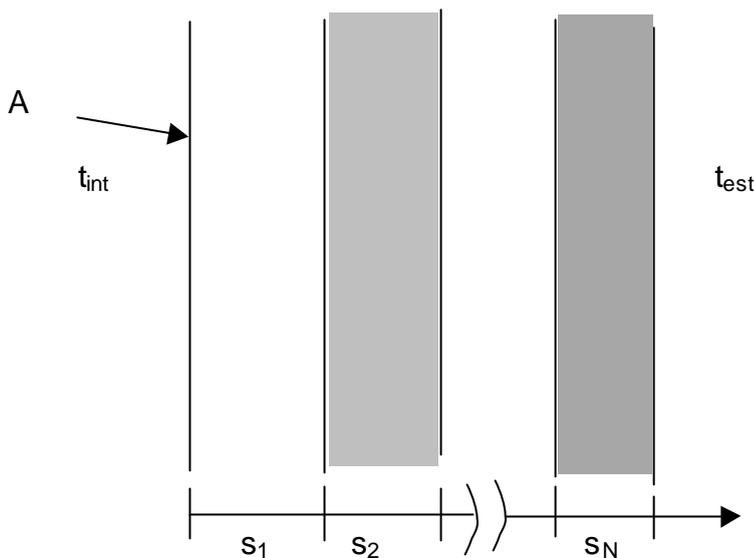


## 14. LA TRASMISSIONE GLOBALE DEL CALORE

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 (parete edilizia) e quella attraverso un tubo cilindrico (scambiatore di calore).

### 14.1.1 LA 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 monodirezionale). Si ipotizzino noti gli spessori [m], le conducibilità termiche  $\lambda$  [W/(m K)] o le conduttanze  $C$  [W/(m<sup>2</sup> K)], le densità  $\rho$  ed i calori specifici  $c$  [J/(kg K)] di ciascuno strato. La parete abbia superficie  $A$  [m<sup>2</sup>]; la temperatura dell'aria negli ambienti sia pari a  $t_{\text{int}}$  (interno) e  $t_{\text{est}}$  (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  $\lambda_i$  con la relazione:

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

Se lo strato  $i$ -esimo presenta una disomogeneità, risulta più opportuno definire la resistenza termica tramite l'inverso della conduttanza  $C_i$  [W/(m<sup>2</sup>K)]

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

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

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

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

$$R_{tot} = R_t + R'_t + R_{si} + R_{se} \quad (14.4)$$

e l'inverso di tale grandezza è definito come coefficiente di trasmissione globale U

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum_{i=1}^N \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^M \frac{1}{C_j} + \frac{1}{h_{est}}} \quad (14.5)$$

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

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

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

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

#### 14.1.2 RESISTENZA TERMICA SUPERFICIALE

Per le resistenze termiche superficiali  $R_s$  devono essere utilizzati i valori, in [ $m^2 K/W$ ], 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

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

#### 14.1.3 RESISTENZA TERMICA DI INTERCAPEDINI DI ARIA NON VENTILATE

La norma ISO 6946 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). 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 [ $m^2 K/W$ ], si ricavano dal prospetto seguente:

spessore [mm]	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

I valori intermedi si ottengono per interpolazione lineare.

Il fatto che, superato un certo spessore, i valori delle resistenze termiche restino praticamente costanti evidenzia 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.

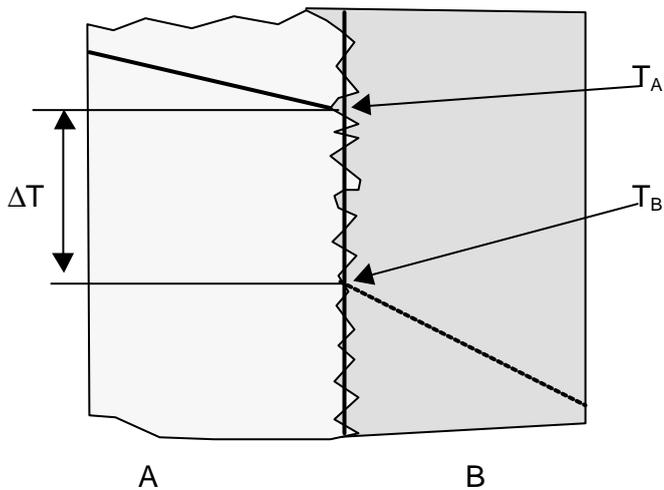
#### 14.1.4 RESISTENZA DI CONTATTO

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  $\Delta T$  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 ( $m^2 K$ )/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

##### Muratura composta

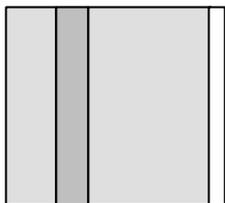


1 2 3 4 5

	Spessore [m]	Cond. Ter. $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]
1- Intonaco	0,02	0,35	1200	910
2- Forati	0,08	0,3	800	840
3- Isolante	0,05	0,033	35	900
4- 3 UNI	0,20	0,5	1050	910
5- Intonaco	0,02	0,90	1800	1090

Trasmittanza globale  $U = 0,412 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

##### Muratura anti - sismica

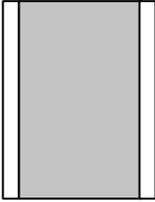


1 2 3 4

	Spessore [m]	Cond. Ter. $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]
1- Cartongesso	0,01	0,21	900	1090
2- Isolante	0,05	0,033	35	900
3- Calcestruzzo	0,12	0,9	1800	910
4- Intonaco	0,02	0,90	1800	1090

Trasmittanza globale  $U = 0,530 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$

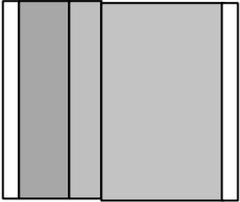
### Muratura isolamento ripartito

	Spessore [m]	Cond. Ter. $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]	
	1- Intonaco	0,02	0,35	1200	910
	2- Laterizio alveolato	0,50	0,34	800	840
	3- Intonaco	0,02	0,90	1800	1090

1 2 3

Trasmittanza globale U =

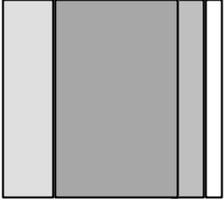
### Muratura in alleggerito ed isolamento concentrato

	Spessore [m]	Cond. Ter. $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]	
	1- Intonaco	0,02	0,35	1200	910
	2- Forati	0,08	0,3	800	840
	3- Isolante	0,02	0,033	35	900
	4- Laterizio alveolato	0,25	0,34	800	840
	5- Intonaco	0,02	0,90	1800	1090

1 2 3 4 5

Trasmittanza globale U =

### Isolamento esterno

	Spessore [m]	Cond. Ter. $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]	
	1- Cartongesso	0,01	0,21	900	1090
	2- Mattoni	0,24	0,90	2000	840
	3- Isolante	0,04	0,033	35	900
	4- Intonaco	0,02	0,90	1800	1090

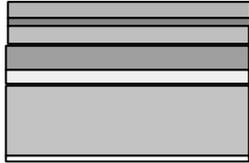
1 2 3 4

Trasmittanza globale U =

## Coperture.

### Solaio Piano (copertura continua)

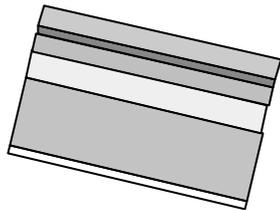
	Spessore [m]	Cond. Ter. $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]
1- Intonaco	0,02	0,21	900	1090
2- Solaio	0,20	0,80	250	880
3- Cappa	0,04	0,90	1800	900
4- Pendenza	0,07	0,40	900	920
5- Isolante	0,04	0,033	50	910
6- Imperm.ne	0,008	0,17	1200	1470
7- Copertura	0,06	0,70	1600	880



Trasmittanza globale U =

### Tetto inclinato n°1 (copertura discontinua)

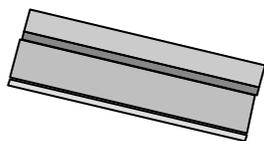
	Spessore [m]	Cond. Ter. $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]
1- Intonaco	0,02	0,21	900	1090
2- Solaio	0,20	0,80	250	880
3- Cappa	0,04	0,90	1800	900
4- Isolante	0,04	0,033	50	910
5- Imperm.ne	0,003	0,17	1200	1470
6- Coppi	0,03	2,00	2700	1260



Trasmittanza globale U =

### Tetto inclinato n°2

	Spessore [m]	Cond. Ter. $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]
1- Legno	0,025	0,18	720	1220
2- Isolante	0,04	0,033	50	910
3- Imperm.ne	0,003	0,23	800	1210
4- Coppi	0,03	2,00	2700	1260



Trasmittanza globale U =

### Vetrate: vetro semplice

	Spessore [m]	Cond. Termica $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]
Vetro	0,004	1,00	2500	840

Trasmittanza termica U =

## vetro doppio

	Spessore [m]	Cond. Termica $\lambda$ [W/(m K)]	Densità $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Cal. Specifico $c_p$ [J/(kgK)]
Vetro	0,004	1,00	2500	840
Intercapedine	Resistenza termica = 0,13 K m <sup>2</sup> /W			
Vetro	0,004	1,00	2500	
	840			

Trasmittanza termica U =

Definita la geometria di un edificio, e definite a piacere le tipologie delle superfici esterne tra quelle sopra elencate, il numero e le dimensioni delle superfici vetrate, si possono calcolare **le dispersioni termiche totali dell'edificio applicando la relazione:**

$$q = U S_{\text{diperdente}} (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}})$$

Per le temperatura interna si ponga  $t_{\text{int}} = 20^\circ\text{C}$ , per la temperatura esterna  $t_{\text{ext}} = -5^\circ\text{C}$ .

## 14.2 LA PARETE CILINDRICA

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

$$q = \frac{2p I_t L}{\ln(r_2 / r_1)} \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \quad (14.6)$$

L = lunghezza del tubo [m];

$r_1$  = raggio interno del tubo [m];

$r_2$  = raggio esterno del tubo [m];

$T_{s1}$  = temperatura della superficie interna del tubo [K];

$T_{s2}$  = temperatura della superficie esterna del tubo [K]

$\lambda_t$  = conducibilità termica del materiale costituente il tubo [W/(m K)].

Nella relazione (14.6) si è ipotizzato che:

$$T_{s1} > T_{s2}.$$

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

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

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 dovuti agli scambi convettivi sul lato interno ed esterno, che sono riprese dalle espressioni precedentemente utilizzate (14.3):

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

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

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:

$$q = \frac{(T_{int} - T_{est})}{\frac{1}{h_{int} \cdot 2p \cdot r_1 \cdot L} + \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2p \cdot l_t \cdot L} + \frac{1}{h_{est} \cdot 2p \cdot r_2 \cdot L}} \quad (14.10)$$

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

$$q = \frac{2p \cdot r_1 \cdot L (T_{int} - T_{est})}{\frac{1}{h_{int}} + r_1 \frac{\ln(r_2 / r_1)}{l_t} + \frac{1}{h_{est} \cdot \frac{r_2}{r_1}}} \quad (14.11)$$

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

$$q = \frac{2p \cdot r_2 \cdot L (T_{int} - T_{est})}{\frac{1}{h_{int} \cdot \frac{r_1}{r_2}} + r_2 \frac{\ln(r_2 / r_1)}{l_t} + \frac{1}{h_{est}}} \quad (14.12)$$

Se le temperature dei due fluidi variano lungo il tubo, alla differenza di temperatura ( $T_{int} - T_{est}$ ) deve essere sostituito l'espressione della differenza media logaritmica di temperatura  $\Delta T_{ML}$  (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.

## **BIBLIOGRAFIA**

C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo. *Trasmissione del Calore*. Ed. CLEUP, Padova, 1992

F. Incropera, D. DeWitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. J. Wiley & Sons, Inc, Third Edition. 1990

A.F.Mills. *Heat and mass transfer*. R.D. Irwin, Inc., 1995