Cada cara de flujo de la placa tiene un Area A, que se le llamará: Area de flujo, porque a través de ella fluye el calor: Q .

En régimen permanente, es decir cuando T_o y T no cambian de valor, la siguiente ecuación fundamental de la conducción se cumple:

$$H = \frac{Q}{t} = -kA\frac{\Delta T}{X} \quad \ldots\ 1\text{-}13\text{-}A\text{-}1$$

H representa la velocidad del flujo térmico y sus unidades son: $\frac{\text{unidades de calor}}{\text{unidad de tiempo}}$.

Q es la cantidad de calor total que fluye por la placa durante el tiempo t.

k es la constante de proporcionalidad de la ecuación fundamental y se llama: Conductividad térmica, y es una propiedad física, característica del material de que esté hecha la placa. Los buenos conductores del calor tienen conductividades térmicas muy grandes, comparadas con las de los malos conductores del calor, llamados también: Aisladores térmi-

cos.

A es el área del flujo térmico de la placa y X es su espesor.

ΔT es la diferencia de temperaturas entre las dos caras de la placa, dada por: $T-T_o$.

El signo menos de la ecuación se agrega, para que H o Q sean positivas, pués ΔT es negativa, ya que T es menor que T_o.

La conductividad térmica k de una sustancia o de un material, es una medida de su capacidad para conducir calor y se expresa mediante la siguiente relación:

$$k = \frac{Q\ X}{At\ \Delta T} \quad \ldots\ 1\text{-}13\text{-}A\text{-}2$$

Naturalmente que esta expresión se obtiene al despejar k de la ecuación: 1-13-A-1.

En el sistema inglés, las unidades de k se obtienen al sustituir cada variable por sus unidades respectivas:

$$\frac{\text{B.T.U. - Pié}}{\text{Pié}^2\text{-seg-}^o\text{F}}$$

Para el sistema métrico se hará lo mismo:

$$\frac{\text{Kcal-M}}{M^2 - \text{seg-}^oC}$$

o también:

$$\frac{\text{Cal - cm}}{cm^2 - \text{seg-}^oC}$$

Conocido el valor de la conductividad térmica de un material dado con sus respectivas unidades, se podrá convertir a otras unidades siguiendo los pasos del método típico de conversión de unidades seguido hasta aquí.

Un factor de conversión de k entre el sistema métrico y el inglés, es:

$$1 \frac{\text{B.T.U. - pulg}}{\text{Pié}^2\text{-h-}^oF} = 3.445 \times 10^{-5} \frac{\text{Kcal - M}}{M^2\text{-seg-}^oC}$$

A continuación se muestra la tabla de conductividades térmicas para diferentes materiales.

TABLA 1-13-A-1

Sustancia	k: B.T.U.-Pulg/Pié^2-h-^oF	k: Kcal-M/M^2-seg-^oC
Aluminio	1451	5.0×10^{-2}
Latón	750	2.6×10^{-2}
Cobre	2660	9.2×10^{-2}
Plata	2870	9.9×10^{-2}
Acero	320	1.1×10^{-2}
Asbesto	4.0	1.4×10^{-4}
Ladrillo	5.0	1.7×10^{-4}
Concreto	12.0	4.1×10^{-4}
Vidrio	7.3	2.5×10^{-4}
Aire	0.16	5.3×10^{-6}
Agua	4.15	1.4×10^{-4}
Corcho	0.30	1.0×10^{-5}

La ecuación fundamental de la conducción del calor, también se aplica para barras rectas, según muestra la figura siguiente:

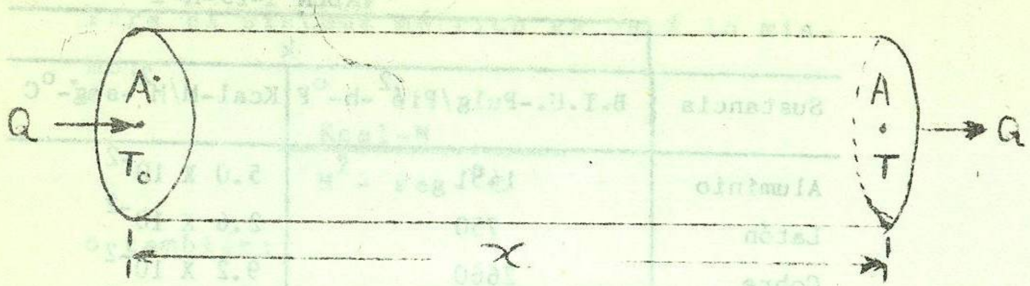


Fig. 1-13-A-2

B.- TRANSMISION DE CALOR POR CONVECCION: En éste metodo, la transferencia de calor se realiza mediante el movimiento de las moléculas de un fluído: líquido o gas; partiendo de una superficie caliente a una parte fría o menos caliente.

La convección difiere de la conducción, en que: En la conducción el material no se mueve y enla convección sí.

Entonces, daremos la siguiente definición: La convección es un proceso en el

cual, el calor se transfiere mediante el movimiento real de un fluído.

En éste método de transferencia del calor, juegan un importante papel las llamadas: Corrientes de convección, ya sea de un líquido o de un gas que absorben energía calorífica en un lugar y luego se mueve a otro sitio, donde libera el calor a la porción más fría del fluído. Por ejemplo: El aire que rodea la superficie caliente de un calentador tubular (dentro de sus tubos puede circular agua caliente o gases calientes o simplemente, puede tener una resistencia eléctrica), al estar en contacto con la superficie caliente de los tubos, comenzará a moverse hacia los alrededores del calentador, alejándose de él, estableciéndose así, un cambio de aire frío por caliente en lugares un poco alejados del calentador, siendo sustituído el aire caliente por el frío, cerca de la superficie de los tubos. Este movimiento continuo del aire constituye: Corrientes de convección, que por el he--

cho de moverse por una diferencia de -- densidades: El aire caliente es más ligero que el frío, y por lo tanto subirá y el aire frío bajará por ser más pesado; la convección será natural y las corrientes serán de convección natural.

Las corrientes de convección pueden ser también forzadas, como en el caso de -- los calentadores eléctricos que traen - integrado un abanico, el cual hace circular al aire a travéz de la parte caliente del calentador. Se ha llegado -- por experimentación a la ecuación de -- transferencia de calor por convección:

$$H = \frac{Q}{t} = hA\Delta T \quad \ldots \quad 1\text{-}13\text{-}B\text{-}1$$

H es la rapidez de la transferencia del calor por convección y sus unidades --- son: $\frac{\text{unidades de calor}}{\text{unidad de tiempo}}$.

Q es la cantidad de calor transmitida por el fluído en movimiento, durante el tiempo t.

ΔT es la diferencia de temperaturas entre la superficie caliente y el fluído.

A es el Area de transferencia de calor de la superficie caliente.

h es la constante de proporcionalidad - de la ecuación 1-13-B-1 y se llama: coeficiente de convección. Este coeficiente, a diferencia del coeficiente de conductividad, no es una Propiedad del material caliente, ni del fluído transmisor del calor.

El coeficiente de convección h depende de: La geometría del sólido caliente y del acabado de su superficie, de la velocidad del fluído y su densidad, de la conductividad térmica, de las diferencias de temperatura y presión del fluído.

A continuación, se muestran los coeficientes de convección para ciertas geometrías.

TABLA 1-13-B-1

Geometría	$h, \frac{Kcal}{M^2\text{-seg-}^oC}$
Placa Vertical	$(4.24 \times 10^{-4})\sqrt[4]{\Delta T}$
Placa horizontal, la cara hacia arriba.	$(5.95 \times 10^{-4})\sqrt[4]{\Delta T}$
Placa horizontal, la cara hacia abajo.	$(3.14 \times 10^{-4})\sqrt[4]{\Delta T}$
El diámetro D del tubo.	$(1.0 \times 10^{-3})\sqrt[4]{\Delta T}$

Las unidades de h se pueden deducir al despejar h de la ecuación 1-13-B-1:

$$h = \frac{Q}{At\,\Delta T}$$

y sustituir las variables por sus respectivas unidades.

C.- TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION:

En éste método, la transferencia de calor se realiza mediante ondas electromagnéticas. Estas ondas se propagan a la -

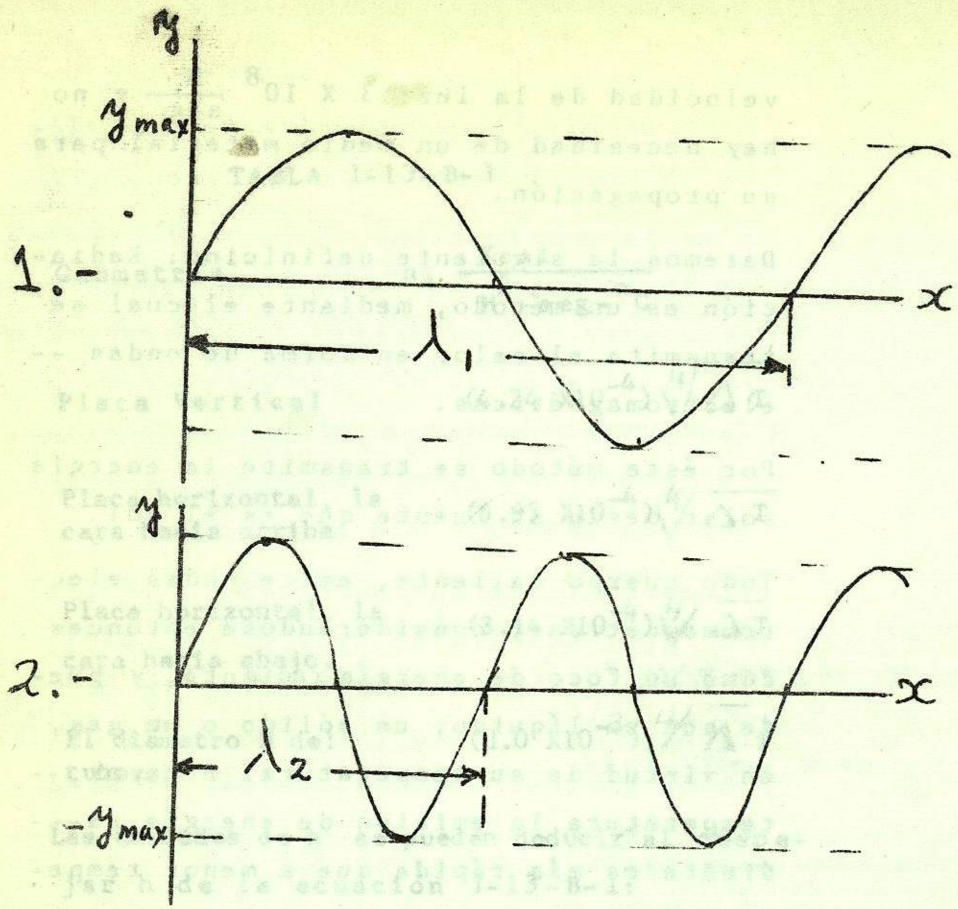
velocidad de la luz: $3 \times 10^8 \frac{M}{seg}$ y no hay necesidad de un medio material para su propagación.

Daremos la siguiente definición: Radiación es un método, mediante el cual se transmite el calor en forma de ondas -- electromagnéticas.

Por éste método se transmite la energía solar desde su fuente que es el sol.

Todo cuerpo caliente, emite ondas electromagnéticas, considerándose entonces como un foco de energía radiante, y puede ser un líquido, un sólido o un gas, en virtud de su temperatura. A mayor -- temperatura la emisión de energía radiante es más rápida que a menor temperatura.

Para tener una idea de las características de una onda en general, contando entre ellas a las ondas electromagnéticas, hagamos los siguientes dibujos:



En el dibujo 1, λ_1 representa la longitud de una onda que viaja a la derecha, a lo largo del eje X. La Ymax representa la amplitud de la onda.

En el dibujo 2, λ_2 representa la longitud de la onda. Ymax es su amplitud.

Observa que la onda 1 es una onda larga pués su λ_1 es mayor que λ_2, la cual corresponde a una onda corta.

Entre más chica sea la longitud de una onda electromagnética, mayor será la energía térmica que transmite.

Los cuerpos muy calientes emiten ondas electromagnéticas mucho más cortas que los cuerpos menos calientes.

Si una barra de hierro se calienta continuamente, al final emitirá radiación visible, de ahí los términos Al rojo y al blanco. En el rojo las ondas son más largas que en el blanco.

Mediciones experimentales demuestran que la velocidad con la cual se irradia energía térmica desde una superficie varía directamente con la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo radiante. Por lo tanto, si se duplica la temperatura de un objeto, la velocidad con la cual emite energía se incrementará 16 veces.

Un factor adicional que debe considerar

se al calcular la rapidez de transferencia de calor por radiación es la naturaleza de las superficies opuestas. Objetos que son buenos emisores de radiación térmica resultan ser buenos absorbedores de radiación. Un objeto que absorbe toda la radiación incidente sobre su superficie se llama: Absorbedor ideal. Tal objeto también será un radiador ideal. En realidad no existe un absorbedor ideal, pero en general, las superficies más negras, serán las que mejor absorban energía térmica. Por ejemplo, una camisa negra absorbe más energía solar que otra más clara: Puesto que la camisa también es un buen emisor, su temperatura extrema será mayor que la temperatura del cuerpo, haciéndola incomoda.

Un absorbedor ideal o radiador ideal es también llamado: Cuerpo negro, por las razones antes mencionadas sobre la camisa.

A la radiación que emite un cuerpo negro se le llama: radiación de cuerpo negro. Aunque tales cuerpos no existen realmente, resulta muy util como un patrón para comparar las capacidades de varias superficies para absorber o emitir energía térmica.

Absorbancia, equivalente a poder emisivo y emisividad, se define como: la medida de la capacidad de un cuerpo para absorber o emitir radiación térmica.

La absorbancia es una cantidad sin unidades, cuyo valor numérico queda comprendido entre 0 y 1, dependiendo de la naturaleza de la superficie. Para un cuerpo negro, la absorbancia es igual a 1 y para una superficie plateada bien pulida se aproxima a cero.

La rapidez de radiación R de un cuerpo, está dada por la siguiente ecuación:

$$R = \frac{E}{tA} = \frac{P}{A} \quad \text{....1-13-C-1}$$

E representa la energía radiante emitida en el tiempo t, a través del área A del cuarpo radiante y P es la potencia radiante.

Como ya se había establecido que la rapidez de la radiación depende de la temperatura T absoluta y de la absorbancia e del cuerpo radiante, se escribirá la siguiente expresión:

$$R = \frac{P}{A} = e\,\sigma\,T^4 \quad .... \text{ 1-13-C-2}$$

Esta ecuación se conoce con el nombre de: Ley de Stefan-Boltzmann.

La constante de proporcionalidad σ es una constante universal e independiente de la naturaleza de la radiación y su valor es: $5.67 \times 10^{-8} \dfrac{\text{Watts}}{M^2 - {}^{o}K}$.

Un cuerpo que está a la misma temperatura que sus alrededores, irradiará y absorberá calor con la misma rapidez.

La siguiente expresión matemática sirve para calcular la rapidez neta de radiación de un cuerpo caliente a sus alrededores:

$$R = e\,\sigma\,(T_1^{\,4} - T_2^{\,4}) \quad ....\text{1-13-C-3}$$

T_1 es la temperatura de la superficie -

caliente y T_2 es la temperatura de la superficie fría. Ambas temperaturas deben estar expresadas en grados absolutos. e es el poder emisivo del cuerpo caliente.

Esta ecuación, es otra forma de expresar la Ley de Stefan-Boltzmann.

1-14 SECCION DE PROBLEMAS RESUELTOS.-

1.- La conductividad térmica del asbesto es $4 \dfrac{\text{B.T.U.-pulg}}{\text{Pie}^2\text{-h-}{}^{o}F}$, expresarla en $\dfrac{\text{Cal-cm}}{\text{cm}^2\text{-seg-}{}^{o}C}$.

Solución.- Partiendo del modelo de conversión de unidades;

$$4\,\frac{\text{B.T.U.-pulg}}{\text{Pie}^2\text{-h-}{}^{o}F} = X\,\frac{\text{Cal-cm}}{\text{cm}^2\text{-seg-}{}^{o}C}$$

$$4\,\frac{\text{B.T.U.}}{\text{Cal}}\;\frac{\text{cm}^2}{\text{Pie}^2}\;\frac{\text{pulg}}{\text{cm}}\;\frac{\text{seg}}{\text{h}}\;\frac{{}^{o}C}{{}^{o}F} = X$$

$$4\,\frac{252\,\cancel{\text{Cal}}}{\cancel{\text{Cal}}}\;\frac{\text{cm}^2}{(30.50\text{cm})^2}\;\frac{2.54\cancel{\text{cm}}}{\cancel{\text{cm}}}\;\frac{\cancel{\text{seg}}}{3600\cancel{\text{seg}}}\;\frac{1.8\,{}^{o}\cancel{F}}{{}^{o}\cancel{F}} = X$$

$$\frac{4 \times 252\ \cancel{\text{cm}^2} \times 2.54 \times 1.8}{930.25\ \cancel{\text{cm}^2} \times 3600} = X$$

$$\frac{4608.6}{3348900} = X = 1.37 \times 10^{-3}$$

o sea:

$$4 \ \frac{\text{B.T.U.-pulg}}{\text{Pie}^2\text{-h-}^{o}F} = 1.37 \ X \ 10^{-3} \ \frac{\text{Cal-cm}}{\text{cm}^2\text{-seg-}^{o}C}$$

2.- Según la tabla 1-13-A-1, la k del acero es ------

$$320 \ \frac{\text{B.T.U.-pulg}}{\text{Pie}^2\text{-h-}^{o}F} \quad \text{o bién: } 1.1 \ X10^{-2} \ \frac{\text{Kcal-M}}{\text{M}^2\text{-seg-}^{o}C}$$

Demostración.- Partiendo del modelo de conver--- sión de unidades:

$$320 \ \frac{\text{B.T.U.-pulg}}{\text{Pie}^2\text{-h-}^{o}F} = X \ \frac{\text{Kcal-M}}{\text{M}^2\text{-seg-}^{o}C}$$

$$320 \ \frac{\text{B.T.U.}}{\text{Kcal}} \ \frac{\text{Pulg}}{\text{M}} \ \frac{\text{M}^2}{\text{Pie}^2} \ \frac{\text{seg}}{\text{h}} \ \frac{^{o}C}{^{o}F} = X$$

$$320 \frac{252 \ \cancel{\text{cal}}}{1000 \ \cancel{\text{cal}}} \ \frac{\cancel{\text{Pulg}}}{39.36 \ \cancel{\text{pulg}}} \ \frac{(3.28 \text{ pies})^2}{\text{Pies}^2} \ \frac{\text{seg}}{3600 \cancel{\text{seg}}} \ \frac{1.8^{o}\cancel{F}}{^{o}\cancel{F}} = X$$

$$\frac{320 \ X \ 252 \ X \ 10.75 \ \cancel{\text{Pies}^2} \ X \ 1.8}{1000 \ X \ 39.39 \ \cancel{\text{pies}^2} \ X \ 3600} = X$$

$$\frac{1560384}{141804000} = X = 1.1 \ X \ 10^{-2}$$

Al sustituir el valor encontrado para - X , en el modelo de conversión, se ha demostrado lo que se pidió.

3.- La pared exterior de un horno de ladrilloa tiene un espesor de 4 pulg. La su-

perficie interior está a una temperatura de 500°F y la exterior a 100°F. ¿Cuánto calor se pierde a través de la pared, si su área es de 20 pies² durante 10 horas?

Solución.- La ecuación fundamental de -- conducción del calor es:

$$\frac{Q}{t} = - \ kA \ \frac{\Delta T}{X}$$

despejando a Q , tenemos:

$$Q = - \ kAt \ \frac{\Delta T}{X}$$

Los datos del problema son: $A = 20$ Pies² $t = 10$ h, $\Delta T = T\text{-}T_o = 100^{o}F - 500^{o}F = - 400^{o}F$ $X = 4$ pulg y la k para el ladrillo según la - tabla 1-13-A-1 es: $5 \ \frac{\text{BTU-Pulg}}{\text{Pie}^2\text{-h-}^{o}F}$

Observa que las unidades de k están en - el mismo sistema que las unidades de los datos. Por lo tanto, sustituyendo las va riables de la ecuación fundamental por - sus valores:

$$Q = - \ 5 \ (20) \ (10) \frac{-400}{4} = 100{,}000 \text{ B.T.U.}$$

Las unidades no se escribieron en la ecuación para no agrandarla y por estar conscientes de que se está trabajando en el mismo sistema, por lo que es lógico esperar que resulten solamente B.T.U. como unidades de la cantidad de calor .

4.- Un extremo de una barra de cobre de 30 cm de longitud y 4 cm² de sección transversal, se coloca en un baño de agua-hielo (0^oC). El otro extremo se coloca en un baño de vapor (100^oC).¿Qué cantidad de calor fluye para la barra durante 30 min?.

Solución.- Partiendo de la ecuación:

$$Q = -kAt \frac{\Delta T}{X}$$

En base a la tabla 1-13-A1, la k del cobre es: $9.2 \times 10^{-2} \frac{Kcal\text{-}M}{M^2\text{-}seg\text{-}^oC}$ y los datos son:

$$Q = 30 \text{ cm} = .30 \text{ M}, \quad A = 4 \text{ cm}^2 = 4 \times 10^{-4} \text{ M}^2$$

$$t = 30 \text{ min} = 0.5 \text{ h}, \quad \Delta T = T - T_o = 0^oC - 100^oC = -100^oC$$

Observa que cada dato hubo de transformarse para que sus unidades estén acordes con las unidades de k, y así, no tener que escribirlas en la ecuación. Sustituyendo

las variables por sus valores respectivos:

$$Q = (-9.2 \times 10^{-2})(4 \times 10^{-4})(0.5)\frac{-100}{.30}$$

$$Q = 6.13 \times 10^{-3} \text{ Kcal} = 6.13 \text{ Cal}$$

5.- Una pared plana vertical de 4 M² de área se mantiene a una temperatura constante de 150^oC y el aire que la rodea sobre ambas caras está a 30^oC ¿Cuánto calor se pierde en ambos lados de la pared durante 5 horas, por convección natural?

Solución.- Usando la ecuación:

$$\frac{Q}{t} = hA\Delta T \text{ , y despejando } Q \text{ ,}$$

$Q = hAt\Delta T$, antes de sustituir, hemos de calcular h. Según la tabla 1-13-B-1, para paredes verticales, $h = 4.24 \times 10^{-4}\sqrt[4]{\Delta T}$ y como $\Delta T = 150^oC - 30^oC = 120^oC$, entonces:

$$h = 4.24 \times 10^{-4}\sqrt[4]{120} = 4.24 \times 10^{-4} \times 3.31$$

$$h = 14.03 \times 10^{-4} = 1.403 \times 10^{-3} \text{ Kcal/M}^2\text{-seg-}^oC$$

y los datos del problema son: