

300618

26  
24



**UNIVERSIDAD LA SALLE**

ESCUELA DE QUIMICA

Incorporada a la U. N. A. M.

**DISEÑO DE UNA PRACTICA PARA OBTENER LA  
CONDUCTIVIDAD TERMICA A REGIMEN PERMANENTE  
EN AISLANTES EN TUBO PARA LABORATORIO DE  
INGENIERIA QUIMICA DE LA ULSA**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A  
**CARLOS TERRAZAS SALAS**

DIRECTOR DE TESIS : ANTONIO VALIENTE BARDERAS

MEXICO, D. F.

1993

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está 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

Capítulo I	
Generalidades.	01
Capítulo II	
Aislantes y pérdidas de calor por conducción, convección y radiación.	30
Capítulo III	
Descripción del equipo utilizado.	42
Capítulo IV	
Experimentación.	47
Capítulo V	
Análisis de resultados.	51
Capítulo VI	
Práctica.	58
Capítulo VII	
Conclusiones y recomendaciones.	67
Bibliografía	

## CAPITULO I

### GENERALIDADES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

#### Transferencia de Calor

Transferencia de calor es el proceso por el cual se transfiere energía al existir un gradiente de temperatura en un sistema, o al estar en contacto dos sistemas a diferentes temperaturas.

A este tipo de energía se le llama calor, y no puede ser medido u observado directamente, pero sus efectos si pueden ser medidos y observados.

Al ponerse en contacto dos objetos que estan a diferentes temperaturas el calor fluye desde el objeto mas caliente llamado fuente hacia el mas frío llamado receptor. Este flujo siempre se realiza en el sentido de temperaturas decrecientes. Existen diferentes procesos de transferencia de calor como son, vaporización, condensación, sublimación, etc.

El calor tiene tres formas de ser transmitido, que son: Conducción, Convección y Radiación.

#### Conducción

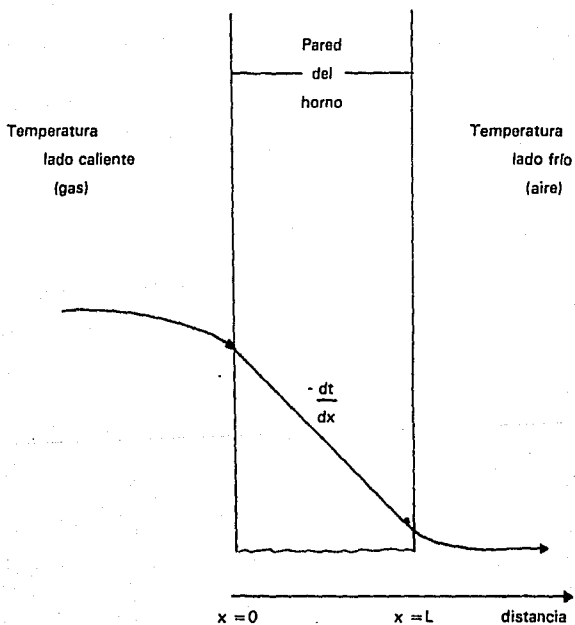
##### Definición.

La conducción es la transferencia de calor que se realiza a escala molecular, en donde el calor fluye desde una región de alta temperatura a una región de baja temperatura. En el flujo de calor, la energía se transmite por comunicación molecular directa.

La conducción es el único mecanismo por el cual puede fluir calor en sólidos opacos, la conducción de calor a través de gases y líquidos por lo general va combinada con la convección, y la radiación en algunos casos.

Un ejemplo de transferencia de calor por conducción puede ser, ladrillos de hornos o pades metálicas, con diferencia de temperatura entre sus dos superficies.

### Ecuación de Fourier



En esta figura se tiene la pared de un horno, por un lado se mantiene en contacto con gas caliente y por otro lado aire frío. Al cabo de cierto tiempo se obtendrá la distribución de temperatura, y el flujo de calor tendrá una dirección en ángulos rectos a la pared, cuando las superficies sean isotérmicas y el cuerpo homogéneo e isotrópico.

En donde se establece que hay un flujo de calor por unidad de tiempo proporcional al cambio de temperatura a través de la pared y área de la misma.

Por lo que  $dQ = kA (-dt/dx)$

A esta ecuación se le conoce como la ley de Fourier, ya que el científico francés J.B.J. Fourier la propuso en el año de 1822.

En donde

$Q$  = Es la rapidez del flujo de calor por conducción a través de la superficie isotérmica en dirección normal, en un material homogéneo e isotrópico fijo, y esta dada en Kcal/hr.

$A$  = Área de la sección a través de la cual fluye el calor por conducción, esta debe ser medida perpendicularmente a la dirección del flujo de calor y esta dada en m.

$-dt/dx$  = Gradiente de temperatura en la sección, es decir la rapidez con la que la temperatura  $t$  varía con respecto a la distancia  $x$  en la dirección del flujo de calor, y esta dada en  $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , y lleva signo negativo si suponemos una temperatura más caliente en la cara de la pared donde  $x = 0$ , y una temperatura menor en la cara donde  $x = L$ .

$k$  = Conductividad térmica del material (que es una constante de proporcionalidad) y está dada en  $\text{Kcal}/\text{h m}^{\circ}\text{C}$ .

### Conductividad Térmica y su relación con la Temperatura

La conductividad térmica es una propiedad del material, y nos indica la cantidad de calor que fluirá a través de la unidad de área si el gradiente de temperatura es la unidad.

La conductividad térmica varía con la temperatura.

A los materiales con alta conductividad térmica se les llama conductores, y para los que tienen baja conductividad térmica se les conoce como aisladores.

Ejemplos de conductores: Metales. Ejemplos de aislantes: Asbesto.

En la siguiente tabla y figura podemos ver como se comportan las conductividades térmicas de varias clases de materiales con la temperatura.

Tabla de conductividades térmicas

Material	k en Kcal/h m °C
Gases a la presión atmosférica.....	0.006 - 0.150
Materiales aislantes.....	0.030 - 0.178
Líquidos no metálicos.....	0.074 - 0.595
Sólidos no metálicos (ladrillo, piedra, concreto).....	0.030 - 2.23
Meales líquidos.....	7.4 - 66.92
Aleaciones.....	11.90 - 104.1
Metales puros.....	44.61 - 356.9

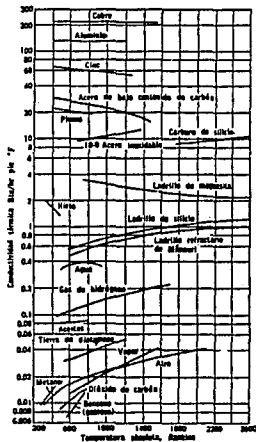


FIGURA 1-2. Variación de la conductividad térmica con la temperatura de sólidos, líquidos y gases.

Fuente: Frank kreith. Principios de Transferencia de calor. 2a Ed., Herrero Hermanos. México, D.F. 1970.

Como ya se dijo anteriormente la conductividad térmica varía con la temperatura, en algunos casos la variación de temperatura es tan pequeña que la conductividad térmica permanece constante, pero en otros donde la variación de temperaturas es significativa, la variación de la conductividad térmica puede ser representada por la función lineal

$$k = k_0(1 + Bt)$$

### Conductividad Térmica de los Gases

La conductividad térmica de los gases aumenta con la temperatura sin depender de la presión, pero cuando las presiones son altas sí depende de ella.

Para calcular la conductividad térmica en los gases se deduce una ecuación en base a la teoría cinética de Chapman-Enskog que asume los siguientes puntos.

1.- Solo son consideradas colisiones binarias entre las moléculas por lo que los resultados no se aplican para altas densidades, suficientes para producir colisiones triples.

2.- La teoría se limita a la mecánica clásica por lo tanto no es válida a bajas temperaturas.

3.- El método de perturbación es válido solamente para condiciones de equilibrio pequeñas y por lo tanto para situaciones donde los gradientes de las propiedades son pequeños.

4.- La teoría solo se aplica en moléculas monoatómicas, sin grados de libertad internos.

Colisiones no elásticas ocurren entre moléculas con grados de libertad internos. En algunas colisiones el movimiento es conservado pero no la energía. La viscosidad no es afectada, y la teoría para gases monoatómicos puede ser aplicada para moléculas poliatómicas semejantes a una esfera. La conductividad térmica es afectada significativamente por la presencia de grados de libertad internos, y la teoría monoatómica no es aplicable para moléculas poliatómicas.

Por lo que  $k = 1.9891(10^{-4}) \sqrt{T/PM}$

$$\sigma^2 \Omega_k$$

Para gases monoatómicos.



Donde:

$k$  = Conductividad térmica cal/cm s °K

$T$  = Temperatura absoluta

$PM$  = Peso molecular

$\sigma^2 = \text{Å}^2$

$\Omega_c$  = Integral de colisión

Para gases poliatómicos

$$k = 1.9891(10^{-4})\sqrt{T/PM} \left[ \frac{4 C_v + 3}{15 R} \right]$$

$C_v$  = Capacidad calorífica a volumen constante

Eucken propuso ecuaciones para gases a baja densidad

Por lo que  $k = \frac{5}{2} C_v \mu$  para gases monoatómicos

$\mu$  = Viscosidad

$$k = \left( C_p + \frac{5}{4} R \right) \frac{\mu}{PM}$$

$C_p$  = Capacidad calorífica molar a presión constante

### Conductividad Térmica de los Líquidos

La conductividad térmica de los líquidos decrece con la temperatura en la mayoría de los líquidos, excepto en el agua y la glicerina.

Para encontrar la conductividad térmica de los líquidos podemos utilizar la ecuación de Bridgman que relaciona la conductividad térmica de los líquidos con su velocidad del sonido.

Por lo que  $k = \frac{2R C_{liq}}{z^2}$

Donde  $R$  = Constante universal de los gases

$C_{liq}$  = Velocidad del sonido en el líquido

Z = Distancia media entre centros de las  
moléculas en un arreglo cúbico

$$Z = (M/\rho)^{1/3}$$

Donde M = Peso molecular

$\rho$  = Densidad

Otra expresión para calcular la conductividad térmica en los líquidos monoatómicos es

$$k = (\rho/M)^{1/3} R \sqrt{\frac{8}{5}} \frac{C_{\text{liq}}}{\gamma \Pi \text{ No}^{1/2}}$$

Donde No = Número de moléculas por mol

$\gamma$  = Relación del calor específico a presión constante

y volumen constante  $\gamma = 1 + 2/f$

f = Grados de libertad

Y para líquidos poliatómicos tenemos

$$k_{\text{liq}} = Z \sqrt{\frac{8}{5}} (\rho/M)^{1/3} R \frac{C_{\text{liq}}}{\gamma \Pi \text{ No}^{1/2}}$$

### Conductividad Térmica de los Sólidos

Para metales puros la conductividad térmica puede calcularse mediante la ecuación propuesta por Wiedemann-Franz que relaciona la conductividad térmica con la conductividad eléctrica

$$k = L_0 \sigma T$$

Donde k = Conductividad térmica

$\sigma$  = Conductividad eléctrica

T = Temperatura absoluta

$L_0$  = Constante de Lorentz =  $2.45(10^{-8}) \text{ } \omega\Omega/\text{K}^2$

La conductividad térmica en cualquier otro sólido que no sea metal solo puede calcularse de manera experimental ya que depende fundamentalmente de la porosidad y la fricción

hueca que se encuentra en ellos.

### Transmisión de Calor por Conducción en Estado Estacionario

Si consideramos el flujo de calor en estado estacionario a través de una lámina plana, si  $k$  es independiente de la temperatura y el área de la lámina es uniforme y las superficies exteriores de la lámina son isotérmicas y perpendiculares al plano, y  $Q$  permanece constante a lo largo del camino que sigue el flujo de calor y  $x$  es la distancia desde el lado caliente hacia el lado frío

$$\text{Entonces } \frac{Q}{A} = -k \frac{dt}{dx}$$

$$\text{De otra manera } dt = \frac{-Q dx}{kA}$$

Integrando desde  $x = 0$  y  $t = t_1$  tenemos que

$$\frac{Q}{A} = \frac{k(t_1 - t_2)}{L} \quad Q = \frac{kA \Delta T}{L}$$

En donde  $t$  es igual a la diferencia de temperaturas entre la temperatura más alta y la temperatura más baja.

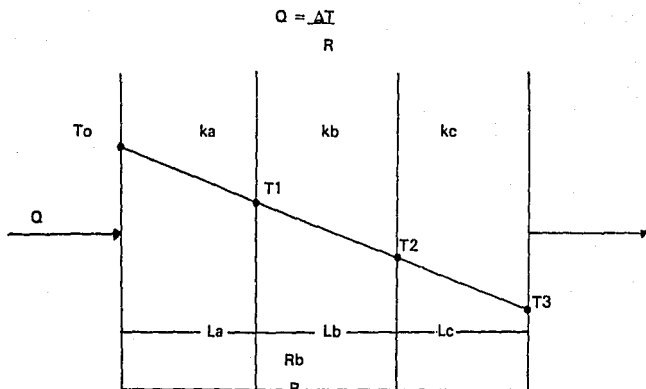
Puesto que  $kA/L$  es la conductancia su recíproco es la resistencia al calor

$$R = \frac{L}{kA} \quad \text{dada en } \frac{\text{Hr } ^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$$

La transmisión de calor por conducción en estado no estacionario no será tratada aquí por lo que le recomendamos ver la tesis de Juana Carlota Moreno Pulido que se titula "Determinación de la conductividad térmica a régimen no permanente".

### Transmisión de Calor por Conducción a través de varias paredes

Cuando una pared consta de varios materiales colocados juntos en serie, tenemos que:



Flujo de calor en una pared compuesta de varios materiales

El calor que fluye a través del material a, tiene una resistencia  $R_a$  y este a su vez fluye al material b y c teniendo resistencia  $R_b$  y  $R_c$  respectivamente. El calor que entró por la pared a debe ser igual al calor que salió por la pared c, por lo que el calor debe ser igual para las relaciones de la diferencia de temperatura entre la resistencia de cada capa, por lo que

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{\Delta T_a}{R_a} = \frac{\Delta T_b}{R_b} = \frac{\Delta T_c}{R_c}$$

De donde  $Q = \frac{T}{R} = \frac{T_0 - T_1}{R_a} = \frac{T_1 - T_2}{R_b} = \frac{T_2 - T_3}{R_c}$

$$Q = \frac{T_0 - T_1}{L_a/k_a A} = \frac{T_1 - T_2}{L_b/k_b A} = \frac{T_2 - T_3}{L_c/k_c A}$$

Reacomodando y sustituyendo

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_0 - T_3}{(L_a/k_aA) + (L_b/k_bA) + (L_c/k_cA)}$$

### Transmisión de Calor por Conducción a través de un Cuerpo Cilíndrico

Supongamos que tenemos un cilindro hueco por ejemplo una tubería, el cual tiene un radio exterior  $r_2$  y un radio interior  $r_1$ , dicho cilindro tiene una conductividad térmica de acuerdo al material de que este construido la cual es constante.

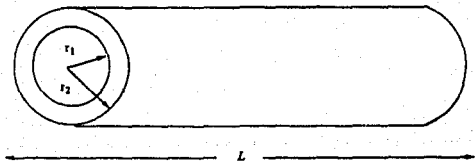
Utilizando la ecuación  $Q = -kA \frac{dt}{dx}$

Area del cilindro  $A = 2\pi rL$

$dx = dr$

Por lo que  $Q = 2\pi rLk(-dt/dx)$

$$Q = \frac{k2\pi L(T_1 - T_2)}{\ln r_2/r_1}$$



### Transmisión de Calor por Conducción a través de varias capas Cilíndricas

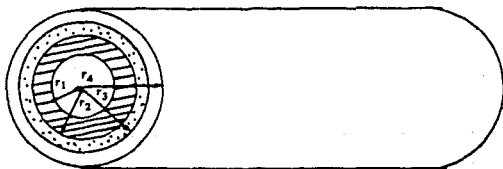
Supongamos que tenemos un cilindro compuesto de varios materiales en serie por lo que

$$Q = \frac{\Delta T}{R}$$

$$R = \frac{\ln r_1/r_2}{2 Lk}$$

$$Q = \frac{k_a 2\pi L(T_1 - T_2)}{\ln r_2/r_1} = \frac{k_b 2\pi L(T_2 - T_3)}{\ln r_3/r_2} = \frac{k_c 2\pi L(T_3 - T_4)}{\ln r_4/r_3}$$

$$Q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{1/k_a \ln r_2/r_1 + 1/k_b \ln r_3/r_2 + 1/k_c \ln r_4/r_3}$$



### Transmisión de Calor por Conducción a través de Cuerpos Esféricos

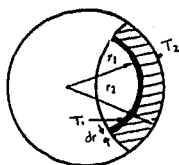
Si consideramos una esfera hueca de radio interior  $r_1$  y radio exterior  $r_2$  y las temperaturas de las superficies interior y exterior son uniformes y constantes, y el área de una esfera es  $A = 4\pi r^2$

Tenemos que

$$Q = -4\pi r \frac{dT}{dr}$$

$$\frac{Q}{4\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = - \int_{T_1}^{T_2} k dT$$

$$Q = \frac{4\pi k r_1 r_2 (T_1 - T_2)}{r_2 - r_1} = \frac{k \sqrt{A_2 A_1} (T_2 - T_1)}{r_2 - r_1}$$



### Transmisión de Calor por Conducción a través de varias capas Esféricas

Cuando una esfera esta compuesta de varios materiales como lo muestra la figura.



Tenemos que

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_1 - T_2}{R_a} = \frac{T_2 - T_3}{R_b} = \frac{T_3 - T_4}{R_c}$$

$$R = \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2 k a 4\pi}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_0 - T_3}{\frac{r_2 - r_1}{4\pi k r_1 r_2} + \frac{r_3 - r_2}{4\pi k_2 r_2 r_3} + \frac{r_4 - r_3}{4\pi k_3 r_3 r_4}}$$

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2 k a 4\pi}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{r_3 - r_2}{r_2 r_3 k b 4\pi}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{r_4 - r_3}{r_3 r_4 k c 4\pi}}$$



## Convección

### Definición

La convección es la transferencia de calor entre un fluido caliente y un fluido frío por medio de movimiento. En este proceso se transporta energía por la acción combinada de conducción de calor, almacenamiento de energía y movimiento del fluido.

Un ejemplo de convección puede ser el de un líquido que es calentado en un recipiente, el cual recibe un flujo de calor en las partículas adyacentes por conducción. El líquido que se encuentra en el fondo incrementa su temperatura y almacenará energía, después este fluido de menor densidad se moverá hacia una zona del fluido con menor temperatura y mayor densidad, en donde se mezclará y transmitirá su energía.

La transferencia de calor por convección se divide en: convección libre y convección forzada.

Convección libre es cuando el movimiento del fluido es producido por la diferencia de densidades que hay en la mezcla, al moverse las partículas de una temperatura mayor a una menor.

Convección forzada es cuando la mezcla del fluido es producida por un agente externo como un agitador.

Newton definió que la rapidez de transferencia de calor por convección en la frontera entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento es:

$$Q = hc A (T_s - T)$$

Donde

Q = Calor

hc = Coeficiente de convección desde la superficie del fluido

T<sub>s</sub> = Temperatura de la superficie del sólido

T = Temperatura del fluido

A = Área de transferencia de calor

Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección es una función del flujo de fluido,

de las propiedades térmicas del fluido y de la geometría del sistema. El valor del coeficiente de transferencia de calor por convección no es uniforme sobre una superficie y depende del lugar donde se mide la temperatura del fluido.

Existen cuatro métodos disponibles para el cálculo de coeficientes de transferencia de calor por convección:

- 1.- Análisis dimensional combinado con experimentos.
- 2.- Soluciones matemáticas exactas de las ecuaciones de capa frontera.
- 3.- Análisis aproximado de la capa frontera por métodos integrales.
- 4.- Analogía entre transferencia de calor, transferencia de masa y transferencia de cantidad de movimiento.

Estas cuatro técnicas han contribuido para el conocimiento de la transferencia de calor por convección. Pero, ningún método aislado puede resolver todos los problemas debido a que cada uno tiene sus limitaciones que reducen su campo de aplicación.

Determinación de grupos adimensionales. Para determinar grupos adimensionales se utilizará un método sencillo relacionando datos experimentales de transferencia de calor por convección para un fluido que fluya a través de un tubo caliente.

Las siguientes cantidades físicas son las que se utilizan en el proceso de transferencia de calor por convección.

Variable	Símbolo	Ec. dimensional
Dímetro del tubo	D	[ L ]
Conductividad térmica del fluido	k	[ ML / $\theta$ T ]
Velocidad del fluido	v	[ L / $\theta$ ]
Densidad del fluido	$\rho$	[ M / L ]
Viscosidad del fluido	$\mu$	[ M / L $\theta$ ]
Calor específico a presión constante	Cp	[ L / $\theta$ T ]
Coficiente de transferencia de calor	hc	[ M / $\theta$ T ]

Existen siete cantidades físicas y cuatro dimensiones fundamentales por lo que obtendremos 3 grupos adimensionales para relacionar los datos. Para poder determinar los grupos adimensionales, es igual al producto de las variables, cada una de las cuales están

elevadas a una potencia desconocida.

$$\Pi = D^a k^b \nu^c \rho^d \mu^e C_p^f hc^g$$

Sustituyendo las ecuaciones dimensionales tenemos que:

$$\Pi = [L]^a [M/L\theta T]^b [L/\theta]^c [M/L^3]^d [M/L\theta]^e [L^2/\theta T]^f [M/\theta^3 T]^g$$

Para que  $\Pi$  sea adimensional, los exponentes de cada dimensión fundamental deben sumarse separadamente e igualarse a cero. Igualando la suma de los exponentes de cada dimensión fundamental a cero, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} b + d + e + g &= 0 && \text{para } M \\ a + b + c - 3d - e + 2f &= 0 && \text{para } L \\ -3b - c - e - 2f - 3g &= 0 && \text{para } \theta \\ -b - f - g &= 0 && \text{para } T \end{aligned}$$

Cualquier conjunto de valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $g$  que simultáneamente satisfaga estas ecuaciones, hará que  $\Pi$  sea adimensional.

Como existen siete incógnitas y únicamente cuatro ecuaciones, se puede escoger valores para tres de los exponentes en cada uno de los grupos adimensionales. La única limitación para esta elección de exponentes es que cada uno de los exponentes elegidos sea independientemente de los otros. Un exponente es independiente si el determinante formado con los coeficientes de los términos restantes no se anula.

El coeficiente de transferencia de calor por convección,  $hc$  es la variable que se desea evaluar por lo que se selecciona su exponente  $g$  y se considera igual a la unidad. Y se hace que  $c = d = 0$  para simplificar.

Resolviendo las ecuaciones simultáneas se tiene que  $a = 1$ ,  $b = -1$ ,  $e = 0$ ,  $f = 0$  por lo que el primer grupo adimensional es

$$\Pi_1 = \frac{hcD}{k}$$

Que se le conoce como el número de Nusselt  $Nu$

Para se hace que  $g = 0$  para que  $hc$  no aparezca nuevamente y también se hace que

$a = 1$  y  $f = 0$  resolviendo las ecuaciones se tiene que  $b = 0$ ,  $c = 1$ ,  $d = 1$ ,  $e = -1$  por lo que  $\Pi_2 = \frac{VD_2}{\mu}$

A este grupo adimensional se le conoce como el número de Reynolds  $Re$ .

Si hacemos  $e = 1$ ,  $c = 0$  y  $g = 0$  tenemos que

$$\Pi_3 = \frac{C_D \mu}{k}$$

Conocido como el número de Prandtl  $Pr$ .

Con esto podemos observar que aunque el coeficiente de transferencia de calor es una función de seis variables, las siete variables están combinadas en tres grupos adimensionales.

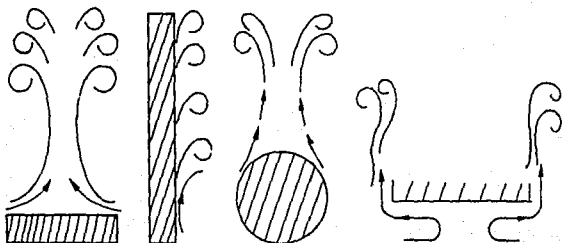
Por lo que el número de Nusselt va a ser función de los números de Reynolds y Prandtl

$$Nu = f(Re, Pr)$$

El coeficiente de transferencia de calor en convección libre es relativamente más bajo en comparación con el de convección forzada.

### Coefficiente de Transferencia de Calor en Convección Libre

En las siguientes figuras podemos observar el movimiento de un fluido que se calienta a través de diferentes superficies.



Mediante el método de análisis dimensional encontramos los siguientes grupos adimensionales para la transferencia de calor por convección libre.

$$a) Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

Donde Pr = Número de Prandtl

$C_p$  = Capacidad calorífica

$\mu$  = Viscosidad térmica del fluido

$k$  = Conductividad térmica del fluido

$$b) Gr = \frac{\beta g L \Delta T}{\nu} = \frac{\beta g L \Delta T}{\mu}$$

Donde Gr = Número de Grashof

$\beta$  = Coeficiente de expansión térmica

$g$  = Aceleración de la gravedad

$L$  = Longitud de la superficie

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas

$\mu$  = Viscosidad térmica del fluido

$\nu$  = Viscosidad cinemática

$$c) Nu = \frac{hL}{k}$$

Donde Nu = Número de Nusselt

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección libre

$L$  = Longitud de la superficie

$k$  = Conductividad térmica del fluido

Al combinar estos grupos adimensionales podemos encontrar correlaciones del tipo

$$Nu = f(Gr, Pr)$$

las cuales nos van a ayudar a calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección libre.

Para paredes verticales tenemos que

$$Nu = 0.59 (Gr Pr)^{1/4}$$

$$\frac{hL}{k} = 0.59 \left[ \frac{\beta g \rho^3 L^3 \Delta T}{\mu^2} \frac{Cp \mu}{k} \right]^{1/4}$$

Si  $GrPr$  va de  $10^4$  a  $10^8$  las propiedades del fluido se calculan a

$$T_f = \frac{T_{\text{fluido}} + T_{\text{pared}}}{2}$$

Si  $GrPr$  va de  $10^4$  a  $10^{12}$

$$Nu = 0.13 (GrPr)^{1/3}$$

$$\frac{hL}{k} = 0.13 \left[ \frac{\beta g \rho^3 L^3 \Delta T}{\mu^2} \frac{Cp \mu}{k} \right]^{1/3}$$

Si  $GrPr < 10^4$

$$Nu = 1.36 (Gr Pr)^{1/6}$$

$$\frac{hL}{k} = 1.36 \left[ \frac{\beta g \rho^3 L^3 \Delta T}{\mu^2} \frac{Cp \mu}{k} \right]^{1/6}$$

Para placas horizontales

Para placas calientes con la cara hacia arriba o placas frías con la cara hacia abajo

$Gr Pr$  de  $2 \times 10^7$  a  $3 \times 10^{10}$

$$Nu = 0.14 (Gr Pr)^{1/3}$$

$$\frac{hL}{k} = 0.14 \left[ \frac{\beta g \rho^3 L^3 \Delta T}{\mu^2} \frac{Cp \mu}{k} \right]^{1/3}$$

$Gr Pr$  de  $10^5$  a  $2 \times 10^7$

$$Nu = 0.54 (Gr Pr)^{0.25}$$

$$\frac{hL}{k} = 0.54 \left[ \frac{\beta g \rho^3 L^3 \Delta T}{\mu^2} \frac{Cp \mu}{k} \right]^{0.25}$$

Para placas calientes con la cara hacia abajo o placas frías con la cara hacia arriba.

GrPr de  $3 \times 10^5$  a  $3 \times 10^{10}$

$$Nu = 0.27 (GrPr)^{0.15}$$

$$\frac{hL}{k} = 0.27 \left[ \frac{\beta g \rho^3 \Delta T C_p \mu}{\mu^2 k} \right]^{0.15}$$

Para esferas

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección libre utilizamos la correlación de Froessling que dice

$$\frac{hD}{k} = 2 + 0.6Gr^{1/4}Pr^{1/3}$$

k

Para cuando el producto  $Gr^{1/4}Pr^{1/3} > 200$

Si  $Gr^{1/4}Pr^{1/3} < 200$

$$\frac{hD}{k} = 2$$

k

Para tubos verticales

$$\frac{hD_0}{k} = 0.59 \left[ \frac{D_0^3 \rho^3 g \beta \Delta T C_p \mu}{\mu^2 k} \right]^{0.25}$$

Para GrPr de  $10^3$  a  $10^9$

$$\frac{hD_0}{k} = 0.13 \left[ \frac{D_0^3 \rho^3 g \beta \Delta T C_p \mu}{\mu^2 k} \right]^{1/3}$$

Para GrPr de  $10^9$  a  $10^{12}$

Para cilindros

$$\frac{hD_0}{k} = 0.53 \left[ \frac{D_0^3 \rho^3 g \beta \Delta T C_p \mu}{\mu^2 k} \right]^{0.25}$$

Si GrPr va de  $10^3$  a  $10^9$

$$\frac{hD_0}{k} = 0.13 \left[ \frac{D_0^3 \rho g \beta \Delta T C_p \mu}{\mu^2 k} \right]^{1/3}$$

Si GrPr >  $10^9$

$$\frac{hD_0}{k} = 1.09 \left[ \frac{D_0^3 \rho g \beta \Delta T C_p \mu}{\mu^2 k} \right]^{1/4}$$

Si GrPr <  $10^4$

### Coficiente de Transferencia de Calor por Convección Forzada

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada podemos utilizar las combinaciones de los siguientes grupos adimensionales

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad \text{Número de Nusselt}$$

$$St = \frac{h}{\rho V C_p} = \frac{Nu}{RePr} \quad \text{Número de Stanton}$$

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} \quad \text{Número de Reynolds}$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad \text{Número de Prandtl}$$

$$Gr = \frac{\beta g \rho^2 L^3 \Delta T}{\mu^2} \quad \text{Número de Grashof}$$

$$Co = \frac{\rho D \lambda \Delta T}{v^3 C_p} \quad \text{Número de Condensación}$$

$$Pe = \frac{DV\rho C_p}{k} \quad \text{Número de Peclet}$$

$$Gr = \frac{w C_p}{kL} \quad \text{Número de Graetz}$$



Existen varias formas de flujo de calor por convección forzada para fluidos, que son: para fluidos dentro de tubos, para fluidos afuera de tubos y para fluidos que fluyen sobre superficies geométricas.

En este capítulo nos enfocaremos solamente a calcular el flujo de calor en fluidos dentro de tubos.

Existen algunas correlaciones para calcular el coeficiente de calor por convección forzada en el interior de tubos.

Para flujo laminar

$$Nu = 2 \left[ \frac{wC_p}{kL} \right]^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$$

$$Nu = 2 (Gr)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$$

Si la temperatura de salida es igual a la de pared

$$Nu = \frac{2wC_p}{\pi kL}$$

$$\Pi kL$$

$$Nu = \frac{2}{\Pi} Gr$$

$$\Pi$$

Para cuando la temperatura es muy grande

$$Nu = 1.75 \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \left[ \frac{wC_p}{kL} (1 + 0.15Z)^{1/3} \right]^{1/3}$$

$$Z = \frac{L^2}{D^2} GrPr$$

Para region de transición con Re de 2,100 a 10,000

$$\frac{hD}{k} = 0.116 \left[ Re^{1/3} - 125 \right] (Pr)^{1/4} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \left[ 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{1/4} \right]$$

Para flujo turbulento  $Re > 10,000$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{Calentamiento}$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad \text{Enfriamiento}$$

Para gases

$$Nu = 0.021 Re^{0.8}$$

Para fluidos muy viscosos

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1/4}$$

Para agua

$$h = \frac{2280 (1.352 + 0.0198t) u^{0.8}}{D^{0.2}}$$

$$h = \frac{\text{Kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad u = \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad t = \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Transferencia de Calor con Cambio de Fase

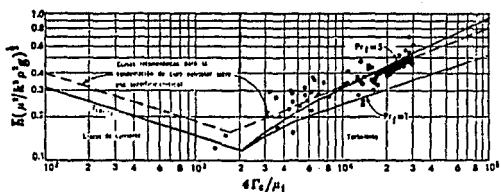
En este capítulo solo trataremos la transferencia de calor en la condensación.

La condensación ocurre cuando al ponerse en contacto un vapor saturado con una superficie a una temperatura inferior. En condiciones normales se forma un flujo continuo de líquido sobre la superficie y el condensado fluye hacia abajo debido a la gravedad. El condensado es laminar y el calor se transfiere de la superficie intermedia vapor-líquido hacia la superficie por conducción, siempre y cuando la velocidad del vapor no sea muy alta y la película muy gruesa. Sobre una placa vertical el grueso de la película aumenta continuamente de la parte superior a la inferior.

### Condensación en forma de película

Existen diferentes relaciones teóricas para calcular los coeficientes de transferencia de calor, para la condensación en forma de película de vapor puro en tubos y placas, en este caso solo trataremos la condensación de vapores en el interior de tubos verticales.

### Condensación de vapores en el interior de tubos verticales



Fuente. Frank Kreith. Principios de transferencia de calor. 2aEd. Herrero Hermanos, México, D.F. 1970

$G'$  = Carga de condensado para tubos verticales

$$Nu = 0.0054 (Pr_l^{0.45}) (Re_v^{0.9}) \left(\frac{\mu_w}{\mu_l}\right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_w}\right)^{0.5}$$

$\mu_w$  = viscosidad del vapor

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad Re_v = \frac{4W}{\mu_l D}$$

$Pr_l$  = Prandtl del líquido

$Re_v$  = Reynolds del vapor

## Radiación

### Definición

Radiación es la transmisión de energía a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía se absorbe por el receptor y parte es reflejada por él. Si la radiación se transmite a través del vacío no se transforma en calor u otra forma de energía ni sufre desviaciones en su trayectoria.

Ejemplos de radiación: El cuarzo fundido transmite prácticamente toda la radiación que incide sobre él; una superficie opaca pulimentada o espejo refleja la mayor parte de la radiación que recibe; una superficie negra o mate absorbe casi toda la radiación que recibe.

### Ecuación de Boltzman

Boltzman basandose en la 2a ley de la termodinámica estableció que la velocidad a la cual fluye una fuente de calor, es

$$\frac{Q}{A} = \sigma \epsilon T^4$$

Y se le conoce como la ley de la cuarta potencia

En donde  $T$  = Temperatura absoluta

$\sigma$  = Constante dimensional

$\epsilon$  = Emisividad

Radiación térmica es la radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Para propósitos prácticos la radiación de importancia en los cálculos de transferencia de calor, está limitada a longitudes de onda entre 0.1 y 100  $\mu$ . La cantidad total de la radiación emitida por un cuerpo por unidad de área y de tiempo, se llama poder de emisión total  $E$ , depende de la temperatura y de las características de la superficie del cuerpo.

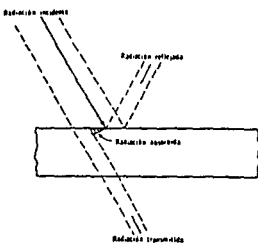
Cuando la radiación incide sobre un cuerpo, es practicamente absorbida, parcialmente reflejada y parcialmente transmitida. La relación entre la energía absorbida, la energía reflejada y la energía transmitida es

$$\alpha + \varphi + \psi = 1$$

Donde  $\alpha$  = absorbanca, que es, la fracción de la radiación incidente absorbida por el cuerpo

$\varphi$  = reflexibilidad, que es, la fracción de la radiación incidente reflejada por la del cuerpo

$\psi$  = transmisividad, que es, la fracción de la radiación incidente transmitida a través del cuerpo



Los cuerpos que no transmiten radiación se llaman cuerpos opacos por lo que

$$\alpha + \varphi = 1$$

La reflexión de la radiación puede ser regular o difusa. Si una superficie esta altamente pulida y lisa, la reflexión de la radiación será semejante a la de un haz de luz. A esta se le llama reflexión regular. Cuando el material es rugoso o su superficie tiene asperezas, la reflexión de la radiación a partir de su superficie ocurre practicamente en todas sus direcciones y se le llama reflexión difusa. Una superficie de reflexión difusa puede definirse como aquella que refleja con la misma distribución espacial de energía que un cuerpo negro. Las magnitudes de  $\alpha$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ , depende del material, su espesor, acabado de superficie y longitud de onda de la radiación.

## Cuerpo Negro y Ley de Kirchoff

Un cuerpo negro o radiador es un cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él y que no refleja o transmite ninguna, o como un radiador que emite a cualquier temperatura especificada la máxima cantidad posible de radiación térmica a todas las longitudes de onda. El cuerpo negro es un estándar con el que pueden compararse las características de la radiación de otros cuerpos.

Si suponemos dos cuerpos pequeños B1 y B2 con superficies de áreas A1 y A2 se colocan en un recipiente grande y vacío que está perfectamente aislado a sus alrededores. Habrá intercambio de radiación entre los dos cuerpos y las paredes del recipiente, hasta que se alcancen la misma temperatura. La rapidez con la cual cada cuerpo emite su radiación será igual a la rapidez con que absorben radiación. Si G es la rapidez con que la energía radiante de las paredes incide en cada cuerpo, y  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son las absorbancias E1 y E2 el poder de emisión de B1 y B2 respectivamente

$$\text{Por lo que } A_1 G \alpha_1 = A_1 E_1 \text{ y } A_2 G \alpha_2 = A_2 E_2$$

$$\text{Entonces } \frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2} = E$$

para cualquier cuerpo.

A esta relación se le conoce como ley de Kirchoff

La ley de Kirchoff enuncia que en el equilibrio térmico, la razón del poder de emisión de una superficie a su absorbancia, es la misma para todos los cuerpos. La absorbancia está limitada a valores entre 1 y 0. El poder de emisión máximo ocurre cuando tiene su valor máximo de uno, una condición que se aplica precisamente al cuerpo negro. Por lo que un cuerpo negro es un radiador ideal  $E_b$ . El poder de emisión de otros cuerpos es menor que el del cuerpo negro, y la razón  $E/E_b$  es también igual a la absorbancia ya que  $\alpha_b = 1$  por lo que el equilibrio térmico, la absorbancia y la emisividad de un cuerpo son iguales. Para el cuerpo negro ambas son iguales a la unidad.

El poder de emisión de un cuerpo negro depende únicamente de la temperatura.

Por lo que la energía radiada por un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta

$$E_b = \sigma T^4$$

Donde  $E_b$  = Poder de emisión de un cuerpo negro BTU/h Pie<sup>2</sup>

$\sigma$  = Constante =  $0.173 \times 10$  BTU/H Pie<sup>2</sup> °R

T = Temperatura °R

$$\frac{Q}{A} = \epsilon \sigma T^4$$

A

#### Intercambio de energía entre dos planos extensos paralelos

Si dos placas o planos radiantes son infinitamente grandes, de manera que la cantidad de radiación que se escapa por las aristas de la fuente y las aristas del receptor, es insignificante. Si ambas placas o planos son cuerpos negros, la energía del primero es  $E_{b1} = \sigma T_1^4$  y del segundo  $E_{b2} = \sigma T_2^4$ . Toda la energía que recibe el cuerpo negro es absorbida y el cambio neto por pie cuadrado entre dos planos mantenidos a temperatura constante es

$$\frac{Q}{A} = E_{b1} - E_{b2} = \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

A

$$\frac{Q}{A} = 0.173 \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4$$

A

#### Relación de Energía a un Receptor Completamente Absorbente

Cuando la fuente de calor es pequeña en comparación con el medio que lo rodea, es costumbre hacer la simplificación de que nada del calor radiado por la fuente se refleja a ella

por lo que

$$\frac{Q}{A} = \epsilon_r \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

El efecto de la radiación puede ser expresado por

$$\frac{Q}{A} = hr (T_1 - T_2)$$

Donde

hr = Coeficiente de transferencia por radiación

Por lo que

$$hr = \frac{Q/A}{T_1 - T_2} = \frac{\epsilon_r \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}$$



## CAPITULO II

### AISLANTES Y PERDIDAS DE CALOR POR CONDUCCION, CONVECCION Y RADIACION

#### Aislantes

Un material aislante es aquel que presenta una conductividad térmica baja.

Los materiales aislantes muestran una gran dependencia con la densidad, a medida que los materiales aislantes tienen mayor densidad, tendrán menor fracción hueca por lo que tendrán una mayor conductividad térmica.

Existen diferentes tipos de materiales aislantes y podemos clasificarlos de la siguiente forma:

- a) Según su servicio
- b) Según sus características físicas.

Clasificación según el servicio.

Los materiales aislantes se clasifican de la siguiente manera, dependiendo del servicio y la temperatura a la que trabajen

- 1) Materiales de alta temperatura de 60°C hacia arriba
- 2) Materiales de baja temperatura de 60 a 20 °C
- 3) Materiales criogénicos de -20 °C hacia abajo

Clasificación según sus características físicas.

Se clasifican de acuerdo a sus características físicas de la siguiente manera

- 1) Granulares.- Silicato de calcio, vermiculita exfoliada, tierras diatomáceas con silicato de sodio
- 2) Fibrosos.- Fibra de vidrio y lana mineral
- 3) Espumosos.- Poliestireno y poliuretano
- 4) Monolíticos.- Cementos de unión y acabados, y mastiques
- 5) Reflectivos.- Paredes pulidas metálicas

1) Granulares.- Se presentan en placas o preformados rígidos, para lo cual se necesitan algún aglutinante o fibras de refuerzo.

Silicato de calcio. Tiene como fibra de refuerzo asbesto amozite, es de estructura porosa e insoluble en agua. Tiene buena resistencia mecánica y a la compresión. Su densidad promedio es de 15 lb/pie<sup>3</sup> y es el aislante granular más empleado.

Verniculita exfoliada.-Se usa mezclada en la proporción adecuada con aglutinantes bajo la forma de cemento refractario aislante seco o en pasta.

Tierras diatomáceas con silicato de sodio.- Es soluble en agua, pero se usa para preparar cemento refractario aislante, mezclandolo con aglutinante resistente al calor y al agua.

2) Fibrosos.- Se pueden fabricar rígidos, semirígidos y flexibles, siendo su limitante principal la temperatura de operación, ya que los materiales aglutinantes empleados se queman a temperaturas mayores a las que especifican los fabricantes. Algunos de ellos y sus características principales son:

Fibra de vidrio.- Se obtiene a partir de arena fundida, teniendo gran variedad de productos dependiendo del uso a que se destine.

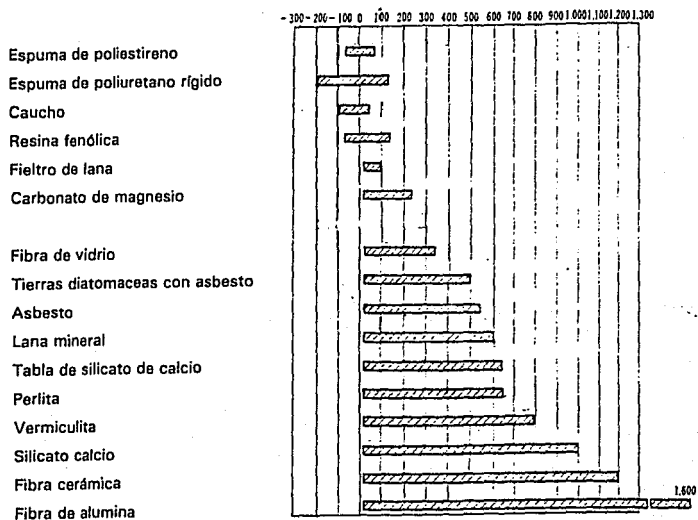
Lana mineral.- Se obtiene a partir de escoria metálica fundida. Se presenta como colchonetas armadas, placas y granel.

3) Espumosos.- Son materiales producto de una reacción química de freones o fluorocarbonos o CO<sub>2</sub> como espumador y monómero de estireno como inhibidor. Ejemplos de ellos son el poliestireno y el poliuretano, siendo más usado este último. Para el aislamiento de tanques se ha encontrado el poliuretano especialmente útil y barato, puesto que el trabajo puede fácilmente ser realizado en campo, con la consiguiente reducción de costos. Sus características, como por ejemplo la conductividad térmica, lo hacen inmejorable.

4) Monolíticos.- Se presentan en forma de cementos y mortares que se usan para sellar uniones y en partes difíciles de aislar, así como también forman el acabado de los sistemas de aislamiento. El fabricante, por lo general, recomienda sus propios monolíticos.

5) Reflectivos.- Son aislantes muy novedosos, actualmente utilizados solo en reactores nucleares y cohetes espaciales. Los aislantes reflectivos consisten de enflautados de diferentes diseños, de láminas pulidas que reflejan el calor, con lo que se obtienen conductividades térmicas muy bajas.

A continuación mostramos una figura donde podemos observar los rangos de la temperatura de servicio de diferentes materiales aislantes.



Los materiales aislantes utilizados para desarrollar esta práctica son: Fibra de vidrio, fibra cerámica y lana mineral.

### FIBRA CERAMICA

La fibra cerámica ofrece una gran variedad de temperaturas de trabajo y servicio dependiendo de sus diferentes composiciones. Estas composiciones inorgánicas basadas en silico-aluminatos previene la formación de humos y olores ofensivos que pudieran contaminar la atmósfera del horno a las temperaturas de quemado.

La fibra cerámica presenta una muy baja conductividad térmica, una excelente resistencia al choque térmico y una bajísima capacidad de retención de calor almacenada.

Existen diferentes tipos de fibra

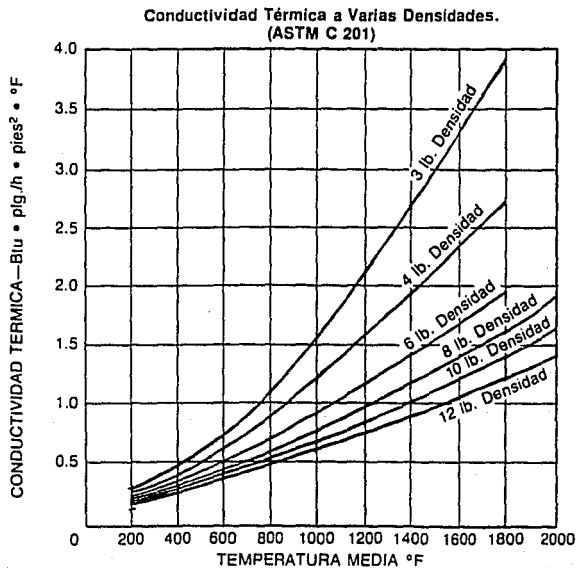
#### Fibra Tipo B

La fibra tipo B tiene una temperatura límite de uso de 982 °C, y se puede utilizar en combustión con otras fibras de mas alta temperatura para obtener una mejor eficiencia del costo en un trabajo de aislamiento.

#### Propiedades

Color	blanca
Diametro de fibra, en micras	2.8
Longitud de fibra en mm	102 a 254
Densidad	0.127 g/cm
Calor específico J/Kg °C, 982 °C prom.	1088
Resistencia a la tensión de la fibra N/m <sup>2</sup>	11.3 x 10 <sup>9</sup>
modulo de tensión de la fibra N/m <sup>2</sup>	84.1 x 10 <sup>9</sup>
Punto de fusión °C	1760
Conductividad Térmica	De .02 a .2 Kcal m h °C

Análisis Químico (%) :    Oxido de Aluminio, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 40-48  
                                 Oxido de Silice, SiO<sub>2</sub> 45-55



## FIBRA DE VIDRIO

La fibra de vidrio se obtiene a partir de la arena fundida, y con ella se pueden fabricar aislantes termoacústicos en fibra de vidrio .

Estos aislamientos termoacústicos de fibra de vidrio son un valiosísimo auxiliar en la industria de la construcción ya que se traduce en confort, tranquilidad y ahorro de energéticos con la subsecuente ventaja económica de las empresas: La inversión que se hace en aislantes termoacústicos se recupera en corto tiempo gracias al ahorro que se obtiene al usarlos. Para ello es indispensable una buena selección del tipo de material y del espesor a emplear.

Los aislantes termoacústicos de fibra de vidrio presentan las siguientes ventajas: Alta eficiencia térmica, alta eficiencia acústica, estabilidad dimensional , no se pudren ni envejecen, brindan ahorro en inversión de equipo, reducen costos de instalación, fáciles de instalar, dan confort y tranquilidad.

La fibra de vidrio presenta las siguientes características: Tiene una temperatura de operación de -84°C a 450°C.

### Medias Cañas

Estas medias cañas son de 91 cm. de longitud para aislamientos de tuberías de cobre en diámetros nominales de 13 mm. a 76 mm. y espesores de 25 mm. a 51mm. y para tuberías de hierro en diámetros nominales de 13 mm. a 76 mm. y espesores de 25 mm. a 76 mm. y se recomienda para temperaturas de hasta 450°C.

### Características:

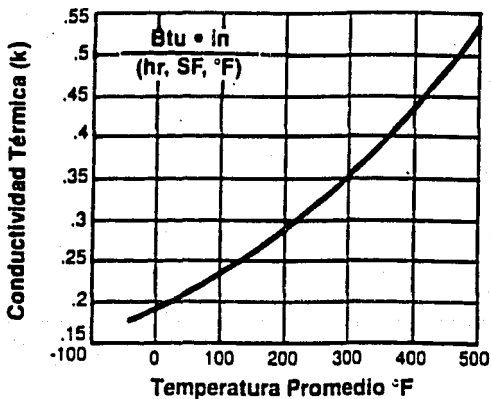
Adsorción de humedad:	Menos de 0.2% de volumen
Resistencia a corrosión:	No causará la corrosión de cobre, acero o acero galvanizado.
Transmisión de vapor de humedad:	No excede 0.02 permisible.
Encogimiento lineal:	Menos de 0.5%
Alcalinidad:	Alcalinidad máxima 0.6%, pH máximo 11.2.

Resistencia a bacterias y hongos.

No engendra ni promueve su crecimiento.

## Características de Rendimiento

### Rendimiento Térmico: (ASTM C 335)



## LANA MINERAL

Es un producto de fibras semirefractarias especialmente elaborado a base de roca basáltica de diferentes características, fundido a temperaturas de más de 1200 °C, sometido a un proceso de fibrización en unidades de centrifugación, durante este proceso se le esprea aceite, con el fin de proteger las fibras de la abrasión y de agua, lo que la hace repelente al agua. Se presenta en forma de colchoneta con un soporte metálico en la cara exterior, ya sea metal desplegado o malla hexagonal, cosido con alambre galvanizado.

Las características generales más sobresalientes de las colchas de lana mineral respunteadas a metal desplegado o malla hexagonal y de las colchonetas armadas son:

- Alta eficiencia térmica, por su bajo factor de conductividad.
- Alta eficiencia acústica, por su alto coeficiente de reducción de sonido.
- Dimensionalmente estables, no sufren contracciones con los cambios de temperatura.
- Incombustibles, por su naturaleza inorgánica.
- Inorgánicas, no crean hongos ni bacterias.
- Ligeras.
- Resilientes (elásticos).
- Repelentes al agua, no absorben humedad por su débil higroscopicidad.
- No favorecen la corrosión.
- Facilidad de instalación, por su flexibilidad.
- Económicas.

Los campos de aplicación son muy grandes, como por ejemplo:

- 1.- Plantas industriales. Aislamiento de plantas petroquímicas, azucareras, cementeras, papeleras, centrales termoeléctricas y nucleares.
- 2.- Depósitos de almacenamiento y transporte. Aislamiento térmico en esferas, tanques y en vagones-cisterna.
- 3.- Buques. Aislamiento térmico en servicios de vapor, en transportes criogénicos y bodegas de transporte frigorífico.
- 4.- Líneas de tuberías. Aislamiento térmico de tuberías.

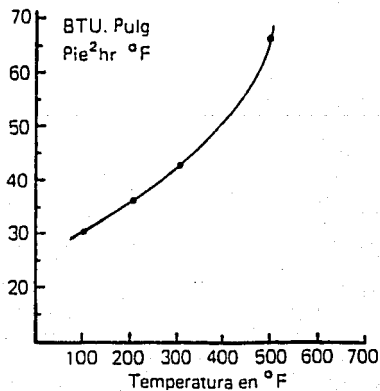
Estas colchonetas constituyen un producto ideal para el aislamiento de equipos industriales que operan a altas temperaturas hasta de 770 °C. Los recubrimientos metálicos facilitan su instalación y forman una base apropiada para los acabados.



A continuación mostramos algunas de sus propiedades físicas.

- Temperatura máxima. 770 °C(1418 °F).
- Densidades. 96,144,192 Kg/m3.
- Resistencia al fuego. Incombustible.
- Corrosión al acero. Ninguna.
- Conductividad térmica. De 0.30 a 0.63 BTU in/ft2 h °F  
Densidad 96 Kg/m3 (6 lb/ft3)  
De 0.28 a 0.56 BTU in/ft2 h °F  
Densidad 192 Kg/m3 (12 lb/ft3).
- Resiliencia. 98 %.
- Encogimiento lineal. 1 % a 400 °C (752 °F).
- Temperatura de fusión. 1100 °C (2012 °F).
- Absorción de humedad. 0.2 % por peso a 100 °C (212 °F)
- Eficiencia a 365 °C (689 °F). 96 % calor conservado.

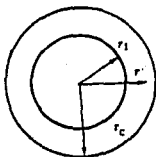
Gráfica de Conductividad Térmica



### Pérdida máxima de calor a través de un tubo aislado

Puede parecer que entre más grueso sea el aislante menor será la pérdida total de calor. Esto será cierto siempre para aislantes planos, pero no para aislamientos curvos. Si consideramos un tubo con capas sucesivas de aislamiento cilíndrico. A medida que el grueso del aislante se aumenta, la superficie de la que el calor debe ser removido por el aire aumenta y la pérdida total de calor puede aumentar si el área aumenta más rápidamente que la resistencia, por lo que la resistencia del aislamiento por metro lineal será:

$$R_a = \frac{1}{2\pi k} \ln r/r_1$$



Y la resistencia del aire por metro lineal de tubo es

$$R_a = \frac{1}{ht2\pi r}$$

La resistencia es un mínimo, la pérdida de calor un máximo cuando la derivada de las sumas de la resistencia R con respecto al radio r es igual a cero

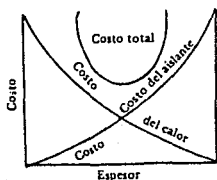
$$\frac{dR}{dr} = 0 = 1/2\pi k \frac{d \ln r/r_1}{dr} + 1/ht2 \frac{d}{dr} 1/r$$
$$0 = 1/2\pi k r - 1/ht2\pi r^2$$

En la máxima pérdida de calor  $r = r_c$  ,  $r_c = k/ht$

La máxima pérdida de calor por una tubería tiene lugar cuando el radio crítico es igual a la razón de la conductividad térmica del aislamiento al coeficiente de superficie de transferencia de calor. Por lo que se debe mantener el radio crítico tan pequeño como sea posible, de manera que la aplicación del aislamiento proporcione una reducción y no un aumento en la pérdida de calor por una tubería. Esto se puede lograr usando un material aislante de baja conductividad de manera que el radio crítico sea menor que el radio de la tubería o  $r_c < r_1$ .

#### Grueso Óptimo del Aislante

Al aumentar el espesor del aislante la cantidad de calor que sale de una superficie puede decrecer, pero el costo del aislamiento aumenta. El más económico es aquel para el cual la suma del costo anual (depreciación) es mínima.



El espesor óptimo en superficies cilíndricas se puede calcular de la siguiente manera

$$K_1 = \frac{1}{r_1} \left[ \sqrt{\frac{h \cdot k (T_s - T_a)}{A C (10^6)}} - \frac{K}{ht} \right]$$

En donde  $K_1$  es la relación  $r_1/r_2$  mas económica que se puede determinar a partir de

$$K_1 = r_2/r_1 \ln r_2/r_1 \quad y$$

$r_1$  = radio interno del aislante

$r_2$  = radio externo del aislante

$n$  = horas de año de operación

$C$  = costo del aislante aplicado en pesos/m

$k$  = conductividad térmica Kcal/H m °C

$A$  = fracción del costo que debe amortizarse por año

$T_s$  = Temperatura de la superficie sin aislar en °C

$T_a$  = Temperatura ambiente en °C

$q$  = costo de calor perdido en pesos/millon de Kcal

$ht$  = coeficiente combinado de convección y radiación Kcal/ H<sup>2</sup>m °C

### CAPITULO III

#### DESCRIPCION DEL EQUIPO UTILIZADO

El equipo utilizado para determinar la conductividad térmica (k) de diferentes aislantes es el siguiente.

-Tres tubos de 1 pulgada cedula 40 y 1.20 m de longitud, cada uno de estos tubos esta aislado con una pulgada de espesor de un material diferente, y tendrán una entrada de vapor por la parte superior, que estará controlada por una llave, y una salida por la parte inferior que también estará controlada por una llave de salida que conecta a un tubo recolector de condensados, con un indicador de nivel tubular tipo vaso comunicante.

-Un tubo paralelo a estos tres tubos por donde se drene el sistema de vapor, y está conectado al calorímetro de barril.

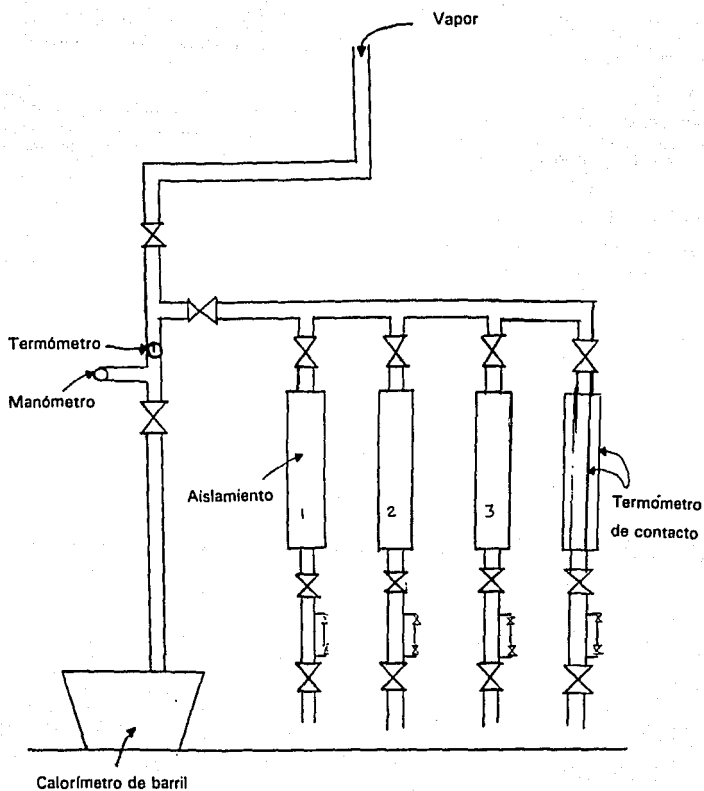
-Un termómetro con rango de 0 a 200°C en la entrada del sistema para medir la temperatura del vapor.

-Un manómetro de rango de 0 a 7 kg/cm<sup>2</sup> colocado a la entrada del vapor hacia los tubos para medir la presión de vapor.

-Un termómetro de contacto de 0 a 200 °C para determinar las temperaturas de la superficie de los tubos y la temperatura superficial exterior de los aislantes.

-Un calorímetro de barril para determinar el flujo de calor que entra al sistema.

En la siguiente figura se muestra un esquema simplificado del equipo utilizado.



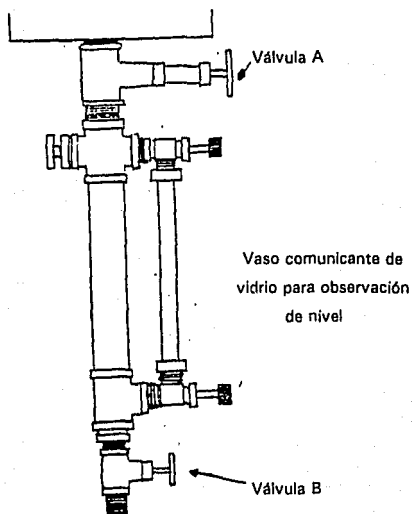
Esquema simplificado del equipo utilizado.

### **Funcionamiento del equipo utilizado.**

#### **Pasos para la corrida de la determinación del flujo de calor del vapor.**

- 1) Se le pone una cantidad conocida de agua al calorímetro de barril.
- 2) Se mide la temperatura del agua contenida en el calorímetro de barril.
- 3) Se cierran todas las llaves de paso.
- 4) Se suministra vapor al sistema a través de una línea de vapor conectada en la parte superior del sistema.
- 5) Se abre la llave de entrada al sistema y se espera a que se establezca la presión y la temperatura.
- 6) Se abre la llave del tubo que está conectado al calorímetro de barril, se burbujea vapor de agua, y se empieza a tomar el tiempo de la corrida, la presión inicial y la temperatura inicial.
- 7) Se cierra la llave del tubo conectado al calorímetro y se toma el tiempo transcurrido, la temperatura y presión final del vapor, se mide el volumen y la temperatura del agua mas el condensado.
- 8) Con los datos obtenidos se hacen los balances de masa y energía correspondientes y se determina el flujo de calor del vapor.

En la siguiente figura se muestra en detalle el tubo recolector de los condensados.



**Pasos para hacer las corridas de la determinación de la conductividad térmica de los aislamientos.**

- 1) Se introduce vapor al sistema abriendo la válvula de alimentación.



2) Se abre la válvula de entrada del tubo aislado donde se va a llevar a cabo la corrida.

3) Se drenan los condensados que se encuentran en la tubería, por la parte inferior del tubo, abriendo la válvula B y después abriendo la válvula A para drenar el tubo.

4) Se espera 10 minutos y luego se cierra la válvula B y se abre la válvula A, después de tres minutos, se abre B y se drena el tubo, esta operación se repite hasta que el sistema se haya estabilizado, es decir hasta que ya no haya variación apreciable en la temperatura de los termómetros, y con esto se podrá empezar a hacer las corridas.

5) Una vez bien drenado el tubo, se coloca un recipiente adecuado a la salida del tubo recolector de condensados, se cierra la válvula B y se hecha andar el cronómetro y se miden la temperatura y presión de vapor.

6) Estabilizar la presión y temperatura del sistema con la válvula de alimentación de vapor.

7) Después de un tiempo adecuado se observa el nivel de los condensados a través del indicador de nivel, y antes de que se acerque al límite superior se cierra la válvula A y se abre la válvula B para recolectar los condensados. Se mide inmediatamente su temperatura en el recipiente donde se recolectan.

8) Se toma la lectura de la presión del vapor en el momento final, la temperatura de los termómetros, y se determina el volumen de los condensados recolectados.

## CAPITULO IV

### EXPERIMENTACION

En este capítulo se presenta el procedimiento efectuado durante la experimentación, así como los datos obtenidos en cada una de las corridas.

Primeramente se procedió a drenar todos los tubos del sistema, fueron colocados 5 litros de agua en el calorímetro de barril a una temperatura de 21 °C, se abrió la válvula de admisión de vapor para alimentar vapor a través del tubo que se conecta al calorímetro de barril, y se esperó a que se estabilizara la temperatura y presión de vapor. Una vez estabilizadas la presión y la temperatura se iniciaron las corridas, se conecto el calorímetro de barril, y se alimento vapor a una temperatura de 124 °C y una presión de 1.5 kg/cm<sup>2</sup>, se tomó el tiempo de la corrida y al finalizar la corrida, se tomó la temperatura y volúmen de la mezcla que se encontraba en el calorímetro de barril, se repitió este procedimiento dos veces más y se obtubieron los siguientes resultados.

CORRIDA No.	PRESION Kg/cm <sup>2</sup>	TIEMPO min.	TEMP. VAPOR °C	VOLUMEN AGUA litros	TEMP. AGUA °C	VOLUMEN MEZCLA litros	TEMP. MEZ. °C
1	1.5	3	124	5	21	9.012	73.0
2	1.5	3	128	5	21	9.100	76
3	1.5	3	127	5	21	9.090	75

La temperatura ambiente fue de 21 °C

Con estos datos se pudo obtener el flujo de calor del vapor que se alimenta al sistema.

Para calcular las pérdidas de calor totales y la conductividad térmica de los aislantes se obtuvieron los siguientes datos durante la experimentación.

Se alimento vapor a través de tubo número 1, este tubo es de acero al carbón de una pulgada de diámetro cedula 40, y mide 1.20 metros de longitud, y esta recubierto con una

pulgada de espesor de fibra de vidrio.

Al iniciar la corrida se tomó la temperatura y presión del vapor alimentado al sistema, así como la temperatura del medio ambiente. Y al finalizar la corrida se tomaron las temperaturas de las superficies tanto del tubo como del aislante. Se midió la temperatura y volumen de los condensados, y la duración de la corrida

Se realizaron tres corridas para cada uno de los tubos aislados y se obtuvieron los siguientes resultados.

#### **Tubo No. 1**

Aislante: Fibra de vidrio

Díametro del tubo: 1 pulgada ced. 40 Ac. al carbón

Longitud del tubo: 1.20 m.

Temperatura ambiente: 21 °C

Espesor del aislante: 1 pulgada

Corrida No.	Presión vapor kg/cm	Temperat. vapor °C	Temperat. tubo °C	Temperat. aislante °C	Temperat. condens. °C	Volumen conens. litros	Tiempo min.
1	1.5	126	103	42	79	.068	5
2	1.5	127	102	45	80	.067	5
3	1.5	130	105	44	78	.060	5

#### **Tubo No. 2**

Aislante: Lana mineral

Díametro del tubo: 1 pulgada ced. 40 ac. al carbón

Longitud del tubo: 1.20 m.

Temperatura ambiente: 21 °C

Espesor del aislante: 1 pulgada

Corrida No.	Presión vapor kg/cm	Temperat. vapor °C	Temperat. tubo °C	Temperat. aislante °C	Temperat. cond. °C	Volúmen cond. litros	Tiempo min.
1	1.5	145	130	50	50	.061	5
2	1.5	148	135	53	51	.065	5
3	1.5	148	134	51	55	.068	5

### Tubo No. 3

Aislamiento: Fibra cerámica

Díametro del tubo: 1 pulgada ced. 40 en Ac. al carbón

Longitud del tubo: 1.20 m.

Temperatura ambiente: 21 °C

Espesor del aislante: 1 pulgada

Corrida No.	Presión vapor Kg/cm	Tempera. vapor °C	Temperat. tubo °C	Temperat. aislante °C	Temperat. cond. °C	Volúmen cond. °C	Tiempo min.
1	1.5	127	113	40	90	.050	5
2	1.5	124	112	38	91	.060	5
3	1.5	125	110	38	90	.040	5

### Nomenclatura

$P_{\text{vapor}}$  = Presión de vapor kg/cm

$T_{\text{vapor}}$  = Temperatura de vapor °C

$t$  = Tiempo Hr

$V_{\text{agua}}$  = Volumen del agua lt

$T_{\text{agua}}$	= Temperatura del agua °C
$V_{\text{meza}}$	= Volúmen de la mezcla lt.
$T_{\text{meza}}$	= Tempertatura de la mezcla °C
$T_{\text{amb}}$	= Temperatura ambiente °C
$T_{\text{tubo}}$	= Temperatura del tubo °C
$T_{\text{aisl}}$	= Temperatura del aislante °C
$V_{\text{cond}}$	= Volúmen de los condensados lt
$T_{\text{cond}}$	= Temperatura de los condensados °C
$L$	= Longitud del tubo m
$x$	= Espesor del aislante m
$D_i$	= Diámetro interno del tubo m
$D_e$	= Diámetro externo del tubo m

## CAPITULO V

### ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos obtenidos en forma experimental, así como un ejemplo para ilustrar la obtención de los mismos.

Para ilustrar los cálculos se tomaron los datos de la corrida No. 1 obtenidos en el calorímetro de barril, así como los datos obtenidos en la corrida No. 1 del tubo No. 3.

#### Datos del calorímetro

Presión de vapor =  $1.5 \text{ kg/cm}^2$

Tiempo = 3 minutos

Temperatura de vapor =  $124 \text{ }^\circ\text{C}$

Volúmen del agua = 5 litros

Temperatura del agua =  $21 \text{ }^\circ\text{C}$

Volúmen de la mezcla = 9.012 litros

Temperatura de la mezcla =  $73 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura ambiente =  $21 \text{ }^\circ\text{C}$

#### Datos del tubo No. 3

Díametro del tubo = 1 pulgada ced. 40

Longitud del tubo = 1.20 m.

Espesor del aislante = 1 pulgada

Presión de vapor =  $1.5 \text{ Kg/cm}^2$

Temperatura de vapor =  $127 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura del tubo =  $113 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura de la superficie del aislante =  $40 \text{ }^\circ\text{C}$

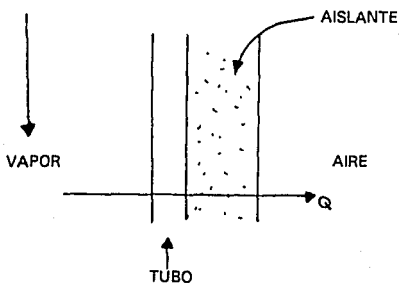
Temperatura de los condensados =  $90 \text{ }^\circ\text{C}$

Volúmen de condensados = 0.050 litros

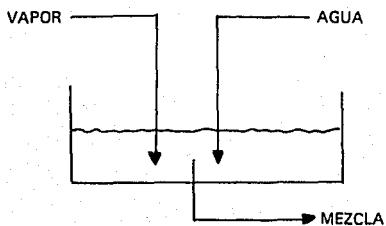
Tiempo de la corrida = 5 minutos

#### Planteamiento

- Se calculó el flujo de calor que entra al tubo
- Se calculó el calor perdido en los condensados
- Se calculó el calor que entra efectivamente al tubo
- Se obtuvo la conductividad térmica del aislante



#### Balace de Materia en el Calorímetro



$$M_{\text{vapor}} + M_{\text{agua}} = M_{\text{mezcla}}$$

$$M_{\text{vapor}} = M_{\text{mezcla}} - M_{\text{agua}}$$

### Balance de Calor en el Calorímetro

$$M_{\text{vapor}} H_{\text{vapor}} + M_{\text{agua}} H_{\text{agua}} = M_{\text{mezcla}} H_{\text{mezcla}}$$

$$H_{\text{vapor}} = \frac{M_{\text{mezcla}} H_{\text{mezcla}} - M_{\text{agua}} H_{\text{agua}}}{M_{\text{vapor}}}$$

$$H_{\text{mezcla}} = C_{p \text{ agua}} (T_{\text{mezcla}} - T_0)$$

$$H_{\text{agua}} = C_{p \text{ agua}} (T_{\text{agua}} - T_0)$$

$$C_{p \text{ agua}} = 1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ Kg/Lt}$$

$$M_{\text{agua}} = V_{\text{agua}} \rho_{\text{agua}}$$

Sustituyendo valores

$$M_{\text{agua}} = (5 \text{ Lt}) (1 \text{ Kg/Lt}) = 5 \text{ Kg}$$

$$M_{\text{mezcla}} = (9.012 \text{ Lt}) (1 \text{ Kg/Lt}) = 9.012 \text{ Kg}$$

$$M_{\text{vapor}} = 9.012 \text{ Kg} - 5 \text{ Kg} = 4.01 \text{ Kg}$$

$$H_{\text{agua}} = (1 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}) (21^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 21 \text{ Kcal/Kg}$$

$$H_{\text{mezcla}} = (1 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}) (73^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 73 \text{ Kcal/Kg}$$

$$H_{\text{vapor}} = \frac{(9.012 \text{ Kg}) (73 \text{ Kcal/kg}) - (5 \text{ Kg}) (21 \text{ Kcal/Kg})}{4.012 \text{ Kg}}$$

$$H_{\text{vapor}} = 137.80 \text{ Kcal/Kg}$$



### Tabla de Resultados

Corrida	Tiempo min.	T vap °C	T agua °C	T mez °C	M agua Kg	M vap Kg	M mez Kg	H agua Kcal/Kg	H mez Kcal/Kg	H vap Kcal/Kg
1	3	124	21.0	73	5	4.012	9.012	21	73	137.80
2	3	128	21.0	76.0	5	4.100	9.100	21	76	143.07
3	3	127	21.0	75.0	5	4.090	9.090	21	75	141.01

#### Balance en el tubo muestra

$$Q = M \text{ cond } ( H \text{ vap } - H \text{ cond } )$$

$$H \text{ cond } = C_p \text{ agua } ( T \text{ cond } - T_o )$$

$$m \text{ cond } = \frac{M \text{ cond}}{t}$$

$$M \text{ cond } = V \text{ cond } \rho \text{ cond}$$

$$M \text{ cond } = ( 0.050 \text{ Lt } ) ( 1 \text{ Kg/Lt } ) = 0.050 \text{ Kg}$$

$$\tau = 5 \text{ minutos } = .05 \text{ H}$$

$$m \text{ cond } = \frac{0.050 \text{ Kg}}{0.05 \text{ H}} = 1.00 \text{ Kg/H}$$

$$0.0833 \text{ H}$$

$$H \text{ cond } = ( 1 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C} ) ( 90 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C} )$$

$$H \text{ cond } = 90 \text{ Kcal/Kg}$$

$$Q = ( 1.00 \text{ Kg/H } ) ( 137.80 \text{ Kcal/Kg} - 90 \text{ Kcal/kg} )$$

$$Q = 48.80 \text{ Kcal/H}$$

$$Q = \frac{\Delta T}{\Sigma R} = \frac{\Delta T}{R_i + R_t + R_k + R_a}$$

$$\Delta T = T_i - T_a$$

$$R_i = 1/h_i A_i$$

$$A_i = \pi D_i L$$

$$h_i = \text{De tablas}$$

$$R_t = ( \ln r_2/r_1 ) / 2\pi L k \text{ tubo}$$

$$R_k = ( \ln r_3/r_2 ) / 2\pi L k \text{ aisl}$$

$$R_a = 1/h_t A_{ext}$$

$$h_t = 9.74 + 0.07 \Delta t$$

$$A_{ext} = \Pi D_{ext} L$$

En donde

$\Sigma R$  = Sumatoria de resistencias

$T_i$  = Temperatura interna

$T_a$  = Temperatura ambiente

$h_i$  = Coeficiente de película

$A_i$  = Area interna del tubo

$r_1$  = Radio interno del tubo

$r_2$  = Radio externo del tubo

$r_3$  = Radio externo del aislante

$L$  = Longitud del tubo

$k_{tubo}$  = Conductividad térmica del tubo

$k_{aisl}$  = Conductividad térmica del aislante

$A_{ext}$  = Area externa del aislante

$h_t$  = Coeficiente de convección y radiación en  $w/m^2 \cdot ^\circ K$

$\Delta t$  = Diferencia de temperaturas entre la superficie del aislante y el aire circundante en  $^\circ K$

$Q$  = Perdidas de calor en  $w$

Sustituyendo valores

$$h_i = 5000 \text{ Kcal/H m}^2 \cdot ^\circ C \quad \text{De Tablas}$$

$$D_i = 1.049 \text{ plg} \times \frac{1 \text{ m}}{39.37 \text{ plg}} = 0.0266 \text{ m}$$

$$A_i = \Pi(0.0266 \text{ m})(1.20 \text{ m}) = 0.10028 \text{ m}^2$$

$$R_i = 1 / ( 5000 \text{ Kcal/H m}^2 \cdot ^\circ C ) ( 0.10028 \text{ m}^2 )$$

$$R_i = 0.001994 \text{ h } ^\circ C/\text{Kcal}$$

$$r_1 = D_i/2 = 0.0266 \text{ m}/2 = 0.0133 \text{ m}$$

$$De = 1.315 \text{ plg} \times \frac{1 \text{ m}}{39.37 \text{ plg}} = 0.0334 \text{ m}$$

$$r2 = De/2 = 0.0334 \text{ m}/2 = 0.0167 \text{ m}$$

$$k \text{ tubo} = 38.66 \text{ Kcal/H m}^\circ\text{C} \rightarrow \text{De tablas}$$

$$Rt = \ln(0.0167 \text{ m} / 0.0133 \text{ m}) / 2\pi(1.20 \text{ m}) (38.66 \text{ Kcal/H m}^\circ\text{C})$$

$$Rt = 0.2276/291.49 = 0.00078 \text{ H}^\circ\text{C/Kcal}$$

$$\text{Espesor del aislante} = 1 \text{ plg} \times \frac{1 \text{ m}}{39.37 \text{ plg}}$$

$$x = 0.0254 \text{ m}$$

$$r3 = r2 + x$$

$$r3 = 0.0167 \text{ m} + 0.0254 \text{ m} = 0.0421 \text{ m}$$

$$Rk = \ln(0.0421 \text{ m}/0.0167 \text{ m}) / 2\pi(1.20 \text{ m}) (k \text{ aisl})$$

$$Rk = 0.924639/7.5398 \text{ k aisl}$$

$$D \text{ ext} = r3 \times 2$$

$$D \text{ ext} = 0.0421 \times 2 = 0.0842 \text{ m}$$

$$\text{Temperatura de superficie del aislante} = 40^\circ\text{C} + 273$$

$$T \text{ aisl} = 313 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$\text{Temperatura del aire} = 21 \text{ }^\circ\text{C} + 273$$

$$T \text{ aire} = 294 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$ht = 9.74 + 0.07 (313-294)$$

$$ht = 12.95 \text{ w/m}^2\text{ }^\circ\text{K}$$

$$ht = 11.137 \text{ Kcal/H m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$A \text{ ext} = \pi (0.0842 \text{ m}) (1.20 \text{ m})$$

$$A \text{ ext} = 0.31742 \text{ m}^2$$

$$Ra = 1/(11.137 \text{ Kcal/h m}^2\text{ }^\circ\text{C}) (0.31742 \text{ m}^2)$$

$$Ra = 0.33515 \text{ H}^\circ\text{C/Kcal}$$

$$Q = \Delta T / (Ri + Rt + Rk + Ra)$$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior tenemos que

$$28.68 = (127 - 21) / 0.001994 + 0.00078 + (0.12263 / k \text{ aisl}) + 0.28287$$

$$28.68 = 106 / 0.285644 + 0.1226 / k \text{ aisl}$$

Resolviendo esta ecuación tenemos que

$$k \text{ aisl} = 0.036 \text{ Kcal/H m } ^\circ\text{C}$$

#### Tabla de Resultados

No. Tubo	Corrida No.	Tiempo min	Presion vapor Kg/cm <sup>2</sup>	Temp. vapor °C	Temp. tubo °C	Temp. aisl °C	Volum. cond °C	Temp. cond °C	Q Kcal/H	k Hm°C
<b>Fibra de Vidrio</b>										
1	1	5	1.5	126	103	42.0	.068	79	34.48	.0450
1	2	5	1.5	127	102	45.0	.067	80	30.83	.0390
1	3	5	1.5	130	105	44.0	.066	78	31.18	.0386
<b>Lana Mineral</b>										
2	1	5	1.5	145	130	50	.061	60	40.89	.048
2	2	5	1.5	148	135	53	.060	65	34.24	.039
2	3	5	1.5	148	134	51	.063	68	36.21	.042
<b>Fibra Cerámica</b>										
3	1	5	1.5	127	113	40	.050	90	28.68	.0365
3	2	5	1.5	124	112	38	.060	91	39.31	.0530
3	3	5	1.5	125	110	38	.040	90	22.94	.0290

## CAPITULO VI

### PRACTICA

#### Proposición de una práctica para determinar pérdidas de calor y conductividad térmica de materiales aislantes.

##### Perdidas de Calor y Conductividad Térmica

**Objetivo.**- El objetivo de la practica es hacer que los alumnos midan las pérdidas de calor totales de un equipo y las compare con las que se pueden predecir a partir de correlaciones, y las conductividades térmicas de los aislantes empleados.

**Introducción.**- Las pérdidas de calor que puede sufrir un equipo son debidas a tres mecanismos, conducción, convección y radiación. La conducción se lleva a cabo debido a que las moléculas que se mueven más rápido en la parte más caliente de un cuerpo, comunican mediante impactos una parte de su energía a las moléculas adyacentes. Como el calor fluye de la parte caliente a la fría de un cuerpo, las moléculas más activas ceden algo de su energía a las menos activas. El calor se conduce a través de sólidos, líquidos y gases. Es sabido que no todos los materiales son buenos conductores, a los malos conductores se les denomina aislantes. Los buenos conductores se utilizan para transferir calor de un sitio a otro, mientras que los aislantes son utilizados para evitar el paso del calor.

La cantidad de calor que se transmite por conducción puede evaluarse mediante la ley de Fourier

$$Q = -k A \frac{dT}{dx} \dots\dots 1$$

En donde k es el coeficiente de conductividad térmica, A es el área de transferencia, T la temperatura y x el espesor de la capa de material.

La convección implica la transferencia de calor por medio de la mezcla de un fluido con otro, o del movimiento de un fluido debido a las corrientes convectivas resultantes de una

diferencia de temperaturas en el seno del fluido.

La cantidad de calor que se transmite por convección esta dada por la ley de Newton

$$Q = h A ( T_s - T ) \dots\dots 2$$

En donde h es el coeficiente de convección,  $T_s$  la temperatura de la superficie del sólido y T la del fluido.

El calor radiante consiste en ondas electromagnéticas que se desprenden desde un cuerpo, a diferencia de los mecanismos de conducción y convección en donde el transporte de calor requiere de un medio para propagarse, el calor puede propagarse por radiación aún en el vacío.

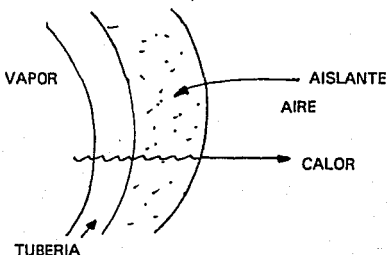
La ecuación básica de la radiación es de Boltzmann

$$Q = A \sigma T^4 \dots\dots\dots 3$$

En donde A es la superficie radiante, T la temperatura y  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann

### Perdidas simultaneas de calor

Cualquier cuerpo situado en la tierra pierde o gana calor, por una combinación de los tres mecanismos descritos. En el caso de una tubería de vapor aislada situada a la intemperie el proceso sería



El vapor transmite calor a la tubería por convección. Posteriormente este calor es transmitido por convección a través de la pared de la tubería y del aislante y finalmente el calor se transmite al aire por convección y radiación.

Las pérdidas simultaneas por conducción, convección y radiación pueden obtenerse por

$$Q = \Delta T / R_c + R_a + R_s \dots\dots\dots 4$$

En donde  $R_c$  es la resistencia por convección entre el vapor y el tubo,  $R_a$  la resistencia del aislante y  $R_s$  la resistencia superficial.

$$R_c = 1 / h_c A_i \dots\dots\dots 5$$

$$R_a = \Delta x_i / k_t A_t + \Delta x_a / k_a A_a \dots\dots\dots 6$$

$$R_s = 1 / ( h_c + h_r ) A_s \dots\dots\dots 7$$

$h_c$  = Coeficiente por convección del vapor al tubo

$A_i$  = Area interna del tubo

$\Delta x_i$  = Espesor del tubo

$k_t$  = Conductividad térmica del tubo

$A_c$  = Area media de transferencia del tubo

$\Delta x_a$  = Espesor del aislante

$A_s$  = Area superficial del aislante

$h_c$  = Coeficiente de convección de la superficie del aislante al aire

$h_r$  = Coeficiente de radiación

Para calcular las pérdidas térmicas de los aparatos que se encuentran en locales cerrados y cuando la temperatura de los aparatos no superan los 150 °C se puede utilizar la fórmula aproximada

$$h_t = h_r + h_c = 9.74 + 0.07 \Delta T \dots\dots\dots 8$$

En donde  $h_t$  es el coeficiente total de transferencia de calor por radiación y convección en  $w/m^2 \text{ } ^\circ K$ . La diferencia de temperaturas  $\Delta T$  es la existente entre la superficie del aparato y el aire circundante en  $^\circ K$ .

En el caso de cuerpos con superficies irregulares el área media de transferencia de calor por conducción esta dada por

$$A_m = \frac{A_{\text{externa}} + A_{\text{interna}}}{2} \dots 9$$

### Equipo utilizado en la práctica

El equipo utilizado en la práctica esta formado por 3 tubos a los que se les puede introducir vapor. Estos cuerpos estan recubiertos en toda su superficie por una capa de aislante, siendo el aislante de cada cilindro diferente. En la parte inferior de los cilindros estan colocadas unas valvulas que permiten el drenaje de vapor condensado. Por otra parte se cuenta con dos termopares electronicos para detectar las temperaturas de superficie de los tubos y los aislantes. Tambien se tiene un calorímetro de barril para determinar el flujo de calor del vapor que entra al sistema.

### Descripción de la práctica

Pasos de la corrida para la determinación del flujo de calor del vapor.

- 1.- Se le pone una cantidad conocida de agua al calorímetro de barril.
- 2.- Se mide la temperatura del agua contenida en el calorímetro de barril.
- 3.- Se cierran todas las llaves de paso.
- 4.- Se suministra vapor al sistema a través de una línea de vapor conectada en la parte superior del sistema.
- 5.- Se abre la llave de entrada al sistema y se espera a que se establezca la presión y la temperatura.



6.- Se abre la llave del tubo que esta conectado al calorímetro de barril y se burbujea vapor de agua, se empieza a tomar el tiempo de la corrida, la presión inicial y la temperatura inicial.

7.- Se cierra la llave del tubo conectado al calorímetro y se toma el tiempo transcurrido, la temperatura y presión final. Se mide el volúmen y la temperatura del agua mas el condensado.

8.- Con los datos obtenidos se hacen los balances de masa y energía correspondientes y se determina el flujo de calor del vapor.

#### Pasos para hacer las corridas para la determinación del calor total y la conductividad térmica de aislamientos.

1.- Se introduce vapor al sistema abriendo la válvula de alimentación.

2.- Se abre la válvula de entrada del tubo aislado donde se va a llevar a cabo la corrida.

3.- Se drenan los condensados que se encuentran en la tubería, por la parte inferior del tubo, abriendo la válvula B y después abriendo la válvula A para drenar el tubo.

4.- Se espera 10 minutos y luego se cierra la válvula B y se abre la válvula A, después de tres minutos, se abre B y se drena el tubo, esta operación se repite hasta que el sistema se haya estabilizado, es decir hasta que ya no haya variación apreciable en la temperatura de los termopares, y con esto se podrá empezar a hacer las corridas.

5.- Una vez bien drenado el tubo, se coloca un recipiente adecuado a la salida del tubo recolector de condensados, se cierra la válvula B y se hecha andar el cronómetro y se miden la temperatura y presión de vapor.

6.- Estabilizar la presión y temperatura del sistema con la válvula de alimentación de vapor.

7.- Después de un tiempo adecuado se observa el nivel de los condensados a través del indicador de nivel, y antes de que se acerque al límite superior se cierra la válvula A y se abre la válvula B para recolectar los condensados. Se mide inmediatamente su temperatura en el recipiente donde se recolectan.

8.- Se toma la lectura de la presión del vapor en el momento final, la temperatura de los termopares, y se determina el volumen de los condensados recolectados.

En la tabla siguiente vierta sus resultados experimentales, y con ello efectue los calculos para obtener Q y k.

Corrida	1	2	3	4	5
Tiempo min					
Temperatura vapor °C					
Presión vapor Kg/cm <sup>2</sup>					
Volúmen de agua Lt					
Temperatura agua °C					
Volúmen mezcla Lt					
Temperatura mezcla °C					
Flujo de calor Kcal/H					

Estos datos son para el experimento del calorímetro de barril.

Aislante: \_\_\_\_\_  
Diámetro del tubo: \_\_\_\_\_  
Longitud del tubo: \_\_\_\_\_  
Temperatura amb. \_\_\_\_\_  
Espesor del aisl. \_\_\_\_\_

Corrida                    1                    2                    3                    4                    5

Tiempo  
min.

Presión de  
vapor  $\text{Kg/cm}^2$

Temperatura  
vapor  $^{\circ}\text{C}$

Temperatura  
tubo  $^{\circ}\text{C}$

Temperatura  
aislante  $^{\circ}\text{C}$

Volúmen  
condensados Lt

Temperatura  
condensados  $^{\circ}\text{C}$

Conductividad  
térmica ( k )

### Trabajo posterior a la práctica.

- 1.- El alumno deberá reportar las pérdidas experimentales de calor en cada uno de los tubos.
- 2.- El alumno entregará las pérdidas de calor teóricas, despreciando la resistencia del tubo metálico y la del vapor.
- 3.- El alumno entregará las pérdidas teóricas de calor sin despreciar ningún término.
- 4.- El alumno obtendrá la conductividad térmica de cada uno de los aislantes de los tubos.
- 5.- El alumno resolverá el cuestionario resuelto.

### Cuestionario

- 1.- ¿Cuál será la ecuación resultante de integrar la ecuación 1 para cuerpos cilíndricos ?
- 2.- ¿Cuál sería la ecuación resultante de integrar la ecuación 1 para varios cuerpos cilíndricos ?
- 3.- ¿Cuál es la correlación apropiada para obtener el coeficiente de convección por condensación del vapor en el interior de tubos verticales ?
- 4.- La ecuación 8 presenta un coeficiente  $h_c$  para convección libre o natural de la superficie del cilindro al aire. ¿Cuál sería la correlación apropiada para este caso particular (diferente a la correlación propuesta) ?
- 5.- En la ecuación 8 se presenta un coeficiente  $h_r$  para radiación. ¿En general como se obtendría ese coeficiente ?
- 6.- ¿Cómo se obtiene el espesor óptimo de un aislante ?
- 7.- ¿Cuál es el valor de la conductividad térmica a  $100\text{ }^\circ\text{C}$  de las siguientes sustancias ?  
Cobre, bronce, hierro galvanizado y asbesto.
- 8.- ¿En la ecuación 3 cuál es el valor de la constante  $\sigma$  ?
- 9.- ¿Qué es el radio crítico ?
- 10.- ¿Cuales son los factores de conversión para pasar de  $\text{Cal/s } ^\circ\text{K cm}$  a  $\text{BTU/H ft } ^\circ\text{F}$ ,  $\text{w/m } ^\circ\text{K}$ ,  $\text{Kcal/H m } ^\circ\text{C}$  ?

11.- ¿ Qué es la conductividad térmica ?

12.- ¿ Que es un aislante ?

**Bibliografía para la practica.**

- F. Kreith, W. Z. Black. La Transmisión del Calor. Alhambra-Madrid-1983.

- Antonio Valiente Barderas. Problemas de Transferencia de Calor. Limusa-México-1988.

- D. Q. Kern. Procesos de Transferencia de Calor. Compañía Editorial Continental-México-1979.

-R.H. Perry. Chemical Engineering Handbook. Mc. Graw Hill-New York-1973.

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### Conclusiones

El equipo utilizado fue diseñado para determinar las conductividades térmicas de diferentes materiales aislantes, para esto se tiene que seguir el procedimiento planteado aquí, y seguir las recomendaciones para el uso del equipo.

La conductividad térmica promedio del aislante de fibra de vidrio obtenida fue de 0.0409 Kcal/H m °C. La especificación de la conductividad térmica del fabricante es de 0.037 a 0.043 Kcal/H m °C según la variación de temperatura.

La conductividad térmica promedio del aislante de lana mineral obtenida fue de 0.043 Kcal/H m °C. Las especificaciones de la conductividad térmica del fabricante es de 0.040 a 0.049 Kcal/H m °C.

La conductividad térmica promedio del aislante de fibra cerámica obtenida fue de 0.0327 Kcal/H m °C. Las especificaciones del fabricante son de 0.031 a 0.038 Kcal/H m °C.

Los resultados obtenidos en estos experimentos pueden salirse de estos rangos, cuando no se sigan las recomendaciones que a continuación se muestran.

#### Recomendaciones

Hacer corridas con un solo tubo, y no con 2 o más simultáneamente, ya que es muy importante considerar que hay transferencia de calor por convección y radiación entre tubos contiguos, y esto puede hacer que nuestros resultados varíen.

Fijar los termopares antes de hacer la corrida, uno de ellos debe estar colocado en la superficie externa del tubo, es decir entre el tubo y el aislante, el otro debe estar colocado en la superficie externa del aislante. Ya que si estos son colocados en el momento de la corrida pueden provocar pérdidas de calor al tratar de colocar el termopar entre el tubo y el aislante.

Revisar que las válvulas, manómetro, termómetro y termopares funcionen correctamente, para esto se sugiere que se alimente vapor y se abran y cierren las siguientes válvulas.

- La de alimentación de vapor.
- La válvula de entrada de cada tubo.
- La válvula de salida del tubo o entrada del tubo recolector de condensados de cada tubo.
- La válvula de salida del tubo recolector de cada tubo.

Revisar que haya incremento de temperatura en los termopares y termómetro.. Verificar que haya incremento en la presión del manómetro.

Revisar que cada uno de los aislantes este colocado perfectamente para evitar pérdidas de calor por algún hueco.

El calorímetro de barril debe estar herméticamente cerrado, ya que de lo contrario puede haber pérdidas de vapor, y los balances de masa serán incorrectos.

Drenar los tubos de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Válvula A = Entrada del tubo recolector
  - Válvula B = Salida del tubo recolector
- 1.- Abrir válvula B hasta que salga todo el vapor y los condensados.
  - 2.- Cerrar la válvula B y abrir válvula A. Esperar 30-60 segundos.
  - 3.- Cerrar válvula A y abrir válvula B rápidamente.
  - 4.- Cerrar válvula B y abrir válvula A.
  - 5.- Abrir válvula B y volver a cerrarla.
  - 6.- Al cerrar B, prender el cronómetro para iniciar la corrida.

Es muy importante hacer la observación de que cuando la caldera arranca, debido a una baja presión, el vapor que entra al tubo lleva una mayor proporción de agua, debida al arrastre de ésta, haciendo variar bastante las lecturas y originando errores muy grandes. Por esto se recomienda dar por terminada la corrida o volverla hacer cuando se oiga que la caldera entra en operación. Es muy importante que no haya variaciones muy grandes de presión y temperatura del vapor alimentado por la caldera, entre el inicio y final de una corrida.

Para la recolección de los condensados se recomienda colocar un vaso de precipitados de 500 ml. a la salida del tubo recolector de condensados. Se debe cuidar que el nivel de condensados observado en el vaso comunicante no se encuentre demasiado cerca del límite superior, también se recomienda hacer corridas entre 2 y 8 minutos. Después de transcurrido este tiempo, se cerrará la válvula de entrada de condensados, y se abrirá la válvula de salida de los condensados, se recolectarán y se medirá inmediatamente la temperatura en el recipiente donde se recolectaron, y se medirá su volumen.

Como medida de seguridad se recomienda usar guantes protectores para abrir y cerrar válvulas.

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



## BIBLIOGRAFIA

- D.Q. Kern. *Procesos de Transferencia de Calor*: Compañía Editorial Continental, México, 1979.
- W.L. McCabe, Smith J.C. , *Unit Operations of Chemical Engineer*. Mc Graw Hill, Kogakusha. Tokyo, 1976.
- Mc Adams W.H. *Heat Transmission*. 3th Ed. Mc Graw Hill, New York, 1954.
- Brown & Marco. *Introduction to Heat Transfer*. 3th Ed. Mc Graw Hill. New York. 1958
- Geghart, B. *Heat Transfer*. 2d Ed. Mc Graw Hill. New York. 1971.
- Fishenden, M. *Transfer Operations*. Mc Graw Hill. Japan. 1972.
- M. Jakob. *Heat Transfer*. Wiley. New York. 1949.
- K.S. Pavlov, P.G. Romakov, A.A. Noskov. *Problemas y ejemplos para el curso de Operaciones Básicas y Aparatos de Tecnología Química*, Editorial Mir. Moscú, 1981.
- R.H. Perry. *Chemical Engineering Handbook*. Mc Graw Hill. New York. 1973.
- Schenck H.J. *Heat Transfer Engineering*. Printice Hall. New Jersey.
- Boswort R.C.L. *Heat Transfer Phenomena*. Wiley. New York. 1952.
- E.R.G. Eckert. *Introducción to the Transfer of Heat and Mass*. Mc Graw Hill. New York. 1950.
- Frank Kreith. *Principles of Heat Transfer*. Mc. Graw Hill. New York. 1973.
- Rohsenow & Hartnett. *Handbook of Heat Transfer*. Mc Graw Hill.
- Welty A.S. et al. *Principios de operaciones unitarias*. Editorial Limusa. México, D.F. 1982.
- Foust A.S. et al. *Principios de Operaciones Unitarias*. Cía. Editorial Continental. México, D.F. 1982.
- Antonio Valiente Barderas. *Problemas de Transferencia de Calor*. Limusa. México, D.F. 1988.
- Eiji Horie, *Ceramic Fiber Insulation Theory and Practice*. The Eibun Press LTD. Tokio, Japon. 1986.

## APENDICE A

### FACTORES DE CONVERSION PARA LAS UNIDADES USADAS PARA LA CONDUCTIVIDAD TERMICA

W/(m · K)	Kcal/m · h · °C	BTU/ft · h · °F	BTU in/ft <sup>2</sup> · h · °F
1	$8.600 \times 10^{-1}$	$5,77886 \times 10^{-1}$	6.93461
1.16279	1	$6.7196 \times 10^{-1}$	8.0635
1.73035	1.48824	1	1.200 X 10
$1.4420 \times 10^{-1}$	$1.240 \times 10^{-1}$	$8.333 \times 10^{-2}$	1

## APENDICE B

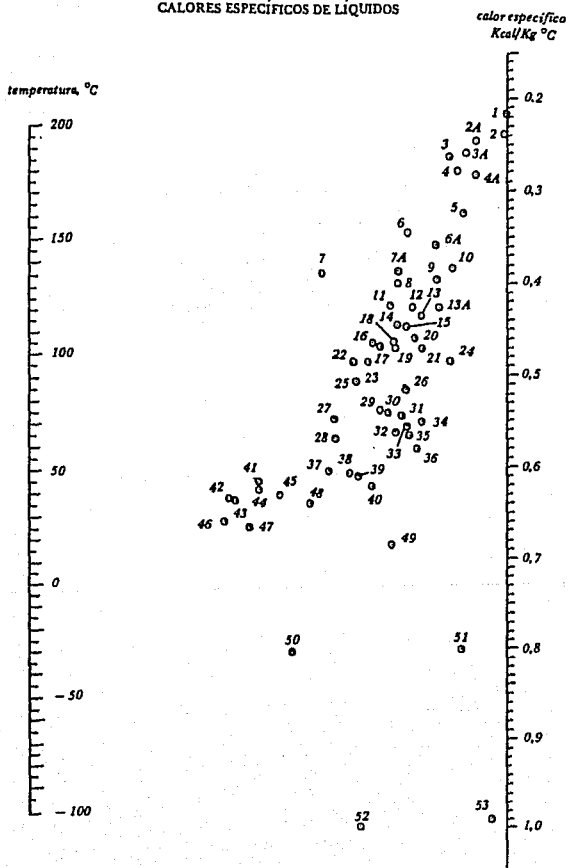
Coeficientes aproximados de película

$$h_i \text{ ó } h_o \quad \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

<i>Sin cambio de estado</i>	
Agua	1450 a 9760
Gases	15 a 250
Solventes orgánicos	500 a 2500
Aceites	50 a 585
<i>Condensación</i>	
Vapor	5000 a 15000
Solventes orgánicos	750 a 2500
Aceites ligeros	1000 a 2000
Aceites pesados (vacío)	100 a 250
Amoniaco	2500 a 5000
<i>Evaporación</i>	
Agua	4000 a 9760
Solventes orgánicos	500 a 1500
Amoniaco	1000 a 2000
Aceites ligeros	750 a 1460
Aceites pesados	50 a 250

## APENDICE C

### CALORES ESPECÍFICOS DE LÍQUIDOS



Fuente: J.H. Perry, *Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill. Nueva York, 5a. ed. 1969.