

CONCEPTOS ESENCIALES DE LA TRANSMISION DE CALOR EN UNA EDIFICACION

Carlos Safranez, Dr. Ingeniero

310-11

Dirigiéndose esta publicación al técnico del ramo de la Construcción, poco familiarizado con los problemas de aislamiento térmico, se presenta una breve exposición de los conceptos esenciales de la transmisión de calor en una edificación. Se exponen ejemplos del cálculo de la resistencia térmica y de la curva de temperatura de una cubierta plana y de un sótano. Se analiza la repercusión del aislamiento térmico sobre el consumo de energía con tiempo frío y tiempo caluroso. Sobre la posibilidad de producirse condensaciones, y sobre la temperatura a que estará expuesta la membrana impermeabilizante de un sótano, debido a la calefacción, con el fin de que no sobrepase los límites fijados. Finalmente, se dan a conocer dos ábacos para la determinación del coeficiente K de la transmisión de calor y de la resistencia térmica R, de distintos tipos de aislamiento.

1. INTRODUCCION

No es el propósito de esta publicación introducir conceptos o procedimientos nuevos referentes a la transmisión de calor en la edificación. Pero, debido a la importancia primordial que ha adquirido actualmente el problema del ahorro de la energía, necesidad ésta subrayada con la reciente publicación del Real Decreto 2429/1979 de 6 de julio, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE - CT - 79, sobre Condiciones Térmicas en los Edificios, ha aumentado considerablemente el número de profesionales que se ven obligados a prestar una especial atención al aislamiento térmico.

Observamos que muchos técnicos del ramo de la Construcción, con poca experiencia en esta clase de trabajos, encuentran serias difi-

cultades y vienen obligados a sacrificar mucho tiempo hasta conseguir familiarizarse con los problemas que presenta el aislamiento térmico.

Por esta razón, nos parecía oportuno presentar, en una breve exposición, los conceptos esenciales de la transmisión de calor en una edificación, teniendo siempre presente al técnico no especializado en la materia.

2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES

La transmisión de calor en una edificación y, por consiguiente, la pérdida de calor o, en su caso, su aumento, se produce al existir una diferencia de temperatura entre el ambiente interior y el exterior.

Mantener unas determinadas condiciones térmicas ambientales en el interior de los edificios, es el objetivo que deben perseguir los técnicos, elaborando unas soluciones constructivas adecuadas para conseguir esta finalidad. Por otra parte, el mantenimiento de estas condiciones ambientales por los usuarios representa un gasto de energía que será tanto menor, cuanto mayor sea la resistencia que ofrezca la solución elegida a la transmisión de calor.

Las causas de la transmisión de calor entre los ambientes interior y exterior, a través de los elementos constructivos que los separan, se debe a la tendencia al equilibrio térmico entre ambos ambientes, similar al fenómeno que se produce en los vasos comunicantes.

La transmisión de calor entre ambos ambientes se ve condicionada por los siguientes factores:

- a) La conductividad térmica de los componentes que forman los elementos de separación entre ambientes con diferente temperatura.
- b) El contacto de la superficie de estos elementos con el aire en movimiento, tanto por la cara exterior, como por la interior,

- actuando el aire como conductor del calor.
- c) Características propias de los elementos constructivos de cerramiento, como la permeabilidad al aire de las carpinterías, etcétera.

Aparte de la transmisión de calor que se produce a través de la superficie del cerramiento debido a las dos primeras causas, se realiza, también, una transmisión de calor en las zonas como ángulos y encuentros de tipo singular, la llamada transmisión lineal de calor.

Sin embargo, de acuerdo con la finalidad de divulgación de esta exposición, vamos a tratar solamente de la transmisión superficial de calor a través de los elementos planos, prescindiendo también de la debida a la permeabilidad al aire de los elementos constructivos de cerramiento.

3. FINALIDAD DE LA DETERMINACION DE LA TRANSMISION DE CALOR

La determinación de la transmisión de calor nos sirve para conocer el comportamiento térmico del edificio y de sus elementos constructivos de forma que:

- a) Pueda definirse, en la fase de proyecto, la composición constructiva más adecuada del edificio para que obtenga unas condiciones de aislamiento térmico idóneas que permitan mantener las condiciones ambientales deseadas, de forma que las pérdidas o ganancias de calor se mantengan dentro de unos límites que se consideren admisibles.
- b) Pueda comprobarse, en edificios ya construidos, la eficacia de las soluciones constructivas empleadas, determinar las causas de las deficiencias que puedan presentarse y, en estos casos, poder elegir las soluciones para subsanarlas.
- c) Pueda determinarse el desarrollo de la curva de temperatura en el interior de un elemento de cerramiento. Esta curva nos indica la temperatura a que están expuestos los distintos elementos que componen el cerramiento, lo que nos permite apreciar si se encuentran aún dentro del límite admisible, factor de gran importancia en la utilización de impermeabilizantes u otros materiales muy condicionados por la temperatura, así como para la previsión y tratamiento de las posibles con-

densaciones tanto superficiales como internas.

- d) Pueda calcularse, partiendo de un aislamiento térmico determinado, el consumo de energía necesario con el fin de conservar la temperatura ambiente deseada.

4. DETERMINACION DE LA CANTIDAD DE LA TRANSMISION DE CALOR

La cantidad de flujo de calor que se transmite a través de un elemento de cerramiento, es directamente proporcional a su coeficiente K de la transmisión de calor, a su superficie, a la diferencia de temperatura entre los ambientes que separa y a la duración del flujo de calor.

Para una superficie de $S \text{ m}^2$, una diferencia de temperatura de $(t_i - t_e)^\circ\text{C}$ y un tiempo de n horas, obtendremos la cantidad de calor transmitido del ambiente más cálido al más frío, o sea, la cantidad Q de la pérdida de calor, aplicando la siguiente fórmula:

$Q = K \cdot S \cdot (t_i - t_e)^\circ\text{C} \cdot nh$ medido en kilocalorías (kcal), o en vatios hora (Wh).

El flujo de calor que se produce del ambiente más caliente hacia el más frío, encuentra una serie de resistencias térmicas parciales cuya suma define la resistencia térmica total R_r del elemento de cerramiento que atraviesa. El valor del coeficiente K de la transmisión de calor es el valor inverso de R_r .

$$K = \frac{1}{R_r}$$

Introduciendo este valor de K en la fórmula anterior, obtenemos la cantidad de la pérdida de calor Q, por medio de la fórmula siguiente:

$Q = \frac{1}{R_r} \cdot S \cdot (t_i - t_e)^\circ\text{C} \cdot nh$ medido, igualmente, en kcal o en Wh.

Los valores del coeficiente K de la transmisión de calor y de la resistencia térmica total R_r , respectivamente, caracterizan las condiciones térmicas de una edificación y su conocimiento es la condición indispensable para resolver los problemas relacionados con la transmisión de calor en la misma. Esta es la razón para empezar siempre los cálculos correspondientes, con la determinación pre-

via de los valores de R_r y de K , respectivamente.

Al mayor valor de K corresponde una mayor cantidad de calor transmitido y, por consiguiente, una mayor pérdida de calor y viceversa. Por el contrario, al mayor valor de R_r corresponde una menor cantidad de calor transmitido y una menor pérdida de calor y viceversa.

Normalmente, se procede primero a calcular el valor de R_r , facilitándonos su valor inverso, el correspondiente valor de K .

5. COEFICIENTE R_r DE LA RESISTENCIA TÉRMICA TOTAL DEL CERRAMIENTO

De acuerdo con lo expuesto el valor del coeficiente R_r se define como el valor inverso del coeficiente K de la transmisión de calor

$$R_r = \frac{1}{K}$$

5.1. Valor del coeficiente K de la transmisión de calor

El coeficiente K nos indica la cantidad de calor que se transmite a través de 1 m^2 de superficie de un elemento de cerramiento, de L metros de espesor, en el tiempo de 1 hora, siendo $1 \text{ }^\circ\text{C}$ la diferencia de temperatura entre el ambiente interior y el exterior.

De acuerdo con lo expuesto en el apartado 2, el valor de K depende del valor de las transmisiones parciales de calor, o sea, de los coeficientes h_i y h_e de la transmisión superficial de calor debidos al contacto de la superficie del cerramiento con el aire interior y exterior, respectivamente, y del valor de la conductancia térmica C del cerramiento.

Entendemos como conductancia térmica, la relación entre la conductividad térmica λ y el espesor L , medido en metros, de un elemento de cerramiento.

$$C = \frac{\lambda}{L}$$

En los apartados siguientes, volveremos detalladamente sobre el particular, y también sobre los coeficientes h_i y h_e .

El valor de K y, naturalmente, de los coeficientes parciales de la transmisión de calor h_i , h_e y C , se mide en $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$ o también

en $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ siendo $1 \text{ Wh} = 0,860 \text{ kcal}$ y $1 \text{ kcal} = 1,163 \text{ Wh}$.

5.2. Valor del coeficiente R_r de la resistencia térmica total

A cada coeficiente parcial de la transmisión de calor corresponde una resistencia térmica parcial, cuyo valor es el valor inverso de aquellos, o sea,

resistencias térmicas superficiales $\frac{1}{h_i}$ y $\frac{1}{h_e}$,

y

resistencia térmica interna $R = \frac{1}{C} = \frac{L}{\lambda}$

La suma de las citadas resistencias parciales define la resistencia térmica total R_r de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$R_r = \frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{C} + \frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_i} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e}$$

medido en $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{kcal}}$ o también en $\frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$

Estando compuesto el cerramiento por varios elementos constructivos, el valor de su conductancia térmica es la suma de los valores parciales de C , o sea:

$$\Sigma C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

El valor inverso de ΣC nos proporciona el valor de la suma de las resistencias térmicas internas ΣR , por lo que podemos definir también el valor de la resistencia térmica total R_r en la forma siguiente:

$$R_r = \frac{1}{h_i} + \Sigma R + \frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_i} + \Sigma \frac{1}{C} + \frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_i} + \Sigma \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e}$$

medido en $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{kcal}}$ o también en $\frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$

Se observa en los últimos años, la tendencia

TABLA 1

Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor	Situación del cerramiento					
	De separación con espacio exterior o local abierto			De separación con otro local, desván o cámara de aire		
	1/h,	1/h,	1/h, + 1/h,	1/h,	1/h,	1/h, + 1/h,
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal > 60° y flujo horizontal	0,13 (0,11)	0,07 (0,06)	0,20 (0,17)	0,13 (0,11)	0,13 (0,11)	0,26 (0,22)
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≤ 60° y flujo ascendente	0,11 (0,09)	0,06 (0,05)	0,17 (0,14)	0,11 (0,09)	0,11 (0,09)	0,22 (0,18)
Cerramientos horizontales y flujo descendente	0,20 (0,17)	0,06 (0,05)	0,26 (0,22)	0,20 (0,17)	0,20 (0,17)	0,40 (0,34)

Resistencias térmicas superficiales en $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C/kcal (m^2 \cdot ^\circ C/W)$.

a dar la preferencia a W como medida de la transmisión de calor como, por ejemplo, en Francia y Alemania (3 y 4).

6. RESISTIVIDAD TÉRMICA r Y RESISTENCIA TÉRMICA INTERNA R

Para determinar el valor de la resistividad térmica r y de la resistencia térmica interna R , hay que disponer de los valores de la conductividad térmica λ de los distintos elementos constructivos del cerramiento, siendo el valor de r el valor inverso de λ

$$r = \frac{1}{\lambda} \text{ medido en } \frac{m \cdot h \cdot ^\circ C}{kcal} \text{ o también en } \frac{m \cdot ^\circ C}{W}$$

6.1. Valor de la conductividad térmica λ y de la conductancia térmica C

El valor de λ de un material determinado indica la cantidad de calor que se transmite a través de un cubo de 1 m de lado, en 1 hora de tiempo, siendo 1 °C la diferencia de temperatura entre dos caras opuestas.

El valor de λ se mide en:

$$\frac{kcal \cdot m}{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C} = \frac{kcal}{m \cdot h \cdot ^\circ C}$$

o también en:

$$\frac{W \cdot m}{m^2 \cdot ^\circ C} = \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

El valor de la conductancia térmica C nos facilita la cantidad de calor que se transmite a través de 1 m² de superficie de un elemento de cerramiento, de un espesor de L metros y de una conductividad térmica λ , en 1 hora de tiempo, siendo 1 °C la diferencia de temperatura.

$$C = \frac{\lambda}{L} \text{ medido en } \frac{kcal}{m \cdot h \cdot ^\circ C \cdot m} = \frac{kcal}{m^2 \cdot h \cdot ^\circ C}$$

$$\text{o también en } \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Al depender el valor de la conductancia térmica C de dos factores, a un mayor valor de la conductividad térmica λ corresponde un mayor valor de C y, por el contrario, a un mayor valor del espesor L corresponde un menor valor de C , y viceversa.

A título informativo, algunos valores de λ figuran en las tablas 2, 3, 4 y 5, donde se presentan unos ejemplos del procedimiento a seguir para el cálculo de la transmisión de calor de una cubierta plana y de una pared de un sótano.

TABLA 2. CUBIERTA PLANA CON AISLAMIENTO TERMICO

Medido en kcal					Medido en W				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Espeor L m	Conducti- vidad térmica λ λ kcal $m \cdot h \cdot ^\circ C$	Resisti- vidad térmica $r = \frac{1}{\lambda}$ $m \cdot h \cdot ^\circ C$	Resisten- cias térmicas parciales $\frac{1}{h} \text{ y } R = \frac{L}{\lambda}$ $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$	Conducti- vidad térmica λ W $m \cdot ^\circ C$	Resisti- vidad térmica $r = \frac{1}{\lambda}$ $m \cdot ^\circ C$	Resisten- cias térmicas parciales $\frac{1}{h} \text{ y } R = \frac{L}{\lambda}$ $m^2 \cdot ^\circ C$	Descenso de tempera- tura $t_{n-1} - t_n =$ $= 24,4 \frac{1}{h} \text{ } ^\circ C$ ó $24,4 R_n \text{ } ^\circ C$	Tempera- tura en las zonas de contacto $^\circ C$
Aire interior $t_i = + 20 \text{ } ^\circ C$ Resistencia térmica superficial $1/h_i$ asc				$1/h_i = 0,12$			$1/h_i = 0,10$	$t_i - t_o = 2,4$	$t_i = + 20,0$
Forjado de hormigón Corcho aglomerado.	0,20 0,04	1,30 0,04	0,77 25,00	$R_1 = 0,15$ $R_2 = 1,00$	1,51 0,046	0,66 21,50	$R_1 = 0,13$ $R_2 = 0,86$	$t_o - t_1 = 3,2$ $t_1 - t_2 = 21,2$	$t_o = + 17,6$ $t_1 = + 14,4$ $t_2 = - 6,8$
Hormigón para es- tablecer la pen- diente	0,05	1,30	0,77	$R_3 = 0,04$	1,51	0,66	$R_3 = 0,03$	$t_2 - t_3 = 0,7$	$t_3 = - 7,5$
Membrana imper- meabilizante	0,01	0,25	4,00	$R_4 = 0,04$	0,29	3,44	$R_4 = 0,035$	$t_3 - t_4 = 0,8$	$t_4 = - 8,3$
Solado	0,04	1,70	0,59	$R_5 = 0,02$	1,98	0,50	$R_5 = 0,02$	$t_4 - t_5 = 0,5$	$t_5 = - 8,8$
Resistencia térmica superficial $1/h_e$				$1/h_e = 0,06$			$1/h_e = 0,05$	$t_5 - t_e = 1,2$	$t_e = - 10,0$
Aire exterior $t_e = - 10 \text{ } ^\circ C$				$R_r = 1,43$			$R_{r1} = 1,23$	$t_i - t_e = 30 \text{ } ^\circ C$	

$$K_1 = \frac{1}{R_{r1}} = \frac{1}{1,23} = 0,81 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

TABLA 3. CUBIERTA PLANA SIN AISLAMIENTO TERMICO

1	2	3	4	5
	espeor L m	resisten- cias térmicas parciales $\frac{1}{h} \text{ y } R = \frac{L}{\lambda}$ $m^2 \cdot ^\circ C$ W	descenso de temperatura $t_{n-1} - t_n =$ $= 0,81 \frac{1}{h} \text{ } ^\circ C$ ó $0,81 R_n \text{ } ^\circ C$	temperatura en las zonas de contacto $^\circ C$
Aire interior $t_i = + 20 \text{ } ^\circ C$				$t_i = + 20,0$
Resistencia térmica superficial $1/h_i$ asc		$1/h_i = 0,10$	$t_i - t_o = 8,2$	$t_o = + 11,8$
Forjado de hormigón	0,20	$R_1 = 0,13$	$t_o - t_1 = 10,6$	$t_1 = + 1,2$
Hormigón para establecer la pendiente.	0,05	$R_2 = 0,03$	$t_1 - t_2 = 2,5$	$t_2 = - 1,3$
Membrana impermeabilizante	0,01	$R_3 = 0,035$	$t_2 - t_3 = 2,9$	$t_3 = - 4,2$
Solado	0,04	$R_4 = 0,02$	$t_3 - t_4 = 1,7$	$t_4 = - 5,9$
Resistencia térmica superficial $1/h_e$		$1/h_e = 0,05$	$t_4 - t_e = 4,1$	$t_e = - 10,0$
Aire exterior $t_e = - 10 \text{ } ^\circ C$		$R_{r2} = 0,37$	$t_i - t_e = 30 \text{ } ^\circ C$	

$$K_2 = \frac{1}{R_{r2}} = \frac{1}{0,37} = 2,70 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

TABLA 4. CUBIERTA PLANA, TIEMPO CALUROSO

Con aislamiento térmico					Sin aislamiento térmico		
1	2	3	4	5	6	7	8
	Esesor L m	Resistencias térmicas parciales $\frac{1}{h} + R = \frac{L}{\lambda}$ m ² · °C W	Descenso de temperatura $t_{n-1} - t_n = \frac{1}{11,7} \frac{1}{h} \text{°C}$ ó 11,7 R _n · °C	Temperatura en las zonas de contacto °C	Resistencias térmicas parciales $\frac{1}{h} + R = \frac{L}{\lambda}$ m ² · °C W	Descenso de temperatura $t_{n-1} - t_n = 35,7 \frac{1}{h} \text{°C}$ ó 35,7 R _n · °C	Temperatura en las zonas de contacto °C
Aire exterior t _e = + 35 °C Resistencia térmica superficial 1/h _e		1/h _e = 0,05	t _e - t ₀ = 0,6	t _e = + 35,0 t ₀ = + 34,4	1/h _e = 0,05	t _e - t ₀ = 1,8	t _e = + 35,0 t ₀ = + 33,2
Solado	0,04	R ₁ = 0,02	t ₀ - t ₁ = 0,2	t ₁ = + 34,2	R ₁ = 0,02	t ₀ - t ₁ = 0,7	t ₁ = + 32,5
Membrana impermeabilizante	0,01	R ₂ = 0,04	t ₁ - t ₂ = 0,4	t ₂ = + 33,8	R ₂ = 0,04	t ₁ - t ₂ = 1,3	t ₂ = + 31,2
Hormigón para establecer la pendiente.	0,05	R ₃ = 0,03	t ₂ - t ₃ = 0,4	t ₃ = + 33,4	R ₃ = 0,03	t ₂ - t ₃ = 1,1	t ₃ = + 30,1
Corcho aglomerado	0,04	R ₄ = 0,86	t ₃ - t ₄ = 10,1	t ₄ = + 23,3			
Forjado de hormigón.	0,20	R ₅ = 0,13	t ₄ - t ₅ = 1,5	t ₅ = + 21,8	R ₄ = 0,13	t ₃ - t ₄ = 4,7	t ₄ = + 25,4
Resistencia térmica superficial 1/h _{i des}		1/h _i = 0,15	t ₅ - t _i = 1,8	t _i = + 20,0	1/h _i = 0,15	t ₄ - t _i = 5,4	t _i = + 20,0
Aire interior t _i = + 20 °C							
		R ₃ = 1,28	t _e - t _i = 15 °C		R ₄ = 0,42	t _e - t _i = 15 °C	

$$K_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1,28} = 0,78 \frac{W}{m^2 \text{ °C}}$$

$$K_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{0,42} = 2,38 \frac{W}{m^2 \text{ °C}}$$

TABLA 5. SOTANO CON CALEFACCION

1	2	3	4	5	6
	Esesor L m	Resistividad térmica $r = \frac{1}{\lambda}$ m · °C W	Resistencias térmicas parciales $\frac{1}{h} + R = \frac{L}{\lambda}$ m ² · °C W	Descenso de temperatura $t_{n-1} - t_n = \frac{1}{62,9} \frac{1}{h} \text{°C}$ ó 62,9 R _n · °C	Temperatura en las zonas de contacto °C
Aire dentro de la chimenea t _i = + 200 °C Resistencia térmica superficial 1/h _{i hor}			1/h _i = 0,120	t _i - t ₀ = 7,5	t _i = + 200,0 t ₀ = + 192,5
Ladrillos refractarios	0,13	1,29	R ₁ = 0,167	t ₀ - t ₁ = 10,6	t ₁ = + 181,9
Aislamiento térmico	0,25	8,60	R ₂ = 2,150	t ₁ - t ₂ = 135,3	t ₂ = + 46,6
Hormigón	0,50	0,66	R ₃ = 0,330	t ₂ - t ₃ = 20,8	t ₃ = + 25,8
Membrana impermeabilizante	0,01	3,44	R ₄ = 0,034	t ₃ - t ₄ = 2,2	t ₄ = + 23,6
Ladrillos de protección (humedecidos)	0,13	1,15	R ₅ = 0,150	t ₄ - t ₅ = 9,4	t ₅ = + 14,2
Resistencia térmica superficial 1/h _e			1/h _e = 0,066	t ₅ - t _e = 4,2	t _e = + 10,0
Subsuelo t _e = + 10 °C					
			R ₅ = 3,017	t _i - t _e = 190 °C	

6.2. Valor de la resistencia térmica interna R

El valor inverso de la conductividad térmica C nos facilita el valor de la resistencia térmica interna R de un elemento constructivo del cerramiento, de un espesor de L metros y de una conductividad térmica λ

$$R = \frac{1}{C} = \frac{L}{\lambda} \text{ medido en } \frac{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{kcal}} \text{ o}$$

en $\frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$

A un mayor valor de la conductividad térmica λ corresponde un menor valor de R y, por el contrario, a un mayor valor del espesor L corresponde un mayor valor de R , y viceversa.

Al estar compuesto el cerramiento por varios elementos constructivos, y según lo indicado ya en el apartado anterior, el valor inverso de la suma de las parciales conductancias térmicas C de todos estos elementos, define el valor de la suma de las parciales resistencias térmicas internas R

$$\Sigma R = \Sigma \frac{1}{C} = \Sigma \frac{L}{\lambda} \text{ medido en } \frac{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{kcal}}$$

o en $\frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}'}$

7. RESISTENCIAS TERMICAS SUPERFICIALES $\frac{1}{h_i}$ Y $\frac{1}{h_e}$

De acuerdo con lo tratado en el apartado 5, el valor del coeficiente de las resistencias térmicas superficiales es el valor inverso del coeficiente de la transmisión superficial de calor h_i , interior, y h_e , exterior, o sea,

$$\frac{1}{h_i} \text{ y } \frac{1}{h_e}$$

7.1. Valor de los coeficientes h_i y h_e de la transmisión superficial de calor

Los coeficientes h_i y h_e nos indican la cantidad de calor que se transmite debido al contacto de la superficie de un elemento de cerramiento con el aire interior y exterior, res-

pectivamente, al estar el aire en movimiento y actuar como conductor de calor.

El valor de coeficiente h se mide en $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$

o en $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

y se refiere a una superficie de 1 m^2 , 1 hora de tiempo y una diferencia de temperatura de $1 ^\circ\text{C}$ entre el ambiente interior y el exterior.

Esta transmisión de calor es fácilmente comprobable al simple contacto de la mano. Siendo, por ejemplo, la temperatura exterior más baja que la interior; al tocar la pared por la parte interior se produce la sensación de frío comparando con la temperatura ambiente; lo contrario ocurre al tocar la pared por la parte exterior.

Los valores de h_i y h_e no dependen ni de la clase del material de cerramiento, ni de su espesor, al contrario de lo que ocurre con la conductividad térmica.

El valor de h_e exterior depende exclusivamente, a los efectos prácticos, de la velocidad del aire, mientras que el valor de h_i interior depende, además, del sentido del flujo del calor y de la orientación de la superficie del cerramiento.

El flujo de calor se efectúa desde el ambiente más caliente hacia el más frío, correspondiendo al sentido ascendente un valor de h_i más elevado que el descendente.

En su «Manual de Cubiertas Planas», indica Moritz (2) los siguientes valores para h_i y h_e :

$$h_i \text{ ascendente} = \frac{7 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$h_i \text{ descendente} = \frac{5 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$h_e = \frac{20 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$$

Este último valor corresponde a una velocidad del aire de 2 m/seg.

7.2. Valor de las resistencias térmicas superficiales $\frac{1}{h_i}$ y $\frac{1}{h_e}$

Con los valores de h_i y h_e citados en el apartado anterior, obtenemos los siguientes valores para las resistencias térmicas superficiales:

$$\text{Para } h_i \text{ ascendente} = \frac{7 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}} \text{ resulta}$$

$$\frac{1}{h_i} = \frac{1}{7} = \frac{0,14 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}}{\text{kcal}}$$

$$\text{Para } h_i \text{ descendente} = \frac{5 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}} \text{ resulta}$$

$$\frac{1}{h_i} = \frac{1}{5} = \frac{0,20 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}}{\text{kcal}}$$

$$\text{Para } h_e = \frac{20 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}} \text{ resulta}$$

$$\frac{1}{h_e} = \frac{1}{20} = \frac{0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}}{\text{kcal}}$$

En el Real Decreto 2429/1979 de 6 de julio figuran, en el Anexo 2, los valores del coeficiente de las resistencias térmicas superficiales en función de la posición del cerramiento y del sentido del flujo de calor, teniendo en cuenta, además, la situación del cerramiento, los cuales reproducimos en la tabla 1.

8. CALCULO DE LOS VALORES DE LA RESISTENCIA TERMICA TOTAL R_t Y DEL COEFICIENTE K DE LA TRANSMISION DE CALOR

Una vez se disponga de todos los valores de las resistencias térmicas parciales, se puede proceder a la determinación del valor de la resistencia térmica total R_t de un elemento de cerramiento, de acuerdo con la definición formulada en el apartado 5:

$$R_t = \left(\frac{1}{h_i} + \sum \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e} \right) \frac{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}}{\text{kcal}}$$

o también $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}{\text{W}}$

Conociendo el valor de R_t se calcula el valor del coeficiente K de la transmisión de calor mediante el valor inverso de R_t :

$$K = \frac{1}{R_t} \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}} \text{ ó } \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$$

También podemos proceder ahora a la determinación de la curva de temperatura en el interior del cerramiento.

El hecho de partir del concepto de la resistencia térmica, definida como el valor inverso de la transmisión de calor, en vez de partir de esta última —siendo precisamente la transmisión de calor la que se observa y se comprueba en el laboratorio—, añade, evidentemente, una notable dificultad para la comprensión de las personas poco iniciadas en la materia.

Con el fin de facilitar la realización de los cálculos relacionados con los problemas de la transmisión de calor en una edificación, vamos a exponer a continuación tres ejemplos del procedimiento a seguir, tratándose de una cubierta plana, y otro referente a una pared de un sótano, para aclarar la repercusión de la calefacción sobre su impermeabilización.

9. DETERMINACION DEL VALOR DE R_t PARA UNA CUBIERTA PLANA CON AISLAMIENTO TERMICO

Para demostrar la ejecución del cálculo de la resistencia térmica total R_t de una cubierta plana con aislamiento térmico, nos vamos a valer de un ejemplo que figura en el libro de K. Lufsky «La Impermeabilización en la Construcción» (4). El cálculo se realiza empleando la forma de una tabla, procedimiento éste muy recomendable.

En la columna 1 de la tabla 2 indicamos la composición de la cubierta, y en la columna 2, el espesor, medido en metros, de sus componentes. Se supone una temperatura interior t_i de +20 °C y una temperatura exterior t_e de -10 °C.

Orientándose el sentido del flujo de calor desde el ambiente más caliente hacia el más frío, en el caso que nos interesa, el flujo de calor se efectúa hacia el exterior, o sea, en sentido ascendente, y se aplica el correspondiente valor de la resistencia térmica superficial $\frac{1}{h_i} = 0,12$, siendo $\frac{1}{h_e} = 0,06$.

De acuerdo con el propósito de este trabajo, dirigido al técnico poco acostumbrado a esta clase de cálculos, efectuamos la determinación del valor R_r en kcal y también en watos, con el propósito de reflejar la repercusión de ambas medidas. Por la citada razón, hacemos constar también, en las columnas 3 y 6, los valores de la conductividad térmica λ , no limitándonos solamente a los valores de la resisti-

vidad térmica $r = \frac{1}{\lambda}$ estrictamente necesarios, columnas 4 y 7.

Sumando los valores de las resistencias térmicas parciales, o sea, los valores de las resistencias térmicas internas $R = \frac{L}{\lambda}$ y añadiendo los valores de las resistencias térmicas superficiales $\frac{1}{h_i}$ y $\frac{1}{h_e}$ que figuran en las columnas 5 y 8, obtenemos los valores de la resistencia térmica total R_r medido en kcal, y R_{r1} medido en W, que son:

$$R_r = 1,43 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}}{\text{kcal}} \text{ y } R_{r1} = 1,23 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}{\text{W}}$$

10. DETERMINACION DE LA CURVA DE TEMPERATURA

Una vez definido el valor de la resistencia térmica total R_r de un elemento de cerramiento, éste nos sirve como punto de partida para aclarar varios conceptos relacionados con la transmisión de calor a través del mismo, de acuerdo con lo indicado en el apartado 3.

Vamos a empezar con la determinación de la curva de temperatura de la cubierta plana tratada en el apartado anterior, o sea, calcularemos el desarrollo de la temperatura en el interior de la misma, y la de sus superficies interior y exterior.

Tratándose de un cerramiento formado por varios elementos constructivos, el procedimiento a seguir consiste en determinar la temperatura reinante en cada uno de los puntos de contacto entre ellos, por lo que hay que calcular el descenso de temperatura $t_{n-1} - t_n$ que se produce en éstos.

Llamamos t_e a la temperatura en la zona de contacto entre el aire interior y la superficie

del techo, t_1 a la de la zona de contacto entre el forjado y el corcho, t_2 a la de la zona entre el corcho y el hormigón para establecer las pendientes, etc. Con una temperatura interior t_i de +20 °C y una exterior t_e de -10 °C, tenemos una diferencia total de temperatura:

$$t_i - t_e = 30 \text{ °C}$$

El valor de la resistencia térmica total R_{r1} de acuerdo con la tabla 2, es de:

$$R_{r1} = 1,23 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}{\text{W}}$$

El descenso de temperatura $t_{n-1} - t_n$ que se produce en un elemento constructivo, es proporcional al valor de su resistencia térmica interna R_n y también al de la resistencia térmica superficial $\frac{1}{h_i}$ y $\frac{1}{h_e}$, respectivamente, existiendo la siguiente relación entre éstos y los valores de $t_i - t_e$ y de R_{r1} :

$$\frac{t_{n-1} - t_n}{R_n} \text{ ó } \frac{t_{n-1} - t_n}{1/h} = \frac{t_i - t_e}{R_{r1}}$$

Por consiguiente, podemos establecer la siguiente fórmula para el valor de $t_{n-1} - t_n$:

$$t_{n-1} - t_n = R_n \cdot \frac{t_i - t_e}{R_{r1}} = R_n \cdot \frac{30}{1,23} = 24,4 R_n \text{ °C [1]}$$

$$\text{o también } t_{n-1} - t_n = \frac{1}{h} \cdot \frac{30}{1,23} = 24,4 \frac{1}{h} \text{ °C}$$

En la columna 9 de la tabla 2, figuran los valores del descenso de temperatura producidos en todos los elementos constructivos de la cubierta, calculados de acuerdo con la fórmula [1], empezando con el descenso debido al contacto del aire interior con la superficie del techo y terminando con el descenso debido al contacto de la superficie del solado con el aire exterior.

$$\begin{aligned} t_i - t_e &= 24,4 \times 0,10 \text{ °C} = 2,4 \text{ °C} \\ t_e - t_1 &= 24,4 \times 0,13 \text{ °C} = 3,2 \text{ °C} \\ t_1 - t_2 &= 24,4 \times 0,86 \text{ °C} = 21,2 \text{ °C} \\ &\dots\dots\dots \\ t_5 - t_e &= 24,4 \times 0,05 \text{ °C} = 1,2 \text{ °C} \end{aligned}$$

En la columna 10, figuran las temperaturas en las zonas de contacto de todos los elementos constructivos, empezando con la superficie

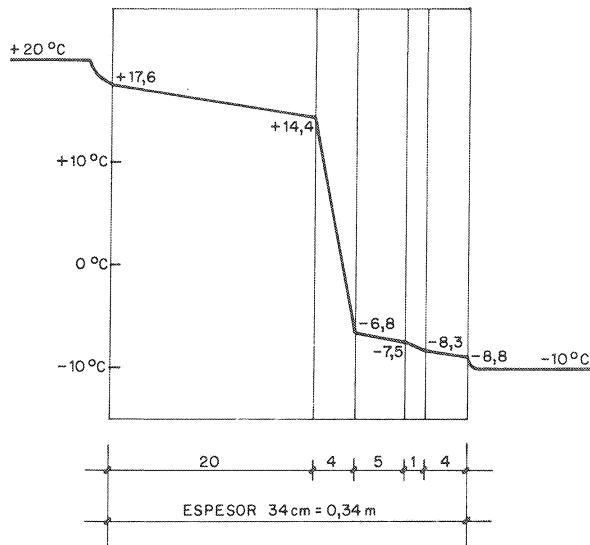


Fig. 1a

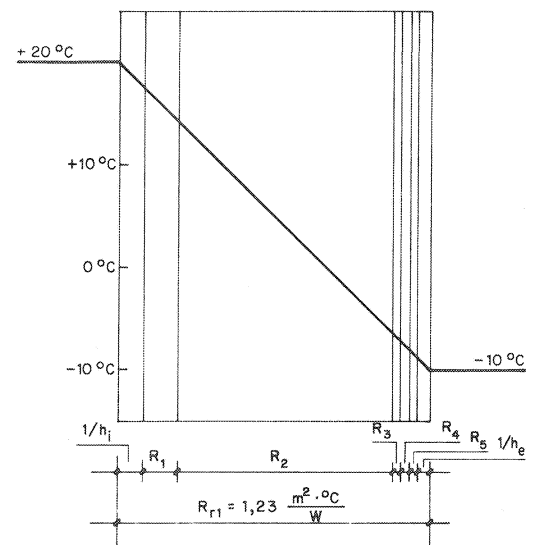


Fig. 1b

Curva de temperatura de la cubierta plana con aislamiento térmico

del techo y terminando con la superficie del solado. Estas se obtienen deduciendo de la temperatura anterior, el valor del descenso experimentado en el elemento constructivo siguiente.

Los valores de la columna 10 que forman la curva de temperatura de la cubierta están representados en las figuras 1-a y 1-b.

En la primera están indicados a escala los espesores de los distintos elementos constructivos, habiendo adoptado solamente para la membrana impermeabilizante una escala doble, con el fin de conseguir una mayor claridad de la representación.

En la figura 1-b, en cambio, están indicados en vez de los espesores de los elementos constructivos, los valores de sus resistencias térmicas R , incluyendo naturalmente los valores de las resistencias térmicas superficiales $\frac{1}{h_i}$ y $\frac{1}{h_e}$.

Ya que el descenso de temperatura es proporcional al valor de la resistencia térmica, la curva de temperatura de la figura 1-b está representada por una línea recta.

Este hecho nos permite establecer gráficamente la curva de temperatura dentro de un elemento de cerramiento, partiendo simplemente de los valores de las resistencias térmicas parciales que figuran en la columna 8.

Antes de proceder a analizar los resultados obtenidos según la tabla 2 y para poder esta-

blecer una comparación, vamos a repetir la misma operación para otra cubierta plana de las mismas características que la anterior, pero suprimiendo el aislamiento térmico.

11. DETERMINACION DEL VALOR DE R_2 PARA UNA CUBIERTA PLANA SIN AISLAMIENTO TERMICO

Ya que la única diferencia entre ambas cubiertas es el corcho que forma el aislamiento térmico, podemos establecer el valor de R_2 simplemente substrayendo de R_{r1} el valor de R_2 de la resistencia térmica del corcho, de acuerdo con la tabla 2.

$$R_2 = R_{r1} - R_2 = 1,23 - 0,86 = 0,37 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Pero, para la determinación de la correspondiente curva de temperatura, resulta conveniente valerse de nuevo de una tabla, por lo que confeccionamos la tabla 3, aunque simplificada en lo posible aprovechando los datos de la tabla 2.

12. DETERMINACION DE LA CURVA DE TEMPERATURA

Para calcular el descenso de temperatura $t_{n-1} - t_n$ tenemos solamente que sustituir en la fórmula [1] (ver apartado 10), la resistencia térmica R_{r1} por la R_2 , cuyo valor, de acuerdo con lo definido en el apartado 11, es de 0,37 medido en vatios. De este modo, obtenemos la fórmula:

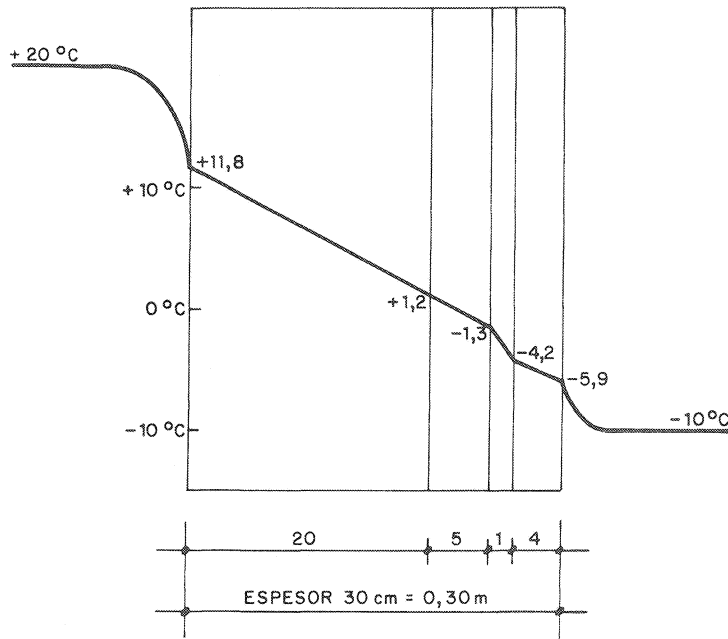


Fig. 2a

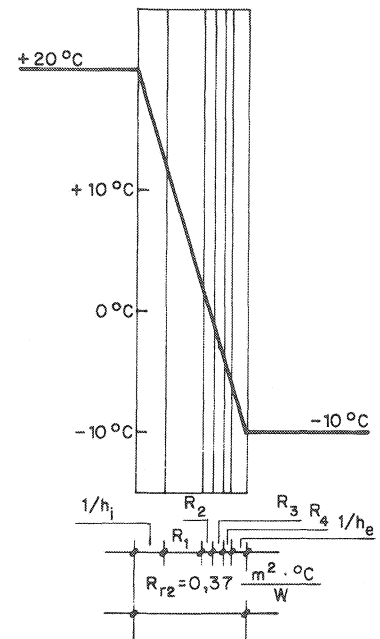


Fig. 2b

Curva de temperatura de la cubierta plana sin aislamiento térmico

$$t_{n-1} - t_n = R_n \cdot \frac{t_i - t_e}{R_{r2}} = R_n \cdot \frac{30}{0,37} = 81,1 R_n \text{ } ^\circ\text{C} [2]$$

$$\text{o también } t_{n-1} - t_n = \frac{1}{h} \cdot \frac{30}{0,37} = 81,1 \frac{1}{h} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los valores del descenso de temperatura obtenidos de acuerdo con la fórmula [2], figuran en la columna 4 de la tabla 3, y la temperatura en las zonas de contacto, en la columna 5 de la misma. (Ver apartado 10 y figuras 2a y 2b).

13. REPERCUSION DEL AISLAMIENTO TERMICO

Comparando los resultados obtenidos en la cubierta con aislamiento térmico y en la otra sin éste, llama la atención la disminución tan pronunciada del coeficiente R , de la resistencia térmica total. Del $R_{r1} = 1,23$, baja a $R_{r2} = 0,37$, o sea, que tiene solamente 30,1 % del valor del primero.

Esta disminución de la resistencia térmica repercute, naturalmente, en el aumento del consumo de energía y también en el aumento de la posibilidad de producirse condensaciones.

13.1. Pérdida de calor y consumo de energía

A la resistencia térmica total R_{r1} corresponde el coeficiente K_1 de la transmisión de calor, siendo su valor:

$$K_1 = \frac{1}{R_{r1}} = \frac{1}{1,23} = 0,81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

A la resistencia térmica total R_{r2} corresponde el coeficiente K_2 de la transmisión de calor, cuyo valor es:

$$K_2 = \frac{1}{R_{r2}} = \frac{1}{0,37} = 2,70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Para una superficie de $S \text{ m}^2$, una diferencia de temperatura de $\Delta t \text{ } ^\circ\text{C}$ y un tiempo de n horas, la transmisión total de calor, equivalente a la pérdida de calor Q , resulta ser:

$$Q = K \cdot S \text{ m}^2 \cdot \Delta t \text{ } ^\circ\text{C} \cdot n \text{ h} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} = K \cdot S \cdot \Delta t \cdot n \text{ Wh} [3]$$

Valiéndonos de la fórmula [3], procederemos a determinar los valores de Q_1 y Q_2 tomando como ejemplo una superficie $S = 100 \text{ m}^2$ y un tiempo $n = 24$ horas. Manteniendo la temperatura interior t_i a $+20 \text{ } ^\circ\text{C}$ y con una temperatura media exterior de $+5 \text{ } ^\circ\text{C}$, tenemos una diferencia de temperatura $\Delta t = 20 - 5 = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Para el coeficiente K_1 de la transmisión térmica de la cubierta con el aislamiento térmico de nuestro ejemplo, hemos obtenido el valor

$$\text{de } K_1 = 0,81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Introduciendo estos datos en la fórmula [3], obtenemos el valor de $Q_1 = 0,81 \times 100 \times 15 \times 24 \text{ Wh} = 29.160 \text{ Wh} = 29,16 \text{ kWh}$.

Para obtener el valor de Q_2 de la cubierta sin el aislamiento térmico, tenemos que sustituir

$$\text{el valor de } K_1 \text{ por } K_2 = 2,70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

$$Q_2 = 2,70 \times 100 \times 15 \times 24 \text{ Wh} = 97.200 \text{ Wh} = 97,20 \text{ kWh}.$$

Para mantener la temperatura interior de acuerdo con las condiciones indicadas, se produce, debido a la ausencia del aislamiento térmico, un exceso de consumo de energía de $97,20 - 29,16 = 68,04 \text{ kWh}$, o sea, un aumento del 233% comparando con el consumo al disponer de un aislamiento.

13.2. Posibilidad de condensaciones

La posibilidad de producirse condensaciones en el interior de una edificación depende de los tres factores siguientes:

- de la temperatura interior t_i .
- del grado de humedad relativa del aire en el interior.
- de la temperatura en la zona de contacto entre el aire interior y el cerramiento.

En el aire, está contenida siempre una cierta cantidad de agua en forma de vapor. La cantidad máxima de vapor que puede contener el aire depende de la temperatura de éste, y se la designa como cantidad de saturación para una temperatura determinada, siendo el 100% el grado de humedad relativa del mismo. Todo exceso de vapor por encima de la cantidad de saturación, se elimina condensándose en forma de gotitas de agua.

Esta condensación se produce también al bajar la temperatura del aire, ya que a una temperatura inferior corresponde una menor cantidad de saturación y viceversa.

En las tablas 2 y 3 de nuestro ejemplo, figuran en las columnas 10 y 5, respectivamente, las temperaturas en las zonas de contacto. La temperatura t_o indica la temperatura en la zona de contacto entre el aire interior y la superficie del techo. Para una temperatura interior de $t_i = +20 \text{ }^\circ\text{C}$ de la edificación con un aislamiento térmico, resulta $t_o = +17,6 \text{ }^\circ\text{C}$, y sin el mismo, solamente $t_o = +11,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

A una temperatura de $t_i = +20 \text{ }^\circ\text{C}$, corresponde una cantidad de saturación de vapor de $17,30 \text{ g/m}^3$ (2). Suponiendo un grado de humedad relativa del aire en el interior del 50%, su contenido de humedad asciende al 50% de $17,30 \text{ g/m}^3$, o sea, a $8,65 \text{ g/m}^3$.

A una temperatura de $+17,6 \text{ }^\circ\text{C}$, corresponde una cantidad de saturación de $15,01 \text{ g/m}^3$, y a la de $+11,8 \text{ }^\circ\text{C}$ una cantidad de $10,54 \text{ g/m}^3$.

En ambos casos, las cantidades de saturación resultan ser superiores a la cantidad de humedad de $8,65 \text{ g/m}^3$ que contiene el aire, por lo que no se producen condensaciones.

Sin embargo, esta situación cambia al subir a 61% el grado de humedad relativa del aire en el interior, significando un contenido de humedad de $0,61 \times 17,30 = 10,55 \text{ g/m}^3$. Mientras para la edificación con un aislamiento térmico (tabla 2) esta cantidad sigue siendo inferior a la cantidad de saturación, para la edificación sin un aislamiento térmico (tabla 3) hemos llegado a este límite con una temperatura en la zona de contacto de $t_o = +11,8 \text{ }^\circ\text{C}$ y la correspondiente cantidad de saturación de $10,54 \text{ g/m}^3$. Por consiguiente, al subir el grado de humedad relativa por encima del 61%, se producirán condensaciones en el techo.

Para la edificación con un aislamiento térmico, el grado de humedad relativa tiene que alcanzar el 87% para llegar al punto crítico de saturación con un contenido de humedad de $0,87 \times 17,30 = 15,05 \text{ g/m}^3$, y solamente a partir de este grado de humedad relativa hay que contar con la aparición de condensaciones.

14. SITUACION CON TIEMPO CALUROSO

Vamos a proceder ahora a analizar la situación reinante en ambos tipos de edificación con tiempo caluroso. Suponemos una tempe-

ratura exterior de $t_e = +35\text{ }^\circ\text{C}$, pretendiendo conservar la temperatura interior a $t_i = +20\text{ }^\circ\text{C}$.

Orientándose el sentido del flujo de calor desde la temperatura más elevada hacia la inferior, éste se efectúa ahora desde el exterior hacia el interior, o sea, en el sentido descendente. Por consiguiente, para el cálculo de las resistencias térmicas totales R_{r3} y R_{r4} de las edificaciones con y sin aislamiento térmico, tenemos que emplear en concepto de la resistencia térmica superficial $\frac{1}{h_i}$ interior, en

vez de $\frac{1}{h_i}$ ascendente, la resistencia $\frac{1}{h_i}$ descendente.

Al no sufrir alteración alguna los restantes valores de las resistencias térmicas parciales, podemos establecer los valores de R_{r3} y R_{r4} simplemente sustrayendo de los valores de R_{r1} y R_{r2} , respectivamente, el valor de $\frac{1}{h_i \text{ asc.}}$

y sumando el valor de $\frac{1}{h_i \text{ desc.}}$

$$R_{r3} = R_{r1} - \frac{1}{h_i \text{ asc.}} + \frac{1}{h_i \text{ desc.}} = 1,23 - 0,10 + 0,15 = 1,28 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{r4} = R_{r2} - \frac{1}{h_i \text{ asc.}} + \frac{1}{h_i \text{ desc.}} = 0,37 - 0,10 + 0,15 = 0,42 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

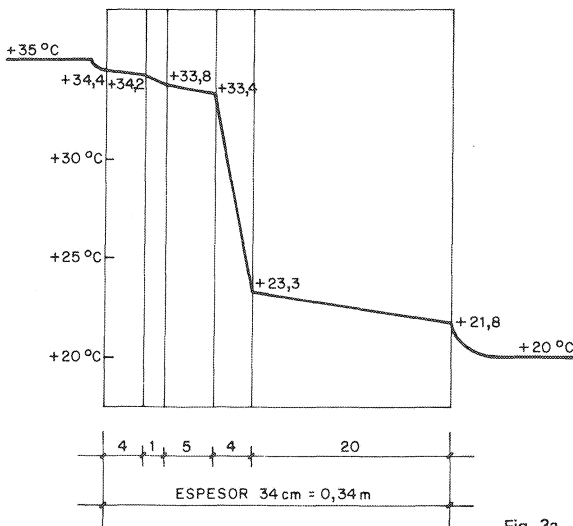


Fig. 3a

Curva de temperatura, tiempo caluroso, de la cubierta plana con aislamiento térmico

15. CURVA DE TEMPERATURA DE LA CUBIERTA CON AISLAMIENTO TÉRMICO

Con una temperatura exterior t_e de $+35\text{ }^\circ\text{C}$ y una interior t_i de $+20\text{ }^\circ\text{C}$, tenemos una diferencia de temperatura de $t_e - t_i = 35 - 20 = 15\text{ }^\circ\text{C}$. Para establecer la correspondiente curva de temperatura, o sea, la temperatura reinante en las zonas de contacto de cada uno de los elementos constructivos de la cubierta, hay que calcular el descenso de temperatura $t_{n-1} - t_n$ que se producen en éstos valiéndose de la fórmula [1], según lo expuesto en el apartado 10, introduciendo en la misma el valor de

$$R_{r3} = 1,28 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (\text{Ver apartado 14.})$$

$$t_{n-1} - t_n = R_n \frac{t_e - t_i}{R_{r3}} = R_n \frac{15}{1,28} = 11,7 R_n \text{ }^\circ\text{C} \quad [4]$$

o también

$$t_{n-1} - t_n = \frac{1}{h} \cdot \frac{15}{1,28} = 11,7 \frac{1}{h} \text{ }^\circ\text{C}$$

De acuerdo con el sentido del flujo de calor que se efectúa desde el exterior hacia el interior, empezamos con el descenso de la temperatura en la zona de contacto entre el aire exterior y el solado, denominando t_0 a la temperatura en la superficie de éste.

Los resultados de este cálculo figuran en la columna 4 de la tabla 4, y las temperaturas resultantes en las zonas de contacto, en la columna 5 de la misma y en las figuras 3a y 3b.

Observamos que en la zona de contacto entre el aire interior y la superficie del techo, tenemos la temperatura de $t_5 = 21,8\text{ }^\circ\text{C}$, o sea, $+1,8\text{ }^\circ\text{C}$ por encima de la temperatura de $t_i = +20\text{ }^\circ\text{C}$ que se pretende mantener.

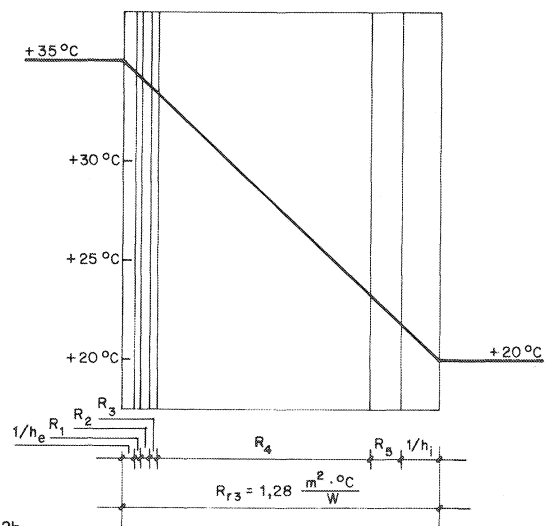


Fig. 3b

16. CURVA DE TEMPERATURA DE LA CUBIERTA SIN AISLAMIENTO TERMICO

Repetimos el cálculo anterior, sustituyendo el valor de la resistencia térmica total $R_{r,3}$ por el de $R_{r,4} = 0,42$ (ver apartado 14).

De esta forma obtenemos la fórmula [5] para el cálculo del descenso de temperatura:

$$t_{n-1} - t_n = R_n \frac{t_e - t_i}{R_{r,4}} = R_n \frac{15}{0,42} = 35,71 R_n \text{ } ^\circ\text{C} \quad [5]$$

o también

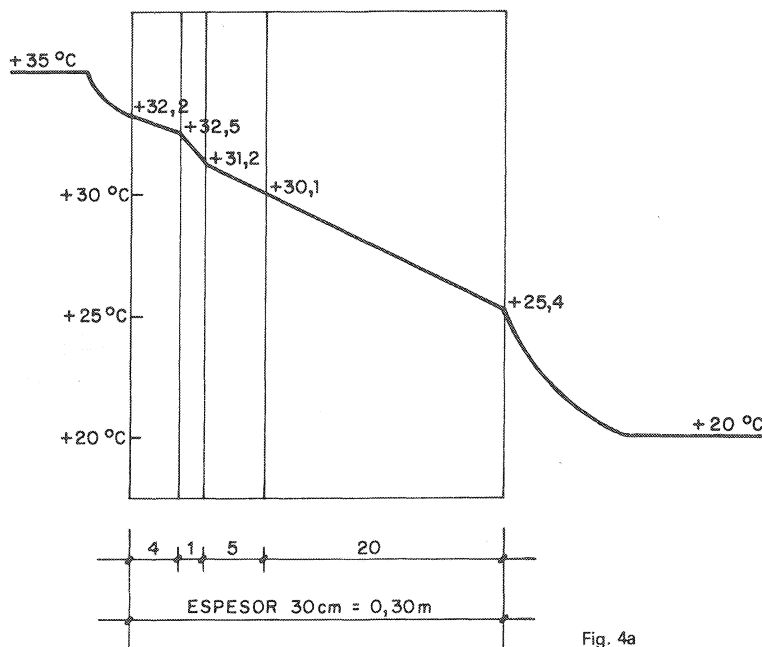


Fig. 4a

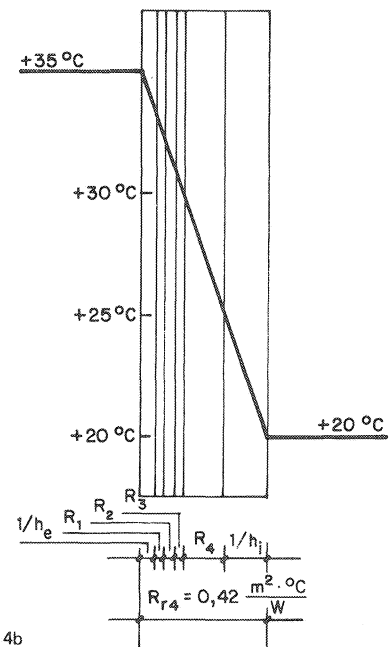


Fig. 4b

Curva de temperatura, tiempo caluroso, de la cubierta plana sin aislamiento térmico

17. REPERCUSION DEL AISLAMIENTO TERMICO SOBRE LOS GASTOS DE LA REFRIGERACION

Según lo demuestran las curvas de temperatura, para mantener ésta en el interior a $+20 \text{ } ^\circ\text{C}$, en ambos casos, hace falta una refrigeración con el fin de eliminar el exceso de calor transmitido desde el exterior.

Para determinar la cantidad de este exceso de calor, se parte del valor del coeficiente K de la transmisión térmica, siendo $K = \frac{1}{R_r}$.

Con $R_{r,3} = 1,28 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$ y $R_{r,4} = 0,42$, ob-

$$t_{n1} - t_n = \frac{1}{h} \cdot \frac{t_e - t_i}{R_{r,4}} = \frac{1}{h} \cdot \frac{15}{0,42} = 35,71 \frac{1}{h} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los resultados figuran en las columnas 7 y 8 de la misma tabla 4 y figuras 4a y 4b.

Observamos que ahora tenemos en la zona de contacto entre el aire interior y la superficie del techo, una temperatura de $t_5 = +25,4 \text{ } ^\circ\text{C}$, notablemente superior a la de $+21,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ de la cubierta con aislamiento térmico.

tenemos:

$$K_3 = \frac{1}{1,28} = 0,78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \text{ y}$$

$$K_4 = \frac{1}{0,42} = 2,38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

Para una superficie de 100 m^2 y una diferencia de temperatura de $t_e - t_i = 35 - 20 = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$, durante siete horas, se transmite de acuerdo con la fórmula [3], apartado 13.1, a través de la cubierta con aislamiento térmico, un exceso de calor Q_3 con un valor de:

$$Q_3 = \frac{0,78 \text{ W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 100 \text{ m}^2 \cdot 15 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot 7 \text{ h} = 8.190 \text{ Wh} = 8,19 \text{ kWh}$$

En las mismas condiciones, obtenemos para la cubierta sin aislamiento térmico, un exceso de calor Q_4 con un valor de:

$$Q_4 = \frac{2,38 \text{ W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 100 \text{ m}^2 \cdot 15 \text{ }^\circ\text{C} \cdot 7 \text{ h} = 24.990 \text{ Wh} = 24,99 \text{ kWh}$$

Según lo demuestran estos resultados, la falta de un aislamiento térmico tiene como consecuencia un aumento de la transmisión de calor hacia el interior de la edificación, de 8,19 kWh a 24,99 kWh, o sea, un aumento del 200%, lo que repercute, naturalmente, en la medida correspondiente, en los gastos de la refrigeración.

18. REPERCUSION DE LA CALEFACCION SOBRE UNA IMPERMEABILIZACION

Al tener prevista la instalación de una calefacción en un sótano impermeabilizado, hay que comprobar previamente si la temperatura a que estará expuesta la membrana impermeable no resulta excesiva y pudiera ser la causa de un deterioro de la misma, reforzando, si es preciso, el aislamiento térmico de la calefacción.

Vamos a aprovechar, otra vez, un ejemplo que nos ofrece F. Lufsky en su libro (4). Se trata de una chimenea que conduce aire caliente y que se encuentra adosada a un muro de un sótano impermeabilizado por medio de una

membrana asfáltica. Esta clase de impermeabilización no debe estar expuesta, de forma permanente, a temperaturas superiores a $+40 \text{ }^\circ\text{C}$. Los detalles constructivos de este muro figuran en la tabla 5.

Suponemos una temperatura de $t_i = +200 \text{ }^\circ\text{C}$ del aire caliente dentro de la chimenea y una temperatura de $t_e = +10 \text{ }^\circ\text{C}$ del subsuelo. El procedimiento a seguir para establecer la curva de temperatura en el muro es idéntico al empleado para las cubiertas. Solamente existe una diferencia en los valores de los coeficientes h_i y h_e de la transmisión de calor superficial, debido al contacto de la superficie del cerramiento con el aire interior y exterior, respectivamente, y por consiguiente, en los valores de las resistencias térmicas superficiales $\frac{1}{h_i}$ y $\frac{1}{h_e}$.

Para el valor de h_i , hay que tener en cuenta la orientación vertical de la superficie y el sentido horizontal del flujo de calor.

La superficie exterior del cerramiento no está en contacto con el aire en movimiento, sino con el subsuelo. El valor de h_e es muy inferior al que corresponde a una cubierta al aire libre; teóricamente debe ser cero, pero con el fin de aumentar el coeficiente de seguridad, aplica Lufsky, para h_e , el valor de $13 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$, equivalente a $15,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ y,

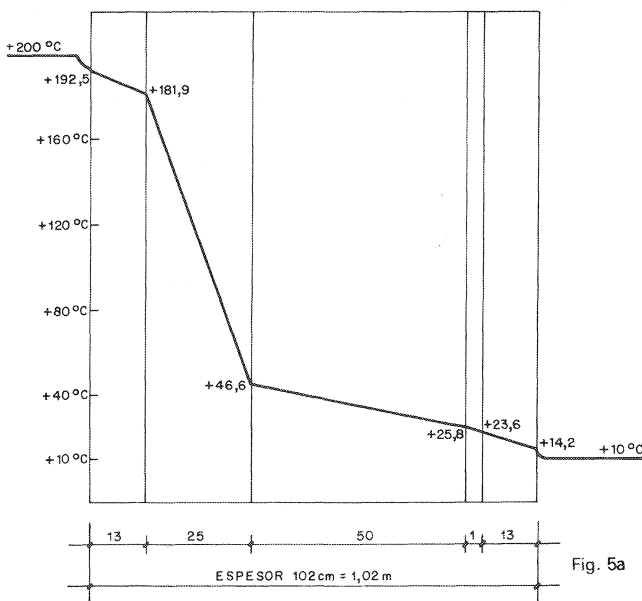


Fig. 5a

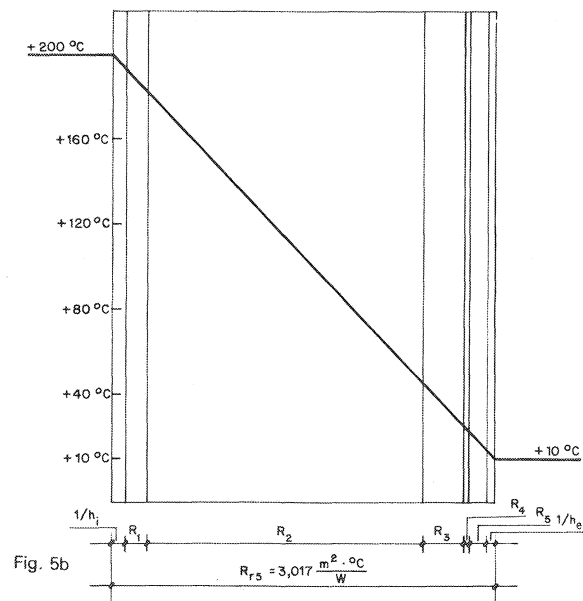


Fig. 5b

Curva de temperatura del sótano con calefacción

por consiguiente, la resistencia térmica superficial

$$\frac{1}{h_e} = 0,066 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

Para averiguar el valor de la resistencia térmica total R_r del muro, nos valemos de la tabla 5. La suma de las resistencias térmicas parciales que figuran en la columna 4, nos da:

$$R_{r,5} = 3,017 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

La diferencia de temperatura entre el aire interior y el exterior resulta ser:

$$t_i - t_e = 200 - 10 = 190 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Introduciendo los valores de $R_{r,5}$ y de $t_i - t_e$ en la fórmula [1] (ver apartado 10), obtenemos la fórmula [6] para la determinación de los valores de los descensos de temperatura $t_{n-1} - t_n$ en los distintos elementos constructivos del muro:

$$t_{n-1} - t_n = R_n \frac{t_i - t_e}{R_{r,5}} = R_n \frac{190}{3,017} = 62,9 R_n \text{ } ^\circ\text{C} \quad [6]$$

o también

$$t_{n-1} - t_n = \frac{1}{h} \frac{t_i - t_e}{R_{r,5}} = \frac{1}{h} \frac{190}{3,017} = 62,9 \frac{1}{h} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Los valores de $t_{n-1} - t_n$ figuran en la columna 5 de la tabla 5, y las temperaturas en las zonas de contacto, en la columna 6 y en las figuras 5a y 5b. La temperatura t_3 en la zona de contacto entre el hormigón y la membrana impermeabilizante resulta ser $+25,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ y se encuentra, por consiguiente, por debajo de la temperatura crítica de $+40 \text{ } ^\circ\text{C}$, por lo que no hace falta modificar el aislamiento térmico previsto.

19. ABACO PARA LA DETERMINACION DEL COEFICIENTE K DE LA TRANSMISION TERMICA DE UNA CUBIERTA PLANA

En la «Revue Générale de l'Étanchéité et de l'Isolation», expone el ingeniero Jean Hra-

bovsky (5) un ábaco con el fin de facilitar la determinación del coeficiente K de la transmisión de calor en una cubierta plana con aislamiento térmico (ábaco 1). Este ábaco se emplea también para seleccionar un aislamiento adecuando, cuando se trata de respetar un valor de K determinado.

El ábaco parte del valor de $R_r = 0,304 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$

de la resistencia térmica total de una cubierta de composición normal, sin incluir el valor de la resistencia térmica del aislamiento, la llamada «cubierta de referencia».

Esta cubierta es muy similar a la que nos ha servido como ejemplo, expuesto en la tabla 3, apartado 11, y cuya resistencia térmica total, tiene el valor de $R_{r,2} = 0,37 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$

Los valores medidos en $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ del coeficiente K que corresponden al valor de $R_r = 0,304$, figuran en las dos verticales que limitan el ábaco. Además, tenemos otra vertical al lado izquierdo y tres más al lado derecho, donde están marcados los valores de K correspondientes a los valores de $R_r = 0,25$; $0,35$; $0,40$; y $0,45$, respectivamente. De este modo se amplía considerablemente el alcance de este ábaco.

Como es natural, estos valores del coeficiente K se desplazan hacia arriba o hacia abajo, en relación con los de la «cubierta de referencia», según sea el correspondiente valor del coeficiente R_r , inferior o superior al valor de $R_r = 0,304$, respectivamente. El ábaco 1, abarca los materiales aislantes, desde la conductividad térmica $\lambda = 0,025$ hasta $\lambda = 0,060$, medido en $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$, cuyos espesores L se extienden desde 2 cm hasta 12 cm.

Las líneas horizontales nos facilitan la equivalencia de los valores de la resistencia térmica entre las distintas combinaciones de la conductividad térmica λ y el espesor L del aislamiento.

Con $\lambda = 0,039$ y un espesor $L = 5,0$ cm, obtenemos para la «cubierta de referencia» un valor de $K = 0,63 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$. (El cálculo nos da un valor de $K = 0,6305$). El mismo valor de K obtenemos también, p. e., con $\lambda = 0,0312$

y un espesor de $L = 4,0$ cm, siendo igual la resistencia térmica interna R de ambos tipos de aislamiento.

$$R = \frac{L}{\lambda} = \frac{0,05}{0,039} = \frac{0,04}{0,0312} = 1,28 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

El valor de R de las resistencias térmicas internas que nos indican las líneas horizontales, disminuye en el sentido hacia la parte superior del ábaco, mientras que el valor del coeficiente K de la transmisión de calor aumenta en este sentido, lo que nos facilita una visión global de la incidencia del valor de R sobre el valor de K .

Al tener que respetar un cierto valor de K , la horizontal que corresponde al mismo, nos indica los distintos tipos de aislamiento térmico que cumplen con esta condición. Para no repetir el ejemplo anterior, vamos a suponer un valor de $K = 0,54 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$. Al estar previsto un aislamiento con un valor de $\lambda = 0,029 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$, éste debe tener un espesor de $L = 4,5$ cm. (El cálculo nos da un valor de $L = 0,0449$ m).

Para un valor de $K = 0,52$ y teniendo previsto un aislamiento de 6,0 cm de espesor,

el valor de λ debe ser $0,037 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}}$
 (El cálculo nos da un valor de $L = 0,03706$).

Todos estos ejemplos se refieren a una cubierta con la resistencia térmica total $R_{t1} = 0,304 \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}$, sin incluir el valor de la resistencia térmica del aislamiento. Vamos a utilizar ahora el ábaco para un distinto valor de R_{t1} , y lo fijamos en $R_{t2} = 0,37$, aprovechando el ejemplo de la tabla 3, complementándolo con el de la tabla 2. La composición de ambas cubiertas es idéntica, con la excepción del aislamiento térmico.

Siendo $R_{t2} > R_{t1} = 0,304$, tenemos que utilizar ahora una de las verticales complementarias, del lado derecho del ábaco.

La que más se acerca al valor de $R_{t2} = 0,37$, es la que corresponde al valor de $R_{t1} = 0,35$.

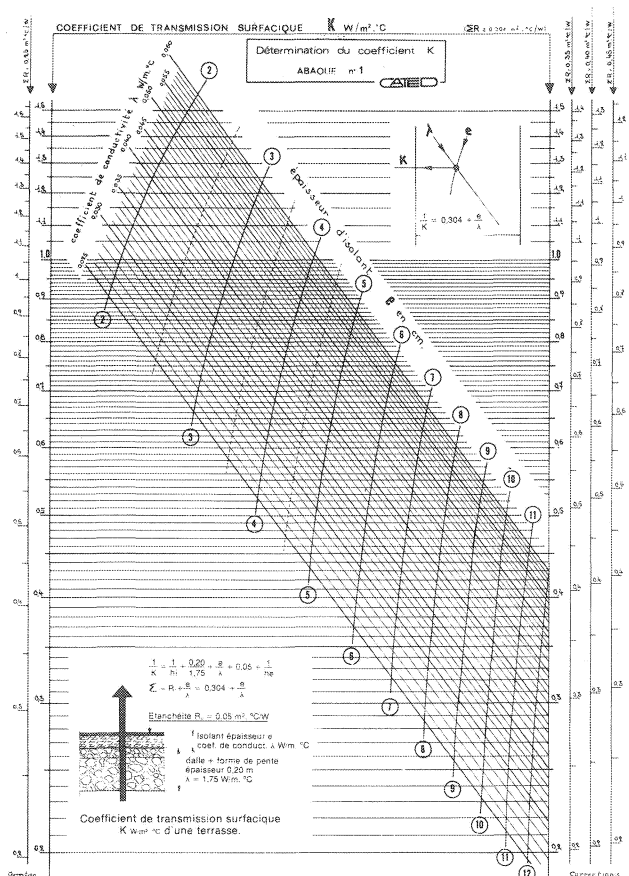
El aislamiento térmico, según la tabla 2, se compone de aglomerado de corcho de 4 cm de espesor, con un $\lambda = 0,046$. La horizontal, o sea, la resistencia térmica que corresponde a este aislamiento, nos marca en la vertical de $R_{t1} = 0,35$, un valor de 0,81 para el coeficiente K .

Efectivamente hemos encontrado el mismo valor de 0,81 al calcular el valor del coeficiente K_1 de la transmisión de calor de la cubierta según tabla 2 (ver apartado 13), lo que demuestra de nuevo la precisión de este ábaco.

20. ABACO PARA LA DETERMINACION DEL COEFICIENTE R DE LA RESISTENCIA TERMICA INTERNA DEL AISLAMIENTO TERMICO

En el ábaco 1, las horizontales representan la equivalencia de los valores de la resistencia térmica interna R entre las distintas combinaciones de la conductividad térmica λ y el espesor L del aislamiento, pero no nos facili-

Abaco 1



tan el valor de R. Para obtener éste, hay que realizar el cálculo correspondiente, de acuerdo con la relación $R = \frac{L}{\lambda}$

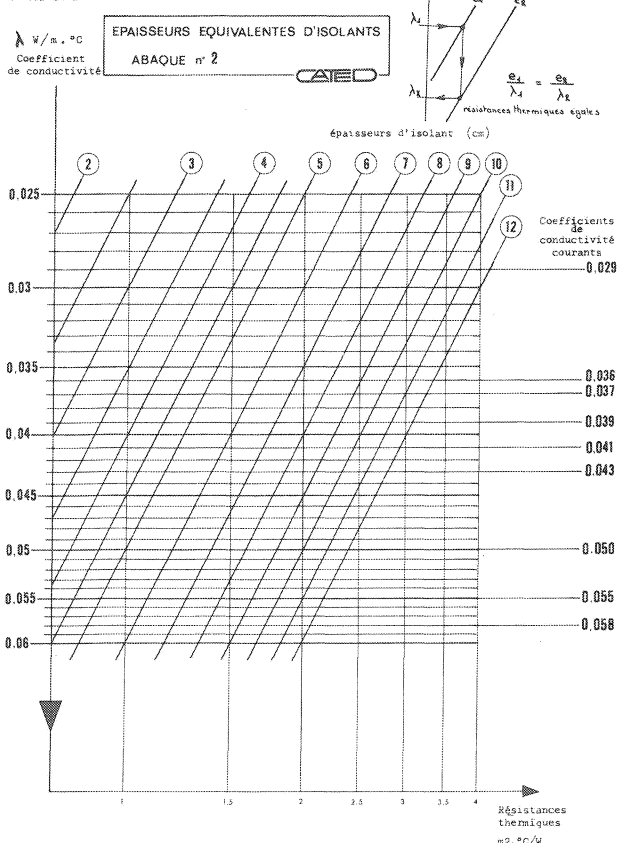
Con el fin de poder obtener directamente los valores de las distintas resistencias R, J. Hrabovsky nos presenta en la misma publicación (5) el ábaco 2, basado en la relación:

$$\frac{L_1}{\lambda_1} = \frac{L_2}{\lambda_2}$$

El ábaco 2, abarca los materiales con valores de λ entre 0,025 y 0,060 $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ y los espesores L entre 2 y 12 cm. Las verticales nos indican directamente los valores de R de las correspondientes resistencias térmicas internas, hasta $R = 4 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$.

Necesitamos, p. e., un aislamiento térmico con un valor de $R = 2,0 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ para no sobrepasar un determinado valor del coeficiente K de la transmisión de calor. El ábaco 2 nos

Abaco 2



indica todas las combinaciones de materiales, desde $\lambda = 0,06$ y un espesor L de 12 cm, hasta $\lambda = 0,025$ y un espesor L de 5 cm, que cumplen con esta condición. Esta información nos facilita la selección más adecuada entre los materiales de aislamiento de distintas características, de que se dispone.

NOTA: En los ábacos el símbolo R corresponde al símbolo R , de la Norma NBE - CT - 79, y el símbolo e al símbolo L de la Norma.

INDICE DE SIMBOLOS EMPLEADOS

1. Q Pérdida o exceso de calor medido en kcal o en $W \cdot h$.
2. K Coeficiente de transmisión de calor. Unidad: $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ó $W/m^2 \cdot ^\circ C$.
3. R , Resistencia térmica total. Unidad: $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C/kcal$ ó $m^2 \cdot ^\circ C/W$.
4. λ Coeficiente de conductividad térmica. Unidad: $kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$ ó $W/m \cdot ^\circ C$.
5. $r = \frac{1}{\lambda}$ Resistividad térmica. Unidad: $m \cdot h \cdot ^\circ C/kcal$ ó $m \cdot ^\circ C/W$.
6. L Espesor. Unidad: metros.
7. $C = \frac{\lambda}{L}$ Conductancia térmica. Unidad: $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ó $W/m^2 \cdot ^\circ C$.
8. $R = \frac{L}{\lambda}$ Resistencia térmica interna. Unidad: $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C/kcal$ ó $m^2 \cdot ^\circ C/W$.
9. h_i ó h_e Coeficiente de transmisión de calor superficial. Unidad: $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ó $W/m^2 \cdot ^\circ C$.
10. $\frac{1}{h_i}$ ó $\frac{1}{h_e}$ Resistencia térmica superficial. Unidad: $m^2 \cdot h \cdot ^\circ C/kcal$ ó $m^2 \cdot ^\circ C/W$.

BIBLIOGRAFIA

1. Real Decreto 2429/1979 de 6 de julio, «B.O.E.» núm. 253, 22 octubre, 1979.
2. Karl Moritz, «Manual de Cubiertas Planas», Editorial Blume.
3. «La Réglementation sur l'Isolation thermique et les toitures revêtues d'étanchéité». Revue Générale de l'Étanchéité et de l'Isolation, núm. 101/1975.
4. K. Lufsky, «Bauwerksabdichtung», Editorial Teubner. Stuttgart, Alemania, 1975.
5. Jean Hrabovsky, «Abaque pour la détermination du coefficient de transmission surfacique d'une toiture-terrace». Revue Générale de l'Étanchéité et de l'Isolation, numéro 106/1977.