

TRANSMISIÓN DEL CALOR

INTRODUCCIÓN

Calor: es energía que se transmite de un cuerpo a otro, o de una parte a otra de un mismo cuerpo, en virtud de la existencia de un gradiente térmico y por ello, cuando éste desaparece cesa la transmisión de calor. Los mecanismos de propagación del calor son: conducción, convección y radiación.

CONDUCCIÓN

Si un cuerpo de longitud L y sección transversal A tiene uno de sus extremos a la temperatura T_1 y el otro a la T_2 y se aísla adecuadamente en su longitud L , para que la energía térmica sólo pueda seguir el camino que le ofrece el volumen $A \cdot L$, si se supone que $T_2 > T_1$, la versión finita de la Ley de Fourier establece que cuando se ha alcanzado el régimen estacionario -téngase en cuenta que al poner el cuerpo en contacto con los focos a temperaturas T_i , se requiere cierto tiempo hasta que cada sección alcanza la temperatura que corresponde al gradiente térmico $(\frac{T_2 - T_1}{L})$ -, la velocidad de transmisión del calor H_s viene dada por:

$$H_s = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{L}$$

siendo:

H_s : flujo de calor en la unidad de tiempo (*Heat_{speed}*).

λ : coeficiente de conductividad térmica (NBE-CT-79). La Norma Básica de Edificación (NBE), correspondiente al comportamiento térmico de los edificios (CT) de 1979, ha sido sustituida por el Código Técnico de la Edificación (CTE). Así pues, la realización de los cálculos de aislamiento en un proyecto de ejecución deben realizarse teniendo en cuenta sus artículos. La cita a la NBE-CT 79 en estas notas obedece a su claridad conceptual.

A : sección transversal del elemento de longitud L que conecta los focos a temperatura T_1 y T_2 .

T_2 y T_1 : temperaturas,

L : longitud del elemento conductor.

La temperatura marca el nivel de agitación molecular; se

Cap. VII: Termodinámica. Lección 4: Transmisión del calor

demostró que la energía asociada a la velocidad v_x , para una molécula de gas ideal era:

$$E_c^{v_x} = \frac{1}{2} m v_x^2 = \frac{1}{2} kT$$

la dependencia de la energía de una molécula con la temperatura es extensible al átomo; al aumentar T aumenta la energía del átomo, con lo que éste aumenta la amplitud de su vibración en torno a la posición de equilibrio, colisionando con los átomos vecinos y transmitiendo así la temperatura

La transmisión de calor por conducción tiene lugar, fundamentalmente, como transferencia de energía. Los átomos vibran en sus posiciones de equilibrio; al aumentar su agitación chocan con las moléculas vecinas, con lo que transmiten energía cinética -inferior a la que tenían antes del choque-, por ello la temperatura será inferior también. Los metales conductores tienen cargas libres, por lo que al adquirir energía cinética se desplazan por el conductor, chocando con los átomos fijos, con lo que les ceden energía cinética, pero no toda, lo que explica que la temperatura disminuya a lo largo del cuerpo transmisor de calor. Hay, pues, también, cierta transferencia de materia en la conducción.

Ecuación de dimensiones:

Dado que en la ecuación de dimensiones del coeficiente de conductividad térmica " λ " va a intervenir el tiempo y la temperatura, es preciso distinguir los símbolos de ambas magnitudes. No habiendo un criterio universalmente aceptado al respecto, se utilizará la letra "t" para el tiempo.

$$[\lambda] = \frac{[H_s]L}{[A]T} = \frac{\left[\frac{Q}{t}\right]L}{L^2T} = \frac{\left[\frac{E}{t}\right]L}{L^2T} = \frac{\left[\frac{W}{t}\right]L}{L^2T} = W t^{-1} L^{-1} T^{-1} = M L T^{-2} L t^{-1} L^{-1} T^{-1} = M L T^{-3} t^{-1}$$

donde Q es el símbolo de la magnitud calor, E, el de la energía y W, el del trabajo.

No obstante, como ocurre con otras magnitudes físicas, las unidades del coefte. de conductividad térmica se establecen a

Cap. VII: Termodinámica. Lección 4: Transmisión del calor

partir de las unidades derivadas que tienen nombres y símbolos especiales. Así, en función de la ud. histórica del calor, se emplea kcal/(h·m·°C) y en el S.I., W/(m·K).

En el denominador de la ud. S.I. no hay milikelvin (mK), como podría interpretarse si no se escribiera el punto intermedio entre el símbolo del metro y el de la temperatura absoluta.

Ley de FOURIER en forma diferencial:

$$H_s = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

flujo de calor en sentido negativo del gradiente de temperatura.

La transmisión de calor por conducción, por unidad de longitud "u" en un tubo de radio interior "R₁" y exterior, "R₂" vendrá dada por:

$$H_s = -\lambda 2\pi u \frac{dT}{dr}$$

integrando,

$$H_s \int_{r=R_1}^{r=R_2} \frac{dr}{r} = -2\pi\lambda u \int_{T=T_i}^{T=T_{ext}} dT$$

y en definitiva:

$$H_s L \frac{R_2}{R_1} = 2\pi u \lambda (T_{int.} - T_{ext.}) = 2\pi\lambda u (T_{int.} - T_{ext.})$$

de donde se despejaría la expresión para "H_s".

Aplicación al caso:

Deducir la transmisión de energía térmica por conducción para una tubería de fibrocemento [0,47 kcal/(h·m·°C), Φ_{int.}=100 mm, espesor: 8 mm], por la que circula agua a 18 °C, cuando la temperatura exterior es de 4 °C. (Respuesta: 278 kcal/h).

Aplicación:

Cap. VII: Termodinámica. Lección 4: Transmisión del calor

Comparación entre el flujo de calor a través del hueco de una ventana, constituida por una lámina de cristal (4 mm), y a través del cerramiento (12 cm de ladrillo macizo) en el que está inserta.

TRANSPARENCIA CON COEFICIENTES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

CONVECCIÓN

Es el mecanismo predominante de transmisión de calor en los fluidos y tiene como fundamento físico la dependencia de la densidad de éstos con la temperatura. Se trata de una transferencia de materia.

Ejemplos: calefacción convencional, congelación superficial de lagos y embalses, brisas de playa y de montaña.

El agua es la única sustancia que tiene un coeficiente negativo de dilatación térmica, denominándose dilatación anómala del agua al fenómeno correspondiente. En efecto, dado que la densidad del agua aumenta entre 0 y 3,98 °C, alcanza el máximo en esta última temperatura (1000 kg/m³, 1 g/cm³) y disminuye por encima de 3,98 °C, resulta que para una masa determinada, la variación del volumen con la temperatura es recíproca, con lo que el volumen disminuye hasta 3,98 °C, donde presenta el valor mínimo.

Debido a que la densidad del agua alcanza el máximo a 3,98 °C, cuando el agua superficial de un lago, embalse, etc., se enfría, su densidad aumenta y por tanto se hunde, siendo remplazada por agua menos densa -por estar más caliente-, y que al llegar a la superficie del embalse, lago, etc., se enfría y le sucede lo mismo. Se genera así un movimiento natural de convección -en masa, se suele decir también-, del agua, que sólo finaliza cuando toda ella se ha enfriado hasta 3,98 °C.

Si el enfriamiento ambiental continúa, el agua superficial disminuye su temperatura y terminará por solidificarse. La capa de hielo así formada protegerá al agua situada debajo de la que se ha transformado en hielo, aunque nada impide que ésta aumente su espesor. En todo caso, el agua situada debajo de la banquisa estará a 4 °C y esa temperatura es suficiente para mantener la vida de las especies acuáticas.

Las brisas son vientos locales propios de costas y

Cap. VII: Termodinámica. Lección 4: Transmisión del calor

montañas que obedecen a la variación de la densidad del aire con la temperatura. La energía radiante del Sol calienta de forma distinta el agua y el terreno, debido a su distinto calor específico. En efecto, el del agua es $1 \text{ cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$, siendo éste el segundo valor más alto entre las sustancias conocidas, sólo después del hidrógeno.

Por el contrario el calor específico de la arena de la playa es de $0,22 \text{ cal}/(\text{g } ^\circ\text{C})$. Debido a la diferencia entre estos valores, la arena se calienta mucho más rápido que el agua y calienta el aire situado encima de ella, que disminuye su densidad y por ello, asciende en la atmósfera, siendo ocupado su lugar por aire más frío procedente del mar, en una nueva manifestación de la convección natural antes descrita. Se genera así la corriente de aire fresco procedente del mar que se conoce como brisa.

Hay también transmisión de calor por convección entre la superficie de un cuerpo y la de un fluido, siempre que sus temperaturas sean diferentes, la expresión que proporciona dicha transmisión de calor es la ley de Newton (HDEZ. GORÍBAR, p. 176):

$$H_s = hA(T_2 - T_1)$$

H_s : energía transmitida por convección en la unidad de tiempo

h : coeficiente de convección térmica (HDEZ. GORÍBAR).

h depende de la rugosidad de la superficie, así como de la velocidad del viento. Los valores siguientes se deben a HOUGHTEN Y MCDERMOTT:

$$h = 1,4 + 0,28v, \text{ superficies lisas}$$

$$h = 1,6 + 0,3v, \text{ madera y yeso}$$

h también depende de la orientación de la superficie, como se

verá a continuación.

La NBE-CT-79 considera h_i y h_e y los denomina coeficiente superficial de transmisión de calor y corresponden al cerramiento-ambiente interior y al cerramiento-ambiente exterior. Sus inversos se denominan resistencia térmica superficial. La citada norma contiene unas tablas que proporcionan los valores de los coeficientes superficiales en función de la orientación del elemento superficial de cerramiento (Fachada, cubierta, etc.)

La convección es un mecanismo importante de pérdida de calor de las personas. Cuando el aire está en reposo, se adhiere a la piel, formando una delgada película, a través de la cual el calor se pierde por conducción, con lo que se produce un eficaz aislamiento. No lo hay, por el contrario, si la piel desnuda se expone a una corriente de aire, ya que la velocidad de éste lo despega y la pérdida repentina del calor corporal puede causar, por ejemplo, una contracción muscular.

La tabla siguiente muestra la influencia de la velocidad del aire en contacto con la piel sobre el valor de h . En los Estados Unidos de Norteamérica es frecuente que los programas de información meteorológica proporcionen el "windchill" (efecto enfriador del viento), que tiene en cuenta la temperatura que la velocidad del aire deja en la piel. En España, hace ya algunos años que se utiliza el término "Temperatura de sensación" para tener en cuenta el citado efecto del aire.

¡Error! Marcador no definido. COEFICIENTE DE CONVECCIÓN (h) (kcal/s m ² °C)	VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)
$1.7 \cdot 10^{-3}$	0
$3.4 \cdot 10^{-3}$	1
$8.5 \cdot 10^{-3}$	5

RADIACIÓN

Emisión

*La ley de Stefan-Boltzmann establece que todo cuerpo con

Cap. VII: Termodinámica. Lección 4: Transmisión del calor

temperatura absoluta superficial no nula emite energía radiante en forma de ondas electromagnéticas:

$$H = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

siendo e , el coeficiente de emisividad, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, "A", la superficie del cuerpo emisor y T la temperatura absoluta.

Absorción

*La ley de Stefan-Boltzmann también proporciona la energía absorbida por un cuerpo procedente de la energía emitida por el ambiente:

$$H = a \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{amb}^4$$

donde "a" es el coeficiente de absorción, de igual valor que el de emisividad. Debido a esta coincidencia se comprende que los cuerpos de colores oscuros sean los que más energía absorban y también, los que más energía emitan y que por ello, se prefieran prendas claras de vestir en el verano, y oscuras en invierno.

Emisividad y absorcividad

*Si se tiene un cuerpo de temperatura "T", superficie exterior "A", coefte. de emisividad "e", y coefte. de absorción "a" en un ambiente a temperatura "T_{amb}" se tiene:

$$H_{emit.} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad H_{abs.} = a \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{amb}^4$$

si se supone que se alcanza el equilibrio para la temperatura "T_{equ.}", deberá ser:

$$H_{emit.} = H_{abs.} \rightarrow e \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{equ.}^4 = a \cdot \sigma \cdot A \cdot T_{equ.}^4 \rightarrow a = e$$

*cuerpo negro= emisor ideal= radiador ideal, $e=a=1$.

Los cuerpos blancos absorben poco y consiguientemente, emiten poca energía. Encalado de casas en Andalucía, encalado del tronco de árboles y de las ramas madres (GIL ALBERT, 130).

Albedo

Albedo: fracción de energía reflejada por un cuerpo (1-e).

¡Error! Marcador no definido.MATER IAL	ALBEDO
cultivos	0.10-0.25
arena	0.20-0.40
planeta Tierra	0.30
nieve	0.80-0.90

Referencia: TOHARIA, 11.

Aplicación: cálculo energía radiante emitida por enfriamiento de una superficie cultivada cuando su temperatura es de 15°C y la del ambiente es de -3°C.

$$H = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 T^4} \cdot 0.85 [(273.15 + 15)^4 - (273.15 - 3)^4] T^4 = 75,56 \frac{W}{m^2} \frac{1 \cdot J/s}{1 \cdot W}$$

Debido a que no se ha logrado que el editor de ecuaciones permita la inserción del espacio que, según el R.D. 2032/2009, debe haber entre el módulo de una magnitud física y la unidad en la que se expresa, se han utilizado puntos para señalar el cumplimiento del citado requisito.

$$H = 75,56 \frac{W}{m^2} \frac{1 \cdot J/s}{1 \cdot W} \frac{1 \cdot cal}{4,186 \cdot J} \frac{1 \cdot kcal}{10^3 \cdot cal} \frac{10^4 \cdot m^2}{1 \cdot ha} \frac{3600 \cdot s}{1 \cdot h} = 649833 \frac{kcal}{ha \cdot h} \frac{1 \cdot Gcal}{10^3 \cdot kcal} = 650 \frac{Gcal}{ha \cdot h}$$

Según Bouchet, en una noche de enfriamiento radiativo pueden perderse hasta 10^6 kcal/ha·h = 1 Gcal/(ha·h) (DÍAZ QUERALTO, p.85).

Ley de WIEN

$$\lambda \cdot T = 2.898 \text{ mmK}$$

en la expresión precedente, λ representa la longitud de onda de la radiación emitida por el cuerpo de temperatura superficial T.

Cap. VII: Termodinámica. Lección 4: Transmisión del calor

Aplicación: energía radiante emitida por el Sol

Suponiendo que el Sol (5.500 °C, 696 Mm, $6,96 \cdot 10^8$ m, SERWAY) es un cuerpo negro, calcular la energía radiante que llega a la Tierra (Distancia Sol-Tierra 150 Gm) y expresarla en múltiplos de vatio (Respuesta: 383 YW).

Ejercicio: Utilizar la denominada "constante solar" para comprobar la temperatura del Sol.

Deducir la temperatura que debe tener el Sol para que la constante solar -energía que llega a la posición del Universo en la que está la Tierra- sea de 1353 W/m^2 y expresarla después en función de la ud. histórica del calor ($1,94 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$). La energía al nivel de la superficie terrestre no es esta, sino bastante inferior.

TRANSMISIÓN DE CALOR A TRAVÉS DE UN CERRAMIENTO

Se deducirá la ley que rige la transmisión de calor por convección -interior y exterior- de un cerramiento y por conducción a través de las capas "i" del cerramiento definidas térmicamente por su conductividad térmica (λ_i) y espesor (L_i).

Convección exterior

$$Q_{cv} = h_e A (T_{amb.ext.} - T_{0.1})$$

Conducción, primera capa

$$Q = \lambda_1 A \frac{(T_{0.1} - T_{1.2})}{L_1}$$

Conducción, segunda capa

$$Q = \lambda_2 A \frac{(T_{1.2} - T_{2.3})}{L_2}$$

Conducción, tercera capa

$$Q = \lambda_3 A \frac{(T_{2-3} - T_{3-0})}{L_3}$$

Transmisión por convección interior

$$Q_{cv} = h_i A (T_{3-0} - T_{amb.i})$$

Llevando al primer miembro lo que no son temperaturas resulta:

$$\frac{Q}{Ah_e} = (T_{amb.e} - T_{0-1})$$

$$Q A \frac{L_2}{\lambda_2} = T_{1-2} - T_{2-3}$$

$$Q A \frac{L_1}{\lambda_1} = T_{0-1} - T_{1-2}$$

$$Q A \frac{L_2}{\lambda_2} = T_{1-2} - T_{2-3} \text{ ¡Error! Marcador no definido.}$$

$$Q A \frac{L_3}{\lambda_3} = T_{2-3} - T_{3-1}$$

$$\frac{Q}{h_i A} = (T_{3-1} - T_{amb.i})$$

y sumando,

$$Q A \left(\frac{1}{h_e} + \sum_{i=1}^{i=3} \frac{L_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i} \right) = T_{amb.e} - T_{amb.i}$$

despejando "Q", se obtiene:

$$Q = \frac{A}{\frac{1}{h_e} + \sum_{i=1}^3 \frac{L_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i}} (T_{amb.e} - T_{amb.i})$$

El denominador se denomina resistencia térmica del cerramiento, por lo que podría escribirse:

$$Q = \frac{A}{R_{T,ceram.}} (T_{amb.e} - T_{amb.i})$$

y llamando "K" a la inversa de la resistencia térmica del cerramiento, se obtiene:

$$Q = AK (T_{amb.e} - T_{amb.i})$$

K es el denominado coefte. de transmisión de calor (NBE-CT-79).

BIBLIOGRAFÍA (SERÁ COMPLETADA, D.m., lo antes posible).

NBE CT-79, Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda, BOE n° 74, del 28 de marzo de 2006.

Forrester, Frank H., "1001 questions answered about the wheather", Dover Publications, Inc, New York, 1981.

Hernández Goríbar, E., "Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración", Editorial Limusa, México, 1987.

HOUGHTEN Y MCDERMOTT

Gil-Albert Velarde, Fernando, "La ecología del árbol frutal", Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, MAPA, MundiPrensa, 1989.

Cap. VII: Termodinámica. Lección 4: Transmisión del calor

Toharia, M., "Predecir el tiempo: tarea difícil, tarea importante", Salvat Editores, S.A. Barcelona, 1981.

Díaz Queralto, Francisco, *societatis Iesus, s.I.*, "Práctica de la defensa contra heladas", Dilagro, S.A. de ediciones, Lérica, 1983.

Jansa Guardiola, "Tratado de Meteorología Teórica", Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones.

Serway, Raymond, A., "Física", Nueva Editorial Interamericana, S.A. de C.V., México, D.F., 1ª edición en español, 1985.

UNIVERSIDAD DE LEÓN. Prof. Dr. Miguel Celemín Matachana.