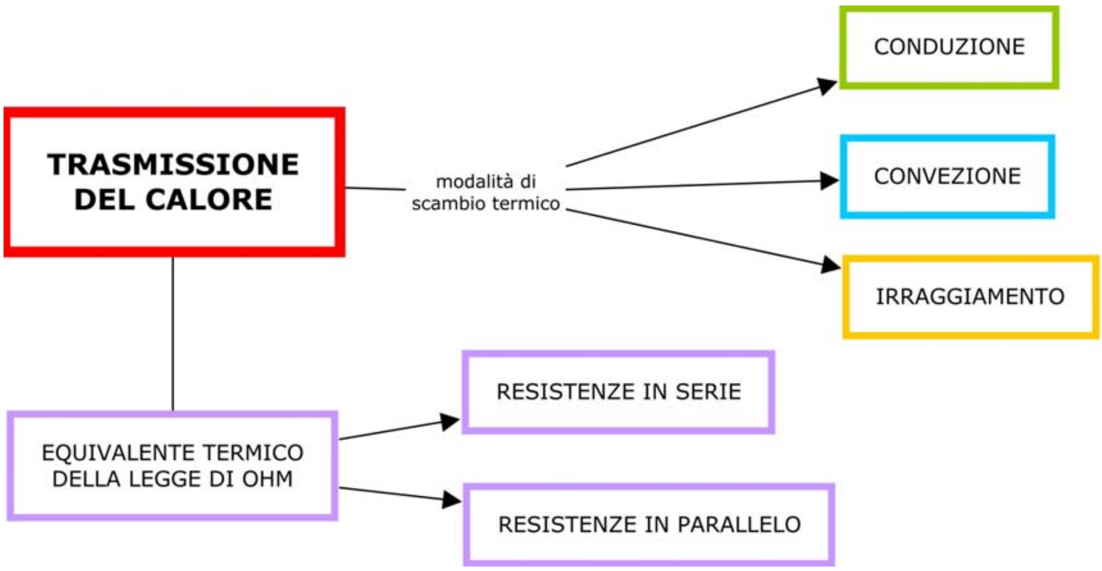


La **Termocinetica** si occupa dello scambio di energia tra sistemi, ma con grande interesse per l'aspetto temporale, poiché lo scopo di tale scienza è quello di quantificare i tempi necessari ai trasferimenti di energia.

Parleremo quindi di potenze, cioè di calore trasferito nell'unità di tempo e non più di quantità di calore.

Modalità di scambio termico

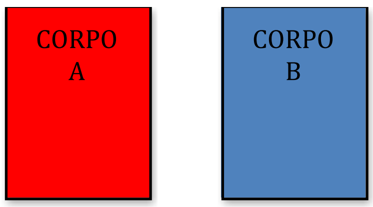
Per **Trasmissione del calore** si intende il trasferimento di calore tra due sistemi, causato da una differenza di temperature tra quest'ultimi. Se durante tale processo non viene prodotto calore, il calore ceduto da un sistema viene acquistato dal secondo sistema, in accordo con la legge di conservazione dell'energia.

Le tre modalità attraverso le quali può avvenire lo scambio di calore sono:

- CONDUZIONE
- CONVEZIONE
- IRRAGGIAMENTO

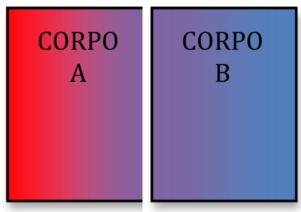
Conduzione

Il trasferimento di calore per conduzione avviene tra corpi solidi, liquidi o gassosi a contatto tra di loro, che si trovano a temperature differenti. Supponiamo di prendere due corpi A e B a due temperature differenti (*Fig.1a*), nella zona di contatto tra i due corpi, le particelle del corpo A a temperatura maggiore (T_1), che possiedono un'energia cinetica più elevata, urtandosi con le particelle del corpo B a temperatura minore (T_2), che possiedono un'energia cinetica più bassa, trasferiscono loro una parte dell'energia cinetica (*Fig.2a*). Nella conduzione il calore si propaga attraverso gli urti tra le particelle. La conseguenza è un aumento della temperatura del corpo più freddo e una diminuzione della temperatura del corpo più caldo fino al raggiungimento dell'equilibrio termico (*Fig.3a*).



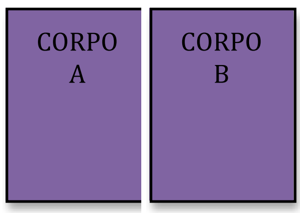
$T_1 > T_2$

Fig.1a



$T_1 > T_2$

Fig.1b



$T_1 = T_2$

Fig.1c

Convezione

La convezione è il processo di trasferimento di calore tipico dei fluidi.

Supponendo di prendere due corpi a diversa temperatura non a diretto contatto tra loro, ma separati da una cavità all'interno della quale vi è un fluido, in presenza di gradienti di temperatura, le particelle del fluido cominciano a muoversi.

Aumentando di temperatura per conduzione, il fluido a contatto con il corpo caldo (A) si espande e diminuisce di densità, e a causa della spinta di Archimede sale essendo meno denso del fluido che lo circonda che è più freddo.

Si generando così *moti convettivi*, in cui il fluido caldo sale verso l'alto e quello freddo scende verso il basso (*Fig.2*).

Questo fenomeno prende il nome di *convezione naturale*.

Si parla invece di *convezione forzata* quando il fluido è posto in movimento da interventi esterni e non avviene naturalmente a causa di differenze di temperatura. Questo tipo di processo viene utilizzato per aumentare lo scambio di calore ad esempio attraverso l'utilizzo di un ventilatore che muova l'aria.

Al contrario per limitare lo scambio di calore è necessario mantenere ferma l'aria, come in natura fa il cactus servendosi della peluria presente su di esso.

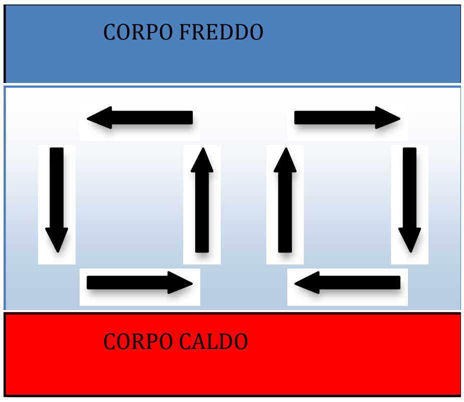


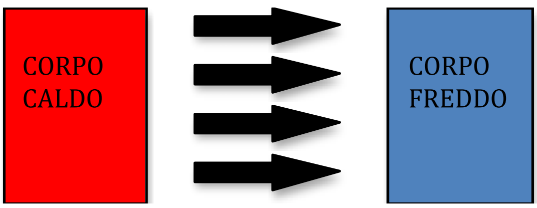
Fig.2

Irraggiamento

L'irraggiamento è un processo di trasferimento del calore che non necessita di un mezzo per lo scambio di energia tra corpi, ma può avvenire anche nel vuoto, poiché si sviluppa attraverso la propagazione di onde elettromagnetiche.

Lo scambio termico per irraggiamento ci appare evidente quando un corpo è molto caldo, e diventa incandescente. In tali condizioni, lo spettro elettromagnetico irradiato interessa anche la regione della luce visibile (lunghezza d'onda compresa fra 380 e 780 nm)

I corpi trasmettono calore per irraggiamento anche a bassa temperatura, in quanto emettono dei raggi infrarossi, cioè aventi una lunghezza d'onda superiore a 780 nm, quindi non visibili dall'uomo.



Equivalente termico della legge di Ohm

Qualunque sia il meccanismo di trasporto di calore, ne possiamo ricavare un modello causa-effetto in analogia al fenomeno della conduzione elettrica.

Così come la differenza di potenziale fa circolare corrente elettrica secondo *la Legge di Ohm,* la differenza di temperatura (causa), produce un flusso di calore (effetto); analogamente si può definire la formula corrispondente della Legge di Ohm per quanto riguarda gli scambi di calore.

Secondo tale formula la quantità di calore scambiata nell'unità di tempo, ossia la potenza termica, è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura che causa lo scambio di calore.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T} \qquad (1)$$

Da cui:

$$\boxed{\Delta T = R_T \cdot \dot{Q}} \qquad (2)$$

Dove **ΔT** è la differenza di temperatura misurata in Kelvin o in °C, $\dot{Q}$ è la potenza termica espressa in Watt e **R_T** è la resistenza termica che si misura in $[K/W]$.

Resistenze in serie e in parallelo

Affrontiamo ora due composizioni base per i problemi di scambio termico.

RESISTENZE IN SERIE

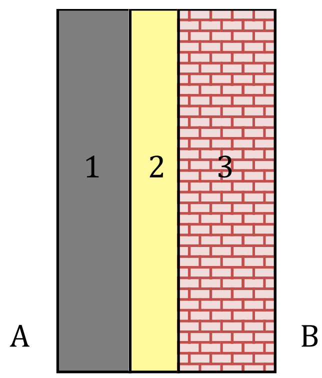


Fig.3a

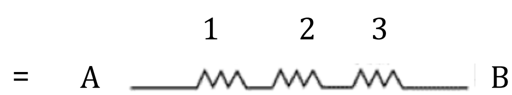


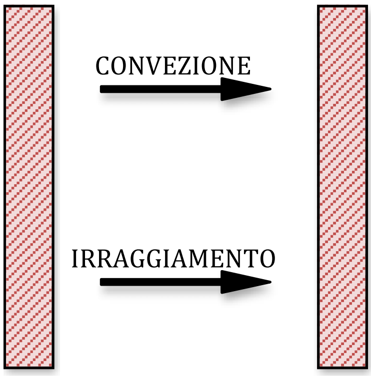
Fig.3b

Consideriamo ora il caso di una parete multistrato (Fig.3a), composta da diversi materiali. Il calore è trasferito per conduzione dalla parte A alla parte B incontrando tre diversi materiali, non si ha quindi un unico fenomeno di conduzione ma se ne hanno tre, uno per ognuno di essi.

Analogamente possiamo considerare la parete multistrato corrispondente ad un circuito elettrico composto da tre resistenze in serie, di cui la resistenza totale R_T è la somma delle tre resistenze in serie (3).

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 \qquad (3)$$

RESISTENZE IN PARALLELO



=

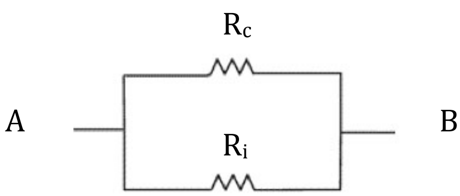


Fig.4a *Fig.4b*

Consideriamo come mostrato in figura 4a due corpi A e B a temperature diverse in una stanza contenente aria.

Nella cavità lo scambio termico avviene sia per convezione che per irraggiamento. Stabilendo un'analogia con i circuiti elettrici, il fenomeno può essere descritto da un circuito di resistenze in parallelo (Fig.4b).

Il reciproco della resistenza totale è dato dalla somma dei reciproci delle resistenze R_c (convezione) e R_i (irraggiamento) (4).

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_i} \qquad (4)$$

Legge di conduzione o Legge di Fourier

Andiamo ora ad analizzare più approfonditamente il fenomeno della conduzione attraverso la legge che lo regola, tale legge è chiamata Legge della conduzione o Legge di Fourier ed esprime un legame di causa-effetto:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad(T)} \qquad (5)$$

dove:

- $\dot{q}$ è la **densità di flusso termico** definita come la potenza termica scambiata per unità di superficie.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \qquad \left[\frac{W}{m^2}\right] \qquad (6)$$

- λ detta **conducibilità termica**, non è un coefficiente poiché non è un numero puro ma si misura in $[W]\cdot[m]^{-1}\cdot[K]^{-1}$.
  Attraverso i valori della conducibilità termica è possibile classificare i materiali in isolanti con λ<1 W/mK, e conduttori λ>1 W/mK. Per conoscere i valori di λ riferiti a ciascun materiale si faccia riferimento alla tabella in appendice (tabella 1).

- **grad(T),** indicato anche con ∇T (nabla), è il **gradiente di temperatura** che è proporzionale al flusso di calore. Il vettore gradiente è il vettore le cui tre componenti cartesiane sono le derivate della temperatura rispetto alle direzioni x, y e z. Esso “punta” verso le temperature crescenti.
  Noi studieremo solo problemi unidimensionali quindi il gradiente sarà la derivata della temperatura lungo la direzione in cui il calore si sta propagando.
  Prendendo ad esempio il dentro e il fuori di un edificio, il vettore è perpendicolare alla superficie dei muri e indica il flusso di calore che attraversa la parete. In sintesi possiamo dire che il gradiente è esprimibile come la differenza di temperatura diviso la distanza.
  L’unità di misura del gradiente è $\left[\frac{K}{m}\right]$.

EQUAZIONE DI FOURIER PER UNA LASTRA PIANA

La legge di Fourier formalmente è un’equazione differenziale in quanto contiene un operatore gradiente, quindi nell’usarla dovremmo fare l’integrazione risolvendo quest’equazione differenziale.

In realtà quest’operazione per casi più comuni è già stata fatta come nel caso che andiamo ad esaminare di una lastra piana (Fig.5).

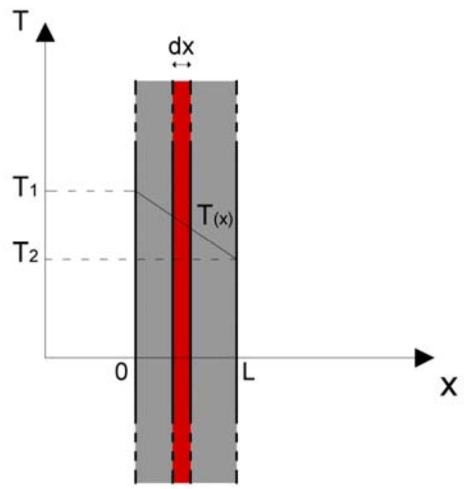


Fig.5

In una lastra piana a temperatura T_1 da un lato e T_2 dall'altro, se prendiamo uno strato infinitesimo in qualsiasi posizione x della lastra, il gradiente avrà sempre il medesimo valore e sarà costante in tutti i punti.

L'andamento della temperatura all'interno della parete sarà rettilineo, quindi dovendo calcolare l'integrale di una costante, l'equazione di Fourier risulterà come segue:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\lambda}{L} \cdot \left(T_1 - T_2\right) \qquad (7)$$

dove $\frac{\partial T}{\partial x}$ è il **gradiente di temperatura** nel caso unidimensionale cioè la derivata della temperatura rispetto ad x. In altre parole la derivata della temperatura su x è la differenza di temperatura diviso L, dove **L** è lo spessore della lastra.

Possiamo quindi calcolare la dispersione dell'intera parete:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{L} \cdot \left(T_1 - T_2\right) \cdot S \qquad (8)$$

dove **S** è la superficie.

In generale ricordando che $\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_T}$ avremo:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{L} \cdot \left(T_1 - T_2\right) \cdot S = \frac{\Delta T}{R_T} \qquad (9)$$

da quest'identità possiamo ricavare la **resistenza termica** per una parete monostrato $\mathbf{R_T}$:

$$R_T = \frac{L}{\lambda \cdot S} \qquad (10)$$

ESERCIZIO 1

Calcolare la potenza termica dispersa, causata dal calore che fuoriesce dall'interno di un edificio, attraverso una parete di gesso spessa 5cm e avente una superficie di 10 m2, sapendo che la temperatura all'interno e all'esterno valgono rispettivamente 20°C e 0°C.

A=10 m2
L=5 cm=0,05m
T1=20°C
T2=0°C
ΔT=20°C=20 K

Dalla tabella in appendice, ricaviamo il valore della conducibilità termica del gesso λ=0,4 W/mK.

A questo punto conosciamo tutti i dati e, attraverso la formula della conduzione in una lastra piana (7), calcoliamo la quantità di calore che si trasferisce:

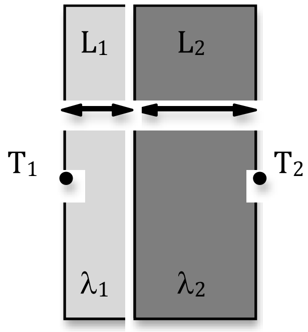
$$\dot{q}=\frac{\lambda}{L}\cdot\left(T_1-T_2\right)=\frac{0,4}{0,05}\cdot 20=160\frac{W}{m^2}$$

considerando poi che la superficie S è 10 m^2, ricaviamo la potenza termica $\dot{Q}$:

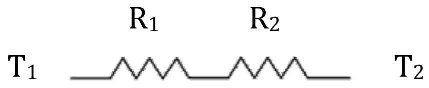
$$\dot{Q}=\dot{q}\cdot S=160\cdot 10=1600 \quad W$$

ESERCIZIO 2

Affianchiamo una parete in calcestruzzo, avente conducibilità λ=1,5 W/mK, a quella di gesso dell'esercizio 1. I dati del problema sono:



A=10 m²
L1=5 cm=0,05 m
L2=10 cm=0,10 m
λ_1=0,5 W/m K
λ_2=1,5 W/m K
T_1=20°C
T_2=0°C
ΔT = 20°C=20 K



Possiamo ragionare direttamente, sostituendo alle due resistenze in serie, la resistenza equivalente pari alla somma delle due resistenze termiche.

A questo punto calcoliamo ciascuna delle due resistenze termiche per conduzione attraverso la formula $R_T = \frac{L}{\lambda \cdot S}$;

quindi avremo:

$$R_1 = \frac{L_1}{\lambda_1 \cdot S_1} = \frac{0{,}05}{0{,}4 \cdot 10} = \frac{1}{80}\frac{K}{W}$$

$$R_2 = \frac{L_2}{\lambda_2 \cdot S_2} = \frac{0{,}10}{1{,}5 \cdot 10} = \frac{1}{150}\frac{K}{W}$$

essendo due resistenze in serie, la resistenza equivalente R_{EQ} sarà:

$$R_{EQ} = R_1 + R_2 = \frac{1}{80} + \frac{1}{150} = \frac{5}{300} = 0{,}01916666\frac{K}{W}$$

A questo punto utilizziamo la formula equivalente della Legge di Ohm per calcolare la potenza termica $\dot{Q}$:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{EQ}} = \frac{20}{0{,}01916666} = 1043{,}5 \ W$$

Supponiamo ora di aggiungere un terzo strato di polistirolo alla parete precedente di spessore **L_3**= 5 cm=0,05 m e rispettivo λ_3=0,04 W/mK.

A questo punto analogamente a come abbiamo calcolato le resistenze precedenti, calcoliamo **R_3**:

$$R_3 = \frac{L_3}{S_3 \cdot \lambda_3} = \frac{0{,}05}{10 \cdot 0{,}04} = 0{,}125 \quad \frac{K}{W}$$

Ricalcoliamo la resistenza equivalente inserendo R_3:

$$R_{EQ} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{80} + \frac{1}{150} + 0{,}125 = 0{,}1416666 \quad \frac{K}{W}$$

Calcoliamo a questo punto la potenza termica totale scambiata dal sistema dopo l'aggiunta del terzo strato:

$$\dot{Q}_{3strati} = \frac{\Delta T}{R_{EQ}} = \frac{20}{0{,}01416666} = 138{,}7 \quad W$$

Notiamo che con l'aggiunta di soli 5 cm di polistirolo si diminuisce la potenza termica scambiata di circa 1/8 di quella calcolata con solo due strati.

Convezione e Pseudo Legge di Fourier

Affrontiamo ora più nello specifico il fenomeno della convezione.

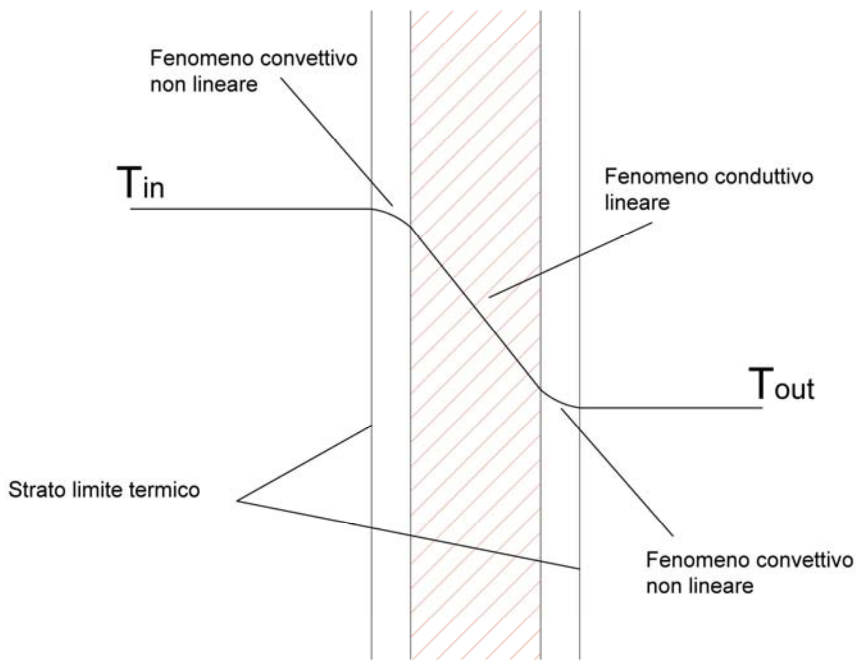


Fig.6

Consideriamo il caso di una lastra piana come in Fig.6 e ipotizziamo che sulle due facce della lastra avvengano dei fenomeni di convezione: in prossimità della parete la temperatura dell'aria comincia già a scendere e a contatto con essa avremo una temperatura leggermente inferiore della temperatura interna al locale.

Ugualmente accadrà all'esterno.

All'interno della parete invece avremo un andamento lineare in quanto avviene un fenomeno di tipo conduttivo; viceversa negli strati d'aria, chiamati strati limite termici, la conduzione non è il fenomeno dominante ma si ha un fenomeno convettivo.

Per questo caso quindi non è possibile utilizzare la Legge di Fourier, in sostanza è come se avessimo altre due resistenze in serie dove R_2 è la resistenza di conduzione mentre R_1 e R_3 sono le due resistenze di convezione (Fig.7).

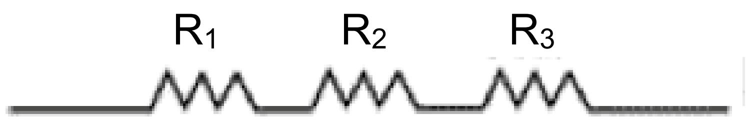


Fig.7

Dal punto di vista delle relazione causa-effetto per la convezione abbiamo una pseudo legge di Fourier:

$$\dot{q}=h\left(T_{ambiente}-T_{p}\right) \qquad (11)$$

dove **h** viene chiamato **coefficiente di adduzione** ed è in realtà la somma del coefficiente di convezione e quello di irraggiamento di grandezza dimensionale $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$.

Se andiamo a calcolare la resistenza termica di convezione ricaviamo che:

$$R_{T,Slt}=\frac{T_{ambiente}-T_{p}}{\dot{q}\cdot S}=\frac{1}{h\cdot S} \qquad (12)$$

Questi strati limite termici che si sviluppano dentro e fuori la parete, quindi, è come se fossero due strati aggiuntivi e il flusso termico può essere calcolato come:

$$\dot{q}=\frac{T_{in}-T_{out}}{\frac{1}{h_{in}}+\frac{L}{\lambda}+\frac{1}{h_{out}}} \qquad (13)$$

La norma tecnica ci dice di utilizzare dei *coefficienti di convezione convenzionali* pari a h_{in}= 8 W/m^{2}K e h_{out}= 20 W/m^{2}K.

ESERCIZIO 1

Si calcoli il flusso termico attraverso una parete di mattoni di spessore pari a 0,25 m e area di 10 m^2 con un coefficiente di conduzione λ= 1 W/mK sapendo che h_{in}= 8 W/m^{2}K e h_{out}= 20 W/m^{2}K. Le temperature dell'ambiente sono T_{in}= 20°C e T_{out}= 0°C.

Ricordando quanto detto in precedenza, sostituiamo i dati nella (13), si ha quindi

$$\dot{q}=\frac{20-0}{\frac{1}{8}+\frac{0,25}{1}+\frac{1}{20}}=47\ \ \frac{W}{m^2}$$

Tenendo conto della superficie in oggetto

$$\dot{Q}=\dot{q}\cdot A=47\cdot 10=470\ \ W$$

ESERCIZIO 2

Sfruttando i dati dell'esercizio precedente si calcoli ora la potenza necessaria a riscaldare un edificio di forma cubica (4 pareti più il tetto di caratteristiche analoghe alla parete dell'esercizio 1) di area totale A= 50 m^2 e nelle stesse condizioni di temperatura.

Calcoliamo la potenza dispersa attraverso le pareti:

$$\dot{Q}=\dot{q}\cdot A=47\cdot 50=2350\ \ W$$

Considerando che il volume dell'edificio è pari a V= 1000 m^3 e trattandosi di un'abitazione residenziale, il ricambio del'aria deve essere pari a 0,5 V/h, ovvero V_{aria}= 500 m^3/h.

Essendo introdotta dall'esterno la temperature dell'aria introdotta è di 0°C.

La potenza necessaria a riscaldare tale volume d'aria è data da:

$\dot{Q}_v=\dot{M}\cdot c_p\left(T_{out}-T_{in}\right)$ dove $\dot{M}$ è la portata in massa, se ipotizziamo una densità dell'aria ρ= 1,2 kg/m^3 e sapendo che c_p= 1000 J/kgK, ottengo

$$\dot{Q}_v=\frac{500}{3600}\cdot 1,2\cdot 1000\cdot 20=3333\ \ W$$

quindi la dispersione è di 2350 W per quanto riguarda l'involucro e 3333 W per il ricambio d'aria.

TABELLA 1

Materiale	Conducibilità termica a 20° C (W/mK)
Acciaio con 5% Ni	29
Acciaio con 30% Ni	105
Acqua (liquida in quiete a 20°C)	0,63
Acqua pesante 10 - 100°C	0,56 - 0,65
Alcool	0,21
Alluminio	210
Aria (in quiete a 20°C)	0,026
Argentana	27
Argento	420
Asfalto	0,64
Basalto	1,27 - 3,5
Bronzo	58 - 65
Carbone	0,14 - 0,17
Carbone di storta	4
Carbone in polvere	0,12
Cartone	0,14 - 0,23
Cartongesso in lastre	0,21
Caucciù	0,13 - 0,23
Celluloide	0,35
Cellulosa compressa	0,24
Cemento in polvere	0,070
Cenere	0,069
Creta	0,90
Duralluminio	160
Ferro elettrolitico	87
Ferro ed acciaio	46,5 - 58
Gesso	0,4
Ghiaccio	2,20 - 2,50
Ghisa	50
Glicerina	0,220
Grafite	4,9
Granito	3,18 - 4,10
Incrostazioni di caldaia	1,16 - 3,49
Intonaco di calce e gesso	0,70
Legno asciutto ortogonale alle fibre di abete e pino	0,10 - 0,12
Legno asciutto ortogonale alle fibre di quercia	0,18
Legno asciutto parallelamente alle fibre	0,15 - 0,27
Linoleum	0,18
Manganina	23
Marmo	2,1 - 3,5
Mercurio liquido a 0° C	8,13
Mercurio liquido a 60° C	9,64
Mercurio liquido a 120° C	10,92
Mercurio liquido a 160° C	11,6
Mercurio liquido a 222° C	12,78
Mica	0,39
Muratura di pietrame	1,40 - 2,40

Muratura refrattaria (dinas, schamotte, silica) 200° C	0,70 - 0,90
Muratura refrattaria (dinas, schamotte, silica) 1000° C	1,2 - 1,4
Naftalina	0,37
Neve (appena caduta e per strati fino a 3 cm)	0,06
Neve (soffice, strati da 3 a 7 cm)	0,12
Neve (moderatamente compatta, strati da 7 a 10 cm)	0,23
Neve (compatta, strati da 20 a 40 cm)	0,70
Nichel	58 - 65
Oli e petroli	0,12 - 0,17
Oro	299
Ottone	70 - 116
Pietra arenaria	1,30 - 1,75
Pietra calcare compatta	0,70
Pietra calcare granulosa	0,95
Piombo solido	35
Pb 44,5% + Bi 55,5% (lega liq.) 160 - 320° C	9,2 - 11,3
Platino	70
Porcellana	0,80 - 1,05
Quarzo ortogonale all'asse	6,60
Quarzo parallelo all'asse	12,80
Quarzo oggetti fusi	1,4 - 1,9
Rame (8300 Kg/m^3)	302
Rame (8900 Kg/m^3)	395
Sabbia asciutta	0,35
Sabbia con 7% di umidità	1,16
Sodio solido	125,60
Sodio liquido 100 - 500° C	86 - 67
Stagno	64
Sughero (200 Kg/m^3)	0,052
Vetro	0,5 - 1
Zinco	110
Zolfo	0,23

| Stampa la tabella |