



Zeno Martini (admin)

TRASMITTANZA TERMICA DELLE VETRATE

19 April 2006

Premessa sulle proprietà termiche

*L'energia termica, cioè il calore, fluisce da un ambiente ad un altro in tre modi fondamentali: **conduzione, convezione, irraggiamento**. Il senso della trasmissione è dall'ambiente a temperatura maggiore verso quello a temperatura inferiore. Se i due ambiente sono separati da un divisorio, la potenza calorica che lo attraversa è proporzionale alla differenza di temperatura.*

Per quanto riguarda le proprietà termiche del vetro occorre considerare il calore trasmesso dall'ambiente interno verso l'esterno, e quello trasmesso dall'esterno verso l'interno. Nel primo caso il parametro di valutazione è la trasmittanza termica, oggetto del presente articolo; nel secondo caso il fattore selare che sarà trattato in un articolo successivo.

Trasmittanza U_g (W / m^2K)

La costante di proporzionalità è la trasmittanza termica, il "kappa" come si diceva qualche tempo fa, perché quello era il simbolo comunemente usato. Attualmente le norme internazionali hanno stabilito di usare per il vetro (glass) il simbolo **U_g** .

Dunque se **$Dt = t_i - t_e$** è la differenza di temperatura tra un ambiente e l'esterno, la potenza che attraversa un metro quadro di una superficie vetrata è data da

$$Q = U_g * Dt.$$

Se il calore trasmesso all'esterno non è ripristinato, la temperatura dell'ambiente si abbassa fino al valore dell'esterno. Quindi per mantenerla costante occorre produrre il calore che si trasmette

attraverso le pareti. E' allora evidente la convenienza di avere per le superfici vetrate l' U_g più bassa possibile.

Osserviamo che l'inverso di U_g è la resistenza termica: **$R_g=1/U_g$** . E' spesso più comodo riferirsi alla resistenza termica, specie nel calcolo della trasmittanza di pareti composte: la resistenza termica globale è la somma delle resistenze termiche dei singoli elementi che compongono la parete.

NOTA

La legge che regola il flusso di calore è formalmente simile alla legge di ohm. La temperatura corrisponde al potenziale elettrico, e la potenza che si trasmette alla corrente. La legge è dunque del tipo

$$Q = \Delta T / R_T$$

con $\Delta T = T_1 - T_2$ e Q espressa in W/m^2 . R_T rappresenta la resistenza termica complessiva. Se ci si limita alla trasmissione per conduzione, l'analogia con la legge di Ohm si estende anche al calcolo della resistenza termica, che diventa invece più complesso quando occorre tener conto, come si vedrà, di ognuna delle modalità di trasmissione del calore. L'inverso della resistenza termica è la trasmittanza e si misura in W/m^2K . Vedere in proposito la lezione presente in questo sito.

Unità di misura

La potenza calorica si misura come ogni altra potenza (elettrica, meccanica ecc), quindi in watt (W) che sono joule per ogni secondo ($W=J/s$). Il joule è l'unità di misura dell'energia. Nel nostro caso è una potenza che attraversa l'unità di superficie, quindi W/m^2 .

La consuetudine tuttora in uso è di misurare l'energia in calorie (cal) o chilocalorie (kcal), oppure, in wattora (o chilowattora kWh che sono piuttosto noti a tutte per le bollette elettriche). Naturalmente trattandosi di misure della medesima grandezza esse sono tutte ricavabili l'una dall'altra mediante formule di conversione. Ricordiamole:

$$1 \text{ kcal} = 4186 \text{ joule}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.600.000 \text{ joule} = 860 \text{ kcal}$$

La misura della potenza calorica Q si misura in watt (e $kW=1000 \text{ W}$), come detto. Una tradizionale misura è anche la $kcal/h$ (chilocaloria per ora). Si ha:

$$1 \text{ kcal/h} = 1,16 \text{ W} \quad (1 \text{ W} = 0,86 \text{ kcal/h})$$

La trasmittanza termica U_g , è dunque il rapporto tra Q salto di temperatura, quindi si misura in **W/m^2K** . Si ha

$$1 \text{ W/m}^2K = 0,86 \text{ kcal/hm}^2K$$

La trasmittanza U_g tiene conto di tutte le modalità di trasmissione del calore.

La temperatura di un corpo corrisponde allo stato di agitazione delle sue molecole.

La conduzione è la propagazione del calore dovuta al movimento delle molecole che si trasmette a quelle adiacenti; è il modo con cui il calore passa attraverso i corpi solidi;

la convezione è lo spostamento di calore conseguente allo spostamento della massa materiale per cui riguarda principalmente i gas;

l'irraggiamento è la trasmissione di calore per mezzo di onde elettromagnetiche, propagazione che non necessita di alcun mezzo materiale. Ogni corpo che ha una temperatura superiore allo zero assoluto irradia energia, energia che è tanto più elevata quanto maggiore è la temperatura del corpo. Due corpi alla stessa temperatura irradiano (emettono) diverse quantità di energia: hanno, si dice, una diversa emissività. Il corpo che a parità di temperatura emette la maggior quantità di energia è detto "corpo nero" cui è attribuita perciò un'emissività unitaria.

La potenza radiante emessa da un corpo nero per unità di superficie è espressa dalla relazione di Stefan-Boltzmann

$$E_{\text{nero}} = s \cdot T^4$$

con $s = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4\text{)}$.

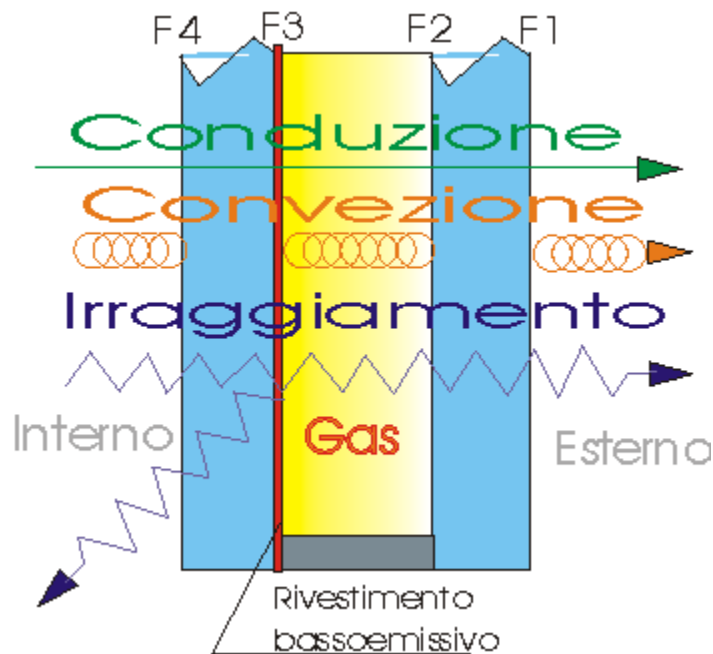
L'emissività, e , di un corpo è dunque il rapporto tra la radiazione emessa dalla sua superficie e la radiazione emessa dal corpo nero alla stessa temperatura: è dunque un numero compreso tra zero ed ad uno.

$$e = E/E_{\text{nero}}$$

Il vetro semplice trasmette il calore per conduzione associata comunque a fenomeni di convezione per il movimento dell'aria degli ambienti che esso separa. La trasmittanza conduttiva di una parete è data dalla conducibilità termica, λ (W/mK), diviso lo spessore d o, ciò che è lo stesso, la sua resistenza è spessore diviso conducibilità (osserviamo qui che in pratica è la stessa definizione della resistenza elettrica fornita dalla seconda legge di Ohm, quando in quest'ultima si ponga $S=1 \text{ m}^2$). La resistenza termica aumenta dunque con lo spessore. Però alla resistenza

termica del vetro è sempre associata la resistenza dovuta alla convezione superficiale che è indipendente dallo spessore e dà luogo ad una resistenza prevalente rispetto a quella del vetro. Si ha allora che raddoppiare lo spessore del vetro comporta una resistenza doppia, quindi una trasmittanza dimezzata, ma la variazione è in realtà molto inferiore. Ad esempio, come i successivi procedimenti di calcolo consentiranno di verificare, per un vetro di spessore 5 mm si ha una $U_g=5,88 \text{ W/m}^2\text{K}$, mentre per 10 mm si ha $U_g=5,71 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Nella vetrata isolante (doppio vetro ed anche triplo), oltre allo stesso tipo di trasmissione, esiste la quella per conduzione attraverso l'intercapedine di gas che separa i vetri. Si aggiunge dunque la resistenza termica del gas che, avendo una conducibilità molto inferiore a quella del vetro, aumenta la resistenza termica complessiva, abbassando in modo consistente la trasmittanza globale, praticamente dimezzandola.



L'irraggiamento è sempre presente e la sua entità può essere modificata da particolari trattamenti applicati alle superfici vetrarie, che ne modificano l'emissività da cui l'irraggiamento dipende. Si hanno i cosiddetti vetri bassoemissivi. Si può in tal modo aumentare notevolmente la resistenza termica, quindi abbassare la trasmittanza. Si arriva a valori di $U_g=1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il rivestimento bassoemissivo in pratica

riflette verso l'interno buona parte del flusso di calore dovuto all'irraggiamento.

Il calcolo dettagliato della trasmittanza è sviluppato secondo la norma **UNI EN 673**.

Come già detto più volte, torna comodo ragionare in termini di resistenza. La resistenza complessiva è:

$$R = R_e + R_t + R_i$$

- **$R_e = 1/h_e$**
 - **h_e** il coefficiente di scambio termico esterno normalizzato in 23 W/(m²K)
- **$R_i = 1/h_i$**
 - **$h_i = h_r + h_c$** è il coefficiente di scambio termico interno con:
 - **h_r** conduttanza convettiva (5,26*e W/(m²K)) con e emissività corretta della superfici (per il vetro sodo-calcico non trattato e=0,837)
 - **h_c** conduttanza convettiva (3,6 (m²K) se la convezione è naturale

$$R_t = R_s + R_v$$

- **R_v** resistenza termica totale dei vetri
- **R_s** resistenza termica totale delle intercapedini

Per ogni vetro si ha

$$R_v = s \cdot r$$

s: spessore del vetro; **r=1/l**: resistività termica del vetro (= 1.0 mK/W)

$$R_s = 1/(h_r + h_g)$$

- **h_r** conduttanza radiativa.
- **h_g** conduttanza del gas

$$h_r = T^3 \cdot 4s / (1/e_1 + 1/e_2 - 1)$$

- **s** : costante di Stefan-Boltzmann(= 5.67*10⁻⁸ W/(m²K⁴))
- **e₁, e₂** emissività 'corrette' della superficie rivolta all'intercapedine

- Nota: generalmente si fornisce per il rivestimento l'emissività normale. Occorre moltiplicare l'emissività normale per dei coefficienti correttivi compresi tra 1,22 e 0,94 per emissività normali che vanno da 0,03 a 0,89)
- **T**: temperatura assoluta media del gas (K)

$$h_g = Nu \cdot l / s$$

- **s**: spessore dell'intercapedine
- **l**: conduttività termica del gas
- **Nu**: numero di Nusselt

Si ha

vetrate verticali	$Nu = 0,035 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,38}$
vetrate orizzontali - calore ascendente	$Nu = 0,16 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,28}$
vetrate a 45° - calore ascendente	$Nu = 0,10 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,31}$
vetrate non verticali- calore discendente	$Nu = 1$

con

$$Gr = 9,81 \cdot s^3 \cdot DT \cdot r^2 / (T_m \cdot m^2)$$

numero di **Grashof**

$$Pr = m \cdot c / l$$

- numero di **Prandtl**
- **DT** : differenza di temperatura tra le superfici che delimitano l'intercapedine
- **r**: massa volumica
- **m** : viscosità dinamica
- **c**: capacità termica specifica
- **T_m** : temperatura media

NB: se, dai calcoli si ha $Nu < 1$ si prende $Nu = 1$: indica che il flusso di calore avviene solo per conduzione attraverso il gas. Quando $Nu > 1$ significa che, oltre alla conduzione esiste la conduzione per convezione.

La seguente tabella riporta le proprietà dei gas puri usati per le vetrate isolanti.

NB: Per le miscele di gas la generica proprietà P si può calcolare dalle proprietà P1 e P2 dei gas componenti in base alla loro frazione volumica F1, F2 ecc. Quindi $P = F1 \cdot P1 + F2 \cdot P2$.

Gas	$T_m(^{\circ}\text{C})$	r (kg/m ³)	m (kg / (m*s))	l (W / m K)	c J / (kg K)
Aria	-10	1.326	1.66E-05	0.02336	1,008x10 ⁻³
	0	1.277	1.71E-05	0.02416	
	10	1.232	1.76E-05	0.02496	
	20	1.189	1.81E-05	0.02576	
Argon	-10	1.829	2.04E-05	0.01584	0,519x10 ⁻³
	0	1.762	2.1E-05	0.01634	
	10	1.699	2.16E-05	0.01684	
	20	1.64	2.23E-05	0.01734	
SF6	-10	6.844	1.38E-05	0.01119	0,614x10 ⁻³
	0	6.602	1.42E-05	0.01197	
	10	6.36	1.46E-05	0.01275	
	20	6.118	1.49E-05	0.01354	
Cripto	-10	3.832	2.26E-05	0.00842	0,245x10 ⁻³
	0	3.69	2.33E-05	0.0087	
	10	3.56	2.4E-05	0.009	
	20	3.43	2.47E-05	0.00926	

Condizioni al contorno normalizzate

Il valore di Ug dipende dalle condizioni ambientali in cui sarà installato il vetro, principalmente di temperatura e di ventilazione. Se queste non sono esattamente specificate occorre riferirsi a valori standard definite dalla Norma UNI EN 673.

r	resistività del vetro sodico-calcico	1,0 m*K/W
e	emissività del vetro sodico-calcico puro	0,837

DT	differenza di temperatura tra le superfici del vetro	15 K
T_m	temperatura media dell'intercapedine	283 K
s	costante di Stefan-Boltzmann	$= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
h_e	coefficiente di scambio termico esterno di superfici di vetro sodico-calcico	23 W/(m ² *K)
h_i	coefficiente di scambio termico interno di superfici di vetro sodico-calcico	8 W/(m ² *K)
A	costante	0,035
n	esponente	0,38
T_p	temperatura di riferimento per le proprietà	283 K

Esempio di calcolo

Vetrocamera con vetro esterno chiaro di spessore 8 mm ($e=0,837$ corretta a 0,79), vetro interno bassoemissivo (rivestimento in faccia 3: NB faccia 1 è convenzionalmente l'esterna) di spessore 6 mm ($e = 0,048$ corretta a 0,056) ed intercapedine con Argo da 12 mm.

$$\mathbf{R_e=1/23=0,0434 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$\mathbf{R_i=1/8=0,125 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$\mathbf{h_r=283^3 \cdot 4 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} / (1/0,837 + 1/0,056 - 1) = 5,14 / (1,27 + 17,9 - 1) = 0.284 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

$$\mathbf{Gr=9,81 \cdot 0,012^3 \cdot 15 \cdot 1,699^2 / 283 \cdot 2,16^2 \cdot 10^{-10} = 7340000 / 1320 = 5560}$$

$$\mathbf{Pr=2,16 \cdot 10^{-5} \cdot 0,519 / 0,01684 = 66,5 \cdot 10^{-5}}$$

$$\mathbf{Nu=0,035 \cdot (5560 \cdot 66,5 \cdot 10^{-5})^{-0.38} = 0.035 \cdot (3,7)^{-0.38} = 0,057 (<1, \text{ quindi } Nu=1)}$$

$$\mathbf{h_g=0,01684 / 0,012 = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

$$\mathbf{R_s=1/(0,284 + 1,4) = 0,594 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$\mathbf{R_v=0,014 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

$$R_t = 0,594 + 0,014 = 0,608 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R = 0,0434 + 0,125 + 0,608 = 0,776 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Ug = 1/R = 1,29 (NB: si approssima, normativamente, alla prima cifra decimale, quindi **Ug = 1,3**)

Si osservi la determinante importanza del vetro bassoemissivo. Con vetro normale si avrebbe

$$h_r = 283^3 \cdot 4 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} / (1/0,837 + 1/0,837 - 1) = 5,14 / (1,27 + 1,27 - 1) = \mathbf{3,34 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

$$R_s = 1 / (3,34 + 1,4) = 0,211 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_t = 0,211 + 0,014 = 0,225 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R = 0,0434 + 0,125 + 0,225 = 0,393 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\mathbf{Ug = 1/R = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}}$$