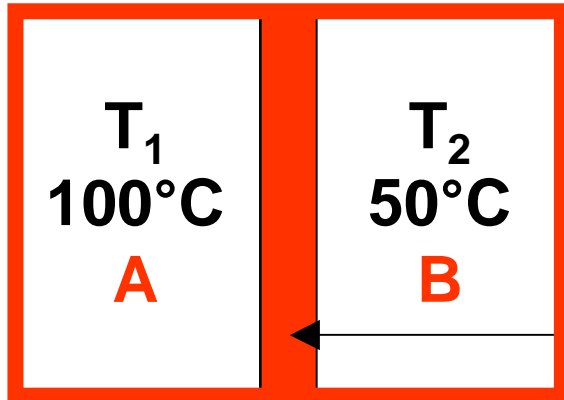


TRASMISSIONE DEL CALORE

Dalla termodinamica abbiamo appreso che:

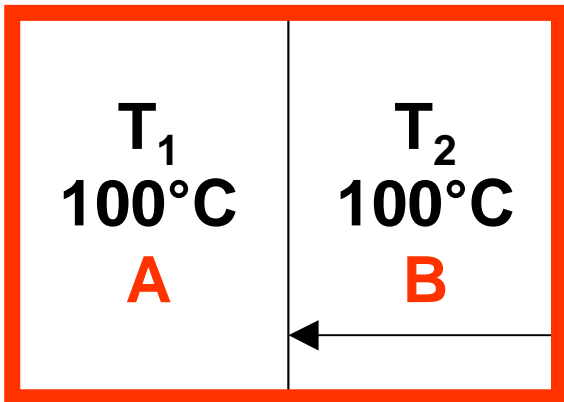
- Il calore Q (come del resto il lavoro) non è una proprietà del sistema, ma una forma di **energia in transito**. Si può quindi dire che un sistema possiede energia (ad esempio energia interna U , energia cinetica E_c o energia potenziale E_p), ma si deve dire che un sistema **scambia energia sotto forma di calore** con un altro sistema.
- La quantità di calore scambiata può essere quantificata.
- Il passaggio di calore da un sistema ad un altro può avvenire se sono soddisfatte le seguenti condizioni:
 - ✓ I due sistemi si devono trovare a temperature diverse
 - ✓ Non devono essere separati da una parete adiabatica
- Per il primo principio la quantità di calore trasferito ad un sistema (se $L=0$) eguaglia l'entità dell'incremento di energia del sistema stesso.
- Per il secondo principio il calore si propaga nella direzione delle temperature decrescenti, da una regione ad alta temperatura ad una regione a bassa temperatura.

TRASMISSIONE DEL CALORE



Il sistema A ed il sistema B rimarranno alla stessa temperatura $Q_{AB} = 0$. Il sistema A è isolato termicamente dal sistema B.

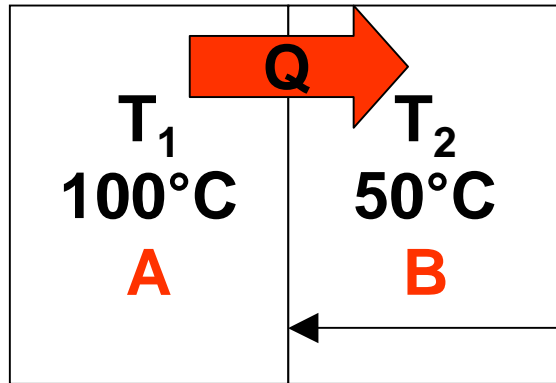
Parete e contorno adiabatici



Anche in questo caso $Q_{AB} = 0$. I sistemi, pur non essendo termicamente isolati, si trovano alla stessa temperatura.

Parete diatermica

TRASMISSIONE DEL CALORE



In questo caso $Q_{AB} > 0$.

Se non interverranno altri fattori, dopo un certo periodo di tempo, $T_1 = T_2$, dopo di che $Q_{AB} = 0$.

Parete diatermica

Con l'analisi termodinamica si può determinare la quantità di calore trasferito per un qualunque processo senza avere alcuna informazione sulla durata di quest'ultimo; la termodinamica si occupa della quantità di calore scambiato da un sistema con l'ambiente nel passaggio da uno stato di equilibrio ad un altro. Lo scambio termico avviene nel rispetto del principio di conservazione dell'energia.

TRASMISSIONE DEL CALORE

La trasmissione del calore focalizza l'indagine sugli scambi sotto forma di Q , si trascurano gli effetti degli scambi energetici in lavoro.

Nei problemi pratici quello che interessa maggiormente è **LA RAPIDITA' CON CUI AVVIENE LO SCAMBIO**, piuttosto che la quantità di calore scambiata.

Esempio del thermos: Dopo quanto tempo il caffè che si trova inizialmente a 90°C raggiunge gli 80°C ?

- L'analisi termodinamica ci consente di valutare la quantità di calore scambiato ma non il tempo.
- La trasmissione del calore ci consente di valutarne anche il tempo.

*“La determinazione della velocità di propagazione del calore verso o da un sistema e quindi i tempi di raffreddamento e di riscaldamento, così come la variazione di temperatura costituiscono **l'oggetto della trasmissione del calore**”*

POTENZA TERMICA E FLUSSO TERMICO

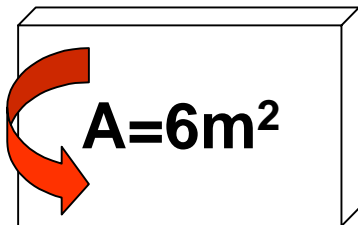
Quando si conosce la potenza scambiata \dot{Q} , la quantità totale di calore scambiato Q durante un intervallo di tempo $\Delta\tau$ si può determinare con la relazione:

$$Q = \int_0^{\tau} \dot{Q} d\tau$$

Nel caso particolare in cui \dot{Q} è costante: $Q = \dot{Q} \Delta\tau$

Si definisce **FLUSSO TERMICO** la potenza riferita ad una superficie di area unitaria. Il flusso termico medio su una superficie si esprime:

$$\phi \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{\dot{Q}}{A}$$



$$\dot{Q} = 24W = \text{cost.}$$

$$\phi = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{24W}{6m^2} = 4 \frac{W}{m^2}$$

OBIETTIVI DELLA TRASMISSIONE DEL CALORE

Considerando che il calore non si distribuisce istantaneamente in tutti i punti del sistema

– all'interno di un sistema possono stabilizzarsi condizioni diverse di temperatura da un punto ad un altro e di conseguenza può permanere un flusso di calore da un punto ad un altro.

– in un sistema la temperatura in un punto può variare nel tempo o rimanere costante e cioè il sistema può essere in regime variabile o permanente

La trasmissione del calore si occupa dello studio dell'insieme di leggi che governano il passaggio di calore da un sistema ad un altro o da un punto ad un altro di uno stesso sistema, dei dispositivi coinvolti negli scambi di calore e delle leggi che danno la distribuzione di temperatura all'interno di un sistema in funzione dello spazio e del tempo.

Le finalità di questa parte del corso sono le seguenti:

- Determinazione del calore scambiato tra un punto ed un altro;
- Determinazione della distribuzione di temperatura nei vari punti ed eventualmente la sua variazione nel tempo.

I MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

I meccanismi di trasmissione del calore sono tre: **CONDUZIONE, CONVEZIONE, IRRAGGIAMENTO.**

– tutti e tre i meccanismi richiedono l'esistenza di una **differenza di temperatura**;

– si verificano spontaneamente da un sistema a temperatura più alta ad un sistema a temperatura più bassa;

– la **conduzione** e l'**irraggiamento** danno luogo esclusivamente a trasferimento di calore, mentre la **convezione** comporta sempre anche trasporto di massa;

– in natura o nei problemi tecnici è molto raro che si presenti uno solo dei tre meccanismi; generalmente sono associati tra loro in varie combinazioni.

Il flusso di calore può essere definito dalla relazione:

$$\phi = \text{parametro } \Delta T$$

dove parametro: coefficiente che tiene conto della maggiore o minore facilità, con la quale, a parità di ΔT , ha luogo il trasferimento di calore;

ΔT : differenza di temperatura

CONDUZIONE

E' il trasferimento di energia che si verifica per effetto dell'interazione delle particelle di una sostanza dotata di maggiore energia con quelle adiacenti dotate di minore energia.

Può avvenire

- nei liquidi;
- nei solidi;
- nei gas.

➤ Nei liquidi e nei gas è dovuta alla collisione delle molecole nel loro moto caotico.

➤ Nei solidi è dovuta alla vibrazione delle molecole all'interno del reticolo e al trasporto di energia da parte degli elettroni liberi.

La potenza termica trasmessa per conduzione attraverso una lastra piana di spessore costante è data da:

Potenza termica trasmessa per conduzione [W]

Costante di proporzionalità o conducibilità termica del materiale [W/mK]

Superficie normale alla direzione di trasmissione del calore [m²]

Spessore [m]

Differenza di temperatura [K o °C]

Flusso di calore

T_1

T_2

$$\dot{Q}_{COND} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

CONVEZIONE

E' il trasferimento di energia tra una superficie solida e un fluido adiacente in movimento.

- Implica gli effetti combinati di conduzione e trasporto di massa;
- Il calore trasmesso per convezione aumenta con la velocità del fluido.

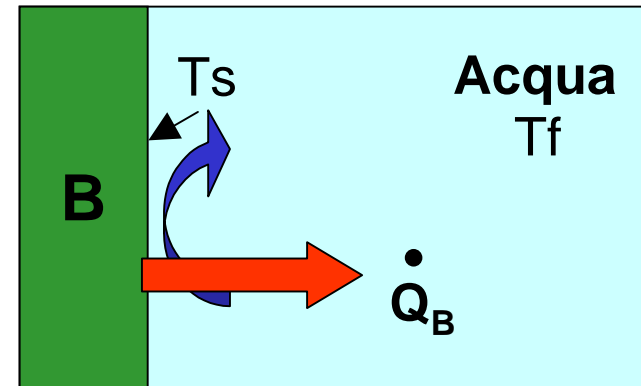
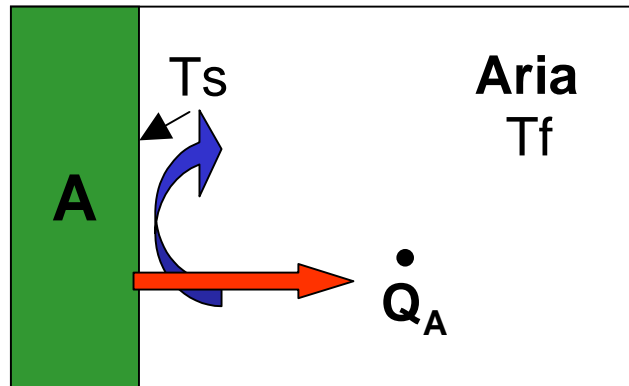
CONVEZIONE FORZATA

Avviene quando il fluido è forzato a scorrere su una superficie da mezzi esterni (ad esempio un ventilatore).

CONVEZIONE NATURALE (O LIBERA)

Avviene quando il moto del fluido è causato da forze ascensionali che sono indotte dalle differenze di densità dovute alla variazione di temperatura del fluido in un campo gravitazionale.

CONVEZIONE



$$\dot{Q}_B > \dot{Q}_A$$

La potenza termica trasmessa per convezione è espressa dalla relazione:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h A (T_s - T_f)$$

Legge di Newton

h = coefficiente di scambio termico convettivo [W/m² K]

A = superficie normale al flusso [m²]

T_s = Temperatura solido [K]

T_f = Temperatura fluido [K]

IRRAGGIAMENTO

E' il trasferimento di energia che avviene attraverso le onde elettromagnetiche (o fotoni) prodotte da variazioni nelle configurazioni elettroniche degli atomi e delle molecole.

Ad esempio il sole trasferisce l'energia alla terra per irraggiamento

- non richiede la presenza di un mezzo interposto (quindi avviene anche nel vuoto)
- avviene alla velocità della luce
- tutti i corpi a temperatura superiore allo zero termico emettono radiazione termica.

La potenza massima termica trasmessa per irraggiamento da una superficie a temperatura assoluta T_s [K] è data dalla

LEGGE DI STEFAN BOLTZMANN

LEGGE DI STEFAN BOLTZMANN

$$\dot{Q}_{e \max} = \sigma A (T_s)^4$$

A = area della superficie [m²]

σ = costante di Stefan Boltzmann pari a $5,67 \times 10^{-8}$ [W/m²K⁴] (nel SI)

T_s = Temperatura della superficie [K]

La superficie ideale che trasmette tale potenza è detta **CORPO NERO**

L'irraggiamento emesso da un corpo nero è detto radiazione di un corpo nero.

La potenza emessa per irraggiamento da una qualsiasi superficie reale è data dalla relazione:

$$\dot{Q}_{emiss} = \varepsilon \sigma A (T_s)^4$$

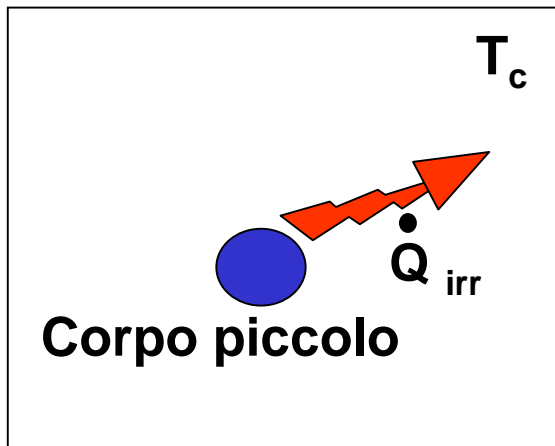
ε = Emissività della superficie il cui valore, compreso tra 0 e 1, è la misura di quanto il comportamento di una superficie si approssima a quella del corpo nero, per il quale $\varepsilon=1$

LEGGE DI STEFAN BOLTZMANN

La differenza tra la potenza termica radiante emessa e quella assorbita da una superficie è la **POTENZA TERMICA NETTA PER IRRAGGIAMENTO**.

La determinazione della potenza termica netta scambiata è complessa in quanto dipende da:

- Proprietà delle superfici
- Orientamento relativo
- Caratteristiche del mezzo tra le due superfici che irraggiano.

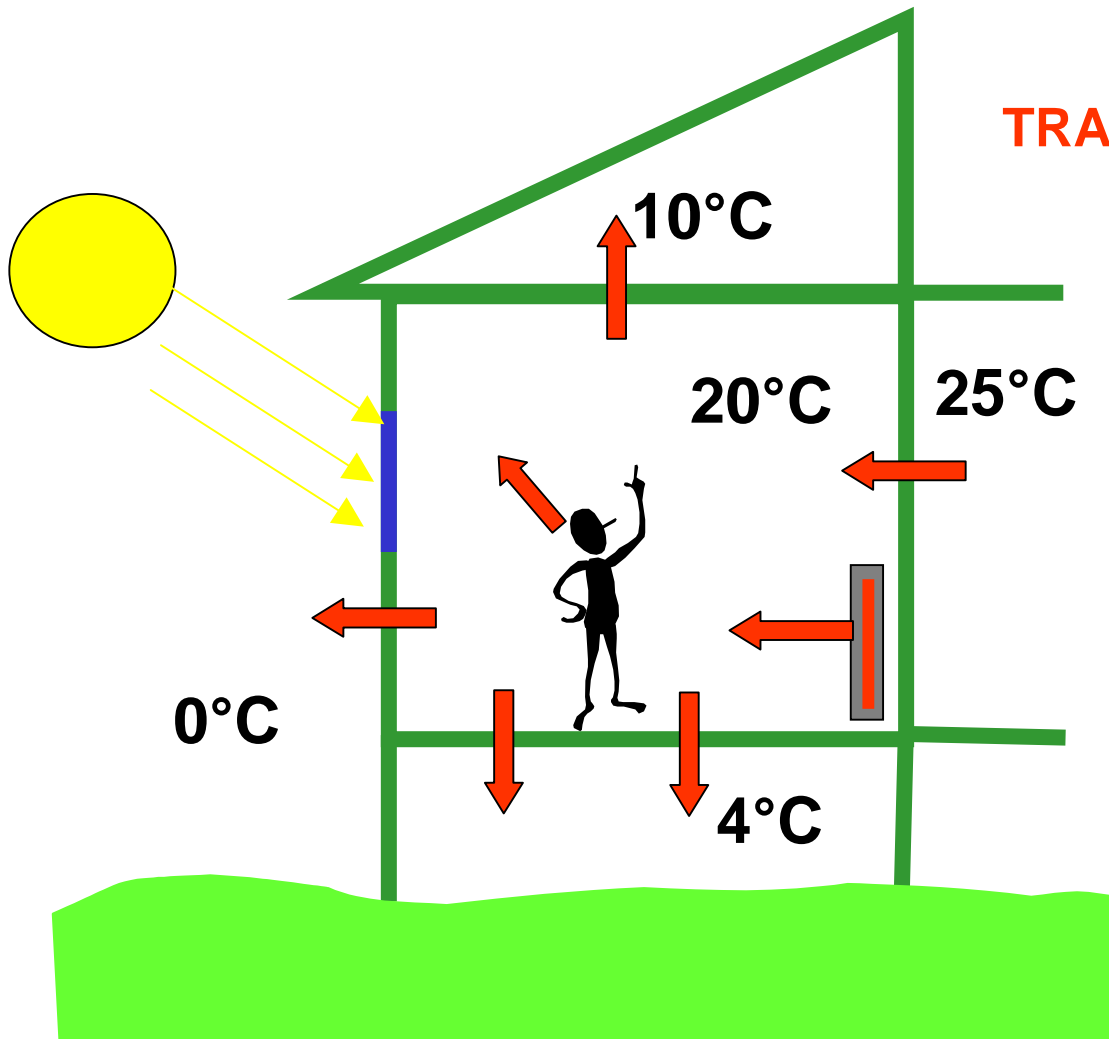


Contenitore grande

Il caso di una superficie piccola è semplice:

$$\dot{Q}_{irr} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_c^4)$$

Bilancio energetico di un sistema uomo - edificio - ambiente



MODALITA' DI TRASMISSIONE DEL CALORE

SOLE: solo irraggiamento
PARETE: conduzione, convezione, irraggiamento
UOMO: conduzione, convezione, irraggiamento
CORPO SCALDANTE: convezione, irraggiamento

CONDUZIONE

Considerando costanti le temperature dell'aria all'interno e all'esterno dell'edificio, la trasmissione del calore per conduzione attraverso una parete di un edificio può essere considerata:

- **Stazionaria**
- **Mono dimensionale**

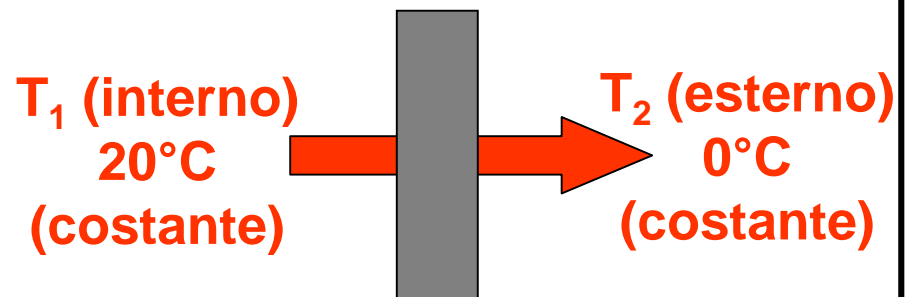
Se non vi è alcuna generazione interna di calore, per il primo principio:

Pot. Termica entrante - Pot. Termica Uscente = Potenza termica

ovvero:
$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_u = \frac{dE_{\text{parete}}}{dt}$$

Poiché in condizioni stazionarie la potenza termica accumulata deve essere nulla. Il flusso termico attraverso la parete deve essere costante.

$\dot{Q}_{\text{cond}} = \text{cost}$ in quanto il flusso termico entrante deve uguagliare il flusso termico uscente.



CONDUZIONE

La relazione fondamentale per il calcolo del flusso di calore in caso di conduzione pura, fu proposta da **Joseph Fourier** nel 1822

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

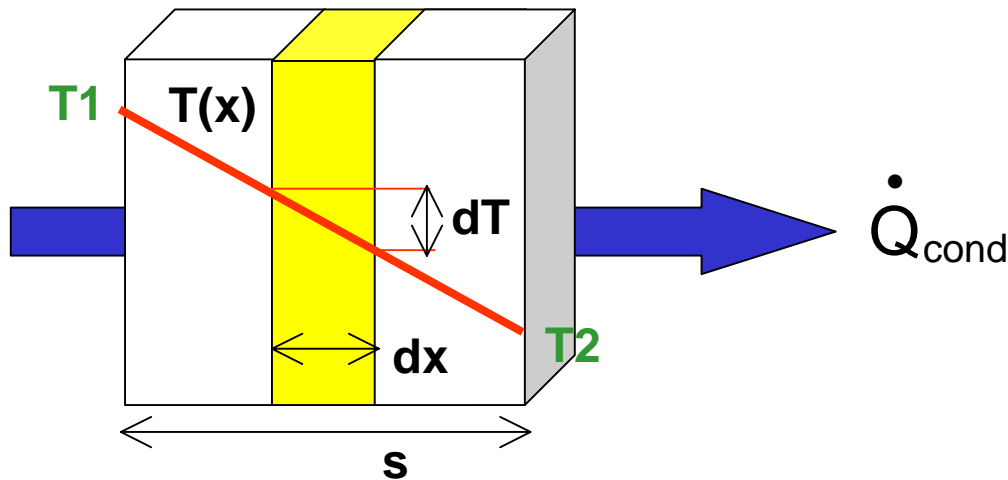
STAZIONARIA e MONODIMENSIONALE Postulato di Fourier per la conduzione

Dove:

- \dot{Q}_{cond} = quantità di calore che fluisce nella direzione x nell'unità di tempo [W]
- λ = conducibilità termica del materiale [W/mK]
- $\frac{dT}{dx}$ = gradiente di temperatura nella direzione x
- A = area della superficie normale a x attraverso la quale fluisce calore

Il segno - tiene conto del fatto che il flusso di calore va nel senso in cui dT/dx diminuisce.

CONDUZIONE



In condizioni stazionarie, la distribuzione di temperatura in una parete piana è una linea retta

Separando le variabili nell'equazione di Fourier e integrando da $x = 0$ dove $T(0) = T_1$ a $x = s$ dove $T(s) = T_2$, si ottiene:

$$\int_{x=0}^s \dot{Q}_{\text{cond}} dx = - \int_{T=T_1}^{T_2} \lambda A dT$$

Dove $\lambda/s =$ **conduttanza** della parete
[W/m²K]

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \lambda A \frac{T_2 - T_1}{s}$$

$s/\lambda =$ **resistenza termica** della parete al passaggio del calore [m²K/W]

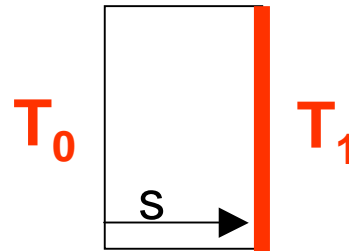
$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{\lambda}{s} A (\Delta T)$$

d'ora in avanti chiamiamo **RESISTENZA TERMICA** la resistenza termica specifica, ossia riferita all'unità di area

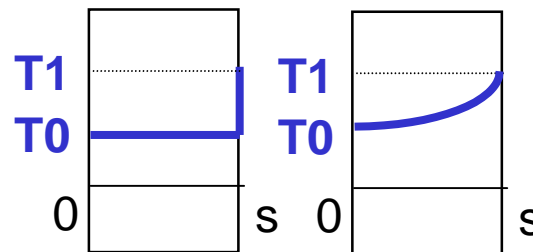
CONDUZIONE

La proporzionalità diretta tra la quantità di calore e l'incremento di temperatura a parità di spessore è dimostrabile dalla seguente esperienza.

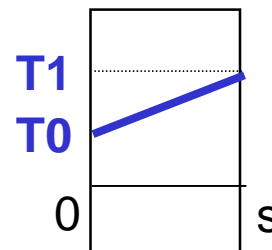
Si porta istantaneamente la faccia destra di una lastra ad una temperatura $T_1 > T_0$



Durante il **transitorio** T è funzione, oltre che della coordinata s anche del tempo τ . Non si è quindi in regime stazionario o permanente



Nella condizione **a regime** l'andamento del profilo delle temperature è lineare



CONDUZIONE - RESISTENZA TERMICA

La relazione $\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{\lambda}{S} A(\Delta T)$

avendo posto $\frac{S}{\lambda} = R_c$ resistenza termica

può anche essere espressa nella forma: $\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{1}{R_c} A(\Delta T)$

dalla quale si evidenzia come Q_{cond} sia **inversamente proporzionale alla resistenza termica** del materiale

La **resistenza termica** a sua volta è:

- direttamente proporzionale allo spessore della parete;
- inversamente proporzionale alla conducibilità λ della parete

A parità di spessore, offriranno una maggiore resistenza termica al passaggio di calore le pareti costituite da materiali con λ più piccola

λ
[W/mK]

100

100

10

1

0,1

0,01

gas

aria

isolanti

fibre
legno
schiume

liquidi

acqua

oli

solidi
non met.

ossidi

roccia

cibo

gomma

leghe
metall.

Lega di
alluminio

metalli
puri

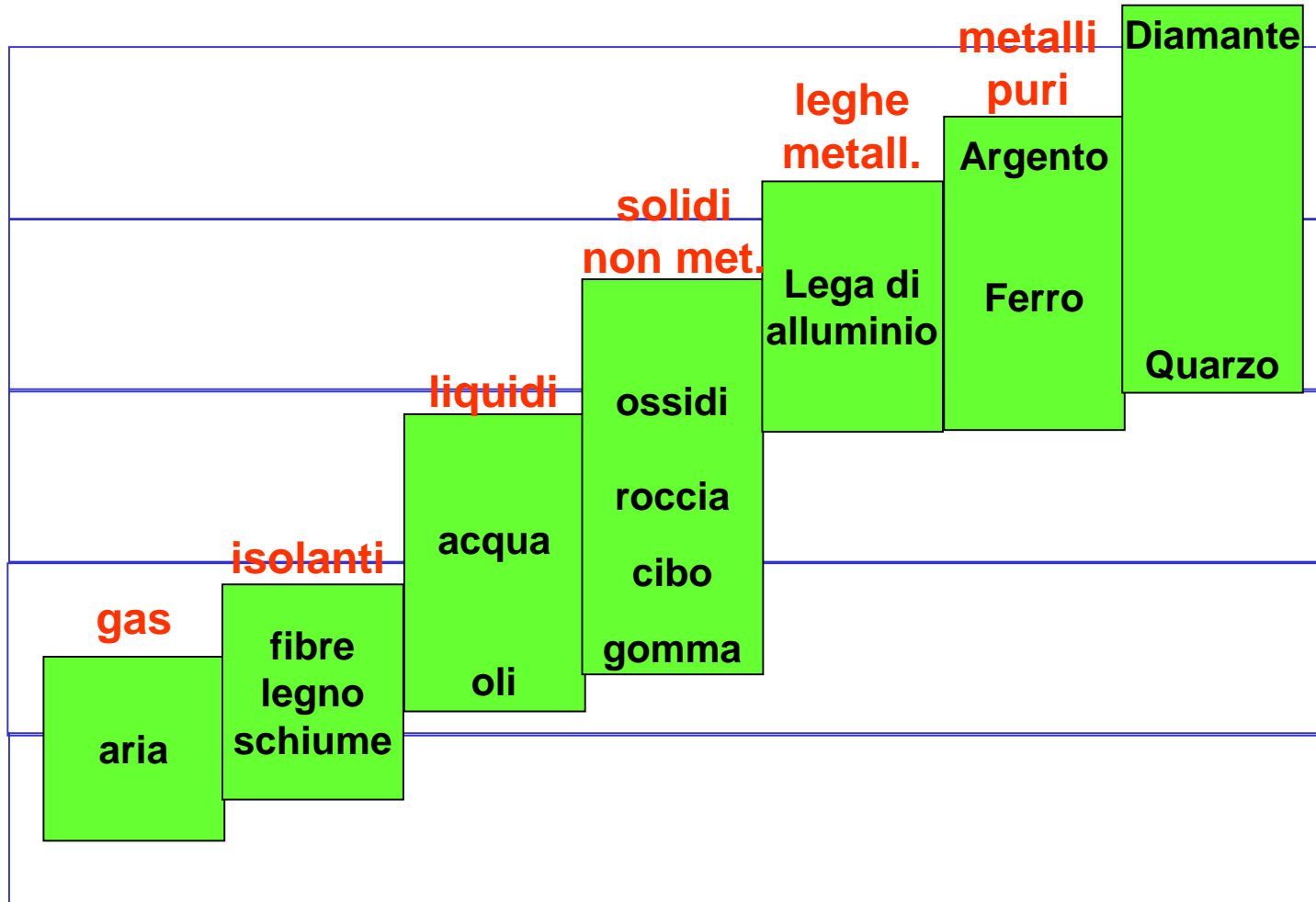
Argento

Ferro

cristalli
non met.

Diamante

Quarzo

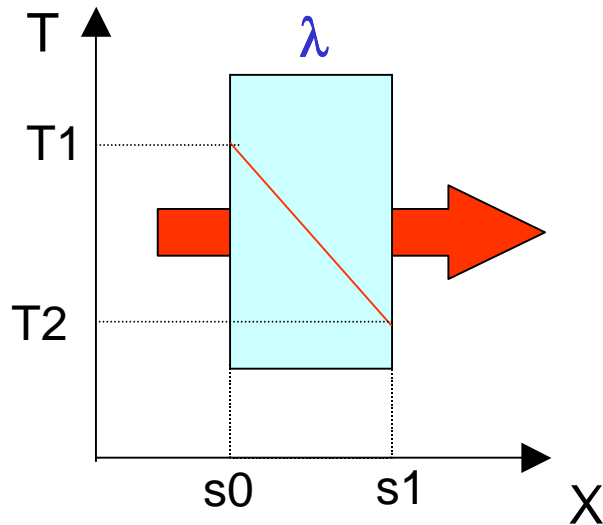


CONDUCIBILITA' TERMICA DI ALCUNI MATERIALI USATI IN EDILIZIA (TEMP. AMB)

La conducibilità termica varia con la temperatura. Per le applicazioni in edilizia si considera costante.

	λ	
VETRO	1,4	
GRANITO	2,79	
GOMMA	0,13	
MATTONE	1 - 1,8	
CALCESTRUZZO	1,4	
PINO	0,11	
ABETE	0,14	
SABBIA	0,27	
NEVE	0,049	
GHIACCIO	1,88	
LATERIZIO ORDINARIO	0,72	
INTONACO	0,25 - 0,72	
FIBRA DI VETRO	0,046	} ← Materiali isolanti
POLISTIRENE	0,027	
SUGHERO	0,039	

CONDUZIONE - PARETE PIANA MONOSTRATO



$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{1}{R} A(T_1 - T_2) \quad \frac{S}{\lambda} = R$$

$$[\text{W}] = \frac{1}{\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} [\text{m}^2\text{K}]$$

ESEMPIO:

Superficie parete: 20 m^2

T_1 : $20 \text{ }^\circ\text{C}$

T_2 : 0°C

λ : 1 W/mK

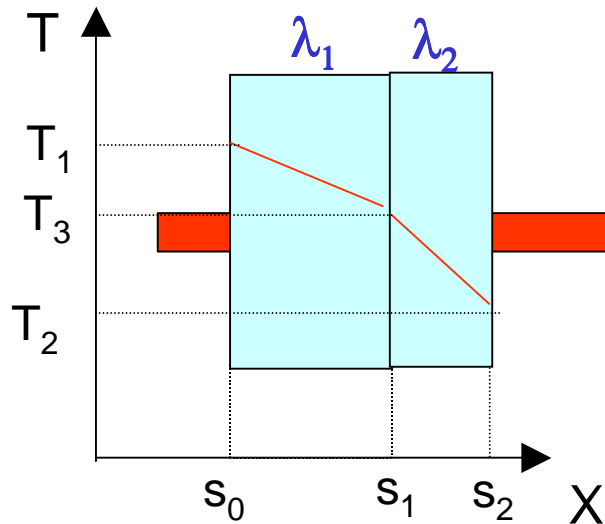
S : $0,5 \text{ m}$

$$R = \frac{S}{\lambda} = \frac{0,5}{1} = 0,5 \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$$

$$\dot{Q}_c = \frac{1}{0,5} \cdot 20 \cdot (20 - 0) = 800 [\text{W}]$$

Flusso di calore $\Phi = \frac{\dot{Q}_c}{A} = \frac{800}{20} = 40 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$

CONDUZIONE - PARETE PIANA MULTISTRATO



$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{1}{R} A(T_1 - T_2)$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3}$$

ESEMPIO:

Superficie parete: 20 m²

T₁: 20 °C

T₂: 0°C

λ₁: 1W/mK

S₁: 0,4 m

λ₂: 0,04W/mK

S₂: 0,1 m

$$R_T = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} = \frac{0,4}{1} + \frac{0,1}{0,04} = 0,4 + 2,5 = 2,9 \left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$$

$$\dot{Q}_C = \frac{1}{2,9} * 20 * (20 - 0) = 138 [\text{W}]$$

$$\Phi = \frac{\dot{Q}_C}{A} = \frac{138}{20} = 6,9 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Per diminuire il flusso di calore è necessario aumentare la resistenza totale della parete

CONDUZIONE

Abbiamo esaminato il fenomeno della **trasmissione del calore per conduzione** ed abbiamo appreso che, considerando che in una parete piana:

- il flusso di calore sia **mono direzionale**, ossia normale alla superficie della parete;
- non vi sia alcuna generazione interna di calore;
- il **regime sia stazionario**, ossia che sia superata la fase transitoria e che la distribuzione delle temperature all'interno della parete non risenta del tempo t .

La quantità di calore che attraversa la parete nell'unità di tempo, (la potenza termica) integrando la relazione di Fourier, risulta:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{\lambda}{S} A(\Delta T)$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{1}{R_T} A(\Delta T)$$

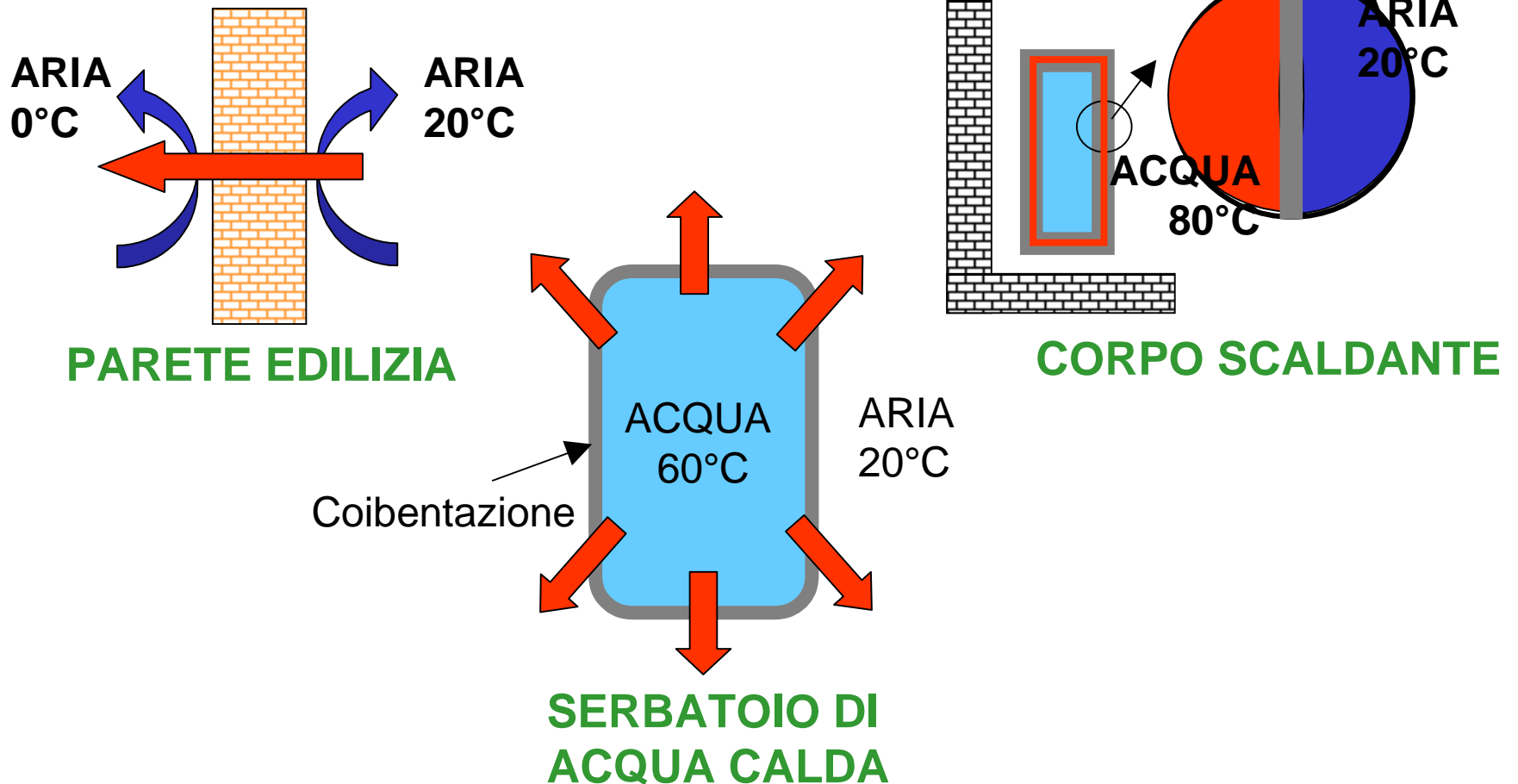
$$R_T = \sum_1^N \frac{S_n}{\lambda_n}$$

R_T è la resistenza termica totale, ossia la sommatoria delle resistenze di ogni singolo strato di materiale considerato isotropo.

La resistenza al passaggio di calore per conduzione è direttamente proporzionale allo spessore S ed inversamente proporzionale alla conducibilità termica λ .

CONVEZIONE

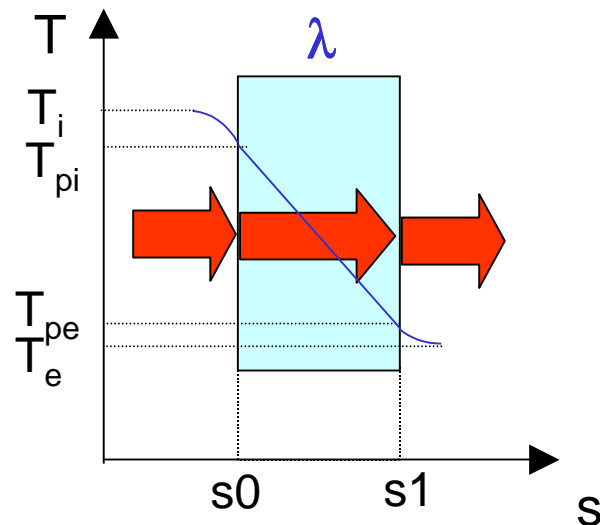
In una parete piana che separa due ambienti nei quali sono presenti due fluidi (ad esempio aria - aria, aria - acqua, acqua - acqua) la trasmissione del calore deve tenere conto non solo della conduzione, ma anche della **convezione**.



CONVEZIONE

In una parete edilizia è necessario eseguire una analisi completa della trasmissione del calore e quindi tenere conto che il calore si trasmette:

- per CONVEZIONE tra l'aria interna del locale e la superficie interna della parete
- per CONDUZIONE attraverso la parete costituita da uno o più strati
- per CONVEZIONE tra la faccia esterna della parete e l'aria esterna.



In una parete costituita da un solo strato le resistenze termiche non sono una, ma tre (2 per la conv. E 1 per la cond.).

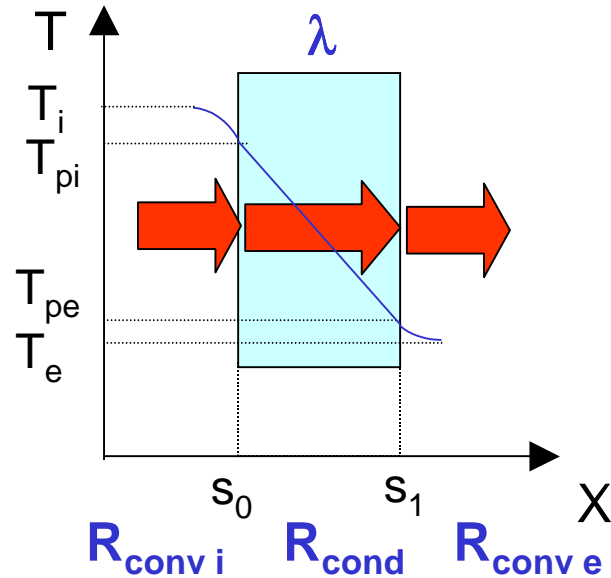
T_i = Temperatura interna

T_{pi} = Temperatura parete interna

T_{pe} = Temperatura parete esterna

T_e = Temperatura esterna

CONVEZIONE



$$R_{tot} = R_{conv.i} + R_{cond} + R_{conv.e}$$

$$R_{tot} = \frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}$$

$$\dot{Q}_{tot} = \frac{1}{R_{tot}} A(T_i - T_e)$$

**TRASMITTANZA
della PARETE**

Le resistenze $R_{conv\ i}$ e $R_{conv\ e}$ si calcolano, noti i coefficienti conduttivi h_i e h_e dal loro reciproco.

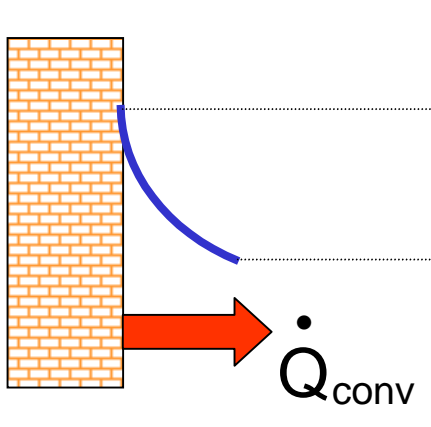
L'analisi del fenomeno convettivo si riduce alla definizione di h_i e h_e .

CONVEZIONE

Consideriamo la parete di un corpo solido lambita da un fluido in moto. Se tra la temperatura della superficie del corpo T_s e quella del fluido T_f vi è una differenza.

Tra parete e fluido si instaura un flusso di potenza termica secondo la già citata legge:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (T_s - T_f)$$



T_s

T_f

dove h è un coefficiente di proporzionalità che prende il nome di coefficiente convettivo o conduttanza convettiva e dipende da:

- proprietà fisiche del fluido
- dinamica del flusso
- geometria della superficie della parete

Convezione naturale

gas	3 - 20 [W/m ² K]
liquidi	100 - 600 [W/m ² K]
acqua bollente	1000 - 20000 [W/m ² K]

Convezione forzata

gas	10 - 100 [W/m ² K]
fluidi viscosi	50 - 500 [W/m ² K]
acqua	500 - 10000 [W/m ² K]

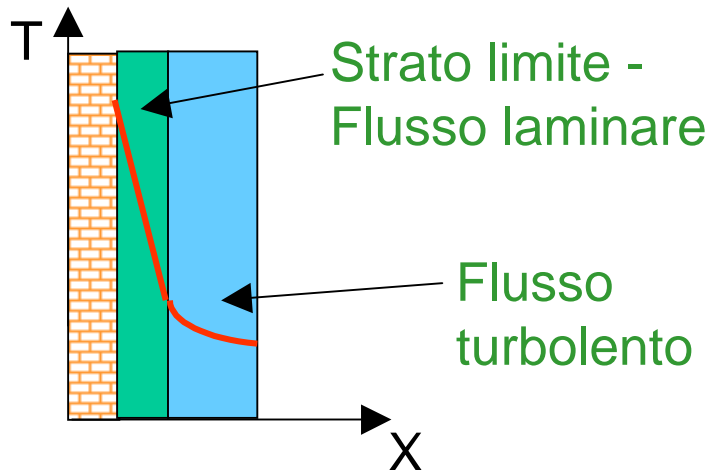
CONVEZIONE

La trasmissione del calore per convezione viene trattata diversamente secondo che questa sia forzata o naturale.

FORZATA: quando il moto del fluido è indotto da una azione di pompaggio esterna.

NATURALE: quando il moto del fluido è dovuto al trasporto di calore in atto.

Il flusso del fluido può essere laminare o turbolento. Nel primo caso, non essendovi rimescolamento, lo scambio di calore avviene per conduzione. Nel secondo caso si verifica, in prossimità della parete, una situazione come quella schematizzata



In prossimità della parete si incontra uno strato in moto laminare (strato limite) attraverso il quale il calore passa per conduzione. Allontanandosi dalla parete si incontra il moto turbolento, forte rimescolamento del fluido ed elevato trasporto di calore. La maggiore resistenza al passaggio di calore è offerta dallo strato limite.

CONVEZIONE FORZATA

Il coefficiente h dipende:

- dalle caratteristiche del fluido: densità (ρ), viscosità (μ), calore specifico a pressione costante (c_p), conduttività (λ)
- dalle condizioni di moto del fluido (v)
- dalla geometria della parete: diametro equivalente (D)

$$h_f = h(\rho, \mu, c_p, \lambda, v, D)$$

Applicando l'analisi dimensionale si ottiene che:

$$h_f = \text{cost} \cdot \frac{\lambda}{D} \left[\frac{\rho v D}{\mu} \right]^a \left[\frac{C_p \mu}{\lambda} \right]^b$$

$$\frac{h_f D}{\lambda} = \text{cost} \cdot \left[\frac{\rho v D}{\mu} \right]^a \left[\frac{C_p \mu}{\lambda} \right]^b$$

CONVEZIONE FORZATA

$$\frac{h_f D}{\lambda}$$

Numero di Nusselt (N_{NU}) si può ottenere dividendo il flusso di calore per convezione ($h\Delta T$) per il flusso di calore per conduzione ($\lambda/D * \Delta T$) e confronto i due sistemi di trasporto del calore.

$$\frac{C_p \mu}{\lambda}$$

Numero di Prandtl (N_{PR}): si ottiene dividendo μ/ρ per $\lambda/\rho C_p$, ossia il coefficiente di diffusione della quantità di moto per il coefficiente di diffusione del calore; esso confronta le due diffusività molecolari.

$$\frac{\rho v D}{\mu}$$

Numero di Reynolds (N_{RE}): indica se il moto è in regime laminare o turbolento.

$$N_{NU} = \text{cost. } N_{RE}^a N_{PR}^b$$

CONVEZIONE NATURALE

Il coefficiente h dipende:

- dalle caratteristiche del fluido: come nel caso precedente, ma in più: il coefficiente di dilatazione isobara α da cui dipende il cambiamento di densità
- dalle condizioni di moto del fluido: queste, non essendo più il moto imposto dipendono ancora da α , dalla densità media ρ , dalla differenza di temperatura tra parete e fluido e dall'accelerazione di gravità, ossia da $\rho g \alpha (T_p - T_f)$
- dalla geometria della parete: come nel caso precedente ma con la necessità di conoscere la posizione della parete rispetto al campo gravitazionale.

CONVEZIONE NATURALE

Applicando l'analisi dimensionale, si ottiene:

$$\frac{hD}{\lambda} = \text{cost.} \left(\frac{D^3 \rho (\rho g \alpha (T_p - T_f))}{\mu^2} \right)^c \cdot \left(\frac{C_p \mu}{\lambda} \right)^d$$

Numero di
Nusselt N_{NU}

Numero di
Grashof N_{gr}

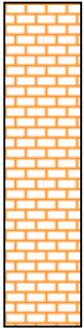
Numero di
Prandtl N_{PR}

N_{GR} è un indice del contributo dei moti convettivi allo scambio termico. D è una dimensione lineare caratteristica del corpo.

Anche in questo caso la relazione generale può essere semplificata:

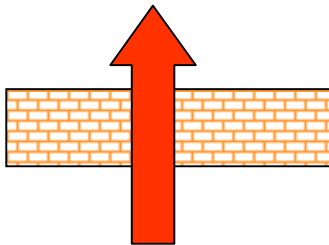
$$N_{NU} = \text{cost.} N_{GR}^c N_{PR}^d$$

CONVEZIONE



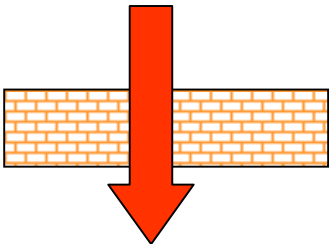
PARETE VERTICALE: $h_i = 8,13 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $h_e = 23,26 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $= 2,3 + 10,5 \sqrt{w}$ se la velocità del vento w è maggiore di 4 m/s

PARETE ORIZZONTALE (FLUSSO ASCENDENTE)



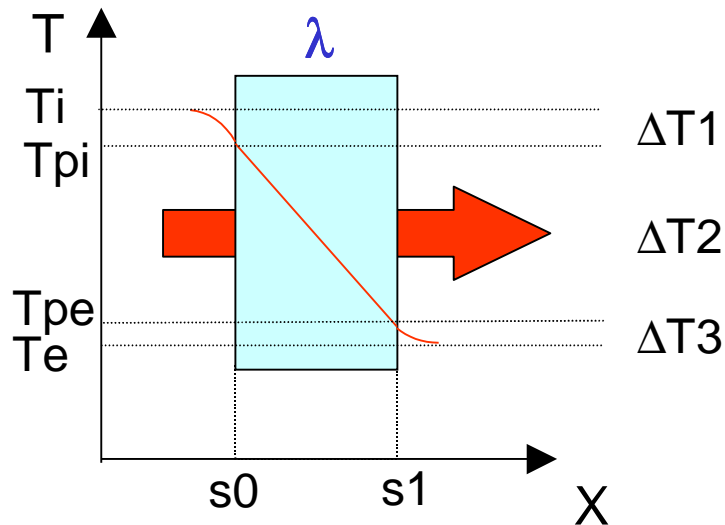
$h_i = 9,35 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $h_e = 23,26 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $= 2,3 + 10,5 \sqrt{w}$ se la velocità del vento w è maggiore di 4 m/s

PARETE ORIZZONTALE (FLUSSO DISCENDENTE)



$h_i = 5,81 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $h_e = 16,39 \text{ W/m}^2\text{K}$
 $= 0,7(2,3 + 10,5 \sqrt{w})$ se la velocità del vento w è maggiore di 4 m/s

IL CALCOLO DEL PROFILO DELLE TEMPERATURE



Eguagliando i flussi si ottiene che:

$$(T_i - T_{pi}) = \frac{k \cdot (T_i - T_e)}{h_i} = \Delta T_1$$

$$(T_{pi} - T_{pe}) = \frac{k \cdot (T_i - T_e)}{\frac{\lambda}{s}} = \Delta T_2$$

$$(T_{pe} - T_e) = \frac{k \cdot (T_i - T_e)}{h_e} = \Delta T_3$$

Il flusso di calore è dato da:

$$\Phi = k \cdot (T_i - T_e)$$

Ma anche dalle relazioni:

$$\Phi = h_i \cdot (T_i - T_{pi})$$

$$\Phi = \frac{\lambda}{s} \cdot (T_{pi} - T_{pe})$$

$$\Phi = h_e \cdot (T_{pe} - T_e)$$

Applicando lo stesso metodo si possono calcolare i profili delle temperature di pareti con più strati