

Calcolo delle trasmittanze termiche

Tra i richiami di Trasmissione del Calore abbiamo già messo in evidenza il legame che sussiste tra la potenza termica o frigorifera erogata dagli impianti di condizionamento e la potenza termica o frigorifera richiesta dall'involucro edilizio. Ciò che determina sia l'intensità che la durata in tempo delle dispersioni o delle rientrate termiche è sicuramente dovuto alla qualità dell'involucro edilizio. Tale qualità l'abbiamo già espressa in termini di trasmittanza termica (o resistenza termica).

Nell'ottica di contenere i consumi energetici, il calcolo della trasmittanza termica dei componenti che partecipano alla composizione dell'involucro edilizio, è regolamentato da diverse norme UNI EN.

Se il calcolo della trasmittanza è regolamentato da molte normative, la risoluzione con carta e penna è particolarmente lenta e pertanto si rende efficace l'utilizzo di software commerciali; ciononostante, le norme vanno studiate e ricordate dall'utente perché non è garantito al 100% che il software sia aggiornato in ogni momento, senza contare che questo non è responsabile di eventuali errori di input che possano sfalsare il risultato.

STRATI OMOGENEI

Nel caso di strati omogenei, la resistenza termica utile è data semplicemente dal rapporto:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Dove d è lo spessore dello strato del materiale nel componente, che può non coincidere con lo spessore nominale «preso con il calibro» (per esempio quando un prodotto comprimibile è installato compresso, come nel caso della lana roccia, la quale viene compressa di alcuni millimetri quando applicata nella parete), mentre λ è la conduttività termica utile calcolata secondo ISO/DIS 10456.2 oppure ricavata da valori tabulati (tabelle – ricordiamo – sempre fatte a norma).

I valori dei parametri termofisici degli strati dei materiali costituenti le pareti sono reperibili dalle norme UNI 10351 e UNI 10355, o comunque su appositi manuali tecnici riportanti gli estratti delle suddette norme, oppure ancora dai cataloghi dei costruttori.

Il produttore è obbligato a fornire i valori di riferimento per la prestazione di un determinato prodotto. Successivamente è compito del progettista modificarli a seconda della previsione delle condizioni al contorno con cui il materiale entrerà in contatto una volta posto in opera. Infatti, se chiamiamo λ_D la conduttività dichiarata dal produttore e λ_d la conduttività corretta da impiegare nei calcoli:

$$\lambda_D = \lambda_d F_T F_m F_a$$

Dove F_T , F_m e F_a sono tre fattori di correzione dovuti rispettivamente alla temperatura, all'umidità e all'invecchiamento. Quanto devono valere questi coefficienti? All'aumentare della T il coefficiente F_T deve essere minore di uno (la conducibilità corretta risulta maggiore rispetto a quella dichiarata), poiché tanto più alta è la temperatura tanto minore è la resistenza del materiale; analogamente, una maggiore condizione di umidità favorisce lo scambio termico, per cui all'aumentare dell'umidità consegue un F_m minore di uno; infine, l'usura dovuta all'invecchiamento peggiora la qualità del materiale e ne aumenta dunque la conduttività, quindi lo stesso discorso si estende anche per F_a .

RESISTENZA TERMICA SUPERFICIALE

Per una superficie, il calore si diffonde per via convettiva, conduttiva e radiativa, e ogni tipo di scambio ha un concetto differente di resistenza termica. È possibile ridurre il calcolo della resistenza totale di una parete stratificata – che tenga conto anche della convezione e dell'irraggiamento dell'aria interna ed esterna – introducendo il concetto di resistenza termica superficiale, ossia la resistenza offerta dalla quantità di aria posta a diretto contatto con un elemento tecnico attraverso il quale scorre il flusso termico. Ovviamente, la resistenza termica dell'aria dipende da fattori:

- Ambientali, perché è differente se l'ambiente è confinante o no;
- Morfologiche, perché è differente se la superficie di contatto è piana o no;

- Tecniche, perché varia in funzione dell'emissività della superficie.

Come si calcola la resistenza dell'aria? In generale, si segue la seguente tabella, tenendo conto che il flusso si considera orizzontale per inclinazioni comprese entro $\pm 30^\circ$.

Resistenza [$m^2 K/W$]	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R_{si}	0.10	0.13	0.17
R_{se}	0.04	0.04	0.04

La norma UNI EN ISO 6946:2008 indica di utilizzare sempre valori di resistenza interna pari a $0.13 m^2 K/W$ in altre situazioni.

Per superfici non piane o altri casi particolari, la resistenza superficiale è data da:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r}$$

Dove ovviamente h_c è il coefficiente di scambio convettivo dell'aria mentre h_r è il coefficiente di irraggiamento, che dobbiamo definire a partire dal coefficiente del corpo nero ideale $h_{r0} = 4\sigma T_m^3$ moltiplicato per un fattore ε adimensionale detto emissività che indica la deviazione del caso reale dal modello ideale di corpo nero, sempre compreso tra 0 (corpo bianco ideale) e 1 (corpo nero ideale). Nell'espressione di cui sopra, ricordiamo che:

- $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ è la costante di Stefan-Boltzmann;
- T_m è la temperatura termodinamica media della superficie e delle superfici limitrofe;

Quanto al coefficiente di scambio convettivo, bisogna distinguere la situazione dell'aria interna da quella dell'aria esterna: h_{ci} vale $5.0 W/m^2K$ se il flusso è ascendente, $2.5 W/m^2K$ se è orizzontale e $0.7 W/m^2K$ se è discendente; h_{ce} vale invece $(4 + 4|v|) W/m^2K$, dove v è la velocità del vento in m/s (considerata adimensionale per semplicità di calcolo).

Le due tabelle di esempio a lato si riferiscono rispettivamente al valore del coefficiente di irraggiamento (corpo nero) al variare della temperatura e al valore della resistenza dell'aria esterna al variare della velocità del vento. La seconda tabella assume che $h_r \approx 5.0 W/m^2K$, e credo che lo stesso sia assunto per il calcolo dei valori di R_{si} della tabella precedente.

Temperatura [$^\circ C$]	h_{r0} [W/m^2K]
-10	4.1
0	4.6
10	5.1
20	5.7
30	6.3

Velocità del vento [m/s]	R_{se} [m^2K/W]
1	0.08
2	0.06
3	0.05
4	0.04
5	0.04
7	0.03
10	0.02

Intercapedini d'aria

Parliamo di intercapedine d'aria, nell'ambito dell'isolamento termico, quando tra due pareti vi è aria immobile, l'emissività ε delle stesse è maggiore di 0.8, il rapporto tra spessore e lunghezza delle pareti è minore di un decimo e la portata volumica \dot{V} dell'aria attraverso il volume di controllo dell'intercapedine è nulla. Devono verificarsi tutte queste condizioni affinché si parli di intercapedine. Si segue quindi la norma UNI EN ISO 6946:2008, i cui valori di R_{int} rispetto a spessori noti sono tabellati di seguito. Valori intermedi possono essere ottenuti per interpolazione lineare, ed è invece inutile adoperare estrapolazioni al di sopra dei 300 mm di spessore.

Spessore dell'intercapedine d'aria (mm)	Resistenza termica (m^2K/W) a seconda direzione del flusso di calore		
	ascendente	orizzontale	discendente
0	0,00	0,00	0,00
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

Se invece l'aria non è in quiete, ma sono comunque rispettate le altre condizioni:

- Se l'aria è debolmente ventilata, la resistenza termica utile è uguale alla metà del valore corrispondente della precedente tabella; tuttavia, se la resistenza termica tra l'intercapedine d'aria e l'ambiente esterno è maggiore di $0.15 m^2 K/W$, essa deve essere riportata al valore $0.15 m^2 K/W$;
- Se l'aria è fortemente ventilata, si trascura la resistenza dell'intercapedine e tutto ciò che si trova oltre, come se la parete finisse in corrispondenza dell'intercapedine stessa.

Ponti termici

Il ponte termico è una zona locale limitata dell'involucro edilizio che rappresenta una densità di flusso termico maggiore rispetto agli elementi costruttivi adiacenti. In altre parole, è un ponte termico qualsiasi elemento permetta un(a) maggiore rientro/dispersione di energia termica rispetto alle superfici adiacenti ad esso.

Introduciamo quindi il concetto di trasmittanza termica lineica $\Psi_k [W/m K]$, ossia un coefficiente che esprime il flusso termico disperso attraverso il ponte termico per ogni metro di lunghezza e per una differenza di temperatura unitaria fra interno ed esterno. I valori di Ψ_k sono poi moltiplicati per la lunghezza L del giunto interessato per ottenere il valore della trasmittanza termica equivalente del ponte.

Ponte termico	Tipologia di ponte termico	$\Psi_e [W/mK]$	$l [m]$	$\Psi_e l [W/K]$
Parete/tetto	R2	0,50	30,00	15,00
Parete/parete	C2	-0,10	16,00	-1,60
Parete/pavimento su terreno	GF6	0,45	30,00	13,50
Partizione/parete	IW2	0,95	8,00	5,70
Partizione/tetto	IW6	0,00	5,00	0,00
Architrave, soglia, stipite	W8	1,00	23,60	23,60
Totale				56,20

Per i calcoli delle trasmittanze di ponti termici complessi, sono utilizzabili appositi abachi di calcolo, che tuttavia costituiscono una tecnologia obsoleta: infatti, i calcoli delle trasmittanze termiche sono oggi automatizzati da appositi software commerciali. A noi serve comunque sapere cosa sia e come si riconosce un ponte termico, e quali risultati dobbiamo aspettarci in virtù della classificazione dell'edificio e delle norme.

Infine, il ponte termico non può essere eliminato, ma può solo essere ridotto: ad esempio, su uno spigolo di una parete possiamo incrementare la quantità oppure la qualità dell'isolante, ma mai azzerare completamente il salto di trasmittanza rispetto alla superficie circostante, per motivi in questo caso principalmente geometrici, ma secondariamente anche materici.

Finestre e porte vetrate

Per finestre e porte vetrate, il calcolo della trasmittanza è il risultato di una media ponderata (sull’espansione geometrica di ogni elemento) delle trasmittanze del vetro (U_g), del telaio (U_t) e del ponte termico dovuto al distanziatore, al giunto tra vetro e telaio etc. (Ψ_g), in virtù della UNI EN ISO 10077-1. In sostanza:

U_w = (A_g U_g + A_t U_t + l_g Psi_g) / A_w

Vetrata				Tipo di gas nell'intercapedine (concentrazione del gas ≥ 90%)				
Tipo	Vetro	Emissività normale	Dimensioni [mm]	Aria	Argon	Krypton	SF6	Xenon
Vetrata doppia	Vetro normale	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8	3,0	2,6
			4-8-4	3,1	2,9	2,7	3,1	2,6
			4-12-4	2,8	2,7	2,6	3,1	2,6
			4-16-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6	3,1	2,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,20	4-6-4	2,7	2,3	1,9	2,3	1,6
			4-8-4	2,4	2,1	1,7	2,4	1,6
			4-12-4	2,0	1,8	1,6	2,4	1,6
			4-16-4	1,8	1,6	1,6	2,5	1,6
			4-20-4	1,8	1,7	1,6	2,5	1,7
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,15	4-6-4	2,6	2,3	1,8	2,2	1,5
			4-8-4	2,3	2,0	1,6	2,3	1,4
			4-12-4	1,9	1,6	1,5	2,3	1,5
			4-16-4	1,7	1,5	1,5	2,4	1,5
			4-20-4	1,7	1,5	1,5	3,4	1,5
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,10	4-6-4	2,6	2,2	1,7	2,1	1,4
			4-8-4	2,2	1,9	1,4	2,2	1,3
			4-12-4	1,8	1,5	1,3	2,3	1,3
			4-16-4	1,6	1,4	1,3	2,3	1,4
			4-20-4	1,6	1,4	1,4	2,3	1,4
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,05	4-6-4	2,5	2,1	1,5	2,0	1,2
			4-8-4	2,1	1,7	1,3	2,1	1,1
			4-12-4	1,7	1,3	1,1	2,1	1,2
			4-16-4	1,4	1,2	1,2	2,2	1,2
			4-20-4	1,5	1,2	1,2	2,2	1,2
Vetrata tripla	Vetro normale	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8	1,9	1,7
			4-8-4-8-4	2,1	1,9	1,7	1,9	1,6
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6	2,0	1,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,20	4-6-4-6-4	1,8	1,5	1,1	1,3	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,3	1,0	1,3	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,8	1,3	0,8
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,15	4-6-4-6-4	1,7	1,4	1,1	1,2	0,9
			4-8-4-8-4	1,5	1,2	0,9	1,2	0,8
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,7	1,3	0,7
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,10	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0	1,1	0,8
			4-8-4-8-4	1,4	1,1	0,8	1,1	0,7
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6	1,2	0,6
	Una lastra con trattamento superficiale	≤0,05	4-6-4-6-4	1,6	1,2	0,9	1,1	0,7
			4-8-4-8-4	1,3	1,0	0,7	1,1	0,5
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5	1,1	0,5

Materiale	Tipo	Trasmittanza Termica U_t [W/(m²K)]
Poliuretano	Con anima di metallo e spessore di PUR >= 5	2,8
PVC Profilo vuoto	Con due camere cave	2,2
	Con tre camere cave	2,0
Legno duro	Spessore 70 mm	2,1
Legno tenero	Spessore 70 mm	1,8
Metallo	-	5,5
Metallo con Taglio termico	Distanza minima di 20 mm tra sezioni opposte di metallo	2,4

Materiali del telaio	Vetrata doppia o tripla non rivestita, intercapedine con aria o gas Ψ [W/mK]	Vetrata doppia con bassa emissività, vetrata tripla con due rivestimenti a bassa emissività intercapedine con aria o gas Ψ [W/mK]
Telaio in legno o telaio in PVC	0,06	0,08
Telaio in alluminio con taglio termico	0,08	0,11
Telaio in metallo senza taglio termico	0,02	0,05

gli oscuranti hanno una propria resistenza al flusso termico, che va a sommarsi alle altre resistenze. In termini di U:

U'_w = U_{w+shut} f_{shut} + U_w (1 - f_{shut})

Dove f_shut è la frazione adimensionale della differenza cumulata di temperatura, derivante dal profilo orario di utilizzo della chiusura esterna (generalmente pari a 0.6).

CARATTERISTICHE OTTICHE DEL VETRO

Il parametro che quantifica la percentuale di radiazione solare globale che attraversa una determinata tipologia di vetro per raggiungere l’ambiente interno è il fattore solare g. Tale fattore è definito come la somma della radiazione trasmessa e della radiazione solare assorbita dalla superficie e ritrasmessa verso l’ambiente interno. Il dominio di esistenza di tale valore è, quindi, compreso tra 0 e 1, anche se nel caso specifico possiamo ridurre il campo di esistenza tra 0 e 0.87 (fattore solare g del vetro singolo

Qui a lato abbiamo una tabella con i valori di U_g per diverse tipologie di vetrata, poi raggruppate per rifinitura del vetro, emissività, spessori dei vetri (e dei separatori) e infine gas impiegato nelle intercapedini.

Un’altra norma che ci viene incontro è la UNI TS 11300-1:2008, che dà la trasmittanza termica per alcuni tipi di vetro (tab. di seguito).

Tipo di vetro	U_g [W/(m²K)]
Vetro singolo	5,7
Vetro singolo selettivo	3,2
Doppio vetro normale	3,3
Doppio vetro con rivestimento selettivo	2,0
Triplo vetro normale	1,8
Triplo vetro con rivestimento selettivo	1,4

I valori della trasmittanza termica di una vetrata sono solitamente forniti dal produttore.

Qui a lato abbiamo invece, secondo le medesime norme, i valori di trasmittanza da utilizzare per telaio e intercapedine in base al materiale di cui è costituito il primo.

GLI OSCURANTI
Naturalmente, anche

chiaro). È comunque da sottolineare l'importanza di tale parametro nella comprensione e nel calcolo degli apporti solari attraverso le superfici trasparenti dell'edificio.