEMPERATURA)

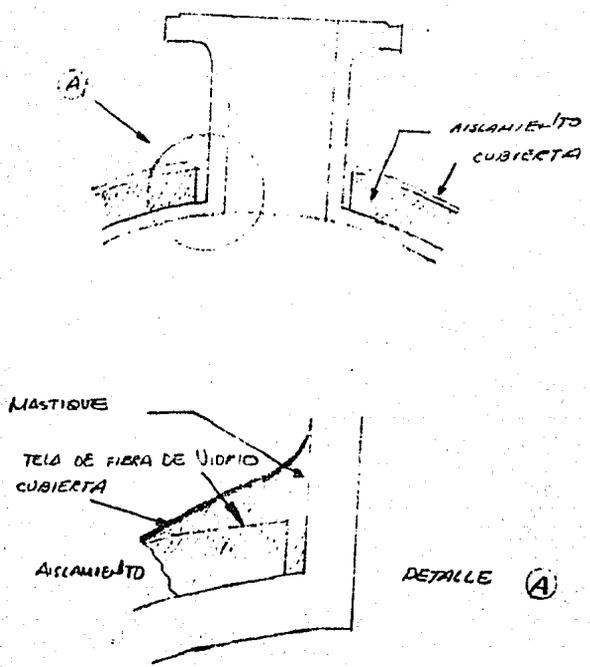


FIG. 6.14

SELLADO DE CUBIERTAS DE AISLAMIENTO EN BOQUILLAS.

El sistema de pernos no es aconsejable para este caso, y -  
si el sistema flotante, las recomendaciones aceptables son: la  
de no abandonar de un día para otro un aislamiento expuesto al  
medio ambiente, lo que se consigue instalando la barrera de va-  
por simultáneamente y sellando la parte que no se unió con un -  
tramo de dicha barrera. Es de suma importancia determinar el es-  
pesor del aislante, por que se toma en cuenta la temperatura de  
superficie exterior y la humedad del medio ambiente (por medio  
de la temperatura de rocío) esto con el fin de evitar condensa-  
ciones de la humedad del ambiente sobre la superficie, que ori-  
ginaría problemas de corrosión o inundaciones indeseables en el  
aislante. Existen otros aislantes para servicios sujetos a ba--  
jas temperaturas tales como el poliestireno o poliuretano en --  
los cuales el espumado puede hacerse en campo por medio de es--  
preado directo sobre la superficie por aislar.

#### BARRERA DE VAPOR

Es una película que se coloca sobre el aislante térmico a  
baja temperatura y debe tener dos características básicas:

a) PERMEABILIDAD.- De 0.2 Perms<sup>(1)</sup> máximo a 0.001 Perms.

(1) 1 Perm. = un grano de vapor de agua que pasa a través de -  
1 pie<sup>2</sup>/Hr de operación y con una diferencia de presión de 1" -  
Hg (grano de agua = 1/7000 lb) .

## b) HERMETISMO O CONTINUIDAD

Durante la selección tomar en cuenta estas características.

Existen barreras de vapor prefabricadas (Pyrovit para tuberías) y elaboradas en el campo a base de mastic.

El pyrovit está formado por papel, asfalto y limadura de aluminio, se debe tener cuidado de sellar las uniones con mastic para dar el hermetismo requerido.

Cuando la barrera de vapor se aplica con mastic en el campo --- (emulsión asfalto-aromática) ésta se puede aplicar con llana o por aspersión de acuerdo a la fig. 6.15 .

Una mala aplicación que deje un orificio es suficiente para destruir el aislante, ya que por él penetrará la humedad, --- ocasionando condensaciones internas y congelamiento si el servicio es criogénico.

Si el agua ocupa las cavidades del poro del aislante, modificará su factor K perdiendo sus características aislantes.

En juntas de expansión-contracción se procederá de acuerdo a las figuras 6.16 y 6.17 .

Las figuras de la 6.18 a la 6.27 muestran detalles de instalación de la barrera de vapor, señalando los problemas que puedan ocurrir por mala aplicación, resaltando la importancia de su ---

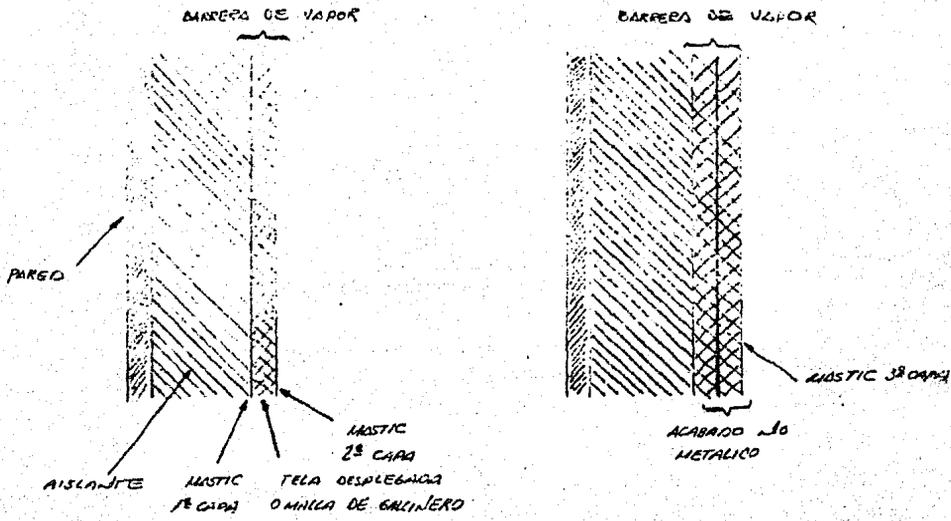


FIG. 6.15

BARRETO DE VAPOR APLICADA EN CALIPO

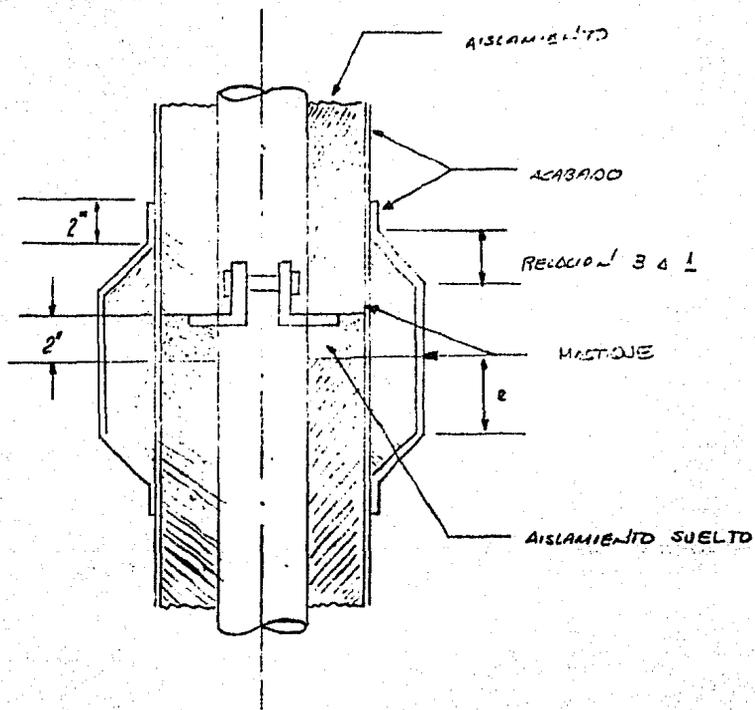


FIG. 6.16

SOPORTES DE AISLAMIENTO EN TUBERIA VERTICAL  
 BAJA TEMPERATURA

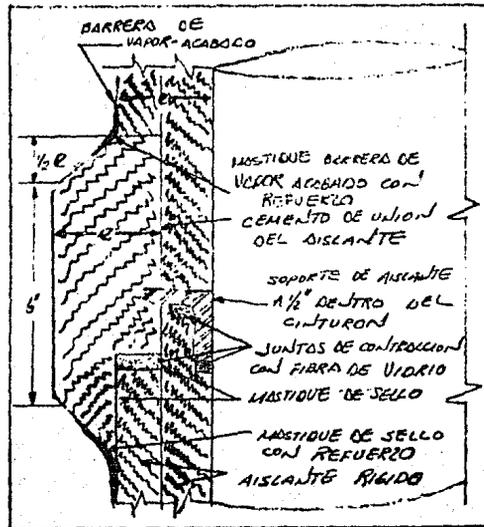


FIG. 6.17

JUNTA DE CONTRACCION EN RECIENTES  
A BAJA TEMPERATURA

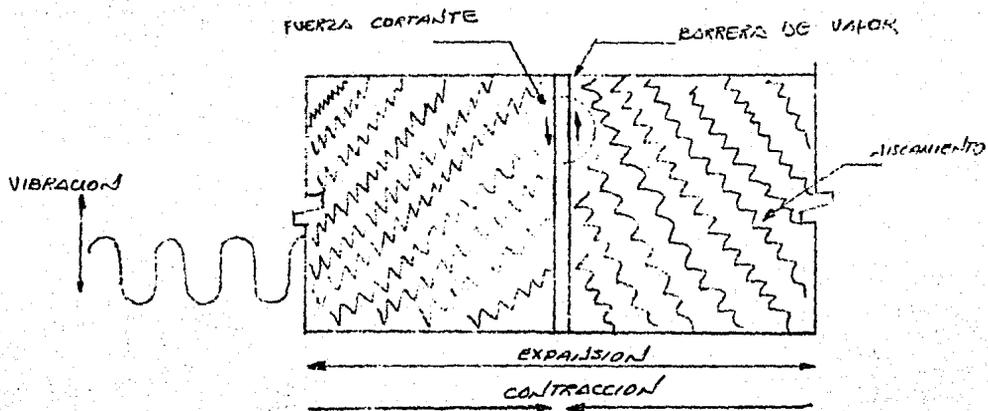


FIG. 6.18

ESFUERZOS MECANICOS EN LA BARRERA  
PROVENIENTES DEL INTERIOR

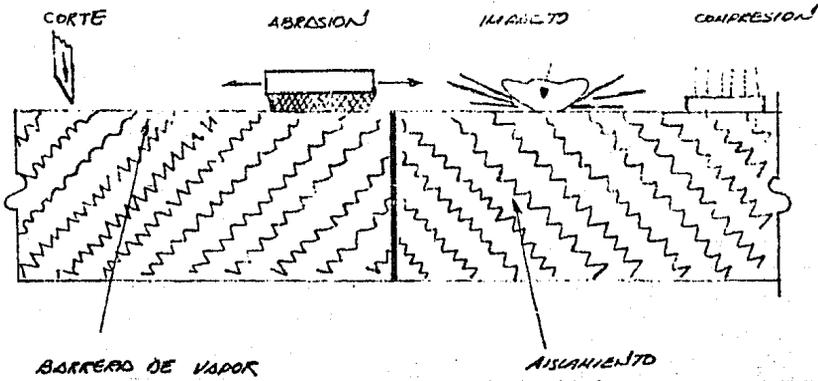


FIG. 6.19

ESFUERROS MECANICOS EN LA BARRERA  
 PROVENIENTES DEL EXTERIOR

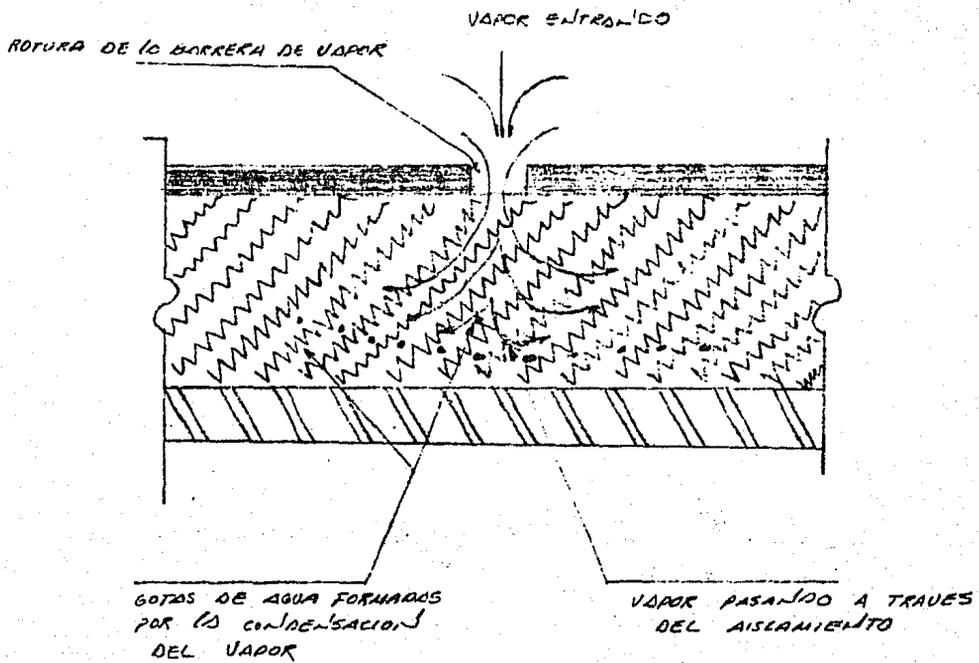


FIG. 6.20

PASO DE LA HUMEDAD EN FORMA DE VAPOR A TRAVES DEL AISLAMIENTO POR ROTURA O FALLA DE LA BARRERA DE VAPOR

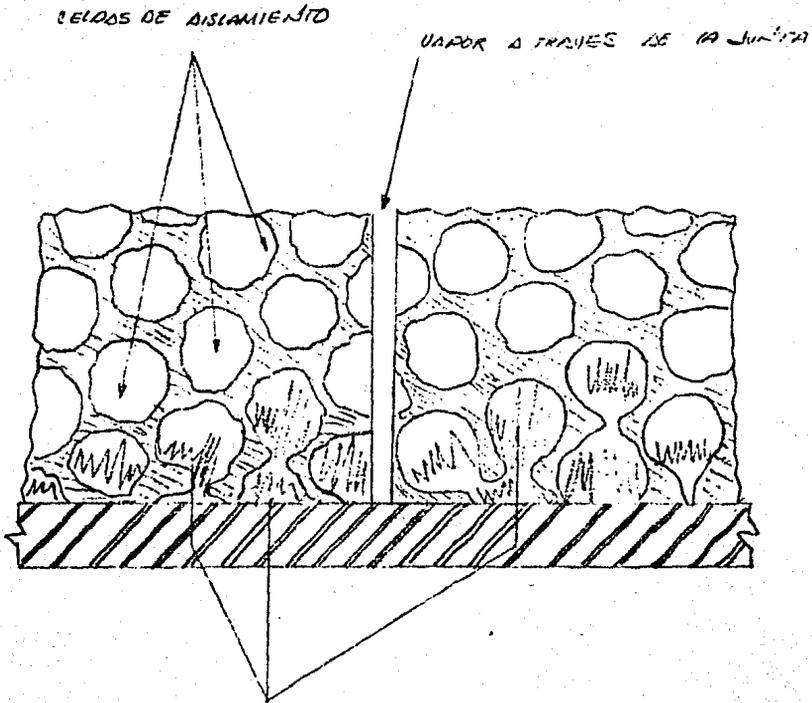


FIG. 6.21

SECCION MICROSCOPICA DE UN AISLAMIENTO RIGIDO  
INSTALADO EN UN TUBO O EN UN EQUIPO

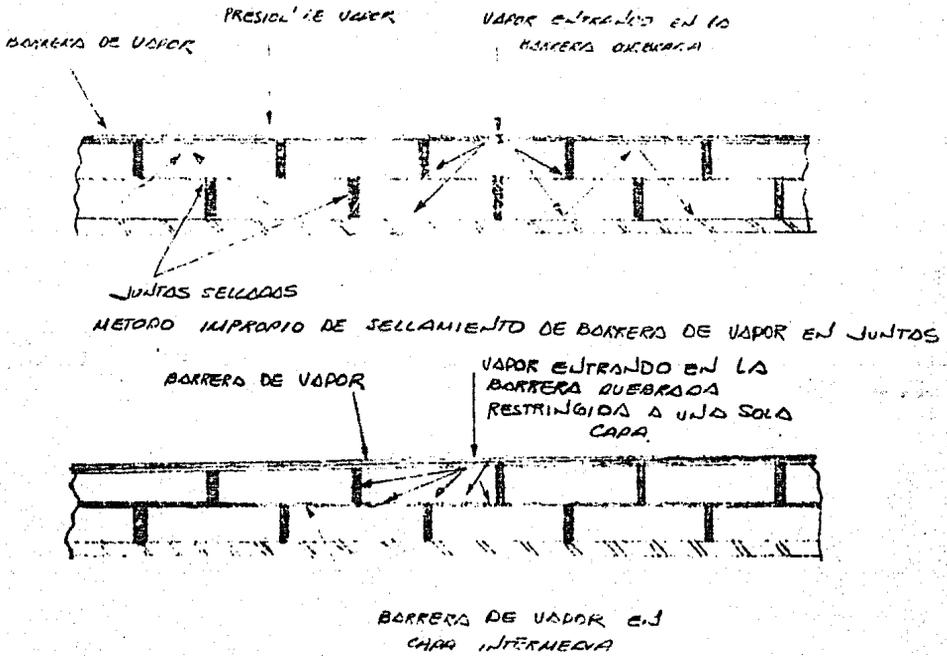


FIG. 6.22

METODO PROPIO DE SELLAMIENTO DE BARRERAS DE VAPOR EN JUNTAS.

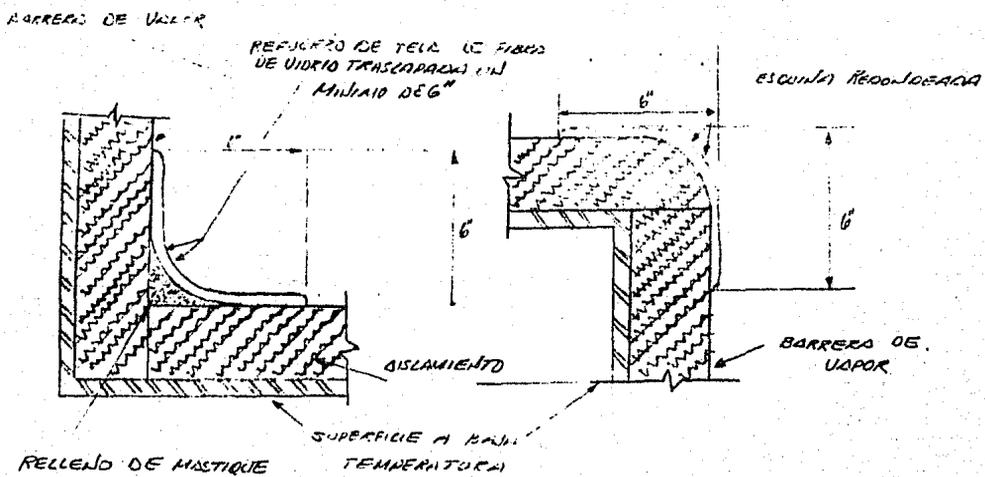
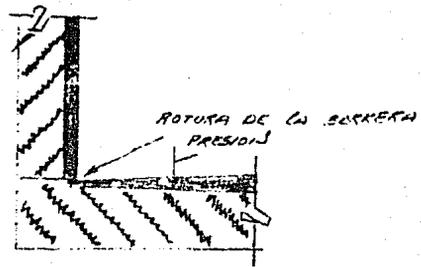
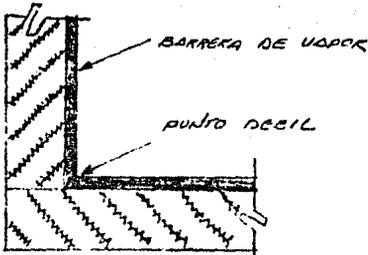
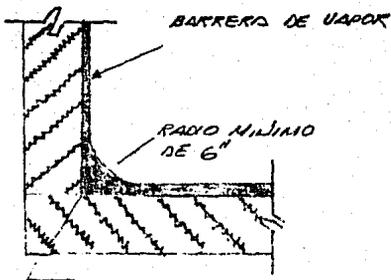


FIG. 6.23

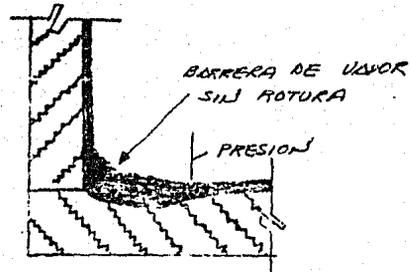
AISLAMIENTO DE ESCUINAS CON BARRERA DE VAPOR REFORZADA



METODO INCORRECTO DE AISLAR ESQUINAS INTERNAS



RELLENO LE MISTIQUE  
BARRERA DE VAPOR



METODO CORRECTO DE AISLAR ESQUINAS INTERNAS  
APLICACION DE BARRERAS DE VAPOR EN ESQUINAS  
INTERNAS

FIG. 6.24

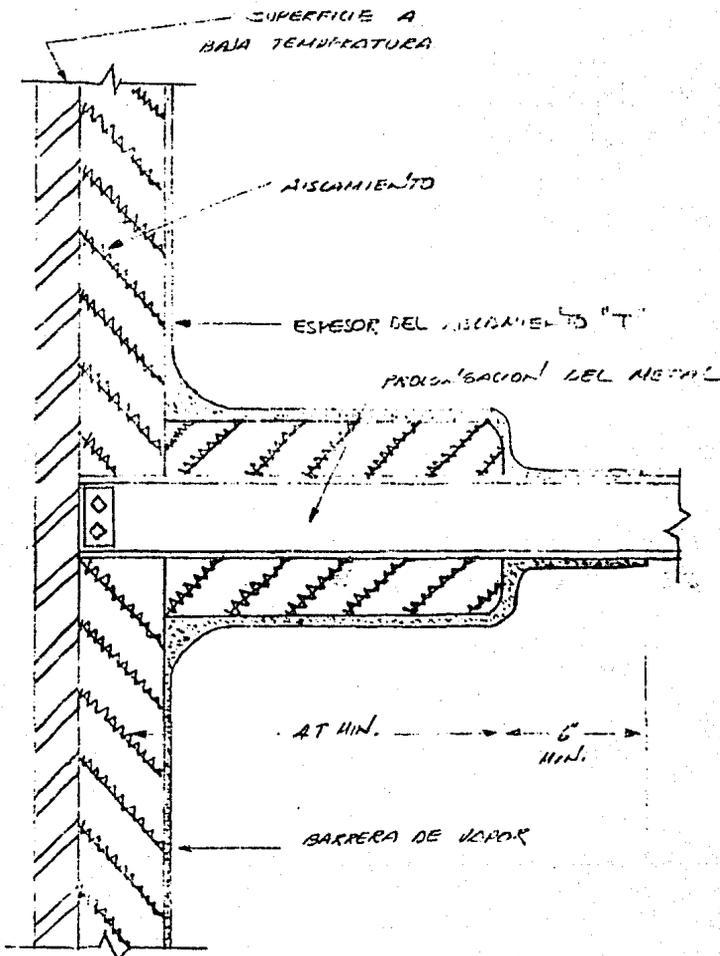


FIG. 6.25

METODO CORRECTO DE AISLAR LAS PROYECCIONES METALICAS DE SUPERFICIES A BAJA TEMPERATURA

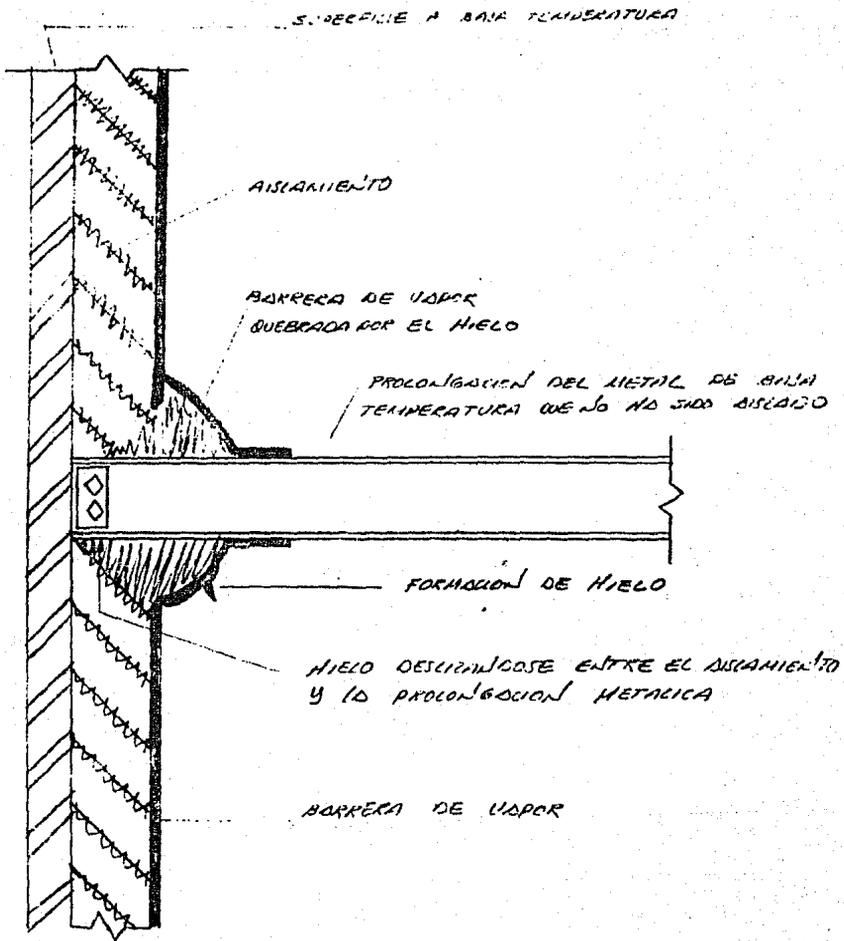


FIG. 6.26

FORMACION DE HIELO EN PROLONGACION METALICA NO AISLADA

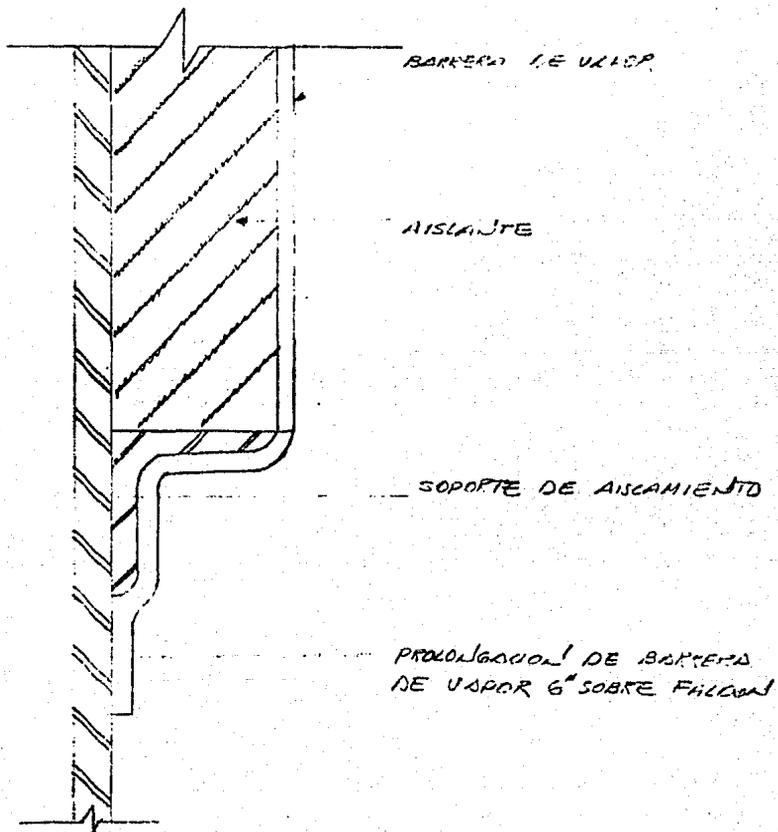


FIG. 6.27

AISLAMIENTO EN FALDAS  
 (BANK TERMINATION)

función.

#### 6.2.4.- ACABADOS

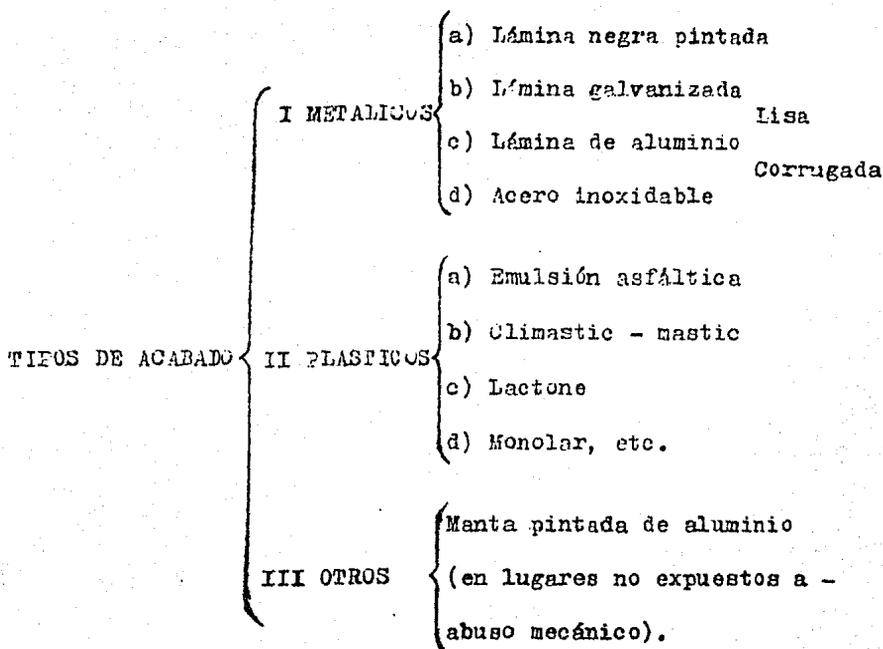
La función básica de los acabados es la de dar protección al aislante contra una, varias o el total de las siguientes razones:

- 1.- Intemperie (nieve, lluvia, humedad, viento)
- 2.- Abuso mecánico y abrasión
- 3.- Paso de vapor.
- 4.- Radiación solar, ultravioleta e infrarroja
- 5.- Gases, humos y sustancias químicas
- 6.- Fuego .

Es importante considerar el tipo de protección que requiere el aislante y el tipo de ataque que puede recibir para poder seleccionar el acabado adecuado.

Los acabados se pueden clasificar en dos grandes grupos: metálicos y no metálicos, presentando en cada uno las opciones de protección enlistadas y requiriendo en algunos casos la combinación de los dos tipos o el auxilio de los no metálicos cuando se seleccionó el acabado metálico.

El cuadro sinóptico siguiente muestra los tipos de acabado que se usan, en el apéndice se tiene mayor información.



## 1. ACABADOS METALICOS

Los acabados metálicos para altas y bajas temperaturas cubren básicamente los aspectos de protección de intemperie, abuso mecánico y contra fuego, además de darle una apariencia agradable al área de trabajo no conseguida por los otros acabados. Los acabados metálicos mostrados en el cuadro sinóptico tienen características particulares que se mencionan a continuación:

a) Lámina negra.

Es el acabado metálico más barato, de menor vista y de man

tenimiento caro, de no pintarse en períodos cortos su oxidación es inminente y por consiguiente sus funciones protectoras se pierden.

b) Lámina de aluminio.

Es el acabado metálico más usado en la industria, debido a que es resistente a la humedad, ligero, manejable, de buenas cualidades mecánicas a espesores adecuados, reflectivo y de excelente apariencia.

No es adecuado en ambientes alcalinos, ni da protección contra el fuego debido a que su temperatura de ablandamiento es de ---  
1200° F .

c) Lámina galvanizada.

Es de magníficas características mecánicas debido a su densidad tres veces mayor a la del aluminio, su apariencia es buena aunque inferior, se recomienda en partes expuestas a fuerte abuso mecánico y en ambientes secos ya que se oxida fácilmente en presencia de humedad.

d) Lámina de acero inoxidable.

Sería la mejor opción de no ser por su alto costo.  
Es inerte a casi todas las atmósferas (corrosivas, desolventes, etc.), da protección contra el fuego.

Funde a 2600° F, tiene excelente resistencia mecánica, es de apariencia brillante insuperable.

Una precaución importante es no usarse en ambientes clorados ya que los iones cloro ocasionan esfuerzos de corrosión por coartaduras que hacen inoperante al acabado.

En los acabados metálicos existe la posibilidad de formación de una celda electrolítica ya sea porque el aislante tenga algún aglutinante que se disuelva con la humedad (silicato de sodio por ejemplo) y origine un flujo de corriente entre el metal de acabado y el metal de la pared aislada, originando una reacción electroquímica de corrosión; o bien el caso en donde el metal de refuerzo de un aislante flexible esté en contacto con la lámina de acabado.

Cuando se presente el primer caso es necesario dar una protección adicional aplicando una película de polietileno a la lámina o bien, aplicando sobre el aislamiento un mastique de 1/8" de película seca que impida el paso de la humedad y el flujo de corriente, a esta se le suele llamar barrera de humedad. También es factible resolver el problema aplicando mastique en el traslape de la lámina de acabado y dándole 2 1/2" de traslape, o bien efectuando un machimbrado de la lámina y sellando con masti

que la barrera de humedad.

Una precaución adicional sería efectuar todos los traslapes en sentido inverso a los vientos dominantes y en tubería horizontal a una inclinación mínima.

En el 2<sup>o</sup> caso, es conveniente instalar un separador dieléctrico entre metales que puede ser papel asfaltado o permafelt.

Es importante que las pijas como los flejes sean del mismo material que el de la lámina para que no ocurra una corrosión galvánica, sin embargo es conveniente en la mayoría de los casos utilizar elementos de sujeción de inoxidable para no tener la corrosión y tener mejor resistencia mecánica.

A bajas temperaturas debido a la necesidad de aplicar barrera de vapor ya que no se puede usar anclas de soporte para el aislante no se usaran pijas o remaches de sujeción, toda la sujeción del acabado deberá ser con flejes, de acero inoxidable y a una separación de 6".

## 2.- ACABADOS NO METÁLICOS PARA AISLANTES A ALTAS TEMPERATURAS

El cambio de material de acabado metálico por uno no metálico debe ser de acuerdo al tamaño, forma o localización de la superficie aislada a proteger.

La facilidad de instalación, aún en superficies irregula--

res y sus características protectoras los hacen muy útiles.

Se pueden aplicar con brocha, guante y llana o bien por medio de esparado; por lo general siempre se requiere de una malla de refuerzo que puede ser tela de gallinero, lona o tela de fibra de vidrio.

A los acabados no metálicos se les puede llamar barrera de humedad, membrana a prueba de agua o barrera a la intemperie, - siendo en servicios a alta temperatura su función principal, impedir que el aislante sufra daños por lo siguiente: lluvia, nieve y alta humedad del medio ambiente; sin embargo, tiene ventajas adicionales como el ser películas flexibles que también aportan protección mecánica, ataque químico y protección contra fuego, así como también pueden ofrecer protección contra la corrosión y radiaciones infrarrojas y ultravioleta, la fig. 6.28 muestra la aplicación.

La característica de barrera de humedad o de intemperie está dada por su permeabilidad de 3 perms promedio, es decir, es una barrera impermeable que impide la penetración del agua. Al encontrarse en operación el equipo, permitirá eliminar el vapor de agua que pudo haber quedado en el aislante durante su instalación.

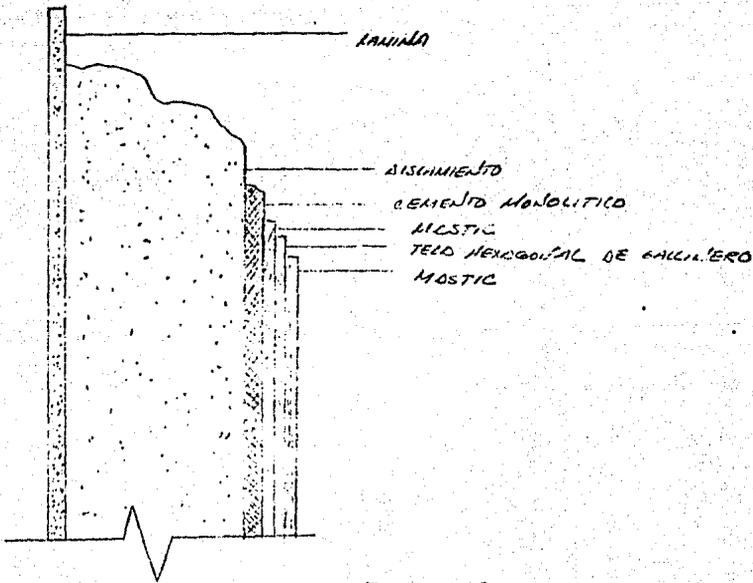
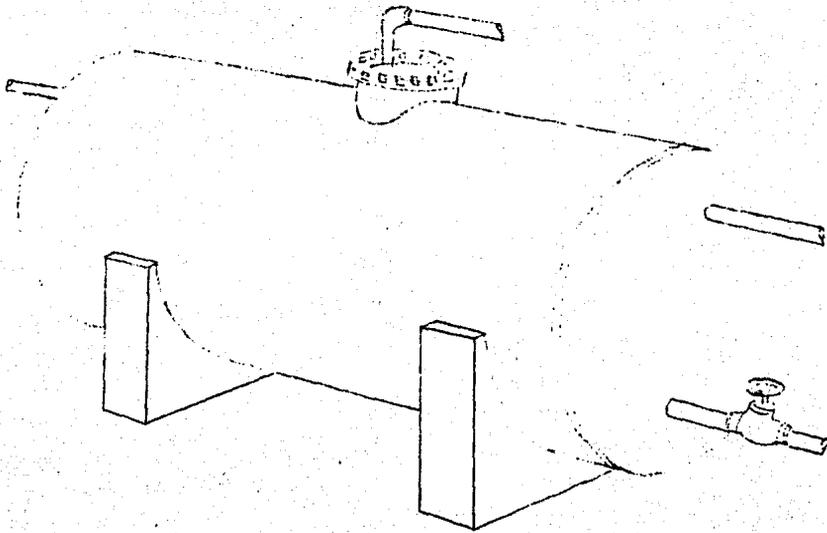


FIG. 6.28

ALTA TEMPERATURA SERVIRIA A LA INTemperie

En la fig. 6.29 muestra el sentido de la presión de vapor sobre el acabado a diferentes condiciones.

Es importante mencionar que los mastiques de acabado para alta temperatura son emulsiones asfálticas, poliméricas, o elastoméricas en base acuosa, razón por la cual pueden ser considerados como no combustibles y no tóxicos.

### 3.- ACABADOS NO METALICOS PARA BAJAS TEMPERATURAS

Ya que se ha seleccionado el tipo de acabado no metálico, este puede ser o no barrera de vapor.

En la fig. 6.15 se muestra la instalación del acabado sobre la barrera de vapor con un refuerzo adicional, que es un caso similar al de la fig. 6.30 .

Con servicios duales de temperatura se seleccionará cuidadosamente el tipo de mastique para acabado, si por ejemplo, la temperatura es menor a  $-50^{\circ}$  F o mayor de  $100^{\circ}$  F, el material asfáltico se endurece demasiado y se vuelve quebradizo, cuando baja la temperatura, y cuando esta aumenta pierde su consistencia compacta, por lo que no es recomendable .

Si se aplica sobre la barrera de vapor un acabado del mismo tipo de mastique habrá que considerar su punto de flameo y su toxicidad ya que generalmente su base es solvente por lo tan

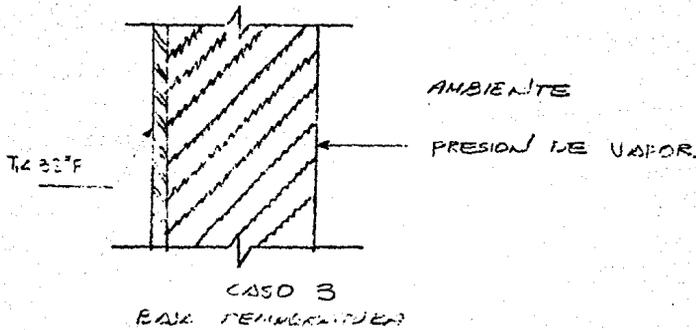
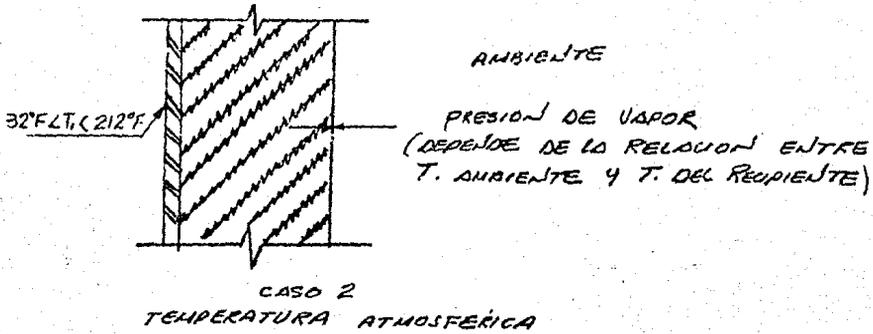
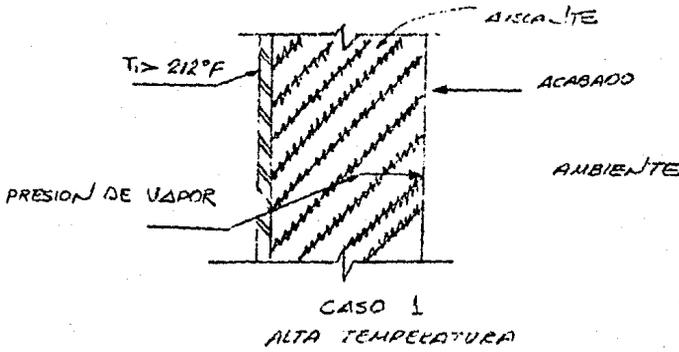


FIG. 6.29

EFECTO DE LA HUMEDAD A DIFERENTES NIVELES DE TEMPERATURA

BAJA TEMPERATURA  
SERVICIO A LA INTemperIE

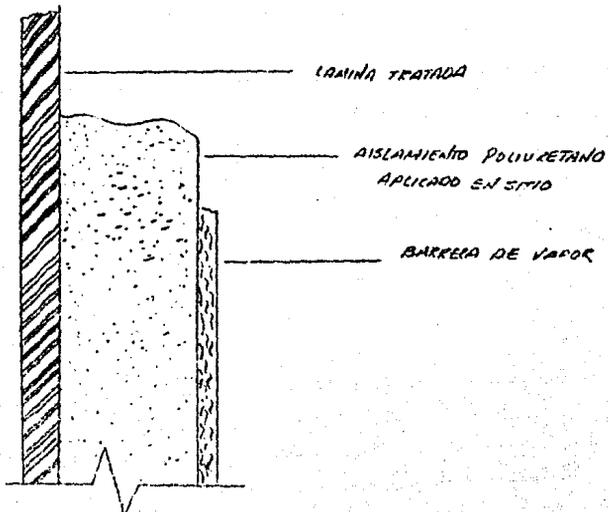
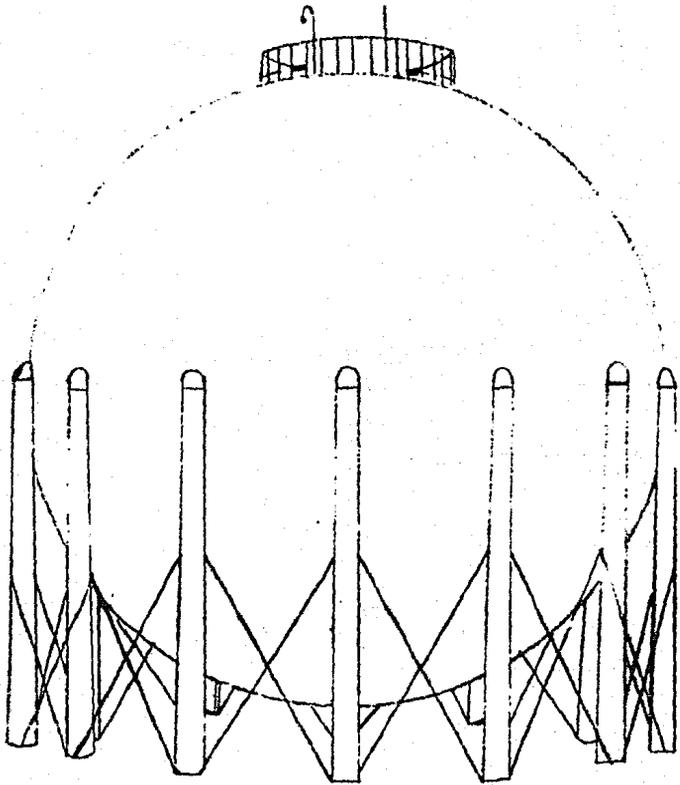


FIG. 6.30

to puede ser peligroso; por consiguiente los mastiques de barra de intemperie son más recomendables en estos casos.

#### 6.2.5.- PRUEBAS DE CAVIDAD

El código ASTM indica las pruebas a que deberán ser sometidos los aislamientos de acuerdo a su clasificación, a continuación se describen pruebas factibles de realizarse en un laboratorio improvisado.

##### a) MODULO DE RUPTURA PARA PLACAS

Es la presión que soporta en el centro antes de romperse una placa de 1" de espesor y superficie de 12" x 6" con soportes a 1" de cada extremo, ver fig. 6.31 .

##### b) MODULO DE COMPRESION PARA PLACAS

Es la presión distribuida uniformemente en una placa de 6" x 6" para comprimir el 5 % del espesor de la placa.

Esta prueba es de suma importancia cuando el material se va a proponer como respaldo interno en hornos .

La importancia de este módulo lo podemos visualizar con el siguiente ejemplo.

La temperatura interior de un horno es de 1500° C por lo que es necesario usar refractario , ladrillo aislante y por último el silicato de calcio, cuando la temperatura es inferior a 1000° C

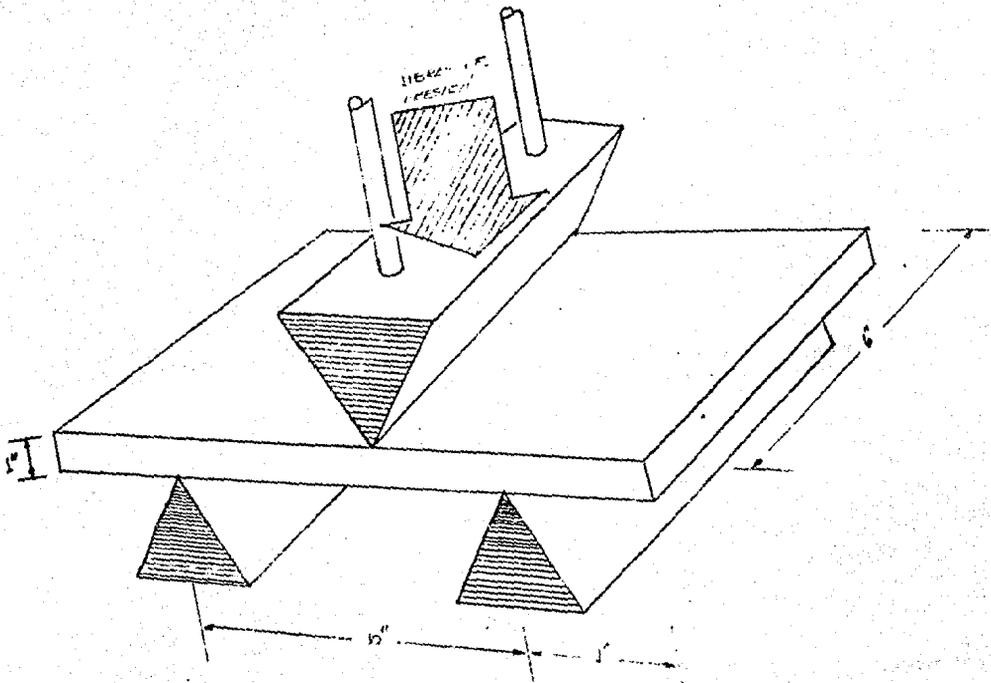


FIG. 631

MODULO DE RUTURA PARA PLACAS

se puede comprender lo importante que es el módulo de compresión ya que el aislante tiene que soportar el peso del refractario - y el ladrillo además de su expansión por el calor; si el aislante llega a fallar en este aspecto se cae. Es importante tener en consideración que el material aislante encoge con la temperatura.

#### 6.2.6.- RECOMENDACIONES DE MANEJO

Aquí se señala la importancia del manejo y almacenamiento de los materiales aislantes ya que de acuerdo con sus características, pueden dañarse o hecharse a perder en el trayecto comprendido entre la compra y la instalación.

Los materiales aislantes más delicados son los granulares y los fibrosos.

##### 1.- GRANULARES

Estos materiales porosos y rígidos son muy frágiles debido a la baja densidad requerida, para satisfacer la baja conductividad térmica, deben empacarse debidamente en cajas de cartón - de doble enflautado y con letreros alusivos, no es recomendable estibar más de dos cajas en posición vertical, ni encimar objetos pesados, sujetarse y evitar posibles golpes.

Deben protegerse contra humedad y lluvia, tanto en el manejo co

mo en almacenamiento.

## 2.- FIBROSOS

Debido a las características de estos materiales de ser soportes mecánicos de celdas de aire, empleando aglutinantes para su conformado, no tendrán muchos problemas de manejo en cuanto a posibles fracturas, aún en la presentación de preformados o - placas rígidas; sin embargo, se deberá tener mucho cuidado en la protección contra la intemperie, ya que la humedad modifica el - coeficiente K, por consiguiente pierde sus cualidades aislantes apelmaza el material y lo destruye si se llega a mojar.

Esta protección debe efectuarse cubriendo el material con polietileno, almacenándolo en áreas cubiertas y sobre bases de madera que mantengan al material sin contacto con el piso, nunca se debe dejar alguna instalación sin terminar y en caso de - hacerlo, se deberá cubrir garantizando su protección a la intem - perie.

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES

1.- El presente trabajo es una recopilación referente a los aspectos importantes comprendidos en el estudio del proceso de -- transferencia de calor por conducción, y puede ser adoptado como una guía sistemática para la aplicación en necesidades de selección de cualquier sistema de aislamiento. Incluye el desarrollo matemático de algunas geometrías por aislar y los criterios de transferencia de calor (capítulo I y II), la clasificación de los sistemas de aislamiento (capítulo III), las consideraciones necesarias para la selección de un aislante (capítulo IV), la determinación del espesor económico (capítulo V) y los criterios y recomendaciones para la instalación de los diferentes -- sistemas de aislamiento.

2.- La información se presenta en forma tal que este trabajo -- sirva como manual de fácil uso para quien requiera un procedimiento de cálculo, selección e instalación de sistemas de aislamiento térmico para equipos y tuberías.

3.- Otro aspecto importante es el uso de una simbología adecuada, discutida en el capítulo IV, en donde se presenta la importancia de la identificación de un sistema de aislamiento en tra

bajos de cualquier grupo de ingeniería de proyectos. En este capítulo se incluye una simbología sencilla para identificar los sistemas de aislamiento, aunque la información de todo el trabajo puede ser usada considerando otro tipo de simbología.

4.- Para la selección de un sistema de aislamiento térmico se deben analizar detalladamente los siguientes aspectos:

- 1.- Aspectos térmicos
- 2.- Aspectos de resistencia al ataque químico
- 3.- Aspectos de resistencia mecánica
- 4.- Aspectos económicos
- 5.- Aspectos de condiciones ambientales (principalmente - humedad)
- 6.- Aspectos de seguridad (protección a equipos y personas)

Todos ellos discutidos dentro del presente estudio.

5.- A continuación se muestran dos diagramas de flujo que indican la metodología para usar la información comprendida en este trabajo, siendo de gran utilidad para ejecutar un trabajo rápido y confiable de selección de un sistema de aislamiento. La figura 7.1 representa un método corto para seleccionar un sistema de aislamiento para aplicaciones pequeñas y no críticas. Mientras que la figura 7.2 muestra un método más completo para la selec-

ción de cualquier sistema de aislamiento térmico. El método co  
rto puede ser usado en aquellos casos en los cuales interesa la  
selección previa del sistema de aislamiento, para estimación de  
costos o definición de arreglos y necesidades de instalación --  
(espacio) de equipos y tuberías. Con el método largo puede se--  
leccionarse el sistema de aislamiento definitivo a instalar in-  
cluyendo la identificación del mismo necesaria para su adquisi-  
ción e instalación.

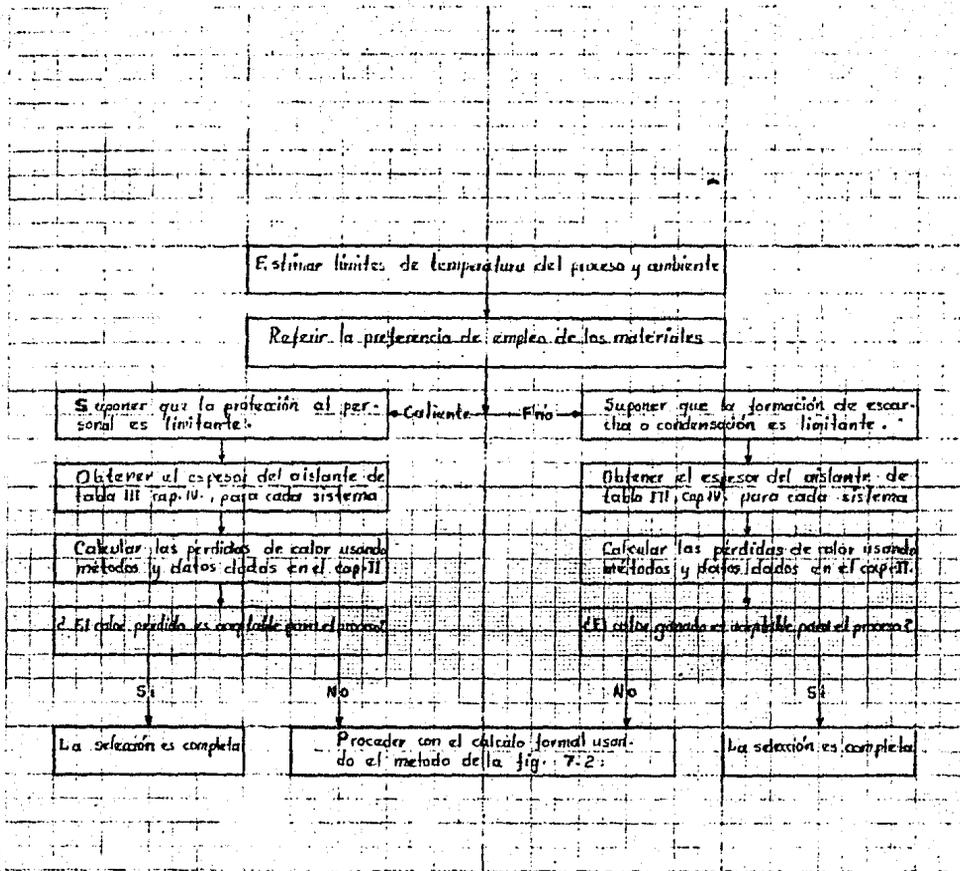


FIG. 7.1. METODO CORTO PARA LA SELECCION DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO (PARA APLICACIONES PEQUEÑAS Y NO CRITICAS)

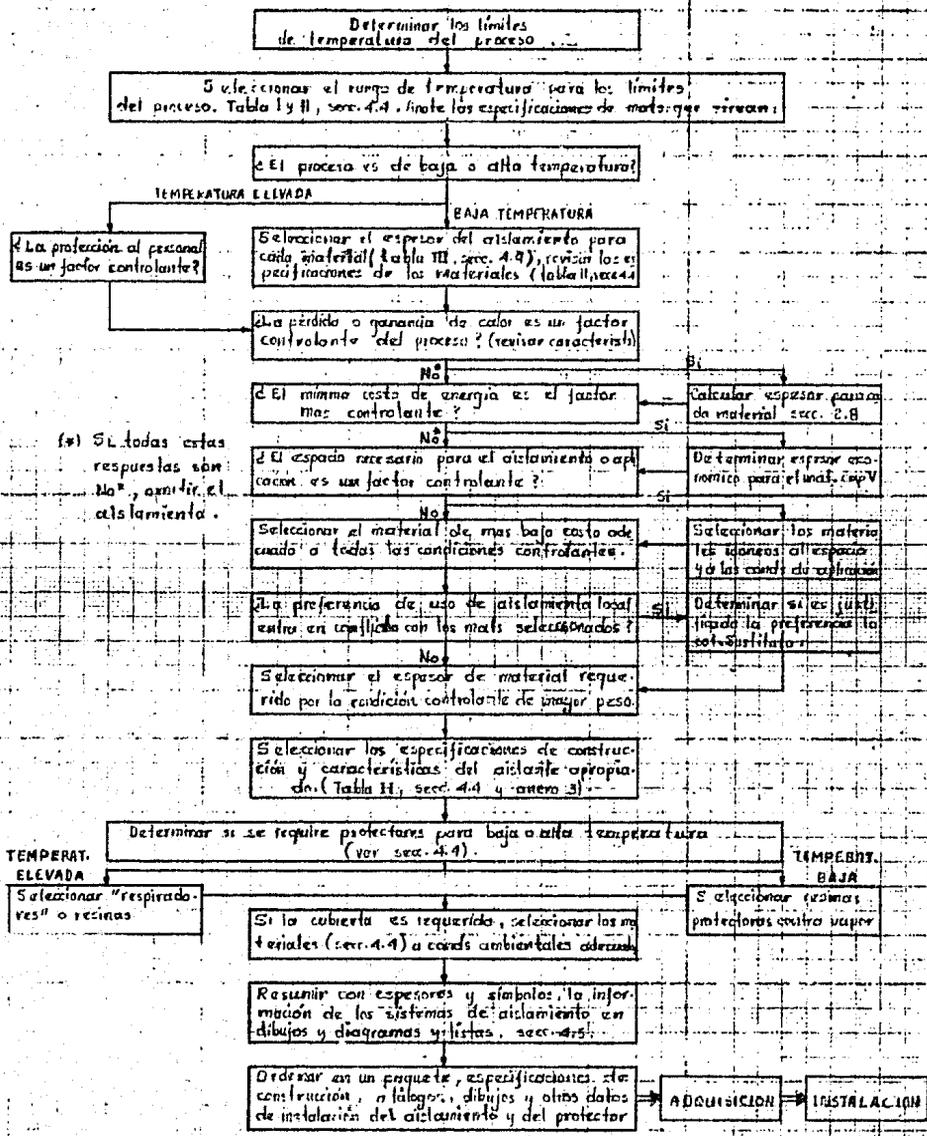


FIG. 7.2 METODO PARA LA SELECCION DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO

A N E X O 1

PROPIEDADES Y CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS DE SÓLIDOS

MATERIALES CERÁMICOS

Material	Densidad lb/ft <sup>3</sup>	T. Medio		Conduct. Térmica BTU-in/hoft <sup>2</sup> °F	Cap. Cal. BTU/lb °F
		°F	°C		
Acetato de Celulosa	80-82	113	45	0.107	
Níquelina	205	90	32	12.50	
		357	176	0.53	
Alta Densidad	195	898	471	5.03	
		1089	600	2.09	
		1994	1100	1.40	
		2320	1276	1.58	
Baja Densidad	120	1984	1100	0.75	
		2000	1100	0.58	
		1994	1090	0.50	
Compuestos de Asbesto				0.311	
Carbo-Asbesto		224	105	0.063	
Magnezio (Ladrillo)	159	367	204	2.75	0.270
		1202	650	1.52	0.230
		1598	870	1.31	0.250
		2408	1320	1.05	0.265
Melamina Formaldehido	92-95			0.180	
Micalex (Compuestos de mica y vidrio)		113	45	0.33	
Nitrato de Celulosa	84-87			0.099	0.33-0.38
Resina Epoxy	75.3	58	20	0.115	0.28
Silica Fundida		203	95	0.63	
		1004	540	2.25	
		1400	760	2.66	
		1598	870	2.17	
Silica en Ladrillos	85	369	204	0.60	0.23
		1202	650	0.91	0.26
		1994	1100	1.15	0.285
		2408	1320	1.30	0.295
Silica en polvo fino	6.7	-748	-126	0.01	
		-200	-129	0.014	
		-110	-84.5	0.014	
		799	426	0.12	
Tierra Diatomea (Sólida)	1.7	1598	870	0.17	
Vermiculita (Blocks)	24	199	93	0.025	
		199	93	0.125	
		367	204	0.135	
		799	426	0.156	
Vidrio		58	20	0.60	
		212	100	0.64	
Vidrio (hoja)	144	50	10	0.64	
		212	100	0.67	0.174
Vidrio Pyrex	149	392	200	0.73	0.204
					0.217
		362	190		0.223

Material	Densidad lb/ft <sup>3</sup>	T. Media		Conduct. Térmica BTU-Ft/hrft <sup>2</sup> °F	Cap. Cal. BTU/lb °F
		°F	°C		
Vidrio con Sílica		212	100	1.01	0.224
		572	300	1.33	0.243
		932	500	2.00	0.272
		1506	820	4.49	0.295

MATERIALES ESPUMOSOS

España de Ebonite	4	16	-9	0.017	
		90	32	0.021	
España de urca-fog maldehido	0.3	16	-9	0.020	
		90	32	0.024	
Espuma de Poliestireno 14.7 PSIA	1.34	81	27.4	0.025	
0.5 PSIA		81	27.4	0.025	
14.7 PSIA		-249	-156	0.009	
		-200	-129	0.011	
		-135	-93	0.014	
Espuma de Polierutano	4	-200	-173	0.007	
		-100	-75	0.012	
Espuma de Silición	10-22	171	77	0.036	
		212	100	0.039	
		313	167	0.045	
Espuma de Vinilo	20	52	11	0.030	
		72	22	0.034	
		115	46	0.039	
Vidrio Expandido (Espu ma de vidrio)	10.6	-301	-185	0.025	
		-200	-129	0.029	
		-99.4	-73	0.033	
		-0.4	-18	0.035	
		100	38	0.036	

MATERIALES FIBROSOS

Cubiertas de Fibra de vidrio y aluminio (39PSIA)	1.25	84.2	29	0.031	
20 PSIA		83.4	28.6	0.034	
14.7 PSIA		85.3	29.6	0.031	
4.6 PSIA		87.9	31	0.028	
1.93 PSIA		86	30	0.029	
14.7 PSIA	1.75	95.0	35	0.020	
7.3 PSIA		88.9	31.6	0.023	
0.40 PSIA		90.3	34	0.021	
14.7 PSIA	2.45	92.1	33.4	0.028	
8.3 PSIA		86	30	0.025	
0.32 PSIA		92.5	37.5	0.024	
14.7 PSIA	2.8	90	32.2	0.023	
8.3 PSIA		91	33	0.022	
3.0 PSIA		90.5	33.6	0.022	
14.7 PSIA	3.5	87	30.6	0.023	
7.4 PSIA		85.5	29.7	0.022	
2.8 PSIA		90	32.2	0.022	
0.2 PSIA		91.6	32.1	0.020	

Material	Densidad lb/ft <sup>3</sup>	T. Perfil in	Densidad kg/m <sup>3</sup>	T. Perfil mm	Sp. Cal. kg/m <sup>3</sup>
Fibra de vidrio (blanca)	6	75	11.9	0.011	
		200	33.4	0.025	
		300	53.7	0.037	
		400	64.9	0.049	
		500	73.7	0.054	
Fibra de vidrio -- (colorilla)	3	65	20	0.021	
		300	14.9	0.034	
		300	20.4	0.045	
	6	65	20	0.019	
		300	14.9	0.027	
		300	20.4	0.035	
	9	65	20	0.018	
		300	14.9	0.023	
		300	20.4	0.029	
Fibra de vidrio pre- formada	1	25.4	21	0.027	
		50.8	40	0.051	
	3.75	15.4	10	0.029	
		75.2	24	0.019	
		50	40	0.020	
	2.5	100	32	0.023	
		150	66	0.027	
		50	10	0.018	
	E	100	38	0.020	
		150	66	0.023	
		50	10	0.018	
1	100	38	0.020		
	150	66	0.022		
	117	47	0.024		
Lana Mineral	7.0	117	47	0.024	
		203	95	0.032	
Lana de vidrio	8-12	401	205	0.043	
		787	425	0.065	
	1.4	104	44	0.024	
		140	38	0.023	
	2.4	203	95	0.031	
		372	150	0.046	
	3.0	203	95	0.026	
		401	205	0.035	
	4.8	729	405	0.047	
		140	38	0.022	
25.4	25.4	21	0.020		
	302	150	0.039		
Fibra de vidrio (color de azul)	12.6	227	402	0.059	
		454	80	0.025	
	3	995	130	0.104	
		1595	200	0.200	
	6	159	97	0.022	
		359	53.7	0.024	
	9	1595	130	0.150	
		199	97	0.025	
	1506	199	53.7	0.027	
		1506	200	0.111	

ESTADO DE INVENTARIOS

Material	Existencia 20/10/67	T. de In	T. de Sa	Valor 20/10/67	Cap. Inv.
Aluminio	169	-345	-193	450	0.023
• Aluminio (comercial)		345	193	450	0.023
• Aluminio (resistencia +60 mil)	170	200	93	100	0.225
• Aluminio con fibra	169	200	30	100	
Cobalto	540	-190	-100	57.0	0.054
		190	100	57.0	0.054
Cobalto	551	190	20	57.0	0.110
Cobre (aleaciones):					
• Cobre blanco (grado 0)	55.3	60	20	40	0.000
• Silicio blanco	5.45	60	20	30	0.000
• Aluminio blanco	4.70	60	20	40	0.000
• Niquel blanco	4.60	70	21	34.0	0.000
• Niquel blanco	4.93	70	21	28.0	0.000
Magnesio	100	-315	-103	100	0.173
		100	103	92.5	0.199
		60	20	92	0.242
Manganeso		212	100	15.2	0.097
Mercurio (liquido)	845	32	0	4.74	0.033
		140	60	5.58	0.033
Paladio (comercial)		62	17	24.3	
Plata	655	-99	-73	242.8	0.054
		32	0	24.2	0.056
		212	100	219	0.057
		630	500	212	0.063
Platino	1340	60	20	40.3	0.030
		210	100	41.0	0.030
Plomo (aleaciones):					
• Plomo - antimonio	701	30	0	10.3	0.021
• Plomo - hierro	600	50	20	17.2	0.030
Silicio (puro)	145	-456	-271	2.4-2.4	0.10
		-440	-263	33-1450	0.10
		-270	-173	269-570	0.050
		60	20	0.0	0.100
		110	22	43.1	0.200
		120	27	10.3	0.050
		240	122	13.3	0.040
Titania (comercial)	250	-402	-253	0.9	0.000
		32	0	11.6	0.103
Tungsteno	1205	32	0	95.6	0.030
		2620	2000	05.0	0.041
		5100	2000	25.0	0.040
Zinc (comercial)	465	64	19	60	0.000
Zincato	405	110	100	11	0.000
		1100	600	13.2	0.070

MATERIALES NO METALICOS

Material	Densidad lb/ft <sup>3</sup>	T. Media		Conduct. Termica BTU-ft/hrft <sup>2</sup> °F	Cap. Cal. BTU/lb°F
		°F	°C		
Granulos de aluminagol	5.8	59	32	0.075	
		498	481	0.216	
Asbesto-cemento (tablas)	130	68	20	0.430	
Asbesto comprimido	13.5	59	15	0.148	
Asbesto con magnesita		212	100	0.035	
Asbesto delgado	130	932	500	1.041	
		66	30	0.052	
Asbesto en escamas	130	122	50	0.127	
Asbesto en hojas		90	32	0.184	
Concreto		399	204	0.215	0.156
Corcho (granulado)	6.5	37	0	0.025	
	7.3	50	10	0.022	
Corcho (polvo)	6	82	24	0.022	
Corcho (tablas)	6.9	-207	-103	0.010	
		-200	-129	0.014	
		-99	-73	0.016	
		0	-18	0.020	
		100	38	0.022	
	7.9	82	28	0.022	
	15.7	120	49	0.024	
	20.7	120	49	0.029	
Fibra Kapok	0.2			0.033	
	1.0			0.020	
Madera de pino	22-53	68	20	0.081	
Pyrogel		122	50	0.086	
Silice (aerogel)	3.44	122	50	0.030	
Silice (gel)	32.5	131	55	0.049	
Tierras diatomaceas	12.5	50	10	0.030	
		410	210	0.042	
14.0	797	425	0.056		
	-200	-129	0.020		
12.5	-249	-156	0.017		
	50	10	0.030		
14	410	210	0.042		
	797	425	0.056		
17	-200	-129	0.020		
	-249	-156	0.017		
18.7	-249	-156	0.018		
	-200	-129	0.021		
25	-135	-92.7	0.024		
	50	10	0.035		
25	410	210	0.049		
	797	425	0.066		
25	50	10	0.043		
	401	203	0.059		
		797	425	0.079	

MATERIALES POLIMERICOS

Material	Densidad lb/ft <sup>3</sup>	T. Medio °F °C		Conduct. Térmica BTU-ft/hr. in <sup>2</sup> °F	Exp. Vol. BTU/lb °F
Cloruro de polivinilo (P.V.C.)	75-100			0.082	0.230
Fenol-formaldehído	75-81			0.107	
• resinas con madera y al. carb.	87-91			0.137	
• resinas de asbesto	85-115			0.088	
• resinas de mica	100-120			0.158	
Fenol-formaldehído (ter- mólite)		104	40	0.107	
		113	45	0.084	
		120	50	0.100	
• resinas epoxi		107	42	0.086	
• resinas (epoxi)	1.2	107	42	0.117	
• resinas (epoxi)		70	21	0.117	
• resinas epoxi (sub. tax)	4.9	-201	-129	0.074	
		-200	-129	0.074	
		-69	-72	0.075	
		0	-10	0.077	
		100	38	0.076	
Poliamida (Nylon)	71.1			0.143	
• Hojas	58			0.125	
Poliamida	90.5	77	25	0.09	
	382	392	200	0.103	
	572	308		0.109	
Polimetil metacrilato	74	-127	-88	0.06	0.255
		80	27	0.088	0.310
		212	100		0.425
Poliestireno	64.4	58	20	0.072	0.320
		212	100	0.092	
		382	200	0.092	
Politetrafluoroetileno	137	20	25	0.057	0.258
		600	327	0.104	0.283
Polietileno					
• Hojas	59.3	72	20	0.072	0.55
		124	52	0.102	
• resinas	58.5			0.066	
• resinas	58			0.10-0.10	
• resinas	84-85			0.102	0.38-0.42
TABLE 2-10					
• resinas (epoxi)	10.7	100	40	0.082	
• resinas	58.0	450	230	0.082	

ANEXO 2

CONDUCTIVIDADES TERMICAS DE LIQUIDOS

$$K = \text{BTU}/(\text{h})(\text{ft}^2)(^{\circ}\text{F}/\text{ft})$$

Líquido	$^{\circ}\text{F}$	K	
Aceite de ricino	68	0.104	
	212	0.100	
Aceite de oliva	68	0.097	
	212	0.095	
Acetato de etilo	68	0.101	
Acetato de amilo	50	0.083	
Acetato n - butílico	77-86	0.085	
Acetona	86	0.102	
	167	0.095	
Acido acético 100 %	68	0.099	
	50 %	68	0.200
Acido esteárico	212	0.078	
Acido laúrico	212	0.102	
Acido oleico	212	0.092	
Acido palmítico	212	0.083	
Acido sulfúrico	90 %	86	0.210
	60 %	86	0.250
	30 %	86	0.300
Agua	32	0.330	
	86	0.356	
	140	0.381	
	176	0.398	
Alcohol alílico	77-86	0.104	

Líquido	°F	K
Alcohol n - butílico	86	0.097
	167	0.095
iso -butílico	50	0.091
Alcohol etílico 100 %	68	0.105
	122	0.087
80 %	68	0.137
60 %	68	0.176
40 %	68	0.224
20 %	68	0.281
Alcohol n - heptílico	86	0.094
	167	0.091
Alcohol n - hexílico	86	0.093
	167	0.090
Alcohol metílico 100 %	68	0.124
80 %	68	0.154
60 %	68	0.190
40 %	68	0.234
20 %	68	0.284
Alcohol n - propílico	86	0.099
	167	0.095
Alcohol iso - propílico	86	0.091
	140	0.090
Amoniaco	5-86	0.29
Amoniaco	68	0.261
	140	0.290
Anilina	32-68	0.100
Benceno	86	0.092
	140	0.087

Líquido	°F	K
Bromobenceno	86	0.074
	212	0.070
Bromuro de etilo	68	0.070
Dióxido de azufre	5	0.128
	86	0.111
Tetracloruro de carbono	32	0.107
	154	0.094
Cloruro de calcio, salmuera		
30 %	86	0.320
15 %	86	0.340
Cloruro de sodio, salmuera		
25 %	86	0.330
12.5 %	86	0.340
Clorobenceno	50	0.083
Cloroformo	86	0.080
Diclorodifluorometano	20	0.057
	60	0.053
	100	0.048
	140	0.043
	180	0.038
Dicloroetano	122	0.082
Diclorometano	5	0.0111
	86	0.096
Eter de petróleo	86	0.075
	167	0.073
Etilen glicol	32	0.153
Gasolina	86	0.078

Líquido	° F	K
Glicerina 100 %	68	0.164
80 %	68	0.189
60 %	68	0.220
40 %	68	0.259
20 %	68	0.278
n - Heptano	86	0.081
	140	0.079
n - Hexano	86	0.080
	140	0.078
Kerosena	68	0.086
	167	0.081
Mercurio	82	4.830
Nitrobenceno	86	0.095
	212	0.088
n - Nonano	86	0.084
	140	0.082
n - Octano	86	0.083
	140	0.081
n - Pentano	86	0.078
	167	0.074
Percloroetileno	122	0.092
Sodio	212	49
	410	46
Tolueno	86	0.086
	167	0.084
B - Tricloroetano	122	0.077
Tricloroetileno	122	0.080

Líquido	° F	K
Turpentina (aguarrás)	59	0.074
Vaselina	59	0.106
Orto - Xileno	68	0.090
Meta - Xileno	68	0.090

A N E X O 3

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES AISLANTES

CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO	TIPO DE AISLAMIENTO				
	FIBRA DE VIDRIO 210		Método de prueba ASTM	SILICATO DE CALCIO 100	Método de prueba ASTM
Descripción del material	Fibra de vidrio con resina orgánica			Silicato de calcio hidratado	
Forma	Hojas y medias cañas para tubería			Blocks y cubiertas de tubería	
Rango de temperatura (°F)	0 a 450			100 a 1200	
Conductividad térmica (BTU in/hr ft² °F) a temperatura media	K	Temp.	K	Temp.	
	0.21	50	0.38	100	
	0.24	100	0.40	200	
	0.29	200	0.47	400	
	0.35	300	0.56	600	
Disminución del volumen líq. negl. % máx. a temp. límite	No.			1.5	
Densidad (lb/ft³)	4 a 9			12	
Resistencia a la tensión (psi)	20			20	
Resistencia a la compresión (psi)	3 a 10% de deform.			100 a 5% de deformac.	
Resistencia a la flexión (psi)					
Modulo de elasticidad (psi)					
Resistencia a la abrasión				35 a 10 mm por corrida	
Pérdida % peso por caída					
Exposición al fuego				No combustible	
Índice de flama (espreado)	25				
Índice de densidad de humo	50				
Absorción de agua % volumen - 24 hrs de inmersión	90			90	
Capilaridad	No.			Pobros	
Higroscopia (% Volumen)	0.2			10% en peso	
Transmisión de vapor de agua Perm. (in)					
Acidinidad (PH)	9			10.2	
Contenido de cloro (ppm)	menos de 50			200	
Emisividad					
Difusividad térmica (ft²/hr)	0.02			0.16	
Calor específico (BTU/lb°F)	0.2			0.2	
Observaciones:				Buena resistencia al agua absorbida	

PROPIEDADES DE MATERIALES (Continuación)

CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO	TIPO DE AISLAMIENTO			
	ESPONJA PLÁSTICA 180	Metodo de prueba ASTM	POLIURETANO 500	Metodo de prueba ASTM
Descripción del material	Espuma plástica de célula cerrada		Poliuretano expandido	
Forma	Hojas y cubiertas para tubería.		Blocks, cubiertas de tubería y esprayado.	
Rango de temperatura (°F)	-50 a 220		-400 a 200	
Conductividad térmica (BTU in/hr. ft <sup>2</sup> .°F.) a temperatura media	k 0.27 0.28	Temp. 70 90	k 0.26 0.28 0.48 0.57 0.68	Temp. -100 -50 0 50 100
Coefficiente de expansión			40 x 10 <sup>-6</sup>	
Disminución del volumen: teórica, % max a temp. límite				
Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )	6	D-1622	2.0 a 2.5	D-1622
Resistencia a la tensión (psi)	80		40 a 70	D-1623
Resistencia a la compresión (psi)	40 a 10% de deformac.		50 a 40	D-1621
Resistencia a la flexión (psi)			60 a 70	C-203
Módulo de elasticidad (PSI)				
Resistencia a la abrasión: pérdida % peso por circula				
Exposición al fuego	Auto-extinguible	D-1622-61	Auto-extinguible	D-1622
Índice de flama (esprayado)	50		mas de 25	
Índice de densidad de humo	500		menos que 500	
Absorción de agua % volumen - 24 hrs de inmersión	1	D-1626-62	1.5 a 3.0	
Capilaridad	0			
Higroscopia (% volumen)				
Transmisión de vapor de agua perm. (in)	0.28	C-355-64	1.5	C-355
Alcalinidad (PH)				
Contenido de cloro (ppm)				
Emisividad				
Difusividad térmica (ft <sup>2</sup> /hr)			0.012 a 0.025	
Color específico (BTU/lb.°F)	0.19 a 0.27		0.23	
Observaciones	Requiere cubierta para exteriores		No exponer los espumas a elementos húmedos	

**PROPIEDADES DE MATERIALES (Continuación)**

CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO	TIPO DE AISLAMIENTO				
	FIBRA MINERAL 200		Metodo de prueba ASTM	ESPUMA DE VIDRIO 400	Metodo de prueba ASTM
Descripción del material	Fibras minerales con ligaduras inorgánicas			Celdas de vidrio herméticamente selladas	
Forma	Blocks y cubiertas de tubería			Blocks y cubiertas de tubería	
Rango de temperatura (°F)	100 a 1200			-45 a 800	
Conductividad térmica (BTU in./hr. ft. <sup>2</sup> °F.) a temperatura media	k	Temp.		k	Temp.
	0.33	100		0.32	-50
	0.36	200		0.35	0
	0.42	400		0.41	100
	0.51	600		0.47	200
				0.55	300
Coefficiente de expansión				4.6 x 10 <sup>-6</sup>	
Disminución del volumen liq. a temp. límite, % max.	0			0	
Densidad (lb/ft. <sup>3</sup> )	15			9	
Resistencia a la tensión (psi)				50	
Resistencia a la compresión (psi)	10 a 5% de deformación			100	
Resistencia a la flexión (psi)	40			75	
Módulo de elasticidad (psi)				1800	
Resistencia a la abrasión, ASTM, % peso por caída				0	
Exposición al fuego	No combustible			No combustible	
Índice de flama (espejado)				0	
Índice de densidad de humo				0	
Absorción de agua, % volumen - 24 hrs. de inmersión	90			0.2	
Capilaridad	póvilos			0	
Higroscopia (% volumen)	0.2			0	
Transmisión de vapor de agua perm. (in)				0	
Alcalinidad (PH)	8			7.5	
Contenido de cloro (ppm)	20			menos que 5	
Emisividad				0.05	
Difusividad térmica (ft <sup>2</sup> /hr)	0.01			0.018	
Color específico (BTU/lb °F)	0.22			0.2	
Observaciones				Buena resistencia a la compresión	

PROPIEDADES DE MATERIALES (Continuación)

CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO	TIPO DE AISLAMIENTO																			
	SILICA EXPANDIDA 110	SILICA-ALUMINA 150																		
Descripción del material	Perlita ligada con fibra de vidrio y resistente al agua.	Fibra de cerámica para alta temperatura.																		
Forma	Bloques y cubiertas de tubería	Cobertores y mantas																		
Rango de temperaturas (°F)	100 a 1500	100 a 2500																		
Conductividad térmica (BTU in/hr ft <sup>2</sup> °F) a temperatura media:	<table border="1"> <tr><th>K</th><th>Temp.</th></tr> <tr><td>0.53</td><td>100</td></tr> <tr><td>0.38</td><td>200</td></tr> <tr><td>0.47</td><td>400</td></tr> <tr><td>0.57</td><td>600</td></tr> </table>	K	Temp.	0.53	100	0.38	200	0.47	400	0.57	600	<table border="1"> <tr><th>K(4)</th><th>Temp.</th></tr> <tr><td>0.40</td><td>600</td></tr> <tr><td>0.70</td><td>1060</td></tr> <tr><td>1.10</td><td>1400</td></tr> </table>	K(4)	Temp.	0.40	600	0.70	1060	1.10	1400
K	Temp.																			
0.53	100																			
0.38	200																			
0.47	400																			
0.57	600																			
K(4)	Temp.																			
0.40	600																			
0.70	1060																			
1.10	1400																			
Disminución del volumen lineal. % máx. a temp. límite	1.2																			
Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )	10	5 a 12																		
Resistencia a la tensión (psi)																				
Resistencia a la compresión (psi)	81 a 5% de deformación																			
Resistencia a la flexión (psi)	85																			
Módulo de elasticidad (psi)																				
Resistencia a la abrasión perdida % peso por caída:																				
Exposición al fuego	No combustible	No combustible																		
Índice de Hama (espreado)																				
Índice de densidad de humo																				
Absorción de agua % Volumen - 24 hrs de inmersión	3.7																			
Capilaridad																				
Higroscopia (% volumen)																				
Transmisión de vapor de agua perm. (in)	18																			
Alcalinidad (PH)	9																			
Contenido de cloro (ppm)	50	menos que 50																		
Emisividad																				
Difusividad térmica (ft <sup>2</sup> /hr)	0.014																			
Calor específico (BTU/lb°F)	0.22	0.26 a 1800 °F																		
Observaciones		Alta temperatura y alto costo. Puede usarse en combinación con materiales de bajo costo.																		

(R) Con una densidad de B lb/ft<sup>3</sup>

PROPIEDADES DE MATERIALES (Continuación)

CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO:	TIPO DE AISLAMIENTO				
	POLIESTIRENO 410		Método de prueba ASTM	SÍLICA DIATOMACEA Y FIBRA DE ASBESTO	Método de prueba ASTM
Descripción del material	Poliestireno expandido			Alta temperatura tablas aislantes	
Forma	Bloques y cubiertas de tubería			Tablas	
Rango de temperatura (°F)	0 a 175			100 a 1200	
Conductividad térmica (BTU in/hr (ft² °F) α temperatura media	K	Temp.		K	Temp.
	0.22	0		0.58	200
	0.25	50		0.60	400
	0.27	100		0.62	600
Disminución del volumen lineal, % max. a temp. límite					
Densidad (lb/ft³)	1.0			25	
Resistencia a la tensión (psi)	70			500	
Resistencia a la compresión (psi)	10 a 5% de deformación			14000	
Resistencia a la flexión (psi)					
Módulo de elasticidad (psi)				0.2 x 10 <sup>6</sup>	
Resistencia a la abrasión pérdida % peso por caída					
Exposición al fuego	Autoextinguible			No combustible	
Índice de flama (espreado)				0	
Índice de densidad de humo				0	
Absorción del agua % volumen - 24 hrs de inmersión	1				
Espesoridad	No			Pebbles	
Higróscopa (% volumen)				9	
Transmisión de vapor de agua perm. (in)	2.5			16	
Alcalinidad (pH)				10	
Emitividad					
Difusividad térmica (ft²/hr)	0.017				
Calor específica (BTU/lb °F)	0.27			0.25	
Contenido de cloro (ppm)					
Observaciones	Fácil fabricación y buen peso			Tablas de troncos para fabricación de entrejados	

PROPIEDADES DE MATERIALES AISLANTES RIGIDOS

CARACTERISTICAS DEL AISLAMIENTO	TIPO DE AISLAMIENTO		
	ASBESTOS AMOSITE 120	SILICATO DE CALETA 100	ESPONJA DE VIDRIO ALTA TEMP. 160 BAJA TEMP. 800
Composición	Fibras de asbesto amosite con relleno de silicato dióxido de silicio	Silicato de calcio hidratado y fibras de asbesto	Celdas de espuma de vidrio heurística-mente vertidas.
Forma general	Molde y aislamiento de tubería	Molde y aislamiento de tubería	Molde y aislamiento de tubería
Especificación ASTM	C 391-59T	C 345-60T	C 343-56
Conductividad térmica (BTU in/hr ft <sup>2</sup> °F) a temperatura media	0.53 a 100 °F 0.42 a 300 °F 0.38 a 600 °F	0.35 a 100 °F 0.43 a 300 °F 0.46 a 600 °F	0.36 a 0 °F 0.52 a 100 °F 0.55 a 300 °F
Límites de temperatura (°F)	1200 máx., 120 mín.	1200 máx., 120 mín.	800 máx., -400 mín.
Resistencia a los choques térmicos	Buena dentro de los límites de temperatura	Buena dentro de los límites de temperatura	No se expande y rom- pe cuando está so- jeto a cambios rá- pidos de temperatura
Exposición al fuego	No combustible	No combustible	No combustible
Calor específico (BTU/lb °F)	0.22 a 0.20	0.22 a 0.20	0.20
Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )	18	10 a 18	9 a 10
Esfuerzo de compresión (psi)	83 a 100, a 5% de deformación.	66 a 104, a 5% de deformación.	100
Esfuerzo de tensión (psi)	10 a 40	7.16 a 3.7	84
Esfuerzo de flexión (psi)			100
Módulo de elasticidad			200 000
Absorvidad (humedad por volumen)	1 a 6%	80 a 95%	0.2% únicamente sobre la superficie
Resistencia a los ácidos	Buena	Un poco buena	Buena con excepción de HF y H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
Resistencia a las bases	Buena	Algo buena	Buena
Observaciones		Crea esfuerzos de corrosión de ac- ro inoxidable a cier- tas condiciones de humedad y temp.	Requiere ser pintada

**PROPIEDADES DE MATERIALES (Continuación)**

CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO	TIPO DE AISLAMIENTO			
	FIBRA MINERAL 200	Método de prueba ASTM	ESPUMA DE VIDRIO 400	Método de prueba ASTM
Descripción del material	Fibras minerales con ligaduras inorgánicas		Granos de vidrio herméticamente sellados	
Forma	Blocks y cubiertas de tubería		Blocks y cubiertas de tubería	
Rango de temperatura (°F)	100 a 1200		-45 a 800	
Conductividad térmica (BTU in/hr ft <sup>2</sup> °F) a temperatura media	k	Temp.	k	Temp.
	0.33	100	0.35	50
	0.36	200	0.41	100
	0.42	400	0.47	200
	0.51	600	0.55	300
Coefficiente de expansión			4.5 × 10 <sup>-6</sup>	
Disminución del volumen (lineal) % max. a temp. fuerte	4			
Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )	15		9	
Resistencia a la tensión (psi)			50	
Resistencia a la compresión (psi)	10 a 5% de deformación		100	
Resistencia a la flexión (psi)	40		75	
Módulo de elasticidad (psi)			1800	
Resistencia a la abrasión (Wadite) % peso por caída				
Exposición al fuego	No combustible		No combustible	
Índice de flama (espejado)				
Índice de densidad de humo				
Absorción de agua (% volumen = 24 hrs de inmersión)	90		0.2	
Capilaridad	porosos		0	
Higróscopía (% volumen)	0.2		0	
Transmisión de vapor de agua perm. (in)			0	
Alcalinidad (PH)	8		7.5	
Contenido de cloro (ppm)	20		menos que 5	
Emisividad				
Difusividad térmica (ft <sup>2</sup> /hr)	0.01		0.018	
Calor específico (BTU/lb°F)	0.22		0.22	
Observaciones			Buena resistencia a la compresión	

MATERIALES AISLANTES RIGIDOS (Continuación)

CARACTERÍSTICAS DEL AISLAMIENTO	TIPO DE AISLAMIENTO		
	MAGNESIO 85%	LANA MINERAL (alta densidad) 150	POLIESTIRENO 410
Composición	85% de carbonato hidrogenado y fibras de asbesto.	Fibras inorgánicas con forma irregular.	Poliestireno expandido.
Forma general	Molde y aislamiento de tubería.	Aislamiento moldeable.	Molde y aislamiento de tubería.
Especificación ASTM	C319-55	C392-60	
Conductividad térmica (BTU in/hr ft <sup>2</sup> °F) a temperatura media	0.34 a 100 °F 0.37 a 200 °F 0.43 a 400 °F	0.35 a 200 °F 0.51 a 600 °F 0.75 a 1000 °F	0.25 a 40 °F
Límites de temperatura (°F)	600 máx, 120 mín.	1800 máx, 120 mín.	225 máx, -300 mín.
Resistencia a los choques térmicos	Buena dentro de los límites de temperatura.	Buena dentro de los límites de temperatura.	Buena dentro de los límites de temperatura.
Exposición al fuego	No combustible	No combustible	Se quemara a 250 °F
Calor específico (BTU/lb °F)	0.22 a 0.30	0.22	0.27
Densidad (lb/ft <sup>3</sup> )	10 a 14	18 a 22	2 a 3
Esfuerzo de compresión (psi)	50 a 10% de deform.	10 a 18; a 10% de deformación.	20 a 10% de deform.
Esfuerzo a la tensión (psi)		Paralelo a la cara 20; normal 3	50
Esfuerzo a la flexión (psi)	30 a 42	30 a 55	50
Módulo de elasticidad (psi)		4.4 000	1.400
Absorbidad (humid. por vol)	80 a 95 %	95 %	1 %
Resistencia a los ácidos	Requiere protección a todos los líquidos	Requiere protección a todos los líquidos	Buena
Resistencia a las bases	Requiere protección a todos los líquidos	Requiere protección a todos los líquidos	Buena
Observaciones		No disponible con cubierta para tubería.	No recomendable para áreas riesgosas.

A N E X O 14

PROPIEDADES DE PROTECTORES

CARACTERÍSTICAS DEL PROTECTOR	TIPO DE PROTECTOR		
	LONAS DE BIRZAS (CF)	TELA DE VIDRIO (CG)	TELA DE VIDRIO CON PROTECTOR W.P. (CJ)
Descripción del material	Telas y lonas de algodón de 8 onz/yd <sup>2</sup>	Tela de vidrio de 7.8 onz/yd <sup>2</sup>	Tela de vidrio con una película de látex 29 onz/yd <sup>2</sup>
Forma	Textura flexible	Textura flexible	Textura flexible
Color	Blanco	Blanco	Blanco
Temperatura límite (°F)			
Exposición al fuego	Combustible	No combustible	No combustible
Índice de flama (espreado)			
Índice de densidad de humo			
Toxicidad del humo			
Transmisión de vapor de agua perm (in)	No protege del vap.	No protege del vapor	0.03
No de hoyos		215	215
Emissividad @ 100°F		0.6	0.6
Observaciones	Las lonas van pegadas al aislamiento. Su superficie se pinta.	Puede ser pintada.	Puede ser pintada.

CARACTERÍSTICAS DEL PROTECTOR	TIPO DE PROTECTOR		
	PAPEL DE ASBESTOS AS-FALTICOS (FA)	HOJA DE PAPEL DELGADO CON ASFALTO (FB)	HOJA DELGADA DE PAPEL DE FIBRA CON VIDRIO (FL)
Descripción del material	Papel de asbesto recubierto de asfalto. 50 lb/cuadro	Laminas de asfalto, tela de vidrio y hoja de aluminio. 57 lb/yd <sup>2</sup>	Laminas de aluminio, polvo de vidrio y papel de estirado
Forma	Hoja	Hoja	Hoja
Color	Negra	Negra	Aluminio
Temperatura límite (°F)	250	200	
Exposición al fuego	Combustible	Combustible	
Índice de flama (espreado)			
Índice de densidad de humo			
Toxicidad del humo			
Transmisión de vapor de agua perm (in)			0.02
No de hoyos			
Emissividad @ 100°F	0.92	0.94	emissiv. 0.05 perm 0.07
Observaciones		Protector duro y difícil. Tumbos por rasos.	Se usa brillante. Aplicado en hojas, tapas y ductos.

**PROPIEDADES DE PROTECTORES (Continuación)**

CARACTERÍSTICAS DEL PROTECTOR	TIPO DE PROTECTOR		
	HOJA DEBILADA DE PAPEL DE ESTRASA Y VIDRIO (FM)	HOJA DE ALUMINIO 0.010" (ME)	HOJA DE ALUMINIO 0.016" (MC)
Descripción del material	Lamina de aluminio vidrio y papel de estrasa	Hoja de aluminio corrugado de 3/16" con película de polietileno	Hoja de aluminio corrugado de 3/16" con película de polietileno
Forma	Hoja	Hoja	Hoja
Color	Blanco	Aluminio	Aluminio
Temperatura límite (°F)		1100	1100
Exposición al fuego		No combustible	No combustible
Índice de llama			
Índice de densidad de humo			
Toxicidad del humo			
Transmisión de vapor de agua	0.02	No protege del vapor	No protege del vapor
No. de hojas			
Emitividad @ 100°F	0.6	Brillante 0.05 gris oscuro 0.07 oxidado 0.11	Brillante 0.05 gris oscuro 0.07 oxidado 0.11
Observaciones	Protector con brillo solamente se aplica en el campo.		

CARACTERÍSTICAS DEL PROTECTOR	TIPO DE PROTECTOR	
	HOJA DE ALUMINIO 0.016" (MD)	ACERO GALVANIZADO 0.016" (MW)
Descripción del material	Hoja de aluminio corrugado de 3/16" con película de polietileno y cubierta de acrílica	Superficie pulida en bita to con resina vinilica - 4 mm
Forma	Hoja	Hoja
Color	Aluminio	Blanco
Temperatura límite (°F)	1100	220
Exposición al fuego	No combustible	No combustible
Índice de llama		
Índice de densidad de humo		
Toxicidad del humo		
Transmisión de vapor de agua	No protege del vapor	No protege del vapor
No. de hojas		
Emitividad @ 100°F	brillante 0.05 gris oscuro 0.07 oxidado 0.11	0.6
Observaciones	Cubierta de aluminio usada para evitar corrosión en las aristas.	Alto costo protector para ambientes corrosivos.

PROPIEDADES DE PROTECTORES (Continuación)

CARACTERÍSTICAS DEL PROTECTOR	TIPO DE PROTECTOR		
	ASFALTO PROTECTOR DE VAPOR (RA)	ASFALTO PARA COBRIR EL PROTECTOR (RC)	ALUMINIO CON ASFALTO (RE)
Descripción del material	Asfalto aplicado con solvente	Asfalto aplicado con solvente	Asfalto aplicado con solvente
Forma	Resina	Resina	Resina
Color	Negro	Negro	Aluminio
Temperatura límite (°F)	250	250	250
Exposición al fuego	Combustible	Combustible	Combustible
Índice de flama			
Índice de densidad de humo			
Toxicidad del humo			
Transmisión de vapor de agua perm. (in)	0.003	0.03	0.002
No. de hojas			
Emissividad @ 100 °F	0.94	0.94	
Observaciones			

CARACTERÍSTICAS DEL PROTECTOR	TIPO DE PROTECTOR	
	RESINA UATEX (RF)	PISTURA DE HULE CLORINADO (RG)
Descripción del material	Resina de acetato de polivinilo	Resina de hule eliminado
Forma	Resina	Pistura
Temperatura límite (°F)	180	180
Exposición al fuego		
Índice de flama	25	
Índice de densidad de humo		
Toxicidad del humo		
Color	Varios	Varios
Transmisión de vapor de agua perm. (in)	0.5	No. protege del vapor
No. de hojas		
Emissividad @ 100 °F		
Observaciones		Se usó para verificar deficiencia de la resina de plástico

## BIBLIOGRAFIA

1. A reprint from Chemical Engineering  
Designing shell-and-tube heat exchangers.  
Mc Graw-Hill, New York
2. A reprint from Chemical Engineering  
Heat Exchanger Calculations-Design  
Mc Graw-Hill, New York 1960
3. A reprint from Chemical Engineering  
Heat Transfer  
Mc Graw-Hill, New York
4. Donald Q. Kern  
Procesos de Transferencia de Calor  
C.E.C.S.A., México D.F., 1978
5. General Electric  
Heat transfer, 1972
6. Mc Adams William H.  
Heat transmission  
Mc Graw-Hill, New York, 1954
7. Perry J. Ch.  
Chemical Engineers' Hand book  
Mc Graw-Hill, New York, 1950
8. Rohsenow Warren M.- Choi Harry  
Heat, Mass and Momentum Transfer  
Stanford Univ. press, 1951