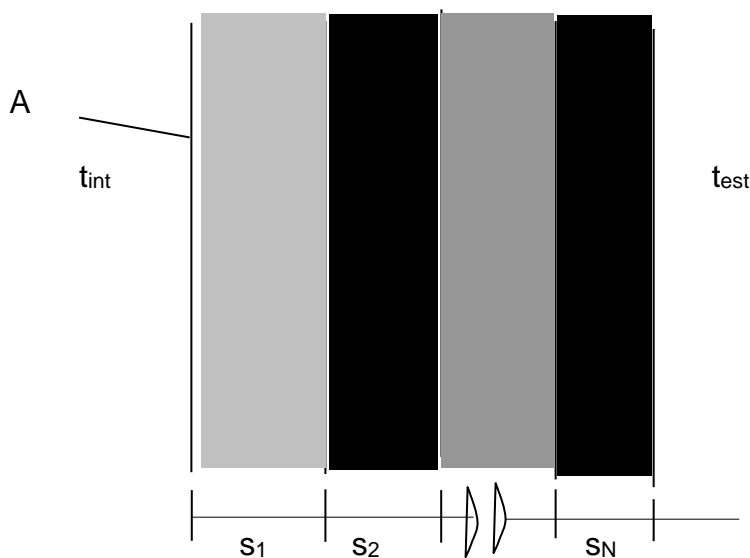


14. LA TRASMISSIONE GLOBALE DEL CALORE

Quando la trasmissione del calore coinvolge tutte e tre le modalità finora viste si parla di 'trasmissione globale' del calore. Si tratterà in particolare nel seguito la trasmissione attraverso più materiali piani e opachi disposti in serie, situazione che si presenta in edilizia nelle pareti multistrato, e quella attraverso un tubo cilindrico (tipico componente impiantistico).

14.1.1 Resistenza termica di una parete opaca

Dato uno strato piano multiplo, si consideri di calcolare la potenza termica che lo attraversa in condizioni stazionarie (proprietà dei materiali e condizioni al contorno indipendenti dal tempo) e in direzione normale alla parete (flusso monodimensionale). Si ipotizzino noti gli spessori s [m], le conducibilità termiche λ [W/(m·K)] o le conduttanze C [W/(m²·K)], le densità ρ [kg/m³] ed i calori specifici c [J/(kg·K)] di ciascuno strato. La parete abbia superficie A [m²]; la temperatura dell'aria negli ambienti sia pari a t_{int} (all'interno) e t_{est} (all'esterno). Consideriamo una parete composta da N strati di materiali diverso.



E' possibile definire la **resistenza termica di ciascuno strato** di spessore s_i e conducibilità termica λ_i con la relazione:

$$R_i = \frac{s_i}{\lambda_i} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (14.1)$$

Se lo strato i -esimo non è omogeneo, risulta più opportuno definire la resistenza termica tramite l'inverso della **conduttanza** C_i [W/(m²K)]

$$R'_i = \frac{1}{C_i} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (14.2)$$

Uguualmente è possibile definire la resistenza termica R_s agli scambi termici convettivi e radiativi che si manifestano sia sulla superficie interna che su quella esterna:

$$R_s = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (14.3)$$

dove α , coefficiente di adduzione, rappresenta la somma dei coefficienti di scambio convettivo h_c e radiativo h_r .

La resistenza totale di scambio R_{tot} è la somma delle resistenze termiche sin qui determinate:

$$R_{tot} = R_{si} + \sum_{i=1}^M R_i + \sum_{j=1}^M R'_j + R_{se} \quad \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right] \quad (14.4)$$

e l'inverso di tale grandezza è definito come coefficiente di trasmissione globale o **trasmittanza U** :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{i=1}^N \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^M \frac{1}{C_j} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (14.5)$$

in cui: α_i , α_e = coefficienti di scambio termico per convezione e radiazione lato interno e lato esterno [$W/(m^2 \cdot K)$];

s_i = spessore dello strato i-esimo della parete [m];

λ_i = conducibilità termica dello strato i-esimo [$W/(m \cdot K)$];

C_j = conduttanza termica dello strato j-esimo [$W/(m^2 \cdot K)$].

14.1.2 Resistenza termica superficiale

Per le resistenze termiche superficiali R_s devono essere utilizzati i valori, in [$m^2 \cdot K/W$], del prospetto seguente:

	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

	Direzione del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
α_i	10	7,7	5,88
α_e	25	25	25

E' considerato orizzontale anche un flusso termico inclinato fino a $\pm 30^\circ$ sul piano orizzontale.

I coefficienti di scambio termico superficiale α_i , α_e sono dati dalla somma dei coefficienti di scambio convettivo h_c e radiativo h_r , così calcolabili [UNI EN ISO 6946:1999]:

$$h_r = \varepsilon \cdot h_{ro}$$

$$h_{ro} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3$$

dove:

- ε è l'emissività della superficie;
- h_{ro} è il coefficiente di irraggiamento di un corpo nero (vedere prospetto seguente);
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$];
- T_m è la temperatura termodinamica media della superficie e delle superfici limitrofe.

Valori del coefficiente di scambio radiativo h_{ro} del corpo nero.

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

Per quanto riguarda il coefficiente di scambio convettivo: sulle superfici interne $h_c = h_{ci}$, dove

- per flusso di calore ascendente: $h_{ci} = 5,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- per flusso di calore orizzontale: $h_{ci} = 2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- per flusso di calore discendente: $h_{ci} = 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Sulle superfici esterne $h_c = h_{ce}$, dove:

$$h_{ce} = 4 + 4 \cdot v$$

dove v è la velocità del vento in prossimità della superficie, in metri al secondo.

I valori della resistenza superficiale esterna, R_{se} , per diverse velocità del vento, sono dati nel seguente prospetto.

Velocità del vento [m/s]	R_{se} [m ² ·K/W]	α_e [W/(m ² ·K)]
1	0,08	12,5
2	0,06	16,6
3	0,05	20
4	0,04	25
5	0,04	25
7	0,03	33,3
10	0,02	50

I valori della resistenza superficiale interna di cui al punto 14.1.2, sono calcolati per $\varepsilon = 0,9$ e con h_{ro} relativo a 20 °C. I valori per la resistenza superficiale esterna sono stati calcolati per $\varepsilon = 0,9$, h_{ro} stimato a 0 °C e con $v = 4 \text{ m/s}$.

Si tratta di una determinazione approssimativa della resistenza superficiale. Calcoli precisi del flusso termico possono essere basati sulle temperature ambientali interne ed esterne (in cui la temperatura dell'aria e quella media radiante sono ponderate in base ai coefficienti di convezione e

di irraggiamento ed in cui si può anche tenere conto della geometria del locale e dell'effetto dei gradienti di temperatura). Se tuttavia le temperature dell'aria e quella media radiante non sono marcatamente differenti, si può usare la temperatura risultante secca (media della temperatura dell'aria e di irraggiamento).

Per le superfici esterne si usa convenzionalmente la temperatura dell'aria esterna, basandosi sull'ipotesi di cielo coperto, in modo che la temperatura dell'aria e quella media radiante siano prossime tra loro. Non viene preso in considerazione l'effetto dell'irraggiamento solare ad onde corte sulle superfici esterne.

14.1.3 Resistenza termica di intercapedini di aria non ventilate

La norma UNI EN ISO 6946:1999 indica la modalità di calcolo per la resistenza termica di intercapedini d'aria nel caso in cui lo spessore nella direzione del flusso termico di tali intercapedini sia inferiore a 0,3 m (e minore del 10% delle altre due dimensioni della parete). Inoltre le facce dell'intercapedine devono essere parallele e perpendicolari alla direzione del flusso termico.

In un'intercapedine non ventilata, non vi è una specifica configurazione che consenta l'attraversamento di aria. Le resistenze termiche, in $[m^2 \cdot K/W]$, si ricavano dal prospetto seguente, i valori intermedi si possono ottenere per interpolazione lineare.

Spessore [mm]	Resistenza termica intercapedine $[m^2 \cdot K/W]$		
	Direzione del flusso termico		
	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

Il fatto che, superato un certo spessore, i valori delle resistenze termiche restino praticamente costanti denota come all'aumentare dello spessore i fenomeni convettivi influiscano sempre di più sulla conduttanza dell'intercapedine. L'influenza dei fenomeni convettivi è trascurabile solo per spessori dell'intercapedine inferiori ai tre centimetri.

Resistenza termica dei sottotetti

Caratteristiche del tetto		R_u $[m^2 \cdot K/W]$
1	Tetto a tegole senza feltro, pannelli o equivalenti	0,06
2	Tetto a lastre o tetto a tegole con feltro o pannelli o equivalenti sotto le tegole	0,2
3	Come in 2 ma con rivestimento di alluminio o altro rivestimento a bassa emissività all'intradosso della copertura	0,3
4	Tetto rivestito con pannelli e feltri	0,3

Nota - I valori del prospetto soprastante comprendono la resistenza termica dell'intercapedine d'aria e la resistenza del tetto (pendente). Essi non comprendono la resistenza termica superficiale esterna (R_{se}).

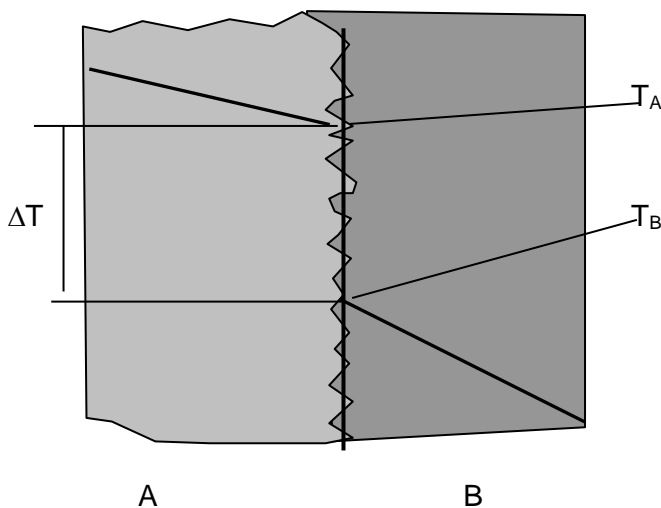
14.1.4 Resistenza di contatto

All'interfaccia tra strati di materiali diversi, a causa del contatto imperfetto esistente a livello microscopico tra le superfici, è rilevabile una differenza di temperatura ΔT che può essere apprezzabile. La rugosità superficiale infatti fa sì che lungo l'interfaccia si formino delle cavità che si comportano da isolante a causa della bassa conduttività termica dell'aria in esse contenuta. Tale resistenza aggiuntiva rende conto pertanto di un accoppiamento imperfetto tra i materiali ed è schematizzabile con il termine resistenza di contatto R_c .

In genere, si preferisce indicare il valore della resistenza di contatto R_c al variare dei materiali in contatto termico tra loro. I valori sperimentali di tali resistenze termiche variano tra 0,00001 e 0,001 ($m^2 \cdot K$)/W. La tabella 14.1 riporta i valori riscontrati per alcuni accoppiamenti. La Figura mostra un esempio di profilo termico.

Tabella 14.1. Valori della resistenza di contatto per alcuni materiali metallici

Acciaio (in vuoto)	$R_c = 6 \div 25 \cdot 10^{-4}$	$[m^2 \cdot K / W]$
Rame (in vuoto)	$R_c = 1 \div 10 \cdot 10^{-4}$	$[m^2 \cdot K / W]$
Ceramica - ceramica	$R_c = 3,33 \div 20 \cdot 10^{-4}$	$[m^2 \cdot K / W]$
Ceramica - metallo	$R_c = 1,18 \div 10 \cdot 10^{-4}$	$[m^2 \cdot K / W]$
Alluminio - alluminio	$R_c = 0,8 \div 4,54 \cdot 10^{-4}$	$[m^2 \cdot K / W]$



14.1.5 Esempi di pareti multistrato

Parete multistrato

	Spessore s [m]	Conduktività λ [W/(m·K)]	Conduktivanz C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			7,7	0,13		
Intonaco	0,02	0,35		0,06	1200	910
Forati	0,08	0,3		0,27	800	840
Isolante	0,05	0,033		1,52	35	900
3 UNI	0,2	0,5		0,40	1050	910
Intonaco	0,02	0,90		0,02	1800	1090
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 2,43 Trasmittanza $U = 0,41$

Muratura antisismica

	Spessore s [m]	Conduktività λ [W/(m·K)]	Conduktivanz C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			7,7	0,13		
Cartongesso	0,01	0,21		0,06	900	1090
Isolante	0,05	0,033		1,52	35	900
Calcestruzzo	0,12	0,9		0,40	1800	910
Intonaco	0,02	0,90		0,02	1800	1090
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 1,59 Trasmittanza $U = 0,53$

Muratura con isolamento ripartito

	Spessore s [m]	Conduktività λ [W/(m·K)]	Conduktivanz C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			7,7	0,13		
Intonaco	0,02	0,35		0,06	1200	910
Laterizio alveolato	0,50	0,34		1,47	800	840
Intonaco	0,02	0,90		0,02	1800	1090
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 1,72 Trasmittanza $U = 0,58$

Muratura in alleggerito ed isolamento concentrato

	Spessore s [m]	Conduttività λ [W/(m·K)]	Conduttanza C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			7,7	0,13		
Intonaco	0,02	0,35		0,06	1200	910
Forati	0,08	0,30		0,27	800	840
Isolante	0,05	0,033		1,52	35	900
Laterizio alveolato	0,50	0,34		1,47	800	840
Intonaco	0,02	0,90		0,02	1800	1090
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 3,50 Trasmittanza U = 0,28

Muratura con isolamento esterno

	Spessore s [m]	Conduttività λ [W/(m·K)]	Conduttanza C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			7,7	0,13		
Cartongesso	0,01	0,21		0,05	900	1090
Mattoni	0,24	0,90		0,27	2000	840
Isolante	0,04	0,033		1,21	35	900
Intonaco	0,02	0,90		0,02	1800	1090
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 1,72 Trasmittanza U = 0,58

Coperture.

Solaio Piano (copertura continua)

	Spessore s [m]	Conduttività λ [W/(m·K)]	Conduttanza C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			10	0,10		
Intonaco	0,02	0,35		0,06	1200	1090
Solaio	0,20	0,80		0,25	250	880
Cappa	0,04	0,90		0,04	1800	900
Pendenza	0,07	0,40		0,18	900	920
Isolante	0,04	0,033		1,21	50	910
Imperm.ne	0,008	0,17		0,05	1200	1470
Copertura	0,06	0,70		0,09	1600	880
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 2,01 Trasmittanza U = 0,50

Tetto inclinato n°1 (copertura discontinua)

	Spessore s [m]	Conduttività λ [W/(m·K)]	Conduttanza C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			10	0,10		
Intonaco	0,02	0,35		0,06	900	1090
Solaio	0,20	0,80		0,25	250	880
Cappa	0,04	0,90		0,04	1800	900
Isolante	0,04	0,033		1,21	50	910
Imperm.ne	0,003	0,17		0,02	1200	1470
Coppi	0,03	2,00		0,02	2700	1260
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 1,74 Trasmittanza U = 0,58

Tetto inclinato n°2

	Spessore s [m]	Conduttività λ [W/(m·K)]	Conduttanza C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			10	0,1		
legno	0,025	0,18		0,14	720	1220
Isolante	0,04	0,033		1,21	50	910
Imperm.ne	0,003	0,23		0,01	800	1210
Coppi	0,03	2,00		0,02	2700	1260
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 1,52 Trasmittanza U = 0,66

Vetrare:**vetro semplice**

	Spessore s [m]	Conduttività λ [W/(m·K)]	Conduttanza C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			10	0,1		
Vetro	0,004	1,00		0,004	2500	840
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 0,144 Trasmittanza U = 6,94

vetro doppio

	Spessore s [m]	Conduttività λ [W/(m·K)]	Conduttanza C [W/(m ² ·K)]	Resist.term. R [m ² ·K/W]	Densità ρ [kg/m ³]	Cal.spec. c_p [J/(kg·K)]
Interf. int.			10	0,1		
Vetro	0,004	1,00		0,004	2500	840
Intercapedine				0,13		
Vetro	0,004	1,00		0,004	2500	840
Interf. est.			25	0,04		

Resistenza termica totale: 0,278 Trasmittanza U = 3,59

Definita la geometria di un edificio e definite le tipologie delle superfici esterne, il numero e le dimensioni delle superfici vetrate, si possono calcolare **le dispersioni termiche dell'edificio attraverso questi elementi di involucro** applicando la relazione:

$$\dot{Q} = U \cdot S_{dipendente} \cdot (t_{int} - t_{ext}) \quad [W]$$

Per la temperatura interna può porre $t_{int} = 20^{\circ}C$, per la temperatura esterna $t_{ext} = -5^{\circ}C$ (temperatura esterna di progetto a Venezia).

14.2 La parete cilindrica

La determinazione della potenza termica trasmessa attraverso una parete cilindrica (tubo) di area A può essere determinata con l'equazione generale della conduzione (vedi cap.10) esprimendo tale grandezza in coordinate cilindriche:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= - \int_{r_1}^{r_2} \lambda_t \cdot A \cdot \frac{dt}{dr} = - \int_{r_1}^{r_2} \lambda_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \frac{dt}{dr} = - \int_{t_1}^{t_2} (\lambda_t \cdot 2 \cdot \pi \cdot L) dt \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} dr \\ \dot{Q} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_t \cdot L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot (t_1 - t_2) \end{aligned} \quad (14.6)$$

L = lunghezza del tubo [m];

r_1 = raggio interno del tubo [m];

r_2 = raggio esterno del tubo [m];

t_1 = temperatura della superficie interna del tubo [K];

t_2 = temperatura della superficie esterna del tubo [K]

λ_t = conducibilità termica del materiale costituente il tubo [W/(m·K)].

Nella relazione (14.6) si è ipotizzato che: $t_1 > t_2$.

La resistenza termica alla conduzione R_t dello spessore $s = (r_2 - r_1)$ di tubo può essere valutata come:

$$R_t = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_t} \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (14.7)$$

Si noti che, nell'espressione precedente, il termine considera anche la superficie.

In molti casi, anziché le temperature superficiali del tubo, sono noti i valori delle temperature del fluido interno t_i ed esterno t_e .

Occorre pertanto considerare le resistenze termiche dovute agli scambi convettivi sul lato interno ed esterno, che sono riprese dalle espressioni precedentemente utilizzate (14.3):

$$R_{s,int} = \frac{1}{h_{int} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L} \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (14.8)$$

$$R_{s,est} = \frac{1}{h_{est} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L} \quad \left[\frac{K}{W} \right] \quad (14.9)$$

con il solito significato per i simboli utilizzati.

Si noti, anche in tali espressioni, come siano stati utilizzati i valori delle resistenze termiche globali: le aree di riferimento, a differenza del caso della parete piana, sono infatti diverse tra interno ed esterno.

Con riferimento alle temperature interna ed esterna, il flusso termico scambiato tra interno ed esterno risulta pari a:

$$\dot{Q} = \frac{(t_{int} - t_{est})}{\frac{1}{h_{int} \cdot 2 \pi r_1 \cdot L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_t \cdot L} + \frac{1}{h_{est} \cdot 2 \pi r_2 \cdot L}} \quad [W] \quad (14.10)$$

Esplicitando il valore della superficie interna: $A_{int} = 2 \pi r_1 L$

$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L \cdot (t_{int} - t_{est})}{\frac{1}{h_{int}} + r_1 \frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_t} + \frac{1}{h_{est} \cdot \frac{r_2}{r_1}}} \quad [W] \quad (14.11)$$

Esplicitando il valore della superficie esterna: $A_{est} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L$

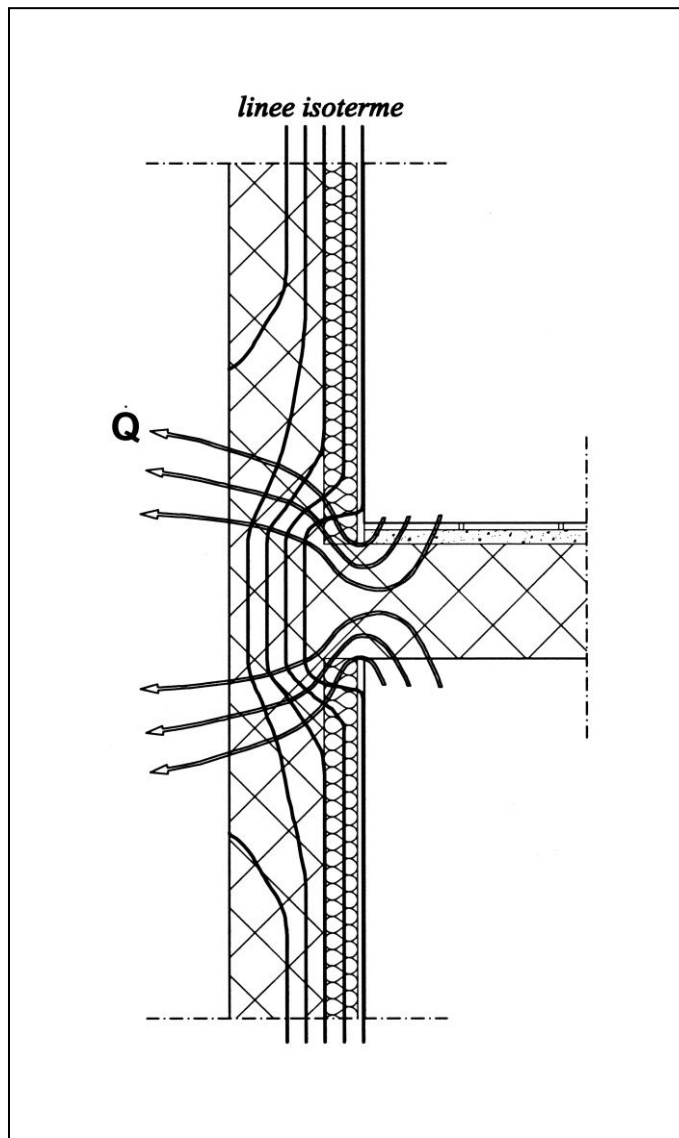
$$\dot{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot L \cdot (t_{int} - t_{est})}{\frac{1}{h_{int} \cdot \frac{r_1}{r_2}} + r_2 \frac{\ln(r_2/r_1)}{\lambda_t} + \frac{1}{h_{est}}} \quad [W] \quad (14.12)$$

Se le temperature dei due fluidi variano lungo il tubo, alla differenza di temperatura ($t_{int} - t_{est}$) deve essere sostituita l'espressione della differenza media logaritmica di temperatura Δt_{ML} (vedi bibliografia).

È interessante notare che l'inserimento di un eventuale strato di isolante è utile solo se il suo spessore è tale da non superare un certo valore critico. Dalla (14.12) si vede infatti che l'aumento di r_2 provoca un aumento del flusso termico.

14.3 I ponti termici

Nella valutazione del carico termico di un edificio bisogna prendere in considerazione quelle situazioni in cui, soprattutto in prossimità di nodi strutturali e tecnologici, il flusso termico non è riconducibile al modello di propagazione monodimensionale del calore. Se questa ipotesi viene meno, le dispersioni termiche nei nodi non possono essere calcolate con la formula (14.5): accade infatti che in prossimità dei ponti termici di forma (dove la disomogeneità deriva dalla disposizione geometrica di strutture uguali) o di struttura (dove abbiamo invece l'accostamento di strutture diverse) l'andamento del campo termico (e quindi il flusso trasmesso) subisca delle perturbazioni per cui le considerazioni fatte in precedenza (in questo capitolo e nei precedenti), di linee di flusso sempre parallele ed ortogonali alle superfici delimitanti uno strato omogeneo, non sono più valide. La figura seguente mostra la deformazione del campo termico in corrispondenza di un ponte termico dovuto alla giunzione di due murature.



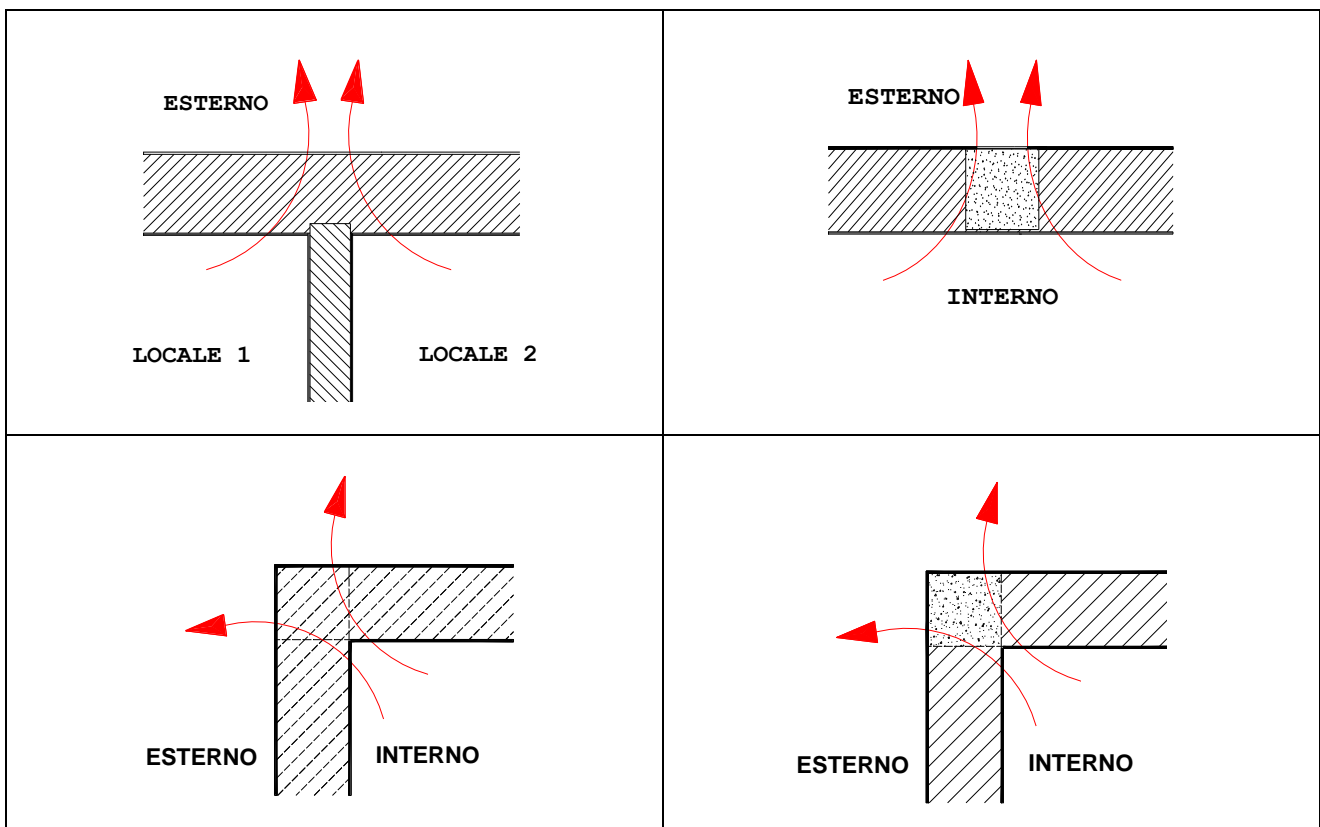
Per calcolare il flusso termico trasmesso in queste configurazioni, comunemente chiamate "ponti termici", non è possibile prescindere da una trattazione separata e differente del problema a

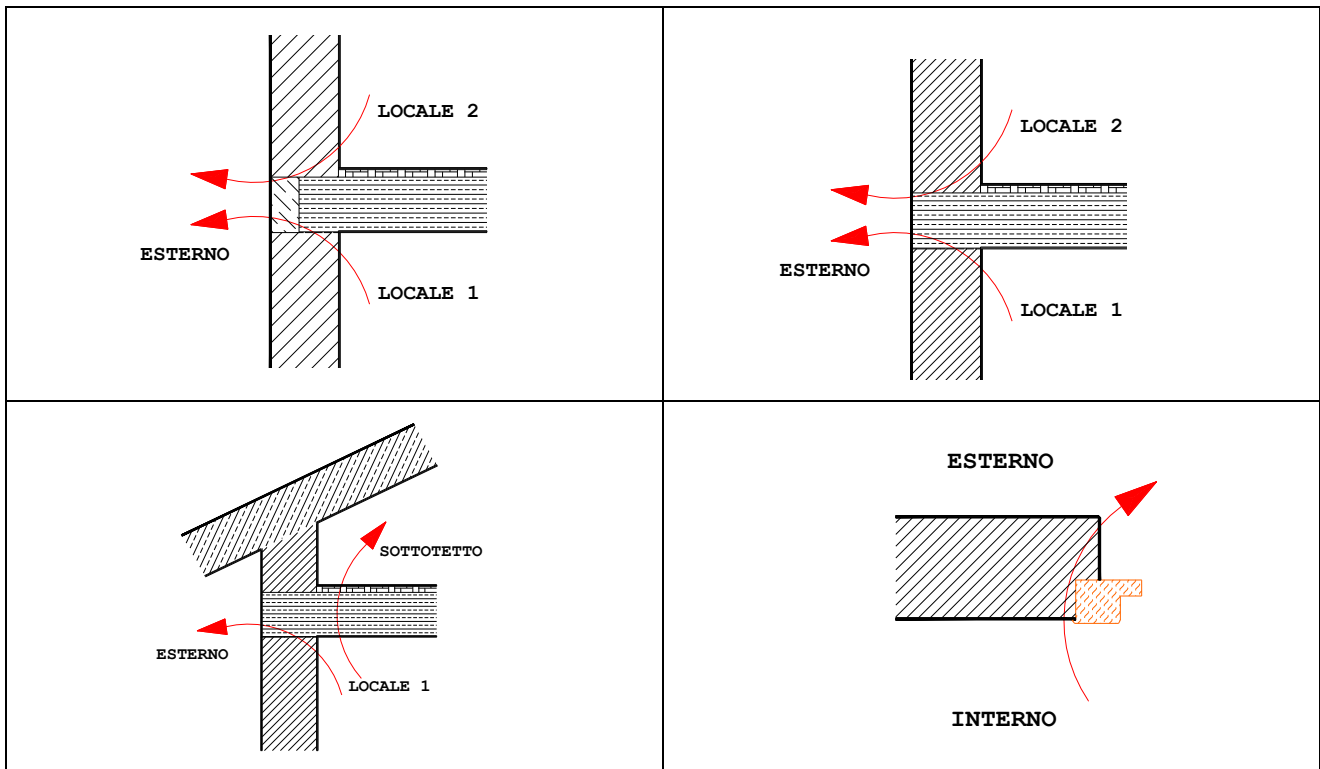
seconda della specificità fisica e geometrica della configurazione edilizia in esame. Per ogni tipologia sono stati svolti degli studi utilizzando il “metodo degli elementi finiti” ed i risultati sono stati successivamente semplificati per una pratica applicazione ricorrendo ad una grandezza chiamata “coefficiente di trasmissione lineica” Ψ_L che dal punto di vista teorico è analoga a quello messo a punto nella determinazione della trasmittanza delle superfici vetrate trattata nel precedente paragrafo. La formula per il calcolo della dispersione termica per ogni singolo ponte termico è in questi casi:

$$\dot{Q}_{pt} = \Psi \cdot L \cdot (t_{int} - t_{ext}) \quad (14.13)$$

dove ψ_L è il coefficiente lineico in $[W/(m \cdot K)]$, L è l'estensione lineare del ponte termico in metri, e $(t_i - t_e)$ è la consueta differenza di temperatura del fluido aria tra interno ed esterno espressa in gradi kelvin. Per ognuna delle diverse particolarità delle strutture è stato valutato il corrispondente valore del coefficiente lineico ψ_L , la cui espressione viene data in funzione dei parametri geometrici o termici della struttura.

La seguente figura illustra alcuni esempi di ponte termico.





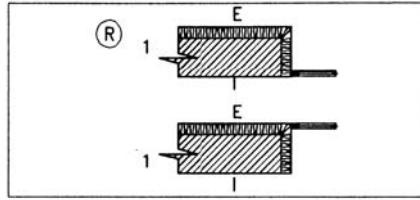
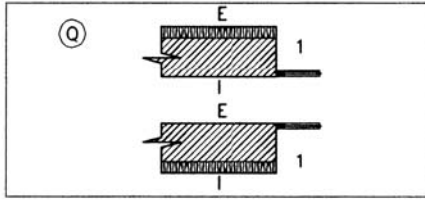
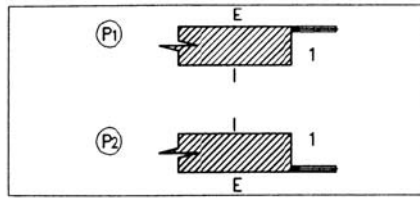
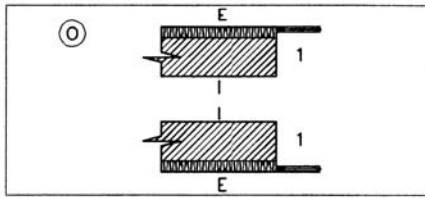
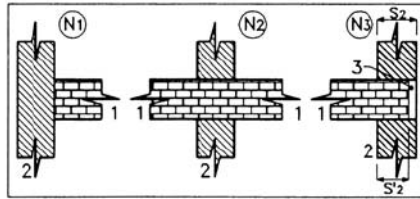
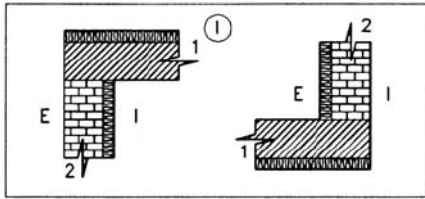
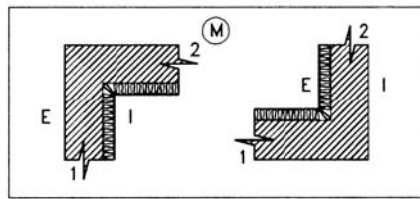
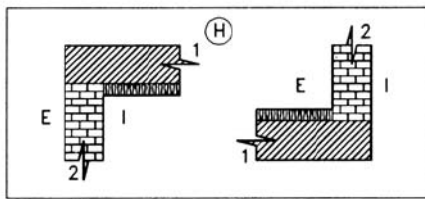
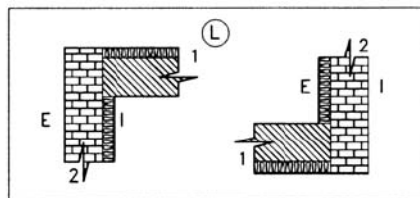
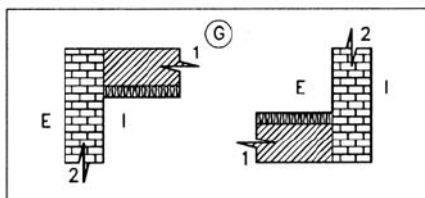
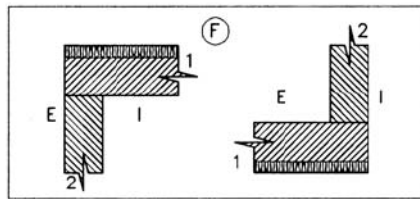
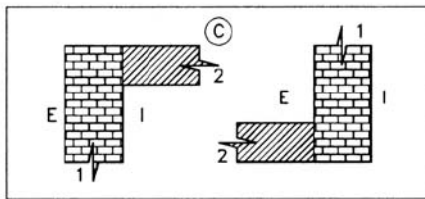
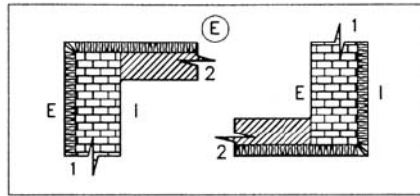
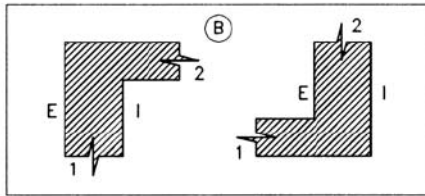
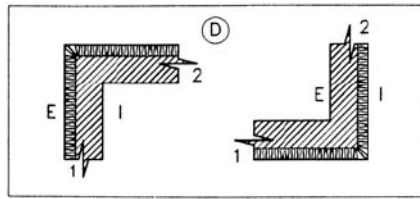
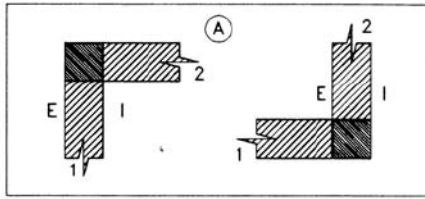
Per una classificazione dei ponti termici in edilizia si rinvia al testo della norma UNI EN ISO 14683: 2001.

Si riportano degli esempi di valutazione delle trasmittanze lineiche basate su studi parametrici delle situazioni più frequenti in edilizia.

Per l'interpretazione delle formule valgono le seguenti precisazioni:

- U_1 e U_2 sono le trasmittanze delle pareti che formano il giunto in $[W/(m^2 \cdot K)]$.
- s_1 ed s_2 sono gli spessori delle pareti che formano il giunto se non c'è isolamento termico oppure gli spessori delle porzioni interne di parete fino all'isolamento termico in caso di isolamento esterno oppure ancora gli spessori delle porzioni esterne di parete fino all'isolamento termico in caso di isolamento esterno in $[m]$.
- r_1 ed r_2 sono le resistenze termiche delle pareti che formano il giunto se non c'è isolamento termico oppure le resistenze termiche delle porzioni interne di parete fino all'isolamento termico in caso di isolamento esterno oppure ancora le resistenze termiche delle porzioni esterne di parete fino all'isolamento termico in caso di isolamento esterno in $[m^2 \cdot K/W]$.
- r'_2 è la somma di tutte le resistenze termiche interne della parete 2.
- α è un coefficiente adimensionale che vale 0,6 se il prodotto $r_{isol} \lambda_2$ è maggiore di 0,9 con r_{isol} pari alla resistenza termica dello strato isolante in $[W/m^2 \cdot K]$ e λ_2 pari alla conducibilità termica della parete 2 in $[W/m \cdot K]$; α è nullo se il prodotto $r_{isol} \lambda_2$ è minore di 0,55; α vale 1,182 se il prodotto $r_{isol} \lambda_2$ è compreso tra i valori precedenti.

Riferimento	Descrizione	Espressione
A	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura con pilastro	$\Psi_L = 0,45 \frac{s_1 + s_2}{2}$
B	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; un materiale continuo	$\Psi_L = 0,2 \cdot \lambda \frac{s_1 + s_2}{2}$
C	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro due materiali diversi	$\Psi_L = 0,2 \cdot \lambda \frac{s_1 + s_2}{2(0,2 + r_1 s_2 / s_1)}$
D	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; un materiale, isolamento continuo	$\Psi_L = 0,6 \cdot \lambda \frac{s_1 + s_2}{2}$
E	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; due materiali, isolamento continuo	$\Psi_L = 0,6 \cdot \lambda_1 \frac{s_1 + s_2}{2}$
F	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; due materiali, isolamento su parete 1, spigolo costituito da parete 1	$\Psi_L = \frac{0,3 \cdot s_1}{(0,06 + r_1 + r'_2)}$
G	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; due materiali isolamento su parete 1, spigolo costituito da parete 2	$\Psi_L = 0,2 \cdot \lambda_2 \frac{s_1 + s_2}{2}$
H	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; due materiali, isol.parziale, su parete 1 spigolo costituito da parete 1	$\Psi_L = \frac{0,2 \frac{s_1 + s_2}{2}}{0,2 + r_1}$
I	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; due materiali, isol.sulle due pareti, spigolo costituito da parete 1	$\Psi_L = \frac{0,3 \cdot s_1}{(0,06 + r_1 + r'_2)} (1 + \alpha)$
L	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; isol. sulle due pareti, spigolo costituito da parete 2	$\Psi_L = \frac{0,3 \cdot s_1}{(0,06 + 0,5 \cdot r_1 + r'_2)} (1 + \alpha)$
M	Collegamento d'angolo tra due elementi di chiusura senza pilastro; isolamento continuo sullo spigolo dal lato interno	$\Psi_L = 0$
N	Collegamento tra un elemento della chiusura (2) e una partizione interna (1)	$\Psi_L = 0,4 \cdot s_1 \frac{1 + \alpha}{r_p + 0,15}$
N1	Se la partizione non penetra nella chiusura	$r_p = \sum r_i$
N2	Se la partizione penetra nella chiusura per l'intero spessore	$r_p = \frac{s_2}{\lambda_1}$
N3	Se la partizione penetra nella chiusura solo per una parte dello spessore (s'_2)	$r_p = \frac{s'_2}{\lambda_1} + \frac{s_2 - s'_2}{\lambda_3}$
O	Giunto tra serramento e chiusura serramento in corrispondenza dell'isolamento	$k_L = 0$
P1	Giunto tra serramento e chiusura; serramento in corrispondenza della parte esterna del materiale	$\Psi_L = 1,4 \frac{\sum s_i}{1,25 + \sum r_i}$
P2	Giunto tra serramento e chiusura; serramento in corrispondenza della parte interna del materiale	$\Psi_L = 1,4 \frac{\sum s_i}{1,25 + \sum r_i}$
Q	Giunto tra serramento e chiusura; serramento in corrispondenza della parte non isolata	$\Psi_L = 0,9 \frac{\sum s_i}{1,25 + \sum r_i}$
R	Giunto tra serramento e chiusura, isolamento continuo; serramento in corrispondenza della parte isolata	$\Psi_L = 0,06 \cdot U_L \sum s_i$



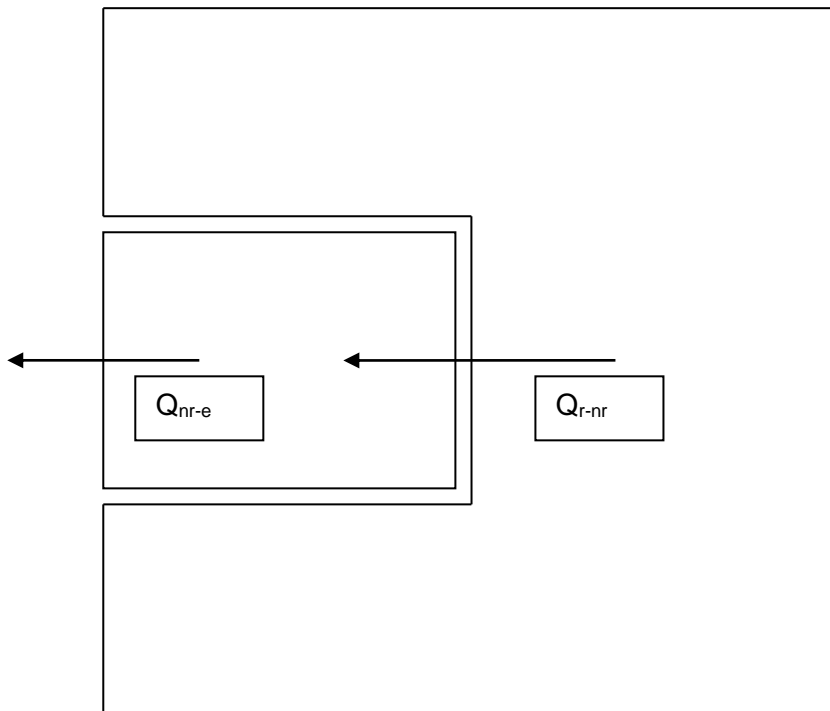
Legenda dei materiali

	a - Acqua
	b - Amianto e derivati
	c - Aria
	d - Calcestruzzi:
	normali
	alleggeriti
	e - Carta, cartoni e derivati
	f - Fibre minerali e naturali
	g - Intonaci e malte
	h - Laterizi
	i - Legnami
	j - Mastici per tenute
	k - Materiali per la impermeabilizzazione
	l - Materiali sfusi e di riempimento:
	isolanti
	non isolanti
	m - Materie plastiche cellulari
	n - Materie plastiche compatte
	o - Metalli
	p - Pannelli e lastre
	q - Porcellana
	r - Rocce naturali
	s - Silicati di calcio in lastre
	t - Vetro

14.4 Temperatura di equilibrio di un locale non riscaldato.

Il calcolo della temperatura interna di un locale non riscaldato è un problema ricorrente nell'esecuzione di bilanci energetici anche semplificati degli edifici. In regime stazionario questa temperatura può essere calcolata in base ad un bilancio dei flussi energetici scambiati dal locale non riscaldato (appendice A della UNI EN ISO 13789:2001).

Si consideri un locale non riscaldato (a temperatura t_{nr}) che scambia un flusso termico (Q_{nr-e}) con l'ambiente esterno (a temperatura t_e) ed un flusso termico (Q_{nr-r}) con i locali riscaldati limitrofi a temperatura data (t_r).



In regime stazionario, ovvero in assenza di variazioni dell'energia interna degli ambienti considerati, le loro temperature interne saranno costanti nel tempo. In base al primo principio si potrà scrivere:

$$\Delta E = \dot{Q}_{nr-e} + \dot{Q}_{nr-r} = -U_{nr-e} \cdot S_{nr-e} \cdot (t_{nr} - t_e) + U_{nr-r} \cdot S_{nr-r} \cdot (t_r - t_{nr}) = 0 \quad (14.13)$$

dunque:

$$\dot{Q}_{nr-e} = \dot{Q}_{nr-r}$$

$$U_{nr-e} \cdot S_{nr-e} \cdot (t_{nr} - t_e) = U_{nr-r} \cdot S_{nr-r} \cdot (t_r - t_{nr})$$

$$U_{nr-e} \cdot S_{nr-e} \cdot t_{nr} + U_{nr-r} \cdot S_{nr-r} \cdot t_{nr} = U_{nr-r} \cdot S_{nr-r} \cdot t_r + U_{nr-e} \cdot S_{nr-e} \cdot t_e$$

$$(U_{nr-e} \cdot S_{nr-e} + U_{nr-r} \cdot S_{nr-r}) \cdot t_{nr} = U_{nr-r} \cdot S_{nr-r} \cdot t_r + U_{nr-e} \cdot S_{nr-e} \cdot t_e$$

$$t_{nr} = \frac{U_{nr-r} \cdot S_{nr-r} \cdot t_r + U_{nr-e} \cdot S_{nr-e} \cdot t_e}{U_{nr-e} \cdot S_{nr-e} + U_{nr-r} \cdot S_{nr-r}} \quad (14.14)$$

Se il locale non riscaldato in questione scambia flussi termici non solo con l'esterno e con lo spazio riscaldato a temperatura nota, ma anche con altri sistemi a diverse temperature (tra cui ad es. il terreno), i relativi flussi andranno aggiunti nell'eq. 14.13 e si procederà in modo analogo.

14.5 Esempi numerici

A) - Una parete multistrato è così costituita:

- strato 1: intonaco spessore 2 cm e $\lambda_1 = 0.35 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$,
- strato 2: laterizio spessore 20 cm e $\lambda_2 = 0.5 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$,
- strato 3: intercapedine d'aria avente resistenza $R = 0,2 \text{ m}^2\text{°C/ W}$,
- strato 4: isolante con $\lambda_4 = 0.034$,
- strato 5: forati spessore 8 cm e $\lambda_5 = 0.3 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$,
- strato 6: intonaco spessore 2 cm e $\lambda_1 = 0.35 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$,
- coefficienti di adduzione interno ed esterno rispettivamente: 8 e 23 $\text{W/(m}^2\text{°C)}$.

trovare lo spessore dello strato di isolante, sapendo che la differenza di temperatura tra interno ed esterno è pari a 30 °C ed il flusso termico che attraversa la parete è di 11 W/m^2 .

il flusso termico specifico (per m^2 di parete) è:

$$\dot{q} = U \cdot \Delta T = U \cdot (t_{int} - t_{ext}) \quad [\text{W/m}^2]$$

dove:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_{i=1}^N \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^M \frac{1}{C_j} + \frac{1}{h_{est}}}$$

in cui: h_{int} , h_{est} = coefficienti di scambio termico per convezione e radiazione lato interno e lato esterno $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$;

s_i = spessore dello strato i-esimo della parete [m];

λ_i = conducibilità termica dello strato i-esimo $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$;

C_j = conduttanza termica dello strato j-esimo $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$.

Inserendo i valori dati:

$$11 = \frac{30}{\frac{1}{8} + \frac{0.02}{0.35} + \frac{0.2}{0.5} + 0.2 + \frac{s_i}{0.034} + \frac{0.08}{0.3} + \frac{0.02}{0.35} + \frac{1}{23}} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$s_i = \left(\frac{30}{11} - 1.264 \right) \cdot 0.034 = 0.049 \text{ [m]}$$

B) - Una parete multistrato è così costituita:

- strato 1: intonaco spessore 2 cm e $\lambda_1 = 0.35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- strato 2: laterizio spessore 20 cm e $\lambda_2 = 0.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- strato 3: intercapedine d'aria avente resistenza $R = 0,2 \text{ m}^2\cdot\text{K / W}$,
- strato 4: isolante con spessore di 5 cm,
- strato 5: forati spessore 8 cm e $\lambda_5 = 0.3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- strato 6: intonaco spessore 2 cm e $\lambda_1 = 0.35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,
- coefficienti di adduzione interno ed esterno rispettivamente: 8 e 23 $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Trovare la conduttività dello strato di isolante, sapendo che la differenza di temperatura tra interno ed esterno è pari a 30 °C ed il flusso termico che attraversa la parete è di 12 W/m^2

il flusso termico specifico (per m^2 di parete) sarà:

$$\dot{q} = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_{i=1}^N \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^M \frac{1}{C_j} + \frac{1}{h_{est}}} \cdot \Delta T \text{ [W/m}^2\text{]}$$

in cui: h_{int} , h_{est} = coefficienti di scambio termico per convezione e radiazione lato interno e lato esterno $[\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}]$;

s_i = spessore dello strato i-esimo della parete [m];

λ_i = conducibilità termica dello strato i-esimo $[\text{W/(m}\cdot\text{K)}]$;

C_j = conduttanza termica dello strato j-esimo $[\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}]$.

Pertanto, inserendo i dati:

$$12 = \frac{30}{\frac{1}{8} + \frac{0.02}{0.35} + \frac{0.2}{0.5} + 0.2 + \frac{0.05}{\lambda_i} + \frac{0.08}{0.3} + \frac{0.02}{0.35} + \frac{1}{23}} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{30}{11} - 1.264 \right) / 0.05 = 29.26 \rightarrow \lambda_i = 0.034$$

C) - Una parete multistrato è così costituita:

- strato 1: intonaco spessore 2 cm e $\lambda_1 = 0.35 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$,
- strato 2: laterizio spessore 20 cm e $\lambda_2 = 0.5 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$,
- strato 3: intercapedine d'aria avente resistenza $R = 0,2 \text{ m}^2\cdot\text{°C / W}$,
- strato 4: forati spessore 8 cm e $\lambda_4 = 0.3 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$,
- strato 5: intonaco spessore 2 cm e $\lambda_1 = 0.35 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$,
- coefficienti di adduzione interno ed esterno rispettivamente: 8 e 23 $\text{W/(m}^2\cdot\text{°C)}$.

trovare la temperatura dell'aria esterna e la temperatura x all'interfaccia tra lo strato 2 e lo strato 3 sapendo che la temperatura interna è di 20 °C ed il flusso termico che attraversa la parete è di 26 W/m².

Il flusso termico specifico (per m² di superficie disperdente) è dato da:

$$\dot{q} = U \cdot (t_i - t_e) = \frac{(t_i - t_e)}{R_{totale}} = \frac{(t_i - t_e)}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_{i=1}^N \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^M \frac{1}{C_j} + \frac{1}{h_{est}}}$$

in cui: h_{int} , h_{est} = coefficienti di scambio termico per convezione e radiazione lato interno e lato esterno [W/(m² K)];

s_i = spessore dello strato i -esimo della parete [m];

λ_i = conducibilità termica dello strato i -esimo [W/(m·K)];

C_j = conduttanza termica dello strato j -esimo [W/(m²·K)].

Per determinare la temperatura all'interfaccia x tra lo strato 2 e lo strato 3 (T_{2-3}) si procede nel seguente modo. Assumendo che il regime sia stazionario, il flusso trasmesso dall'aria interna a quella esterna sarà uguale a quello che dall'aria interna arriva all'interfaccia x in questione.

Pertanto il flusso è calcolabile con entrambe le seguenti equazioni:

$$\dot{q} = \frac{t_i - t_x}{R_{ix}} \rightarrow \dot{q} \cdot R_{ix} = t_i - t_x$$

$$\dot{q} = \frac{t_i - t_e}{R_{tot}} \rightarrow \dot{q} \cdot R_{tot} = t_i - t_e$$

Dalla seconda eq., conoscendo q e la temperatura interna, calcolo la temperatura esterna:

$$26 = \frac{20^\circ\text{C} - t_e}{\frac{1}{8} + \frac{0.02}{0.35} + \frac{0.2}{0.5} + 0.2 + \frac{0.08}{0.3} + \frac{0.02}{0.35} + \frac{1}{23}} \text{ [W / m}^2 \text{]}$$

$$26 = \frac{20^\circ\text{C} - t_e}{0.125 + 0.057 + 0.4 + 0.2 + 0.26 + 0.057 + 0.04} \text{ [W / m}^2 \text{]}$$

$$R_{tot} = 1.139$$

$$t_e = 20 - (26 \cdot 1.139) = -9.6 \text{ [K]}$$

$$R_{ix} = 0.125 + 0.057 + 0.4 = 0.58$$

Eguagliando le due eq. del flusso termico che attraversa la parete si può ricavare la temperatura di interfaccia cercata:

$$\dot{q} = \frac{t_i - t_x}{R_{ix}} = \frac{t_i - t_e}{R_{tot}} \rightarrow \frac{t_i - t_x}{t_i - t_e} = \frac{R_{ix}}{R_{tot}}$$

$$t_i - t_x = \frac{t_i - t_e}{R_{tot}} \cdot R_{ix} = \dot{q} \cdot R_{ix}$$

$$t_x = t_i - \dot{q} \cdot R_{ix} = 20 - 26 \cdot 0,58 = 4,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Bibliografia

- [1] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo. *Trasmissione del Calore*. Ed. CLEUP, Padova, 1992
- [2] F. Incropera, D. DeWitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. J. Wiley & Sons, Inc, Third Edition. 1990
- [3] A.F.Mills. *Heat and mass transfer*. R.D. Irwin, Inc., 1995
- [4] UNI EN ISO 6946: Settembre 1999. *Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodo di calcolo*.
- [5] UNI 10351: 1994 *Materiali da costruzione - Conduttività termica e permeabilità al vapore*
- [6] UNI EN ISO 14683: Aprile 2001. *Ponti termici in edilizia – Coefficiente di trasmissione termica lineica – Metodi semplificati e valori di riferimento*.