

## PRINCIPI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

---

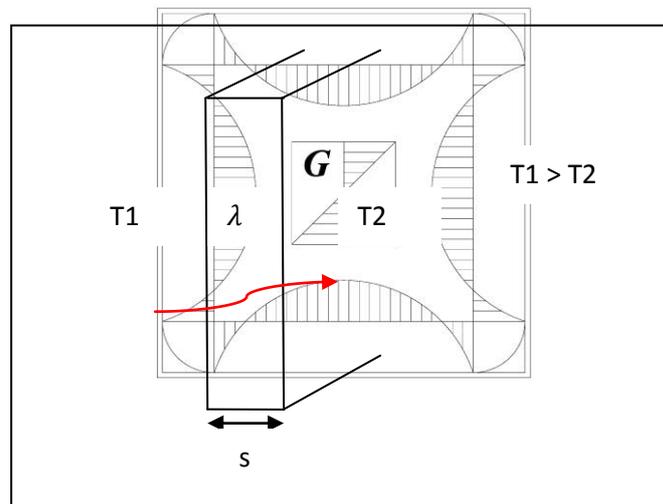
La trasmissione del calore può avvenire attraverso tre meccanismi:

- **Conduzione;**
- **Convezione;**
- **Irraggiamento;**

Nella **conduzione** la trasmissione del calore è riconducibile alle interazioni tra molecole adiacenti; tale fenomeno può verificarsi sia nei solidi che nei fluidi.

In base all'equazione di Fourier, il calore scambiato nell'unità di tempo tra due corpi a contatto tra loro a differente temperatura è espresso dalla seguente espressione:

$$\dot{Q} = \left(\frac{\lambda}{s}\right) A(T_1 - T_2)$$



essendo:

$\lambda$  un parametro di conducibilità termica del materiale che compone la parete(W/mK);

$\lambda/s$  è detta **conduttanza**,  $s/\lambda$  **resistenza termica** [mqK/W];

A la superficie di scambio di calore;

$T_1$  la temperatura interna della parete;

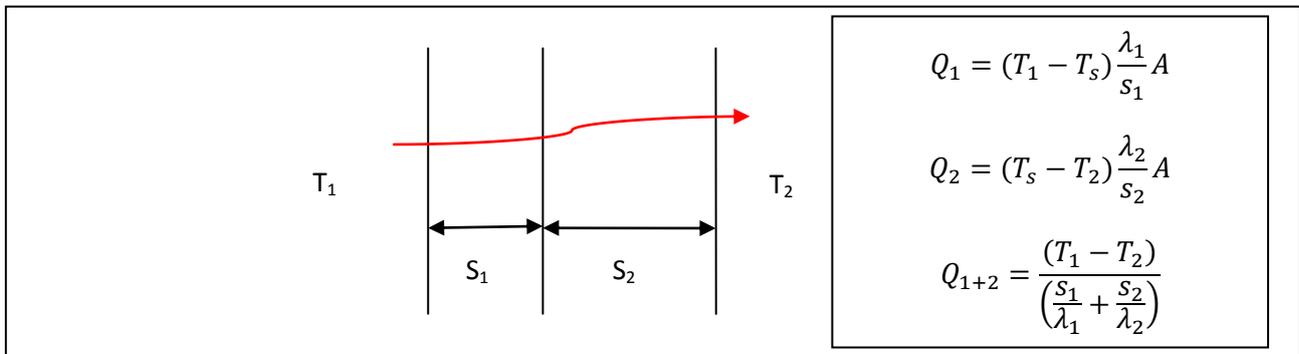
$T_2$  la temperatura esterna della parete;

s lo spessore della parete.

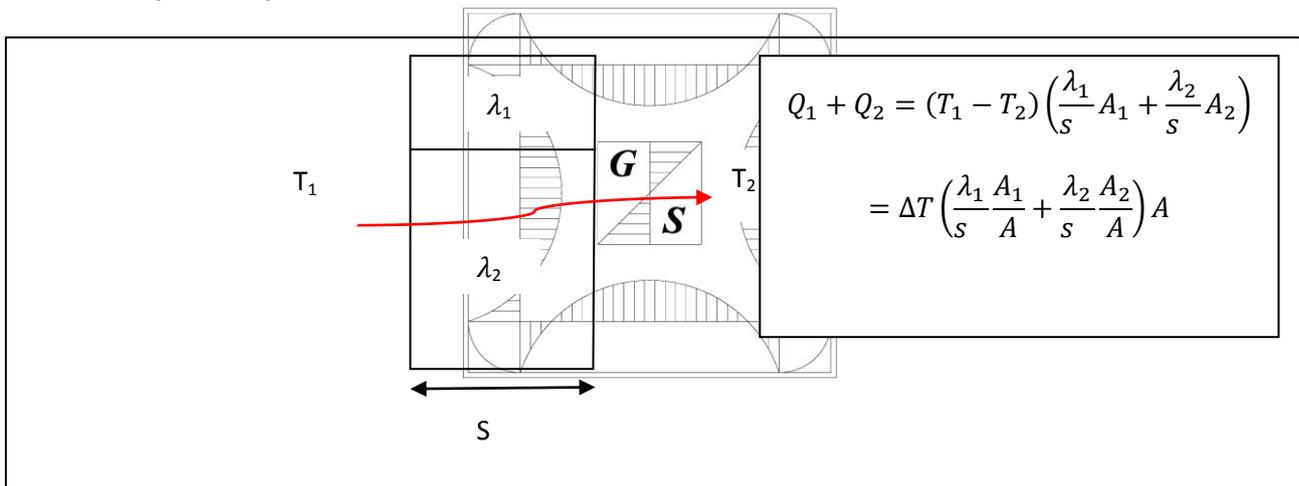
$\lambda$  è la **conducibilità della parete**, esprime il flusso di calore nell'unità di tempo e superficie che attraversa la parete quando esiste una differenza di temperatura unitaria [W/mK].

## TRASMISSIONE DEL CALORE ATTRAVERSO LE PARETI

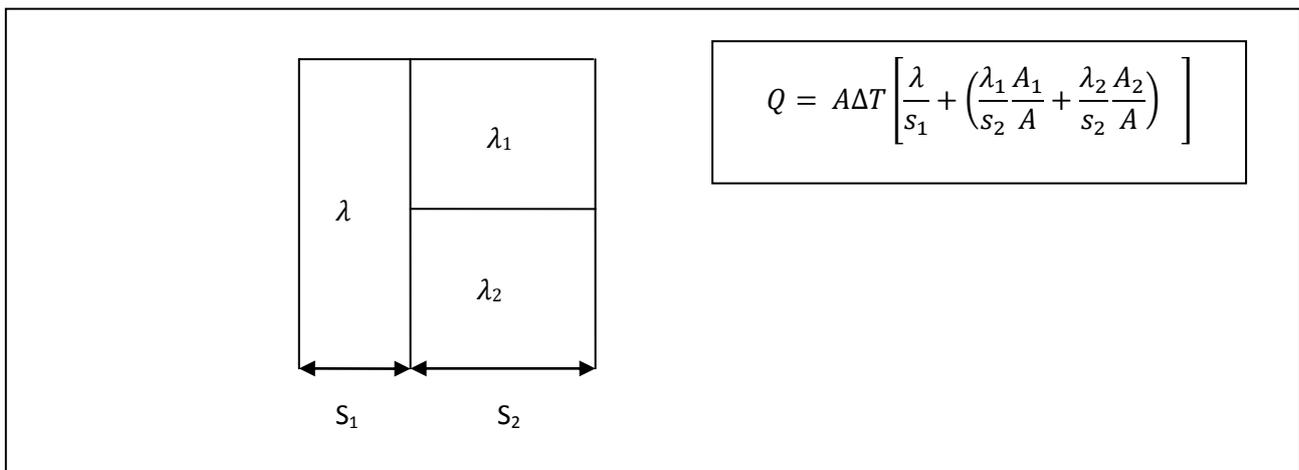
**Conduzione pareti in serie:**



**Conduzione pareti in parallelo:**



**Conduzione parete composta:**



Nella **convezione** la trasmissione del calore avviene attraverso un movimento macroscopico di alcune parti della massa del fluido rispetto ad altre, con trasporto di materia. In genere la convezione avviene tra la superficie di un corpo solido (ad es. la parete) e l'aria dell'ambiente verso cui il corpo si affaccia.

La potenza termica (W) scambiata per convezione è esprimibile dalla formula:

$$Q = h_c A (T_s - T_f)$$

essendo:

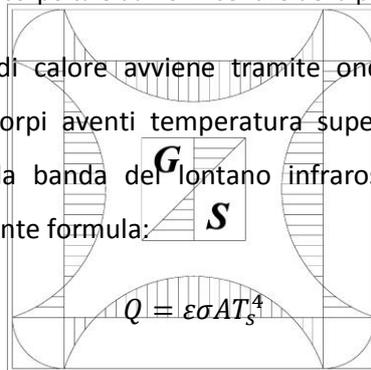
$h_c$  il coefficiente convettivo o di convezione, che dipende da fattori di carattere fluidodinamico, per il calcolo dei quali si fa riferimento a numeri come quello di Nusselt, Reynolds, Prandtl, Grashof;

A la superficie di scambio;

$T_s$  la temperatura superficiale del corpo;

$T_f$  la temperatura del fluido a distanza dal corpo tale da non risentire della presenza del solido.

Nell'**irraggiamento** la trasmissione di calore avviene tramite onde elettromagnetiche che propagano energia anche nel vuoto. Tutti i corpi aventi temperatura superiore allo 0 K emettono energia per irraggiamento prevalentemente nella banda del lontano infrarosso; la potenza termica emessa per irraggiamento si esprime con la seguente formula:



essendo:

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4\text{)}$  la costante di Stefan-Boltzmann;

$T_s$  la temperatura superficiale del corpo;

$\epsilon$  il coefficiente di emissione caratteristico della superficie esterna del corpo grigio considerato;

A la superficie del corpo.

Poiché ogni corpo emette energia, altrettanto vero è che ogni corpo riceve energia; in edilizia è lecito affermare, con errore trascurabile, che il coefficiente di emissione caratteristico di un corpo sia uguale al coefficiente di assorbimento delle radiazioni emesse dagli altri corpi. Per fare un bilancio energetico è necessario relazionare l'energia emessa da ciascun corpo con i fattori di vista che legano un corpo all'altro; i fattori di vista forniscono la misura percentuale di quanta della superficie di un corpo viene vista, in una

sorta di proiezione prospettica, da un altro corpo e viceversa: per un corpo immerso in un ambiente la sommatoria dei fattori di vista che esso ha rispetto a tutti i corpi che delimitano detto ambiente è 1 (100%).

L'energia scambiata tra un corpo e l'ambiente in cui è contenuto dipende dalle temperature superficiali dei vari oggetti e del corpo stesso, poste in relazione secondo i diversi fattori di vista; si può definire pertanto una temperatura media radiante di un ambiente rispetto ad un punto P:

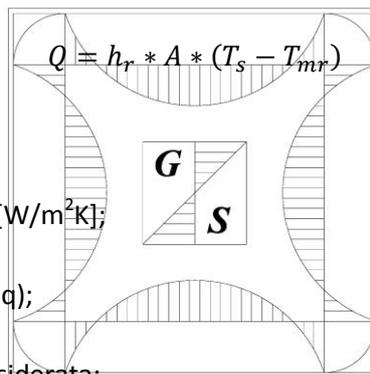
$$t_{mr} = \sum_i F_{i,P} * t_i$$

con:

$F_{i,P}$  fattore di vista tra punto P e le superfici che delimitano l'ambiente;

$t_i$  le rispettive temperature superficiali.

La potenza termica netta di calore scambiato per irraggiamento è ricavabile dalla seguente formula:



essendo

$h_r$  il coefficiente di scambio radiativo [ $W/m^2K$ ];

$A$  la superficie di scambio di calore ( $m^2$ );

$T_s$  la temperatura della superficie considerata;

$T_{mr}$  la temperatura media radiante dell'ambiente visto dalla superficie in esame.

Se immaginiamo un ambiente interno a temperatura maggiore di quello esterno, per l'insieme degli effetti della convezione e dell'irraggiamento, si può affermare che la quantità di calore che passa dall'ambiente interno alla superficie esterna della parete è direttamente proporzionale all'area della superficie stessa, al salto di temperatura tra aria e superficie e ad un **coefficiente di scambio termico di adduzione** interno  $\alpha_i$ , che esprime la quantità di calore ceduta nell'unità di tempo ad ogni unità di area, per ogni grado di differenza di temperatura. Analogamente, per quanto riguarda il calore ceduto dalla parete all'ambiente esterno, si avrà il coefficiente di scambio termico di adduzione esterno  $\alpha_e$ .

Il **calore scambiato per convezione ed irraggiamento** può essere espresso, in forma semplificata, come:

$$Q = (h_c + h_r)A(T_s - T_a) = \alpha A(T_s - T_a)$$

Con:

$T_a$  temperatura ambiente;

$\alpha$  coefficiente di adduzione.

abituali valori dei coefficienti di adduzione per le abitazioni sono:  $\alpha_i = 7.7 \text{ W/mqK}$ ;  $\alpha_e = 25 \text{ W/mqK}$ .

In definitiva, la **resistenza termica** di una generica parete, considerando gli effetti di conduzione, convezione ed irraggiamento, può esprimersi come:

$$R = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_i \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e} \left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

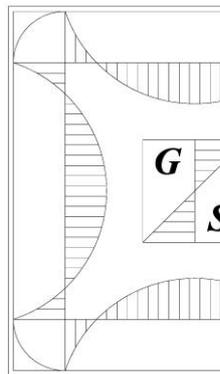
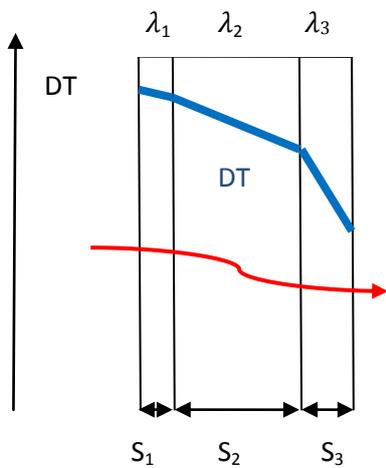
E quindi la trasmittanza come:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_i \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_e}} \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

La trasmittanza termica del muro deve essere più bassa possibile per limitare i consumi energetici nelle abitazioni. Inoltre, la trasmittanza influenza i fenomeni di condensa; è quindi importante conoscere, in funzione della temperatura invernale esterna della zona in esame la trasmittanza termica massima al di sotto della quale si evita l'insorgere sul muro dei fenomeni di condensa. Per valutare la performance energetica degli edifici si adoperano indicatori come la trasmittanza media dell'intero edificio ed il consumo di energia, ad esempio, per il riscaldamento riferito all'unità di superficie e per anno [MJ/mq\*anno]. A livello qualitativo si può definire la trasmittanza media dell'edificio come quel valore che avrebbe un'edificio dotato di superfici uguali e pareti omogenee tutte identiche tra loro: si tratta di fare una media ponderata delle varie trasmittanze che compongono l'abitazione.

ESEMPI APPLICATIVI

Calcolo trasmittanza parete multistrato



$\lambda_1=0.6 \text{ W/mK}; \lambda_2=0.9 \text{ W/mK}; \lambda_3=0.04 \text{ W/mK}$

$S_1=2\text{cm}, S_2=25 \text{ cm}, S_3=0,05\text{cm}.$

$\alpha_i=7 \text{ W/mqK}, \alpha_e=12,5 \text{ W/mqK}; DT=32^\circ\text{C}.$

$U=0.14+(0.02/0,6)+(0,25/0,9)+(0,05/0,04)+0.08=0,56 \text{ W/mqK}.$

$Q=A*U*DT=10*0,56*32=179,2\text{W}$

Flusso calore per unità di sup.:

$q=U*DT=17,9\text{W/mq};$

$DT=DT_i+DT_1+DT_2+DT_3+DT_e :$

$DT_i=q*R_i=17,9/\alpha_i=2,5;$

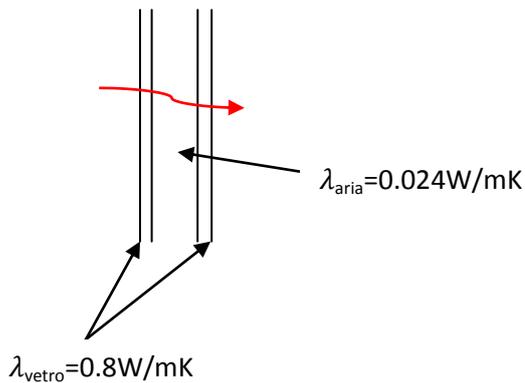
$DT_1=q*R_1=17,9*(s/\lambda)=0,5;$

$DT_2=q*R_2=17,9*0,28=5,0;$

$DT_3=q*R_3=17,9*1,25=22,4;$

$DT_e=q*Re=17,9/\alpha_e=1,4.$

Calcolo trasmittanza vetro doppio (con aria in quiete)



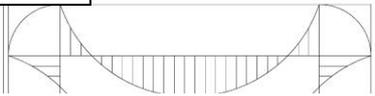
$Q=A*U*DT;$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_v}{\lambda_v} + \frac{s_{aria}}{\lambda_{aria}} + \frac{s_v}{\lambda_v} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

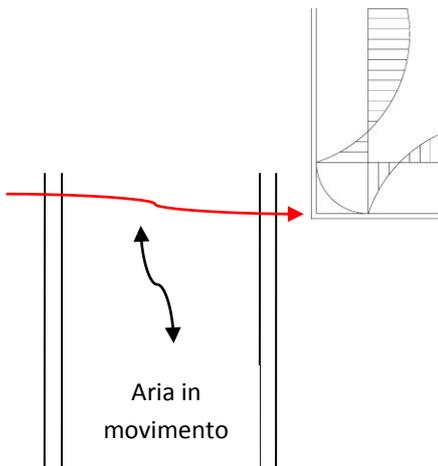
$U=0.442 \text{ W/m}^2\text{K};$

$Q=0.442*1*10=4.42\text{W/m}^2$

$\alpha_i=8 \text{ W/m}^2\text{K}, \alpha_e=23 \text{ W/m}^2\text{K},$   
 $A=1 \text{ m}^2, s_v= 0.005 \text{ m}, s_a=0.05 \text{ m},$   
 $DT=10 \text{ }^\circ\text{C}$



Calcolo trasmittanza vetro doppio (con aria in movimento)



$Q=A*U*DT;$

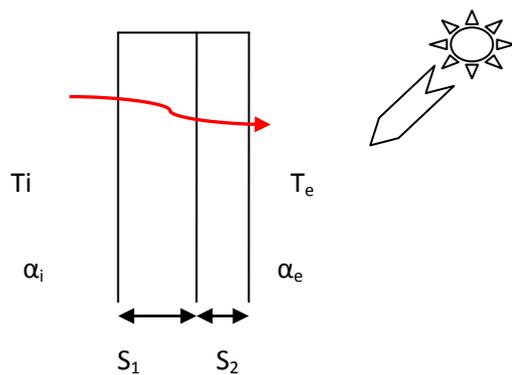
occorre considerare la convezione presente tra i vetri e l'aria interna:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_v}{\lambda_v} + \frac{1}{\alpha_{aria}} + \frac{1}{\alpha_{aria}} + \frac{s_v}{\lambda_v} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

$U=2.14 \text{ W/m}^2\text{K};$

$Q=2.14*1*10=21.4 \text{ W/m}^2$

Calcolo del contributo diretto dell'irraggiamento



Nota la potenza della radiazione  $W$  ( $W/m^2$ ),  
l'energia trasmessa per irraggiamento alla  
superficie esterna è:  $\epsilon \cdot A \cdot W$ .

Per semplificare i calcoli è possibile immaginare  
e calcolare il flusso termico come se si trattasse  
di **sola conduzione e convezione**, introducendo  
una **temperatura fittizia  $T^*$**  tale che il flusso  
termico finale scambiato risulti:  **$Q = A \cdot U \cdot (T_i - T^*)$**

$T^*$  si ricava ponendo:

$$\alpha_e A (T^* - T_e) = \epsilon A W$$

(flusso convettivo fittizio = flusso per  
irraggiamento reale)

cioè:

$$T^* = \frac{\epsilon W}{\alpha_e} + T_e$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

$$Q = A \cdot U \cdot (T_i - T^*)$$

**NB:** In realtà il flusso di calore scambiato per irraggiamento dipende dal fattore di vista, posto pari ad 1 in questo caso. Quindi:  $\alpha_e A (T^* - T_e) = \epsilon \sigma (T_s^{*4} - T_s) = \epsilon A W$ , essendo  $T_s$  la temperatura superficiale del corpo parete esterna.