IV.- TRANSMISIÓN DE CALOR

pfernandezdiez.es

Conducción térmica	*121*
Coeficiente de conductividad térmica, calor específico y densidad	*122*
Metales puros, deposiciones de ceniza, agua, líquidos no metálicos, gases paredes de refractario, aisla	*124*
Resistencia de contacto	*125*
Convección	*125*
Formulación práctica para la convección	*126*
Convección natural	*127*
Convección forzada en régimen laminar	*128*
Flujo laminar por el interior de tubos	*128*
Flujo turbulento	*129*
Flujo turbulento por el interior de tubos	*129*
Flujo turbulento cruzado por el exterior de tubos	*132*
Radiación	*135*
Factores de forma de radiación en configuraciones de 2 dimensiones	*137*
Balance de radiación para recintos con medio no participante	*138*
Recinto formado por dos superficies grises, difusas y opacas con F12 = 1	*138*
Balance de radiación para recintos con medio participante	*139*
Propiedades de la radiación	*140*
Emisividad de los gases	*141*
Tablas de emisividades normales del vapor de agua y del anhidrido carbónico; factores de corrección	*142*
Tabla de longitudes medias L del haz para diversas situaciones geométricas del gas	*145*
Absortividad de los gases	*146*
Tabla de emisividades normales de metales, no metales y pinturas	*147*
Determinación práctica de la emisividad y de la absortividad: CO2, óxido de C, vapor de agua, humos	*148*
Tablas de absortividad en superficies metálicas y no metálicas	*150*
Radiación de nubes de partículas: Llamas de carbón pulverizado, de sebos, de fuel	*150*
Llamas luminosas	*151*
Emisividad en llamas de carbón pulverizado	*152*
Hornos y hogares	*152*
Ejemplos: Conducción a través de pared plana y de pared compuesta	*155*
Ejemplo: Flujo de calor a través de una tubería aislada	*157*
Ejemplo: Transferencia térmica entre un objeto pequeño y una cavidad grande	*158*
Ejemplo: Transferencia de calor entre dos superficies	*158*
Ejemplo: Radiación de un gas caliente a las paredes de hogar	*159*
Ejemplo: Radiación en una cavidad	*160*
Factores de forma de radiación (configuraciones en 3 dimensiones)	*161*
Tablas de propiedades térmicas de algunos metales y aleaciones	*168*
Tabla de propiedades térmicas de algunos aleaciones	*172*
Tabla de propiedades térmicas de algunos aceros y aleaciones especiales	*173*
Tabla de propiedades termicas de algunos materiales de construcción y aislantes	*174*
Tabla de propiedades térmicas de algunos materiales cerámicos	*175*
Tabla de propiedades térmicas de materiales diversos	*177*
Tablas de propiedades térmicas de algunos aceites y glicerinas	*179*
Tablas de propiedades térmicas de algunos metales líquidos	*180*
Tablas de propiedades térmicas de algunos líquidos saturados	*182*
Tablas de propiedades térmicas de algunos gases y vapores	*184*
Referencias	*186*

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.

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.

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

Materiales	*Btu/ft.h.ºF*	*W/mºC*
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*

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:

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

En coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{r}\,\frac{\partial}{\partial r}\left(r\,\frac{\partial T}{\partial r}\right) = \frac{1}{\alpha}\,\frac{\partial T}{\partial t}$$

En coordenadas esféricas:

$$\frac{1}{r^2}\,\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\,\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\ sen\,\theta}\,\frac{\partial}{\partial \theta}\left(sen\,\theta\,\frac{\partial T}{\partial q}\right) + \frac{1}{r^2 sen^2\theta}\,\frac{\partial^2 T}{\partial \Phi^2} + \frac{E}{k} = \frac{1}{\alpha}\,\frac{\partial T}{\partial t}$$

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/fthºF ó (W/mºK); en general, la conductividad térmica es más alta en los materiales sólidos, menor en los líquidos y mucho más reducida en los gases.

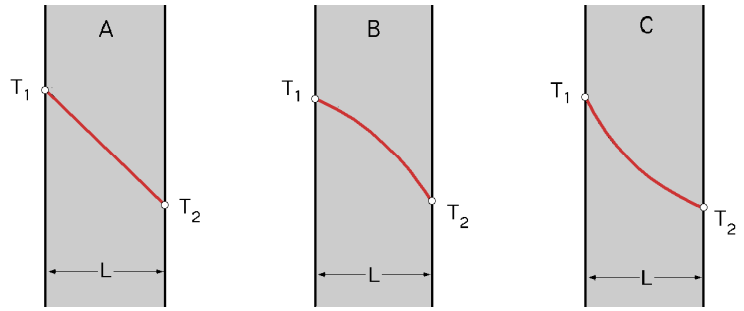
- Metales puros.- La conductividad térmica decrece cuando aumenta la temperatura, mientras que la conductividad de las aleaciones puede aumentar o disminuir con la temperatura.

- Deposiciones de ceniza.- Los valores de la conductividad térmica para una *capa caliente de deposición 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: $\begin{cases} 0{,}03 \div 0{,}29\ Btu/ft.h°F \\ 0{,}05 \div 0{,}5\ W/m°K \end{cases}$

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

La conductividad térmica efectiva de las *deposiciones de ceniza,* para altas temperaturas, es similar a la del aire y el CO_2; 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 = 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.

Su conductividad térmica varía: $\begin{cases} \text{- desde la temperatura ambiente} = 0{,}33\ \frac{Btu}{ft.h°F} = 0{,}57\ \frac{W}{m°K} \\ \text{- hasta el punto crítico} = 0{,}16\ \frac{Btu}{ft.h°F} = 0{,}28\ \frac{W}{m°K} \end{cases}$

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

- 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 varía 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*, en general, no dependen de la presión. La Tabla IV.2 compendia valores de calores específicos de diversos metales, aleaciones y materiales heterogéneos, referidos a la temperatura de 68ºF (20ºC), que se pueden utilizar para otras temperaturas sin que se cometan errores apreciables.

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

Material		*ρ (lb/ft³)*	*C_p (Btu/lb°F)*	*k (Btu/ft.h°F)*
Metales	*Cobre*	*559*	*0,09*	*223*
	Aluminio	*169*	*0,21*	*132*
	Níquel	*556*	*0,12*	*52*
	Hierro	*493*	*0,11*	*42*
	Acero al C	*487*	*0,11*	*25*
	Acero 18% Cr, 8% Ni	*488*	*0,11*	*9,4*
Sólidos no metálicos	*Caliza*	*105*	*0,2*	*0,87*
	Cristal Pirex	*170*	*0,2*	*0,58*
	Ladrillo K-28	*27*	*0,2*	*0,14*
	Argamasa	*140*	*0,2*	*0,075*
	Lana mineral	*8*	*0,2*	*0,016*
Gases	*Hidrógeno*	*0,006*	*3,3*	*0,099*
	Oxígeno	*0,09*	*0,22*	*0,014*
	Aire	*0,08*	*0,24*	*0,014*
	Nitrógeno	*0,08*	*0,25*	*0,014*
	Vapor de agua	*0,04*	*0,45*	*0,015*
Líquidos	*Agua*	*62,4*	*1*	*0,32*
	Dióxido de S	*89,9*	*0,33*	*0,12*

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:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{cont}}$$

Los valores correspondientes al coeficiente de contacto h_{cont} se pueden obtener de Tablas especializadas; a título de ejemplo se indican los siguientes coeficientes de contacto:

- *Acero inoxidable 304, contacto/aire* = $300\ Btu/ft^2h^oF = 1{,}7\ W/m^2{}^oK$
- *Cobre de puesta a tierra, contacto/aire* = $25000\ Btu/ft^2h^oF = 142\ W/m^2{}^oK$

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*

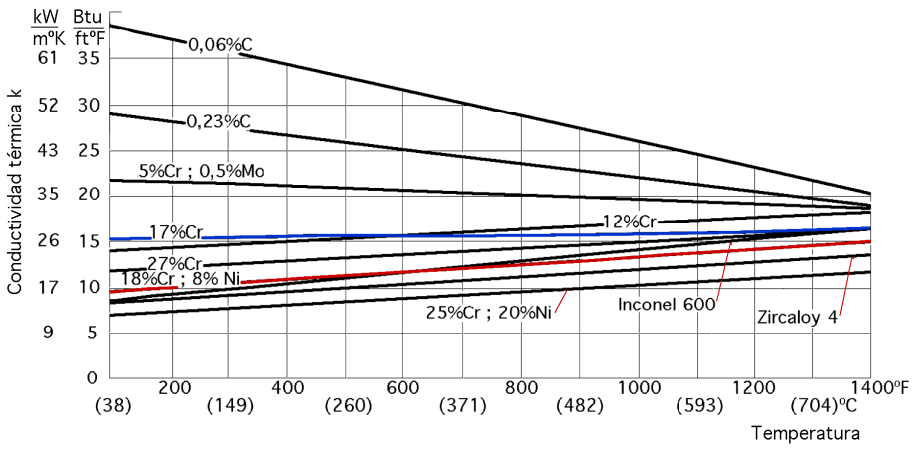


Fig IV.2.- Conductividad térmica de algunos metales y aleaciones

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*		
	$\rho\ \frac{lb}{ft^3}$	$c_p\ \frac{Btu}{lb°F}$	$k\ \frac{Btu}{lb.h°F}$	$\rho\ \frac{lb}{ft^3}$	$c_p\ \frac{Btu}{lb°F}$	$k\ \frac{Btu}{lb.h°F}$	$\rho\ \frac{lb}{ft^3}$	$c_p\ \frac{Btu}{lb°F}$	$k\ \frac{Btu}{lb.h°F}$
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*

$$\text{Conversión de unidades a S.I.} \begin{cases} \rho \Rightarrow (kg/m^3) = 16{,}02\ (lb/ft^3) \\ c_p \Rightarrow (kJ/kg°K) = 4{,}1869\ (Btu/lb°F) \\ k \Rightarrow (W/m°K) = 1{,}7307\ (Btu/ft.h°F) \end{cases}$$

$$\text{Conversión de temperaturas} \begin{cases} °C = (°F - 32)/1{,}8 \\ °F = 1{,}8°C + 32) \\ °K = °C + 273{,}14 \\ °R = °F + 460 \end{cases}$$

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

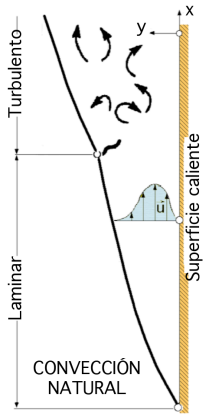
Interface	$h_i\ (W/m^2°K)$
Cerámica-Cerámica	*500 a 3000*
Cerámica-Metal	*1500 a 8500*
Grafito-Metal	*3000 a 6000*
Acero inoxidable-Acero inoxidable	*1700 a 3700*
Aluminio-Aluminio	*2200 a 12000*
Acero inoxidable-Aluminio	*3000 a 4500*
Cobre-Cobre	*10000 a 25000*
Hierro-Aluminio	*4000 a 40000*

IV.2.- CONVECCIÓN

La transferencia de calor por convección en el seno de un fluido tiene lugar mediante una combinación de: $\begin{cases} \text{- } \textit{conducción molecular} \\ \text{- } \textit{movimiento macroscópico del fluido} \end{cases}$

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.

El flujo térmico de la convección se calcula por medio de la ley de Newton:

$$q_c = h_{cF} \, (T_{pF} - T_F)$$

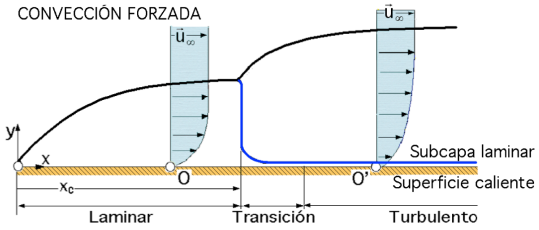


Fig IV.3.- Perfil de velocidades en la convección
a) Natural sobre placa vertical
b) Forzada sobre placa horizontal

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

Tabla IV.6.- Coeficientes de convección típicos

Condición	*Btu/ft²h°F*	*W/m²°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*

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, el coeficiente convectivo de la 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 trans-

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

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

Geometría	$Btu/ft^2h^\circ F^{4/3}$	$W/m^2{}^\circ K^{4/3}$
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 requerido 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 velocidades bajas, las fuerzas viscosas son muy importantes y predomina el flujo laminar

- A velocidades altas 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:

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

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 comprende, aproximadamente, el 98% de la sección transversal, y en él el calor se transfiere por convección

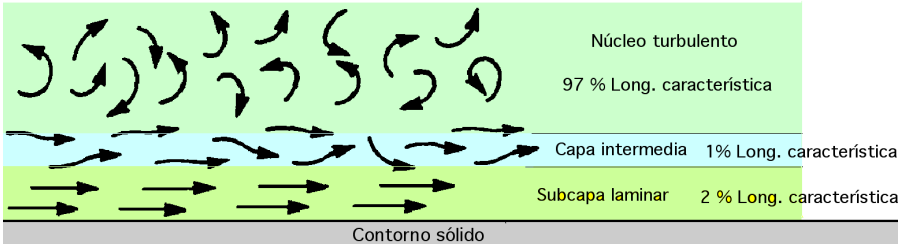


Fig IV.4.- Estructura de un campo de flujo próximo a un contorno sólido

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. En la subcapa del flujo laminar, y en 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 nº 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:

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

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

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

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

siendo:

- $F_{pp} = \dfrac{c_p^{0,4}\ k^{0,6}}{\eta^{0,4}}$ *un coeficiente función de las propiedades del fluido, Fig IV.6, 7 y 8*
- h_c^* *un coeficiente geométrico, Fig IV.5, de la forma:* $h_c^* = 0{,}023\, \dfrac{G^{0,8}}{D_i^{0,2}}$
- $F_T = (\dfrac{T_F}{T_f})^{0,8}$ *un factor de temperatura*

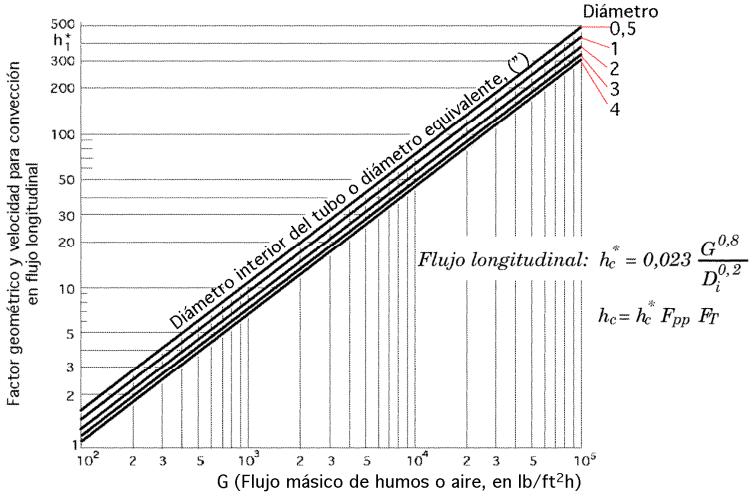


Fig IV.5.- Factor de geometría y velocidad para convección básica en flujo longitudinal (en medidas inglesas)

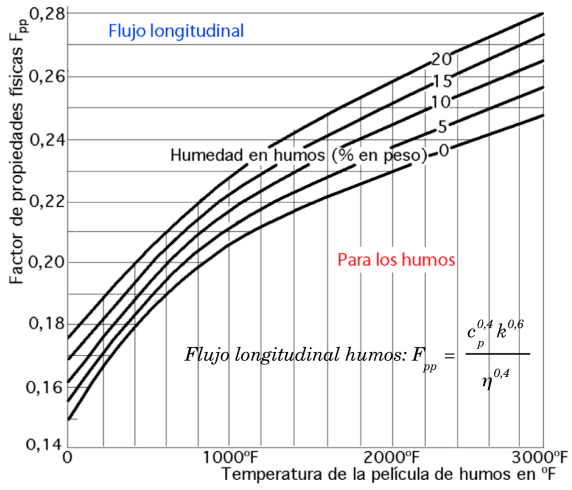


Fig IV.6.- Efecto de la temperatura de película y de la humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp}, para humos

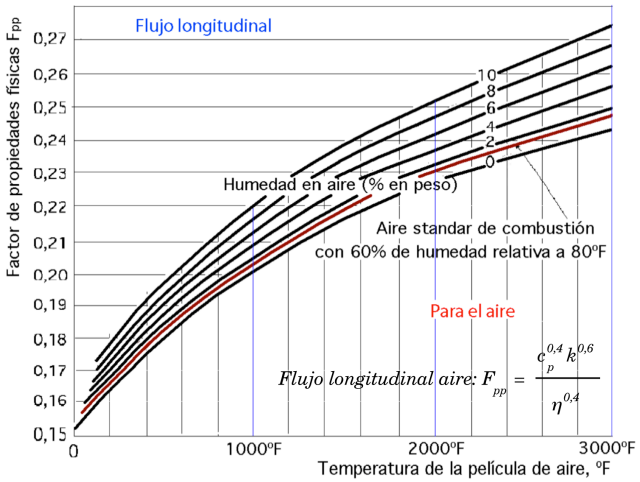


Fig IV.7.- Efecto de la temperatura de película y de la humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp}, para el aire

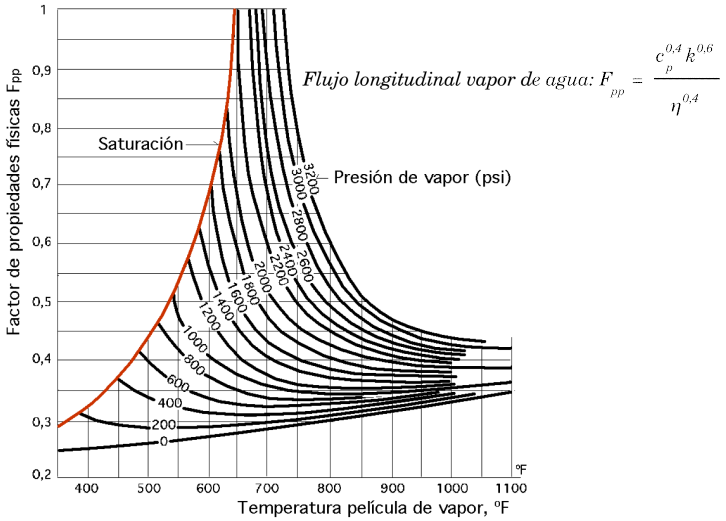
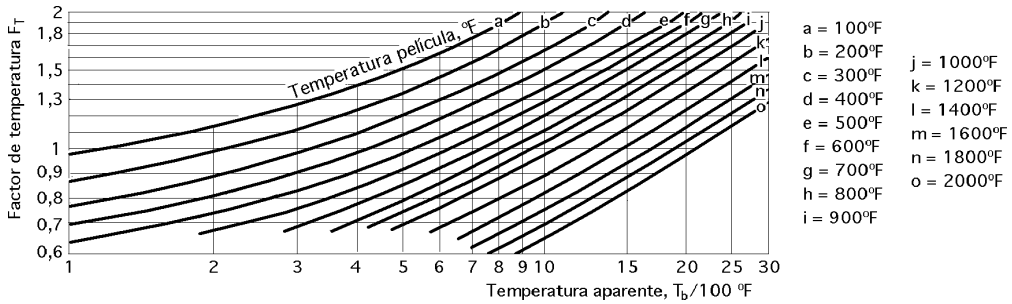


Fig IV.8.- Efecto de la temperatura de película y de la humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp}, para el vapor de agua en flujo longitudinal (sólo para medidas inglesas)



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

Fig IV.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

Flujo turbulento cruzado 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:

$$Nu_d = C\, Re_{máx}^{n} Pr^{1/3} \text{ , con: } \begin{cases} 2000 < Re_{máx} < 40000 \\ Pr > 0{,}7 \end{cases}$$

viniendo dados C y n en la Tabla IV.8

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.10 se indica un factor de corrección ψ del coeficiente de convección:

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

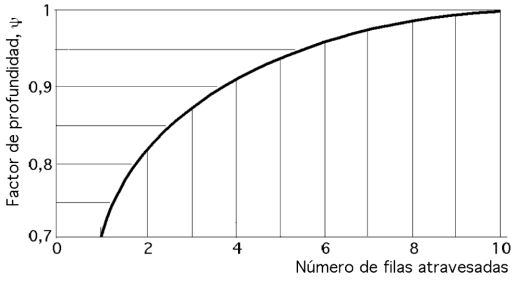


Fig IV.10.- Factor de corrección ψ para N número de filas de tubos atravesadas

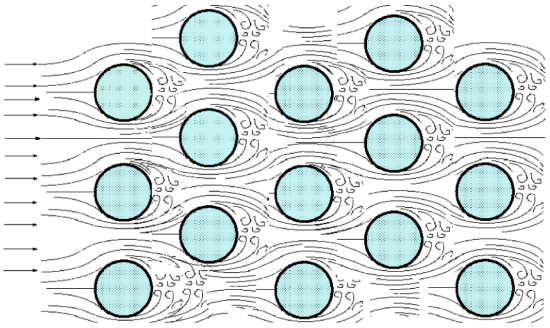


Fig IV.11.- Flujo forzado a través de un haz de tubos

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

$$\text{Disposición regular: Paso mínimo} = (e_x - d) \quad \Rightarrow \quad u_{máx} = \frac{u_F\ e_x}{e_x - d}$$

$$\text{Disposición triangular: Se toma el menor de los pasos:} \begin{cases} \dfrac{e_x - d}{2} \\ \sqrt{\left(\dfrac{e_x}{2}\right)^2 + e_y^2} - d \end{cases} \quad \Rightarrow \quad u_{máx} = \frac{\dfrac{u_F\ e_x}{2}}{\text{Paso mínimo}}$$

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.13 a 17 definen los factores de esta correlación:

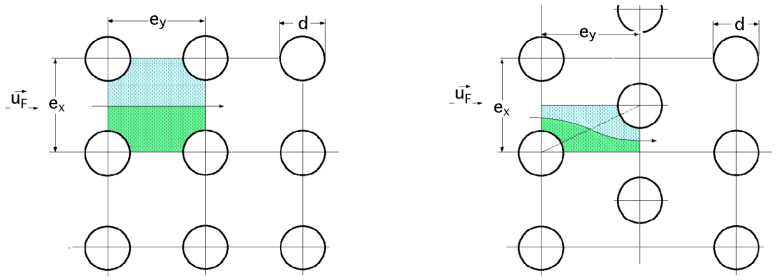


Fig IV.12a-b- Flujos cruzados en baterías de tubos en línea y al tresbolillo

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

EN LÍNEA	$e_x/d = 1{,}25$		$e_x/d = 1{,}5$		$e_x/d = 2$		$e_x/d = 3$	
e_y/d	C	n	C	n	C	n	C	n
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	$e_x/d = 1{,}25$		$e_x/d = 1{,}5$		$e_x/d = 2$		$e_x/d = 3$	
e_y/d	C	n	C	n	C	n	C	n
0,6	---	---	---	---	---	---	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 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

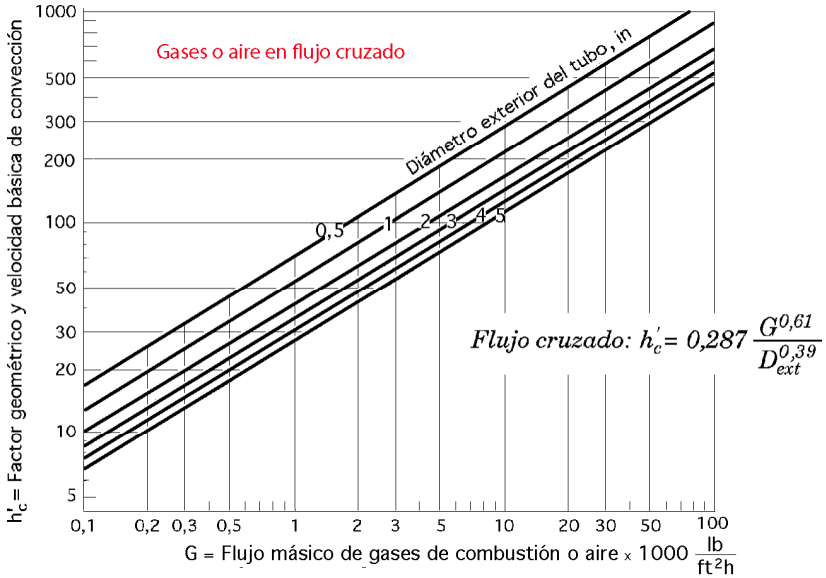


Fig IV.13.- Factor geométrico y velocidad básica de convección h'_C para gases o aire en flujo cruzado (Unidades inglesas)

- *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* $\frac{Espaciado}{Diámetro}$ *de tubos y del número de Re, Fig IV.16*

- *El gasto másico G y el n° de Re se calculan con la sección transversal del flujo de fluido mínima*

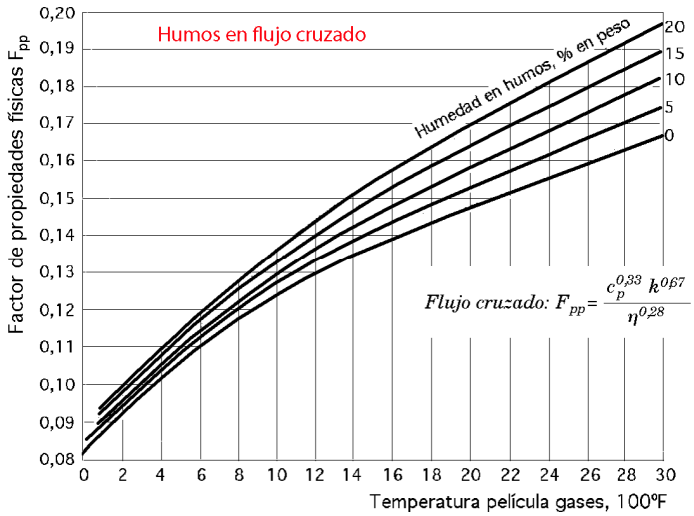


Fig IV.14.- Efecto de la temperatura de película y la humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp}, para humos en flujo cruzado

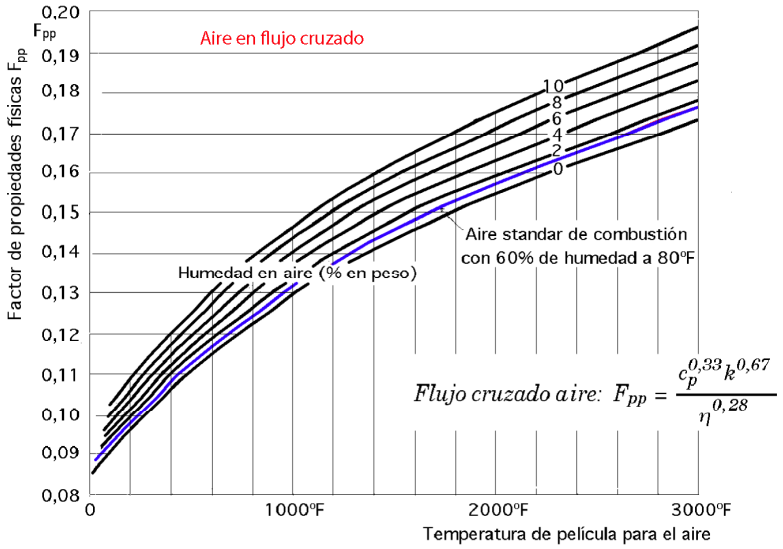


Fig IV.15.- Efecto de la temperatura de película y humedad en el factor de propiedades físicas F_{pp}, para el aire en flujo cruzado

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 $\begin{cases} \text{- } un\ codo \\ \text{- } una\ pantalla\ distribuidora \\ \text{- } un\ cortatiros \end{cases}$

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:

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

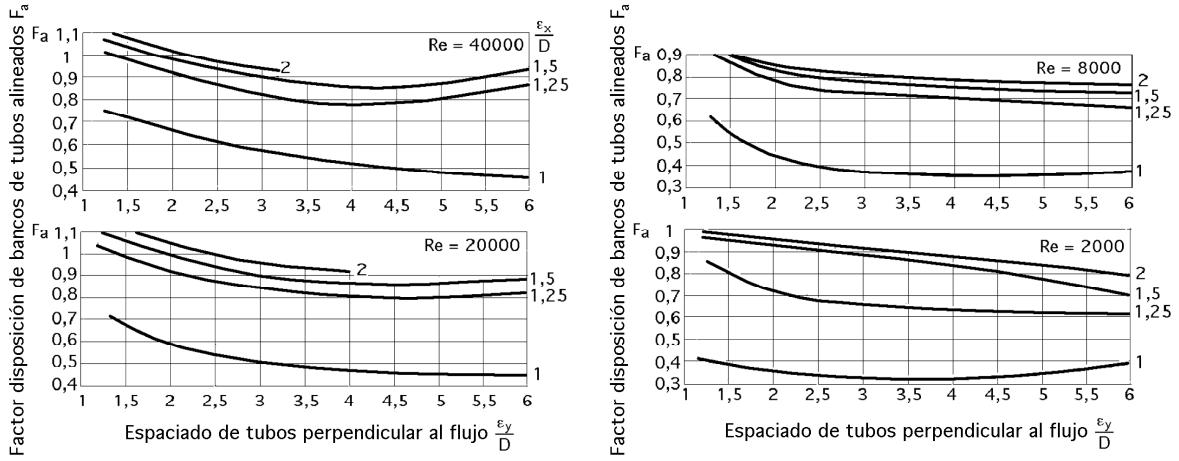


Fig IV.16a.- Factor de disposición F_a, en función del nº de Re, para varias disposiciones de tubos alineados comercialmente limpios, para flujo cruzado de humos o aire

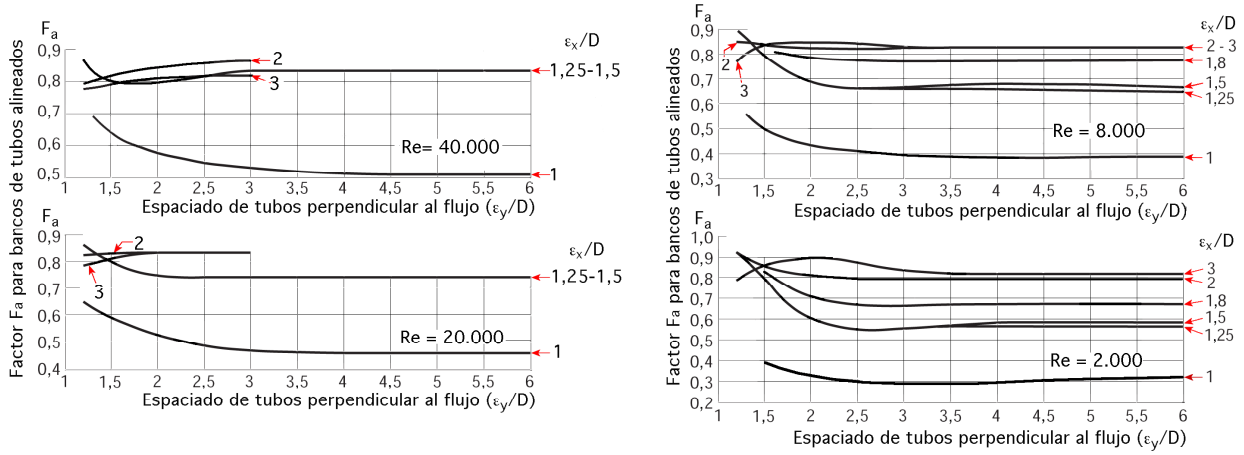


Fig IV.16b.- Factor de disposición F_a, en función del nº de Re, para varias disposiciones de tubos alineados comercialmente limpios, para flujo cruzado de gases cargados de cenizas

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 ne-

cesita 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:

$$q_r = A\,E_{bs} = A\,\sigma\,T_s^4\ ,\ \textit{en la que:}\ \begin{cases} \sigma = 0{,}1713.10^{-8}\ \dfrac{Btu}{ft^2\,h\,{}^\circ R^4}\ \ \textit{ó}\ \ 5{,}67.10^{-8}\ \dfrac{W}{m^2\,{}^\circ K^4} \\ E_{bs} = \textit{Poder emisivo del cuerpo negro} = \sigma\,T_s^4\ \ (\textit{con}\ T_s\ \textit{en}\ {}^\circ R\ \textit{ó en}\ {}^\circ K) \end{cases}$$

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.

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	$0,0 < \varepsilon < 0,98$

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

Si la emisividad depende de la longitud de onda, la superficie pertenece a un radiador selectivo, o a una superficie gris.

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:

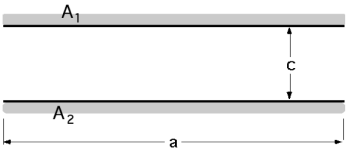
$q_{12} = A_1 F_{12} F (T_1^4 - T_2^4)$, *en la que:* $\begin{cases} A_1 \text{ es el área de la superficie (1)} \\ F_{12} \text{ es el factor de forma o fracción de energía que sale de (1) y alcanza (2)} \\ T_1 \text{ y } T_2 \text{ son las temperaturas de las superficies} \end{cases}$

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.

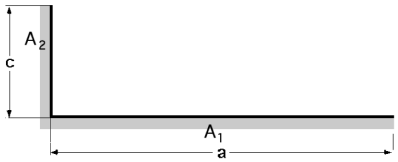
Tabla IV.11.- Factores de forma de radiación en configuraciones de 2 dimensiones

1.- Placas paralelas del mismo ancho



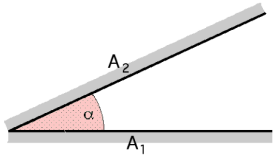
$$F_{A_1 \to A_2} = \sqrt{1 + (\frac{c}{a})^2} - \frac{c}{a}$$

2.- Placas contiguas largas



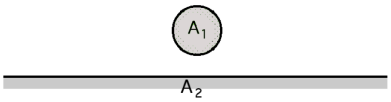
$$F_{A_1 \to A_2} = \frac{1}{2} \{1 + \frac{c}{a} - \sqrt{1 + (\frac{c}{a})^2}\}$$

3.- Cuña simétrica larga



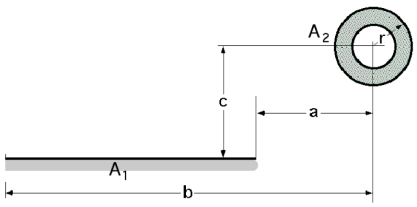
$$F_{A_1 \to A_2} = 1 - sen \frac{\alpha}{2}$$

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



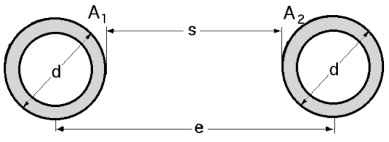
$$F_{A_1 \to A_2} = \frac{1}{2}$$

5.- Cilindro largo paralelo a una placa



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

6.- Cilindros adyacentes largos y paralelos de diámetros iguales



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

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

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 $\begin{cases} - \textit{ Emitida por dicha superficie, } \varepsilon\, E_b \\ - \textit{ Incidente reflejada, } \rho\, G \end{cases}$

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:

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

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:

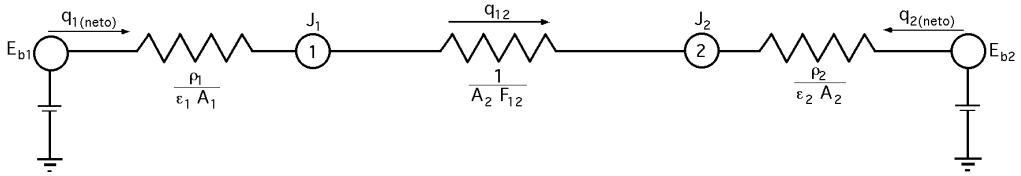


Fig IV.17.- Circuito térmico de dos superficies grises que conforman un recinto

- Dos placas paralelas infinitamente anchas:

$$q_{1(neta)} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{\rho_1}{\varepsilon_1} + 1 + \frac{\rho_2}{\varepsilon_2}} A_1 = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} A_1$$

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

$$q_{1(neta)} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{\rho_2 \, A_1}{\varepsilon_2 \, A_2}} A_1$$

- Un cuerpo pequeño A_1 rodeado por una gran superficie cerrada A_2 :

$$q_{1(neta)} = \varepsilon_1 \, A_1 \, (E_{b1} - E_{b2})$$

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 isotermo, 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:

- Radiación que se emite desde el gas, $\varepsilon_g E_g$

- Energía que llega desde las paredes que la rodean, $(1 - \alpha_g) J_s$

La expresión de la energía incidente es:

$$G_s = \varepsilon_g E_g + (1 - \alpha_g) J_s$$

La energía que abandona la superficie se compone de la $\begin{cases} \text{emisión de radiación directa, } \varepsilon_s E_{bs} \\ \text{radiación incidente reflejada, } (1 - \varepsilon_s) G_s \end{cases}$, por lo que la expresión de la radiosidad es:

$$J_s = \varepsilon_s \, E_{bs} + (1 - \varepsilon_s) G_s$$

La transferencia neta de calor, entre la superficie y los *humos*, es:

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

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

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

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

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

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 absortividad. Un cuerpo negro absorbe toda la energía radiante incidente, de modo que no refleja ni transmite nada de ella por lo que la absortividad 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 2000ºF (1093ºC), 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 $0{,}80 \div 0{,}95$, y pueden considerarse como cuerpos negros. En la Tabla IV.12 se indican valores promedios de emisividades.

Aunque las emisividades dependen de $\begin{cases} - \textit{ la composición de la superficie} \\ - \textit{ su rugosidad} \\ - \textit{ la longitud de onda de la radiación} \end{cases}$, 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, y depende de algunos factores como

- *las condiciones del sustrato citadas*
- *la composición química*
- *la estructura*
- *la porosidad de la capa de deposición*

, por lo que la emisividad aparente se compone de la emisividad combinada de

- *el sustrato*
- *la deposición*

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*
	0,023	*242*	*Pulido*
Óxido cobre	*0,66 a 0,54*	*1470 a 2012*	
Hierro	*0,21*	*392*	*Fundición pulida*
	0,55 a 0,60	*1650 a 1900*	*Chapa lisa*
	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*
	0,66	*70*	*Chapa laminada*
	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*	

Una misma deposición de ceniza sobre superficies diferentes puede facilitar emisividades aparentes muy distintas entre sí; los valores de las emisividades para la ceniza oscilan entre $0,5 \div 0,8$.

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 O_2 y el N_2, 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 CO_2, el SO_2 y el CO. La consideración del vapor de agua y del CO_2 es muy importante en el cálculo 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 hogar.

La energía emitida por una mezcla gaseosa radiante depende de la:

- Temperatura del gas y de las presiones parciales de los constituyentes de la mezcla

- Longitud de onda L del haz, que es función de la geometría y dimensiones del volumen que contiene la 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 de L recomendado es 3,4.

Las Fig IV.18 presentan la emisividad correspondiente al vapor de H_2O y las Fig IV.19 la del CO_2

Para calcular la absortividad 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.

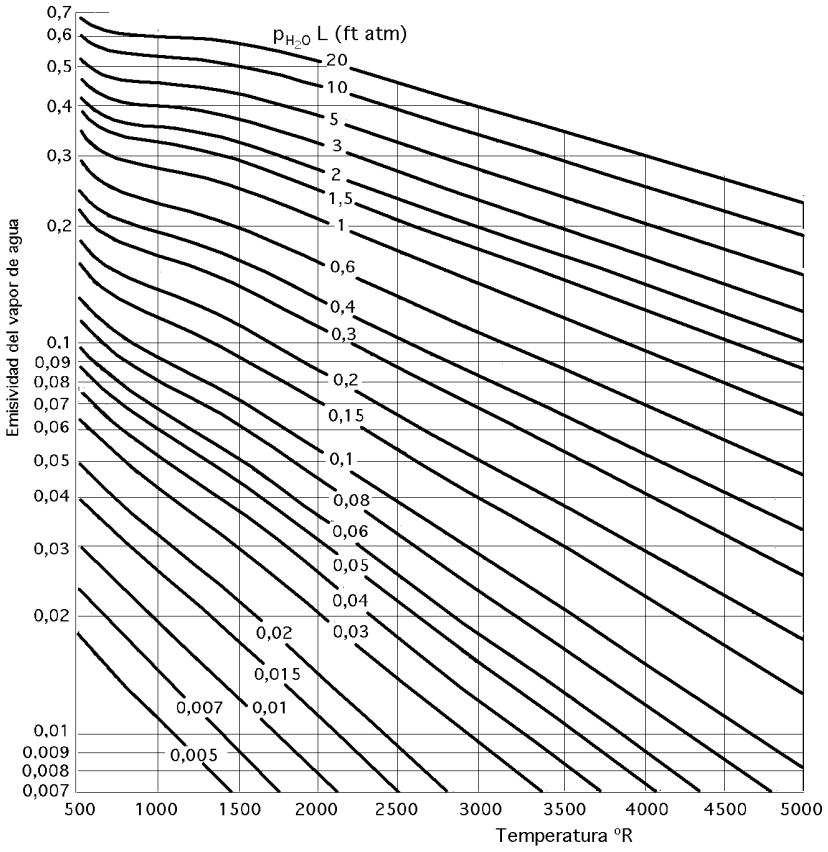


Fig IV.18a.- Emisividad del vapor de agua a la presión total de 1 atm (Höttel) (Unidades inglesas)

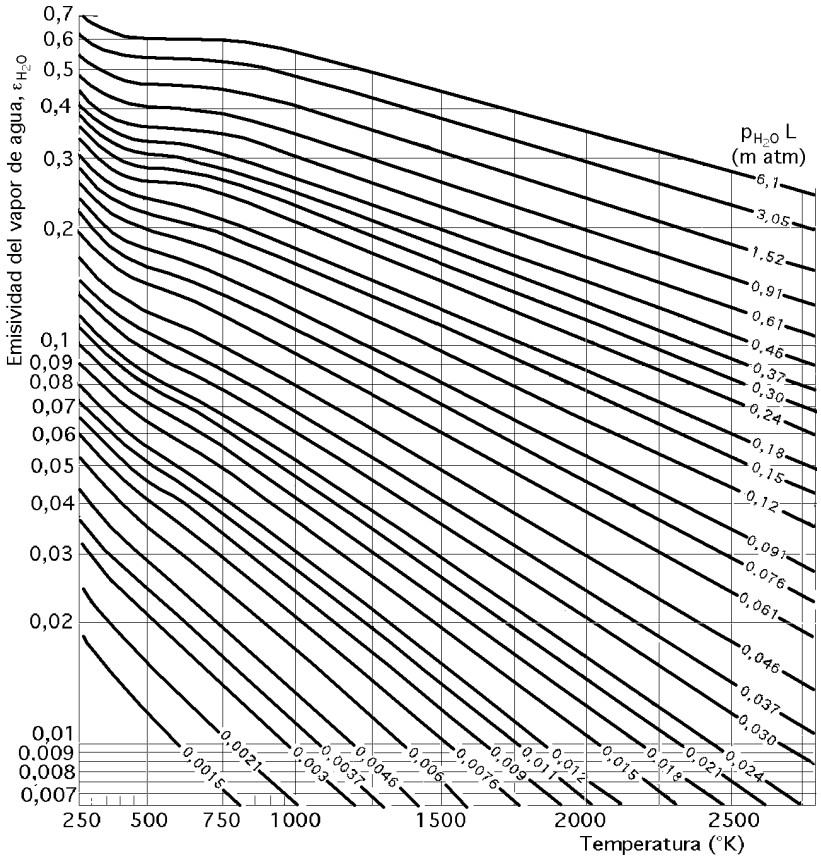


Fig IV.18b.- Emisividad del vapor de agua a la presión total de 1 atm (Höttel) (Unidades S.I.)

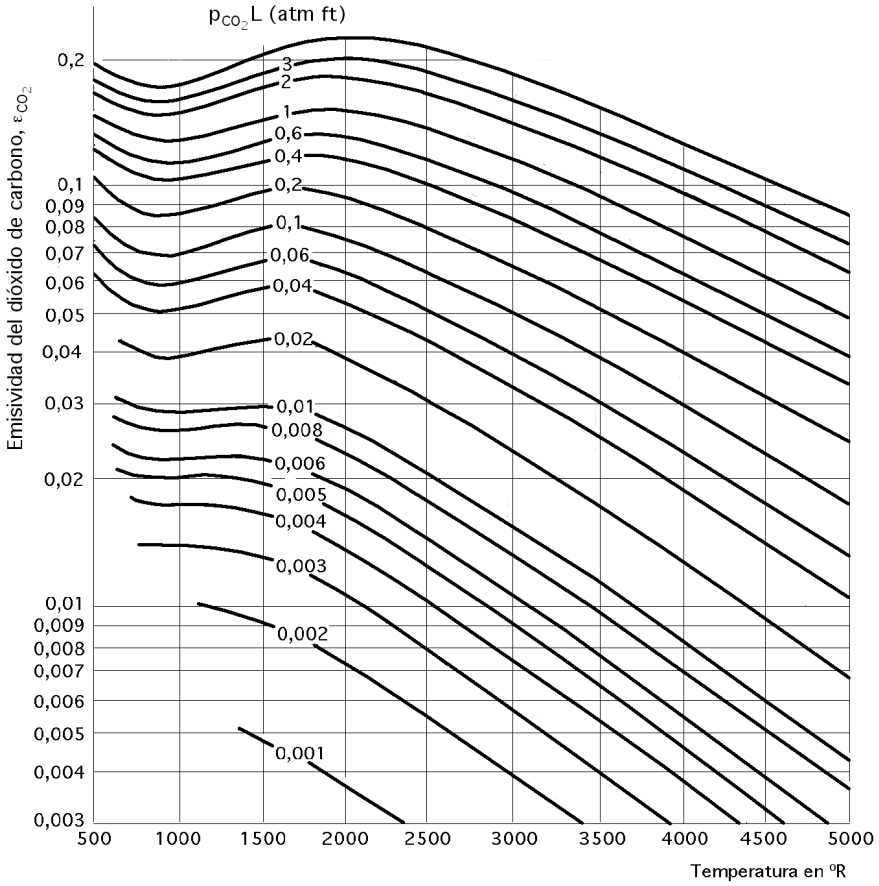


Fig IV.19a.- Emisividad del CO_2 a la presión total de 1 atm (Höttel)

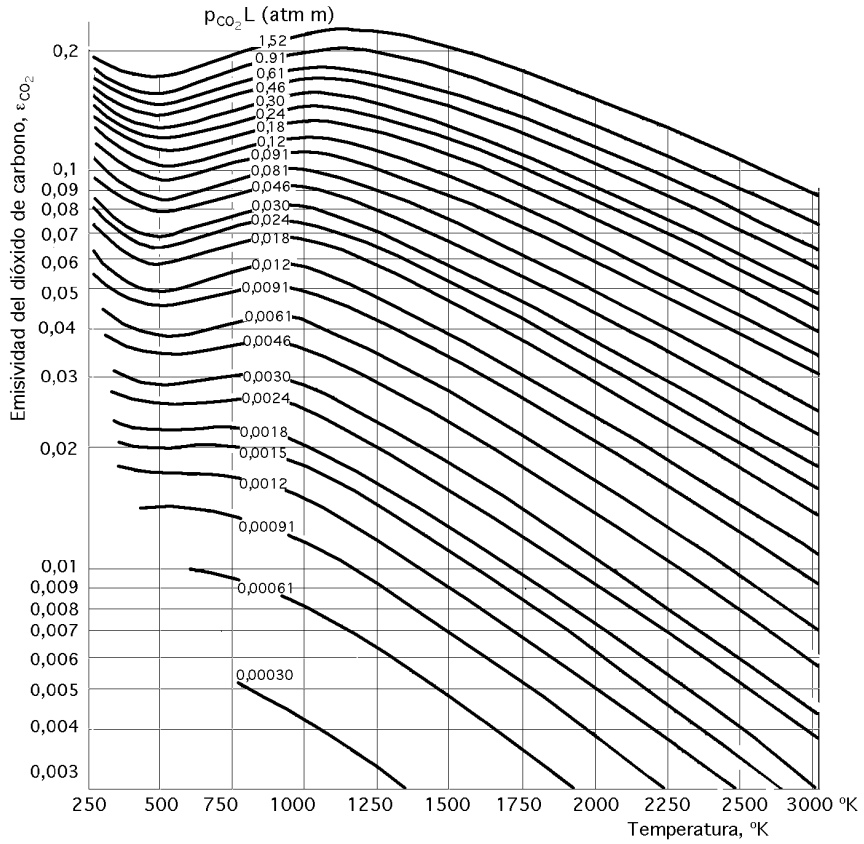


Fig IV.19b.- Emisividad del dióxido de carbono a la presión total de 1 atm (Höttel)

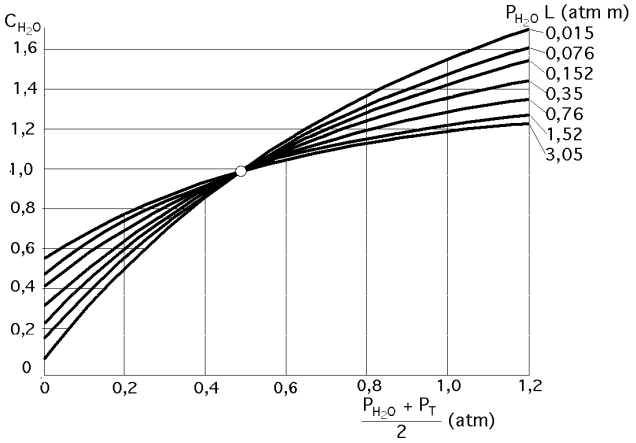


Fig IV.20- Factor de corrección de la emisividad del vapor de H_2O a presiones distintas de 1 atmósfera, (Höttel)

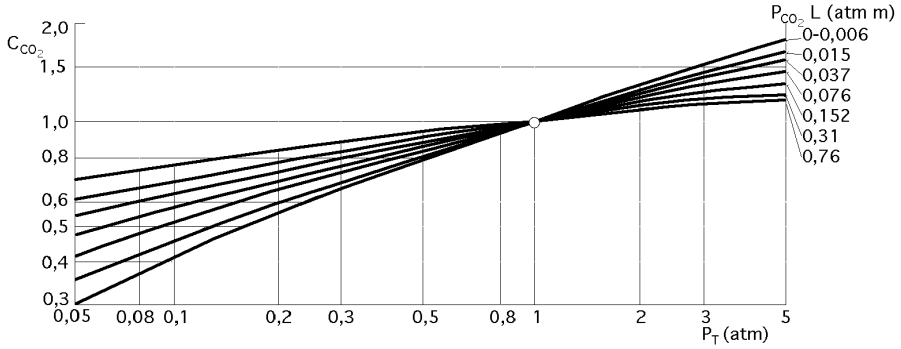


Fig IV.21- Factor de corrección de la emisividad del CO_2 a presiones distintas de 1 atmósfera, (Höttel)

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 = a dos diámetros radiando a la base	*0,60 (Diámetro)*
Cilindro circular recto de altura = a dos diámetros radiando a la superficie cilíndrica	*0,76 (Diámetro)*
Cilindro circular recto de altura = al diámetro, radiando al centro de la base	*Diámetro*
Cilindro circular recto de altura = al diámetro, radiando a toda la superficie	*0,66 (Diámetro)*
Cilindro circular recto de altura = a la mitad del diámetro, radiando al centro de la base	*0,43 (Diámetro)*
Cilindro circular recto de altura = 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 ∞ de tubos al tresbolillo al espacio exterior, Diámetro del tubo = espacio libre	*3,4 (Espacio libre)*
Conjunto ∞ 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 = 2 D)	*3 (S-D)*
Disposición al tresbolillo (Distancia entre centros de los tubos, S = 3 D)	*3,8 (S-D)*
Disposición regular (en línea) S= 2 D	*3,5 (S-D)*

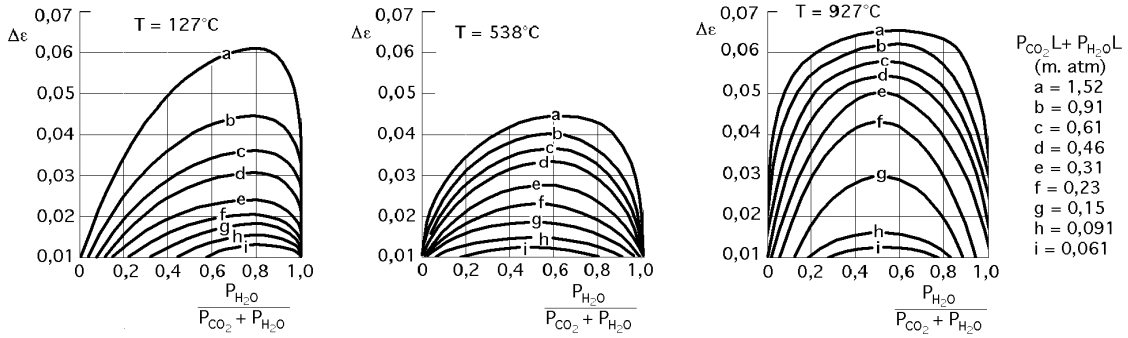


Fig IV.22a.- Factor de corrección Δε de la emisividad de una mezcla de vapor de H_2O y CO_2 (Höttel)

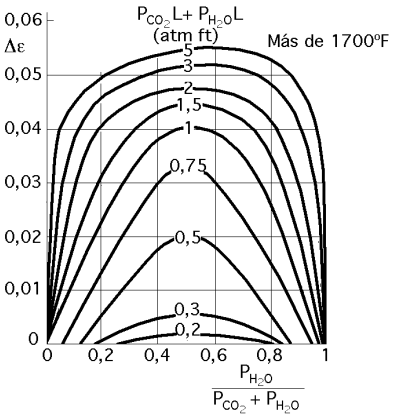


Fig IV.22b.- Factor de corrección Δε de la emisividad de una mezcla de vapor de H_2O y CO_2 (Höttel)

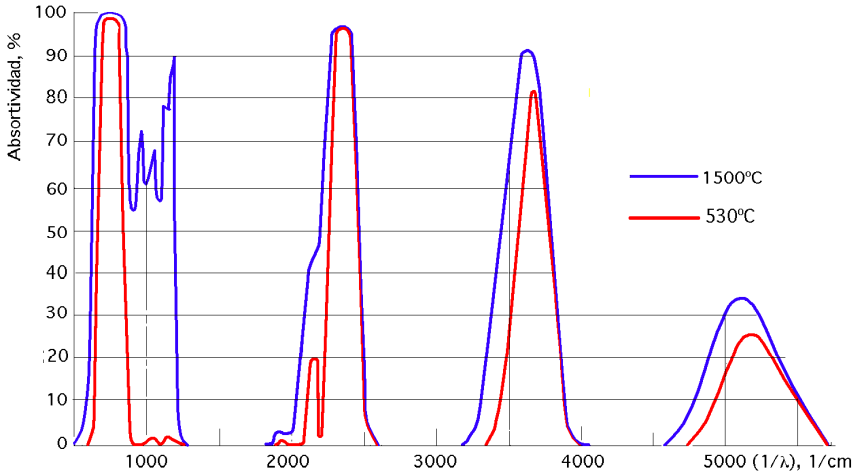


Fig IV.23.- Absortividad espectral del CO_2: $\rho L = 2{,}44\ kg/m^2$

En la Fig IV.20 se presenta el factor de corrección de la emisividad del vapor de H_2O, y en la Fig IV.21 para el CO_2, ambos a presiones distintas de 1 atmósfera, (Höttel)

Cuando el H_2O, y el CO_2 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 Δe que indica la emisión de las bandas de longitud de onda que se superponen.

$$\varepsilon = \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CO_2} - \Delta\varepsilon_{mezcla} = C_{CO_2}\,(\varepsilon_{CO_2})_{P_T=1} + C_{H_2O}\,(\varepsilon_{H_2O})_{P_T=1} - \Delta\varepsilon_{mezcla}$$

en la que $\Delta\varepsilon_{mezcla}$ es un factor de corrección, que incluye 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 $\Delta\varepsilon$ para la mezcla de vapor de H_2O y CO_2 viene representado en las Fig IV.22.

ABSORTIVIDAD DE LOS GASES.- La determinación de la absortividad 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 CO_2 en el que el producto de la densidad ρ del gas por el espesor de la capa de gas L vale $\rho L = 2{,}44\ kg/cm^2$. 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.

Tabla IV.14.- Emisividades normales

METALES	*Estado superficie*	*Temperatura ºC*	*Emisividad ε*
Aluminio	*placa pulida*	*25*	*0,040*
	placa pulida	*200-600*	*0,038-0,06*
	oxidado	*100-500*	*0,20-0,33*
	placa mate	*25*	*0,070*
Antimonio	*pulido*	*37-260*	*0,28-0,31*
Latón	*oxidado*	*200-500*	*0,600*
	pulido	*20-300*	*0,05-0,032*
	placa usada	*50-350*	*0,220*
	mate	*50*	*0,202*
Cromo	*pulido*	*37-1100*	*0,058*
Cobre	*negro oxidado*	*37*	*0,780*
	ligeramente mate	*25*	*0,037*
	pulido	*37-260*	*0,04-0,05*
	oxidado	*80*	*0,018*
Oro	*no pulido*	*20*	*0,470*
	pulido	*37-260*	*0,020*
Hierro	*oxidado*	*100*	*0,740*
	esmerilado	*20*	*0,240*
	pulido	*425-1025*	*0,14-0,38*
	todo oxidado	*20*	*0,69*
	laminado	*925-1100*	*0,87-0,95*
Fundición	*mecanizada*	*22*	*0,44*
	oxidada	*200-600*	*0,64-0,78*
Plomo	*oxidado*	*200*	*0,63*
	oxidado gris	*23*	*0,280*
	pulido	*130-260*	*0,08-0,056*
Magnesio	*pulido*	*37-260*	*0,07-0,13*
	oxidado	*275-825*	*0,55-0,2*
Molibdeno	*para filamentos*	*700-2600*	*0,10-0,20*
	pulido	*150-480*	*0,02-0,05*
Níquel	*pulido*	*37*	*0,170*
	oxidado	*260-540*	*0,37-0,48*
	pulido	*100-260*	*0,045-0,07*
	oxidado	*37-260*	*0,04-0,06*
Platino	*oxidado*	*260-540*	*0,06-0,1*
	placa pulida	*260-540*	*0,06-0,1*
	filamento	*26-1225*	*0,04-0,19*
Plata	*pulida, pura*	*225-625*	*0,02-0,03*
	pulida	*37-370*	*0,02-0,03*
Acero	*pulido*	*23*	*0,160*
Estaño	*brillante*	*225-265*	*0,02-0,03*
	pulido	*37-370*	*0,070*
Tungsteno	*para filamentos*	*3300*	*0,390*
	filamento envejecido	*25-3300*	*0,03-0,35*
Cinc	*oxidado*	*20*	*0,250*
	pulido	*225-325*	*0,05-0,06*

NO METALES	*Estado superficie*	*Temperatura ºC*	*Emisividad ε*
Amianto	*en cartón*	*37*	*0,960*
	en papel	*37*	*0,930*
Ladrillo	*rugoso*	*1000*	*0,380*
	rojo, rugoso	*20*	*0,930*
	gris, satinado	*1100*	*0,750*
	sílice	*540*	*0,800*
Carbón	*filamento*	*1050-1400*	*0,526*
	carbonilla bujías	*95-270*	*0,953*
	negro de humo	*20*	*0,930*
Cerámica	*alfarería, satinado*	*20*	*0,900*
	porcelana	*22*	*0,920*
	refractaria, negra	*93*	*0,940*
Arcilla	*caldeada*	*70*	*91*
Hormigón	*rugoso*	*37*	*0,94*
Vidrio	*liso*	*22*	*0,940*
	rugoso	*260-530*	*0,95-0,85*
Hielo	*liso*	*0*	*0,966*
	rugoso	*0*	*0,985*
Mármol	*grano fino pulido*	*22*	*0,93*
Mica		*37*	*0,75*
Mampostería	*emplastecida*	*0*	*0,930*
Papel	*ordinario*	*20*	*0,8-0,9*
	amianto	*20*	*0,950*
	alquitranado	*20*	*0,910*
	ordinario	*95*	*0,920*
Yeso blanco	*rugosa*	*20*	*0,930*
Porcelana	*vidriada*	*20*	*0,930*
Cuarzo fundido	*rugoso*	*20*	*0,930*
Goma blanda	*gris*	*25*	*0,860*
Goma dura	*negra rugosa*	*25*	*0,950*
Madera de haya	*láminas*	*25*	*0,935*
Madera de encina	*láminas*	*25*	*0,885*
Tierra		*37*	*0,950*
PINTURAS			
Aluminio	*bronce de*	*100*	*0,300*
	esmaltado rugoso	*20*	*0,390*
	Al 10%, laca 22%	*100*	*0,520*
	Al 26%, laca 27%	*100*	*0,300*
Laca	*blanca*	*100*	*0,925*
	negra mate	*80*	*0,970*
Aceite	*pintura*	*20*	*0,89-0,97*
Aceite pintura	*todos los colores*	*100*	*0,92-0,96*
Baquelita	*esmaltada*	*80*	*0,935*
Esmalte	*blanco rugoso*	*20*	*0,900*
	negro brillante	*25*	*0,876*
Pintura al aceite		*1-200*	*0,885*
Imprimación minio		*20-1100*	*0,930*

DETERMINACIÓN PRÁCTICA DE LA EMISIVIDAD Y ABSORTIVIDAD

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 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.14 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 absortividad α es diferente de ε y se calcula también con la Fig IV.19 utilizando el mismo valor de $p\ L$ que el empleado para determinar ε pero tomando como temperatura la de la superficie del sólido $T_{sól}$ (que se comporta como un cuerpo negro) $\begin{cases} emite\ radiación\ (si\ el\ gas\ está\ más\ frío) \\ recibe\ radiación\ (si\ el\ gas\ está\ más\ caliente) \end{cases}$

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

$$\alpha_{CO_2}\Big|_{T_{sól}} = C_{CO_2}\,\varepsilon'_{CO_2}\Big|_{T_{sól}}\ (\frac{T_{CO_2}}{T_{sólido}})^{0,65}$$

en la que el valor de $\begin{cases} C_{CO_2} & se\ toma\ de\ la\ Fig\ IV.19 \\ \varepsilon'_{CO_2}\Big|_{T_{sól}} & se\ toma\ de\ la\ Fig\ IV.19\ a\ la\ temperatura\ del\ sólido \end{cases}$, 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:

$$a)\ p = 0{,}12\ atm\ ;\ L = 1\ m\ ;\ p\,L = 0{,}12 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} T_{gas} = 1000ºC\ ;\ \varepsilon = 0{,}12 \\ T_{sól} = 600ºC\ ;\ \alpha = 0{,}14 \end{cases}$$

$$b)\ p = 0,\ 12\ atm\ ;\ L = 1\ m\ ;\ T_{gas} = 600ºC\ ;\ T_{sól} = 1000ºC\ ;\ p\,L = 0,\ 12\ ;\ \varepsilon = 0{,}14\ ;\ \alpha = 0{,}12$$

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 absortividad del H_2O se calcula mediante la ecuación:

$$\alpha_{H_2O}\Big|_{T_{sól}} = C_{H_2O}\ \varepsilon'_{H_2O}\Big|_{T_{sól}}\ (\frac{T_{H_2O}}{T_{sólido}})^{0,45}$$

en la que el valor de C_{H_2O} se toma de la Fig IV.20, y el de $\varepsilon'_{H_2O}\Big|_{T_{sól}}$ 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} = 1025ºC y $T_{sól}$ = 750ºC, resulta:

$$p\,L = 0{,}122\ ;\ \ \varepsilon = 0{,}105\ ;\ \ \alpha = 0{,}14\ ;\ \ C_{H_2O} = 1{,}07\ \Rightarrow\ \begin{cases}\varepsilon = 0{,}105 \times 1{,}07 = 0{,}112\\ \alpha = 0{,}14 \times 1{,}07 = 0{,}15\end{cases}$$

d) Humos.- Los humos son el resultado de la combustión y contienen anhidrido carbónico, vapor de agua, nitrógeno y en el caso mas general O_2, óxido de C y un poco de anhidrido 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 absortividad 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 Δα = Δε se obtiene de la Fig IV.22 a la temperatura $T_{sól}$.

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 Δε 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 $\dfrac{p_{H_2O}}{p_{H_2O} + p_{CO_2}}$ mientras que $(p_{H_2O}L + p_{CO_2}L)$ figura como un parámetro.

Tabla IV.15a.- Absortividad en superficies metálicas

METALES	*Estado superficial*	*Absortividad*	***METALES***	*Estado superficial*	*Absortividad*
Aluminio	*pulido*	*0,10*	*Magnesio*	*pulido*	*0,19*
	anodizado	*0,14*		*oxidado*	*0,55-0,2*
	en placas	*0,15*	*Níquel*	*muy pulido*	*0,15*
Bronce	*pulido*	*0,3-0,5*		*pulido*	*0,36*
	mate	*0,4-0,65*		*oxidado*	*0,79*
Cromo	*oxidado*	*0,41*	*Platino*	*brillante*	*0,31*
Cobre	*muy pulido*	*0,18*	*Plata*	*muy pulida*	*0,07*
	oxidado	*0,25*		*pulida*	*0,13*
	decolorada por exposición	*0,64*	*Acero inoxidable*	*pulido*	*0,33*
Oro		*0,21*		*oxidado*	*0,52*
Hierro	*galvanizado pulido*	*0,34*	*Tungsteno*	*muy pulido*	*0,37*
	galvanizado nuevo	*0,64*	*Cinc*	*muy pulido*	*0,34*
	mate, oxidado	*0,96*		*pulido*	*0,55*

Tabla IV.15a.- Absortividad en superficies no metálicas

NO METALES	*Estado superficial*	*Absortividad*	***NO METALES***	*Estado superficial*	*Absortividad*
Asfalto pavimento		*0,85*	*Hormigón*	*descolorido*	*0,65*
	libre de polvo	*0,93*		*marrón*	*0,85*
	nuevo	*0,93*		*sucio, oscuro*	*0,71*
Ladrillo	*barnizado blanco*	*0,26*	*Granito*		*0,45*
	arcilla, barnizado crema	*0,36*	*Grasa*		*0,75-0,80*
	rojo	*0,70*			*0,29*
	rojo satinado oscuro	*0,77*	*Oxido de magnesio*		*0,15*
Mármol	*sin pulir*	*0,47*	*Pintura aceite*	*plomo blanco*	*0,24-0,26*
	blanco	*0,44*		*crema clara*	*0,30*
	con fisuras	*0,60*		*verde claro*	*0,50*
Papel	*aglomerado*	*0,25*		*gris claro*	*0,75*
	blanco	*0,28*	*Pintura aluminio*		*0,55*
Arena		*0,76*	*Pizarra*	*gris verdoso*	*0,88*
Serrín de madera		*0,75*	*Pizarra*	*gris plateado*	*0,79*
Nieve	*limpia*	*0,2-0,35*	*Pizarra*	*gris azulado*	*0,85*
Hollín, carbón		*0,95*			

En el ejemplo anterior de los humos con $\begin{cases} 12{,}2\%\ de\ CO_2 \\ 12{,}2\%\ de\ vapor\ de\ agua \end{cases}$ se tenía: $\begin{cases} \varepsilon_{CO_2} = 0{,}125 \\ \varepsilon_{H_2O} = 0{,}112 \end{cases}$

Se considera el diagrama por encima de 927ºC:

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

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

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

El calor intercambiado es:

$$q_{1(neta)} = \sigma \{\varepsilon_{gas} T_{gas}^4 - \alpha_{gas} T_{sól}^4\}$$

que indica que el gas emite y absorbe una parte de la radiación devuelta, al no ser transparente a la radiación.

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 $\begin{cases} \text{- como consecuencia del recalentamiento de las partículas de combustible no quemadas} \\ \text{- o por la formación de C por craking} \\ \text{- o como consecuencia de la presencia de cenizas, etc.} \end{cases}$

Para *llamas de carbón pulverizado*, se debe efectuar un proceso meticuloso 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 de 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 ésto 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 $\varepsilon_F = \varepsilon_{gases}$

Para llamas de mazut, se toma:

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

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

siendo las escalas de Ringelmann unas placas cuadriculadas 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 $\varepsilon_{gas} = 0{,}95$ 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:

$$\int_{E_0}^{E} \frac{dE}{E} = - \int_0^L K\, dL \quad \Rightarrow \quad ln\, \frac{E}{E_0} = - K L \;\; ; \;\; \frac{E}{E_0} = e^{-KL}$$

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:

$$e_\lambda = 1 - e^{- C L f(\lambda)}$$

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.

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

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

con:
- *L recorrido de la radiación*
- *Z es el tanto por uno de sustancias volátiles y de humedad contenidas en el carbón*
- G_h *es el peso de los productos de la combustión por unidad de peso kg/kg*
- d_0 *es el diámetro de las partículas de carbón pulverizado antes de su combustión*
- γ_0 *y* γ *son los pesos específicos antes y después de la crakización*

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* $\alpha_F = \varepsilon_F = 0{,}8$ *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.m^3 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

- 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}

- La llama es gris: $\alpha_F = \varepsilon_F = \dfrac{\varepsilon_{gas} - \alpha_{gas} \left(\dfrac{T_{Receptor}}{T_{gas}}\right)^4}{1 - \left(\dfrac{T_{Receptor}}{T_{gas}}\right)^4}$

- 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:

$$q_{1(neta)} = A_R F^*_{gas\text{-}R} \{E_{b(gas)} - E_{b(Recep)}\} + h_{gas\text{-}R}\ A_R (T_{gas} - T_{Recep}) + U_{gas\text{-}ext}\ A_{ext} (T_{gas} - T_{ext})$$

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.

$$\text{El valor de, } F^*_{gas\text{-}R} = \frac{1}{\dfrac{1}{F_{gas\text{-}R}} + \dfrac{1}{\varepsilon_R} - 1}\ , \quad \text{con, } F_{gas\text{-}R} = 1 + \frac{\dfrac{A_R}{A_{gas}}}{1 + \dfrac{\varepsilon_{gas}}{(1 - \varepsilon_{gas})\, F_{gas\text{-}R}}}$$

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

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 $\varepsilon_g = 0{,}9$, mediante la expresión:

$$(F_{gas\text{-}R})_{\varepsilon_R} = F_{\varepsilon_R = 0{,}9} \; \frac{\varepsilon_R}{0{,}9} \; \frac{\varepsilon_{gas}\,(1 - 0{,}9) + 0{,}9}{e_{gas}\,(1 - \varepsilon_R) + \varepsilon_R}$$

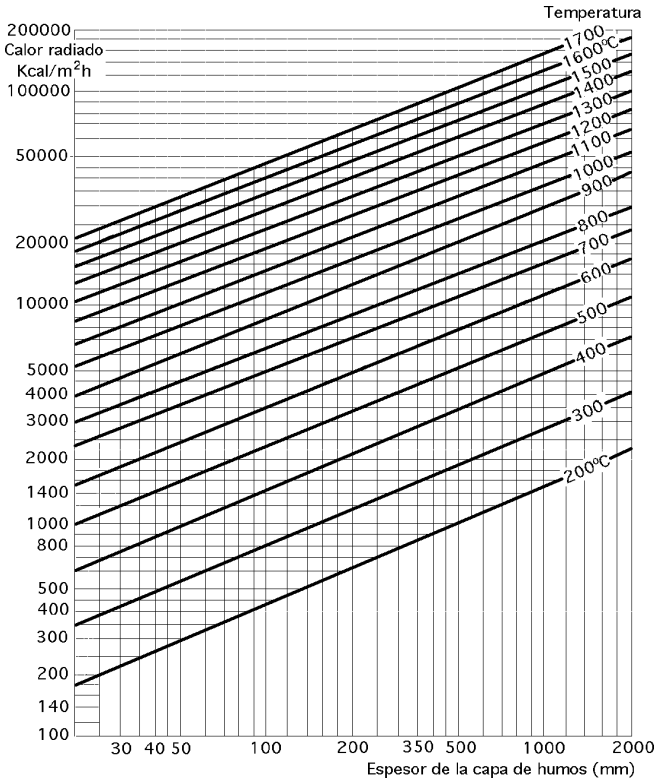


Fig IV.24.- Humos de gas de horno de cok

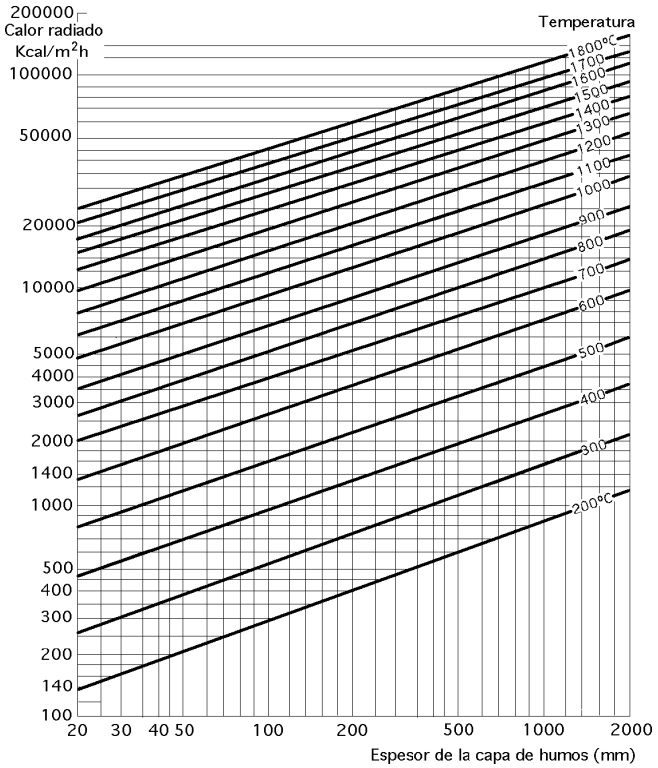


Fig IV.25.- Humos de gas de gasógeno

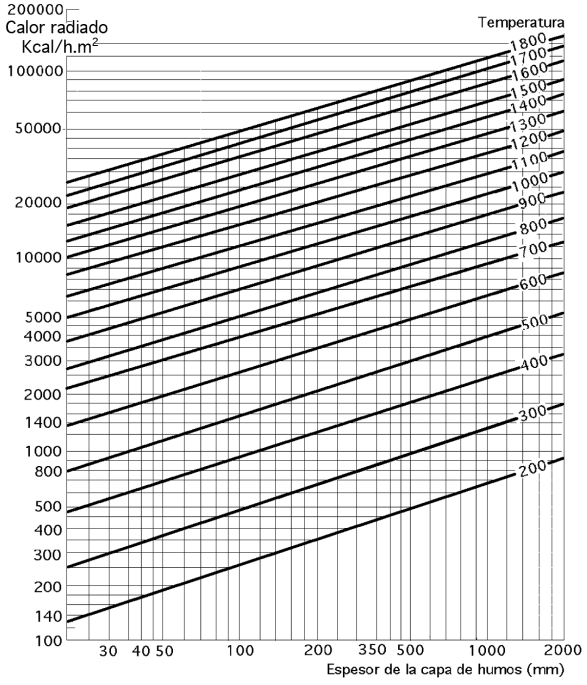


Fig IV.26.- Humos de gas de horno alto

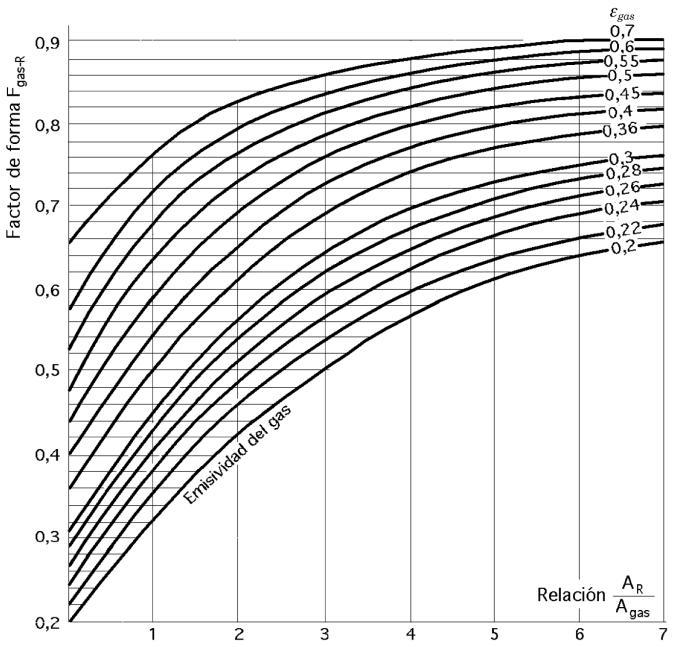


Fig IV.27.- Factor de forma $F_{gas\text{-}R}$ relativo a la radiación entre la llama y el receptor

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 $\begin{cases} \text{- espesor} = 0{,}25'' \ (6{,}3\ mm) \\ \text{- área superficial de las caras } i = 1\ ft^2\ (0{,}0929 m^2) \\ \text{- gradiente de temperaturas } \Delta T = 25°F\ (13{,}9°C) \end{cases}$, el flujo de calor a través de la placa considerada, de k = 30 Btu/(ft.h.ºF), es:

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

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 ft^2 (55,75 m^2) con gases a 1080ºF (582,2ºC) en su lado interno, y temperatura ambiente de 80ºF (26,7ºC) 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* $k_{aisl} = 0{,}042\ Btu/ft.h°K$

- Espesores: $\Delta x_{ref} = 4''\ (10{,}16\ cm)$, $\Delta x_{acero} = 0{,}25''\ (0{,}635\ cm)$, $\Delta x_{aisl} = 3''\ (7{,}62\ cm)$

- Coeficientes de transferencia de calor por convección, en cada una de las caras de la superficie considerada: $\begin{cases} interior \rightarrow (h_{cv})_{int} = 5{,}0\ Btu/ft^2\,h°F \\ exterior \rightarrow (h_{cv})_{ext} = 2{,}0\ Btu/ft^2\,h°F \end{cases}$

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:

$$h_r = 4\,\sigma\,\varepsilon\,F\,\left(\frac{T_g + T_s}{2}\right)^3 = 4\,\sigma\,\varepsilon\,F\,T_g^3 = 4 \times 0{,}1713.10^{-9} \times (1080 + 460)^3 = 25\ Btu/ft^2\,h°F$$

$$R_{eq}A = \frac{\frac{1}{5}\,\frac{1}{25}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{25}} + \frac{\frac{4}{12}}{0{,}09} + \frac{\frac{0{,}25}{12}}{25} + \frac{\frac{3}{12}}{0{,}042} + \frac{1}{2} \quad 0{,}033 + 3{,}7 + 0{,}000833 + 5{,}95 + 0{,}5 = 10{,}18\ \frac{ft^2\,h°F}{Btu}$$

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:

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

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:

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

$$T_2 = T_1 - \frac{q}{A}(RA)_4 = 1077 - \frac{58939}{600} \times 3{,}7 = 713^oF$$

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

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

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

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, deberían elegirse nuevas conductividades utilizando la temperatura media para cada material.

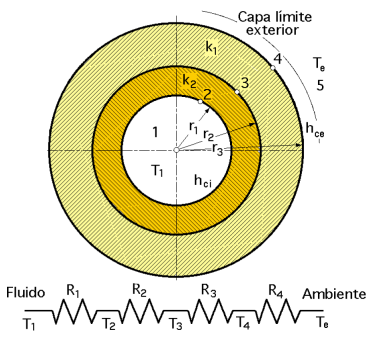


Fig IV.28.- Flujo de calor en tubería aislada térmicamente

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 una 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:

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

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 Btu/ft.hºF, y se recubre con una capa de aislamiento de 0,75" que tiene una k = 0,10 Btu/ft.hºF. La tubería transporta un fluido a 300ºF y está en un medio ambiente a 80ºF.

Con un coeficiente de transferencia de calor de 50 Btu/ft²hºF para el interior y de 4 Btu/ft²hºF para el lado exterior, la resistencia térmica por unidad de longitud es:

$$R_{eq} = \frac{1}{50 \cdot 2\ \pi\ \frac{3,07/2}{12} x\ 1} + \frac{ln\ \frac{3,50}{3,07}}{2\ \pi\ x\ 25\ x\ 1} + \frac{ln\ \frac{5}{3,5}}{2\ \pi\ x\ 0,10\ x\ 1} + \frac{1}{4\ x\ 2\ \pi\ \frac{5/2}{12} \cdot 1} =$$

$$= 0,0249 + 0,000834 + 0,568 + 0,191 = 0,785\ (ft\ h\ ºF/Btu)$$

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

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

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 240ºF. Se supone que el termopar indica una temperatura de 540ºF y que el coeficiente de transferencia de calor *termopar-gas*, es de 20 Btu/ft²hºF.

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 convección desde el gas hacia el termopar.

El flujo de calor entre el termopar y la cavidad es:

$$\frac{q}{A} = 0,8 x (0,173.10^{-8}) x \{(540 + 460)^4 - (240 + 460)^4\} = 1041,9\ \frac{Btu}{ft^2\ h}$$

siendo la temperatura real del gas (aire comburente):

$$T_g = \frac{q/A}{h_c} + T_1 = \frac{1041,9}{20} + 540 = 592ºF$$

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 1040ºF y 940ºF, 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:

$$q_{12} = A_1\ F_{12}\ \sigma\, (T_1^4 - T_2^4) = 50 \times 0{,}125 \times (0{,}173.10^{-8})\ \{(1040+460)^4 - (940+460)^4\} = 13078\ \frac{Btu}{h}$$

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:

$$q_{sup\text{-}gas} = J - G = \frac{A_s\, (\varepsilon_s \varepsilon_g E_{bg} - \varepsilon_s \alpha_g E_{bs})}{1 - (1 - \alpha_g)(1 - \varepsilon_s)}$$

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

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

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 carac-

terística 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:

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

Si se considera un volumen de hogar de 160.000 ft^3, con un área superficial para la transferencia de calor de 19860 ft^2, por el mismo pasan los gases de combustión a 2540ºF estando las paredes del hogar a 1040ºF.

Los gases de la combustión, a 1 atm, están compuestos por: $\begin{cases} \text{- dióxido de carbono } (CO_2)\text{, 10 \%} \\ \text{- vapor de agua } (H_2O)\text{, 5 \%} \\ \text{- nitrógeno } (N_2)\text{, 85 \%} \end{cases}$

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 CO_2 se calculan a la presión de 1 atmósfera en la forma:

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

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

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

El cálculo de la absortividad a 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 e 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* H_2O $\Rightarrow$ $C_{H_2O} = p_{H_2O}\, L\, \dfrac{T_{sól}}{T_{H_2O}} = 0{,}05 \times 29{,}0 \times \dfrac{1040 + 460}{2540 + 460} = 0{,}73$

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

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.

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*

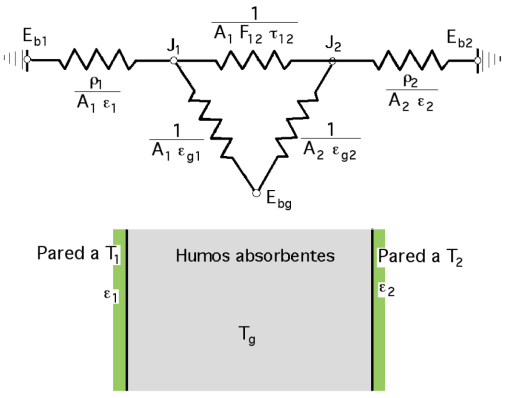


Fig IV.29.- Radiación en una cavidad

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 $\varepsilon_{12} = 1$.

Si el valor de la transparencia es nulo $\varepsilon_{12} = 0$, 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:

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

La resolución del circuito de la Fig IV.29 se obtiene por aplicación de las leyes de Kirchoff, en los nudos J_1 y J_2 .

Las ecuaciones son:

$$\frac{E_{b1} - J_1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 \, A_1}} + \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_1 \, F_{12} \, \tau_{12}}} + \frac{E_{b\,gas} - J_1}{\frac{1}{A_1 \, \varepsilon_{g1}}} = 0$$

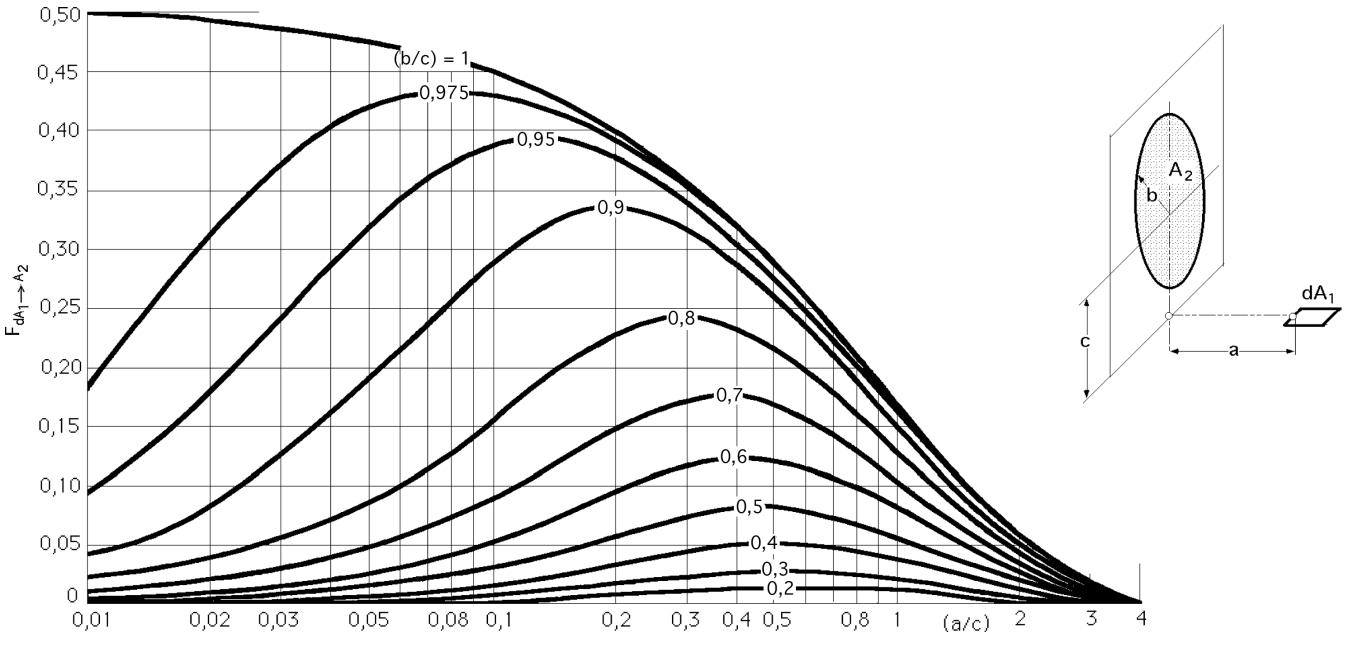
$$\frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 \, A_2}} + \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 \, F_{12} \, \tau_{12}}} + \frac{E_{b\,gas} - J_2}{\frac{1}{A_2 \, \varepsilon_{g2}}} = 0$$

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

FACTORES DE FORMA DE RADIACIÓN *(Configuraciones en 3 dimensiones)*

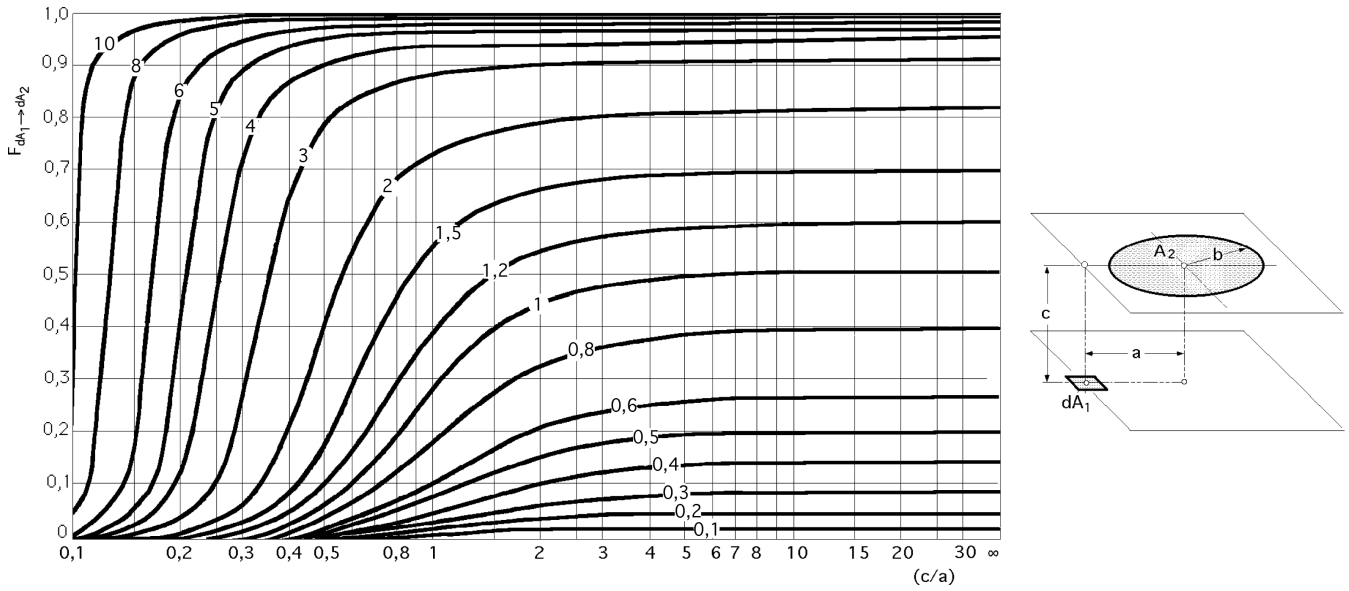
1.- Superficie elemental dA_1 y disco plano A_2 perpendicular al plano que contiene a dA_1

$$X = \frac{a}{c} \;\; ; \;\; Y = \frac{b}{c} \;\; ; \;\; F_{dA_1 \to A_2} = \frac{X}{2} \left(\frac{1 + X^2 + Y^2}{\sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \, Y^2}} - 1 \right)$$



2.- Superficie elemental dA_1 y disco plano A_2 paralelo al plano que contiene a dA_1

$$X = \frac{c}{a} \;\; ; \;\; Y = \frac{b}{c} \;\; ; \;\; Z = 1 + (1 + Y^2) X^2 \;\; ; \;\; F_{dA_1 \to A_2} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Z - 2 X^2 Y^2}{\sqrt{Z^2 - 4 Y^2 X^2}}\right)$$

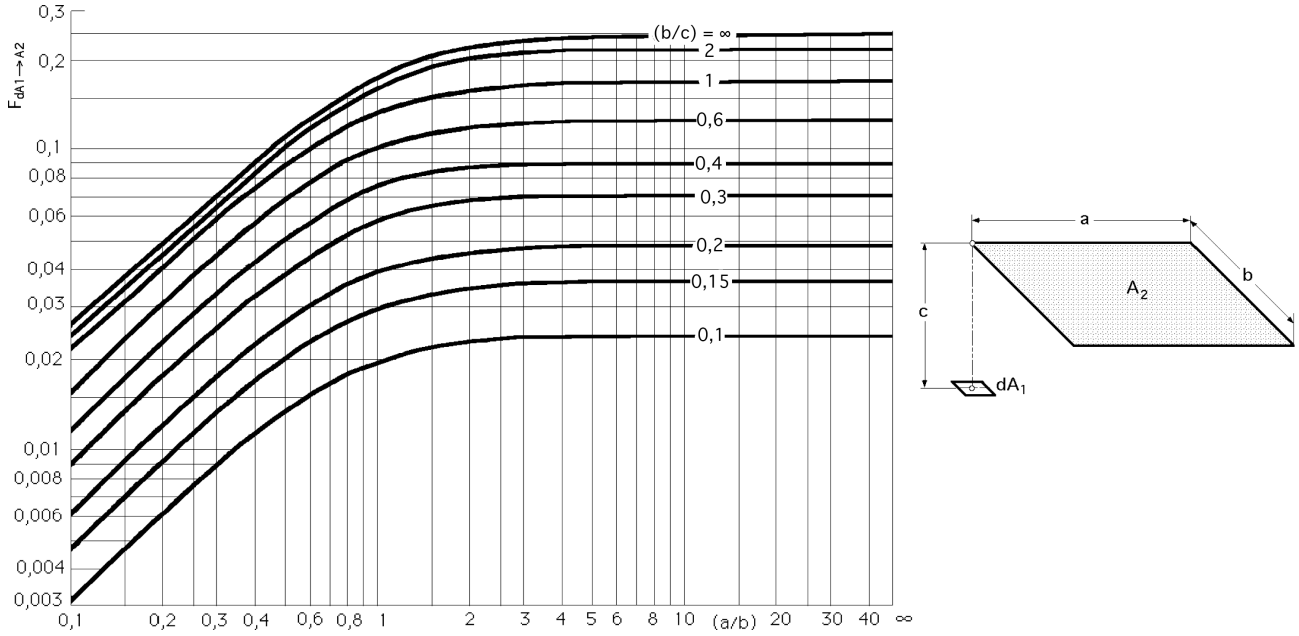


3.- Superficie elemental dA_1 paralela a un rectángulo A_2

Uno de los ángulos del rectángulo A_2 se encuentra en la normal a dA_1

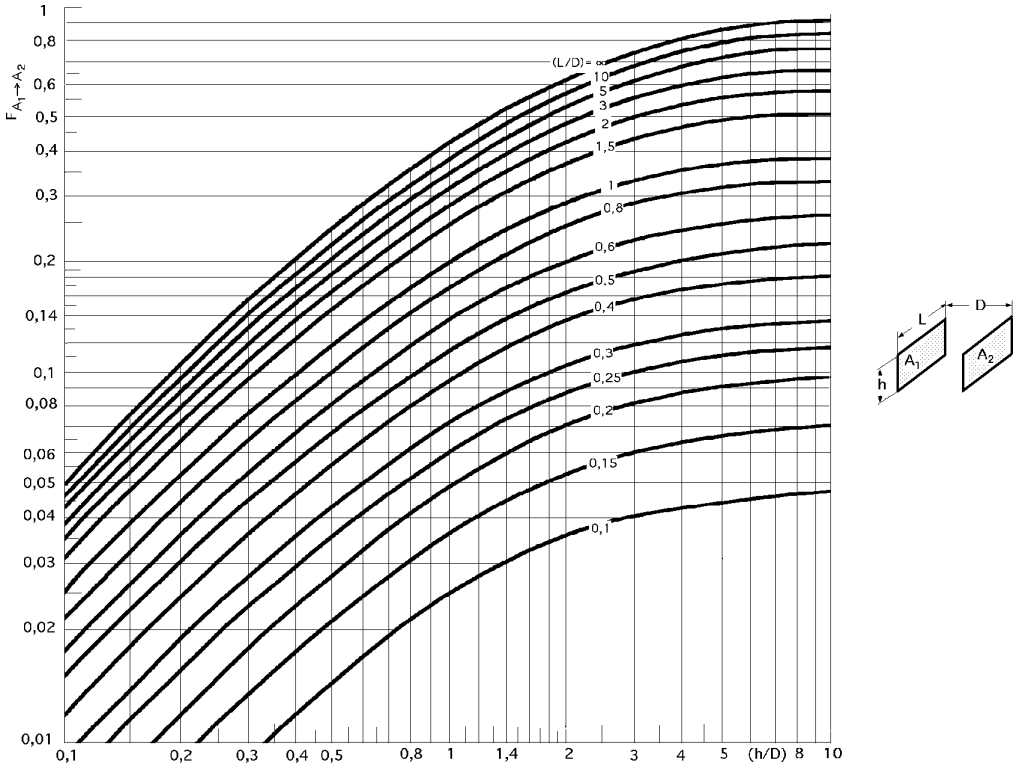
$$X = \frac{c}{a} \;\; ; \;\; Y = \frac{b}{c} \;\; ; \;\; F_{dA_1 \to A_2} = \frac{1}{2\,\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1 + X^2}} \; arc\,tg \; \frac{Y}{\sqrt{1 + X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1 + Y^2}} \; arc\,tg \; \frac{X}{\sqrt{1 + Y^2}} \right)$$

$$F_{dA_1 \to A_2} = \frac{1}{2\,\pi} \left(\frac{a}{\sqrt{b^2 + c^2}} \; arc\,sen \; \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + c^2}} \; arc\,sen \; \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \right)$$



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

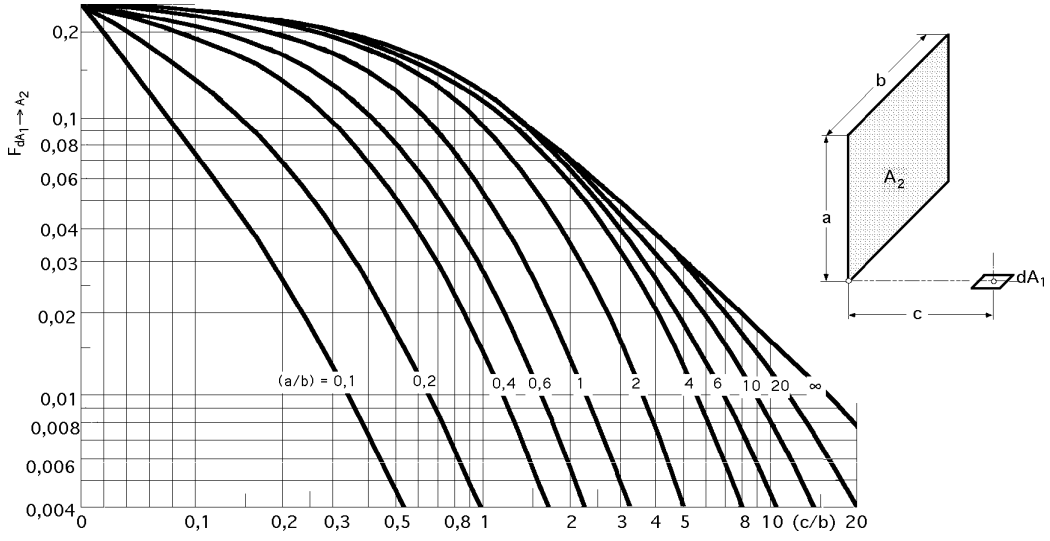
$$F_{A_1 \to A_2} = \frac{2}{\pi\, X\, Y} \left(\ln \sqrt{\frac{(1+X^2)\,(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2}} + Y\sqrt{1+X^2}\ arc\ tg\ \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + X\sqrt{1+Y^2}\ arc\ tg\ \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} - Y\ arc\ tg\ Y - X\ arc\ tg\ X \right)$$



5.- Superficie elemental dA_1 *perpendicular a un rectángulo* A_2

Uno de los ángulos del rectángulo A_2 *se encuentra en línea con* dA_1

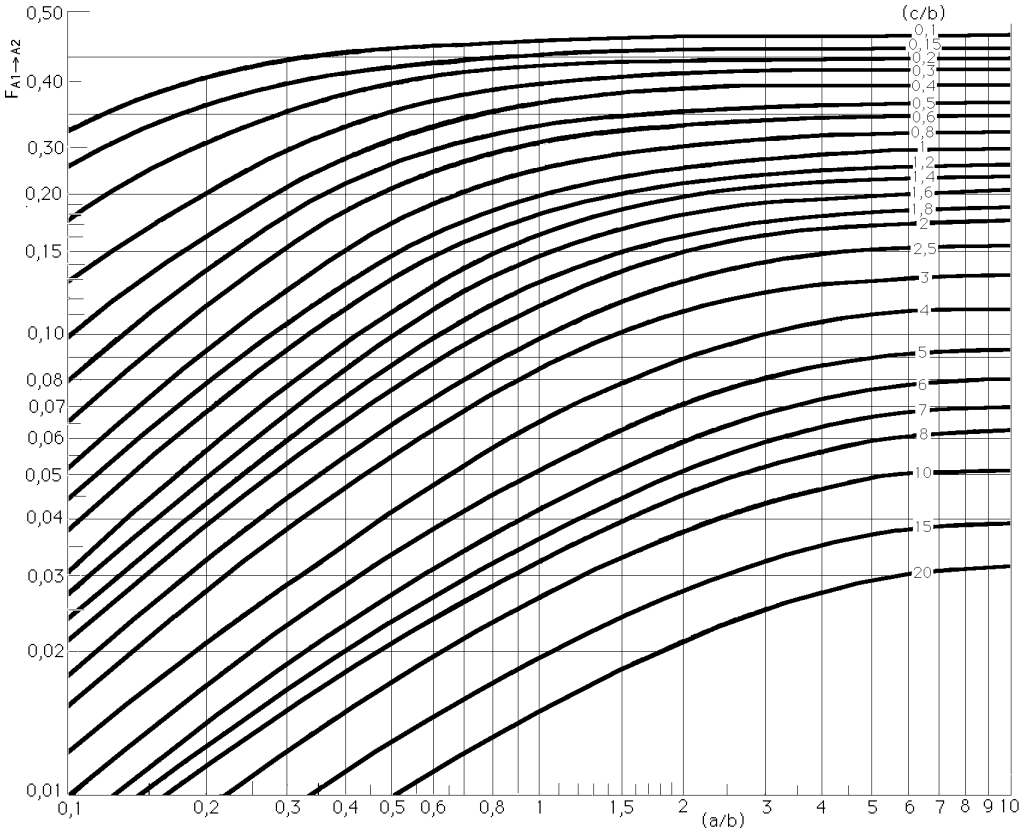
$$X = \frac{a}{b} \quad ; \quad Y = \frac{c}{b} \quad ; \quad A = \frac{1}{\sqrt{X^2+Y^2}} \quad ; \quad F_{dA_1 \to A_2} = \frac{1}{2\,\pi} \left(arc\ tg\ \frac{1}{Y} - A\ Y\ arc\ tg\ A \right)$$

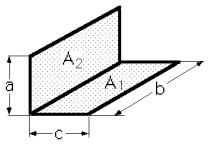


6.- Dos rectángulos con una arista común formando un ángulo de 90º

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

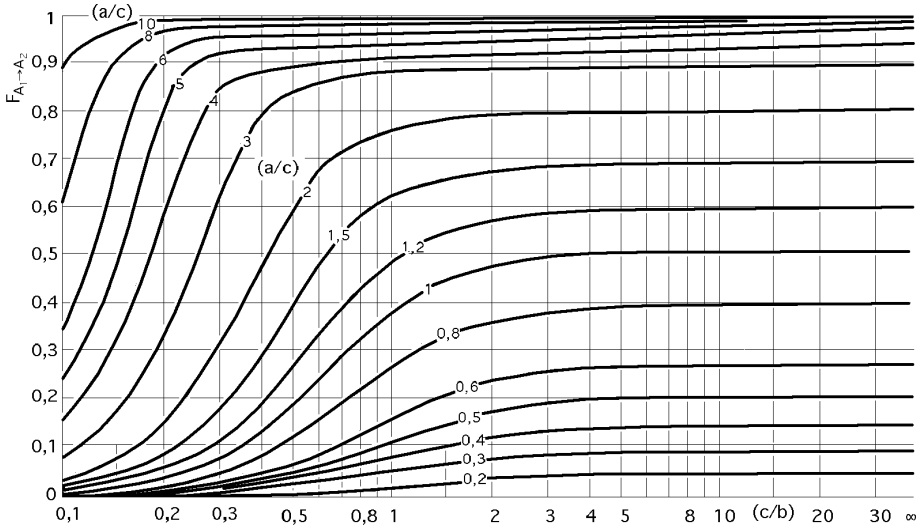
$$F_{A_1 \to A_2} = \frac{1}{\pi Y} \left[X \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{X} + Y \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{Y} - Z \operatorname{arc\,tg} \frac{1}{Z} + \frac{1}{4} \ln \left\{ \frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+Z^2} \left(\frac{X^2(1+Z^2)}{Z^2(1+X^2)} \right)^{X^2} \left(\frac{Y^2(1+Z^2)}{Z^2(1+Y^2)} \right)^{Y^2}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

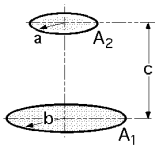




7.- Superficies circulares planas con una normal central común

$$X = \frac{a}{c} \quad ; \quad Y = \frac{c}{b} \quad ; \quad Z = 1 + (1 + X^2)\, Y^2 \quad ; \quad F_{A_1 \to A_2} = \frac{1}{2} \left(Z - \sqrt{Z^2 - 4 \frac{a^2}{b^2}} \right)$$





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

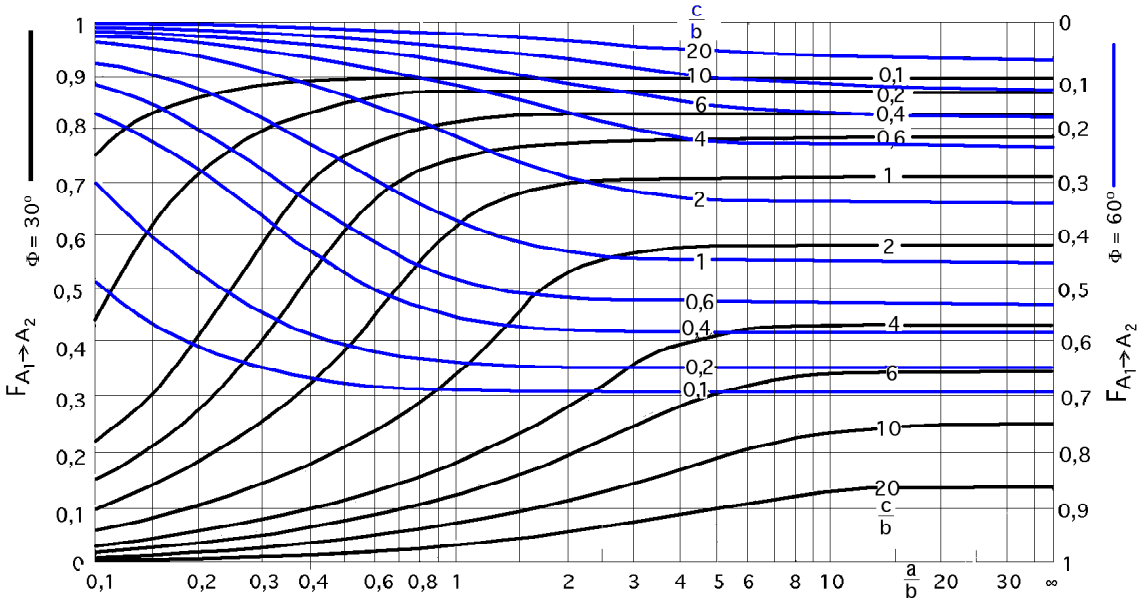
$$X = \frac{a}{b} \quad ; \quad Y = \frac{c}{b} \quad ; \quad Z^2 = X^2 + Y^2 - 2\,X\,Y\cos\Phi$$

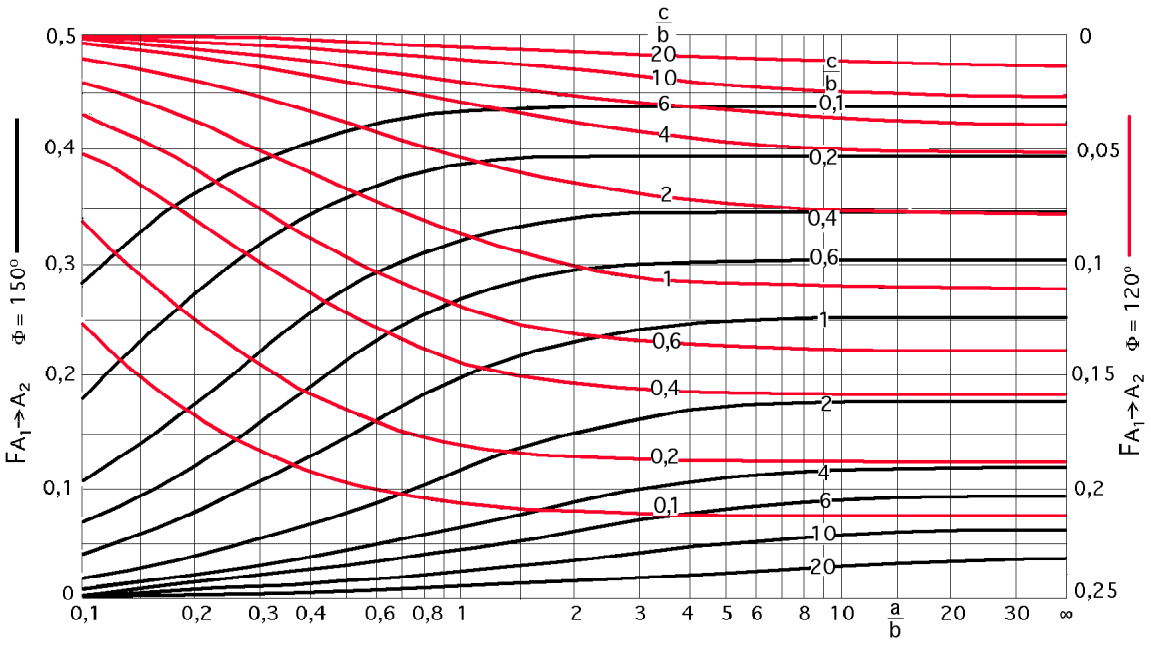
$$\pi\ Y\ F_{A_1\to A_2} = -\frac{sen\ 2\Phi}{4}\{X\,Y\,sen\ \Phi - (\frac{\pi}{2} - \Phi)(X^2 + Y^2) + Y^2 arc\ tg\ \frac{X - Y\cos\Phi}{Y\,sen\ \Phi} + X^2 arc\ tg\ \frac{Y - X\cos\Phi}{X\,sen\ \Phi}\} +$$

$$+ (\frac{1}{2} - \frac{sen^2\Phi}{4}) ln\ \frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+Z} + Y^2\ ln\ \frac{Y^2(1+Z)}{Z(1+Y^2)} + X^2\ ln\ \frac{X^2(1+X^2)\cos^2\Phi}{Z(1+Z)\cos^2\Phi} + X\,arc\ tg\ \frac{1}{X} + Y\,arc\ tg\ \frac{1}{Y} - \sqrt{Z}\ arc\ tg\ \frac{1}{\sqrt{Z}} +$$

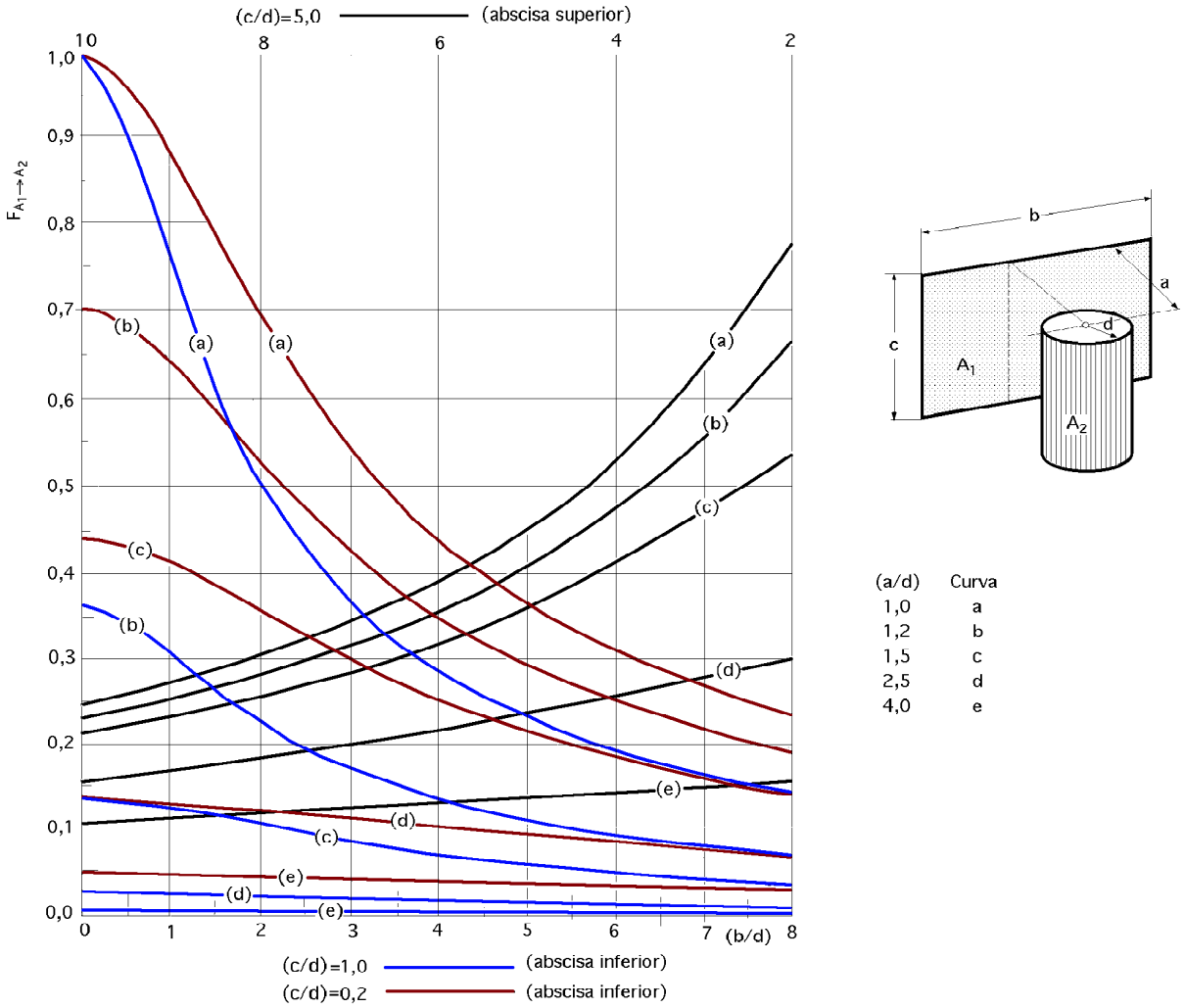
$$+ \frac{sen\ \Phi\ sen\ 2\,\Phi}{2} X\sqrt{1 + X^2 sen^2\Phi}\ (arc\ tg\ \frac{X\cos\Phi}{\sqrt{1 + X^2 sen^2\Phi}} + arc\ tg\ \frac{Y - X\cos\Phi}{\sqrt{1 + X^2 sen^2\Phi}}) +$$

$$+\cos\Phi \int_0^Y \sqrt{1+\xi^2\ sen^2\Phi}\{arc\ tg\ \frac{X - \xi\cos\Phi}{\sqrt{1+\xi^2\ sen^2\Phi}} + arc\ tg\ \frac{\xi\cos\Phi}{\sqrt{1+\xi^2\ sen^2\Phi}}\}d\xi$$

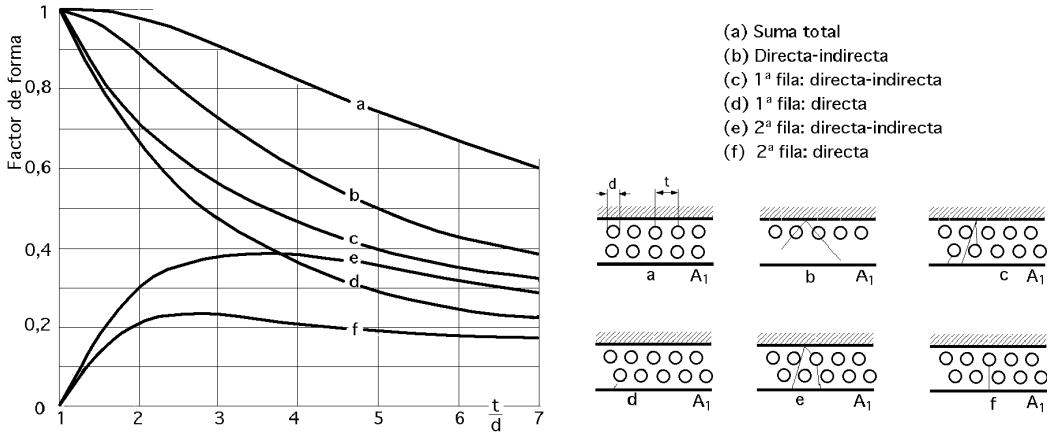




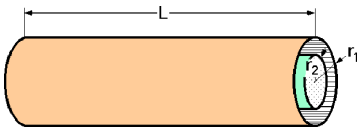
9.- Rectángulo A_1 con cilindro finito A_2



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



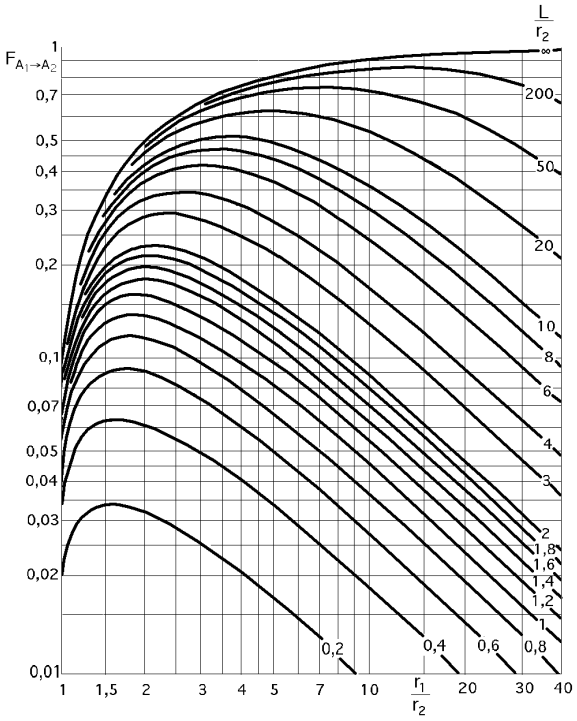
11.- Cilindros coaxiales finitos A_1 exterior, A_2 interior



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

$$F_{A_1 \to A_2} = \frac{1}{X} - \frac{1}{\pi\, X} \left\{ arc\ cos\ \frac{B}{A} - \frac{1}{2\, Y} \left(\sqrt{(A + 2)^2 - (2\, X)^2}\ arc\ cos\ \frac{B}{X\, A} \right) + B\ arc\ sen\ \frac{1}{X} - \frac{\pi\, A}{2} \right\}$$

$$F_{11} = 1 - \frac{1}{X} + \frac{2}{\pi\, X}\ arc\ tg \left(\frac{2\sqrt{X^2 - 1}}{Y} \right) - \frac{Y}{2\,\pi\, X} \left\{ \frac{\sqrt{4\,X^2 + Y^2}}{Y}\ arc\ sen \left(\frac{4\,(X^2 - 1) + \frac{Y^2\,(X^2 - 2)}{X^2}}{Y^2 + 4\,(X^2 - 1)} \right) - arc\ sen\ \frac{X^2 - 2}{X^2} + \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sqrt{4\,X^2 + Y^2}}{Y} - 1 \right) \right\}$$



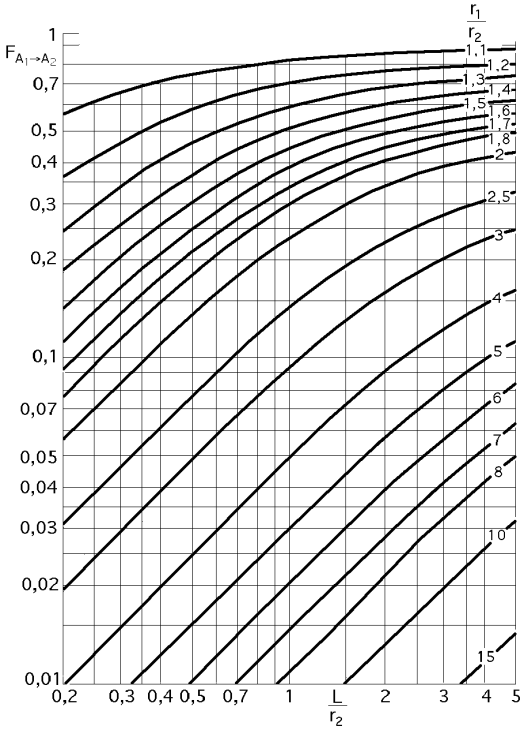


Tabla IV.16.- Propiedades térmicas de algunos metales

Conductividad térmica "k" (W/m°K), a la temperatura en °K de:								*Propiedades a 20°C*				
								ρ	c_p	k	$\alpha.10^6$	*T. fusión*
ELEMENTO	*200*	*273*	*400*	*600*	*800*	*1000*	*1200*	*Kg/m³*	*J/kg°C*	*W/m.°K*	*m²/seg*	*°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*
Níquel	*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 termicas de algunos metales y aleaciones

	Temperatura °C		C.latente	Densidad	Calor espec. c_p		Conduct. térmica		Emisividad ε	
	Fusión	Ebullición	$\frac{Kcal}{kg}$	$\frac{kg}{m^3}$	°C	$\frac{Kcal}{kg°C}$	°C	$\frac{Kcal}{hm°C}$	°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	11oxidado
					200	0,237			600	19oxidado
					400	0,252				
					600	0,268				
Al-Mn (1,2%}	654			2730	100	0,23	20	136	25	3,5 a 7
AI-Cu(4,4%)-Si(0,8%)-Mn(0,8%)- -Mg(0,4%)	638			2800	100	0,23	20	165	20	10
									400	12
Al-Si (12%)-Cu (1%)	571			2690	100	0,23	20	133	20	3,5 a 7
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				
					200	0,113			1000	20
					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%)-Ni32%)-C(0,4%)- -Fe(1%)-Mo(6%)-Mn(0,6%)-S(0,6%)				8210			200	11,8		
							600	17		

Cobre	*1083*	*2600*	*50,6*	*8960*	*20* *100* *200* *1000*	*0,092* *0,094* *0,096* *0,111*	*100* *0* *100* *200* *400* *600*	*349* *333,7* *325* *320* *312* *303*	*20* *1000* *100* *200*	*1,8 pulido* *60 oxidado* *2* *60 oxidado*
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* *300*	*16,5* *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* *1000*	*8 pulido* *36 pulido*
Estaño	*231*	*2270*	*14,5*	*7290*	*20* *200*	*0,054* *0,062*	*-100* *200*	*63* *48*	*20* *100*	*5,1 pulido* *5*
Estroncio	*770*	*1380*	*25*	*2600*	*20*	*0,176*				
Fósforo	*44*	*280*	*5*	*1820*	*20*	*0,177*	*20*	*61*		
GaIio	*29,7*	*2070*	*19,2*	*5910*	*20*	*0,177*				
Hafnio	*2130*	*3000*		*11360*	*20*	*0,035*	*20* *500*	*19* *17*		
Hierro	*1535*	*140*	*65*	*7850*	*20* *500* *1000*	*0,108* *0,163* *0,162*	*-100* *0* *400* *1000*	*74* *67* *41* *30*	*100* *20 a 300* *100*	*3,6 pulido* *4 oxidado* *5*
Indio	*156,4*			*7310*	*-100*	*0,05*				
Iridio	*2454*	*5300*		*22500*	*20* *500*	*0,031* *0,034*	*20* *100*	*50,4* *48,5*		
Litio	*168*	*1370*		*530*	*20* *100*	*0,19* *1,04*	*-100* *0*	*81,7* *60,4*		
Magnesio	*650*	*1197*	*89*	*1740*	*-100* *100* *600*	*0,206* *0,257* *0,311*	*-100* *0* *400*	*172* *147* *135*		
Mg-Al(10%)- Mn (0,1%)	*594*		*89*	*1810*	*20*	*0,25*	*-200* *300*	*46* *61,2*	*20*	*10(pul,oxid)* *16(pul,oxid)*
Mg-Al(6%)- Mn (0,2%)- Zn (3%)	*610*		*89*	*1810*			*-196* *300*	*50* *64*		*16(pul,oxid)*
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* *25* *300*	*0,09* *0,115* *0,178*	*-150*	*5,4*		
Mercurio	*-38,8*	*357*	*2,7*	*13550*	*20*	*0,033*	*20*	*7,56*		
Molibdeno	*2622*	*4800*	*70*	*10200*	*-100* *20* *1500*	*0,049* *0,061* *0,081*	*-100* *100* *1500*	*154* *118* *72*	*20* *600* *2000*	*7,1 pulido* *9,6 pulido* *29 pulido*
Niquel (99,95%)	*1455*	*2370*	*73,8*	*8900*	*20* *100* *500*	*0,106* *0,112* *0,126*	*-100* *25* *500*	*86* *79,2* *53,2*	*20* *20* *1000*	*4,5 pulido* *40 oxidado* *16 pulido*
Oro	*1063*	*2970*	*16,1*	*19320*	*20*	*0,031*	*20*	*255*	*20*	*2 pulido*
Osmio	*2700*	*5500*		*22610*	*0* *1600*	*0,031* *0,039*			*20* *500*	*2 pulido* *3,5 pulido*
Paladio	*1554*	*3980*	*34,2*	*12000*	*20* *1500*	*0,058* *0,076*	*20*	*61,2*	*20* *700*	*1* *9*
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*	*0,032* *0,034*	*20*	*61,2*	*130* *600*	*5,2 pulido* *10 pulido*

					1300	0,04			1500	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 100	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.18.- Tabla de propiedades térmicas de algunas aleaciones

Propiedades a 20°C		*Densidad* ρ *kg/m³*	*Calor específico J/kg°K*	*Conduct. k W/m°K*	*Difusivid a.10⁵ m²/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*	*19,2*		*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 carbono	*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 cromo	*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 níquel	*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 manganeso	*1% Mn*	*7865*	*460*	*50*	*1,388*									
	5% Mn	*7849*	*460*	*22*	*0,637*									
Acero al silicio	*1% Si*	*7769*	*460*	*42*	*1,164*									
	5% Si	*7417*	*460*	*19*	*1% Si*									
Acero al tungsteno	*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.19.- Propiedades térmicas de algunos aceros y aleaciones especiales

	Temper. fusión °C	Densidad ρ gr/cm³	Calor específico c_p		Conductiv. térmica k_c		Emisividad ε	
			°C	Kcal/kg°C	°C	Kcal/hm°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		
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 (0xidado)
					400	28	200	79 (0xidado)
					800	25	600	79 (0xidado)
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		
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	1000	22 (pulido)
					1000	30	600	98 (oxidado)
Fundición 4% C	1147	7,9	20	0,1	100	45	200	0,2 (pulido)
					500	37	200	64 (oxidado)
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)

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

MATERIAL	*Temperatura ºC*	*Densidad* ρ *(kg/m³)*	*Calor específico* c_p *(J/kgºK)*	*Conduct. térmica* k *(W/mºK)*	*Difusiv. térmica* $\alpha.10^5$ *(m²/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*			*18,5*	
	1400			*11,1*	
Ladrillo de magnesita (50% MgO)	*20*	*2000*		*2,680*	
	200		*1130*	*3,81*	
	650			*2,77*	
	1200			*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*	*3000*	*840*	*2,32*	*0,092*
	550			*2,47*	*0,098*
	900			*1,99*	*0,079*
Arcilla refractaria, cocida a 1330ºC	*500*	*2000*	*960*	*1,04*	*0,054*
	800			*1,07*	
	1100			*1,09*	
Arcilla refractaria, cocida a 1450ºC	*500*	*2300*	*960*	*1,28*	*0,04*
	800			*1,37*	
	1100			*1,4*	
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*	*100*		*0,036*	
	20	*200*	*670*	*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 térmicas de algunos materiales cerámicos

	Temper. fusión °C	Temper. reblandec °C	Volumen gas, v_{gas} %	Densidad $\frac{gr}{cm^3}$	Calor específico c_p °C	$\frac{Kcal}{kg°C}$	Cond. térmica k_C °C	$\frac{Kcal}{hm°C}$	Emisividad ε °C	%
Alúmina Al_2O_3 (100%)	2050		0	3,87	20 / 100	0,206	20	16,5	20	73
					500	0,24	500	6,1	300	73
					1000	0,26	1000	5,3	800	40
					1500	0,27	1500	5	1500	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	0,2	20	6,12	100	85
					500	0,24	500	2,9		
					1000	0,3	1000	2,1		
					1500	0,36				
Ladrillos de bauxita Al_2O_3 (60-85%), Fe_2O_3 (4-7%), SiO_2 (26-31%)	1790	1200	19 a 22	2,4	20	0,2	500	3,6		
							1000	1,8	800	50
							1500		1650	62
Ladrillos de cianita Al_2O_3 (58-60%), Fe_2O_3 (0,8-1,5%) SiO_2 (38-40%)	1820	1350	20 a 22	2,5	20	0,2	500	1,3	1300	61
							900	1,42	1800	43
Berilia BeO (100%)	2570		0	3,01	20	0,3	100	189		
					500	0,44	400	76		
					1000	0,5	1000	16,5	1000	56
							1800	13,2	1800	60
Carburo de silicio CSi (100%)	2250		0	3,2	100	0,19	20		1000	92
					500	0,27	500	100	1400	82
					1000	0,3	1000	40		
							1500	7,2		
Carburo de silicio CSi (89 a 91%), SiO (6 a 9%)	2200			3,18	20	0,2	20	14,4	800	93
					500	0,25	500	13		
					1000	0,3	1000	9,7		
Grafito	3700			2,22	20 a 1000	0,34	20	140	150	76
							500	60	400	75
							1000	32	600	71
Carbón Ladrillos	>2200			1,97	2 a 1000	0,25	20	1,4	150	77
							500	2,4	400	77
							1000	4	600	72
Circonio ZrO_2 (100%)	2715			6,1	100	0,12	100	1,65	100	80
					500	0,13	500	1,83	500	60
					1000	0,157	1000	1,96	1000	38
					1500	0,179	1500	2,1	1500	40
Ladrillos de circona ZrO_2 (93%), CaO(4÷5%), Hf(1,5%)	2550			5,6	0 a 1500	0,175	20	1,26	300	60
							500	1,44	500	45
							1000	1,62	2000	31
Circon ZrO_2 (67,1%), SiO_2 (32,9%)				4,6	20	0,14	20	2,7	300	92
					500	0,17	500	2,4	500	80
					1500	0,22	1000	1,5	800	52
Cromita FeO(32,4%), Cr_2O_3 (67,9%)				4,5	20 a 1000	0,22	500	1,5	800	97
							1000	1,58		
Ladrillos de cromita FeO(3÷6%), Cr_2O_3 (30÷45%), SiO_2 (3÷6%), Al_2O_3 (15÷33%),	2000			3,8 a 4,1	100	0,15	20	1,11	800	97
					500	0,2	500	1,3		
					1000	0,21	1000	1,45		
Dolomita calcinada CaO MgO	2480			2,85	100	0,22				
Espinela Al_2O_3 (71,8%), MgO(28,2%)				3,58	100	0,194	500	1,69		
					1000	0,257	1000	2,29		
Magnesita MgO(100%)	2950			3,57	100	0,234	20	36	100	75
					500	0,25	500	11,8	1000	42
					1000	0,28	1000	5,7	1500	32
					1500	0,29	1500	5		
Ladrillos de magnesita Fe_2O_3 (2÷7%), MgO(83÷92%)				3,55	100	0,24	20	11,8	1000	38
					500	0,26	500	6,8		
					1000	0,28	1000	3,5		
					1500	0,32				

Forsterita SiO_2 *(42,7%),* MgO*(57,3%)*	*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 Al_2O_3 *(72%),* SiO_2 *(28%)*				*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 SiO_2 *(98÷99%)*	*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_2O_3 *(0,7%),* SiO_2 *(96%),* CaO*(2%)*	*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_2O_3 *(40÷42%),* SiO_2 *(50÷56%),* Fe_2O_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_2O_3 *(34÷39%),* SiO_2 *(55÷61%),* Fe_2O_3 *(1÷3%)*	*1690*	*1223 a* *1280*	*20 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_2O_3 *(29÷34%),* SiO_2 *(60÷66%),* Fe_2O_3 *(1,5÷3%)*	*1670*	*1200 a* *1250*	*20 a 34*	*1,7 a 2,1*	*20* *1000*	*0,2* *0,25*	*20* *1000*	*0,6 a 1* *0,9 a 1,5*		
Ladrillos Al_2O_3 *(25÷ 29%),* SiO_2 *(65÷70%),* Fe_2O_3 *(1,5÷3%)*	*1650*	*1180 a* *1225*	*20 a 34*	*1,9 a 2,1*	*20* *1000*	*0,2* *0,25*	*20* *1000*	*0,5 a 1* *0,9 a 1,4*		
Ladrillos Al_2O_3 *(20÷24%),* SiO_2 *(70÷75%),* Fe_2O_3 *(1,5÷3%)*	*1580*	*1180 a* *1225*	*20 a 40*	*1,6 a 2*	*20* *1000*	*0,2* *0,25*	*20* *1000*	*0,4 a 1* *0,8 a 1,3*		
Ladrillos Al_2O_3 *(15÷19%),* SiO_2 *(75÷80%),* Fe_2O_3 *(1,5÷3,5%)*	*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 térmicas de materiales diversos

MATERIAL	*Temper. ºC*	*Densidad* ρ $\frac{gr}{cm^3}$	*Calor específico* c_p ($\frac{Kcal}{kg^oC}$)	*Cond. térmica* $\frac{Kcal}{hm^oC}$	*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*		
CeIuIoide	*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* *-180*	*0,19* *0,11*	*0,45*	*0,036* *0,0055*	*0,420*	
Corcho bruto	*40*	*0,13*	*0,48*	*0,036*		
Corcho grano	*20*	*0,1*		*0,016*		
Cloruro polivinilo	*30* *20*	*1,2 a 1,9*		*0,014* *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*		
Esponja 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 20ºC)*
Goma blanda	*100* *0*	*1,2* *1,2*	*0,37* *0,33*	*0,400* *0,140*		*92 (a 20ºC)* *92 (a 20ºC)*
Grafito escobillas	*50*			*3 a 6*		
Grafito en polvo	*90* *30*	*1,34* *1,08*				
Coma espuma	*30*	*0,02*		*0,020*		
Hielo	*0*	*0,917*		*1,900*		*97 (a 20ºC)*
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*
Madera de pino	*20*	*0,44*		*0,092*		*90*
	30	*0,44*		*0,055*		
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*	*0,28*	*3*		*0,96 (a 20ºC)*
	-75	*0,15*	*0,5*	*0,1*		
	-50	*0,2*		*0,13*		
	-25	*0,6*		*0,55*		
	0	*0,1 a 0,5*		*0,05*		
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 20ºC)*
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 20ºC)*
Resina fenolformaldehido		*1,4*		*0,12*		
Resina con relleno				*0,2 a 0,3*		
Seda	*10*			*0,039*		*77(a 20ºC)*
Silicona elastómeros	*50*			*0,21*		
Serrín		*0,4*	*0,65*	*0,12*	*0,45*	
Teflón	*20*	*0,25*		*0,198*		
	200			*0,3*		
Teflón con relleno	*20*			*0,37*		
	200			*0,45*		
Tela algodón 6 capas de barniz	*100*			*0,15*		*92(a20ºC)*
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 glicerina

Aceite de motores sin usar

Temperatura ^oC	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específ.* $\psi_p\ (J/kg^oK)$	*Cond. térmica* $k\ (W/m^oK)$	*Dif. térmica* $\alpha.10^{10}(m^2/s)$	*Visc. dinámica* $\eta.10^3\ (Ns/m^2)$	*Visc. cinemát.* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*N° de Prandtl* *Pr*	$\frac{g\beta}{\nu^2}\ 10^{-10}$
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

Temperatura ^oC	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg^oK)$	*Cond. térmica* $k\ (W/m^oK)$	*Difus. térmica* $\alpha.10^{10}\ (m^2/s)$	*Visc. dinámica* $\eta.10^3\ (Ns/m^2)$	*Visc. cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*N° de 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 $C_3H_5(OH)_3$

Temperatura ^oC	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg^oK)$	*Visc. cinemática* $\nu.10^4\ (m^2/s)$	*Cond. térmica* $k\ (W/m^oK)$	*Difus. térmica* $\alpha.10^7\ (m^2/s)$	*N° de Prandtl* *Pr*	β ^oK
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 $C_2H_4(OH_2)$

Temperatura ^oC	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg^oK)$	*Visc. cinemática* $\nu.10^4\ (m^2/s)$	*Cond. térmica* $k\ (W/m^oK)$	*Difus. térmica* $\alpha.10^7\ (m^2/s)$	*N° de Prandtl* *Pr*	β ^oK
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/m³)*	*Coef.dilat.tér.* $\beta.10^3$	*Calor específ.* c_p *(J/kg°K)*	*Cond.térmica* k*(W/m°K)*	*Difus. térmica* $\alpha.10^7$ *(m²/s)*	*Visc.dinámica* $\eta.10^4$ *(N/s.m²)*	*Visc.cinemática* $\nu.10^6$ *(m²/s)*	*Pr*	$\frac{g\beta}{\nu^2}\ 10^{-10}$
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/m³)*	*Coef.dilat.tér.* $\beta.10^3$	*Calor específ.* c_p *(J/kg°K)*	*Cond.térmica* k*(W/m°K)*	*Difus. térmica* $\alpha.10^5$ *(m²/s)*	*Visc.dinámica* $\eta.10^4$ *(N/s.m²)*	*Visc.cinemática* $\nu.10^7$ *(m²/s)*	*Pr*	$\frac{g\beta}{\nu^2}\ 10^{-9}$
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/m³)*	*Coef.dilat.tér.* $\beta.10^3$	*Calor específ.* c_p *(J/kg°K)*	*Cond.térmica* k*(W/m°K)*	*Difus. térmica* $\alpha.10^5$ *(m²/s)*	*Visc.dinámica* $\eta.10^4$ *(N/s.m²)*	*Visc.cinemática* $\nu.10^7$ *(m²/s)*	*Pr*	$\frac{g\beta}{\nu^2}\ 10^{-9}$
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							
Temperatura °C	*Densidad* ρ *(kg/m³)*	*Calor específico* c_p *(J/kg°K)*	*Visc.dinámica* $\eta.10^4$ *(N/s.m²)*	*Visc.cinemática* $\nu.10^7$ *(m²/s)*	*Conduct.térmica* $W/m°K$	*Difusiv. térmica* $\alpha.10^6$ *(m²/s)*	*Pr*
371	*10540*	*159*	*2,4*	*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: 179ºC; Punto de ebullición: 1317ºC							
Temperatura ºC	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^4\ (N/s.m^2)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^7\ (m^2/s)$	*Conduct.térmica* W/m^oK	*Difusiv. térmica* $\alpha.10^6\ (m^2/s)$	*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: 63,9ºC; Punto de ebullición: 760ºC							
Temperatura ºC	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^4\ (N/s.m^2)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^7\ (m^2/s)$	*Conduct.térmica* W/m^oK	*Difusiv. térmica* $\alpha.10^6\ (m^2/s)$	*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: -11ºC; Punto de ebullición: 784ºC							
Temperatura ºC	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^4\ (N/s.m^2)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^7\ (m^2/s)$	*Conduct.térmica* W/m^oK	*Difusiv. térmica* $\alpha.10^6\ (m^2/s)$	*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 ALGUNOS LÍQUIDOS SATURADOS

Agua

Temperatura °C	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg°K)$	*Cond.térmica* $W/m°K$	*Difus. térmica* $\alpha.10^6\ (m^2/s)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^6\ (N/s.m^2)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Pr*	$\frac{g\beta}{\nu^2}\ 10^{-9}$
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 CO_2

Temperatura °C	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg°K)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Cond.térmica* $W/m°K$	*Difus. térmica* $\alpha.10^7\ (m^2/s)$	*Pr*	$\beta\ (°K)$
-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 SO_2

Temperatura °C	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (J/kg°K)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Cond.térmica* $W/m°K$	*Difus. térmica* $\alpha.10^7\ (m^2/s)$	*Pr*	$\beta\ (°K)$
-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

Temperatura ^oK	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (kJ/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^6\ (kg/m.s)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Cond.térmica* W/m^oK	*Difus. térmica* $\alpha.10^4\ (m^2/s)$	*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

Oxígeno

Temperatura ^oK	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (kJ/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^6\ (kg/m.s)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Cond.térmica* W/m^oK	*Difus. térmica* $\alpha.10^4\ (m^2/s)$	*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

Hidrógeno

Temperatura ^oK	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (kJ/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^6\ (kg/m.s)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Cond.térmica* W/m^oK	*Difus. térmica* $\alpha.10^4\ (m^2/s)$	*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

Vapor de agua húmedo

Temperatura ^oK	*Densidad* $\rho\ (kg/dm^3)$		*Calor específico* $c_p\ (kJ/kg^oK)$		*Conductiv. térmica* W/m^oK		*Viscosidad dinámica* $\eta.10^3\ (kg/m.s)$		*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*

Dióxido de carbono, CO_2

Temperatura ^oK	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (kJ/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^6\ (kg/m.s)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Cond.térmica* W/m^oK	*Difus. térmica* $\alpha.10^5\ (m^2/s)$	*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*

Monóxido de carbono, CO

Temperatura ^oK	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (kJ/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^6\ (kg/m.s)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Cond.térmica* W/m^oK	*Difus. térmica* $\alpha.10^4\ (m^2/s)$	*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	*0,9743*	*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*

Aire

Temperatura ^oK	*Densidad* $\rho\ (kg/m^3)$	*Calor específico* $c_p\ (kJ/kg^oK)$	*Visc.dinámica* $\eta.10^5\ (kg/m.s)$	*Visc.cinemática* $\nu.10^6\ (m^2/s)$	*Cond.térmica* W/m^oK	*Difus. térmica* $\alpha.10^4\ (m^2/s)$	*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*	*0,0337*	*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*	*1,064*	*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*	*1,110*	*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*

REFERENCIAS CAP IV.- TRANSMISIÓN DE CALOR

A. Colburn.- A METHOD OF CORRELATING FORCED CONVECTION HEAT TRANSFER DATA AND A COMPARISON WITH FLUID FRICTION, A.I.Ch.E., Vol.29, pp.174.- 1933

W. McAdams.- HEAT TRANSMISSION.- McGraw-Hill.- 1967

F. Incropers, D. Dewitt.- INTRODUCTIO TO HEAT TRANSFER.- McGraw-Hill.- 1980

S. Patankar.- NUMERICAL HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW, McGraw-Hill.- 1980

F. C. Lockwood, R. A. Wessel.- NEW RADIATION SOLUTION METHOD FOR INCORPORATION IN GENERAL COMBUSTION PREDICTION PROCEDURES.- The Combustion Institute, pp.1405-1414.- 1981

C. A. Meyer..- ASME STEAM TABLES: THERMODYNAMIC AND TRANSPORT PROPERTIES OF STEAM.- American Institute of Mechanical Engineers (ASME).- 1983

W. A. Fiveland.- DISCRETE-ORDINATES SOLUTIONS OF THE RADIATIVE TRANSPORT EQUATION FOR RECTANGULAR ENCLOSURES.- Journal of Heat Transfer, Vol.106.- 1984

W. Roshenaw, J. Hartnett, E. Ganic.- HANDBOOK OF HEAT TRANSFER FUNDAMENTALS.- McGraw-Hill.- 1985

F. Kreith, M. Bohn.- PRINCIPLES OF HEAT TRANSFER.- Harper and Row.- 1986

W. A. Fiveland, R. A. Wessel.- A NUMERICAL MODEL FOR PREDICTING PERFORMANCE OF THREE-DIMENSIONAL PULVERIZED FUEL FIRED FURNACES.- Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol.110, n°.1.- 1988

W. A. Fiveland.- THREE-DIMENSIONAL RADIATIVE HEAT TRANSFER SOLUTIONS BY THE DISCRETE-ORDINATES METHOD.- Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol.2, n°.4.- 1988

B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE.- 40th Edition, Chapter 4.- Barberton, Ohio, USA.- 1992