ANEXO I.- MATERIALES AISLANTES

A.1.- AISLAMIENTOS TÉRMICOS

Son necesarios para evitar pérdidas de energía térmica al medio que rodea los elementos de una instalación, como recipientes, tuberías y otros accesorios. Como la cantidad de energía térmica que se consume es creciente, el desarrollo de buenos aislamientos térmicos contribuye a una utilización más racional de la misma. Las industrias de mayor consumo energético son las del acero, aluminio, productos químicos, petroquímicas, papel, vidrio, arcillas, cemento, alimentación, etc.

El consumo de energía se distribuye en la siguiente forma: $\begin{cases} 50\% \text{ en usos industriales} \\ 25\% \text{ en transportes} \\ 25\% \text{ en edificios} \end{cases}$

La energía que se pierde tiene lugar a temperaturas $\begin{cases} \text{inferiores a } 100^{\circ}C, \text{ el } 50\% \\ \text{menores de } 250^{\circ}C, \text{ el } 25\% \\ \text{superiores a } 250^{\circ}C, \text{ el } 25\% \end{cases}$ estimándose que con buenos aislamientos, las pérdidas se podrían reducir un 15% compensando los precios de amortización, coste de materiales y mantenimiento.

En la Fig A-1 se indica el flujo térmico para aislamientos con óxido de magnesio de 85%.

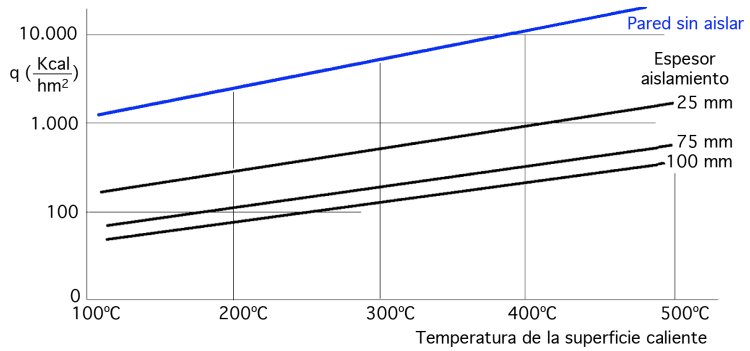

Fig A-1.- Pérdidas térmicas al exterior de una pared de MgO plana sin aislar y aislada con diversos espesores

Los aislamientos térmicos se caracterizan por los bajos valores de su conductividad térmica, aunque en la elección de un determinado aislante hay que tener también en cuenta otros factores como su forma $\begin{cases} \text{geométrica} \\ \text{tamaño} \end{cases}$, y propiedades:

- *Que afectan a la conductividad térmica, tales como temperatura, humedad, sinterización, emisividad*
- *Mecánicas, como la resistencia a la tracción y compresión, resistencia al choque térmico, fatiga, dila-*

taciones y contracciones con la temperatura, abrasión, etc

- Eutécticas a distintas temperaturas y humedades

- Químicas, como la corrosión con y sin humedad, puntos de inflamación en medios ambientes de gases, polvos, etc.

- Trabajo, como cortes y preparación de formas, adhesivos, secado, olores, irritación de ojos o piel, toxicidad por polvos o disolventes de los materiales de juntas

La elección de un material aislante exige analizar sus propiedades para la función específica a la que se destina; los datos procedentes de casas comerciales son escasos y los resultados de medidas experimentales en laboratorio no especifican, en muchos casos:

- El comportamiento en servicio

- Los problemas de unión a los elementos principales del equipo

- La degradación del material

- La variación de las propiedades con el tiempo, etc

Los modos de transmisión de calor en un aislante son la conducción, convección y radiación. El aislamiento térmico se logra aumentando la resistencia térmica de un material a la transmisión de calor por cualquiera de los modos anteriores. De acuerdo con el intervalo de temperaturas de funcionamiento los aislantes se suelen agrupar en:

Aislantes para temperaturas $\begin{cases} \textit{elevadas, por encima de 500ºC} \\ \textit{intermedias, entre 100ºC y 500ºC} \\ \textit{bajas, entre - 100ºC y 100ºC} \\ \textit{criogénicas, entre - 100ºC y - 270ºC} \end{cases}$

A.2.- AISLAMIENTOS PARA TEMPERATURAS ELEVADAS

A ***temperaturas superiores a 500ºC***, los aislantes térmicos son, en general, de tipo cerámico tanto más refractarios cuanto mayor es la temperatura de operación. Estos materiales presentan conductividades térmicas elevadas frente a las conductividades que se obtienen cuando estos mismos materiales se preparan con poros o como fibra agrupada en haces, tejidos o aglomerados de ambos tipos.

En casos especiales, como en los *aislamientos de componentes de reactores nucleares*, éstos se logran con capas múltiples de metales sin puntos o zonas de contacto, conocidos como *aislamientos reflectores*, en los que se logra la resistencia a la: $\begin{cases} \textit{conducción por la proximidad de las láminas} \\ \textit{radiación por el bajo poder emisivo de los metales} \end{cases}$

Esta distancia se puede aplicar a cualquier temperatura, y es adecuada en equipos que puedan tener contaminación, o necesidades frecuentes de inspección, o limpieza especial.

Su precio es elevado, pero sus ventajas y vida de funcionamiento, hacen que este sistema se aplique a otros procesos industriales que utilizaban aislamientos clásicos.

Entre los *aislantes para temperaturas superiores a 500ºC* se pueden citar:

- Ladrillos cerámicos aislantes

- Morteros y sus mezclas

- Silicato cálcico

- Fibras minerales

- Fibras cerámicas de Al_2O_3 *-* SiO_2

- Fibras de Al_2O_3 *,* SiO_2 *,* ZrO_2 *, carbón*

- Aislamientos reflectores de láminas metálicas

Los *ladrillos cerámicos aislantes* se obtienen mezclando materiales refractarios con productos combustibles que se eliminan por calentamiento, resultando ladrillos porosos con una densidad aparente comprendida entre un $25 \div 50\%$ de la teórica.

Tabla A-1.- Materiales aislantes para altas temperaturas (T > 500ºC)

Materiales aislantes	*Densidad* gr/cm^3	*Temperatura* ºC	k_C $Kcal/hmºC$
Arcillas ladrillos	*0,7*	*650*	*0,4*
		900	*0,5*
Arcillas caolín	*0,4*	*500*	*0,2*
		1000	*0,4*
Arcillas caolín	*0,3*	*1000*	*0,18*
Carbón	*0,2*	*500*	*0,08*
		1000	*0,12*
Grafito en tela (vacío) 5 mm espesor	*0,08*	*500*	*0,08*
		1000	*0,25*
		2500	*0,5*
Grafito en tela (atmósfera de N_2*), 5 mm de espesor*		*1500*	*0,16*
		2700	*1,5*
Diatomeas, polvo	*0,2*	*500*	*0,08*
		900	*0,15*
Magnesia (85%) bloques y formas	*0,17*	*500*	*0,055*
Roca lana (bloques)		*600*	*0,052*
Sílice (fibras tela)	*0,1*	*300*	*0,07*
Sílice microcuarzo	*0,05*	*350*	*0,23*
Titanato potásico fibras	*0,8*	*550*	*0,04*
Circona espuma	*0,9*	*500*	*0,3*
		1000	*0,35*
Circona con tela (en vacío) 2 mm de espesor	*0,32*	*500*	*0,05*
		1000	*0,14*
		1700	*0,32*
		2000	*0,47*

Los *morteros y hormigones* hasta temperaturas de 1400ºC, se obtienen mezclando materiales como el cemento Portland, con $\begin{cases} \textit{arenas y gravas ordinarias} \\ \textit{refractarios sílicoaluminosos} \end{cases}$

A temperaturas superiores a 500ºC la conductividad térmica de los aislantes se ve afectada por la radiación, que puede llegar a ser el mecanismo de transmisión de calor predominante:

- En materiales transparentes como la sílice fundida, el aumento de la conductividad comienza a 500ºC

- En materiales traslúcidos como el Al_2O_3, MgO y porcelanas, el efecto es importante a partir de 1000ºC

A temperaturas elevadas es difícil conocer el efecto de la radiación, aunque las estimaciones son de $2 \div 3$ veces el valor de la conductividad térmica del sólido; el ZrO_2, presenta menor aumento por radiación.

En los *materiales porosos*, el tamaño de los poros afecta notablemente a la conductividad térmica; el fluido que, normalmente, llena los poros es el aire; para poros de pequeño tamaño, del orden de 0,005 mm se tiene que:

- La convección es despreciable

- El camino libre medio de las moléculas es superior al tamaño del poro

- La contribución a la conductividad térmica del gas disminuye al aumentar la temperatura

El efecto de la radiación es mayor cuando el diámetro del poro d_{poro} aumenta, y viene dado por la siguiente ecuación

$$k_r = 4\ \varepsilon\ \sigma\ T^3\ d_{poro}$$

Considerando el sólido formado con poros aislados se puede poner:

$$k_{aisl} = V_{sól}\ k_{sól} + V_{poros}\,(k_{gas} + k_r) = V_{sól}\ k_{sól} + V_{poros}\,(k_{gas} + 4\ \varepsilon\ \sigma\ T^3\ d_{poro})$$

en la que $V_{sól}$ es el % de volumen del sólido

Para poros de pequeño diámetro: $k_{aisl} = V_{sól}\ k_{sól}$

Si los poros se agrupan en serie, el aislamiento es más efectivo; una ecuación que representa la conductividad térmica en estas condiciones es:

$$k_{aisl} = \frac{k_{gas} + 4\ \varepsilon\ \sigma\ T^3 d_{poro}}{1 - V_{sól}\ \left(1 - \frac{k_{gas} + 4\ \varepsilon\ \sigma\ T^3 d_{poro}}{k_{sól}}\right)}$$

La ecuación anterior supone capas de poros continuas; los valores mas bajos de k_{aisl} se corresponden con poros pequeños y materiales opacos. Para aislantes de alta temperatura, los materiales porosos presentan fenómenos de sinterización, por lo que hay que elegir materiales poco sinterizables, es decir, puros y con tamaños de poros lo más uniformes posibles.

El aislamiento se puede aumentar, además de por los poros, por materiales aislantes en las zonas exteriores, como la vermiculita. Para temperaturas superiores a 1100ºC, los materiales se sustituyen por sólidos que, normalmente, tienen mayor conductividad térmica que los aislantes porosos, y que son más fáciles de preparar y aplicar.

Los ladrillos porosos de carbón constituyen una excepción, alcanzando la conductividad térmica, en el intervalo de temperaturas $1500 \div 2000$ºC, valores de 0,86 Kcal/hmºC, lo que indica un efecto

despreciable de la radiación en el margen considerado.

Las *fibras aislantes* de alta temperatura se han desarrollado en los últimos años, siendo las más importantes de carbón, sílice-aluminosas y de óxidos puros, Al_2O_3 , SiO_2 y ZrO_2 ; se emplean en forma de fibras y tejidos con temperaturas máximas de funcionamiento del orden de 1300ºC, aunque en periodos de tiempo no muy largos pueden alcanzar 1500ºC; su conductividad térmica varía con la temperatura y la densidad de las fibras, Fig A-2 y A-3.

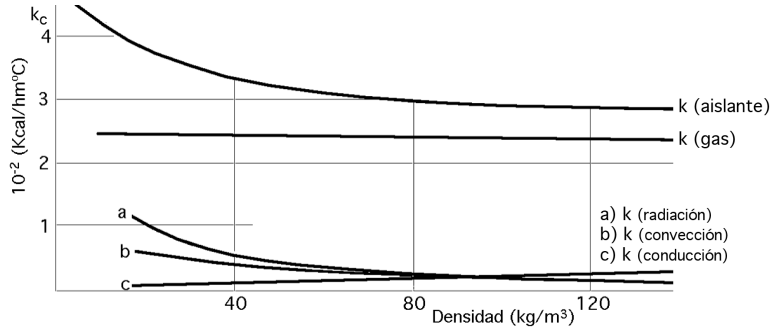

Fig A-2.- Conductividad térmica k_c de materiales fibrosos en función de la densidad y de las contribuciones por conducción, convección y radiación

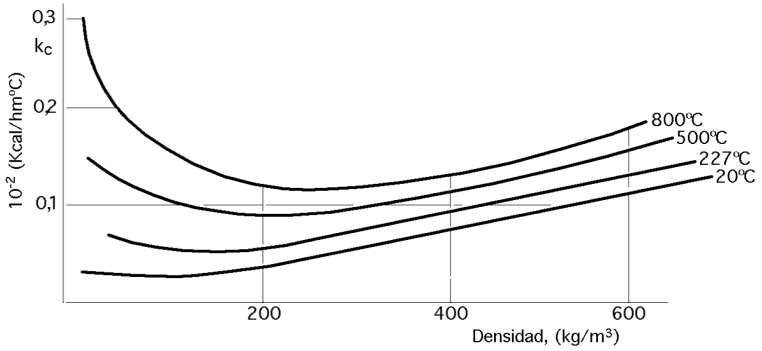

Fig A-3.- Conductividad térmica k_c de materiales fibrosos en función de la densidad y la temperatura

EJEMPLO.- Se desea estimar el aislamiento para un horno cilíndrico de tratamientos que debe funcionar a 2000ºC y cuyas dimensiones interiores son $\begin{cases} \textit{diámetro 0,3 m} \\ \textit{longitud 1 m} \end{cases}$.

La temperatura de la pared exterior es de 40ºC.

RESOLUCIÓN:

A 2000ºC se pueden elegir materiales $\begin{cases} \textit{densos} \\ \textit{de fibras} \\ \textit{reflectores} \end{cases}$

- Los materiales densos, tipo circona, tienen una conductividad térmica elevada frente a los de fibras, por lo que se eligen: $\begin{cases} \textit{Grafito en tela de 5 mm de espesor} \\ \textit{Circona con } Y_2O_3 \textit{ en tela de 2 mm de espesor} \\ \textit{Láminas finas de wolframio} \end{cases}$

Grafito.- Como k_{aisl} depende de la temperatura, se tiene:

$$k_{aisl} = a + b\,T^2\,(°C)^2 = \left| \begin{matrix} a = 0{,}0725 \\ b = 7.10^{-8} \end{matrix} \right| = 0{,}0725 + 7.10^{-8}\;\; T^2$$

$T(°C)$	500	1500	2500
$K_{aisl}\,(Kcal/hmC°)$	0,08	0,25	0,5

Para una temperatura en la superficie exterior del horno de 40ºC:

$$\hat{k}_{aisl} = \frac{1}{2000 - 40} \int_{40}^{2000} (a + bT^2)\; dT = \ldots = a + \frac{b}{2}\,(2000 + 400) \approx a$$

y despreciando el calor eliminado por las bases, por estar mejor aisladas que la superficie lateral:

$$Q = 2\,\pi\;\hat{k}\,L\;\frac{T_{pF} - T_{p0}}{ln\;\frac{r_e}{r_i}} = 2\,\pi\;_x\,0{,}0725\;_x\,1\;\frac{2000 - 40}{ln\;\frac{r_e}{0{,}15}} = \frac{892}{ln\;\frac{r_e}{0{,}15}}$$

obteniéndose:

$N°$ de capas aislantes	1	2	5	10	20	50	100
$r_e\,(m)$	0,155	0,16	0,175	0,2	0,25	0,4	0,65
$Q\,(Kcal/h)$	27210	13824	5693	3100	1746	910	608

Circona.- Al igual que en el caso anterior: $k_{aisl} = a + b\,T^2 = 0{,}033 + 10{,}9\;.10^{-8} T^2\;\;(°C)^2$

$T(°C)$	500	1000	1700	2000
$K_{aisl}\,(Kcal/hmC°)$	0,05	0,14	0,32	0,47

$N°$ de capas aislantes	5	10	20	50	100
$r_e\,(m)$	0,16	0,17	0,19	0,25	0,35
$Q\,(Kcal/h)$	6200	4900	2500	1200	723

Láminas de wolframio.- La emisividad del wolframio viene dada en la siguiente Tabla:

$T(°C)$	40	500	1000	2000
$K_{aisl}\,(Kcal/hmC°)$	0,02	0,08	0,15	0,5

Por la ecuación: $Q = q_{1(neta)\,(N)} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{(N + 1)\,(\frac{2}{\varepsilon} - 1)}\,A$, *(ver Cap XVIII), se tiene, para N láminas :*

$$Q = \frac{4{,}875.10^{-8}\,(2273^4 - 313^4)}{(N + 1)\,(\frac{2}{\varepsilon} - 1)}\;2\,\pi\;_x\,0{,}15\;_x\,1 = \frac{1226000}{(N + 1)\,(\frac{2}{\varepsilon} - 1)}\;\;\frac{Kcal}{h}$$

$N°$ de capas aislantes	5	50	500
$Q\,(Kcal/h)$	66000	5400	533

En consecuencia el orden de preferencia sería: circona, grafito, wolframio (reflector).

A.3.- AISLAMIENTOS PARA TEMPERATURAS INTERMEDIAS

Cubren un gran número de aplicaciones industriales en sistemas de producción y distribución de vapor, industrias de transformación e industrias químicas.

Tabla A-2.- Materiales aislantes para temperaturas intermedias (100°C < T < 500°C)

Materiales aislantes	*Densidad (gr./cm³)*	*Temperatura °C*	*k_c (Kcal/hmC°)*
Amianto papel	*0,3*	*150*	*0,06*
		200	*0,07*
Amianto tela	*0,3*	*300*	*0,07*
Arcillas	*0,7*	*200*	*0,3*
		400	*0,34*
Arcillas caolín		*400*	*0,36*
Diatomeas, moldes	*0,36*	*100*	*0,06*
		250	*0,09*
		400	*0,12*
Diatomeas, polvo	*0,2*	*100*	*0,045*
		200	*0,07*
		400	*0,08*
	0,4	*100*	*0,05*
		200	*0,073*
		400	*0,1*
Magnesia (85%) bloques y formas	*0,17*	*100*	*0,034*
		500	*0,05*
Roca, lana	*0,12 a 0,2*	*100*	*0,045*
		200	*0,06*
		400	*0,09*
Silicato cálcico hidratado, formas moldeadas	*0,2*	*100*	*0,05*
		250	*0,06*
Sílice fundida, fibras	*0,04*	*100*	*0,037*
		500	*0,16*
	0,14	*100*	*0,027*
		500	*0,09*
Vidrio, lana	*0,04*	*100*	*0,038*
		200	*0,045*
		400	*0,067*

Entre los más utilizados se encuentran:

- *Polvo del caparazón de diatomeas*
- *Ladrillos cerámicos de baja densidad*
- *Silicato cálcico con amianto*
- *Oxido de magnesia en polvo y aglomerado con amianto*
- *Lanas o fibras de roca*
- *Lanas o fibras de vidrio*
- *Vermiculita expandida con y sin cementos*
- *Fibras térmicas*
- *Vidrio celular*
- *Sistemas metálicos reflectores*

Estos materiales se preparan en placas, tubos o telas, rígidos, semirígidos o flexibles según modelos y normas de aplicación de las firmas comerciales. En estos intervalos de temperatura se

utilizan mucho las fibras de roca o de vidrio que sustituyen a los aislamientos de silicato cálcico con amianto, debido a los efectos nocivos para la salud de este último. La conductividad térmica varía generalmente en forma lineal entre 100÷400ºC y sus valores son del orden de 0,06 Kcal/hmºC.

A.4.- AISLAMIENTOS PARA TEMPERATURAS BAJAS

Las aplicaciones en este intervalo de temperatura son:

- Usos domésticos y alimentación

- Procesos fisicoquímicos como la separación y almacenamiento de gases, acondicionamiento de aire, recuperación de disolventes, fermentaciones, etc.

Los materiales aislantes son numerosos y se extienden desde productos naturales tratados convenientemente como, corcho, madera, fibras, vegetales, hasta productos orgánicos como gomas o plásticos en placas o fibras.

Los materiales de fibras minerales mencionados anteriormente también tienen aplicación a bajas temperaturas.

Dada la gran variedad de materiales resulta mas conveniente agruparlos por su estructura:

- Materiales sólidos utilizados en construcción, ladrillos, cementos, yesos, morteros, estructuras compuestas, etc

- Fibras o lanas de vidrio, rocas, maderas, papel, cerámicas

- Estructuras celulares porosas y no porosas como materiales orgánicos e inorgánicos, vidrio celular, espumas de cloruro de vinilo, poliuretano, poliestireno, polivinilacetato

- Polvos inorgánicos, diatomeas, vermiculita, óxidos cerámicos

- Láminas finas generalmente Al, recubiertas con materiales aislantes

Un aspecto importante en los aislamientos para bajas temperaturas es la presencia de humedad; los materiales aislantes suelen ser higroscópicos, del orden del 10% a una atmósfera y humedad relativa del 50÷60%. Si la presión de vapor de agua en el exterior del aislamiento es superior a la correspondiente al interior, se produce una difusión y el vapor pasa a la estructura del aislante.

La *conductividad térmica del agua* es del orden de 25 veces superior a la del aire, por lo que un aislante cuando está seco presenta una baja conductividad térmica, pero cuando está instalado puede quedar afectado por la humedad ambiental y comportarse peor que un aislante de conductividad más elevada, pero menos sensible a la humedad. La distribución de humedad dentro del aislante no es lineal y la concentración de agua es mayor en las partes más frías. Si la temperatura es baja, se produce hielo con un aumento notable de la conductividad térmica.

La condensación de agua desprende el calor latente que se transmite a través del vapor de agua si la estructura no es muy cerrada, además de favorecer los fenómenos de convección. Una forma empírica para calcular la conductividad térmica en función de la humedad, y utilizar los fac-

tores de convección sobre la conductividad térmica de los materiales en estado seco, es la siguiente:

Un método efectivo de evitar la pérdida de capacidad de un aislante por humedad, es disponer barreras al vapor de agua, utilizando varios materiales en los que la última capa presente un cierre cuasiestanco.

Se deben cuidar especialmente las zonas débiles como: *Sujecciones*, *Uniones en ángulo*, *Válvulas*, *Salidas de elementos de instrumentación*

colocando cementos o materiales plásticos, a los que no afecten las dilataciones, contracciones y vi-

Humedad %	*1*	*2,5*	*5*	*10*	*15*	*20*	*25*
Factor de multiplicación de k (en estado seco)	*1,3*	*1,55*	*1,75*	*2,1*	*2,35*	*2,55*	*2,75*

Tabla A-3.- Materiales aislantes para bajas temperaturas (-100°C < T < 100°C)

Materiales aislantes	*Densidad (gr/cm³)*	*Conductividad térmica*	
		°C	*k_c (Kcal/hm°C*
Algodón cinta		*30*	*0,06*
Algodón capas		*100*	*0,045*
Amianto, papel		*25*	*0,14*
Amianto láminas		*25*	*0,05*
Amianto+acetato, láminas		*25*	*15*
Amianto (polvo)	*0,46*	*0*	*0,1*
	0,7	*0*	*2*
Coque (polvo)	*0,5*	*100*	
Corcho bruto	*0,09*	*20*	*0,03*
Corcho grano fino	*0,1*		*0,037*
Corcho cartón	*0,12*	*-100*	*0,02*
		20	*0,03*
Diatomeas, polvo	*0,15-0,2*	*-100*	*0,035*
		20	*0,045*
		100	*0,048*
Magnesia hidratada	*0,1-0,15*	*-80*	*0,02*
		0	*0,034*
Rosa, lana	*0,4*	*-100*	*0,034*
		0	*0,047*
	0,26	*-100*	*0,025*
		0	*0,034*
	0,095	*-100*	*0,017*
		0	*0,029*
Vidrio, lana	*0,058*	*-100*	*0,025*
		0	*0,036*
Vidrio, espuma	*0,2*	*-100*	*0,034*
		0	*0,043*
Vidrio, perlita	*0,2*	*-100*	*0,03*
		0	*0,05*
Vidrio, aerogel	*0,1*	*-100*	*0,012*
		0	*0,017*
Poliestireno (espuma)	*0,04*	*-100*	*0,029*
		0	*0,03*
Polivinilo (espuma)		*-100*	*0,032*
		0	*0,043*
Vermiculita	*0,216*	*-100*	*0,038*
		0	*0,055*

braciones de la instalación, cuidados que deben ser tanto mayores cuanto menores sean las temperaturas de funcionamiento.

Los problemas de humedad han dado origen al desarrollo de materiales de estructura celular o expandidos, conocidos como espumas, de tipo inorgánico (vidrios y cementos) u orgánico (poliestireno, cloruro de polivinilo, uretanos)

Los poros contienen aire o gases de baja conductividad y, por sus dimensiones, la convección es prácticamente despreciable; la fase gaseosa ocupa un elevado volumen del material, la conducción es el mecanismo que predomina, y estos materiales son sensibles al envejecimiento; una disminución de su resistencia al vapor de agua afecta notablemente a sus propiedades aislantes.

El *aislamiento con capas múltiples* se logra con fibras o polvos de baja conductividad térmica, entre láminas de Al de baja emisividad; estos materiales son también sensibles a la humedad por lo que es frecuente la necesidad de hacer un vacío, tanto mayor cuanto menor es la temperatura.

Con estructuras de 60 capas/cm se pueden obtener conductividades térmicas del orden de $1{,}54.10^{-5}$ (Kcal/hmºC).

Los materiales en polvo se utilizan también para temperaturas bajas en vacío, la conducción se hace a través del material del aislamiento rodeado de una capa de gas, lográndose un sistema equivalente al aislamiento de capas múltiples; presenta la ventaja de utilizar vacíos moderados, de 0,01 mm de Hg, si bien hay que asegurar la ausencia de humedad.

Con tierra de diatomeas, o perlita se pueden obtener conductividades térmicas equivalentes, tal como se indica en la Tabla A-3.

AISLAMIENTOS EN EDIFICIOS.- Las personas desarrollan sus actividades físicas e intelectuales con esfuerzo mínimo cuando disponen de un clima agradable, por lo que los edificios deben estar protegidos para las temperaturas extremas en invierno y en verano, con unas condiciones de humedad adecuadas en el aire y ausencia de gases nocivos.

Como el consumo racional de energía, en cualquier sistema, impone la necesidad de buenos aislamientos, el acondicionamiento climático de las casas se debe estudiar en el doble aspecto humano y energético. El aislamiento térmico de un edificio depende de las estructuras utilizadas en su construcción, proporciones volumétricas, orientación, huecos de ventanas, puertas, etc.

Normalmente se introducen aislamientos suplementarios en conjuntos normalizados, de lana de vidrio o roca, materiales de estructura celular o mezclas con cementos; dada la variedad de estructuras de materiales compuestos que se utilizan en la construcción, se insiste en el análisis térmico de estas estructuras porque los efectos de la humedad alteran considerablemente las hipótesis de cálculo.

La energía (calor o frío) necesaria para acondicionar un edificio se puede estimar en primera

aproximación, compuesta de tres factores: $\begin{cases} Ventilación \\ Pérdidas\ por\ paredes \\ Orientación \end{cases}$

El calor de ***ventilación*** se expresa por la ecuación:

$q_{vent} = c_p\ V_{aire}\,(T_{int} - T_{ext})$, *en la que* $\begin{cases} V_{aire}\ \text{es el volumen de aire a renovar} \\ T_{int}\ \text{y}\ T_{ext}\ \text{son las temperaturas interior y exterior respectivamente} \\ c_p\ \text{es el calor específico a presión constante} \end{cases}$

Las pérdidas por las ***paredes*** son de la forma:

$q_{pérd} = U\,A\,(T_{int} - T_{ext})$

siendo: U el coeficiente global de transmisión de calor para la estructura considerada, con aire a temperatura T_{int} *en el interior del edificio y* T_{ext} *en el exterior.*

Las pérdidas por *orientación* q_{orient} se expresan en % de las pérdidas por las paredes

El *calor total* necesario es: $q = q_{vent} + q_{pérd} + q_{orient}$

En las Tablas A-4 siguientes se indican los valores necesarios para calcular los términos de la ecuación anterior para elementos estructurales simples.

Tabla A-4.- Coeficientes totales de transmisión de calor expresados en Kcal/hm²ºC

PAREDES EXTERIORES	*Espesor, cm*	*Coeficiente total* k_c *(Kcal/hmºC*
Piedra dura con revestimiento interior	*30*	*2,4*
	45	*2,06*
	60	*1,72*
Piedra semidura con revestimiento interior	*30*	*2,15*
	45	*1,97*
	60	*1,63*
Ladrillo macizo con revestimiento interior	*30*	*1,29*
	45	*1,03*
	60	*0,94*
Ladrillo hueco revestido por las dos caras	*15*	*1,54*
	20	*1,37*
	30	*0,94*
Hormigón composición normal	*12*	*1,97*
	20	*1,37*
	30	*1,11*
Ladrillos huecos de hormigón	*40*	*1,03*

PAREDES EXTERIORES COMPUESTAS *Composición de la pared*	*Espesor total* *cm*	*Coeficiente total* k_c *(Kcal/hmºC*
Ladrilo macizo + cámara de aire de 5 cm + *+ pared interior de ladrillo hueco de 5 cm +* *+ revestimiento de 2 cm*	*20* *35* *45*	*1,37* *1,03* *0,86*
Idem, con aislante de 7 cm	*20* *35* *45*	*0,86* *0,77* *0,68*

Ladrillo hueco revestido + cámara de aire de 9 cm + + ladrillo hueco de 5 cm + revestimiento 2 cm	*25* *30* *40*	*1,1* *0,94* *0,77*
Idem, con aislante de 7 cm	*30* *35* *40*	*0,77* *0,68* *0,68*

SUELOS Y TECHOS	*Espesor total cm*	*Coeficiente total k_c (Kcal/hm°C*
Suelo madera *Techo, vigas madera*	*20 a 25*	*Suelo: 1,63* *Techo: 1,8*
Suelo madera sobre ladrillo *Techo listones madera, con yeso, vigas madera, ladrillo*	*20 a 25*	*Suelo: 0,86* *Techo: 0,94*
Suelo madera sobre hormigón *Techo, yeso, vigas hierro, hormigón*	*20 a 25*	*Suelo: 0,86* *Techo: 0,94*
Suelo madera sobre bovedilla ladrillo *Techo, yeso, vigas hierro, bovedilla ladrillo*	*20 a 25*	*Suelo: 0,86* *Techo: 0,94*
Suelo vidrio *Techo, vigas hierro, vidrio*	*3*	*Suelo: 3,18* *Techo: 3,87*
Suelo madera sobre vigas de hormigón armado *Techo, yeso, zona intermedia hormigón*	*25*	*Suelo: 0,04* *Techo: 1,11*
Suelo madera sobre cemento *Techo, yeso, zona intermedia hormigón*	*25*	*Suelo: 1,97* *Techo: 2,06*
Suelo madera sobre vigas de hormigón armado *Techo, yeso zona intermedia, cuña cerámica*	*25*	*Suelo: 0,86* *Techo: 1,03*

PAREDES INTERIORES	*Espesor total cm*	*Coeficiente total Kcal/hm²°C*
Ladrillo macizo	*10* *15* *25* *35*	*2,06* *1,89* *1,37* *1,03*
Ladrillo hueco	*10* *15* *35*	*1,72* *1,37* *1,03*
Hormigón	*25* *40*	*1,8* *1,48*

PUERTAS Y VENTANAS	*Coeficiente total Kcal/hm²°C*
Ventana exterior de madera (30% madera, cristal simple)	*4,98*
Ventana exterior metálica	*6,02*
Ventana exterior de madera y cristal doble	*3,18*
Ventana exterior metálica y cristal doble	*3,69*
Ventana doble de madera	*3,18*
Ventana doble metálica	*3,18*
Ventanas interiores de madera	*3,09*
Ventanas interiores metálicas	*3,61*
Puerta madera	*3,18*
Puerta metálica	*6,27*
Puertas interiores de madera	*2,49*
Puertas interiores de madera de doble pared	*1,97*

AZOTEAS	*Espesor total cm*	*Coeficiente total Kcal/hm²°C*
Suelo de losetas cerámicas *Vigas de hormigón armado* *Techo de yeso* *Zona entre suelo y techo cuñas cerámicas*	*30*	*Suelo y techo* *1,4*
Suelo de losetas cerámicas *Vigas de hormigón armado* *Techo de yeso*	*20*	*Suelo y techo* *2,4*

Suelo de cemento	*5*	*4,5*
Vigas de madera	*10* *15*	*4* *3,6*
Pizarra con recubrimiento		*5,8*
Placas de uralita sobre madera		*4,4*

ORIENTACIÓN: En paredes orientadas al N, NE y NO aumentar un 10%

CLIMA: En zonas húmedas, en paredes exteriores aumentar un 10%

VIENTOS.- Para velocidades de $\begin{cases} 4\ m/seg, \text{ aumentar un } 5\% \\ 8\ m/seg, \text{ aumentar un } 10\% \\ 20\ m/seg, \text{ aumentar un } 15\% \end{cases}$

PAREDES EXTERIORES: En $\begin{cases} 2 \text{ paredes contiguas en ángulo recto aumentar un } 20\% \\ 2 \text{ paredes opuestas entre sí aumentar un } 30\% \\ 3 \text{ paredes unidas entre sí aumentar un } 40\% \\ 4 \text{ paredes unidas entre sí aumentar un } 50\% \end{cases}$

ALTURAS: $\begin{cases} \text{Hasta } 4\ m \text{ aumentar } 2\% \\ \text{Para alturas superiores a } 4\ m \text{ aumentar un } 4\%, \text{ hasta un máximo del } 20\% \end{cases}$

VENTILACIÓN.- Salas comunes renovación de $\begin{cases} 25\ m^3/h \text{ para locales de } 0 \div 100\ m^3 \\ 20\ m^3/h \text{ para locales de } 100 \div 500\ m^3 \\ 15\ m^3/h \text{ para locales de } 500 \div 1000\ m^3 \end{cases}$

EJEMPLO.- Estimar las pérdidas de calor en una nave de las siguientes características:

- 7 x 12 m^2 de superficie; orientación NE y NO para la dimensión de 12 m; la longitud de 7 m es una pared medianera a otras naves a 15°C

- 3 plantas de 3,8 m de altura con 36 ventanas metálicas de doble vidrio de 2x1 m^2, 18 en cada fachada.

- Azotea compuesta de suelo de losetas cerámicas, vigas de hormigón armado con cuñas cerámicas y enlucido de yeso interior.

- Suelo de la nave de cemento de 20 cm de espesor.

- Puerta de entrada metálica de 4 x 3,5 m^2

- Renovación de aire 25 m^3/h cada 100 m^3 .

- Temperatura interior 22°C, y temperatura mínima exterior 0°C; funcionamiento continuo.

- Paredes fachada y medianeras de ladrillo hueco, cámara de aire y aislamiento de 7 cm con espesor total de 40 cm

RESOLUCIÓN:

- Volumen interior aproximado: $7 \times 12 \times 3 \times 3,8 = 957,6\ m^3$

- Calor ventilación: $q_{ventilación} = 0,29\ \frac{Kcal}{m^3\ ºC} \times 25 \times 9,596\ \frac{m^3}{h} \times (22 - 0)ºC = 1530,56\ \frac{Kcal}{h}$

- Pérdidas en ventanas: $q_{ventanas} = 36 \times 2\ m^2 \times 3,69\ \frac{Kcal}{hm^2\ ºC} \times (22 - 0)ºC = 5845\ \frac{Kcal}{h}$

- *Pérdidas en puertas:* $q_{puertas} = 4 \times 3{,}5\ m^2 \times 6{,}27\ \frac{Kcal}{hm^2\,ºC} \times (22 - 0)ºC = 1931{,}2\ \frac{Kcal}{h}$

- *Pérdidas en suelo nave:* $q_{suelo} = 96\ m^2 \times 3{,}6\ \frac{Kcal}{hm^2\,ºC} \times (22 - 0)ºC = 7603{,}2\ \frac{Kcal}{h}$

- *Pérdidas en la azotea:* $q_{azotea} = 96\ m^2 \times 1{,}3\ \frac{Kcal}{hm^2\,ºC} \times (22 - 0)ºC = 2745{,}6\ \frac{Kcal}{h}$

- *Pérdida paredes fachada:* $q_{fachada} = 187{,}6\ m^2 \times 0{,}68\ \frac{Kcal}{hm^2\,ºC} \times (22 - 0)ºC = 2806{,}5\ \frac{Kcal}{h}$ *, en la que la superficie de la fachada es:* $12 \times 3{,}8 \times 3 \times 2 - (36 \times 2) - (4 \times 3{,}5) = 187{,}6\ m^2$

- *Pérdidas paredes medianeras:* $q_{p.\ medianera} = 2 \times 7 \times 3{,}8\ m^2 \times 0{,}68\ \frac{Kcal}{hm^2\,ºC} \times (22 - 15)ºC = 253{,}2\ \frac{Kcal}{h}$

- *Pérdidas por orientación:* $2806{,}5 \times 0{,}1 = 280{,}6\ \frac{Kcal}{h}$

- *Pérdidas por disposición:* $2806{,}5 \times 0{,}3 = 841{,}95\ \frac{Kcal}{h}$

- ***Calor total*** $= 1530{,}56 + 5845 + 1931{,}2 + 7603{,}2 + 2745{,}6 + 2806{,}5 + 187{,}6 + 253{,}2 + 280{,}6 + 841{,}95$

$= 24025\ \frac{Kcal}{h}$

AISLAMIENTOS PARA TEMPERATURAS CRIOGÉNICAS.- Los materiales para aislamientos a temperaturas muy bajas son, en general, los mismos que para temperaturas bajas, con la salvedad de una mayor calidad, distribución de estructuras, vacíos superiores y perfección de las instalaciones.

Los tipos de aislamientos más frecuentes son: $\begin{cases} Reflectores\ con\ vacío \\ Capas\ múltiples \\ Polvos \end{cases}$

Los *reflectores* son metales muy pulidos, con emisividades muy bajas, del orden de 0,01; estos metales se obtienen por:

- *Deposición en los más caros como oro o plata*
- *Pulido con eliminación de vestigios de impurezas de grasa o aceites en materiales estructurales de cobre o aluminio*

La transmisión de calor por conducción en el gas del medio, se reduce haciendo un vacío superior a 0,001 mm de Hg.

Las pérdidas por conducción se calculan por la ecuación de Kundsen para gases en vacío, de la forma:

$$\frac{q}{A} = k_{acom.}\ \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}\ \sqrt{\frac{R}{8\,\pi\,M\,T}}\ p\,(T_1 - T_2)$$

en la que: $T = \frac{T_1 + T_2}{2}$ *es la temperatura media,* γ *el coeficiente adiabático, p la presión del gas, M su peso molecular, A la superficie de intercambio térmico y* $k_{acom.}$ *el coeficiente de acomodación de la forma:*

$$k_{acom.} = \frac{1}{\frac{1}{k_{acom(1)}} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{k_{acom(2)}} - 1\right)}$$

siendo $k_{acom(1)}$ y $k_{acom(2)}$ los coeficientes de acomodación a las temperaturas T_1 y T_2, y que definen los intercambios de energía entre las moléculas del gas y la superficie.

En superficies limpias metálicas a 300ºK, $\begin{cases} k_{acom.} = 0{,}3 \text{ para el } H_2 \text{ y el He} \\ k_{acom.} = 0{,}7 \text{ para el Ne} \\ k_{acom.} = 0{,}8 \div 0{,}9 \text{ para el } N_2 \text{ y el } O_2 \end{cases}$; en el punto de licuación del gas, tienden a la unidad.

En los aislamientos de *capas múltiples*, se disponen capas alternadas de láminas de Al con láminas de fibra de vidrio de 0,01 mm de espesor, formando conjuntos de $15 \div 40 \ \frac{capas}{cm}$ y una densidad global de $50 \div 300$ kg/m^3.

- La resistencia térmica a la radiación la dan las láminas de Al

- La resistencia a la conducción la proporciona el material de fibra de vidrio

Para aumentar la resistencia a la conducción, se hace el vacío en el sistema, obteniéndose valores de la conductividad térmica equivalente:

- Desde $2{,}6.10^{-3}$ Kcal/hmºC, a 0,0001 mm de Hg

- Hasta 2.10^{-5} Kcal/hmºC a 0,00001 mm de Hg

para un intervalo de temperaturas de la pared fría comprendido entre 20ºK y 75ºK.

Las conductividades térmicas de los *materiales pulverulentos* de bajas temperaturas son del orden de $2{,}4.10^{-3}$ (Kcal/hmºC), con densidades de 100 kg/m^3, y de naturaleza:

- Orgánica, como esférica fenólicas

- Inorgánica, como perlita, obtenida por calcinación de rocas volcánicas con agua de cristalización

- Aerogel de sílice, obtenido por vaporización de gel de sílice con expansión y condensación posterior

Su resistencia a la radiación se puede aumentar por recubrimiento con polvo de Al, obteniéndose conductividades del orden de 4.10^{-4} Kcal/hmºC.

El vacío aumenta la resistencia a la conducción, y con valores 100 veces inferiores al vacío de capas múltiples, del orden de 0,001 mm de Hg, se obtienen conductividades térmicas equivalentes con gel de sílice de $4{,}5.10^{-4}$ Kcal/hmºC.

Los polvos presentan la desventaja de la abrasión, propiedades higroscópicas y combustión con aire si son orgánicos, consideraciones a tener en cuenta en la elección y diseño de estos aislamientos.

- Los aislamientos tipo multicapa se utilizan frecuentemente para líquidos de bajas temperaturas de

ebullición He (4,21°K), H_2 (20,39°K), Ne (27,07°K)

- Los polvos se usan para líquidos de temperaturas de ebullición superiores, Aire (78,8° a 81,8°K), Ar (87,27°K), N_2 (77,35°K), O_2 (90,19°K), CO (81,63°K), CH_4 (71,73°K)

Tabla A-5.- Materiales aislantes para temperaturas criogénicas (-270°C < T < -100°C)

Cuerpos reflectores				
Material	*T(°K)*	*ε (%)*	*T(°K)*	*ε (%)*
Aluminio	*5*	*1,1*	*100*	*1,8*
Bronce	*5*	*1,8*	*100*	*2,9*
Cobre	*5*	*0,5*	*100*	*0,8*
Oro			*100*	*1*
Plata	*5*	*0,4*	*100*	*0,4*

POLVOS	*ϕ mm*	*Densidad kg/m³*	*Temperat. °K*	*Vacío mm de Hg*	*$k_c.10^3$ Kcal/hm°C*
Aerogel	*0,25*	*120*	*20*	*0,001-0,1*	*-1,97*
Sílice	*0,005*	*180*	*90*	*0,001-0,1*	*0,7-1,46*
Perlita expandida	*0,25*	*250*	*90*	*0,001-0,1*	*0,58-2,7*
Vermiculita	*0,2*	*280*	*90*	*0,001*	*3,26*
Lana de vidrio	*0,018*	*160*	*90*	*0,001-0,1*	*4-1,4*

MATERIAL EN CAPAS MÚLTIPLES		*Densidad kg/m³*	*Temper. °K*	*$k_c.10^3$ Kcal/hm°C*
Emparedado de 70 capas, espesor total 3,3 cm de	*papel de fibra de vidrio de 0,3 mm* / *láminas de Al de 0,006 mm*	*120*	*20* / *70*	*0,34* / *0,47*
Emparedado de 75 capas, espesor total 3,5 cm de	*papel de fibra de vidrio de 0,12 mm* / *láminas de Al de 0,127 mm*	*110*	*20* / *70*	*0,37* / *0,44*
Emparedado de 96 capas, espesor total 5 cm de	*papel de fibra de vidrio de 0,3 mm* / *láminas de Al de 0,006 mm*	*120*	*70*	*0,94*
Emparedado de 24 capas/cm y vacío de 0,001 mm de Hg con	*tejido de Nylon (0,15 mm)* / *láminas de Al (6 ,3÷13).10 $^{-3}$mm*	*90*	*70*	*0,2*