

IV.- TRANSMISIÓN DE CALOR

<http://libros.redsauce.net/>

IV.1.- CONDUCCIÓN TÉRMICA

La temperatura es una propiedad intrínseca de la materia, que indica el nivel de energía de sus moléculas. Cuanto más elevada es la temperatura, mayor es la energía cinética o actividad molecular de la sustancia en cuestión. La conducción molecular del calor es simplemente una transferencia de energía debida a una diferencia de temperaturas, entre moléculas de una sustancia sólida, líquida o gaseosa.

La transferencia de calor por conducción se evalúa por medio de la ley de Fourier, de la forma:

$$Q_k = -k A \frac{dT}{dx}$$

El flujo de calor q_k es positivo cuando el gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$ es negativo, resultado que es congruente con el Segundo Principio de la Termodinámica, e indica que el calor fluye en la misma dirección que las temperaturas decrecientes.

La conductividad térmica k es una propiedad del material que caracteriza su posibilidad de conducir o transmitir calor; en la Tabla IV.1 se indican algunos valores de conductividades térmicas.

Otra forma de la ecuación de Fourier, es $Q_k = \frac{k A}{L} (T_1 - T_2)$, en la que el término $\frac{L}{k A}$ se denomina *resistividad térmica* R_k .

En *régimen permanente* las temperaturas varían de un punto a otro del sistema, pero la temperatura de cada uno de los puntos permanece inalterable en el tiempo.

Tabla IV.1.- Conductividad térmica k de algunos materiales comunes

Materiales	Btu / ft.h. °F	W / m°C
Gases a presión atmosférica	0,004 a 0,7	0,007 a 1,2
Materiales aislantes	0,01 a 0,12	0,02 a 0,21
Líquidos no metálicos	0,05 a 0,4	0,09 a 0,7
Ladrillo, piedra, hormigón (Sólidos no metálicos)	0,02 a 1,5	0,04 a 2,6
Metales líquidos	5 a 45	8,6 a 78
Aleaciones	8 a 70	14 a 121
Metales puros	30 a 240	52 a 415

En *régimen transitorio* la conducción de calor implica un almacenamiento de energía térmica. Por ejemplo, en el calentamiento de un hogar hay que suministrar el calor suficiente para elevar la temperatura de las paredes hasta sus nuevos valores de operación y aportar el calor que compense las pérdidas en régimen permanente para el funcionamiento normal.

En las calderas de gran potencia que operan continuamente durante prolongados períodos de tiempo, el calor almacenado en las paredes y en el metal de la caldera es una fracción insignificante del aporte total de calor.

En las calderas pequeñas, con cerramientos de refractario y que funcionan a tiempo parcial o, incluso, en aquellas calderas con hogares que frecuentemente se calientan y enfrían en operación discontinua, la energía almacenada en las paredes durante la puesta en servicio, puede ser una fracción considerable del aporte total de calor.

La conducción en régimen transitorio tiene mucha importancia en la igualación de temperaturas en el calderín de vapor de la caldera, durante los períodos de aumento o disminución de presión de la unidad.

En aquella parte del calderín que se encuentra por debajo del nivel de la superficie libre del agua, la superficie interior del mismo está calentada por su contacto con el agua de la caldera, mientras que la superficie interior del calderín de vapor que se encuentra por encima de dicha superficie libre del agua, está calentada por la condensación del vapor situado sobre el citado nivel.

Durante un período transitorio de calentamiento, las temperaturas interior y exterior de la superficie del calderín de vapor aumentan por conducción, de forma que la diferencia de temperaturas a través de la pared del calderín, son mayores que las correspondientes a los períodos en régimen permanente, lo que implica solicitaciones mayores, por lo que hay que controlar el incremento de temperatura y presión, con el fin de mantener siempre las solicitaciones térmicas dentro de unos límites aceptables, a efectos de proteger el calderín de vapor.

Durante los períodos de reducción de presión, la superficie interior del calderín que se encuentra bajo el nivel de agua, está refrigerada por el agua de la caldera; la parte alta del calderín por encima del nivel de agua, se refrigera por radiación por el flujo de vapor hacia las conexiones de salida y por la conducción a través de la propia pared del mismo.

La conducción transitoria se presenta en todos los procesos de calentamiento, en los que la temperatura varía con el tiempo, por lo que el análisis de la conducción se complica; para un flujo transitorio, la ecuación de energía térmica unidimensional, es:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{siendo: } \alpha = \frac{k}{\rho c_p}, \text{ la difusividad térmica.}$$

$$\text{En coordenadas cilíndricas: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\text{En coordenadas esféricas: } \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T}{\partial \Phi^2} + \frac{E}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Coeficiente de conductividad térmica, calor específico y densidad.- La conductividad térmica es una propiedad que depende de la composición química del material, y se expresa en Btu/fth°F ó (W/m°K); en general, la conductividad térmica es más alta en los materiales sólidos, menor en los líquidos y mucho más reducida en los gases.

- *Metales puros.*- La conductividad térmica decrece cuando aumenta la temperatura, mientras que la conductividad de las aleaciones puede aumentar o disminuir con la temperatura.

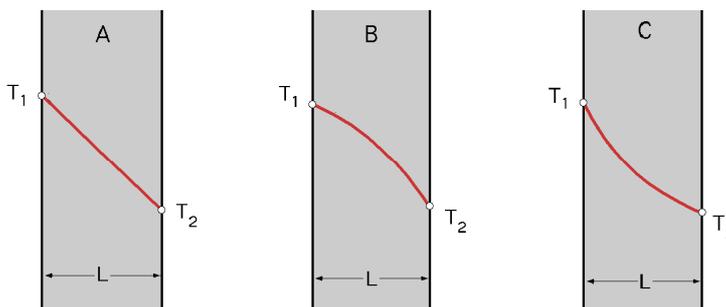
- *Deposiciones de ceniza.*- Los valores de la conductividad térmica para una *capa caliente de deposi-*

ción de ceniza pueden variar mucho según sea la ubicación de la deposición en el interior del hogar de la caldera; en las deposiciones de ceniza:

- La conductividad térmica efectiva varía entre: $\begin{cases} 0,03 \text{ a } 0,29 \text{ Btu/ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F} \\ 0,05 \text{ a } 0,5 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{K} \end{cases}$

- La resistencia suele oscilar entre: $\begin{cases} 0,11 \text{ a } 0,006 \text{ ft}^2\text{h}\cdot^\circ\text{F/Btu} \\ 0,02 \text{ a } 0,001 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{K/W} \end{cases}$

La conductividad térmica efectiva de las *deposiciones de ceniza*, para altas temperaturas, es similar a la del aire y el CO₂; a veces, está más próxima a la de la lana de vidrio, pero no supera los valores correspondientes a los de materiales refractarios; aumenta con la temperatura y crece con la cantidad de óxido de hierro presente en la deposición.



A) $k = \text{Cte}$; B) k crece con el aumento de temperatura ; C) k disminuye con el aumento de temperatura
Fig IV.1.- Representación de la relación temperatura-espesor para diversas conductividades térmicas

- *Agua.*- Las propiedades del agua son relativamente insensibles a la presión, en particular para presiones alejadas de la crítica. La conductividad térmica varía desde:

- $0,33 \text{ Btu/ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F} = (0,57 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{K})$, a la temperatura ambiente

- hasta $0,16 \text{ Btu/ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F} = (0,28 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{K})$, en las proximidades del punto crítico

- *Líquidos no metálicos.*- La mayoría de los *líquidos no metálicos* tiene una conductividad térmica que disminuye cuando aumenta su temperatura, y varía entre $\begin{cases} 0,05 \text{ a } 0,15 \text{ Btu/ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F} \\ 0,09 \text{ a } 0,26 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{K} \end{cases}$

- *Gases.*- Su conductividad térmica aumenta con la temperatura y para las condiciones que se presentan normalmente en los generadores de vapor es independiente de la presión; disminuye cuando aumenta su peso molecular. Así, la relativa alta capacidad del hidrógeno (gas de bajo peso molecular), lo ha convertido en un buen medio refrigerante de alternadores.

- *Materiales no homogéneos.*- En el cálculo de la conductividad térmica de *materiales no homogéneos*, se puede utilizar una conductividad térmica aparente, para tener en cuenta los poros de los materiales constituidos por capas. La conductividad térmica de todos los *materiales no homogéneos*, depende mucho de la densidad aparente.

- *Paredes de refractario.*- En *calderas y hogares con paredes de refractario*, la conductividad térmica puede variar de un punto a otro, debido a diferencias estructurales en la composición, humedad y porosidad, que se pueden atribuir a la construcción de la unidad.

- *Aislamientos.*- En el caso de aislamientos para altas temperaturas, la conductividad térmica aparente de aislamientos fibrosos y de ladrillos refractarios disminuye cuando aumenta la densidad aparente porque el material más denso atenúa la radiación. Sin embargo, existe un límite a partir del cual todo aumento de densidad incrementa la conductividad térmica, debido a la mayor conducción propia del material sólido.

Los calores específicos de *sólidos* y *líquidos*, son en general, independientes de la presión. La Tabla IV.2 compendia valores de calores específicos de diversos metales, aleaciones y materiales heterogéneos, referidos a la temperatura de 68°F (20°C), que se pueden utilizar para otras temperaturas sin que se cometan errores apreciables.

En las aplicaciones prácticas para calderas, la influencia de la presión sobre el calor específico de los gases, se puede considerar casi despreciable, mientras que para el vapor de agua, la variación del calor específico y la conductividad térmica pueden ser importantes en todo el campo de presiones y temperaturas.

Resistencia de contacto.- Un caso especial de conducción se plantea en el caso particular de una *resistencia térmica de contacto*, a través de una junta o interfaz entre materiales sólidos, en los que la superficie de contacto, debido a su rugosidad superficial, es imperfecta como consecuencia de los intersticios. En aplicaciones nucleares, la resistencia de contacto entre las pastillas de combustible, puede tener una gran influencia sobre el proceso de la transferencia de calor.

En un flujo unidimensional en régimen permanente la transferencia de calor a través de la superficie de contacto es: $Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{cont}}$

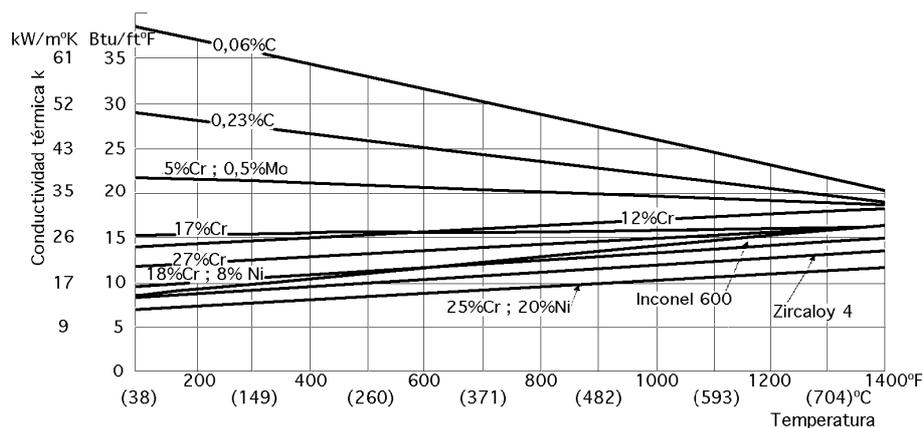


Fig IV.2.- Conductividad térmica de algunos metales y aleaciones

Tabla IV.2.- Propiedades de varias sustancias a la temperatura ambiente de (20°C = 68°F)

Material	ρ (lb/ft ³)	c_p (Btu/lb°F)	k (Btu/ft.h°F)
Metales	Cobre	559	0,09
	Aluminio	169	0,21
	Níquel	556	0,12
	Hierro	493	0,11
	Acero al C	487	0,11
	Acero 18% Cr, 8% Ni	488	0,11
Sólidos no metálicos	Caliza	105	0,2
	Cristal Pyrex	170	0,2
	Ladrillo K-28	27	0,2
	Argamasa	140	0,2
	Lana mineral	8	0,2
Gases	Hidrógeno	0,006	3,3
	Oxígeno	0,09	0,22
	Aire	0,08	0,24
	Nitrógeno	0,08	0,25
	Vapor de agua	0,04	0,45
Líquidos	Agua	62,4	1
	Dióxido de S	89,9	0,33

Tabla IV.3.- Conductividad térmica de humos en Btu/ft.h°F, con exceso de aire del 15% en aceite o gas y del 20% en carbón

Temperatura °F	Gas natural	Aceite	Carbón
0	---	---	---
500	0,022	0,022	0,022
1000	0,03	0,029	0,029
1500	0,037	0,036	0,036
2000	0,044	0,043	0,043
2500	0,051	0,049	0,05

Tabla IV.4.- Propiedades de una selección de gases a 14,696 psi (1,01 bar)

Temperatura °F	AIRE			DIÓXIDO DE CARBONO			OXÍGENO		
	$\rho \frac{lb}{ft^3}$	$c_p \frac{Btu}{lb^\circ F}$	$k \frac{Btu}{lb.h^\circ F}$	$\rho \frac{lb}{ft^3}$	$c_p \frac{Btu}{lb^\circ F}$	$k \frac{Btu}{lb.h^\circ F}$	$\rho \frac{lb}{ft^3}$	$c_p \frac{Btu}{lb^\circ F}$	$k \frac{Btu}{lb.h^\circ F}$
0	0,0855	0,24	0,0131	0,132	0,184	0,0076	945	0,219	0,0133
500	0,0408	0,248	0,0247	0,063	0,274	0,0198	0,0451	0,235	0,0249
1000	0,0268	0,263	0,0334	0,0414	0,28	0,0318	0,0297	0,252	0,0344
1500	0,02	0,276	0,041	0,0308	0,298	0,042	0,0221	0,263	0,0435
2000	0,0159	0,287	0,0508	0,0247	0,309	0,05	0,0178		0,0672
2500	0,0132	0,3	0,063	0,0122	0,311	0,055	0,0148		0,0792
3000	0,0113	0,314	0,0751	0,0175	0,322	0,061	0,0127		0,0912

Temperatura °F	NITRÓGENO			HIDRÓGENO		
	$\rho \frac{lb}{ft^3}$	$c_p \frac{Btu}{lb^\circ F}$	$k \frac{Btu}{lb.h^\circ F}$	$\rho \frac{lb}{ft^3}$	$c_p \frac{Btu}{lb^\circ F}$	$k \frac{Btu}{lb.h^\circ F}$
0	0,0826	0,249	0,0131	0,0059	3,421	0,1071
500	0,0395	0,254	0,0236	0,0028	3,47	0,161
1000	0,026	0,269	0,032	0,0019	3,515	0,2206
1500	0,0193	0,283	0,0401	0,0014	3,619	0,2794
2000	0,0156		0,0468	0,0011	3,759	0,3444
2500	0,013		0,0568	0,0009	3,92	0,4143
3000	0,0111		0,0528	0,0008	4,218	0,488

Conversión de unidades a S.I. $\left\{ \begin{array}{l} \rho \Rightarrow (kg/m^3) = 16,02 (lb/ft^3) \\ c_p \Rightarrow (kJ/kgK) = 41869 (Btu/lbF) \\ k \Rightarrow (W/m^2K) = 17307 (Btu/ft.hF) \end{array} \right.$

Conversión de temperatura $\left\{ \begin{array}{l} ^\circ C = (^{\circ}F - 32) / 1,8 \\ ^\circ F = 1,8^{\circ}C + 32 \\ ^\circ K = ^\circ C + 273,14 \\ ^\circ R = ^\circ F + 460 \end{array} \right.$

Tabla IV.5.- Conductancias interfaciales de algunos materiales a presiones moderadas

Interface	$h_i (W/m^2K)$
Cerámica-Cerámica	500 a 3000
Cerámica-Metal	1500 a 8500
Grafito-Metal	3000 a 6000
Acero inoxidable-Acero inoxidable	1700 a 3700
Aluminio-Aluminio	2200 a 12000
Acero inoxidable-Aluminio	3000 a 4500
Cobre-Cobre	10000 a 25000
Hierro-Aluminio	4000 a 40000

Los valores correspondientes al coeficiente de contacto h_{cont} se pueden obtener de tablas especializadas; como ejemplo de tales valores se indican los siguientes coeficientes de contacto:

- Acero inoxidable 304, contacto/aire = 300 Btu/ft²h°F = 1,7 W/m²K
- Cobre de puesta a tierra, contacto/aire = 25000 Btu/ft²h°F = 142 W/m²K

En las aplicaciones, los factores de contacto se suelen desconocer, por lo que se recurre a algunas estimaciones sustitutivas.

A través de un intersticio, que forma parte de una interfaz de contacto, se presentan al menos dos tipos de aportación:

- La conducción sólido-sólido, por puntos de contacto directo
- La conducción térmica a través de los gases atrapados en los poros o espacios vacíos del material

IV.2.- CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección en el seno de un fluido tiene lugar mediante una combinación de: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Conducción molecular} \\ \text{Movimiento macroscópico del fluido} \end{array} \right.$

La convección se produce siempre en el espacio contiguo a superficies calentadas, como consecuencia del movimiento del fluido en contacto con dichas superficies, Fig IV.3.

La *convección natural* tiene lugar cuando el movimiento del fluido se debe únicamente a diferencias locales de densidad y de viscosidad; el calor fluye desde la superficie hacia el fluido, la densidad disminuye y provoca que el fluido suba y que se sustituya por fluido frío, más denso.

La *convección forzada* se presenta cuando el movimiento del fluido se genera por energía mecánica, mediante aparatos específicos, como bombas y ventiladores.

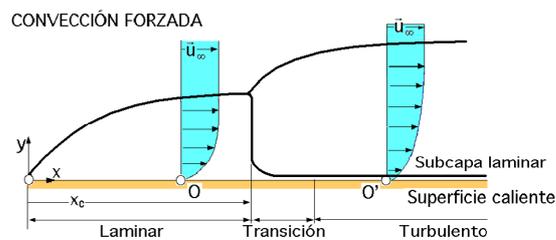
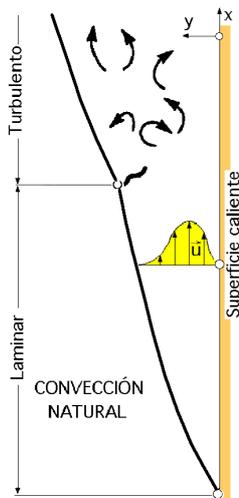


Fig IV.3.- Perfil de velocidades en la convección

a) Natural sobre placa vertical; b) Forzada con capas laminar y turbulenta sobre placa horizontal

Tabla IV.6.- Coeficientes de convección típicos

Condición	$Btu/ft^2h^{\circ}F$	$W/m^2^{\circ}K$
Convección natural aire	1 a 5	6 a 30
Convección forzada aire	5 a 50	30 a 300
Convección forzada vapor	300 a 800	1800 a 4800
Convección forzada aceite	5 a 300	30 a 1800
Convección forzada agua	50 a 2000	300 a 12000
Vaporización agua	500 a 20000	3000 a 120000

El flujo térmico de la convección se calcula por medio de la ley de Newton: $q_c = h_{cF} (T_{pF} - T_F)$, siendo h_{cF} el coeficiente de convección.

En la mayoría de las aplicaciones se utilizan unos coeficientes promedios de transferencia de calor, para cada caso particular de superficie y fluido, relativos a un determinado proceso de intercambio térmico, que depende fundamentalmente de las propiedades hidrodinámicas del fluido y de la geometría de la superficie. En la Tabla IV.6 se indican algunos datos aproximados de coeficientes de convección.

FORMULACIÓN PRÁCTICA PARA LA CONVECCIÓN.- La transferencia de calor por convección, cerca de la superficie, tiene lugar por una combinación de conducción y de transporte de masa.

En el caso del calor que fluye desde una superficie caliente hacia un fluido refrigerante, hay que hacer las siguientes consideraciones:

- El calor fluye por conducción hacia el fluido, incrementando su energía interna
- El elemento de fluido calentado se desplaza hacia una zona más fría, en la que el calor fluye por conducción desde el elemento calentado y desplazado, hacia el fluido contiguo más frío

Este movimiento producido en el fluido se puede lograr de dos maneras diferentes, que caracterizan dos tipos de convección:

- Si el movimiento se debe a una diferencia de densidad, consecuencia de una variación de temperatura, se trata de una convección natural o libre
- Si el movimiento se induce externamente, por una bomba o ventilador, el proceso es una convección forzada

La transferencia convectiva se puede presentar con dos tipos de flujo, laminar y turbulento:

- En flujo laminar, el fluido se mueve en capas de modo que cada elemento del mismo sigue ordenadamente una trayectoria particular bien determinada
- En flujo turbulento, que es el predominante en los de convección de la caldera, el movimiento local del fluido es caótico y para establecer los valores de velocidad media y de transferencia de calor, hay que utilizar un tratamiento estadístico

Cualquier campo de flujo se puede dividir en dos zonas distintas:

- Una zona viscosa, adyacente a la superficie
- Otra zona no viscosa, separada de la superficie de transferencia de calor

La zona calentada es la zona viscosa, y se denomina capa límite térmica. La capa límite hidrodinámica se define como el espesor del flujo para el que la velocidad local llega al 99% del valor de la velocidad lejos de la pared. Los coeficientes de transferencia de calor en la región transitoria, son mayores que los correspondientes a la región en régimen permanente. En la mayoría de las aplicaciones relacionadas con calderas, se asume que las capas límite térmica e hidrodinámica, empiezan a crecer en el mismo punto de la conducción, aunque en realidad no es así.

Convección natural.- Un fluido en reposo, expuesto a una superficie caliente, estará a temperatura más alta y, por tanto, con menor densidad que el resto del fluido que la rodea. La diferencia de densidad, consecuencia de esa diferencia de temperaturas, provoca que los elementos de fluido más calientes y por ello más ligeros, circulen y transporten el calor a otro lugar.

En los diseños de sistemas de calderas, el aire y el humo (gases de combustión) son medios termodinámicos de transferencia de calor para la convección natural o libre.

Para diseños de calderas, la expresión del coeficiente convectivo de transferencia de calor es:

$$h_c = C (T_s - T_F)^{1/3}$$

correlación que se aplica cuando el número de Rayleigh (Ra) es superior a 10^9 , zona de transición entre el flujo laminar y el flujo turbulento; esta correlación facilita coeficientes convectivos de transferencia de

$$\text{calor en el campo: } \begin{cases} 1 \text{ a } 5 \text{ Btu/ft}^2\text{h}^\circ\text{F} \\ 5,68 \text{ a } 28,39 \text{ W/m}^2\text{K} \end{cases}$$

Tabla IV.7.- Valores habituales de la constante C que se utilizan en el diseño de calderas

Geometría	Btu/ft ² h [°] F ^{4/3}	W/m ² °K ^{4/3}
Placa horizontal, cara superior	0,22	1,32
Placas verticales o tubos de más de 1 ft de alto (0,3 m)	0,19	1,31
Tubos horizontales	0,18	1,24

Convección forzada en régimen laminar.- La convección forzada implica la utilización de un mecanismo exterior, ventilador, bomba o una chimenea de tiro natural, para inducir el movimiento re-

querido en el fluido. El número de Reynolds se usa para correlacionar el flujo y la correspondiente transferencia de calor en conductos cerrados; sólo es válido para flujos continuos de fluido que llenen por completo la sección total del conducto.

A bajas velocidades, las fuerzas viscosas son muy importantes y predomina el flujo laminar, mientras que a altas velocidades predominan las fuerzas de inercia y tiene lugar un flujo turbulento.

En el flujo por el interior de conducciones cerradas, la transición a flujo turbulento se desarrolla a partir de $Re = 2000$

La transición de flujo laminar a turbulento, en condiciones ordinarias, en el interior de un conducto, corresponde al intervalo $2000 < Re < 4000$

En el flujo externo de un fluido sobre una superficie plana, la longitud característica para el número Reynolds es la longitud de dicha superficie, en la dirección x del flujo; la transición a la turbulencia se sitúa en $Re > 10^5$

Para bancos tubulares con flujo cruzado, la transición de flujo laminar a turbulento tiene lugar para $Re > 10^2$.

Para el aire y el humo $Pr = 0,7$; la capa límite térmica es más gruesa que la capa límite hidrodinámica.

Flujo laminar por el interior de tubos.- Para el calentamiento o refrigeración de líquidos viscosos, en tubos horizontales o verticales, el coeficiente de transferencia de calor se determina mediante la expresión:

$$Nu = 1,86 \left(Re Pr \frac{D}{L} \right)^{0,33} \left(\frac{\eta_F}{\eta_{pF}} \right)^{0,14}$$

El cociente $\frac{\eta_F}{\eta_{pF}}$ es un factor de corrección debido a la viscosidad que tiene en cuenta la temperatura del fluido y de las paredes

Para fluidos de baja viscosidad, como el agua y los gases, se precisa una ecuación más compleja, si se quieren tener en cuenta los efectos de la convección natural en la superficie de transferencia de calor; en la práctica industrial, esta consideración tiene poco interés, porque el uso de agua y gases en flujos laminares resulta imposible.

FLUJO TURBULENTO.- Los estudios sobre flujo turbulento ponen de manifiesto la existencia de varias regiones bien definidas, Fig IV.4.

a) Una región muy delgada de flujo (subcapa laminar), próxima a la superficie de transferencia de calor, de menos del 2% de la longitud característica, en la que el flujo de calor, desde o hacia la superficie, es una conducción molecular

b) Otra subcapa denominada capa intermedia, adyacente a la anterior del lado del núcleo del flujo, que representa menos del 1% de la longitud característica, y que está constituida por una mezcla de flujo laminar y flujo turbulento. En esta subcapa el calor se transfiere por convección y por conducción simultáneamente.

c) Un núcleo turbulento, que comprende aproximadamente el 98% de la sección transversal, en el que el calor se transfiere por convección

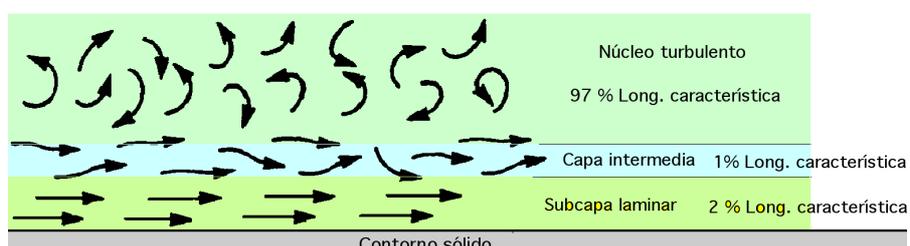


Fig IV.4.- Estructura de un campo de flujo próximo a un contorno sólido

En el flujo turbulento, el movimiento caótico del fluido, provoca movimientos locales axiales y radiales de los elementos del fluido. Esta combinación de movimientos origina remolinos que aumentan la transferencia de calor y la subcapa laminar.

El flujo laminar en la subcapa, así como la componente laminar de la capa intermedia, actúa como una barrera o película resistente, frente al proceso de transferencia de calor. Si la velocidad del fluido aumenta, se comprueba que disminuye el espesor de esta película y que, consecuentemente, se reduce la resistencia a la transferencia de calor.

Flujo turbulento por el interior de tubos.- La diferencia que existe entre dos flujos totalmente turbulentos, uno desde el punto de vista hidrodinámico y otro desde el punto de vista térmico, es mucho más reducida que la separación que hay entre dos flujos laminares, desde esos mismos puntos de vista.

La longitud de flujo necesaria para lograr todas las características de un flujo completamente turbulento desde el punto de vista hidrodinámico está comprendida en el intervalo: $6 < \frac{x}{D} < 20$.

En el análisis de calderas, un flujo térmico completamente turbulento para gases y aire, tiene lugar para unas relaciones similares; para líquidos, la relación correspondiente es algo mayor aumentando con el n° de Pr. Para un flujo turbulento completamente desarrollado, la expresión de Dittus-Boelter es :

$$Nu_d = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

de aplicación a gases y líquidos en el intervalo $0,5 < Pr < 100$, que incluye prácticamente todos los líquidos que aparecen en el diseño de calderas.

Cuando las condiciones de flujo turbulento no están totalmente desarrolladas, la correlación precedente se corrige mediante la expresión:

$$Nu = Nu_d \left\{ 1 + \left(\frac{D}{x} \right)^{0,7} \right\} \text{ con la condición: } 2 \leq \frac{x}{D} \leq 20$$

McAdams sugiere utilizar la ecuación de Dittus-Boelter con todas las propiedades evaluadas a la temperatura de película, a excepción del calor específico.

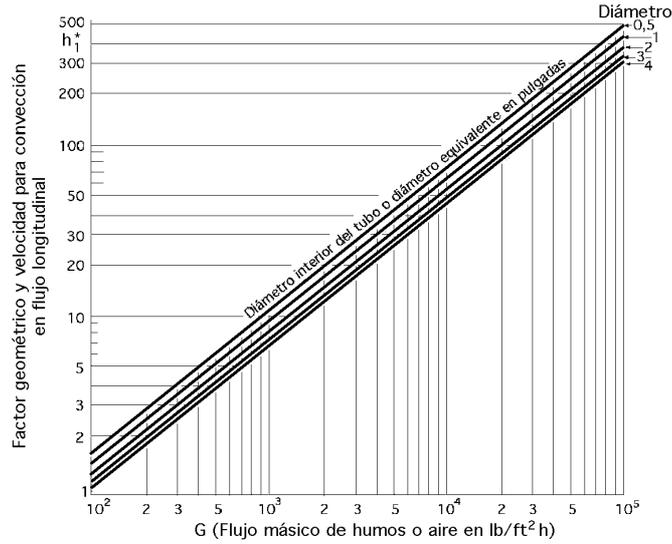
$$\text{La temperatura de película se define en la forma: } T_f = \frac{T_F + T_{pF}}{2}$$

$$\text{El coeficiente de convección es: } h_c = 0,023 \frac{G^{0,8}}{D^{0,2}} \frac{c_p^{0,4} k^{0,6}}{\eta^{0,4}} \left(\frac{T_F}{T_f} \right)^{0,8} = h_c^* F_{pp} F_T$$

$$\text{siendo: } \begin{cases} F_{pp} = \frac{c_p^{0,4} k^{0,6}}{h^{0,4}} \text{ un coeficiente función de las propiedades del fluido, Fig IV.6, 7 y 8} \\ h_c^* \text{ un coeficiente geométrico, Fig IV.5, de la forma: } h_c^* = 0,023 \frac{G^{0,8}}{D_i^{0,2}} \\ F_T = \left(\frac{T_F}{T_f} \right)^{0,8} \text{ un factor de temperatura} \end{cases}$$

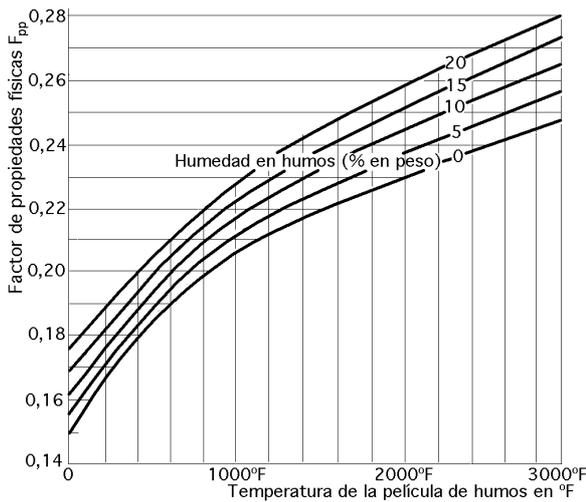
Flujo turbulento por el exterior de tubos.- En cualquier caldera, la aplicación más importante de la convección está en la transferencia de calor desde los humos hacia las superficies tubulares que se encuentran en los pasos de convección. Para el caso de un flujo turbulento sobre baterías de 10 ó más tubos en la dirección del flujo, se utiliza la ecuación general:

$$Nu_d = C Re_{máx}^n Pr^{1/3}, \text{ con: } \begin{cases} 2000 < Re_{máx} < 40000 \\ Pr > 0,7 \end{cases}, \text{ viniendo dados } C \text{ y } n \text{ en la Tabla IV.8}$$



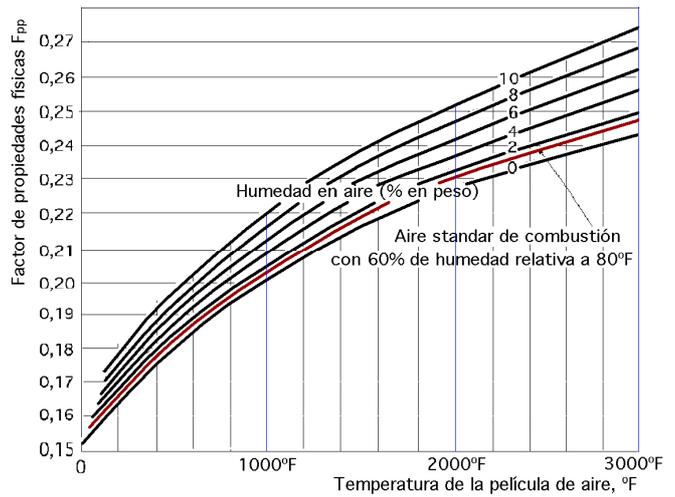
$$\text{Flujo longitudinal: } h_c^* = 0,023 \frac{G^{0,8}}{D_i^{0,2}} ; h_c = h_c^* F_{pp} F_T$$

Fig IV.5.- Factor de geometría y velocidad para convección básica en flujo longitudinal (en medidas inglesas)



$$\text{Flujo longitudinal humos: } F_{pp} = \frac{c_p^{0,4} k^{0,6}}{\eta^{0,4}}$$

Fig IV.6.- Efecto de la temperatura de película y de la humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp} , para humos en flujo longitudinal (sólo para medidas inglesas)



$$\text{Flujo longitudinal aire: } F_{pp} = \frac{c_p^{0,4} k^{0,6}}{\eta^{0,4}}$$

Fig IV.7.- Efecto de la temperatura de película y de la humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp} , para el aire en flujo longitudinal (sólo para medidas inglesas)

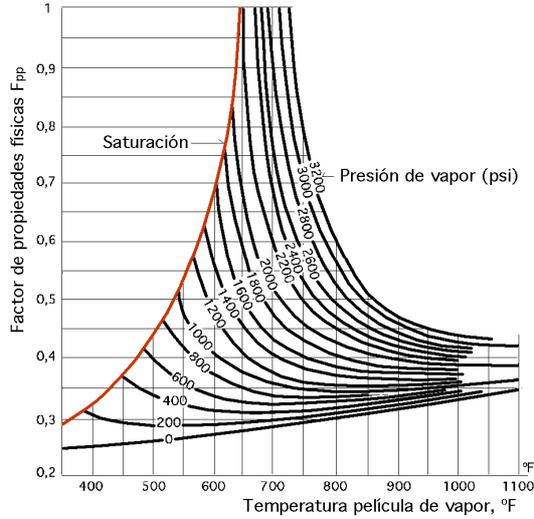
En el caso de que el número de tubos en la dirección del flujo sea menor de 10, en la Tabla IV.9 o en la Fig IV.16 se indica un factor de corrección del coeficiente de convección:

$$h_{C(N)} = \psi h_{C(1 \text{ tubo})}$$

El valor de $Re_{m\acute{a}x}$ se corresponde con la velocidad máxima, y ésta con la sección mínima de paso; de acuerdo con la Fig IV.11a-b se tiene:

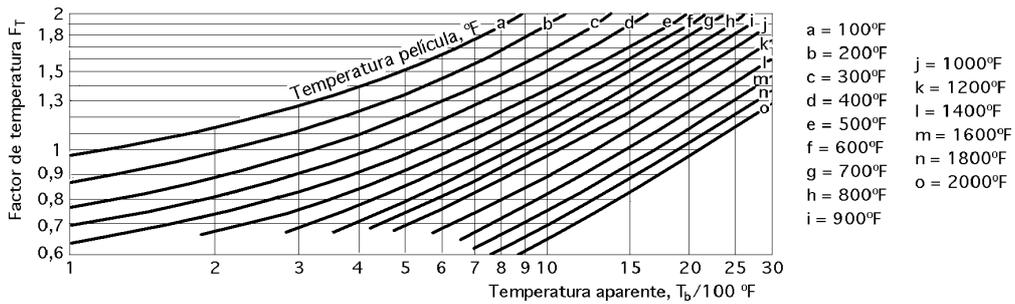
$$\text{Disposición regular: Paso m\acute{a}ximo} = (e_x - d) \Rightarrow u_{m\acute{a}x} = \frac{u_F e_x}{e_x - d}$$

$$\text{Disposición triangular: Se toma el menor de los pasos: } \left\{ \begin{array}{l} \frac{e_x - d}{2} \\ \sqrt{\left(\frac{e_x}{2}\right)^2 + e_y^2} - d \end{array} \right. \Rightarrow u_{m\acute{a}x} = \frac{u_F e_x}{\text{Paso m\acute{a}ximo}}$$



$$\text{Flujo longitudinal vapor de agua: } F_{pp} = \frac{c_p^{0,4} k^{0,6}}{\eta^{0,4}}$$

Fig IV.8.- Efecto de la temperatura de película y de la humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp} , para el vapor de agua en flujo longitudinal (sólo para medidas inglesas)



$$\text{Flujo longitudinal } F_T = \left(\frac{T_b}{T_f}\right)^{0,8} ; T_f = \frac{T_b + T_s}{2}$$

Fig V,9.- Factor de temperatura F_T para convertir la velocidad másica de base aparente (núcleo), a base pelicular para flujo longitudinal de aire, humo, gas y vapor

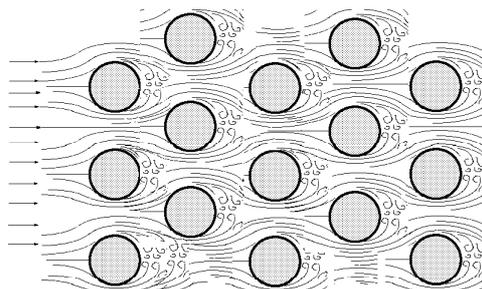


Fig IV.10.- Flujo forzado a través de un haz de tubos

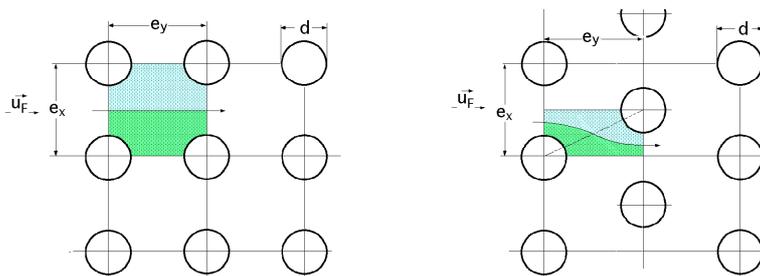


Fig IV.11a-b- Flujos cruzados en baterías de tubos en línea y al tresbolillo

Tabla IV.8.- Valores de C y n para baterías de 10 ó más tubos

EN LÍNEA	$\epsilon_x/d = 1,25$		$\epsilon_x/d = 1,5$		$\epsilon_x/d = 2$		$\epsilon_x/d = 3$	
	C	n	C	n	C	n	C	n
ϵ_y/d								
1,25	0,386	0,592	0,303	0,608	0,111	0,704	0,0703	0,752
1,5	0,407	0,586	0,278	0,620	0,112	0,702	0,0753	0,744
2	0,464	0,570	0,332	0,602	0,254	0,632	0,220	0,648
3	0,322	0,601	0,396	0,584	0,415	0,581	0,317	0,608
AL TRESBOLILLO								
	$C^{\epsilon_x/d=1,25}_n$		$C^{\epsilon_x/d=1,5}_n$		$C^{\epsilon_x/d=2}_n$		$C^{\epsilon_x/d=3}_n$	
ϵ_y/d	---	---	---	---	---	---	0,236	0,636
0,9	---	---	---	---	0,495	0,571	0,445	0,581
1	---	---	0,552	0,558	---	---	---	---
1,125	---	---	---	---	0,531	0,565	0,575	0,560
1,25	0,575	0,556	0,561	0,554	0,576	0,556	0,579	0,562
1,5	0,501	0,568	0,511	0,562	0,502	0,568	0,542	0,568

Tabla IV.9.- Factor de corrección ψ del valor de h_c para N tubos por fila dividido por el valor correspondiente a 10 tubos por fila

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tubos al tresbolillo	0,68	0,75	0,83	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99	1
Tubos alineados	0,64	0,80	0,87	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	0,99	1

Una correlación para flujo cruzado, de aplicación al estudio de calderas que se aplica al calentamiento y refrigeración de fluidos que fluyen por el exterior de tubos limpios, es:

$$Nu = 0,287 Re^{0,61} Pr^{0,33} \psi$$

$$h_{c(N)} = \left(\frac{0,287 G^{0,61}}{D^{0,39}} \right) \left(\frac{c_p^{0,33} k^{0,67}}{\mu^{0,28}} \right) \psi = h_c^* F_{pp} F_a \psi$$

Las Fig IV.12 a 16 definen los factores de esta correlación:

- El factor de propiedades físicas F_{pp} es similar al definido anteriormente
- El factor F_a depende de la disposición de los tubos, de la relación $\frac{\text{Espaciado}}{\text{Diámetro}}$ de tubos y del número de Re, Fig IV.15
- El gasto másico G, y el n° de Re se calculan utilizando la sección transversal del flujo de fluido mínima.

La conductancia pelicular se aplica a bancos tubulares que tengan menos de 10 filas en la dirección del flujo de gases.

Para un flujo no distorsionado, (flujo en línea recta y sin perturbación alguna, al menos desde 4 ft (1,2 m) antes de llegar al banco de tubos), que se aproxime a un haz tubular de menos de 10 filas, el coeficiente de convección se multiplica por el factor de corrección ψ , que es igual a la unidad cuando el banco

tubular está precedido por $\left\{ \begin{array}{l} \text{un codo} \\ \text{una pantalla distribuidora} \\ \text{un cortatiros} \end{array} \right.$

Las ecuaciones que se han establecido para el flujo por el interior de tubos se pueden asumir para flujos paralelos por el exterior de tubos introduciendo en las ecuaciones un diámetro equivalente para flujo paralelo a un banco de tubos circulares dispuestos en un espaciado rectangular, de la forma:

$$D_{equiv} = \frac{4(\epsilon_x \epsilon_y - 0,785 d_{ext}^2)}{\pi d_{ext}} ; \epsilon_x \text{ y } \epsilon_y \text{ son los espaciados entre tubos}$$

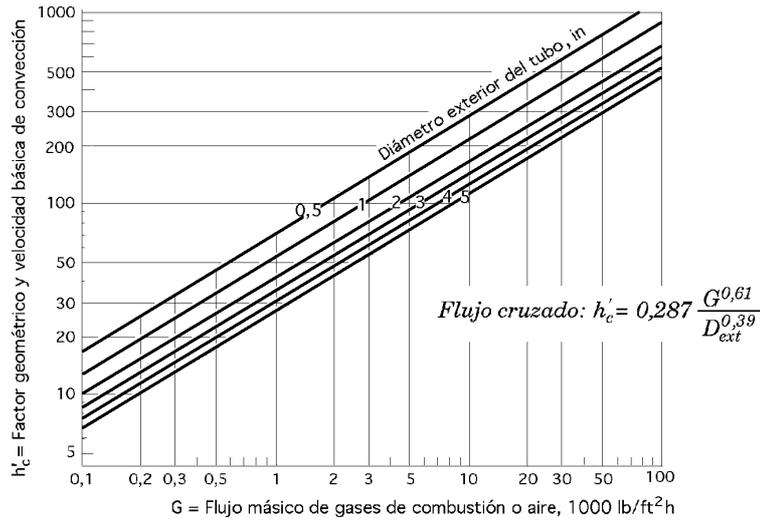


Fig IV.12.- Factor geométrico y velocidad básica de convección h'_c para gases o aire en flujo cruzado (Unidades inglesas)

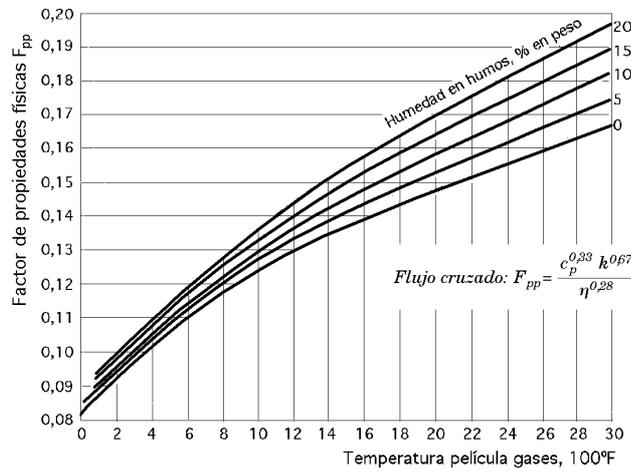


Fig IV.13.- Efecto de la temperatura de película y de la humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp} , para humos en flujo cruzado

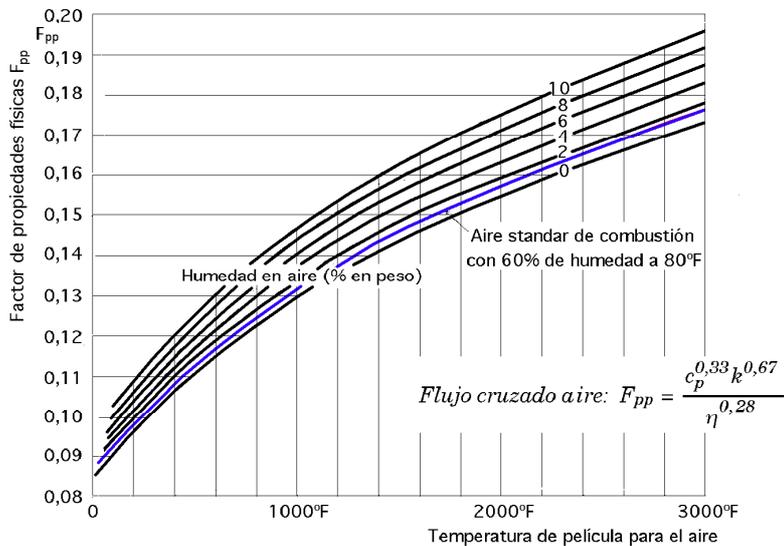


Fig IV.14.- Efecto de la temperatura de película y humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp} , para el aire en flujo cruzado

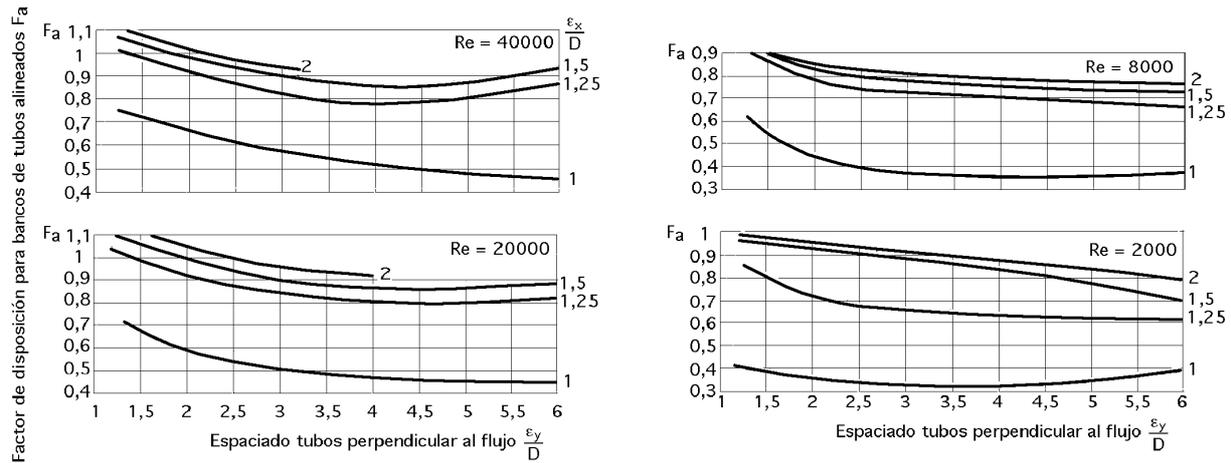


Fig IV.15.- Factor de disposición de los tubos F_a según el n° de Re, para disposiciones de tubos alineados para humos o aire en flujo cruzado

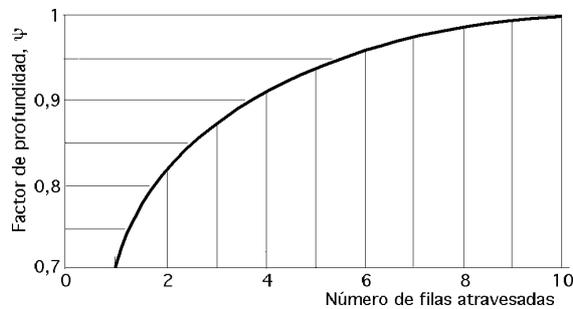


Fig IV.16.- Factor de corrección ψ para N número de filas de tubos atravesadas

IV.3.- RADIACIÓN

La radiación es la transferencia energética entre cuerpos, en cualquier estado, mediante ondas electromagnéticas; este intercambio térmico, a diferencia de la conducción y convección, no necesita de un medio soporte, ya que se puede transmitir en el vacío.

La radiación electromagnética se sitúa en el intervalo de longitudes de onda entre 0,1 y 100 micras, sólo se produce por la temperatura del cuerpo.

Una parte de la radiación térmica que incide sobre un cuerpo se absorbe por el mismo y se convierte en energía interna, mientras que el resto se puede reflejar o transmitir a través del cuerpo. La suma de las tres fracciones de la radiación, reflejada, transmitida y absorbida es igual a la unidad:

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

La radiación térmica puede pasar a través de los gases sin que se produzca absorción alguna, como el aire; estos gases no absorbentes o no participantes, no afectan a la transferencia por radiación. Otros gases como el CO_2 , el vapor de agua, el CO , etc., afectan a la transferencia radiativa, y se les denomina gases absorbentes o participantes; estos gases, dominantes en los humos de calderas, influyen en la transferencia de calor hacia las superficies intercambiadoras y en la distribución de la energía absorbida por la caldera.

Todos los cuerpos emiten energía radiante de forma continua, en cantidades que están determinadas por la temperatura y por la naturaleza de la superficie. Un radiador perfecto (cuerpo negro), absorbe toda la energía que llega a su superficie y, también, emite energía radiante hasta el máximo límite teórico, de conformidad con la Ley de Stefan-Boltzman, de la forma:

$$q_r = A E_{bs} = A \sigma T_s^4, \text{ en la que: } \begin{cases} \sigma = 0,1713 \cdot 10^8 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \text{h} \cdot \text{R}^4} \text{ ó } 567 \cdot 10^8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \\ E_{bs} = \text{Poder emisor del cuerpo negro} = \sigma T_s^4 \text{ (con } T_s \text{ en } ^\circ\text{R ó en } ^\circ\text{K)} \end{cases}$$

La radiación de un cuerpo negro se extiende a todo el intervalo de longitudes de onda; en las aplicaciones a calderas se encuentra en una banda desde 0,1 hasta 20 micras.

La longitud de onda a la que tiene lugar la máxima intensidad de radiación (ley de Wien), es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo.

Un radiador real (cuerpo gris), absorbe menos del 100% de la energía radiante que incide sobre él.

El calor transferido por radiación desde una superficie gris, se puede expresar por:

$$q_r = \varepsilon A \sigma T_s^4$$

siendo ε la emitancia o emisividad de la superficie. La Tabla IV.10 compendia algunos valores representativos de las emisividades características más corrientes.

Si la emisividad es independiente de la longitud de onda, la superficie se dice que pertenece a un radiador no selectivo, o que es una superficie gris.

Si la emisividad depende de la longitud de onda, se habla de una superficie no gris, o de un radiador selectivo.

Tabla IV.10.- Algunos valores representativos de la emisividad

Material	Emisividad
Metales en estado pulido	$0,01 < \varepsilon < 0,08$
Metales tal como se reciben (mates)	$0,1 < \varepsilon < 0,2$
Metales en estado oxidado	$0,25 < \varepsilon < 0,7$
Óxidos cerámicos	$0,4 < \varepsilon < 0,8$
Pinturas especiales	$0,9 < \varepsilon < 0,98$

El análisis exacto de las condiciones en que se presenta un radiador no gris es complejo; sin embargo, si se supone que todas las superficies son grises, se puede realizar un tratamiento sencillo mediante la introducción de un factor de forma F que depende de la configuración o geometría, de las emisividades y de las áreas de las superficies.

La transferencia neta de calor por radiación entre dos cuerpos negros, separados por el vacío o por un gas no participante, es:

$$q_{12} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4), \text{ en la que: } \begin{cases} A_1 \text{ es el área de la superficie (1)} \\ F_{12} \text{ es el factor de forma o fracción de energía que sale de (1) y alcanza} \\ T_1 \text{ y } T_2 \text{ son las temperaturas de las superficies} \end{cases}$$

Como la energía neta en la superficie A_1 debe equilibrar necesariamente la energía neta en la superficie A_2 , se puede escribir la igualdad: $q_{12} = -q_{21}$

La conservación de la transferencia del calor de radiación entre dos superficies viene garantizada por $\begin{cases} \text{el principio de reciprocidad} \Rightarrow A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \\ \text{la regla de la sumatoria} \Rightarrow \sum F_{ij} = 1 \end{cases}$, que permiten calcular los factores de forma, para diversas geometrías.

Balance de radiación para recintos con medio no participante.- La energía neta entre dos superficies negras, se puede escribir en la forma:

$$q_{12} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

ecuación que en calderas tiene un valor limitado, porque en éstas la mayor parte de las superficies que se encuentran del lado de fuegos, son casi siempre grises; se utiliza para estimar la máxima transferencia de calor por radiación entre dos superficies.

La energía incidente G que llega a una superficie es la energía total que llega a dicha superficie desde todas las demás que hay en el recinto.

La energía que sale de una superficie es la radiosidad $J = \varepsilon E_b + \rho G$, que se compone de:

- La energía emitida εE_b por dicha superficie
- La energía incidente reflejada ρG

El calor neto por radiación desde una superficie es: $q_{neta} = A (J - G)$

Para calcular la transferencia de calor por radiación, hay que determinar en primer lugar la radiosidad. La energía neta entre la superficie i y la superficie j es la diferencia de las respectivas radiosidades:

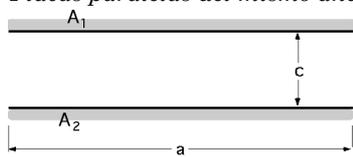
$$q_{(i-j)neta} = A_i F_{ij} (J_i - J_j)$$

La suma de los *términos similares*, para todas las superficies de un recinto considerado, verifica la siguiente expresión matemática:

$$q_i(neta) = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j)$$

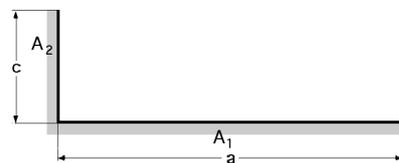
Tabla IV.11.- Factores de forma de radiación en configuraciones de 2 dimensiones

1.- Placas paralelas del mismo ancho



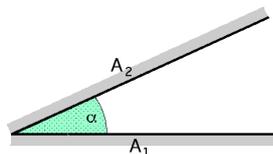
$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \sqrt{1 + \left(\frac{c}{a}\right)^2} - \frac{c}{a}$$

2.- Placas contiguas largas



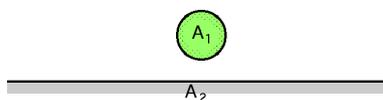
$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{c}{a} - \sqrt{1 + \left(\frac{c}{a}\right)^2} \right\}$$

3.- Cuña simétrica larga



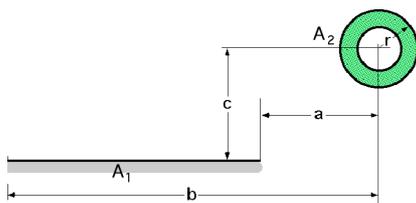
$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = 1 - \text{sen} \frac{\alpha}{2}$$

4.- Cilindro largo paralelo, o esfera, respecto a una gran superficie plana



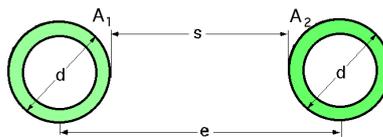
$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{2}$$

5.- Cilindro largo paralelo a una placa



$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{r}{b - a} \left(\text{arc tg} \frac{b}{c} - \text{arc tg} \frac{a}{c} \right)$$

6.- Cilindros adyacentes largos y paralelos de diámetros iguales



$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{p} \left(\sqrt{X^2 + 1} + \text{arc sen} \frac{1}{X} \right)$$

$$X = 1 + \frac{s}{d} = \frac{e}{d}$$

Recinto formado por dos superficies grises, difusas y opacas con $F_{12} = 1$.- Un problema general es aquel en el que intervienen sólo dos superficies grises, difusas y opacas que forman un recinto, como:

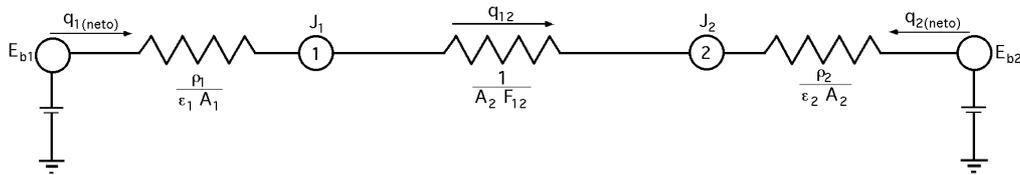


Fig IV.17.- Circuito térmico de dos superficies grises que conforman un recinto

- Dos placas paralelas infinitamente anchas: $q_{1(neta)} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{\rho_1}{\epsilon_1} + 1 + \frac{\rho_2}{\epsilon_2}} A_1 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} A_1$

- Dos cilindros concéntricos largos, el interior de superficie A_1 y el exterior de superficie A_2 , o dos esferas concéntricas:

$$q_{1(neta)} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{\rho_2 A_1}{\epsilon_2 A_2}} A_1$$

- Un cuerpo pequeño A_1 rodeado por una gran superficie cerrada A_2 : $q_{1(neta)} = \epsilon_1 A_1 (E_{b1} - E_{b2})$

Balance de radiación para recintos con medio participante.- En el lado de fuegos del hogar de la caldera, la mezcla de gases absorbe y emite energía radiante. Cuando una superficie limítrofe, a temperatura uniforme, rodea un volumen de gas isoterma, la transferencia de calor por radiación se puede considerar como si fuese la correspondiente a una zona única.

La radiación incidente en la superficie se compone de:

- La radiación que se emite desde el gas $\epsilon_g E_g$
- La energía que llega desde las paredes que la rodean $(1 - \alpha_g) J_s$.

La expresión de la energía incidente es: $G_s = \epsilon_g E_g + (1 - \alpha_g) J_s$

La energía que abandona la superficie se compone de: $\left\{ \begin{array}{l} \text{La emisión de radiación directa: } \epsilon_s E_{bs} \\ \text{La radiación incidente reflejada: } (1 - \epsilon_s) G_s \end{array} \right.$, por lo que la expresión de la radiosidad es: $J_s = \epsilon_s E_{bs} + (1 - \epsilon_s) G_s$

La transferencia neta de calor, entre la superficie y los humos, se evalúa mediante la ecuación:

$$q_{neta(s-g)} = J - G = \frac{A_s (\epsilon_s \epsilon_g E_{bg} - \epsilon_s \alpha_g E_{bs})}{1 - (1 - \alpha_g) (1 - \epsilon_s)}$$

Cuando las superficies son negras se verifica $\epsilon_s = 1$ y la ecuación anterior se reduce a:

$$q_{neta(s-g)} = A (\alpha_g E_{bg} - \alpha_g E_{bs})$$

Para superficies ligeramente grises, *Höttel* y *Sarofin* sugieren la siguiente modificación, con errores inferiores al 10%:

$$q_{neta(s-g)} = A \frac{\epsilon_g + 1}{2} (\epsilon_g E_{bg} - \alpha_g E_{bs})$$

En general, las paredes del recinto de caldera, y los humos y gases que ocupan su interior, tienen temperaturas que varían de una pared a otra y también entre puntos distintos de una misma pared, por lo que se hace necesario un análisis multizona, ya que no se pueden aplicar las expresiones simples de la transferencia de calor a una superficie con aquellas características de temperaturas diferenciales.

PROPIEDADES DE LA RADIACIÓN.- Los cuerpos que son buenos absorbentes de la radiación son también buenos emisores; para tales cuerpos, la ley de Kirchoff establece que, en el equilibrio térmico, la emisividad es igual a la absorptividad. Un cuerpo negro absorbe toda la energía radiante incidente, de modo que no refleja ni transmite nada de ella por lo que la absorptividad y la emisividad son iguales a la unidad. Esta terminología no implica que el cuerpo negro tenga que ser necesariamente de color negro; por ejemplo, la nieve sólo absorbe una pequeña porción de la luz visible incidente, pero para longitudes de onda más largas (que constituyen el grueso de la radiación térmica), la nieve se comporta como un cuerpo negro. A una temperatura de 2000°F (1093°C), un cuerpo negro brilla, porque una parte no despreciable de la radiación está situada en el campo visible.

Los cuerpos nunca son completamente negros, sin embargo, un pequeño agujero a través de una pared de un gran recinto se puede utilizar para aproximarse a las condiciones de un verdadero cuerpo negro. En efecto, la radiación que entra por el agujero sufre múltiples reflexiones y absorciones y, por lo tanto consecuencia de ello, la mayor parte de la radiación se retiene en el interior del recinto.

Emisividad de los gases.- Numerosas superficies comerciales, particularmente en condiciones de alta temperatura, tienen emisividades entre 0,80 ÷ 0,95, y pueden considerarse como cuerpos negros. En la Tabla IV.12 se indican valores promedios de emisividades.

Aunque las emisividades dependen de $\left\{ \begin{array}{l} \text{la composición de la superficie} \\ \text{su rugosidad} \\ \text{la longitud de onda de la radiación} \end{array} \right.$, la realidad es que en el campo práctico de las calderas, la dependencia entre longitud de onda y emisividad es despreciable.

La emisividad de las deposiciones de ceniza en el hogar de la caldera, incide a veces en forma notable en la transferencia de calor relativo a la propia caldera; depende no sólo de las condiciones del sustrato citadas, sino también de la composición química, de la estructura y de la porosidad de la capa de deposición, por lo que, la emisividad aparente se compone de la $\left\{ \begin{array}{l} \text{emisividad combinada del sustrato} \\ \text{deposición} \end{array} \right.$.

Una misma deposición de ceniza sobre superficies diferentes, puede facilitar emisividades aparentes muy distantes entre sí.

Los valores de las emisividades para la ceniza, oscilan entre 0,5 ÷ 0,8.

La emisividad aparente de la deposición de ceniza, aumenta con el contenido en hierro que tenga la deposición; la emisividad disminuye cuando aumenta la temperatura de la pared, especialmente porque las deposiciones se hacen *transparentes* y, en consecuencia, la emisividad efectiva se aproxima entonces a los valores correspondientes a los del sustrato.

Hay muchos gases, como el O₂ y el N₂, que absorben o emiten cantidades insignificantes de radiación, pero otros la absorben o emiten en cantidades sustanciales, como ocurre con el vapor de agua, el CO₂, el SO₂ y el CO.

La consideración del vapor de agua y del CO₂ es muy importante en los cálculos de calderas, debido a su presencia en los productos de combustión de los combustibles hidrocarburados; estos dos gases son radiadores selectivos, es decir, emiten y absorben radiación sólo en ciertas longitudes de onda, fuera del intervalo visible, por lo que se identifican como radiadores no luminosos

La radiación desde una pared del hogar es un fenómeno de superficie y, por lo tanto, los gases que se encuentran en la caldera emiten y absorben radiación, dentro de sus propias bandas, desde cada uno de los puntos del volumen del hogar. La energía emitida por una mezcla gaseosa radiante depende de:

- La temperatura del gas
- Las presiones parciales de los constituyentes de la mezcla
- La longitud de onda L del haz, que es función de la geometría y dimensiones del volumen que contiene dicha mezcla

gaseosa

Una estimación de esta longitud de onda desde el gas hacia la superficie del recinto, que tiene un área A y un volumen V, se obtiene mediante la expresión: $L = 3,6 \frac{V}{A}$

Para una gran cantidad de aplicaciones en calderas, el valor recomendado es 3,4.

Las Fig IV.18 presentan la emisividad correspondiente al vapor de agua y las Fig IV.19 la del CO₂.

Para calcular la absorptividad de un gas cuando se utilizan las Fig IV.18 y 19, Höttel recomienda corregir el término pL , mediante la aplicación de la relación de temperaturas pared/gas.

Cuando el H₂O y el CO₂ coexisten ambos en una mezcla, la emisividad se puede calcular sumando la correspondiente a cada uno de los gases, en el supuesto de que cada gas existiera por sí solo, a la que se resta un factor de corrección de la emisividad $\Delta\epsilon$ que indica la emisión de las bandas de longitud de onda que se superponen.

$$\epsilon = \epsilon_{H_2O} + \epsilon_{CO_2} - \Delta\epsilon_{mezcla} = C_{CO_2}(\epsilon_{CO_2})_{P_T=1} + C_{H_2O}(\epsilon_{H_2O})_{P_T=1} - \Delta\epsilon_{mezcla}$$

en la que $\Delta\epsilon_{mezcla}$ es un factor de corrección, que computa el efecto de un gas sobre el otro.

Esta ecuación desprecia las correcciones por presión y, a todos los efectos, considera que la caldera funciona a 1 atmósfera. El factor de corrección $\Delta\epsilon$ para la mezcla de vapor de H₂O y CO₂ viene representado en las Fig IV.22.

Tabla IV.12.- Emisividades normales para varias superficies

MATERIAL	Emisividad	Temperatura (°F)	Descripción
Aluminio	0,09	212	Chapa comercial
Óxido aluminio	0,63 a 0,42	530 a 930	
Pintura aluminio	0,27 a 0,67	212	Según edad y % Al
Bronce	0,22	120 a 660	Placa mate
Cobre	0,16 a 0,13	1970 a 2330	Fundido
Cobre	0,023	242	Pulido
Óxido cobre	0,66 a 0,54	1470 a 2012	
Hierro	0,21	392	Fundición pulida
Hierro	0,55 a 0,60	1650 a 1900	Chapa lisa
Hierro	0,24	68	Esmerilado reciente
Óxido hierro	0,85 a 0,89	930 a 2190	
Acero	0,79	390 a 1110	Oxidado a 1110 °F
Acero	0,66	70	Chapa laminada
Acero	0,28	2910 a 3270	Fundido
Acero Cr-Ni (18-8)	0,44 a 0,36	420 a 914	Tras calentamiento
Acero Cr-Ni (25-20)	0,90 a 0,97	420 a 980	Oxidado en servicio
Ladrillo rojo	0,93	70	Basto
Ladrillo arcilla refractaria	0,75	1832	
Filamento C lámpara negra	0,945	100 a 700	De 0,003" o más
Agua	0,95 a 0,963	32 a 212	

Absortividad de los gases.- La determinación de la absorptividad α de un gas es un poco más compleja que la emisividad ϵ ; el procedimiento incluye el uso de los diagramas de emisividades, pero modificando previamente los parámetros utilizados en los mismos. Hay que recordar que la absorción (o la emisión) de la radiación en gases no tiene lugar sobre todo el espectro, sino que sucede sobre determinadas bandas de longitudes de onda.

En la Fig IV.23 se muestra el espectro de absorción para el CO₂ en el que el producto de la densidad ρ del gas por el espesor de la capa de gas L vale $\rho L = 2,44 \text{ kg/cm}^2$. El espectro se compone de 4 bandas de absorción, posicionadas en las longitudes de onda de 15 μm , 4,3 μm , 2,7 μm y 1,9 μm .

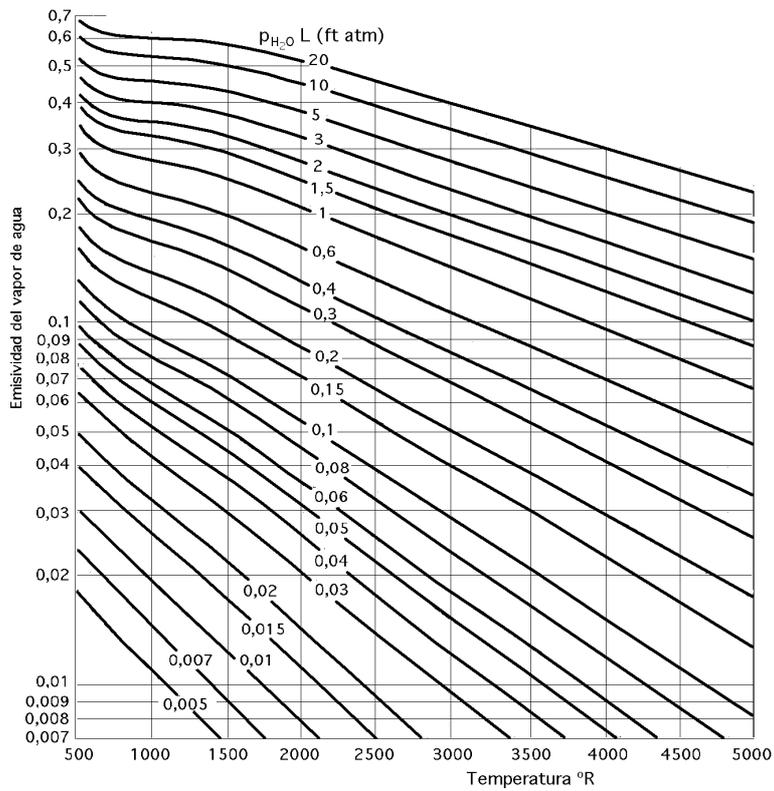


Fig IV.18a.- Emisividad del vapor de agua a la presión total de 1 atm (Höttel) (Unidades inglesas)

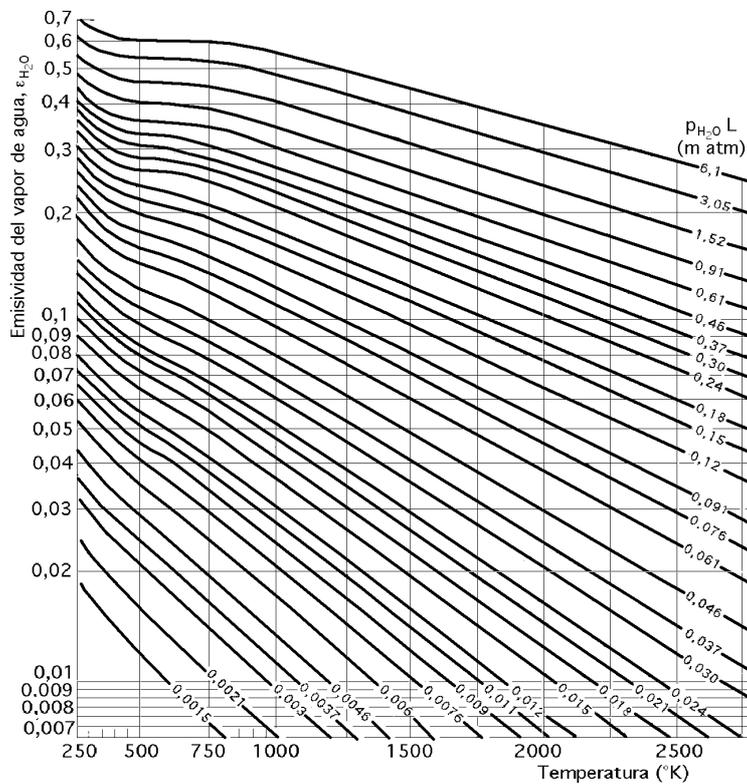


Fig IV.18b.- Emisividad del vapor de agua a la presión total de 1 atm (Höttel) (Unidades S.I.)

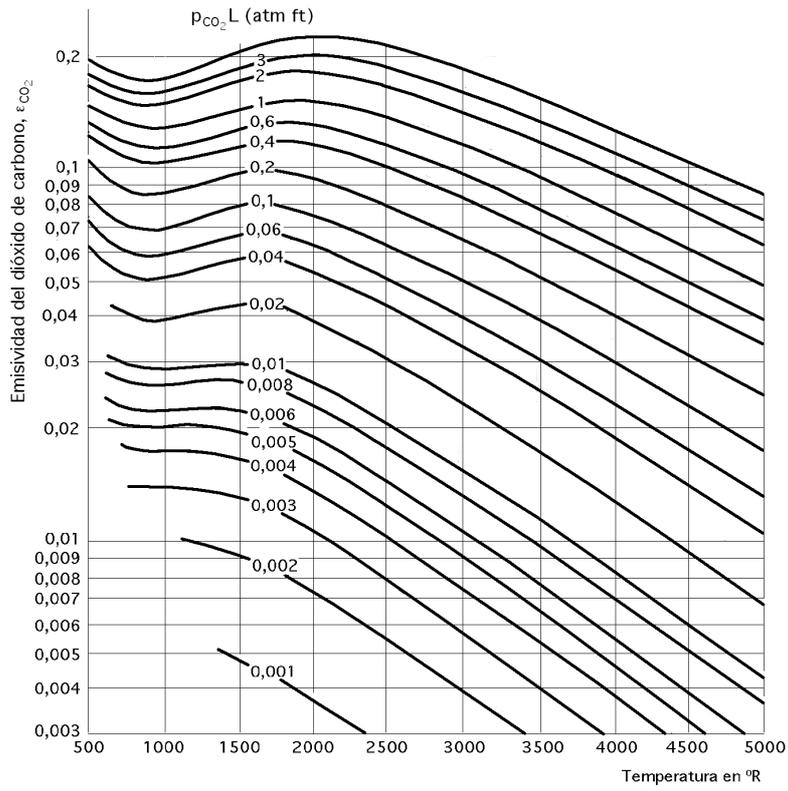


Fig IV.19a.- Emisividad del CO_2 a la presión total de 1 atm (Höttel)

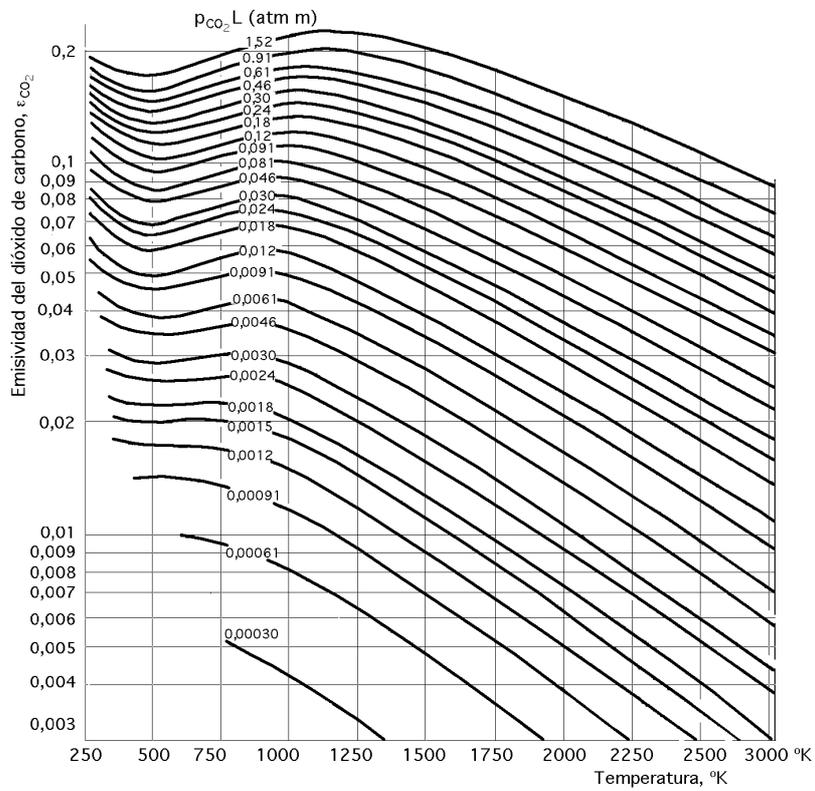


Fig IV.19b.- Emisividad del dióxido de carbono a la presión total de 1 atm (Höttel)

Tabla IV.13.- Longitud media L del haz para diversas situaciones geométricas del gas

Geometría	L
Esfera	2/3(Diámetro)
Cilindro infinito	Diámetro
Planos paralelos infinitos	2 (Distancia entre planos)
Cilindro circular infinito radiando al interior de la superficie cilíndrica	0,95 (Diámetro)
Cilindro circular semiinfinito radiando a la base	0,65 (Diámetro)
Cilindro circular semiinfinito radiando al centro de la base	Diámetro
Cilindro circular recto de altura igual a dos diámetros radiando a la base	0,60 (Diámetro)
Cilindro circular recto de altura igual a dos diámetros radiando a la superficie cilíndrica	0,76 (Diámetro)
Cilindro circular recto de altura igual al diámetro, radiando al centro de la base	Diámetro
Cilindro circular recto de altura igual al diámetro, radiando a toda la superficie	0,66 (Diámetro)
Cilindro circular recto de altura igual a la mitad del diámetro, radiando al centro de la base	0,43 (Diámetro)
Cilindro circular recto de altura igual a la mitad del diámetro, radiando a toda la superficie	0,46 (Diámetro)
Cubo radiando a alguna cara	0,6 (Arista)
Paralelepípedo rectangular, 1,1,4, radiando a la cara, 1x4	0,90 (Arista más corta)
Paralelepípedo rectangular, 1,1,4, radiando a la cara, 1x1	0,86 (Arista más corta)
Paralelepípedo rectangular radiando a todas las caras	0,89 (Arista más corta)
Conjunto infinito de tubos al tresbolillo al espacio exterior, Diámetro del tubo = espacio libre	3,4 (Espacio libre)
Conjunto infinito de tubos al tresbolillo al espacio exterior, Diámetro del tubo = (1/2) espacio libre	4,44 (Espacio libre)
Hemisfera radiando a un elemento y al centro de la base	0,5 (Diámetro)
Volumen entre dos planos paralelos radiando a un elemento sobre una de las caras	1,8 (Espaciado entre planos)
Volumen de gas fuera de un conjunto de tubos radiando a un único tubo:	
Disposición al tresbolillo (Distancia entre centros de los tubos, $S = 2D$)	3 (S-D)
Disposición al tresbolillo (Distancia entre centros de los tubos, $S = 3D$)	3,8 (S-D)
Disposición regular (en línea) $S = 2D$	3,5 (S-D)

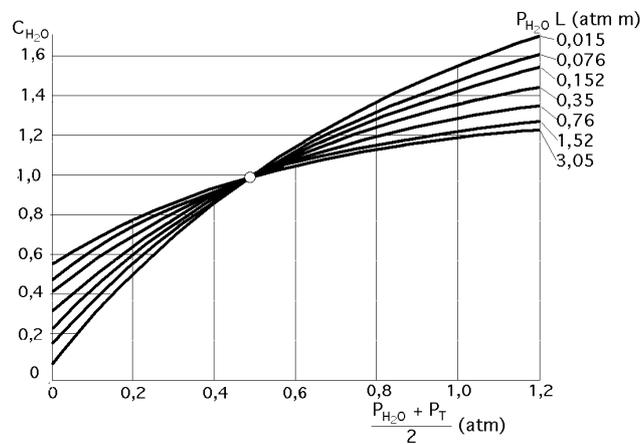


Fig IV.20- Factor de corrección de la emisividad del vapor de H₂O a presiones distintas de 1 atmósfera, (Höttel)

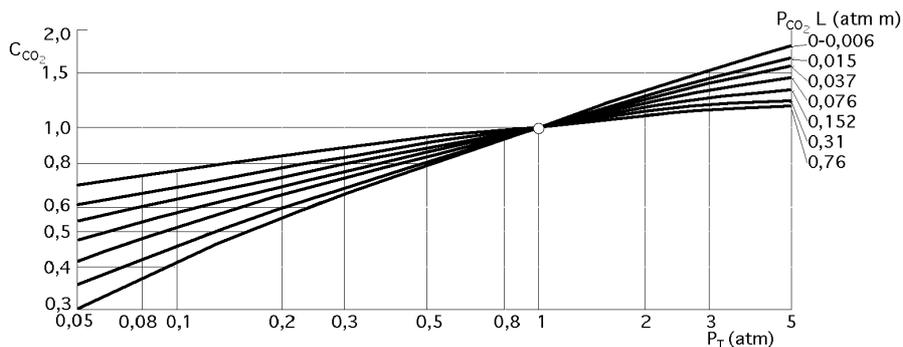


Fig IV.21- Factor de corrección de la emisividad del CO₂ a presiones distintas de 1 atmósfera, (Höttel)

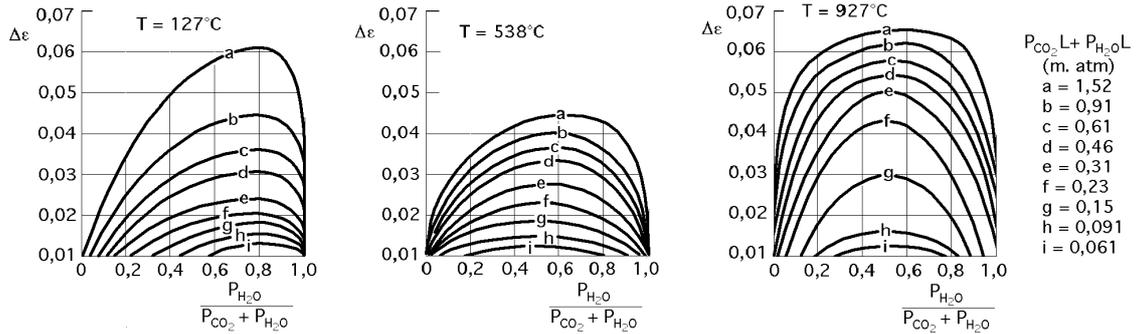


Fig IV.22a.- Factor de corrección $\Delta\epsilon$ de la emisividad de una mezcla de vapor de H_2O y CO_2 (Höttel)

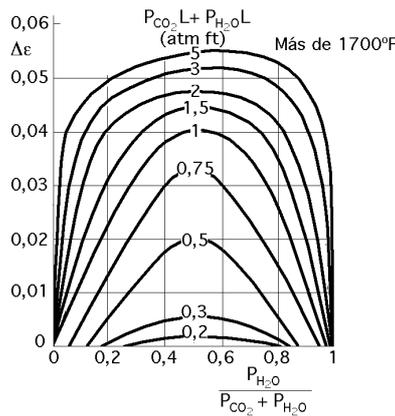


Fig IV.22b.- Factor de corrección $\Delta\epsilon$ de la emisividad de una mezcla de vapor de H_2O y CO_2 (Höttel)

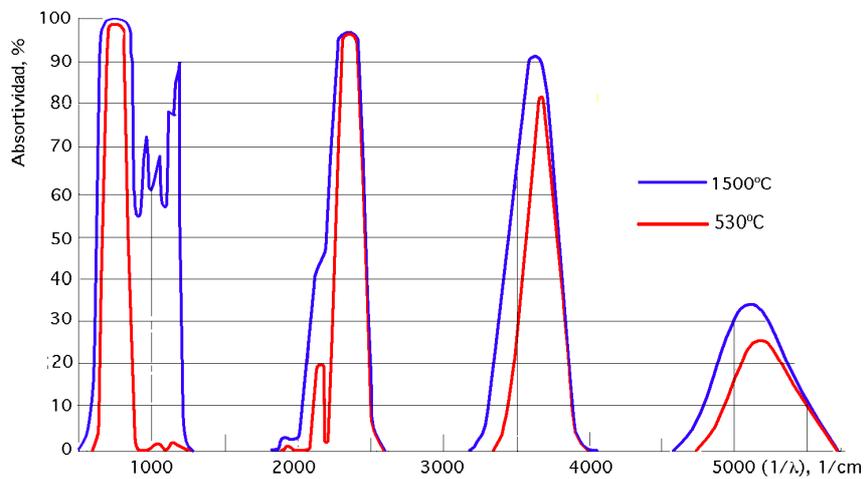


Fig IV.23.- Absorptividad espectral del CO_2 : $\rho L = 2,44 \text{ kg/m}^2$

Determinación práctica de la emisividad y absorptividad

a) *Anhidrido carbónico.*- La presión parcial p del CO_2 es proporcional a su concentración en volumen en la mezcla; por ejemplo:

- Si su proporción en volumen es del 12% a la presión atm, se tiene una presión parcial $p = 0,12 \text{ atm}$
- Si la presión total de la mezcla fuese de 4 atm, la presión parcial del CO_2 sería de 0,48 atm

Según la forma del recinto o mediante la Tabla IV.13 se obtiene el valor de la longitud característica L , se determina el producto $p L$, y con ayuda de la Fig IV.19 se calcula la emisividad ϵ del CO_2 a la temperatura del gas.

La absorptividad α es diferente de ϵ y se calcula también con la Fig IV.19 utilizando el mismo valor de pL que el empleado para la determinación de ϵ pero tomando como temperatura la de la superficie del sólido $T_{sól}$ (que se comporta como un cuerpo negro), $\left\{ \begin{array}{l} \text{que emite radiación (si el gas está más frío) } \\ \text{que la recibe (si el gas está más caliente) } \end{array} \right.$

La absorptividad del CO_2 se calcula también mediante la ecuación de Höttel, de la forma:

$$\alpha_{CO_2})_{T_{sól}} = C_{CO_2} \epsilon'_{CO_2})_{T_{sól}} \left(\frac{T_{CO_2}}{T_{sólido}} \right)^{0,65}$$

en la que el valor de $\left\{ \begin{array}{l} C_{CO_2} \text{ se toma de la Fig IV .19} \\ \epsilon'_{CO_2})_{T_{sólido}} \text{ se toma de la Fig IV .19 a la temperatura del sólido} \end{array} \right.$, calculándose las nuevas

emisividades ϵ' a las presiones parciales: $p'_{CO_2} = p_{CO_2} \frac{T_{sól}}{T_{gas}}$

A título de ejemplo, en el supuesto de que la proporción de CO_2 sea del 12,2% a la presión total de 1 atm, (no hay factor de corrección), se tiene:

$$a) p = 0,12 \text{ atm} ; L = 1 \text{ m} ; pL = 0,12 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_{gas} = 1.000C ; \epsilon = 0,12 \\ T_{sól} = 600C ; \alpha = 0,14 \end{array} \right.$$

$$b) p = 0,12 \text{ atm} ; L = 1 \text{ m} ; T_{gas} = 600^\circ C ; T_{sól} = 1000^\circ C ; pL = 0,12 ; \epsilon = 0,14 ; \alpha = 0,12$$

b) *Oxido de C.*- Para este gas se utiliza el mismo diagrama que para el CO_2 pero se dividen por 2 los valores de ϵ y de α así determinados.

c) *Vapor de agua.*- Se opera igual que para el CO_2 con ayuda de la gráfica IV.3 para 1 atm, y cuando la presión sea distinta de la unidad los valores obtenidos se multiplican por un factor de corrección que se obtiene de la Fig IV.20. Si el vapor de H_2O se encuentra a una temperatura T_{H_2O} para una radiación incidente que procede de una superficie negra a la temperatura $T_{sól}$, la absorptividad del H_2O se calcula mediante la ecuación:

$$\alpha_{H_2O})_{T_{sól}} = C_{H_2O} \epsilon'_{H_2O})_{T_{sól}} \left(\frac{T_{H_2O}}{T_{sólido}} \right)^{0,45}$$

en la que el valor de C_{H_2O} se toma de la Fig IV.20, y el de $\epsilon'_{H_2O})_{T_{sól}}$ de la Fig IV.18, a la temperatura del

sólido, calculándose las nuevas emisividades ϵ' a las presiones parciales $p'_{H_2O} = p_{H_2O} \frac{T_{sól}}{T_{gas}}$

Para una presión parcial del vapor de = 0,122 atm, $L = 1$, $T_{gas} = 1025^\circ C$ y $T_{sól} = 750^\circ C$, resulta:

$$pL = 0,122 ; \epsilon = 0,105 ; \alpha = 0,14 ; C_{H_2O} = 1,07 \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \epsilon = 0,105 \times 1,07 = 0,112 \\ \alpha = 0,14 \times 1,07 = 0,15 \end{array} \right.$$

d) *Humos.*- Los humos son el resultado de la combustión y contienen anhídrido carbónico, vapor de agua, nitrógeno y en el caso mas general O_2 , óxido de C y un poco de anhídrido sulfuroso, que se desprecian para estos cálculos a menos que estén en cantidades importantes. Si tanto el vapor de H_2O como el CO_2 están presentes en una mezcla gaseosa, la absorptividad es de la forma:

$$\alpha_{(mezcla)} = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O} - \Delta\alpha$$

en la que α_{H_2O} y α_{CO_2} se calculan mediante las ecuaciones anteriores, mientras que $\Delta\alpha = \Delta\epsilon$ se obtiene de la Fig IV.22 a la temperatura $T_{sól}$.

Tabla IV.14.- Emisividades normales

METALES	<i>Estado superficie</i>	<i>Temperat. (°C)</i>	<i>Emisividad ϵ</i>	NO METALES	<i>Estado superficie</i>	<i>Temperat. (°C)</i>	<i>Emisividad ϵ</i>
Aluminio	<i>placa pulida</i>	25	0,040	Amianto	<i>en cartón</i>	37	0,960
Aluminio	<i>placa pulida</i>	200-600	0,038-0,06	Amianto	<i>en papel</i>	37	0,930
Aluminio	<i>oxidado</i>	100-500	0,20-0,33	Ladrillo	1,5962	1000	0,380
Aluminio	<i>placa mate</i>	25	0,070	Ladrillo	<i>rojo, rugoso</i>	20	0,930
Antimonio	<i>pulido</i>	37-260	0,28-0,31	Ladrillo	<i>gris, satinado</i>	1100	0,750
Latón	<i>oxidado</i>	200-500	0,600	Ladrillo	<i>sílice</i>	540	0,800
Latón	<i>pulido</i>	20-300	0,05-0,032	Carbón	<i>filamento</i>	1050-1400	0,526
Latón	<i>placa usada</i>	50-350	0,220	Carbón	<i>carbonilla bujías</i>	95-270	0,953
Latón	<i>mate</i>	50	0,202	Carbón	<i>negro de humo</i>	20	0,930
Cromo	<i>pulido</i>	37-1100	0,058	Cerámica	<i>alfarería, satinado</i>	20	0,900
Cobre	<i>negro oxidado</i>	37	0,780	Cerámica	<i>porcelana</i>	22	0,920
Cobre	<i>ligeramente mate</i>	25	0,037	Cerámica	<i>refractaria, negra</i>	93	0,940
Cobre	<i>pulido</i>	37-260	0,04-0,05	Arcilla	<i>caldeada</i>	70	91
Cobre	1,5962	80	0,018	Hormigón	<i>rugoso</i>	37	0,94
Oro	<i>no pulido</i>	20	0,470	Vidrio	<i>liso</i>	22	0,940
Oro	<i>pulido</i>	37-260	0,020	Vidrio	1,5962	260-530	0,95-0,85
Hierro	<i>oxidado</i>	100	0,740	Hielo	<i>liso</i>	0	0,966
Hierro	<i>esmerilado</i>	20	0,240	Hielo	<i>rugoso</i>	0	0,985
Hierro	<i>pulido</i>	425-1025	0,14-0,38	Mármol	<i>grano fino pulido</i>	22	0,93
Hierro	<i>todo oxidado</i>	20	0,69	Mica		37	0,75
Hierro	<i>laminado</i>	925-1100	0,87-0,95	Mampostería	<i>emplastecida</i>	0	0,930
Fundición	<i>mecanizada</i>	22	0,44	Papel	<i>ordinario</i>	20	0,8-0,9
Fundición	1,5962	200-600	0,64-0,78	Papel	<i>amianto</i>	20	0,950
Plomo	1,5962	200	0,63	Papel	<i>alquitranado</i>	20	0,910
Plomo	<i>oxidado gris</i>	23	0,280	Papel	<i>ordinario</i>	95	0,920
Plomo	<i>pulido</i>	130-260	0,08-0,056	Yeso blanco	<i>rugosa</i>	20	0,930
Magnesio	<i>pulido</i>	37-260	0,07-0,13	Porcelana	<i>vidriada</i>	20	0,930
Magnesio	<i>oxidado</i>	275-825	0,55-0,2	Cuarzo fundido	<i>rugoso</i>	20	0,930
Molibdeno	<i>para filamentos</i>	700-2600	0,10-0,20	Goma blanda	<i>gris</i>	25	0,860
Molibdeno	<i>pulido</i>	150-480	0,02-0,05	Goma dura	<i>negra rugosa</i>	25	0,950
1,5962	<i>pulido</i>	37	0,170	Madera de haya	<i>láminas</i>	25	0,935
Níquel	1,5962	260-540	0,37-0,48	Madera de encina	<i>láminas</i>	25	0,885
Níquel	<i>pulido</i>	100-260	0,045-0,07	Tierra		37	0,950
Níquel	1,5962	37-260	0,04-0,06	PINTURAS			
Platino	1,5962	260-540	0,06-0,1	Aluminio	<i>bronce de</i>	100	0,300
Platino	<i>placa pulida</i>	260-540	0,06-0,1	Aluminio	<i>esmaltado rugoso</i>	20	0,390
Platino	1,5962	260-540	0,07-0,11	Aluminio pintado	1,5962	150-300	0,350
Platino	<i>filamento</i>	26-1225	0,04-0,19	Aluminio	<i>Al 10%, laca 22%</i>	100	0,520
Plata	<i>pulida, pura</i>	225-625	0,02-0,03	Aluminio	<i>Al 26%, laca 27%</i>	100	0,300
Plata	<i>pulida</i>	37-370	0,02-0,03	Laca	<i>blanca</i>	100	0,925
Acero	<i>pulido</i>	23	0,160	Laca	<i>negra mate</i>	80	0,970
Estaño	<i>brillante</i>	225-265	0,02-0,03	Aceite	<i>pintura</i>	20	0,89-0,97
Estaño	<i>pulido</i>	37-370	0,070	Aceite pintura	<i>todos los colores</i>	100	0,92-0,96
Tungsteno	<i>para filamentos</i>	3300	0,390	Baquelita	<i>esmaltada</i>	80	0,935
Tungsteno	<i>filamento envejecido</i>	25-3300	0,03-0,35	Esmalte	<i>blanco rugoso</i>	20	0,900
Cinc	<i>oxidado</i>	20	0,250	Esmalte	<i>negro brillante</i>	25	0,876
Cinc	<i>pulido</i>	225-325	0,05-0,06	Pintura al aceite		1-200	0,885
				Imprimación minio		20-1100	0,930

Tabla IV.15.- Absortividad en superficies

METALES	<i>Estado superficial</i>	<i>Absortividad</i>	METALES	<i>Estado superficial</i>	<i>Absortividad</i>
Aluminio	<i>pulido</i>	0,10	Magnesio	<i>pulido</i>	0,19
Aluminio	<i>anodizado</i>	0,14	Magnesio	<i>oxidado</i>	0,55-0,2
Aluminio	<i>en placas</i>	0,15	Níquel	<i>muy pulido</i>	0,15
Bronce	<i>pulido</i>	0,3-0,5	Níquel	<i>pulido</i>	0,36
Bronce	<i>mate</i>	0,4-0,65	Níquel	<i>oxidado</i>	0,79
Cromo	1,5962	0,41	Platino	<i>brillante</i>	0,31
Cobre	<i>muy pulido</i>	0,18	Plata	<i>muy pulida</i>	0,07
Cobre	1,5962	0,25	Plata	<i>pulida</i>	0,13
Cobre	<i>decolorada por exposición</i>	0,64	Acero inoxidable	<i>pulido</i>	0,33
Oro		0,21	Acero inoxidable	1,5962	0,52
Hierro	<i>galvanizado pulido</i>	0,34	Tungsteno	<i>muy pulido</i>	0,37
Hierro	<i>galvanizado nuevo</i>	0,64	Cinc	<i>muy pulido</i>	0,34
Hierro	<i>mate, oxidado</i>	0,96	Cinc	<i>pulido</i>	0,55
NO METALES			NO METALES		
Asfalto pavimento		0,85	Hormigón	<i>descolorido</i>	0,65
Asfalto pavimento	<i>libre de polvo</i>	0,93	Hormigón	<i>marrón</i>	0,85
Asfalto pavimento	<i>nuevo</i>	0,93	Hormigón	<i>sucio, oscuro</i>	0,71
Ladrillo	<i>barnizado blanco</i>	0,26	Granito		0,45
Ladrillo	<i>arcilla, barnizado crema</i>	0,36	Grasa		0,75-0,80
Ladrillo	<i>rojo</i>	0,70	Grava		0,29
Ladrillo rojo	<i>satinado oscuro</i>	0,77	Oxido de magnesio		0,15
Mármol	<i>sin pulir</i>	0,47	Pintura aceite	<i>plomo blanco</i>	0,24-0,26
Mármol	<i>blanco</i>	0,44	Pintura aceite	<i>crema clara</i>	0,30
Mármol	<i>con fisuras</i>	0,60	Pintura aceite	<i>verde claro</i>	0,50
Papel aglomerado		0,25	Pintura aluminio		0,55
Papel blanco		0,28	Pintura aceite	<i>gris claro</i>	0,75
Arena		0,76	Pintura aceite negra	<i>sobre hierro galvanizado</i>	
Serrín de madera		0,75	Pizarra	<i>gris plateado</i>	0,79
Nieve	<i>limpia</i>	0,2-0,35	Pizarra	<i>gris azulado</i>	0,85
Hollín, carbón		0,95	Pizarra	<i>gris verdoso</i>	0,88
Oxido de cinc		0,15	Pizarra	<i>gris oscuro</i>	0,90

Cuando el CO_2 y el H_2O radian, cada uno de ellos es opaco a la radiación del otro, ya que ellos no son diatérmicos, es decir, el H_2O intercepta una parte de la radiación emitida por el CO_2 y viceversa, introduciéndose un término correctivo $\Delta\epsilon$ que se tiene que restar de la suma de los ϵ .

Este término viene dado por una serie de curvas cuyo eje de abscisas es $\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2O} + p_{CO_2}}$ mientras que $(p_{H_2O}L + p_{CO_2}L)$ figura como un parámetro.

En el ejemplo anterior de los humos con 12,2% de CO_2 y 12,2% de vapor de agua se tenía:

$$\epsilon_{CO_2} = 0,125 \quad ; \quad \epsilon_{H_2O} = 0,112$$

Se considera el diagrama por encima de $927^\circ C$: $p_{CO_2}L + p_{H_2O}L = 0,122 + 0,122 = 0,244$

$$\frac{p_{H_2O}L}{p_{CO_2} + p_{H_2O}} = \frac{0,122}{0,244} = 0,5$$

Se puede utilizar la curva 0,228 que proporciona, $\Delta\epsilon = 0,035$.

La emisividad total de los humos es: $0,112 + 0,125 - 0,035 = 0,202$

El calor intercambiado es: $q_{1(neta)} = \sigma \{ \epsilon_{gas} T_{gas}^4 - \alpha_{gas} T_{sól}^4 \}$, que indica que el gas emite y, al no ser transparente a la radiación, absorbe una parte de la radiación devuelta.

Radiación de nubes de partículas.- La radiación de nubes de partículas puede ser debida a las llamas de carbón pulverizado, llamas de gases naturales, llamas de residuos de fuel producidos en la combustión de líquidos pesados, llamas luminosas de sebos originados en el craking de hidrocarburos pesados, llamas con mucho polvo, etc. Las *llamas* se encuentran cargadas de partículas incandescentes que aumentan su emisividad como consecuencia del recalentamiento de las partículas de combustible no quemadas, o por la formación de C por craking, o como consecuencia de la presencia de cenizas, etc.

Para *llamas de carbón pulverizado*, se debe efectuar un proceso meticoloso de preparación del polvo de carbón, de manera que no basta una molienda, sino que además hay que seleccionar el tamaño del grano, de forma que las partículas no superen las 200 micras.

Para *llamas luminosas de sebos* debidos al craking de hidrocarburos pesados, (el sebo se origina por la parte pesada del hidrocarburo), el tamaño de dichos sebos es notablemente inferior siendo del orden de 0,06 micras.

Para llamas debidas al *fuel*, además de los sebos existen otros sólidos que los acompañan cuyas partículas son del orden de 50 a 100 micras. Para el caso de llamas debidas a partículas de polvo, el fenómeno es mucho menos importante.

De todo esto se deduce que las dimensiones de unos casos son muy distintas a las de otros y, por lo tanto, el comportamiento de la llama será también muy distinto. Las partículas del orden de magnitud de 200 micras son opacas a la radiación, mientras que las partículas del orden de magnitud de 0,06 micras son semitransparentes a la misma, por lo que el estudio de las *llamas luminosas de sebos* es distinto al de las *llamas de carbón pulverizado*.

Para *llamas claras de gases pobres y de gas de petróleo* se toma $\epsilon_F = \epsilon_{gases}$

Para *llamas de mazut*, se toma:

$\epsilon_F = \epsilon_{gases} + 0,1$, (cuando el aspecto de la llama se aproxima a las escalas 1 y 2 de Ringelmann)

$\epsilon_F = \epsilon_{gases} + 0,2$, (cuando el aspecto de la llama se aproxima a las escalas 3 y 4 de Ringelmann)

siendo las escalas de Ringelmann unas placas cuadrículadas de espesor variable, según la progresión de la escala. Un sistema óptico permite comparar el aspecto de los humos con la impresión gris proporcionada por la visión de las escalas de Ringelmann a una distancia determinada y apreciar así la calidad de la combustión.

Para llamas de color más fuerte la combustión es defectuosa y el cálculo no tiene sentido. En la llama, el valor de ϵ_F no es nunca constante, por lo que existiendo en la misma zonas diferentes, se puede considerar la radiación particular del fondo de la llama, en donde la temperatura es muy elevada.

Llamas luminosas.- La emisividad de la llama se mejora añadiendo benzol, ya que se favorece la formación de sebos; el rendimiento obtenido así es mucho mayor. Se han llegado a obtener por este procedimiento valores de la emisividad $\epsilon_{gas} = 0,95$ muy próximos a la unidad.

El mecanismo de la formación de sebos no es muy conocido, pero se conocen algunos resultados; por ejemplo, se ha comprobado que si se mezcla oxígeno con el combustible no hay formación de sebos; también se sabe que la mezcla no debe ser homogénea y que existe una dependencia de la relación (aire-

combustible), de la cantidad de aire primario, del grado de atomización del combustible, de la energía cinética de los gases, de la geometría de la llama, de la presencia de sumideros y refractarios, etc.

Para determinar el valor de la emisividad de las llamas luminosas, se parte de la energía dE que incide sobre un volumen determinado, que se supone conocida.

En un espesor dL habrá una absorción de energía de la forma:

$$dE = -K E S dL$$

que integrada para una superficie S unidad:
$$\int_{E_0}^E \frac{dE}{E} = - \int_0^L K dL \Rightarrow \ln \frac{E}{E_0} = -K L ; \frac{E}{E_0} = e^{-KL}$$

y considerando la absorción en tanto por uno de energía radiada:
$$\alpha = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - e^{-KL}$$

Como α y λ están relacionadas entre sí, se puede poner: $\epsilon_\lambda = 1 - e^{-C L f(\lambda)}$, en la que C es una constante y $f(\lambda)$ depende de una serie de factores, teniendo que recurrir a la medida de temperaturas por técnicas de pirometría óptica o caña pirométrica.

Llamas de carbón pulverizado.- El cálculo experimental del coeficiente ϵ de emisividad conduce a la expresión:

$$\epsilon = 1 - e^x, \text{ siendo: } x = \frac{L \left\{ (1 - Z) \frac{\gamma_0}{\gamma} \right\}^{2/3}}{G_h \gamma_0 d_0 \hat{T}_{llamas}}$$

con: $\left\{ \begin{array}{l} L \text{ recorrido de la radiación} \\ Z \text{ es el tanto por uno de sustancias volátiles y de humedad contenidas en el carbón} \\ G_h \text{ es el peso de los productos de la combustión por unidad de peso kg/kg} \\ d_0 \text{ es el diámetro de las partículas de carbón pulverizado antes de su combustión} \\ \gamma_0 \text{ y } \gamma \text{ son los pesos específicos antes y después de la crackización} \end{array} \right.$

Hay que tener en cuenta que en estas emisiones aparece el fenómeno de la luminosidad con la consiguiente radiación, por lo que el valor de ϵ obtenido es por defecto.

Los valores obtenidos en la mayoría de los casos, son muy próximos a la unidad.

Un horno limpio pierde emisividad, mientras que otro con polvo la gana.

Para la combustión del carbón pulverizado se adopta $\alpha_F = \epsilon_F = 0,8 \text{ a } 1$

Hornos y hogares.- El cálculo en hornos se puede hacer por aproximaciones sucesivas, dividiendo el horno en varias partes elegidas arbitrariamente y tales que, en cada una de ellas, las condiciones sean suficientemente uniformes. Para la conservación del buen estado de los refractarios no es prudente sobrepasar las 300.000 Kcal/h.m³ de laboratorio y de hogar, por lo que así se tiene una primera aproximación del volumen a adoptar. Además, si los elementos reaccionantes (hornos de vidrio por ejemplo) atacan el refractario hay que refrigerar las paredes, lo que implica la solidificación de una parte de las escorias fundidas que protegerán a los ladrillos.

En la cámara de combustión la llama se puede aproximar a una esfera, cilindro o cubo, evitándose la forma cónica en que la superficie radiante es menor y que por el vértice podría provocar recalentamientos muy localizados; la llama no se debe dirigir directamente al objeto a calentar, sino paralelamente para un mejor reparto del calor.

En la construcción de un horno hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las pérdidas al exterior a través de las paredes refractarias y algunas veces a través del suelo, son iguales a la convección entre llama y refractario, o llama y receptor, compensándose

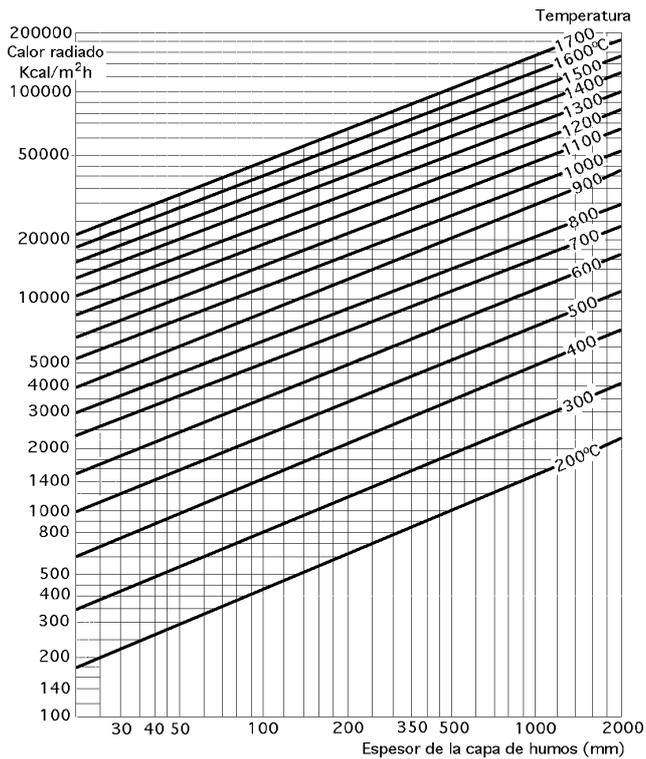


Fig IV.24.- Humos de gas de horno de cok

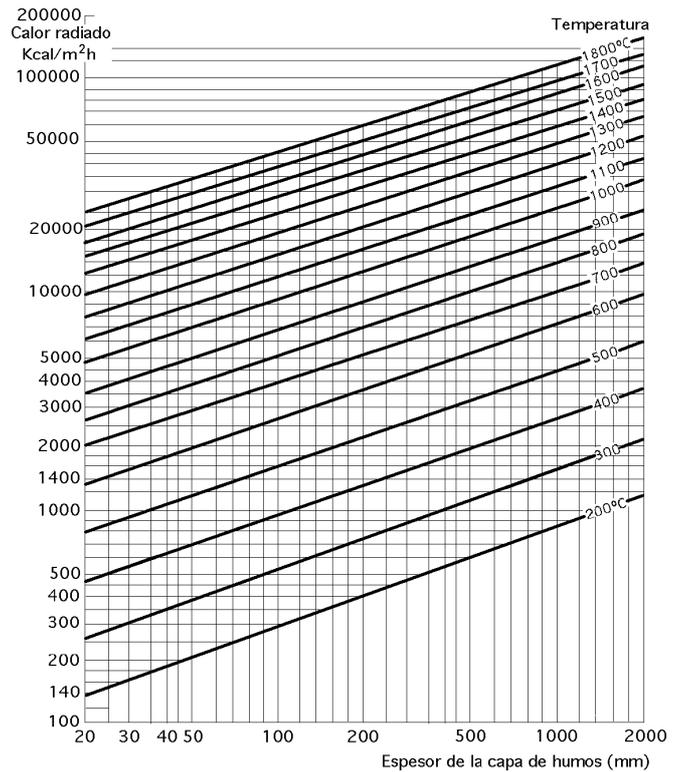


Fig IV.25.- Humos de gas de gasógeno

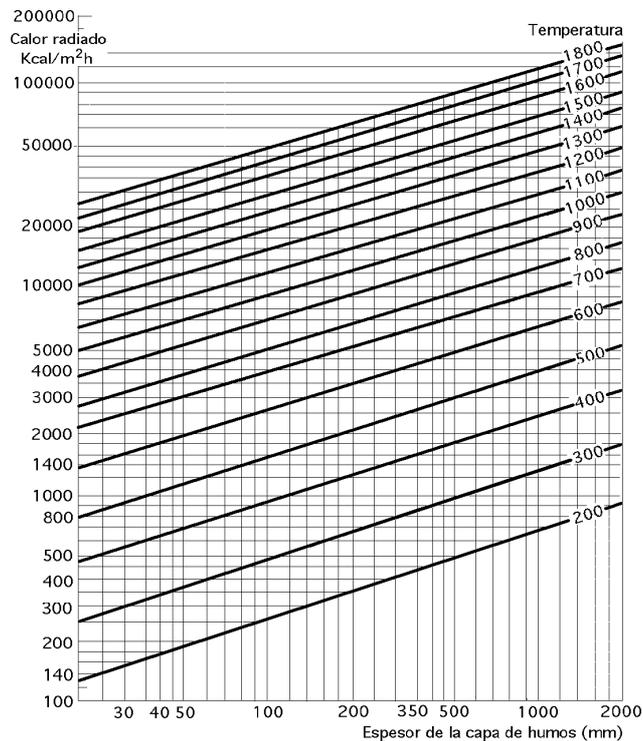


Fig IV.26.- Humos de gas de horno alto

- La llama es gris: $\alpha_F = \epsilon_F = \frac{\epsilon_{gas} \cdot \alpha_{gas} \left(\frac{T_{Receptor}}{T_{gas}} \right)^4}{1 - \left(\frac{T_{Receptor}}{T_{gas}} \right)^4}$

- Todas las superficies refractarias tienen una temperatura común, pero desconocida

- Se puede considerar para la llama y los productos de la combustión una temperatura media T_{gas}

- El receptor térmico (cuerpo a calentar gris), tiene una temperatura superficial uniforme $T_{Receptor}$ un factor de emisión ϵ_R y una superficie A_R .

El calor emitido por la llama se determina por la ecuación:

$$q_1(\text{neta}) = A_R F_{gas-R}^* \{ E_{b(\text{gas})} - E_{b(\text{Recep})} \} + h_{gas-R} A_R (T_{gas} - T_{Recep}) + U_{gas-ext} A_{ext} (T_{gas} - T_{ext})$$

en la que el primer sumando es la radiación de las llamas al receptor, el segundo es la convección hacia el receptor y el tercero son las pérdidas al exterior; esta ecuación es válida para cada sección en que se ha dividido el horno.

Para las demás secciones se repite el mismo cálculo.

El valor de: $F_{gas-R}^* = \frac{1}{\frac{1}{F_{gas-R}} + \frac{1}{\epsilon_R} - 1}$, con: $F_{gas-R} = 1 + \frac{\frac{A_R}{A_{gas}}}{1 + \frac{\epsilon_{gas}}{(1 - \epsilon_{gas}) F_{gas-R}}}$

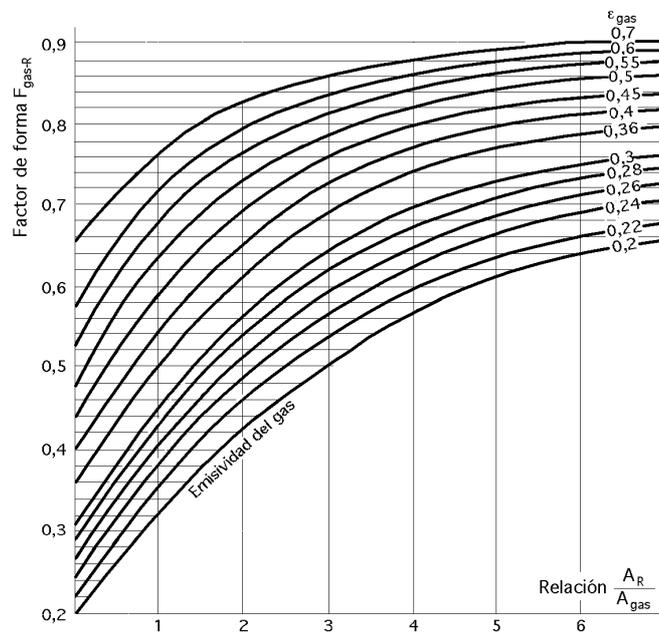


Fig IV.27.- Factor de forma F_{gas-R} relativo a la radiación entre la llama y el receptor

El valor de F_{gas-R} se puede obtener con bastante aproximación, utilizando la Fig IV.27, establecida para un valor de $\epsilon_g = 0,9$.

Las temperaturas de entrada y salida de cada sección se determinan a partir del calor q_F consumido en la misma, por la relación:

$$q_F = G c_{pF} (T_{Entrada\ llama} - T_{Salida\ llama})$$

siendo G la masa total del gas de combustión y c_{pF} el calor específico medio del gas a presión constante en esta sección

Si ϵ_g es diferente de 0,9 se corrige el valor encontrado para $\epsilon_g = 0,9$, mediante la expresión:

$$(F_{gas-R})_{\epsilon_R} = F_{\epsilon_R=0,9} \frac{\epsilon_R}{0,9} \frac{\epsilon_{gas} (1 - 0,9) + 0,9}{\epsilon_{gas} (1 - \epsilon_R) + \epsilon_R}$$

IV.4.- APLICACIONES

Ejemplo IV.1.- Conducción a través de pared plana.- Si una placa plana se calienta por una de sus caras y se refrigera por la cara opuesta, el régimen del flujo de calor se calcula por la ecuación

$$q = \frac{k A}{L} (T_1 - T_2)$$

Para una placa de acero, especificada por $\left\{ \begin{array}{l} \text{espesor} = 0,25'' (6,3 \text{ mm}) \\ \text{área superficial de las caras} i = 1 \text{ ft}^2 (0,0929 \text{ m}^2) \\ \text{gradiente de temperaturas } \Delta T = 25^\circ \text{F} (13,9^\circ \text{C}) \end{array} \right.$, el flujo de calor a través de la placa considerada, de $k = 30 \text{ Btu}/(\text{ft.h.}^\circ\text{F})$, es:

$$q = k A \frac{\Delta T}{L} = 30 \times 1 \times \frac{25}{0,25/12} = 36000 \text{ Btu/hora}$$

Ejemplo IV.2.- Flujo de calor por convección en pared compuesta.- El flujo calorífico es función de las resistencias intrínsecas que presentan el refractario, el acero y el aislamiento, y por las resistencias de las superficies de contacto.

Si se considera una superficie de $600 \text{ ft}^2 (55,75 \text{ m}^2)$ con gases a $1080^\circ\text{F} (582,2^\circ\text{C})$ en su lado interno, y temperatura ambiente de $80^\circ\text{F} (26,7^\circ\text{C})$ en su lado exterior, siendo las conductividades térmicas, espesores y coeficientes de transmisión de calor por convección, los siguientes:

- Conductividades térmicas del refractario $k_{ref} = 0,09$; acero $k_{acero} = 25$; aislamiento $k_{aisl} = 0,042 \text{ Btu}/\text{ft.h}^\circ\text{K}$
- Espesores: $\Delta x_{ref} = 4'' (10,16 \text{ cm})$, $\Delta x_{acero} = 0,25'' (0,635 \text{ cm})$, $\Delta x_{aisl} = 3'' (7,62 \text{ cm})$
- Coeficientes de transferencia de calor por convección, en cada una de las caras de la superficie considerada:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{interior} \rightarrow (h_{cv})_{int} = 5,0 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \text{h}^\circ \text{F} \\ \text{exterior} \rightarrow (h_{cv})_{ext} = 2,0 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \text{h}^\circ \text{F} \end{array} \right.$$

Como la diferencia de temperaturas entre la del gas radiante T_{gas} y la de la superficie T_{sup} es pequeña, y suponiendo que la emisividad de la superficie es igual a 1 y que el factor de forma $F = 1$, el coeficiente de transferencia de calor por radiación se calcula mediante la expresión:

$$h_r = 4 \sigma \varepsilon F \left(\frac{T_g + T_s}{2} \right)^3 = 4 \sigma \varepsilon F T_g^3 = 4 \times 0,1713 \cdot 10^{-9} \times (1080 + 460)^3 = 25 \text{ Btu}/\text{ft}^2 \text{h}^\circ \text{F}$$

$$R_{eq} A = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{25}} + \frac{4}{0,09} + \frac{0,25}{25} + \frac{3}{0,042} + \frac{1}{2} 0,033 + 3,7 + 0,000833 + 5,95 + 0,5 = 10,18 \frac{\text{ft}^2 \text{h}^\circ \text{F}}{\text{Btu}}$$

El refractario y el aislamiento son los que controlan la resistencia global de la pared compuesta; la resistencia del acero representa un valor despreciable, en el conjunto. Si las sucesivas capas de materiales no ofrecen un buen contacto térmico, en sus respectivas interfaces, habrá resistencias debidas a espacios de aire o resistencias de películas.

En el caso de paredes compuestas de materiales aislantes, esas resistencias se pueden considerar despreciables; no obstante, si las resistencias de las capas son pequeñas, en comparación con las respectivas resistencias de las interfaces, deben incluirse en los cálculos de la resistencia global.

Un ejemplo de esta circunstancia se presenta en la transferencia de calor hacia un tubo de caldera, que tiene deposición interna de óxidos; el flujo de calor se puede determinar en la forma:

$$q = k A \frac{T_1 - T_2}{L} = \frac{T_1 - T_2}{R_{eq}} = A \frac{T_1 - T_2}{R_{eq} A} = 600 \times \frac{1080 - 80}{10,18} = 58939 \text{ Btu/h}$$

Para comprobar si las conductividades supuestas son correctas, hay que calcular los intervalos de temperaturas correspondientes a cada material componente de la pared compuesta; para ello hay que calcular las temperaturas respectivas en las interfaces de los materiales en la forma:

$$T_1 = T_0 - \frac{q}{A} (RA)_f = 1080 - \frac{58939}{600} \times 0,033 = 1077^\circ\text{F}$$

$$T_2 = T_1 - \frac{q}{A} (RA)_1 = 1077 - \frac{58939}{600} \times 3,7 = 713^\circ\text{F}$$

$$T_3 = T_2 - \frac{q}{A} (RA)_2 = 713 - \frac{58939}{600} \times 0,000833 = 713^\circ\text{F}$$

$$T_4 = T_3 - \frac{q}{A} (RA)_3 = 713 - \frac{58939}{600} \times 5,95 = 128^\circ\text{F}$$

$$T_5 = T_4 - \frac{q}{A} (RA)_4 = 128 - \frac{58939}{600} \times 0,5 = 80^\circ\text{F}$$

La resistencia despreciable correspondiente al conducto de acero se pone de manifiesto por la caída de temperatura, entre las interfaces 2 y 3 igual a 0. Si las temperaturas calculadas en las interfaces indicasen que las conductividades estaban mal elegidas, a priori, deberían elegirse nuevas conductividades utilizando la temperatura media para cada material. Para el refractario se elegiría una nueva conductividad térmica correspondiente a la temperatura $\frac{T_1 + T_2}{2}$

Ejemplo IV.3.- Flujo de calor a través de la tubería aislada.- El flujo de calor a través de geometría cilíndrica es importante en la evaluación de la transferencia térmica en caldera. Se considera una línea de vapor, como la de la Fig IV.28. La analogía térmica relativa a la tubería se puede escribir mediante la expresión:

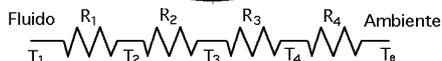
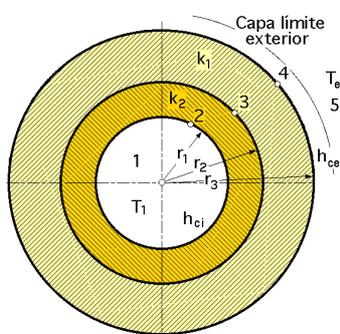


Fig IV.28.- Flujo de calor en tubería aislada térmicamente

$$R_{eq} = \frac{1}{h_i 2 \pi r_i l} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \pi k_1 l} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \pi k_2 l} + \frac{1}{h_{ext} 2 \pi r_{ext} l}$$

El tubo de acero es de diámetro nominal 3 pulg siendo sus diámetros interior y exterior de 3,07" y 3,50" respectivamente, con una $k = 25 \text{ Btu/ft.h}^\circ\text{F}$, y se recubre con una capa de aislamiento de 0,75" que tiene una $k = 0,10 \text{ Btu/ft.h}^\circ\text{F}$. La tubería transporta un fluido a 300°F y está en un medio ambiente a 80°F .

Con un coeficiente de transferencia de calor de $50 \text{ Btu/ft}^2\text{h}^\circ\text{F}$ para el interior y de $4 \text{ Btu/ft}^2\text{h}^\circ\text{F}$ para el lado exterior, la resistencia térmica por unidad de longitud es:

$$R_{eq} = \frac{1}{50 \times 2 \pi \frac{3,07/2}{12} \times 1} + \frac{\ln \frac{3,50}{3,07}}{2 \pi \times 25 \times 1} + \frac{\ln \frac{5}{3,5}}{2 \pi \times 0,10 \times 1} + \frac{1}{4 \times 2 \pi \frac{5/2}{12} \times 1} = 0,0249 + 0,000834 + 0,568 + 0,191 = 0,785 \text{ (ft h}^\circ\text{F/Btu)}$$

observándose que la resistencia global está dominada por la resistencia del aislamiento y de la capa peculiar externa, mientras que la resistencia del metal resulta despreciable.

El flujo de calor por una unidad de longitud de tubería es: $\frac{q}{l} = \frac{300 - 80}{0,785} = 280 \frac{\text{Btu}}{\text{ft h}}$

Ejemplo IV.4.- Transferencia térmica entre un objeto pequeño y una cavidad grande.- Se considera

una determinada sonda de termopar no apantallado con una emisividad 0,8 que está inserta en un conducto que transporta aire comburente a 240°F. Se supone que el termopar indica una temperatura de 540°F y que el coeficiente de transferencia de calor *termopar-gas*, es de 20 Btu/ft²h°F.

Se desea conocer la temperatura real correspondiente al gas.

La temperatura del termopar debe ser inferior a la del gas (aire comburente), ya que existe una pérdida de calor a través de las paredes.

En régimen permanente, mediante un balance de energía se igualan la pérdida de calor por radiación desde el termopar hacia la pared, con la convención desde el gas hacia el termopar. El flujo de calor entre el termopar y la cavidad es:

$$\frac{q}{A} = 0,8 \times (0,173 \cdot 10^{-8}) \times \{ (540 + 460)^4 - (240 + 460)^4 \} = 1041,9 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \text{h}}$$

siendo la temperatura real del gas (aire comburente): $T_g = \frac{q/A}{h_c} + T_1 = \frac{1041,9}{20} + 540 = 592^\circ\text{F}$

Se pueden realizar análisis similares sobre termopares apantallados con cinta reflectora, en medios ambientes de alta temperatura; esta práctica impide las pérdidas de calor del termopar y las lecturas de temperaturas incorrectas.

El flujo de calor desde un termopar apantallado se calcula mediante: $q_{Apant} = \frac{1}{N + 1} q_{No Apant}$, siendo N el número de capas concéntricas del material pantalla.

Ejemplo IV.5.- Transferencia de calor entre dos superficies.- La ecuación: $q_{12} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4)$, permite hacer una estimación de la máxima transferencia de calor radiante entre dos superficies, cuando se dan las dos condiciones siguientes:

- Ambas superficies se consideran cuerpos negros
- En el intercambio energético los gases absorbentes no se tienen en cuenta

Si se consideran dos superficies rectangulares iguales, de 5 a 10 ft, enfrentadas directamente y separadas entre sí 10 ft, y con unas temperaturas respectivas de 1040°F y 940°F, la energía que abandona la superficie 1 y que alcanza directamente la superficie 2, se define por el factor de forma $F_{12} = 0,125$.

El flujo neto de calor es:

$$q_{12} = A_1 F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = 50 \times 0,125 \times (0,173 \cdot 10^{-8}) \{ (1040 + 460)^4 - (940 + 460)^4 \} = 13078 \frac{\text{Btu}}{\text{h}}$$

En el caso de que se considere la participación de gases absorbentes, o bien que las paredes sean cuerpos grises, el flujo neto de calor se reduce aún más.

Ejemplo IV.6.- Radiación de un gas caliente a las paredes de hogar.- La transferencia neta de calor, entre la superficie y los gases (humos), se determina mediante la ecuación:

$$q_{sup-gas} = J - G = \frac{A_s (\epsilon_s \epsilon_g E_{bg} - \epsilon_s \alpha_g E_{bs})}{1 - (1 - \alpha_g)(1 - \epsilon_s)}$$

Cuando las superficies son negras se verifica $\epsilon_s = 1$ y la ecuación anterior se reduce a:

$$q_{neta} = q_{sól-gas} = A_{sól} (\epsilon_g E_{bg} - \alpha_g E_{b sól})$$

La superficie negra $A_{sól}$ recibe por unidad de superficie un promedio de energía del gas igual a la

energía que recibiría una superficie negra ficticia de área unidad colocada en el centro de una semiesfera de radio L constituida por el mismo gas y a la misma temperatura T_g . La longitud característica del gas L se denomina longitud media del gas y sus valores se encuentran tabulados.

Para superficies ligeramente grises, Höttel y Sarofin sugieren con errores inferiores al 10%, la siguiente:

$$q_{sol-gas} = A_{sól} \frac{\epsilon_g + 1}{2} (\epsilon_g E_{bg} - \alpha_g E_{b\ sól})$$

Si se considera un volumen de hogar de 160.000 ft³, con un área superficial para la transferencia de calor de 19860 ft², por el mismo pasan los gases de combustión a 2540°F estando las paredes del hogar a 1040°F.

Los gases de la combustión, a 1 atmósfera, están compuestos por: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Dióxido de carbono (CO}_2\text{)}, 10\% \\ \text{Vapor de agua (H}_2\text{O)}, 5\% \\ \text{Nitrógeno (N}_2\text{)}, 85\% \end{array} \right.$

Siendo la presión parcial de cada uno de ellos proporcional a su concentración en la mezcla. El cálculo de la emisividad total del gas es función de la temperatura, de la presión parcial y de la longitud L que el gas debe recorrer.

El valor de L depende de la forma del recinto y vale: $L = 3,6 \times \frac{V}{A} = 3,6 \times \frac{160.000}{19.860} \approx 29$

Las emisividades del vapor de agua y del CO₂ se calculan a la presión de 1 atmósfera en la forma:

- Para el agua se tiene: $p_{H_2O} L = 29,0 \times 0,05 = 1,45 \Rightarrow \epsilon_{H_2O} = 0,17$

- Para el dióxido de carbono: $p_{CO_2} L = 29,0 \times 0,10 = 2,90 \Rightarrow \epsilon_{CO_2} = 0,16$

El factor de corrección es $\Delta\epsilon = 0,05$, por lo que: $\epsilon_g = \epsilon_{H_2O} + \epsilon_{CO_2} - \Delta\epsilon = 0,17 + 0,16 - 0,05 = 0,28$

El cálculo de la absorptividad α de los gases es un poco más complejo que el de la emisividad; se calcula a partir de las mismas figuras que para la emisividad utilizando el mismo valor de pL que el empleado en el cálculo de ϵ pero se toma como temperatura la de la superficie del sólido que emite la radiación (si el gas está más frío), o que la recibe (si el gas está más caliente)

- Para el H₂O $\Rightarrow C_{H_2O} = p_{H_2O} L \frac{T_{sól}}{T_{H_2O}} = 0,05 \times 29,0 \times \frac{1040 + 460}{2540 + 460} = 0,73$

- Para el CO₂ $\Rightarrow C_{CO_2} = p_{CO_2} L \frac{T_{sól}}{T_{CO_2}} = 0,10 \times 29,0 \times \frac{1040 + 460}{2540 + 460} = 1,45$

- En la Fig IV.18, con los valores 0,73 y 1.500°F, se tiene: $\epsilon_{H_2O}(C_{H_2O}, T_{sól}) = 0,22$

- En la Fig IV.19, con los valores 1,45 y 1.500°F, se tiene: $\epsilon_{CO_2}(C_{CO_2}, T_{sól}) = 0,16$

- Para el H₂O: $\alpha_{H_2O} = \epsilon_{H_2O}(C_{H_2O}, T_s) \left(\frac{T_{H_2O}}{T_s}\right)^{0,45} = 0,22 \left(\frac{2540 + 460}{1040 + 460}\right)^{0,45} = 0,35$

- Para el CO₂: $\alpha_{CO_2} = \epsilon_{CO_2}(C_{CO_2}, T_s) \left(\frac{T_{CO_2}}{T_s}\right)^{0,65} = 0,16 \left(\frac{2540 + 460}{1040 + 460}\right)^{0,65} = 0,25$

- Los dos parámetros para entrada en la Fig IV.20, son:

$$\frac{p_{H_2O}}{p_{CO_2} + p_{H_2O}} = \frac{0,10}{0,05 + 0,10} = 0,66 \quad \text{y} \quad p_{H_2O}L + p_{CO_2}L = 1,45 + 2,90 = 4,35$$

y con estos valores se determina el coeficiente de corrección $\Delta\alpha = 0,05$, obteniéndose:

$$\alpha_g = \alpha_{H_2O} + \alpha_{CO_2} - \Delta\alpha = 0,35 + 0,25 - 0,05 = 0,55$$

El flujo neto de la transferencia de calor es:

$$q_{neta} = q_{sól-gas} = A_{sól} (\epsilon_g E_{bg} - \alpha_g E_{b\ sól}) = 19860 \{ (0,28 \times 3000^4) - (0,55 \times 1500^4) \} = 677 \times 10^6 \text{ Btu/h}$$

En las estimaciones de transferencia de calor en calderas, la longitud del haz siempre es grande, y por ello son también grandes los valores de los parámetros pL .

Para valores elevados de pL es conveniente utilizar tabulaciones particulares, en lugar de obtener cifras aproximadas (siempre más erróneas), mediante interpolación en los correspondientes ábacos de curvas, que se recogen en el conjunto de Fig IV.19, 20, 21, 22 y 23.

Ejemplo IV.7.- Radiación en una cavidad.- La radiación en una cavidad que contiene gases absorbentes, se puede estimar del mismo modo que cuando se estudian las transferencias de superficie a superficie, como:

- La de pared de caldera a pared de caldera
- La de placas tubulares radiantes a placas tubulares radiantes
- La de paredes de caldera a termointercambiadores contenidos en el cerramiento de la caldera

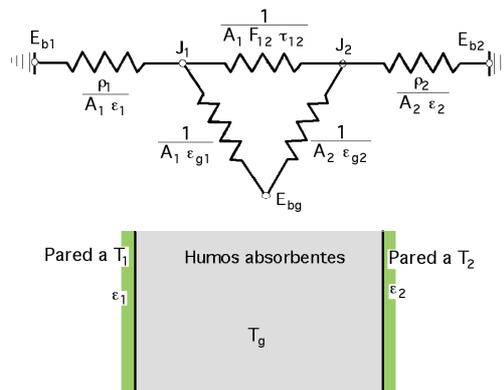


Fig IV.29.- Radiación en una cavidad

Hay que tener en cuenta que la resistencia entre las superficies 1 y 2 disminuye, cuando aumenta la transmisión ϵ_{12} en el gas, hasta una condición de transparencia $\epsilon_{12} = 1$.

Si el valor de la transparencia es nulo $\epsilon_{12} = 0$, los gases son opacos y, entonces, la resistencia es muy grande.

Cuando la emisividad del gas disminuye, el circuito térmico reduce la radiosidad, según la ecuación:

$$J_{sól} = \epsilon_{sól} E_{b\ sól} + (1 - \epsilon_{sól}) G_{sól}$$

La resolución del circuito de la Fig IV.29 se obtiene por aplicación de las leyes de Kirchoff, en los nodos J_1 y J_2 . Las ecuaciones son:

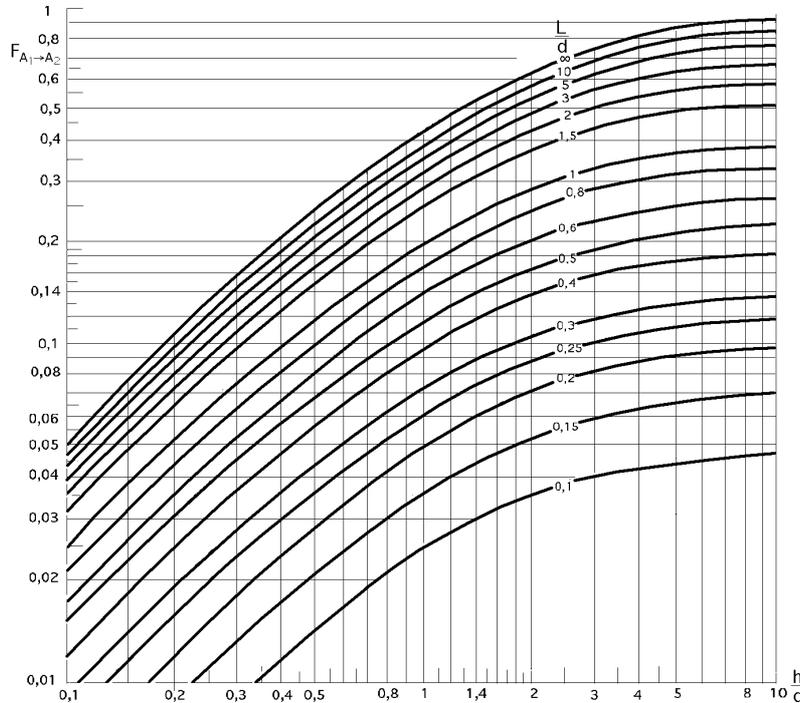
$$\frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1}} + \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_1 F_{12} \tau_{12}}} + \frac{E_{b\ gas} - J_1}{\frac{1}{A_1 \epsilon_{g1}}} = 0 \qquad \frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} + \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{12} \tau_{12}}} + \frac{E_{b\ gas} - J_2}{\frac{1}{A_2 \epsilon_{g2}}} = 0$$

El flujo neto de calor entre superficies es: $q_{12} = A_1 F_{12} \tau_{12} (J_1 - J_2)$

FACTORES DE FORMA DE RADIACIÓN (CONFIGURACIONES EN 3 DIMENSIONES)

1.- Dos rectángulos iguales y paralelos, $X = \frac{L}{D}$, $Y = \frac{h}{D}$

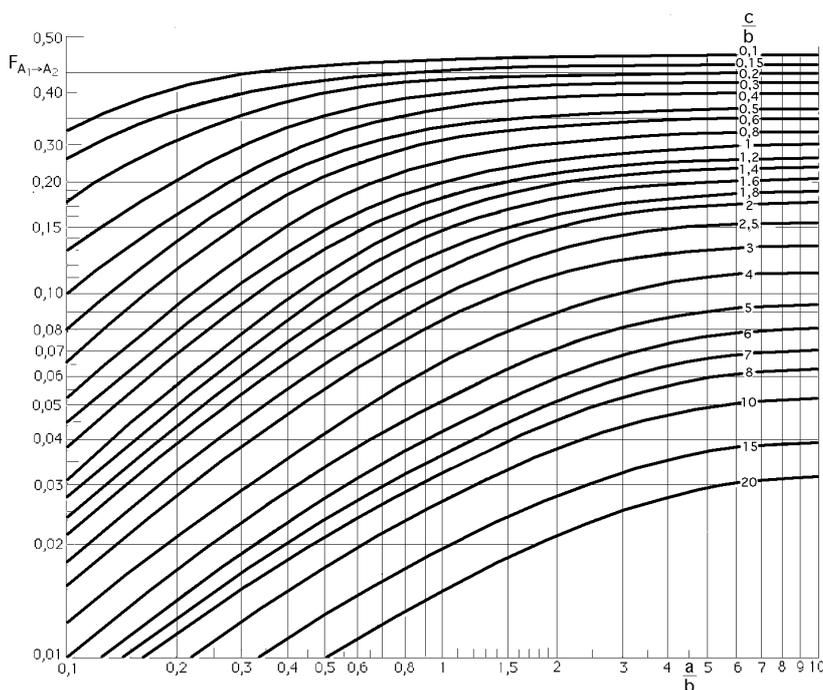
$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{2}{\pi XY} \left(\ln \sqrt{\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2}} + Y \sqrt{1+X^2} \operatorname{arc\,tg} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + X \sqrt{1+Y^2} \operatorname{arc\,tg} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} - Y \operatorname{arc\,tg} Y - X \operatorname{arc\,tg} X \right)$$



2.- Dos rectángulos con una arista común formando un ángulo de 90°

$$X = \frac{a}{b} ; Y = \frac{c}{b} ; Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

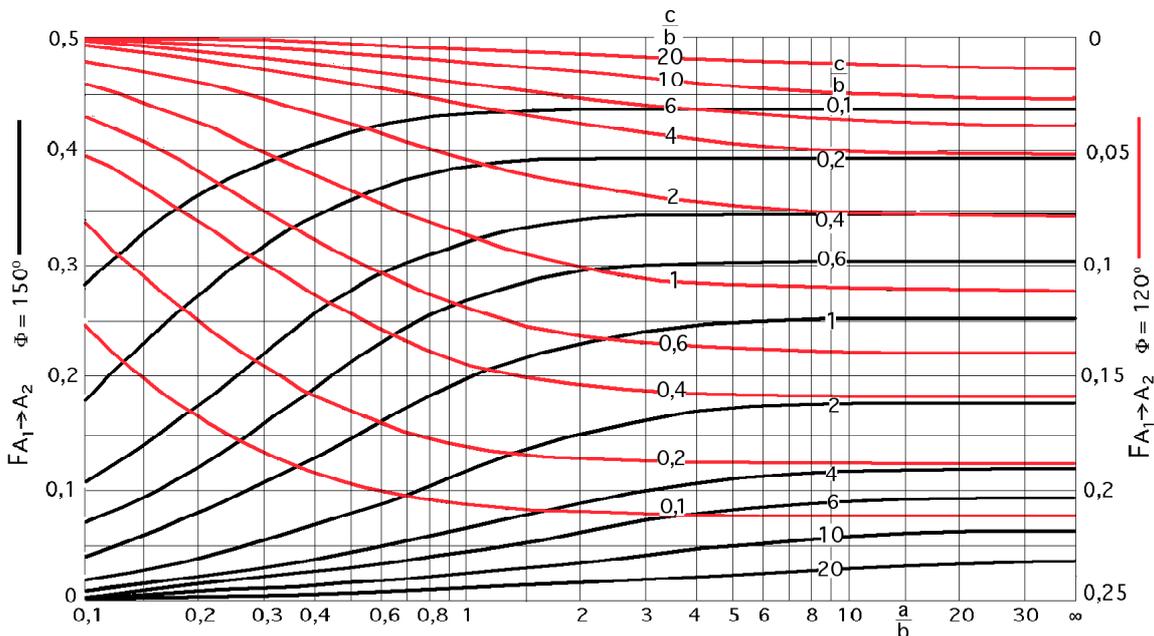
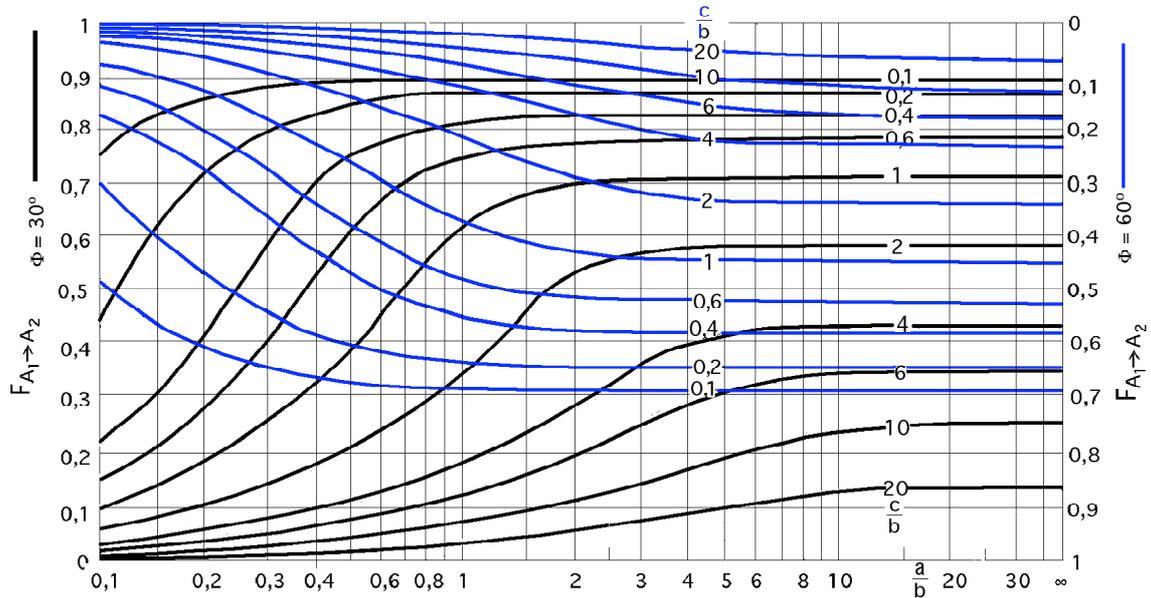
$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{\pi Y} \left[X \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{X} + Y \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{Y} - Z \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{Z} + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+Z^2} \left(\frac{X^2(1+Z^2)}{Z^2(1+X^2)} \right)^{X^2} \left(\frac{Y^2(1+Z^2)}{Z^2(1+Y^2)} \right)^{Y^2} \right\} \right]$$



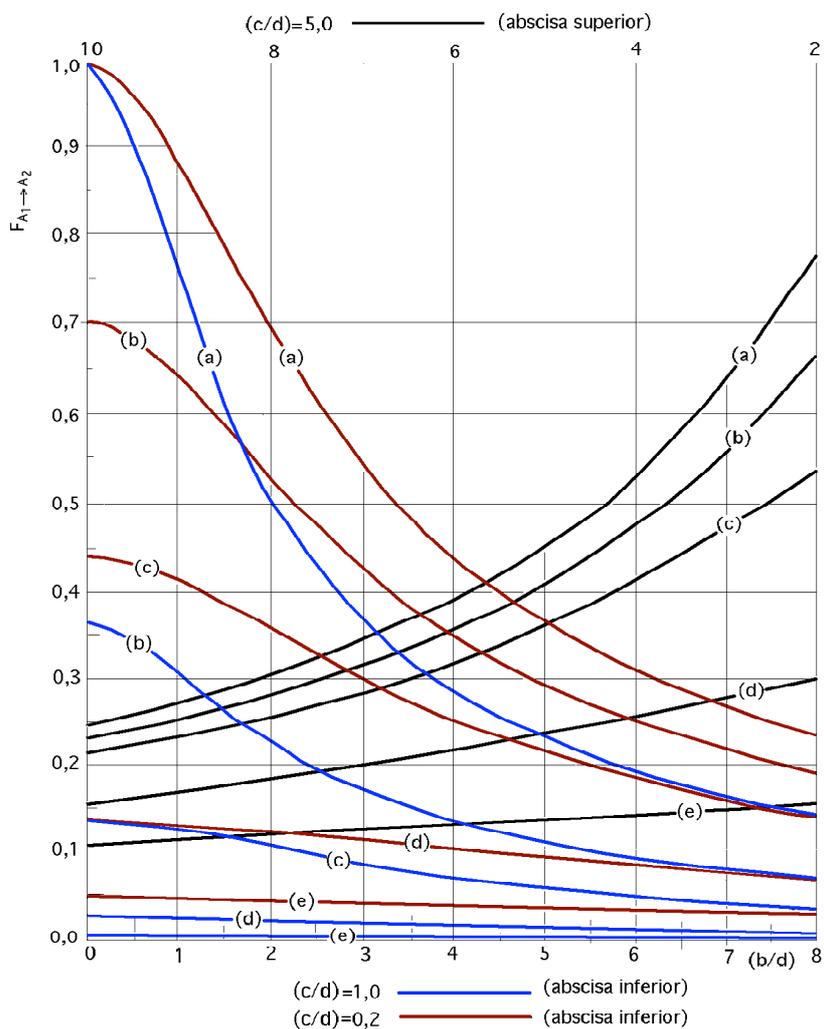
3.- Dos rectángulos con una arista común formando un ángulo Φ

$$X = \frac{a}{b} ; Y = \frac{c}{b} ; Z^2 = X^2 + Y^2 - 2XY \cos \Phi$$

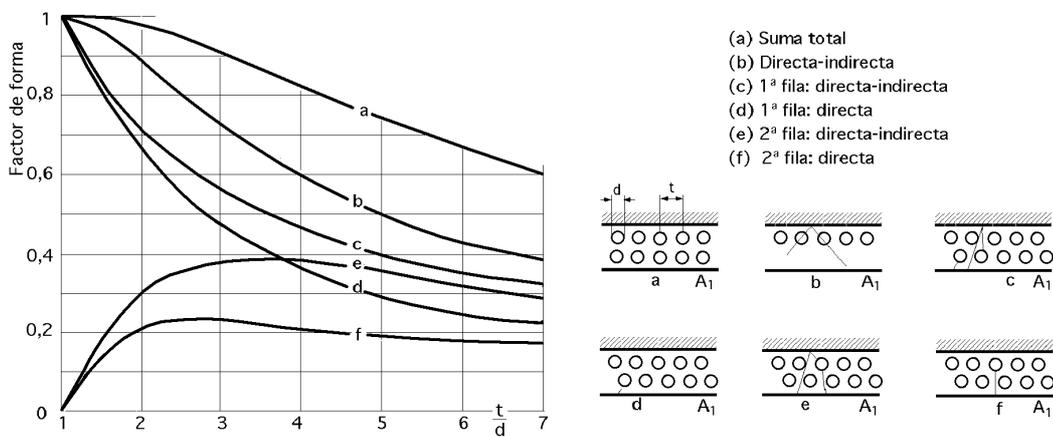
$$\begin{aligned} \pi Y F_{A_1 \rightarrow A_2} = & - \frac{\text{sen } 2\Phi}{4} \{ XY \text{sen } \Phi - (\frac{\pi}{2} - \Phi)(X^2 + Y^2) + Y^2 \text{arc tg } \frac{X - Y \cos \Phi}{Y \text{sen } \Phi} + X^2 \text{arc tg } \frac{Y - X \cos \Phi}{X \text{sen } \Phi} \} + \\ & + (\frac{1}{2} - \frac{\text{sen } 2\Phi}{4}) \ln \frac{(1 + X^2)(1 + Y^2)}{1 + Z} + Y^2 \ln \frac{Y^2(1 + Z)}{Z(1 + Y^2)} + X^2 \ln \frac{X^2(1 + X^2) \cos^2 \Phi}{Z(1 + Z) \cos^2 \Phi} + X \text{arc tg } \frac{1}{X} + Y \text{arc tg } \frac{1}{Y} - \sqrt{Z} \text{arc tg } \frac{1}{\sqrt{Z}} + \\ & + \frac{\text{sen } \Phi \text{sen } 2\Phi}{2} X \sqrt{1 + X^2 \text{sen }^2 \Phi} \left(\text{arc tg } \frac{X \cos \Phi}{\sqrt{1 + X^2 \text{sen }^2 \Phi}} + \text{arc tg } \frac{Y - X \cos \Phi}{\sqrt{1 + X^2 \text{sen }^2 \Phi}} \right) + \\ & + \cos \Phi \int_0^Y \sqrt{1 + \xi^2 \text{sen }^2 \Phi} \left\{ \text{arc tg } \frac{X - \xi \cos \Phi}{\sqrt{1 + \xi^2 \text{sen }^2 \Phi}} + \text{arc tg } \frac{\xi \cos \Phi}{\sqrt{1 + \xi^2 \text{sen }^2 \Phi}} \right\} d\xi \end{aligned}$$



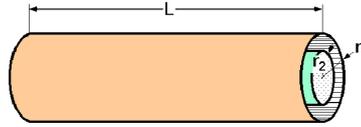
4.- Rectángulo A_1 con cilindro finito A_2



5.- Plano A_1 con respecto a una o dos filas de tubos paralelas al plano



6.- Cilindros coaxiales finitos A_1 exterior, A_2 interior



$$X = \frac{r_1}{r_2} ; Y = \frac{L}{r_2} ; A = Y^2 + X^2 - 1 ; B = Y^2 - X^2 + 1$$

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi X} \left\{ \arccos \frac{B}{A} - \frac{1}{2Y} \left(\sqrt{(A+2)^2 - (2X)^2} \arccos \frac{B}{XA} \right) + B \arcsin \frac{1}{X} - \frac{\pi A}{2} \right\}$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi X} \arctg \left(\frac{2\sqrt{X^2-1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\pi X} \left\{ \frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} \arcsin \left(\frac{4(X^2-1) + Y^2(X^2-2)}{X^2(Y^2+4(X^2-1))} \right) - \arcsin \frac{X^2-2}{X^2} + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sqrt{4X^2+Y^2}}{Y} - 1 \right) \right\}$$

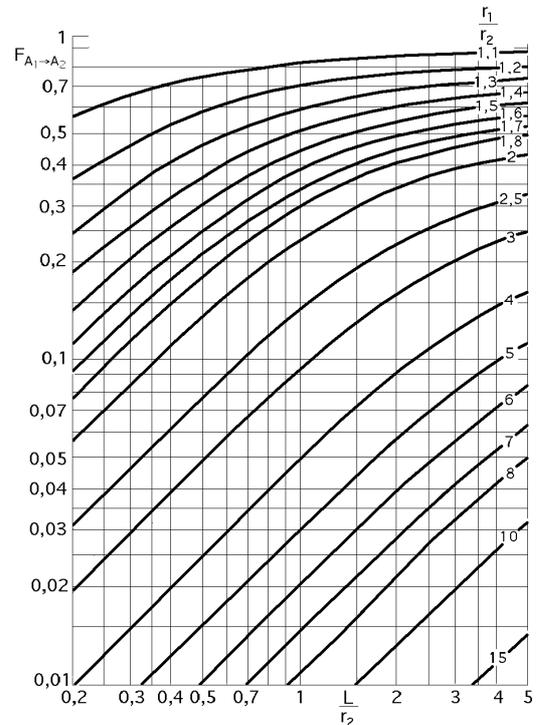
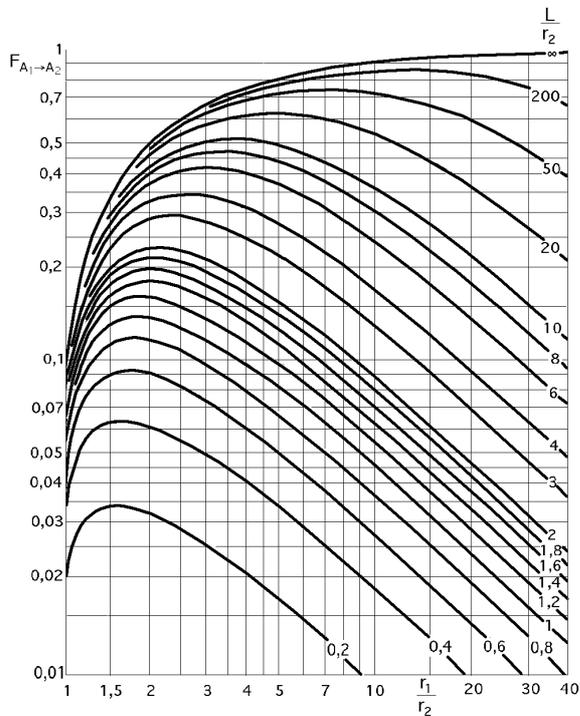


Tabla IV.16.- Propiedades térmicas de algunos elementos metálicos

Conductividad térmica "k" (W/m ^{°K}), a la temperatura en °K de:								Propiedades a 20°C				
ELEMENTO	200	273	400	600	800	1000	1200	ρ kg/m ³	c_p J/kg°C	k W/m.°K	$\alpha \cdot 10^6$ m ² /seg	T. fusión °K
Aluminio	237,0	236,0	240,0	232,0	220,0			2702	896	236,0	97,5	933
Antimonio	30,2	25,5	21,2	18,2	16,8			6684	208	24,6	17,7	904
Berilio	301,0	218,0	161,0	126,0	107,0	89,0	73,0	1850	1750	205,0	63,3	1550
Bismuto	9,7	8,2						9780	124	7,9	6,5	545
Boro	52,5	31,7	18,7	11,3	8,1	6,3	5,2	2500	1047	28,6	10,9	2573
Cadmio	99,3	97,5	94,7					8650	231	97,0	48,5	594
Cesio	36,8	36,1						1873	230	36,0	83,6	302
Cinc	123,0	122,0	116,0	105,0				7140	385	121,0	44,0	693
Circonio	25,2	23,2	21,6	20,7	21,6	23,7	25,7	6570	272	22,8	12,8	2125
Cobalto	122,0	104,0	84,8					8862	389	100,0	29,0	1765
Cobre	413,0	401,0	392,0	383,0	371,0	357,0	342,0	8933	383	399,0	116,6	1356
Cromo	111,0	94,8	87,3	80,5	71,3	65,3	62,4	7160	440	91,4	29,0	2118
Estaño	73,3	68,2	62,2					5750	227	67,0	51,3	505
Germanio	96,8	66,7	43,2	27,3	19,8	17,4	17,4	5360	61,6			1211
Hafnio	24,4	23,3	22,3	21,3	20,8	20,7	20,9	13280	23,1			2495
Indio	89,7	83,7	74,5					7300	82,2			430
Iridio	153,0	148,0	144,0	138,0	132,0	126,0	120,0	22500	134	147,0	48,8	2716
Litio	88,1	79,2	72,1					534	3391	77,4	42,7	454
Magnesio	159,0	157,0	153,0	149,0	146,0			1740	1017	156,0	88,2	923
Manganeso	7,2	7,7						7290	486	7,8	2,2	1517
Mercurio	28,9							13546				234
Molibdeno	143,0	139,0	134,0	126,0	118,0	112,0	105,0	10240	251	138,0	53,7	2883
Niquel	106,0	94,0	80,1	65,5	67,4	71,8	76,1	8900	446	91,0	22,9	1726
Niobio	52,6	53,3	55,2	58,2	61,3	64,4	67,5	8570	270	53,6	23,2	2741
Oro	327,0	318,0	312,0	304,0	292,0	278,0	262,0	19300	129	316,0	126,9	1336
Paladio	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5		12020	247	75,5	25,4	1825
Plata	403,0	428,0	420,0	405,0	389,0	374,0	358,0	10500	234	427,0	173,8	1234
Platino	72,4	71,5	71,6	73,0	75,5	78,6	82,6	21450	133	71,4	25,0	2042
Plomo	36,6	35,5	33,8	31,2				11340	129	35,3	24,1	601
Potasio	104,0	104,0	52,0					860	741	103,0	161,6	337
Renio	51,0	48,6	46,1	44,2	44,1	44,6	45,7	21100	137	48,1	16,6	3453
Rodio	154,0	151,0	146,0	136,0	127,0	121,0	115,0	12450	248	150,0	48,6	2233
Rubidio	58,9	58,3						1530	348	58,2	109,3	312
Silicio	264,0	168,0	98,9	61,9	42,2	31,2	25,7	2330	703	153,0	93,4	1685
Sodio	138,0	135,0						971	1206	133,0	113,6	371
Tántalo	57,5	57,4	57,8	58,6	59,4	60,2	61,0	16600	138	57,5	25,1	3269
Titanio	24,5	22,4	20,4	19,4	19,7	20,7	22,0	4500	611	22,0	8,0	1953
Tungsteno	197,0	182,0	162,0	139,0	128,0	121,0	115,0	19300	134	179,0	69,2	3653
Uranio	25,1	27,0	29,6	34,0	38,8	43,9	49,0	19070	113	27,4	12,7	1407
Vanadio	31,5	31,3	32,1	34,2	36,3	38,6	41,2	6100	502	31,4	10,3	2192

Tabla IV.17.- Propiedades térmicas de algunas aleaciones

Propiedades a 20°C		Dens. ρ kg/m ³	Calor específ. J/kg°C	Cond. k W/m°C	Difus. $\alpha \cdot 10^5$ m ² /seg	Conductividad térmica en (W/m°C) a la temperatura en °C:								
Aleaciones	Composición					-100	0°C	100	200	300	400	600	800	1000
Duraluminio	94-96% Al; 3-5% Cu	2787	833	164	6,680	126	159	182	194					
Siluminio	87% Al; 1,33% Si	2659	871	164	7,100	119	137	144	152	161				
Alusil	80% Al; 20% Si	2627	854	161	7,172	144	157	168	175	178				
Al-Mg-Si	97% Al; 1% Mg; 1% Si	2707	8922	177	7,311		175	189	204					
Bronce de Al	95% Cu; 5% Al	8666	410	83	2,330									
Bronce	75% Cu; 25% Sn	8666	343	26	0,860									
Latón rojo	85% Cu; 9% Sn; 6% Zn	8714	385	61	1,804		59	71						
Latón	70% Cu; 30% Zn	8522	385	111	3,412	88		128	144	147	147			
Plata alemana	62% Cu; 15% Ni; 22% Zn	8618	394	24,9	0,733	19		31	40	45	48			
Constantán	60% Cu; 40% Ni	8922	410	22,7	0,612	21		22	26					
Fundición	4% C	7272	420	52	1,702									
Acero al C	0,5% C	7833	465	54	1,474		55	52	48	45	42	35	31	29
	1% C	7801	473	43	1,172		43	43	42	40	36	33	29	28
	1,5% C	7753	486	36	0,970		36	36	36	35	33	31	28	28
Acero al Cr	1% Cr	7865	460	61	1,665		62	55	52	47	42	36	33	33
	5% Cr	7833	460	40	1,110		40	38	36	36	33	29	29	29
	20% Cr	7689	460	40	1,11		22	22	22	22	24	24	26	29
Acero al Ni	10% Ni	7945	460	26	0,720									
	20% Ni	7993	460	19	0,526									
	40% Ni	8169	460	10	0,279									
	60% Ni	8378	460	19	0,493									
	80% Ni	8618	460	35	0,872									
	Invar 36% Ni	8,137	460	10,7	0,286									
Acero al Cr-Ni	15% Cr; 10% Ni	7865	460	19	0,526									
	15% Cr; 40% Ni	8073	460	11,6	0,305									
	18% Cr; 8% Ni	7817	460	16,3	0,444		16	17	17	19	19	22	27	31
	20% Cr; 15% Ni	7833	460	15,1	0,415									
	25% Cr; 20% Ni	7865	460	12,8	0,361									
	80% Cr; 15% Ni	8522	460	17	0,444									
Acero al Mn	1% Mn	7865	460	50	1,388									
	5% Mn	7849	460	22	0,637									
Acero al Si	1% Si	7769	460	42	1,164									
	5% Si	7417	460	19	0,555									
Acero al W	1% W	7913	448	66	1,858									
	5% W	8073	435	54	1,525									
	10% W	8314	419	48	1,391									
Ni-Cr	90% Ni; 10% Cr	8666	444	17	0,444		17	19	21	23	25			
	80% Ni; 20% Cr	8314	444	12,6	0,343		12	14	16	17	18	23		
Mg-Al; electrol.	Mg; 7% Al; 1,5% Zn;	1810	1000	66	3,605		52	62	74	83				

Tabla IV.18.- Propiedades térmicas de algunos aceros y aleaciones especiales

	Temper. fusión °C	Densidad ρ $\frac{gr}{cm^3}$	Calor específico c_p		Conduc. térmica k_e		Emisividad ϵ	
			°C	$\frac{Kcal}{kg^{\circ}C}$	°C	$\frac{Kcal}{hm^{\circ}C}$	°C	%
Acero Cr (15%), Ni (10%)		7,7	20	0,11	0	14	20	0,58
					400	16	500	0,65
					800	19		
Acero Cr (18%), Ni (8%)		7,7	20	0,11	800	19	20	0,31
							500	0,37
Acero Mn (13%), Ni (20%)		7,7	20	0,11	0	12	500	0,93 oxid.
					300	15		
					500	16		
Acero Mn (13%)			20	0,12	0	11		
					400	16,9		
					800	18,2		
Ni (80%) Cr (14%)	1425	8,51	20	0,11	0	12	300	20 (oxi. pul)
					400	15	800	22 (oxi. pul)
					800	16	300	70 (oxidado)
							800	87 (oxidado)
Ni (57%), Mo (20%), Fe (20%)	1330	8,51	20	0,094	20	9	200	26
					400	15	200	55 (oxidado)
					800	20	500	23 (pulido)
Ni (62%), Mo (30%), Fe (5%)	1350	9,24	20	0,091	20	9,7	20	15
							800	23
							900	68 (oxidado)
Ni (58%), Mo (17%), Fe (5%), Cr (15%), W (5%)	1305	8,94	20	0,092	25	10,9	20	9 (pulido)
							800	23 (pulido)
Acero al wolframio W (2%)		7,96	20	0,106	0	54		
					600	39		
Hierro forjado		7,84	20	0,11	20	51	20	3 (pulido)
					500	37	2000	21 (pulido)
					1000	30	600	98 (oxidado)
Fundición 4% C	1147	7,9	20	0,1	100	45	200	0,2 (pulido)
			k_e		500	37	200	64 (oxidado)
Acero (0,2%C a 0,6%C)	1127 a 1400	7,86	20	0,1	20	54	20	3 (pulido)
			1000	0,15	500	32	1000	22 (pulido)
					1000	23	500	92 (oxidado)
Acero 1% C	1430	7,8	20	0,11	0	38	200	10 (pulido)
					400	30,9		80 (oxidado)
					800	25		
Acero 1,5%C		7,7	20	0,11	0	31	25	80 (Oxidado)
					400	28	200	79 (Oxidado)
					800	25	600	79 (Oxidado)
Acero al Cr (11%)		7,84	50 a 100	0,118	0	41		
					400	33		
					800	22		
Acero al Cr (10%)		7,74	50 a 100	0,113	0	32		
					400	26		
					800	25		
Acero al Cr (20%)		7,6	20	0,11	0	19	20	10 (pulido)
					400	19	800	38 (pulido)
					800	22		

Tabla IV.19.- Propiedades termicas de algunos metales y aleaciones

	Temp. fusión °C	Temp. ebullic. °C	C.lat. r_{l-v} Kcal/kg	Dens. $\rho \cdot 10^{-3}$ kg/m ³	Calor específico c_p		Cond. térmica k_c		Emisividad ϵ	
					°C	Kcal/kg°C	°C	Kcal/hm°C	°C	%
Aluminio (99,96%)	660	2060	94,6	2690	-150	0,136	-200	207	20	1 pulido
					0	0,207	100	196	600	2 pulido
					100	0,225	0	181	25	2,2
					300	0,248	200	190	100	2,8
					600	0,277	400	196	500	6
Aluminio comercial puro (99%)	657		93	2710	0	0,222	-200	163	50 a 500	4,6 pulido
					100	0,222			200	11 oxidado
					200	0,237			600	19 oxidado
					400	0,252				
					600	0,268				
Al-Mn (1,2%)	654			2730	100	0,23	20	136	25	3,5 a 7
Al-Cu(4,4%)-Si(0,8%)-Mn(0,8%)-Mg(0,4%) Al-Si (12%)-Cu (1%)	638			2800	100	0,23	20	165	20	10
	571			2690	100	0,23	20	133	400	12
Al-Mg (2,5%)-Cr (0,25%)	649			2680	100	0,23	20	118	20	5
Al-Si (12%)	585		93	2660	100	0,23	20	133		
Al-Cu (4%)-Si (3%)	632		93	2790	100	0,23	20	104		
Al-Cu (10%) -Mg (0,2%)	627		93	2950	100	0,23	20	136		
Al-Mg (8%)	621			2530	100	0,23	20	86,4		
Antimonio	630	1440	38,3	6620	20	0,049	20	16,2		
					200	0,052	100	14,4		
					500	0,054	500	16,9		
Arsénico	813	610		5730	0 a 100	0,082				
Azufre	119	444	9,3	2070	20	0,175	20	0,22		
Berilio	1315	2970	260	1840	-100	0,2	0	126	20	61
					0	0,42	100	122		
					200	0,57	400	100		
					800	0,74	600	86		
Bismuto	271	1477	12,5	9800	20	0,034	20	7	20	4,8
							189	6,5	100	6,1
							256	6,58		
Boro	2300			2300	20	0,26				
Cadmio	320	765	13,2	8650	20	0,055	20	79		
					100	0,056	100	77,7		
					300	0,076	300	90		
Calcio	850	1440		1550	20	0,149	20	108		
Cesio	28	690	3,8	1900	20	0,052				
Cinc	419	906	24,1	7130	0	0,091	-200	108	200	4,4 pulido
					100	0,095	20	97,2	300	5
					200	0,1	400	82,4		
					400	0,109				
Circonio	1845	2900	60,5	6500	20	0,069	50	18	20	20
					127	0,073	100	17,6		
					427	0,086	250	16		
					1127	0,081				
Cobalto	1495	2900	58,4	8800	20	0,102			1000	20
					200	0,113				
					800	0,161				
					1000	0,184				
Co(65%)-Cr(25%)-Ni(2%)-C(0,25%)-Fe(1%)-Mo(5%)-Mn(0,6%)				8300	20	0,1	200	12,2		
							600	17,6		
Co(34%)-Cr(25%)-Ni(32%)-C(0,4%)-Fe(1%)-Mo(6%)-Mn(0,6%)-S(0,6%)				8210			200	11,8		
							600	17		

Tabla IV.19.- Propiedades termicas de algunos metales y aleaciones (continuación)

	Temp. fusión °C	Temp. ebullic. °C	C.lat. $\frac{Kcal}{kg}$	Dens. $\rho \frac{kg}{m^3}$	Calor específico c_p		Cond. térmica k_c		Emisividad ϵ	
					°C	$\frac{Kcal}{kg^{\circ}C}$	°C	$\frac{Kcal}{hm^{\circ}C}$	°C	%
Cobre	1083	2600	50,6	8960	20	0,092	100	349	20	1,8 pulido
					100	0,094	0	333,7	1000	60 oxidado
					200	0,096	100	325	100	2
					1000	0,111	200	320	200	60 oxidado
							400	312		
		600	303							
Cu (99,94%)-P(0,02%)	1083			8940	20	0,092	20	291		
Cu(85%)-Zn(15%)	1025			8750	20	0,094	20	137	200	3
Cu(70%)-Zn(30%)	1000			8670	20	0,094	20	104	200	3
Cu(60%)-Zn(39,2%)-Sn(0,75%)	900			8410	20	0,094	20	100	50	4
Cu(90%)-Sn(10%)	1000			8780	20	0,094	20	43		
Cu(70%)-Ni(30%)	1240			8940	20	0,094	20	32	20	5,9
Cu(55%)-Ni(45%)	1220			8900	20	0,094	-100	16,5		
							300	24		
Cu-Si (3%)	1025			8530	20	0,09	20	32		
Cu(95%)-Al(5%)	1060			8170	20	0,1	20	71	0 a 800	2 pulido
Cromo	1890	2500		7190	20	0,11	20	63	40	8 pulido
									1000	36 pulido
Estaño	231	2270	14,5	7290	20	0,054	-100	63	20	5,1 pulido
					200	0,062	200	48	100	5
Estroncio	770	1380	25	2600	20	0,176				
Fósforo	44	280	5	1820	20	0,177	20	61		
Gaño	29,7	2070	19,2	5910	20	0,177				
Hafnio	2130	3000		11360	20	0,035	20	19		
							500	17		
Hierro	1535	140	65	7850	20	0,108	-100	74	100	3,6 pulido
					500	0,163	0	67	20 a 300	4 oxidado
					1000	0,162	400	41	100	5
							1000	30		
Indio	156,4			7310	-100	0,05				
Iridio	2454	5300		22500	20	0,031	20	50,4		
					500	0,034	100	48,5		
Litio	168	1370		530	20	0,19	-100	81,7		
					100	1,04	0	60,4		
Magnesio	650	1197	89	1740	-100	0,206	-100	172		
					100	0,257	0	147		
					600	0,311	400	135		
Mg-Al(10%)- Mn (0,1%)	594		89	1810	20	0,25	-200	46	20	10(pul,oxid)
							300	61,2		16(pul,oxid)
Mg-Al(6%)- Mn (0,2%)- Zn (3%)	610		89	1810			-196	50		16(pul,oxid)
							300	64		
Mg-Al(3%)- Mn (0,3%)- Zn(1%)	632			1780			100 a	82,8		
Mg-Al(6%)- Mn (0,2%)- Zn(1%)	618			1800			300	68,4		
Manganeso	1245	2150		7430	-100	0,09	-150	5,4		
					25	0,115				
					300	0,178				
Mercurio	-38,8	357	2,7	13550	20	0,033	20	7,56		
Molibdeno	2622	4800	70	10200	-100	0,049	-100	154	20	7,1 pulido
					20	0,061	100	118	600	9,6 pulido
					1500	0,081	1500	72	2000	29 pulido
Niquel (99,95%)	1455	2370	73,8	8900	20	0,106	-100	86	20	4,5 pulido
					100	0,112	25	79,2	20	40 oxidado
					500	0,126	500	53,2	1000	16 pulido
Oro	1063	2970	16,1	19320	20	0,031	20	255	20	2 pulido
Osmio	2700	5500		22610	0	0,031			20	2 pulido
					1600	0,039			500	3,5 pulido
Paladio	1554	3980	34,2	12000	20	0,058	20	61,2	20	1
					1500	0,076			700	9

Tabla IV.19.- Propiedades termicas de algunos metales y aleaciones (final)

	Temp. fusión °C	Temp. ebullic. °C	C.lat. r_{l-v} $\frac{Kcal}{kg}$	Dens. $\rho \cdot 10^{-3}$ $\frac{kg}{m^3}$	Calor específico c_p		Cond. térmica k_c		Emisividad ϵ	
					°C	$\frac{Kcal}{kg^{\circ}C}$	°C	$\frac{Kcal}{hm^{\circ}C}$	°C	%
Plata	960	2210	25	10490	20 100	0,056 0,056	20 500	360 324	20 a 500	2 a 3 pulido
Platino	1773	4530	26,9	21450	20 500 1300	0,032 0,034 0,04	20	61,2	130 600 1500	5,2 pulido 10 pulido 19
Plomo	327	1725	6,26	11340	20 300	0,031 0,035	-100 300	31,3 25,2	130 28	6,7 pulido 28 oxidado
Pb(92%)- Sb(8%)	271			10740	20	0,032	20	23,4		
Pb(80%)- Sn (20%)	277			10200	20		20	32		
Potasio	63	770	14,5	860	20	0,032	20	86,4		
Rodio	1966	4500		12410	20	0,059	20	75,6	20 1500	2 8
Rubidio	39	680	6,1	1530	20	0,081				
Selenio	220	680	6,6	4810	20	0,084				
Silicio	1430	2300	337	2330	20 18 a 1000	0,162 0,21	20	72	800 1300	65 45
Sodio	97,7	892	27,5	970	20	0,295	20	115		
Talio	300	1460	7,2	11850	20	0,031	20 200	33,4 36		
Tántalo	2996			16600	0	0,036	20	46,8	1000 2000	6 pulido 26
Titanio	1820			4500	25 400	0,126 0,148	20 700	20 15	20 500	18 pulido 21 pulido
Torio	1845			11710	20	0,028	20	32,4	20	36
Uranio	1333			19100	20 600	0,028 0,045	20 900	21,6 36	20	54
Vanadio	1735		3400	61 00	20	0,127	20	25		
Volframio	3395	9530	44	19200	20 1500	0,032 0,039	20 1000 3000	144 60 129	20 500 1000	2 a 3 pulido 7 pulido 30 (pul,oxid)

Tabla IV.20.- Propiedades termicas de algunos materiales de construcción y aislantes

MATERIAL	Temperatura °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Conduct. térmica k (W/m°K)	Difusiv. térmica $\alpha \cdot 10^5$ m ² /seg
Amianto	20	383	816	0,113	0,036
Asfalto	20-55	2120		0,74-0,76	
Baquelita	20	1270		0,233	
Ladrillo común	20	1800	840	0,38-0,52	0,028-0,034
Ladrillo de carborundum (50% SiC)	20	2200		5,820	
Ladrillo de carborundum	600 1400			18,5 11,1	
Ladrillo de magnesita (50% MgO)	20 200 650 1200	2000	1130	2,680 3,81 2,77 1,9	
Ladrillo de mampostería	20	1700	837	0,658	0,046
Ladrillo de sílice (95% SiO ₂)	20	1900		1,070	
Ladrillo de circonio (62% ZrO ₂)	20	3600		2,440	
Ladrillo al cromo	200 550 900	3000	840	2,32 2,47 1,99	0,092 0,098 0,079
Arcilla refractaria, cocida a 1330°C	500 800 1100	2000	960	1,04 1,07 1,09	0,054
Arcilla refractaria, cocida a 1450°C	500 800 1100	2300	960	1,28 1,37 1,4	0,04
Cartón	20			0,14-0,35	
Cemento (duro)	20			1,047	
Arcilla (48,7% humedad)	20	1545	880	1,260	0,101
Carbón, (antracita)	20	1370	1260	0,238	0,013-0,015
Hormigón (seco)	20	500	837	0,128	0,049
Corcho (tableros)	20	120	1880	0,042	0,015-0,044
Corcho (expandido)	20	120		0,036	
Tierra de diatomeas	20	466	879	0,126	0,031
Tierra arcillosa (28% humedad)	20	1500		1,510	
Tierra arenosa (8% humedad)	20	1500		1,050	
Fibra de vidrio	20	220		0,035	
Vidrio, (ventanas)	20	2800	800	0,810	0,034
Vidrio, (lana de)	20 20	100 200	670	0,036 0,040	0,028
Granito	20	2750		3,000	
Hielo (0°C)	20	913	1830	2,220	0,124
Linóleo	20	535		0,081	
Mica	20	2900		0,523	
Corteza de pino	20	342		0,080	
Yeso	20	1800		0,814	
Plexiglás	20	1180		0,195	
Madera (chapa)	20	590		0,109	
Poliestireno	20	1050		0,157	
Goma dura (ebonita)	20	1150	2009	0,163	0,006
Goma esponjosa	20	224		0,055	
Arena seca	20			0,582	
Arena húmeda	20	1640		1,130	
Serrín	20	215		0,071	
Madera de roble	20	609-801	2390	0,17-0,21	0,011-0,012
Madera (Pino, abeto, abeto rojo)	20	416-421	2720	0,150	0,012
Láminas de fibra de madera	20	200		0,047	
Lana	20	200		0,038	

TABLA IV.21.- PROPIEDADES TERMICAS DE ALGUNOS MATERIALES CERAMICOS

	Temp. fusión °C	Temp. Reblan. °C	Volum. gas % v_{gas}	Dens. $\frac{gr}{cm^3}$	Calor específico c_p		Cond. térmica k_c		Emisividad ϵ	
					°C	$\frac{Kcal}{kg^{\circ}C}$	°C	$\frac{Kcal}{hm^{\circ}C}$	°C	%
Alúmina Al_2O_3 (100%)	2050		0	3,87	20/100 500 1000 1500	0,206 0,24 0,26 0,27	20 500 1000 1500	16,5 6,1 5,3 5	20 300 800 1500	73 73 40 31
Ladrillos de corindon Al_2O_3 (80 a 95%), Fe_2O_3 (2 a 5%)	1790 a 1900	1300	16 a 20	3,2 a 3,5	20 500 1000 1500	0,2 0,24 0,3 0,36	20 500 1000	6,12 2,9 2,1	100	85
Ladrillos de bauxita Al_2O_3 (60 a 85%), Fe_2O_3 (4 a 7%), SiO_2 (26 a 31%)	1790	1200	19 a 22	2,4	20	0,2	500 1000 1500	3,6 1,8	800 1650	50 62
Ladrillos de cianita Al_2O_3 (58 a 60%), Fe_2O_3 (0,8 a 1,5%), SiO_2 (38 a 40%)	1820	1350	20 a 22	2,5	20	0,2	500 900	1,3 1,42	1300 1800	61 43
Berilia BeO (100%)	2570		0	3,01	20 500 1000	0,3 0,44 0,5	100 400 1000 1800	189 76 16,5 13,2	1000 1800	56 60
Carburo de silicio CSi (100%)	2250		0	3,2	100 500 1000	0,19 0,27 0,3	20 500 1000 1500	100 100 40 7,2	1000 1400	92 82
Carburo de silicio CSi (89 a 91%), SiO (6 a 9%)	2200			3,18	20 500 1000	0,2 0,25 0,3	20 500 1000	14,4 13 9,7	800	93
Grafito	3700			2,22	20 a 1000	0,34	20 500 1000	140 60 32	150 400 600	76 75 71
Carbón Ladrillos	>2200			1,97	20 a 1000	0,25	20 500 1000	1,4 2,4 4	150 400 600	77 77 72
Circona ZrO_2 (100%)	2715			6,1	100 500 1000 1500	0,12 0,13 0,157 0,179	100 500 1000 1500	1,65 1,83 1,96 2,1	100 500 1000 1500	80 60 38 40
Ladrillos de circona ZrO_2 (93%), CaO (4 a 5%), Hf (1,5%)	2550			5,6	20 a 1500	0,175	20 500 1000	1,26 1,44 1,62	300 500 2000	60 45 31
Circon ZrO_2 (67,1%), SiO_2 (32,9%)				4,6	20 500 1500	0,14 0,17 0,22	20 500 1000	2,7 2,4 1,5	300 500 800	92 80 52
Cromita FeO (32,4%), Cr_2O_3 (67,9%)				4,5	20 a 1000	0,22	500 1000	1,5 1,58	800	97
Ladrillos de cromita FeO (3 a 6%), Cr_2O_3 (30 a 45%), SiO_2 (3 a 6%), Al_2O_3 (15 a 33%),	2000			3,8 a 4,1	100 500 1000	0,15 0,2 0,21	20 500 1000	1,11 1,3 1,45	800	97
Dolomita calcinada CaO MgO	2480			2,85	100	0,22				
Espinela Al_2O_3 (71,8%), MgO (28,2%)				3,58	100 1000	0,194 0,257	500 1000	1,69 2,29		
Magnesita MgO (100%)	2950			3,57	100 500	0,234 0,25	20 500	36 11,8	100 1000	75 42

TABLA IV.21.- PROPIEDADES TERMICAS DE ALGUNOS MATERIALES CERAMICOS (Continuación)

	Temp. fusión	Temp. Reblan.	Volum. gas %	Dens.	Calor específico		Cond. térmica		Emisividad	
	°C	°C	v_{gas}	$\frac{gr}{cm^3}$	c_p	k_c	°C	ϵ	°C	%
					°C	$\frac{Kcal}{kg^{\circ}C}$	°C	$\frac{Kcal}{hm^{\circ}C}$		
Magnesita (continuación) MgO(100%)	2950			3,57	1000 1500	0,28 0,29	1000 1500	5,7 5	1500	32
Ladrillos de magnesita Fe ₂ O ₃ (2÷7%), MgO(83÷92%)				3,55	100 500 1000 1500	0,24 0,26 0,28 0,32	20 500 1000	11,8 6,8 3,5	1000	38
Forsterita	1910			3,25	100	0,22	500 1000	1,4 1,3	800	95
Ladrillo de forsterita				3,3	100	0,22	1300	1,3	800	95
Mullita SiO ₂ (98÷99%)				3,03	100 500 1000	0,15 0,17 0,18	100 500 1000	5 3,6 3,3	100 500 1000 1500	75 70 55 45
Nitruro de boro (BN)	2400			2,1	20	0,18	400 1000	25,2 21,6		
Sílice Al ₂ O ₃ (40÷42%), SiO ₂ (50÷56%), Fe ₂ O ₃ (1,5÷3%)	1750			2,2	20 500 1000 1500	0,165 0,25 0,29 0,34	20 500 1000	1,22 1,36 1,8	500 700	68 50
Ladrillos de sílice Al ₂ O ₃ (34÷39%), SiO ₂ (55÷61%), Fe ₂ O ₃ (1÷3%)	1710			2,3	500 1000 1500	0,23 0,26 0,3	20 500 1000	0,82 1,04 1,33	1000 1500	80 72
Sílice, arcillas, ladrillos Al ₂ O ₃ (29÷34%), SiO ₂ (60÷66%), Fe ₂ O ₃ (1,5÷3%)	1710	1250 a 1300	15 a 35	1,8 a 2,2	20 1000	0,2 0,25	20 1000	0,8 a 1 1 a 1,3	1000 1500	73 62
Ladrillos Al ₂ O ₃ (25÷29%), SiO ₂ (65÷70%), Fe ₂ O ₃ (1,5÷3%)	1690	1223 a 1280	20 a 30	2 a 2,2	20 1000	0,2 0,25	20 1000	0,6 a 1 0,9 a 1,5	1000	73
Ladrillos Al ₂ O ₃ (20÷24%), SiO ₂ (70÷75%), Fe ₂ O ₃ (1,5÷3%)	1670	1200 a 1250	20 a 34	1,7 a 2,2	20 1000	0,2 0,25	20 1000	0,6 a 1 0,9 a 1,5		
Ladrillos Al ₂ O ₃ (15÷19%), SiO ₂ (75÷80%), Fe ₂ O ₃ (1,5÷3,5%)	1650	1180 a 1225	20 a 34	1,9 a 2,2	20 1000	0,2 0,25	20 1000	0,5 a 1 0,9 a 1,4		
Ladrillos	1580	1180 a 1225	20 a 40	1,6 a 2,2	20 1000	0,2 0,25	20 1000	0,4 a 1 0,8 a 1,3		
Ladrillos	1500	1180 a 1250	28 a 40	1,6 a 1,8	20 1000	0,2 0,25	20 1000	0,4 a 0,7 0,7 a 8		

Tabla IV.22.- PROPIEDADES TERMICAS DE MATERIALES DIVERSOS

MATERIAL	Temper. °C	Densidad $\rho (\frac{kg}{cm^3})$	Calor específico $c_p (\frac{Kcal}{kg^{\circ}C})$	Cond. térmica $k (\frac{Kcal}{hm^{\circ}C})$	Dif. térmica $\alpha.10^3 (\frac{m^2}{h})$	Emisividad ϵ
Abeto	20	0,4	0,65	0,12	0,460	
Algodón lana	20	0,08		0,12		
Arena seca	20	1,5	0,19	0,28	9,800	
Arena gruesa	20	1,6		1,4		
Arcilla	20	1,46	0,21	1,01	3,6	
Asfalto	20	2,11	0,5	0,6	0,57	91
Asfalto en gotas	20			0,14		
Basalto	20	2,5 a 2,9		3		
Cal (enlucido)	20	1,6		0,61		
Carbón	20	1,14	0,31	0,16	0,4	92
Carbón vegetal	20	0,19		0,05		
Celuloide	20	1,4		0,15		
Cemento seco	20	1,6	0,2	0,72		93
Cemento reforzado	20	2,2	0,2	1,33		93
Cemento escorias	20	1,6	0,19	0,6		93
Cemento Portland	20	1,9	0,27	0,26		93
Cemento celular	20	0,3		0,08		
Cemento amianto	20			0,1		96
Cemento magnesia	20			0,06		
Cemento vermiculita	20			0,8		
Cemento (60% arena)	20			0,57		
Clinker	20	1,4	0,34	0,14		
Corcho láminas	20	0,19	0,45	0,036	0,420	
	-180	0,11		0,0055		
Corcho bruto	40	0,13	0,48	0,036		
Corcho grano	20	0,1		0,016		
Cloruro polivinilo	30	1,2 a 1,9		0,014		
	20			0,12		
Circona grano	300			1,7		
Ceniza madera	30			0,06		
Coque de petróleo	20			4,5		
Coque en polvo	20	0,5	0,29	0,16	0,100	
Ebonita	20	1,2		0,13		
Ebonita celular	-10			0,025		
España celulosa	30			0,045		
Espuma polivinilo	20			0,05		
Escoria alto horno	100			0,09		
Fibras caña azúcar	20			0,04		
Fieltro láminas	20	0,25		0,045		
Fieltro lana	20	0,18		0,04		
Formica	500			0,036		
Goma dura	90	2,4	0,26	0,890		92 (a 20°C)
Goma blanda	100	1,2	0,37	0,400		92 (a 20°C)
	0	1,2	0,33	0,140		92 (a 20°C)
Grafito escobillas	50			3 a 6		
Grafito en polvo	90	1,34				
	30	1,08				
Coma espuma	30	0,02		0,020		
Hielo	0	0,917		1,900		97 (a 20°C)
Hormigón de arena	20	1,5		0,600		93
Hormigón de grava	20	1,8		0,900		92
Hormigón armado	20	2,2		1,300		93
Ladrillos de construcción	20	0,8 a 1,5	0,162	0,2 a 0,3		93
Ladrillos carborundum	20	1		9,7		95
Lavas	20	2,1		2,5		92
Madera de balsa	20	0,128		0,045		90

Tabla IV.22.- PROPIEDADES TERMICAS DE MATERIALES DIVERSOS (final)

MATERIAL	Temper. °C	Densidad $\rho (\frac{kg}{cm^3})$	Calor específico $c_p (\frac{Kcal}{kg^{\circ}C})$	Cond. térmica $k (\frac{Kcal}{hm^{\circ}C})$	Dif. térmica $\alpha.10^3 (\frac{m^2}{h})$	Emisividad ϵ
Madera de pino	20 30	0,44 0,44		0,092 0,055		90
Madera de nogal	20	0,8	0,42	0,312		
Mica	20	0,29		0,5		
Mica y papel 30 hojas 2 mm espesor	20			0,1		
Mica en láminas	20			0,24		
Mica en láminas con papel y barniz	100			0,14		
Melamina con relleno	20	1,4		0,2 a 0,3		
Marmol	20	2,6 a 3		3		
Metacrilato metilo	20	1,18		0,18		0,93
Nieve	-100	0,93 0,15 0,2 0,6 0,1 a 0,5	0,28 0,5	3 0,1 0,13 0,55 0,05		0,96 (a 20°C)
Paneles yeso	30			0,1		0,94
Paneles fibra paja	20	0,15 a 0,2		0,05		0,94
Paneles fibra caña	20	0,2		0,05		0,92
Papel Kraft	30			0,033		93
Papel corrugado	30			0,033		85 a 90
Papel cartón barnizado	40			0,24		9 (a 20°C)
Piedra calcárea	20	1,9		1,3		95
Piedra dura	20	2,7		2,5		9
Piedra granito	20	2,6 a 3		3		90
Piedra pómez	50			0,16		94
Poliamidas		1,13		0,21		
Politeno		0,91		0,28		
Poliestireno		1,05		0,12		
Porcelana	100	2,4	0,26	0,89	1,43	92 (a 20°C)
Resina fenolformaldehido		1,4		0,12		
Resina con relleno				0,2 a 0,3		
Seda	10			0,039		77(a 20°C)
Silicona elastómeros	50			0,21		
Serrín		0,4	0,65	0,12	0,45	
Teflón	20 200	0,25		0,198 0,3		
Teflón con relleno	20 200			0,37 0,45		
Tela algodón 6 capas de barniz	100			0,15		92(a20°C)
Tela vidrio con resina epoxy				0,18		
Tela vidrio 0.07 mm	30			0,07		
Tierra seca	20	1,5		0,119		
Tierra húmeda	-18	1,7		1		
Yeso	20	1,65		0,29		93
Yeso celular	20	0,12	0,48	0,56	0,69	

TABLAS IV.23.- PROPIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS ACEITES Y GLICERINAS

Aceite de motores sin usar

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor especif. c_p (J/kg°K)	Cond. térmica k (W/m°K)	Dif. térmica $\alpha \cdot 10^{10}$ (m ² /s)	Visc. dinámica $\eta \cdot 10^3$ (Ns/m ²)	Visc. cinemát. $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	N° Prandtl Pr	$\frac{g \beta}{\nu^2} \cdot 10^{-10}$
0	899,1	1796	0,147	911	3848	4280	47100	
20	888,2	1880	0,145	872	799	900	10400	8475
40	876,1	1964	0,144	834	210	240	2870	
60	864	2047	0,14	800	72,5	83,9	1050	
80	852	2131	0,138	769	32	37,5	490	
100	840	2219	0,137	738	17,1	20,3	276	
120	829	2307	0,135	710	10,3	12,4	175	
140	816,9	2395	0,133	686	6,54	8	116	
160	805,9	2483	0,132	663	4,51	5,6	84	

Aceite de transformadores

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor especif. c_p (J/kg°K)	Cond. térmica k (W/m°K)	Dif. térmica $\alpha \cdot 10^{10}$ (m ² /s)	Visc. dinámica $\eta \cdot 10^3$ (N/s.m ²)	Visc. cinemát. $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	N° Prandtl Pr
-50	922	1700	0,116	742	29320	31800	428600
-40	916	1680	0,116	750	3866	4220	56300
-30	910	1650	0,115	764	1183	1300	17000
-20	904	1620	0,114	778	365,6	404	5200
-10	898	1600	0,113	788	108,1	120	1530
0	891	1620	0,112	778	55,24	67,5	867
10	885	1650	0,111	763	33,45	37,8	495
20	879	1710	0,111	736	21,1	24	326
30	873	1780	0,11	707	13,44	15,4	218
40	867	1830	0,109	688	9,364	10,8	157

Glicerina C₃H₅(OH)₃

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Visc. cinemática $\nu \cdot 10^4$ (m ² /s)	Cond. térmica k (W/m°K)	Difus. térmica $\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	N° Prandtl Pr	β 1/°K
0	1276	2261	83,1	0,282	0,983	84700	
10	1270	2319	30	0,284	0,965	31000	
20	1264	2386	11,8	0,286	0,947	12500	0,0005
30	1258	2445	5	0,286	0,929	5380	
40	1252	2512	2,2	0,286	0,914	2450	
50	1245	2583	1,5	0,287	0,893	1630	

Etileno glicol C₂H₄(OH)₂

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Visc. cinemática $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	Cond. térmica k (W/m°K)	Difus. térmica $\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	N° Prandtl Pr	β 1/°K
0	1130,75	2294	57,53	0,242	0,934	615	
20	1116,65	2382	19,18	0,249	0,939	204	0,00065
40	1101,43	2474	8,69	0,256	0,939	93	
60	1087,66	2562	4,75	0,26	0,932	51	
80	1077,56	2650	2,98	0,261	0,921	32,4	
100	1058,5	2742	2,03	0,263	0,908	22,4	

TABLAS IV.24. - PROPIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS METALES LÍQUIDOS

Mercurio

Punto de fusión: - 38,9°C ; Punto de ebullición: 357°C

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Coef.dil.tér. $\beta \cdot 10^3$	Calor especif. c_p (J/kg°K)	C.térmica k (W/m°K)	Difus.térmica $\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Visc.dinámica $\eta \cdot 10^4$ (N/s.m ²)	Visc.cinemát. $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr	$10^{-10} \frac{g \beta}{v^2}$
0	13628		140,3	8,2	42,99	16,9	0,124	0,0288	
20	13579	18,2	139,4	8,69	46,06	15,48	0,114	0,0249	13,73
50	13506		138,6	9,4	50,22	14,05	0,104	0,0207	
100	13385		137,3	10,51	57,16	12,42	0,0928	0,0162	
150	13264		136,5	11,49	63,54	11,31	0,0853	0,0134	
200	13145		157	12,34	69,08	10,54	0,0802	0,0116	
250	13026		135,7	13,07	74,06	9,96	0,0765	0,0103	
315,7	12847		134	14,02	81,5	8,65	0,0673	0,0083	

Sodio

Punto de fusión: 97,8°C; Punto de ebullición: 883°C

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Coef.dil.tér. $\beta \cdot 10^3$	Calor especif. c_p (J/kg°K)	C.térmica k (W/m°K)	Difus.térmica $\alpha \cdot 10^5$ (m ² /s)	Visc.dinámica $\eta \cdot 10^4$ (N/s.m ²)	Visc.cinemática $\nu \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	$10^{-9} \frac{g \beta}{v^2}$
94,0	929	0,27	1382	86,30	6,71	6,99	7,31	0,0110	4,96
205,0	902	0,36	1340	80,30	6,71	4,32	4,60	0,0072	16,7
315,6	878,5		1304	75,78	6,65	3,29	3,77	0,0057	
371,0	860		1298	72,40	6,45	2,83	3,16	0,0051	
426,7	852,8		1277	69,39	6,41	2,52	2,97	0,0046	
538,0	820,0		1264	64,37	6,21	2,31	2,82	0,0040	
650,0	790		1261	60,56	6,11	1,96	2,50	0,0041	
705,0	778		1256	59,70	6,19	1,79	2,26	0,0038	
760,0	767,5		1270	56,58	5,83	1,72	2,25	0,0385	

Bismuto

Punto de fusión: 271°C; Punto de ebullición: 1477°C

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Coef.dil.tér. $\beta \cdot 10^3$	Calor especif. c_p (J/kg°K)	C.térmica k (W/m°K)	Difus.térmica $\alpha \cdot 10^5$ (m ² /s)	Visc.dinámica $\eta \cdot 10^4$ (N/s.m ²)	Visc.cinemática $\nu \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	$10^{-9} \frac{g \beta}{v^2}$
316	10011	0,117	144,5	16,44	1,14	1,622	1,57	0,014	46,5
427	9867	0,122	149,5	15,58	1,06	1,339	1,35	0,013	65,6
811	9739	0,126	154,5	15,58	1,03	1,101	1,08	0,011	106
922	9611		159,5	15,58	1,01	0,923	0,903	0,009	
1033	9467		164,5	15,58	1,01	0,789	0,813	0,008	

Plomo

Punto de fusión: 327°C; Punto de ebullición: 1737°C

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor especif. c_p (J/kg°K)	Visc.dinámica $\eta \cdot 10^4$ (N/s.m ²)	Visc.cinemática $\eta \cdot 10^6$ (N/s.m ²)	Cond.térmica W/m°K	Difus.térmica $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
371	10540	159		0,0230	16,1	9,61	0,024
425	10470	156	2,11	0,0202	17,5		0,019
525	10350	155	1,72	0,0166	19,0		0,014
625	10230	155	1,49	0,0146	20,4		0,011
704	10140	155	1,37	0,0140	21,9	9,48	0,009

Litio

Punto de fusión: 179°C; Punto de ebullición: 1317°C							
Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Visc.dinámica $\eta \cdot 10^4$ (N/s.m ²)	Visc.cinemática $\eta \cdot 10^6$ (N/s.m ²)	Cond.térmica W/m°K	Difus.térmica $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
204,4	509,2	4365	5,416	1,1098	46,37	20,96	0,051
315,6	498,8	4270	4,465	0,8982	43,08	20,32	0,043
426,7	489,1	4211	3,927	0,8053	38,24	18,65	0,0432
537,8	476,3	4171	3,473	0,7304	30,45	15,4	0,0476

Potasio

Punto de fusión: 63,9°C; Punto de ebullición: 760°C							
Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Visc.dinámica $\eta \cdot 10^4$ (N/s.m ²)	Visc.cinemática $\eta \cdot 10^6$ (N/s.m ²)	Cond.térmica W/m°K	Difus.térmica $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
426,7	741,7	766	2,108	0,2839	39,45	69,74	0,0041
537,8	714,4	762	1,711	0,24	36,51	67,39	0,0036
648,9	690,3	766	1,463	0,2116	33,74	64,1	0,0033
760	667,7	783	1,331	0,1987	31,15	59,86	0,0033

Na-K (56% Na, 44% K)

Punto de fusión: -11°C; Punto de ebullición: 784°C							
Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Visc.dinámica $\eta \cdot 10^4$ (N/s.m ²)	Visc.cinemática $\eta \cdot 10^6$ (N/s.m ²)	Cond.térmica W/m°K	Difus.térmica $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
93,3	889,8	1130	5,622	0,6347	25,78	27,76	0,0246
204,4	865,6	1089	3,803	0,4414	26,47	28,23	0,0155
315,6	838,3	1068	2,935	0,3515	27,17	30,5	0,0115
426,7	814,2	1051	2,15	0,2652	27,68	32,52	0,0081
537,8	788,4	1047	2,026	0,2581	27,68	33,71	0,0076
648,9	759,5	1051	1,695	0,224	27,68	34,86	0,0064

TABLAS IV.25 .- PROPIEDADES TÉRMICAS DE LÍQUIDOS SATURADOS

Agua

Temper. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Cond. térmica W/m°K	Difus. térmica $\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Visc. dinámica $\eta \cdot 10^6$ (N/s.m ²)	Visc. cinemática $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr	$\frac{g\beta}{\nu^2} \cdot 10^9$
0	999,9	4226	0,558	0,131	1794	1,789	13,7	
20	998,2	4182	0,597	0,143	1004	1,006	7,02	2,035
40	992,3	4178	0,633	0,151	653,0	0,658	4,34	8,833
60	983,2	4181	0,658	0,155	470,0	0,478	3,02	22,75
80	971,8	4194	0,673	0,165	353,7	0,364	2,22	46,68
100	958,4	4211	0,682	0,169	281,0	0,294	1,75	85,09
120	943,1	4245	0,685	0,171	233,0	0,247	1,45	
140	926,1	4279	0,687	0,172	198,2	0,214	1,24	
160	907,6	4338	0,682	0,173	171,5	0,189	1,10	
180	887,0	4413	0,678	0,172	153,5	0,173	1,00	
200	864,8	4501	0,665	0,170	129,0	0,160	0,94	517,2
220	840,5	4606	0,656	0,168	126,0	0,150	0,89	
240	812,2	4752	0,639	0,164	116,0	0,143	0,87	
260	784,0	4944	0,614	0,157	107,5	0,137	0,87	
280	750,8	5204	0,583	0,150	101,4	0,135	0,92	
300	712,5	6594	0,543	0,132	94,1	0,132	1,02	1766

Dióxido de carbono CO₂

Temperat. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Visc. cinemática $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	Cond. térmica W/m°K	Difus. térmica $\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	β (1/°K)
-50	1156,3	1840	0,119	0,085	0,4021	2,96	
-40	1117,8	1880	0,118	0,1011	0,481	2,46	
-30	1076,8	1970	0,117	0,1116	0,5272	2,22	
-20	1032,4	2050	0,115	0,1151	0,5445	2,12	
-10	983,4	2180	0,13	0,1099	0,5133	2,2	
0	927,0	2470	0,108	0,1045	0,4578	2,38	
10	860,0	3140	0,101	0,0971	0,3608	2,8	
20	772,6	5000	0,091	0,0872	0,2219	4,1	0,014
30	597,8	36400	0,08	0,0703	0,0279	28,7	

Dióxido de azufre SO₂

Temperat. °C	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kg°K)	Visc. cinemática $\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	Cond. térmica W/m°K	Difus. térmica $\alpha \cdot 10^7$ (m ² /s)	Pr	β (1/°K)
-50	1560,8	1359,5	0,484	0,242	1,141	4,24	
-40	1536,8	1360,7	0,424	0,235	1,13	3,74	
-30	1520,64	1361,6	0,371	0,23	1,117	3,31	
-20	1488,6	1362,4	0,324	0,225	1,107	2,93	
-10	1463,6	1362,8	0,288	0,218	1,097	2,62	
0	1438,46	1363,6	0,257	0,211	1,081	2,38	
10	1412,5	1364,5	0,232	0,204	1,066	2,18	
20	1386,4	1365,3	0,21	0,199	1,05	2	0,00194
30	1359,33	1366,2	0,19	0,192	1,035	1,83	
40	1329,22	1367,4	0,173	0,185	1,019	1,7	
50	1299,1	1368,3	0,162	0,177	0,999	1,61	

TABLAS IV.25 .- PROPIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS GASES Y VAPORES

Vapor de agua recalentado

Temperat. °K	Densidad $\rho \frac{kg}{m^3}$	Calor espec. $c_p \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$	Visc.dinám. $\eta \cdot 10^6 \frac{kg}{m \cdot seg}$	Visc.cinem. $\nu \cdot 10^6 \frac{m^2}{seg}$	Cond.térm. $k \frac{W}{m^{\circ}C}$	Difus.térm. $\alpha \cdot 10^4 \frac{m^2}{seg}$	Pr
380	0,5863	2,0600	12,71	21,6	0,0246	0,204	1,060
400	0,5542	2,0140	13,44	24,2	0,0261	0,234	1,040
450	0,4902	1,9800	15,25	31,1	0,0299	0,307	1,010
500	0,4405	1,9850	17,04	38,6	0,0339	0,387	0,996
550	0,4005	1,9970	18,84	47,0	0,0379	0,475	0,991
600	0,3652	2,0260	20,67	56,6	0,0422	0,573	0,986
650	0,3380	2,0560	22,47	64,4	0,0464	0,666	0,995
700	0,3140	2,0850	24,26	77,2	0,0505	0,772	1,000
750	0,2931	2,1190	26,04	88,8	0,0549	0,883	1,005
800	0,2739	2,1520	27,86	102,0	0,0592	1,001	1,010
850	0,2579	2,1860	29,69	115,2	0,0637	1,130	1,019

Aire

Temperat. °K	Densidad $\rho \frac{kg}{m^3}$	Calor espec. $c_p \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$	Visc.dinám. $\eta \cdot 10^5 \frac{kg}{m \cdot seg}$	Visc.cinem. $\nu \cdot 10^6 \frac{m^2}{seg}$	Cond.térm. $k \frac{W}{m^{\circ}C}$	Difus.térm. $\alpha \cdot 10^4 \frac{m^2}{seg}$	Pr
100	3,6010	1,027	0,692	1,92	0,0092	0,0250	0,770
150	2,3675	1,010	1,028	4,34	0,0137	0,0575	0,753
200	1,7684	1,006	1,329	7,49	0,0181	0,1017	0,739
250	1,4128	1,005	1,488	10,53	0,0223	0,1316	0,722
300	1,1774	1,006	1,983	16,84	0,0262	0,2216	0,708
350	0,9980	1,009	2,075	20,76	0,0300	0,2983	0,697
400	0,8826	1,014	2,286	25,90	0,0336	0,3760	0,689
450	0,7833	1,021	2,484	31,71	0,0371	0,4222	0,683
500	0,7048	1,030	2,671	37,90	0,0404	0,5564	0,680
550	0,6423	1,039	2,848	44,34	0,0436	0,6532	0,680
600	0,5879	1,055	3,018	51,34	0,0466	0,7512	0,680
650	0,5430	1,063	3,177	58,51	0,0495	0,8578	0,682
700	0,5030	1,075	3,332	66,25	0,0523	0,9672	0,684
750	0,4709	1,086	3,481	73,91	0,0551	1,0774	0,686
800	0,4405	1,098	3,625	82,29	0,0578	1,1981	0,689
850	0,4149	1,109	3,765	90,75	0,0603	1,3097	0,692
900	0,3925	1,121	3,899	99,30	0,0628	1,4271	0,696
950	0,3716	1,132	4,023	108,20	0,0653	1,5510	0,699
1000	0,3524	1,142	4,152	117,80	0,0675	1,6779	0,702
1100	0,3204	1,160	4,440	138,60	0,0732	1,9690	0,704
1200	0,2947	1,179	4,690	159,10	0,0782	2,2510	0,707
1300	0,2707	1,197	4,930	182,10	0,0837	2,5830	0,705
1400	0,2515	1,214	5,170	205,50	0,0891	2,9200	0,705
1500	0,2355	1,230	5,400	229,10	0,0946	3,2620	0,705
1600	0,2211	1,248	5,630	254,50	0,1000	3,6090	0,705
1700	0,2082	1,267	5,850	280,50	0,1050	3,9770	0,705
1800	0,1970	1,287	6,070	308,10	0,1110	4,3790	0,704
1900	0,1858	1,309	6,290	338,50	0,1170	4,8110	0,704
2000	0,1762	1,338	6,500	369,00	0,1240	5,2600	0,702
2100	0,1682	1,372	6,720	399,60	0,1310	5,7150	0,700
2200	0,1602	1,419	6,930	432,60	0,1390	6,1200	0,707
2300	0,1538	1,482	7,140	464,00	0,1490	6,5400	0,710
2400	0,1458	1,574	7,350	504,00	0,1610	7,0200	0,718
2500	0,1394	1,688	7,570	543,50	0,1750	7,4410	0,730

Hidrógeno

Temperat. °K	Densidad $\rho \frac{kg}{m^3}$	Calor espec. $c_p \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^6 \frac{kg}{m \cdot seg}$	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6 \frac{m^2}{seg}$	Cond. térm. $k \frac{W}{m^{\circ}C}$	Difus. térm. $\alpha \cdot 10^4 \frac{m^2}{seg}$	Pr
30	0,84722	10,84	1,606	1,895	0,0228	0,0249	0,759
50	0,50955	10,501	2,516	4,88	0,0362	0,0676	0,721
100	0,24572	11,229	4,212	17,14	0,0665	0,2408	0,712
150	0,16371	12,602	5,595	34,18	0,0981	0,475	0,718
200	0,12270	13,54	6,813	55,53	0,1282	0,772	0,719
250	0,09819	14,059	7,919	80,64	0,1561	1,13	0,713
300	0,08185	14,314	8,963	109,5	0,182	1,554	0,706
350	0,07016	14,436	9,954	141,9	0,206	2,031	0,697
400	0,06135	14,491	10,864	177,1	0,228	2,568	0,69
450	0,05462	14,499	11,779	215,6	0,251	1,164	0,682
500	0,04918	14,507	12,636	257,0	0,272	3,817	0,675
550	0,04469	14,532	13,475	301,6	0,292	4,516	0,668
600	0,04085	14,537	14,285	349,7	0,315	5,306	0,664
700	0,03492	14,574	15,89	455,1	0,351	6,903	0,659
800	0,03060	14,675	17,40	569	0,384	8,563	0,664
900	0,02723	14,821	18,78	690	0,412	10,217	0,676
1000	0,02451	14,968	20,16	822	0,440	11,997	0,686
1100	0,02227	15,165	21,46	965	0,464	13,726	0,703
1200	0,02050	15,366	22,75	1107	0,488	15,484	0,715
1300	0,01890	15,575	24,08	1273	0,512	17,394	0,733
1333	0,01842	15,638	24,44	1328	0,519	18,013	0,736

Oxígeno

Temperat. °K	Densidad $\rho \frac{kg}{m^3}$	Calor espec. $c_p \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^6 \frac{kg}{m \cdot seg}$	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6 \frac{m^2}{seg}$	Cond. térm. $k \frac{W}{m^{\circ}C}$	Difus. térm. $\alpha \cdot 10^4 \frac{m^2}{seg}$	Pr
100	3,9918	0,9479	7,77	1,95	0,00903	0,0239	0,815
150	2,6190	0,9178	11,49	4,39	0,01367	0,0569	0,773
200	1,9559	0,9131	14,85	7,59	0,01824	0,1021	0,745
250	1,5618	0,9157	17,87	11,45	0,02259	0,1579	0,725
300	1,3007	0,9203	20,63	15,86	0,02676	0,2235	0,709
350	1,1133	0,9291	23,16	20,80	0,03070	0,2968	0,702
400	0,9755	0,9420	25,54	26,18	0,03461	0,3768	0,695
450	0,8652	0,9567	27,77	31,99	0,03828	0,4609	0,694
500	0,7801	0,9722	29,91	38,34	0,04173	0,5502	0,697
550	0,7096	0,9881	31,97	45,05	0,04517	0,6441	0,700
600	0,6504	1,0044	33,92	52,15	0,04832	0,7399	0,704

Monóxido de carbono, CO

Temperat. °K	Densidad $\rho \frac{kg}{m^3}$	Calor espec. $c_p \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^6 \frac{kg}{m \cdot seg}$	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6 \frac{m^2}{seg}$	Cond. térm. $k \frac{W}{m^{\circ}C}$	Difus. térm. $\alpha \cdot 10^4 \frac{m^2}{seg}$	Pr
220	1,5536	1,0429	13,83	8,90	0,01900	0,1176	0,758
250	1,3649	1,0425	15,40	11,28	0,02144	0,1506	0,750
300	1,1388	1,0421	17,84	15,67	0,02525	0,2128	0,737
350	0,9742	1,0434	20,09	20,62	0,02883	0,2836	0,728
400	0,8536	1,0484	22,19	25,99	0,03226	0,3605	0,722
450	0,7585	1,0551	24,18	31,88	0,04360	0,4439	0,718
500	0,6822	1,0635	26,06	38,19	0,03863	0,5324	0,718
550	0,6202	1,0756	27,89	44,97	0,04162	0,6240	0,721
600	0,5685	1,0877	29,60	52,06	0,04446	0,7190	0,724

Dióxido de carbono, CO₂

Temperat. °K	Densidad $\rho \frac{kg}{m^3}$	Calor espec. $c_p \frac{kJ}{kg^{\circ}C}$	Visc .dinám. $\eta \cdot 10^6 \frac{kg}{m \cdot seg}$	Visc cinem . $\nu \cdot 10^6 \frac{m^2}{seg}$	Cond.térm. $k \frac{W}{m^{\circ}C}$	Difus.térm. $\alpha \cdot 10^5 \frac{m^2}{seg}$	Pr
220	2,4733	0,783	11,105	4,49	0,010805	0,0592	0,818
250	2,1657	0,804	12,59	5,81	0,012884	0,07401	0,793
300	1,7973	0,871	14,958	8,32	0,016572	0,10588	0,770
350	1,5362	0,900	17,205	11,19	0,02047	0,14808	0,755
400	1,3424	0,942	19,32	14,39	0,02461	0,19463	0,738
450	1,1918	0,980	21,34	17,90	0,02897	0,24813	0,721
500	1,0732	1,013	23,26	21,67	0,03352	0,3084	0,702
550	0,9739	1,047	25,08	25,74	0,03821	0,375	0,685
600	0,8938	1,076	26,83	30,02	0,04311	0,4483	0,668

Vapor de agua húmedo

Temperat. °C	Densidad kg/m ³		Calor específico kJ/kg°C		Conductiv. térmica W/m°C		Viscos. dinámica $\eta \cdot 10^3$ (kg/m.seg)		Pr	
	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor
0	1000	0,0049	4,21	1,86	0,569	0,0163	1,75	0,0085	13,00	0,97
5	1000	0,0068	4,20	1,86	0,578	0,0167	1,50	0,0087	10,90	0,96
10	1000	0,0094	4,19	1,86	0,587	0,0171	1,30	0,0088	9,29	0,96
15	999	0,0128	4,19	1,87	0,595	0,0175	1,14	0,0090	7,99	0,96
20	998	0,0173	4,18	1,87	0,603	0,0179	1,00	0,0092	6,95	0,96
25	997	0,0230	4,18	1,88	0,611	0,0183	0,89	0,0094	6,09	0,96
30	996	0,0304	4,18	1,88	0,618	0,0187	0,80	0,0095	5,39	0,96
40	992	0,0512	4,18	1,89	0,632	0,0195	0,59	0,0100	3,89	0,95
60	983	0,130	4,19	1,91	0,653	0,0212	0,46	0,0106	2,97	0,95
80	972	0,293	4,20	1,95	0,670	0,0229	0,351	0,0113	2,20	0,96
100	958	0,598	4,22	2,01	0,681	0,0248	0,279	0,1120	1,73	0,97
125	939	1,30	4,26	2,12	0,687	0,0273	0,220	0,0130	1,36	1,01
150	917	2,55	4,32	2,29	0,687	0,0300	0,181	0,0139	1,14	1,07
200	865	7,86	4,51	2,91	0,665	0,0375	0,134	0,0157	0,91	1,22
250	799	19,98	4,87	3,94	0,616	0,0495	0,107	0,0175	0,85	1,39
300	712	46,19	5,65	6,18	0,541	0,0720	0,085	0,0198	0,89	1,70