

LA CÁMARA DE AIRE, "MATERIAL" AISLANTE.

En el campo de la construcción estamos acostumbrados a utilizar materiales específicos para aislamiento térmico que calculamos y utilizamos sobre la base de una serie de hipótesis de partida simplificadoras que nos facilitan en gran medida, y de forma suficientemente aproximada, la evaluación de su capacidad aislante.

Una vez puestos en obra, los materiales específicamente aislantes son sólidos y en ellos la transmisión real de calor podemos asimilarla a un proceso de conducción pura.

Para aproximarnos a evaluar su comportamiento térmico les asignamos un coeficiente de transmisión de calor por conducción llamado *conductividad*, que determina la cantidad temporal de flujo de calor sobre una unidad de superficie, a través de una unidad de espesor homogéneo de material, en dirección perpendicular a los planos isotermos, inducida por un gradiente térmico de una unidad de temperatura. Las unidades que utilizamos son vatios, metro y grado kelvin, del sistema internacional.

Aunque la conductividad real de un material no es un valor constante, en la práctica le asignamos a la conductividad, y a su inversa la resistividad, un valor de diseño constante, y en un símil del cálculo estructural podríamos decir que característico puesto que no utilizamos coeficientes de seguridad, ligado explícitamente a sus posibles densidades, determinado mediante ensayo en condiciones normalizadas que fijan los valores de las demás variables reduciéndolas a constantes.

Entre las variables que reducimos a constantes cabe destacar el gradiente térmico y la temperatura media, por lo que todos los cálculos que realizamos están basados en mediciones en régimen de flujo estacionario, inexistente en la realidad.

Además de los materiales específicamente aislantes nos encontramos en la práctica constructiva con otro "material", también específicamente aislante, que no es sólido sino gaseoso: La cámara de aire.

Los gases en general, y el aire (considerado como gas) en concreto, presentan muy baja transmisión térmica por conducción, inferiores en general a las de los mejores materiales aislantes. De hecho, éstos basan su poder aislante en la existencia en su masa de grandes cantidades de aire, u otros gases, encapsulados en pequeños espacios, o células, cerrados.

Pero el proceso de transmisión de calor a través de un gas no es asimilable a una transmisión de calor por conducción exclusivamente. En los gases se hacen efectivas transmisiones de calor por convección, ligada a la conducción, y por radiación, independiente de las dos anteriores, de tal entidad que hacen inviable la asunción de las hipótesis simplificadoras de cálculo empleadas para los materiales sólidos.

Para poder evaluar la transmisión térmica a través de las cámaras de aire deberemos olvidarnos, en un principio, de las cómodas facilidades que nos proporcionan las hipótesis simplificadoras válidas en el caso de aislantes sólidos y replantearnos el problema de la transmisión de calor desde sus principios con el objeto de obtener reglas o pautas que nos faciliten el empleo, fiablemente evaluado, de la cámara de aire como material aislante de altas prestaciones.

Comenzaremos por analizar el proceso que se desarrolla en la transmisión de calor a través de las cámaras de aire.

Una vez conocido este proceso, podremos considerar qué factores podemos corregir, más o menos fácilmente, para potenciar su capacidad aislante, y como evaluarla de forma operativa.

Para comenzar el análisis de las cámaras de aire las definiremos como un espacio limitado por dos superficies, básicamente planas y lisas, paralelas entre sí y perpendiculares a la dirección del flujo de calor, con espesores (perpendiculares al flujo de calor) inferiores al 10% de cualquiera de las otras dos dimensiones y siempre menores de 30 cm, que contienen aire de forma estanca, sin intercambio con el aire exterior a la cámara.

Con estas premisas, podemos considerar las cámaras de aire como térmicamente homogéneas, y por tanto podremos sumar su resistencia térmica a las del resto de las capas sólidas, también térmicamente homogéneas, que constituyan un cerramiento. La transmitancia total U del cerramiento será la inversa de la suma de las resistencias de las distintas capas homogéneas incluyendo las resistencias térmicas superficiales interior y exterior.

En el caso de que las superficies que delimitan la cámara no sean paralelas, la resistencia térmica varía sobre la superficie de la cámara y ésta no es térmicamente homogénea, por lo que se requiere un cálculo específico para estos casos que pondere la variación de la resistencia térmica en función de la superficie.

En el caso de que exista flujo de aire a través de la cámara, esta deberá considerarse ventilada, ligeramente o muy ventilada, y su resistencia térmica se verá mermada de forma importante.

Una vez definidas las condiciones que debe satisfacer la cámara de aire para que pueda ser considerada como una capa homogénea de un cerramiento multicapa y su resistencia térmica pueda ser sumada a las del resto de las capas necesitamos establecer la resistencia térmica de las cámaras de aire, que según la EN ISO 6946 "Elementos y componentes de edificación. Resistencia y transmisión térmica. Método de cálculo", está dado por la expresión:

$$R_g = 1 / (h_a + h_r) \quad (1)$$

Donde:

R_g es la resistencia térmica de la cámara.

h_a es el coeficiente de conducción-convección.

h_r es el coeficiente de radiación.

Esta expresión nos indica de forma analítica que la resistencia térmica de una cámara de aire es inversamente proporcional a la transmisión de calor a su través debida a fenómenos de conducción-convección combinadas y a la transmisión de calor por radiación de forma independiente: en lo que se refiere a las cámaras de aire de edificios, ambas pueden variar con independencia entre sí.

Teniendo en cuenta que la resistencia a la transmisión de calor por conducción del aire es muy elevada y que los movimientos convectivos están muy limitados por la resistencia que ofrece el reducido espesor de la cámara, por lo menos en espesores menores de 4 cm, se puede afirmar que la transmisión de calor en una cámara de aire estrecha, menor de 4 cm, se debe principalmente a la transmisión por radiación entre las dos paredes de la cámara.

La transmisión de calor por radiación, a través de una cámara de aire, está condicionada por la temperatura media, por el gradiente de temperatura entre las superficies limítrofes y por las propiedades de éstas superficies.

La EN ISO 6946 establece:

$$h_r = E h_{r0} \quad (2)$$

Donde:

E es el factor de emisividad entre las superficies, o emisividad efectiva de la cámara.

h_{r0} es el coeficiente de radiación para una superficie o cuerpo negro a una temperatura dada. Sus valores, basados en ensayos, están dados en la Tabla A-1 de la EN-ISO 6946:

Valores del coeficiente de radiación para un cuerpo negro h_{ro}

Temperatura °C	h_{ro} W / (m ² K)
-10	4,1
0	4,6
10	5,1
20	5,7
30	6,3

Dado que h_{ro} depende exclusivamente de la temperatura, y estamos refiriéndonos a aislamientos para edificaciones con rangos de temperatura muy limitados, no podemos incidir en su valor a efecto de reducir notablemente la transmisión de calor por radiación en las cámaras de aire.

Es importante observar que el calor transmitido por radiación a través de una cámara de aire no está afectado por el espesor de la cámara, su posición o el sentido del flujo de calor.

Analicemos ahora el segundo factor de la ecuación (2): el factor de emisividad entre superficies E.

Para superficies que puedan ser consideradas cuerpos grises ideales, las propiedades superficiales están caracterizadas por la emisividad.

(En los cuerpos grises ideales la absorbancia "a" es igual a la emisividad "e". Si además son cuerpos opacos, la absorbancia "a" y la reflectancia "r" suman la unidad. Por tanto en los cuerpos grises opacos se cumple: emisividad e + reflectancia r = 1.)

La *emisividad* "e" de una superficie es la relación entre el flujo radiante emitido por la superficie y el flujo emitido por un cuerpo negro a la misma temperatura y en las mismas condiciones. Es, por tanto, adimensional.

El factor de emisividad E de una cámara de aire expresa el efecto combinado de las emisividades de las superficies limítrofes en sus dos caras. También se conoce como emisividad efectiva de la cámara de aire.

El factor de emisividad E entre dos superficies es función de las emisividades "e₁" y "e₂" de las superficies que la delimitan y analíticamente quede definida así:

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1 \quad (3)$$

Los materiales de construcción "corrientes", en expresión de la NBE-CT/79, tienen una emisividad de 0,90, por lo que la emisividad efectiva "E" de las cámaras de aire que conforman es de 0,82. Teóricamente, el empleo de materiales "no tan corrientes", en términos NBE-CT/79, que sabemos que existen, con emisividades inferiores a 0,90 nos permitiría reducir el segundo factor de la ecuación (2) y reducir así el valor de la transmisión térmica por radiación en las cámaras de aire. Los valores de los factores de emisividad E que obtendríamos combinando superficies con distintas emisividades comprendidas entre 0,90 y 0,03 serían, aplicando la ecuación (3):

Valores del factor de emisividad E entre superficies de emisividades e₁ y e₂

e ₁ \ e ₂	0,90	0,40	0,10	0,05	0,03
0,90	0,82	0,38	0,09	0,05	0,03
0,40	0,38	0,25	0,09	0,05	0,03
0,10	0,09	0,09	0,05	0,03	0,02
0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02
0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02

La colocación de las emisividades (superficie caliente o fría) no afecta al factor de emisividad E ni, por tanto, al flujo de calor transmitido por radiación.

Pero podemos pasar de la teoría a la práctica porque hoy en día existen algunos materiales de construcción, que afortunadamente ya son "corrientes", con emisividades superficiales muy inferiores a 0,9.

Como ejemplos podemos citar el vidrio Planitherm^R de Saint-Gobain Cristalería (e = 0,10) utilizado para aumentar la resistencia térmica de las cámaras de aire de los dobles y triples acristalamientos y el aislamiento termo reflexivo Super Polynum^R de Optimer (e = 0,03) utilizado para aumentar la resistencia térmica de las cámaras de aire estancas que delimitan en cerramientos opacos.

Volviendo a la ecuación (1), hemos visto que la transmisión por conducción-convección se evalúa por el coeficiente de transmisión h_a , muy condicionado por la posición de la cámara de aire, determinante de dirección y sentido del flujo de calor, y por el espesor de la cámara.

Su valor, determinado experimentalmente, no figura explícitamente en la EN ISO 6946.

Pero, como ya hemos dicho, es independiente del coeficiente de transmisión por radiación h_r .

Por tanto podremos conocer sus valores, a partir de las ecuaciones (1) y (2):

$$R_g = 1 / (h_a + h_r) \quad \rightarrow \quad h_a = (1 / R_g) - h_r \quad (1bis) \quad \rightarrow \quad h_a = (1 / R_g) - E h_o \quad (4)$$

$$h_r = E h_{ro} \quad (2) \quad \rightarrow$$

si conociéramos R_g y h_r para un caso concreto.

Como en la misma EN ISO 6946 sí figuran explícitamente los valores de la resistencia térmica de cámaras de aire sin ventilar formadas por superficies de alta emisividad, en su Tabla 2:

**Resistencia térmica (m² K / W) de cámaras de aire estancas:
superficies de alta emisividad**

Espesor de la cámara de aire mm	Dirección del flujo de calor		
	Hacia arriba	Horizontal	Hacia abajo
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

Los valores intermedios se pueden obtener por interpolación lineal.

Admitiendo que los valores de la tabla se basan en un factor de emisividad E de 0,82 (superficies de alta emisividad e = 0,9), a una temperatura de 10 °C ($h_{ro} = 5,1$), deducimos de (4) la siguiente tabla de valores para el coeficiente de transmisión de calor por conducción-convección:

Coefficiente de transmisión por conducción-convección h_a ($m^2 K / W$)
Cámaras de aire estancas

Espesor de la cámara de aire mm	Dirección del flujo de calor		
	Hacia arriba	Horizontal	Hacia abajo
5	4,91	4,91	4,91
7	3,51	3,51	3,51
10	2,48	2,48	2,48
15	2,07	1,70	1,70
25	2,07	1,37	1,08
50	2,07	1,37	0,58
100	2,07	1,37	0,36
300	2,07	1,37	0,17

Los valores intermedios se pueden obtener por interpolación lineal.

Podemos observar que la resistencia térmica de las cámaras de aire a la transmisión por conducción -convección crece con el espesor de la cámara hasta un determinado valor, dependiente de la dirección y sentido del flujo, a partir del cual se mantiene estable.

Para aprovechar mejor la capacidad aislante de una cámara de aire existente en una solución constructiva determinada podremos subdividirla en cámaras más estrechas, mediante "cortinas" con ambas superficies de baja emisividad ($e < 0,05$), adecuadamente selladas entre sí para garantizar la estanqueidad al aire entre las cámaras.

Determinados los valores de h_a y h_r , ya podemos evaluar analíticamente, y modificar incidiendo en el espesor y el factor de emisividad, los valores de la resistencia térmica de las cámaras de aire estancas, térmicamente homogéneas, a partir de la ecuación (1), para sumarlas a las resistencias del resto de las capas que con ellas constituyan un cerramiento multicapa y a las resistencias térmicas superficiales. El valor de la transmitancia U del cerramiento será el inverso de esta suma total.

Así , por ejemplo, para cámaras de aire estancas con factor de emisividad 0,05 y 10 °C de temperatura media, obtendremos la siguiente tabla de valores:

Resistencia térmica ($m^2 K / W$) de cámaras de aire estancas:
Factor de emisividad 0,05
Temperatura media 10 °C

Espesor de la cámara de aire mm	Dirección del flujo de calor		
	Flujo vertical ascendente	Flujo horizontal	Flujo vertical descendente
10	0,36	0,36	0,36
15	0,42	0,50	0,50
25	0,42	0,59	0,72
50	0,42	0,59	1,12
100	0,42	0,59	1,47
300	0,42	0,59	2,08

Los valores intermedios se pueden obtener por interpolación lineal.

Resulta muy práctico poder analizar y consultar los valores de la resistencia térmica de las cámaras de aire sobre gráficas en las que el eje de abscisas contenga los espesores de la cámara y el de ordenadas las resistencias térmicas correspondientes para diferentes valores del resto de las variables: factor de emisividad, temperatura media y gradiente de temperatura entre sus superficies limítrofes, para diferentes direcciones y sentidos del flujo de calor.

Presentamos cinco gráficas en las que se repiten los mismos ejes de coordenadas.

Es interesante poder verlas en conjunto para poder compararlas y apreciar visualmente los efectos de la variación de cada uno de los factores que determinan la resistencia térmica, manteniendo constantes los demás.

Los ejes de abscisas, ejes horizontales, representan los espesores medidos en milímetros, desde cero, en el origen, hasta 90 mm.

Los ejes de ordenadas, ejes verticales, representan resistencias térmicas en $m^2 K/W$, desde cero hasta 2, aunque en algunos casos se supera este valor.

La razón de que tengamos cinco gráficas diferentes es que cada una de ella contiene datos relativos a un sentido de flujo de calor diferente.

Tenemos por tanto cinco sentidos de flujo, uno por gráfica.

En primer lugar, flujo de calor ascendente vertical.

En segundo lugar flujo de calor ascendente a 45 grados.

En tercer lugar flujo de calor horizontal.

En cuarto lugar flujo de calor descendente a 45 grados.

En quinto lugar flujo de calor descendente vertical.

Para todos los cálculos se parte de dos hipótesis básicas:

1ª el flujo es estacionario, lo que significa que las temperaturas, exterior e interior, permanecen constantes.

2ª el flujo de calor es perpendicular al cerramiento.

Por tanto, también podríamos decir que las cinco gráficas se refieren a:

Cerramientos horizontales (cubiertas en invierno o forjados sobre espacio exterior o no calefactado en verano), la primera.

Cerramientos inclinados 45 grados (cubiertas muy inclinadas en invierno), la segunda.

Cerramientos verticales la tercera; cerramientos inclinados 45 grados (cubiertas en verano), la cuarta.

Y, finalmente, cerramientos horizontales (cubiertas en verano o forjados sobre espacio exterior o no calefactado en invierno), la quinta.

En todas las gráficas aparece resaltada la recta horizontal correspondiente a la ordenada de valor uno, que corresponde a la unidad de resistencia térmica y por tanto coincide con la unidad de su inversa, la transmitancia térmica U . Valores de resistencia térmica por encima de esta recta implicarán valores de transmisión térmica inferiores a la unidad.

Además, en cada gráfica están resaltadas las rectas horizontales correspondientes a los límites que exige la actual normativa para los tipos de cerramientos a que se refiere, siempre en condiciones de invierno que son las únicas que especifica la CT-79.

(Hay que tener en cuenta que esta norma se publicó con el objeto de procurar el ahorro energético y en los años 70 apenas había instalaciones de aire acondicionado. Las circunstancias han variado y en el verano de 2.004, coincidiendo con la ola de calor, se produjo el máximo consumo de electricidad diario, que por otra parte ya ha sido superado con la última ola de frío de enero de 2.005. Hoy en día, el aislamiento en condiciones de verano debería ser tenido en cuenta tanto como el de invierno por la normativa y por el buen criterio del proyectista, independientemente de lo que exija la norma.)

En todas las gráficas aparecen las mismas líneas rectas inclinadas con diferentes pendientes y que pasan por el origen de coordenadas. Con los ejes adoptados, espesor y resistencia térmica, estas pendientes constantes corresponden a diferentes resistividades (la inversa de la conductividad d/R , que es la cotangente de las rectas).

Como ya hemos visto, aunque los valores reales de la conductividad de los materiales no son constantes, varía con la temperatura media y con el gradiente de temperatura, por ejemplo, admitimos la simplificación de asignarle valores de diseño constantes, que en el caso de la CT-79 corresponden a temperaturas medias de 10 grados.

Dado que la conductividad de los materiales no depende del sentido del flujo de calor, las rectas se repiten de forma idéntica en todas las gráficas.

Cada pendiente corresponde a una resistividad y aquí figura un abanico, desde 0,024 hasta 0,057 de conductividad, que abarca los valores de los materiales aislantes comúnmente empleados en construcción.

A mayor pendiente de la recta corresponde mayor poder aislante. Inversamente, a menor pendiente corresponde menor capacidad aislante.

Su presencia nos permite comparar la capacidad aislante de las cámaras de aire con las que proporcionan el resto de los materiales específicamente aislantes.

Por otro lado podemos observar, en diferentes colores, líneas quebradas que varían en las cinco gráficas.

Representan la relación entre el espesor y la resistencia térmica de diferentes cámaras de aire según datos experimentales de ASHRAE publicados en 2.001, y corresponden a cámaras de aire de espesor uniforme, limitadas por planos lisos, superficies paralelas y estancas, es decir térmicamente homogéneas.

Figuran con cinco colores distintos, cada uno corresponde a un factor de emisividad diferente.

Para cada factor de emisividad figuran dos valores: representan diferentes saltos térmicos con una misma temperatura media de 10 °.

En línea negra figuran los valores obtenidos de EN ISO 6946, que coinciden aproximadamente con los de ASHRAE.

Observando el conjunto podemos apreciar fácilmente, de izquierda a derecha, como a medida que la convección natural, aire caliente ascendente, se opone al sentido del flujo que queremos evitar la resistencia térmica de la cámara aumenta considerablemente.

La resistencia térmica de las cámaras horizontales con flujo de calor descendente es, básicamente, independiente del salto térmico (líneas del mismo color muy cercanas). En el resto de los casos existe una diferencia apreciable, lo que implica que el valor de la resistencia individual que se debe computar, para cámaras de aire múltiples, debe adecuarse al salto térmico real. Cada cámara de aire requiere un cálculo individual de su resistencia que se aplique a las condiciones limítrofes (salto térmico) establecidas. Podríamos decir que, dado que al disminuir el salto térmico la resistencia térmica aumenta, si dividimos una cámara de resistencia "R" y espesor "d" en dos cámaras de espesor "d / 2", manteniendo todos lo demás parámetros constantes, excepto el salto térmico ΔT que sería $(\Delta T) / 2$ para cada una de las cámaras, obtendremos una resistencia térmica total de las dos cámaras mayor que "R".

Señalado con un círculo y una cruz podemos ver la resistencia térmica obtenida con dos cámaras de aire estancas separadas por una "cortina" SuperPolynum.

Señalado con un círculo y un aspa figura la resistencia térmica que se obtiene con tres cámaras de aire estanca separadas por dos "cortinas" SuperPolynum.

Para obtener gran resistencia térmica con aislamiento termo reflexivo se necesita una serie de varias capas de aire limitadas por superficies de baja emisividad. Excepto para cámaras de aire horizontales muy gruesas con flujo de calor descendente, se gana poco térmicamente con la adición de una segunda superficie de baja emisividad en la misma cámara de aire.

Si una cámara de aire tiene solo una superficie de baja emisividad, y el ambiente es seco, la cara en la que se coloca la superficie de baja emisividad no incide apreciablemente en el coeficiente de transmisión.

En situaciones normales de edificios en el ambiente está presente el vapor de agua y debe evitarse que se produzcan condensaciones en el interior del cerramiento. Una superficie de baja emisividad colocada en la cara caliente de una cámara de aire puede también actuar como barrera de vapor si el material y las juntas tienen permeabilidad suficientemente baja. Si la superficie de baja emisividad no se coloca en la cara caliente, habrá que determinar la necesidad o no de una barrera de vapor.

Junto a las gráficas figuran los cuadros de valores que se han utilizado para elaborarlas.

La interpolación es aceptable para valores de la temperatura media, salto térmico, factor de emisividad y espesor de la cámara.

Por último y a efectos prácticos hay que citar algunas precauciones que hay que tener a la hora de utilizar, en el día a día de las obras, materiales termo reflexivos.

Para el aislamiento termo-reflexivo utilizado en edificación el valor de la emisividad para radiaciones de onda larga (infrarojo) es muy importante, pero no el valor para onda corta o del espectro visible. El brillo visible no es una verdadera medida de la reflexión de la radiación térmica porque la reflexión para la luz y para la onda larga no están relacionadas. La emisividad de las superficies debe determinarse mediante ensayo de laboratorio: el ojo humano no detecta la emisividad. No todo lo que brilla tiene baja emisividad.

La acción química, acumulación de polvo o aceite, o la presencia de condensación, pueden cambiar las propiedades de la superficie de baja emisividad lo suficiente para modificar sensiblemente su comportamiento térmico. Los cambios químicos incluyen oxidación, corrosión, o manchas causadas por el aire, el vapor de agua, la humedad del yeso, o contacto con materiales tratados (como maderas barnizadas o ignifugadas). Es fundamental conocer las características y el envejecimiento de los materiales termo-reflexivos que se ponen en obra antes de seleccionarlos.

El Departamento Técnico Polynum.

 **Optimer System, S.A.**

**Polg. Ind. San Miguel Nave 7B
Crta Alcalá-Daganzo Km 3,2
Alcalá de Henares – Madrid – España
Telf: 91 888 07 38 Fax: 91 881 49 89
Web: www.optimersystem.com
Email: optimer@optimersystem.com**