

Capitolo 3

Trasmissione del calore

Laboratorio di Costruzione dell'Architettura
Controllo Ambientale degli Edifici

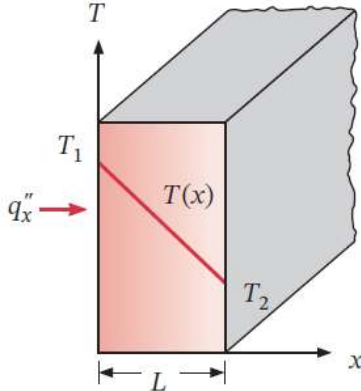
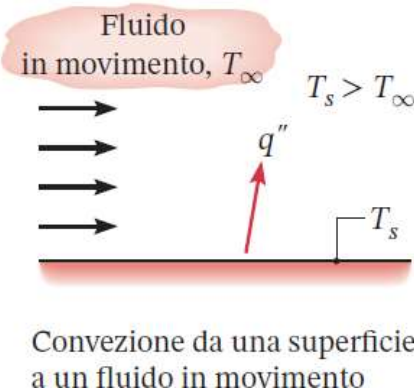
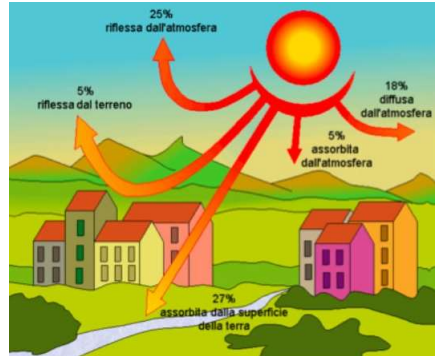
Docente: Riccardo Zamolo (rzamolo@units.it)



A.A. 2024/2025

Trasmissione del calore e sue modalità

Trasmissione del calore: **trasferimento di energia** che ha luogo a causa di una **differenza di temperatura**

Conduzione	Advezione	Irraggiamento
Mezzo: solido o fluido Meccanismo: scambi di energia a livello microscopico da particelle con maggior energia a quelle con minor energia	Mezzo: fluido Meccanismo: trasferimento di energia a livello macroscopico dovuto a movimenti di massa Advezione + conduzione = convezione	Mezzo: qualsiasi (anche nel vuoto) Meccanismo: trasferimenti di energia attraverso scambio di fotoni / radiazione elettromagnetica
		

Conduzione: legge di Fourier (1D)

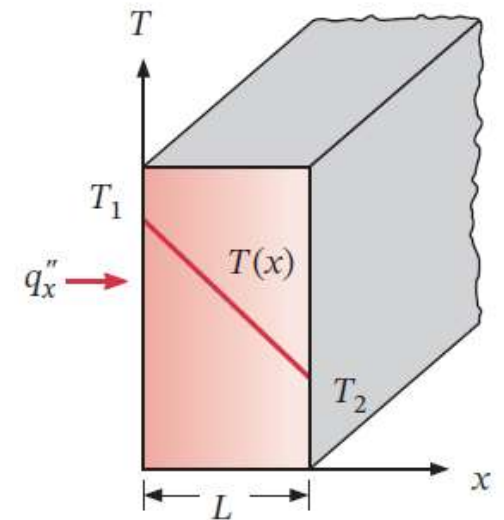
Conduzione: **scambio di calore a livello microscopico** che ha luogo a causa di una **differenza di temperatura** in un mezzo che può essere sia solido che fluido (liquido o gas). A livello microscopico si ha quindi un **gradiente di temperatura**, ossia **variazione di temperatura nello spazio**.

Lo scambio di energia per conduzione avviene sempre nel **verso decrescente della temperatura** (ricordiamoci il II principio della termodinamica).

La legge fondamentale della conduzione è la **legge di Fourier**:

$$q_x'' = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

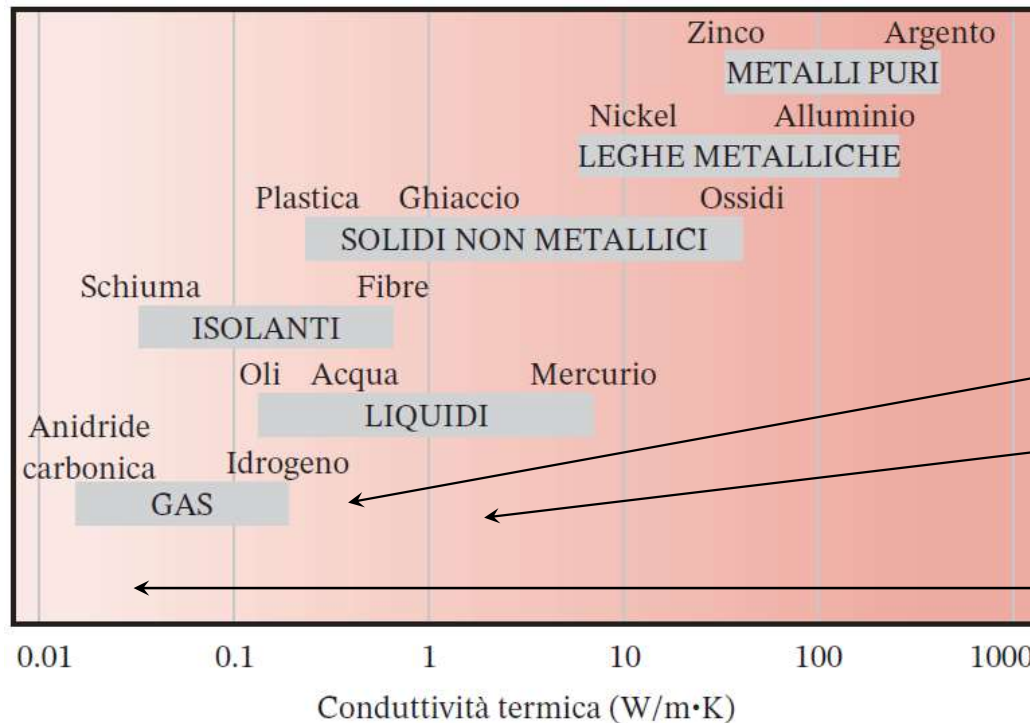
- q_x'' [W/m²] = **flusso termico** = potenza termica [W] scambiata lungo la direzione x per unità di superficie [m²] ortogonale a x
- λ [W/(m · K)] = conduttività termica del **materiale**
- $\frac{dT}{dx}$ [K/m] = gradiente di temperatura



Conduzione: legge di Fourier e conduttività termica

λ [W/(m · K)] = conduttività termica del materiale

E' la costante di proporzionalità tra **gradiente di temperatura** e **flusso termico** ($q_x'' = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$)



SOSTANZA	CONDUTTIVITÀ TERMICA (λ) [W/mK]
Aria (20 °C)	0,025
Acqua (20 °C)	0,580
Vetro	0,800
Mattone (cavo)	0,600
Calcestruzzo	2,000
Polistirolo espanso	0,030 – 0,040
Lana di roccia	0,035 – 0,040

Conduzione: legge di Fourier, superfici, flussi e potenze

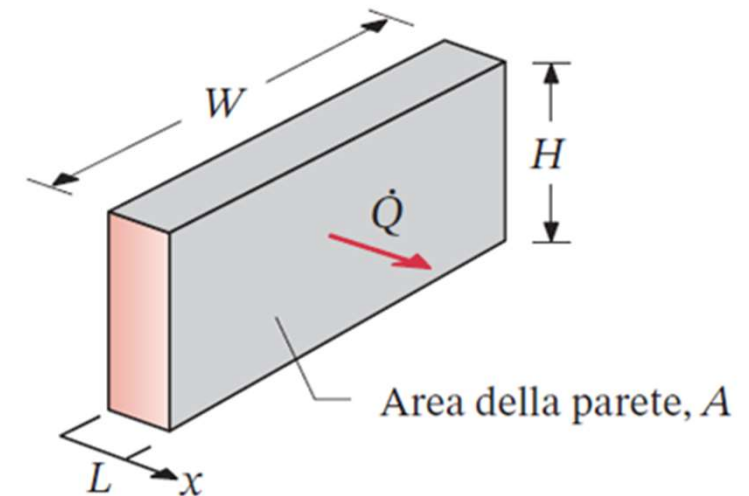
$$q_x'' = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

- q_x'' = **flusso termico** = potenza termica scambiata per unità di superficie:

$$q_x'' = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{q_x}{A} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

- $\dot{Q} = q_x$ = **potenza termica** scambiata:

$$\dot{Q} = q_x = A \cdot q_x'' = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad [\text{W}]$$



Conduzione: legge di Fourier, parete piana

In una **parete piana monodimensionale** (es. **parete molto estesa**), in condizioni **stazionarie** e materiale con **conduttività costante**, l'andamento della temperatura è **lineare** attraverso la parete:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} = -\frac{\Delta T}{L}$$



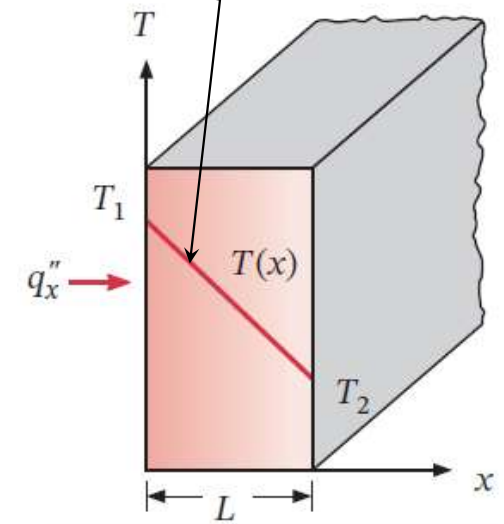
Le temperature possono essere messe indifferentemente in K o °C perché si tratta di differenze di temperatura

La legge di Fourier per il flusso termico diventa quindi:

$$q_x'' = -\lambda \frac{dT}{dx} = \lambda \frac{\Delta T}{L} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

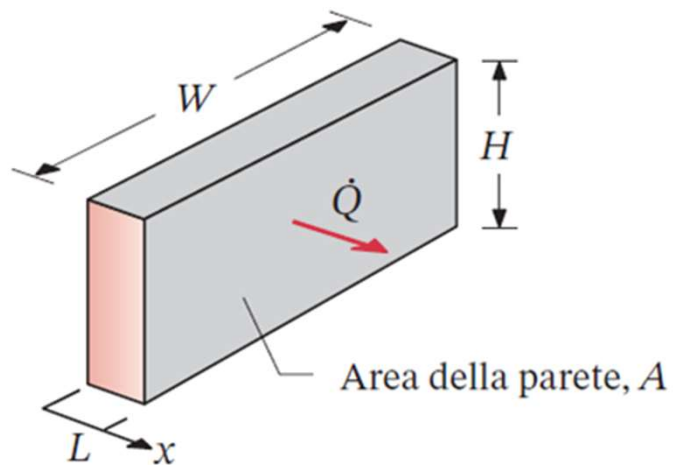
e di conseguenza la **potenza termica** trasmessa **attraverso la parete** sarà:

$$q_x = A \cdot q_x'' = A \cdot \lambda \frac{\Delta T}{L} \quad [\text{W}]$$



Esercizio 1 (legge di Fourier, parete piana)

Data una **parete** di calcestruzzo ($\lambda = 2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) larga $W = 8 \text{ m}$, alta $H = 3 \text{ m}$ e spessa $L = 50 \text{ cm}$, calcolare il **flusso termico** e la **potenza termica** dispersa verso l'esterno quando la temperatura della superficie esterna è $T_2 = 5 \text{ °C}$ mentre quella della superficie interna è mantenuta a $T_1 = 18 \text{ °C}$.



Conduzione: resistenza termica (conduttiva)

Riorganizziamo i termini della formula della **potenza termica** trasmessa attraverso una parete:

$$\dot{Q} = q_x = A \cdot \lambda \frac{\Delta T}{L} = \frac{\Delta T}{\frac{L}{A \cdot \lambda}} = \frac{\Delta T}{R} \quad [\text{W}]$$

dove, in analogia alla resistenza elettrica, l'elemento al denominatore è la **resistenza termica conduttiva**:

$$R_{cond} = \frac{L}{A \cdot \lambda} \quad \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$$

La **resistenza termica** R mette in **relazione diretta** la **potenza termica** scambiata [W] con la **differenza di temperatura** ΔT [K oppure °C]: a parità di differenza ΔT , maggiore la resistenza termica R , minore la potenza termica scambiata $\dot{Q}$ ($= q_x$).

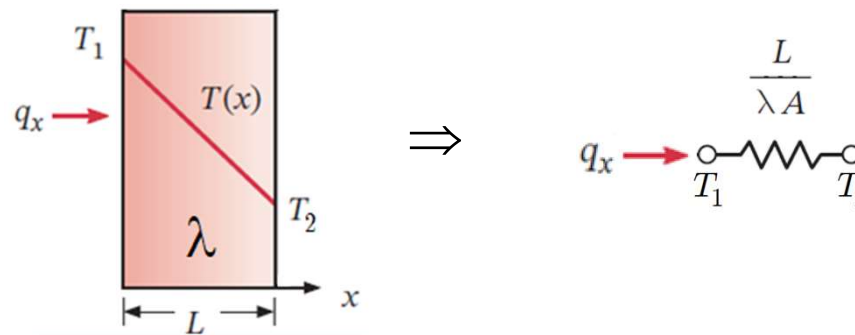
Dalla formula della resistenza termica si vede che, come ci si aspettava, la **resistenza termica conduttiva** R_{cond} di una parete piana è **direttamente proporzionale al suo spessore** L ed **inversamente proporzionale** alla sua **superficie** A ed alla **conduttività termica** λ del materiale.

Conduzione: analogia elettrotermica

L'**analogia elettrotermica** è una dualità tra il fenomeno della **conduzione elettrica** e quello della **conduzione termica**. Deriva dal fatto che le leggi che regolano i due fenomeni sono fisicamente identiche, a patto di sostituire i termini corrispondenti:

Fenomeno	Flusso	Potenziale	Resistenza	Descrizione	Formula
Conduzione termica	potenza termica q_x	temperatura T	resistenza termica R	Flusso termico diretto da temperatura maggiore verso temperatura minore	$q_x = \frac{\Delta T}{R}$
Conduzione elettrica	corrente I	potenziale elettrico V	resistenza elettrica R_{el}	Corrente elettrica diretta da potenziale maggiore verso potenziale minore	$I = \frac{\Delta V}{R_{el}}$

Tale analogia permette di schematizzare problemi di conduzione (e non solo) tramite **reti elettriche equivalenti**. Nel caso della parete piana:



Conduzione: trasmittanza termica

Riorganizziamo in un'altra maniera i termini della formula del **flusso termico**:

$$q''_x = \lambda \frac{\Delta T}{L} = \left(\frac{\lambda}{L} \right) \cdot \Delta T = U \cdot \Delta T \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

dove il termine U è la **trasmittanza termica conduttiva**:

$$U_{cond} = \frac{\lambda}{L} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

La **trasmittanza termica** U mette in **relazione diretta** il **flusso termico** scambiato $[\text{W}/\text{m}^2]$ con la **differenza di temperatura** ΔT $[\text{K}$ oppure $^{\circ}\text{C}]$: a parità di differenza ΔT , maggiore la trasmittanza U , maggiore il flusso termico scambiato q''_x .

La **trasmittanza termica** conduttiva U esprime un concetto **inverso rispetto alla resistenza termica** R e **non dipende dall'estensione** (superficie A) della parete poiché si riferisce all'unità di superficie, analogamente al flusso termico a cui si riferisce. Resistenza e trasmittanza sono legate da:

$$R = \frac{1}{A \cdot U} \quad \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$$

Conduzione: pareti composite a due strati

Consideriamo una parete piana **composita** costituita da **due strati** A e B con conduttività λ_A e λ_B diverse ed applichiamo la legge di Fourier ai singoli strati, scritta in funzione della **potenza termica** q_x trasmessa attraverso la parete e delle **resistenze termiche** R_A e R_B dei singoli strati:

$$T_1 - T_2 = \Delta T_A = R_A \cdot q_x$$

$$T_2 - T_3 = \Delta T_B = R_B \cdot q_x$$

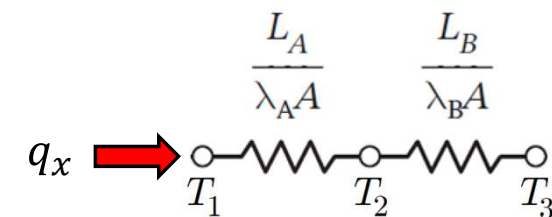
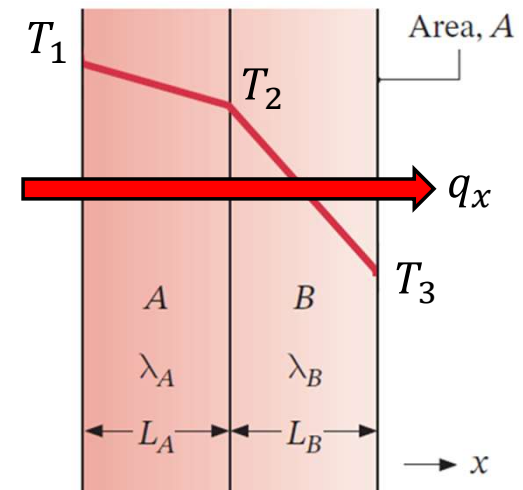
sommando ↓

$$T_1 - T_3 = \Delta T = (R_A + R_B) \cdot q_x = R_{tot} \cdot q_x$$

ossia la **resistenza termica** R_{tot} della **parete composita** è la **somma** delle **resistenze termiche** dei singoli strati:

$$R_{tot} = R_A + R_B = \frac{L_A}{A \cdot \lambda_A} + \frac{L_B}{A \cdot \lambda_B}$$

Nella **rete elettrica equivalente** le due resistenze sono in **serie**:



Conduzione: resistenza termica specifica

Spesso (es. pareti composite) è molto utile ragionare in termini di **grandezze specifiche**, ossia riferite all'**unità di superficie** di scambio termico, es. flusso termico q''_x [W/m²]. In tal modo la superficie effettiva A **non viene mai esplicitamente considerata** (come nel caso della trasmittanza).

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = \frac{\Delta T}{A \cdot R} = \frac{\Delta T}{R''} = U \cdot \Delta T \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

dove R'' è la **resistenza termica specifica**:

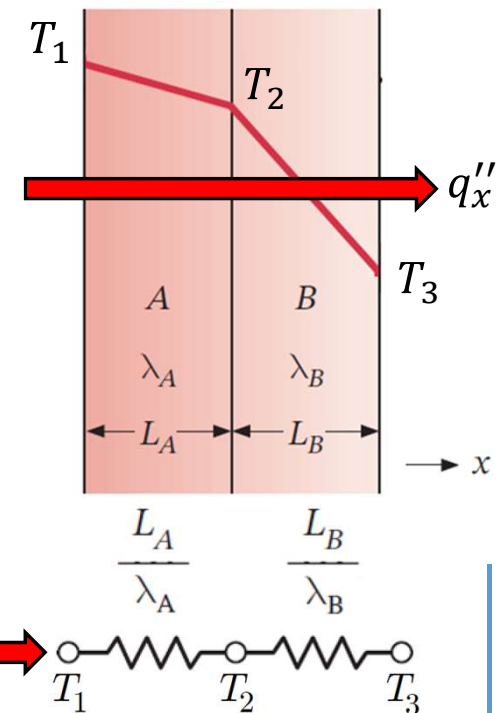
$$R'' = A \cdot R = \frac{1}{U} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

che nel caso di **singola parete piana** vale quindi:

$$R''_{\text{cond}} = A \cdot R_{\text{cond}} = A \cdot \frac{L}{\lambda \cdot A} = \frac{L}{\lambda}$$

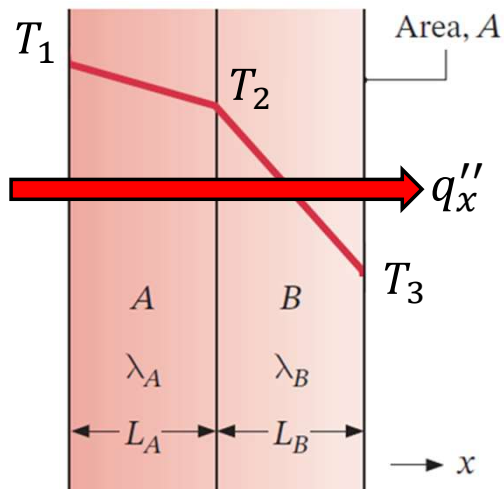
Per parete composita vale ancora la regola della **somma delle resistenze**:

$$R''_{\text{tot}} = R''_A + R''_B$$



Esercizio 2 (parete composita)

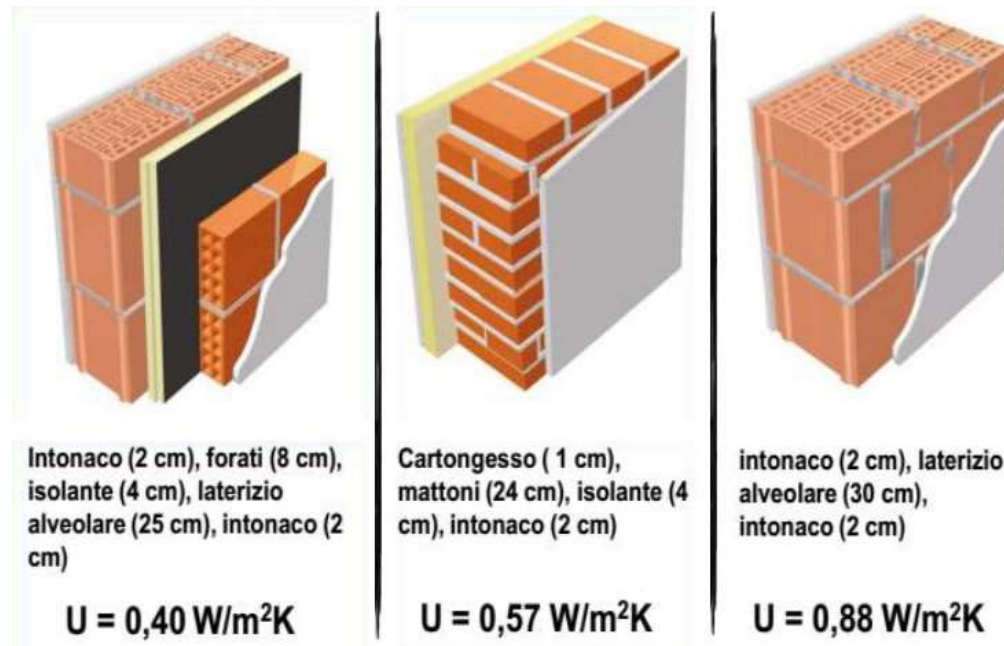
Data una **parete piana** costituita da **due strati** A (calcestruzzo, conduttività $\lambda_A = 2 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, spessore $L_A = 20 \text{ cm}$) e B (isolante, conduttività $\lambda_B = 0.03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, spessore $L_B = 20 \text{ cm}$), calcolare il flusso termico q''_x [W/m^2] quando le temperature alle estremità sono $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_3 = 4 \text{ }^\circ\text{C}$. Si calcoli inoltre la temperatura intermedia T_2 .



Conduzione: trasmittanza pareti esterne

Esempi di **pareti multistrato esterne** e loro caratterizzazione in termini di **trasmittanza** U [W/(m²K)]:

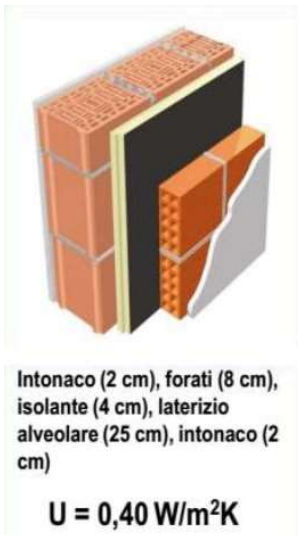
$$q''_x = \frac{\dot{Q}}{A} = U \cdot \Delta T \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$



Minore U Maggiore U
Maggior isolamento Minor isolamento

Esercizio 3 (trasmissione pareti esterne)

Data la parete multistrato in figura, calcolare la potenza termica dispersa q_x [W] quando le temperature delle superfici interna ed esterna sono $T_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_2 = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e le dimensioni della parete sono $W = 8\text{ m}$, $H = 3\text{ m}$.



Convezione

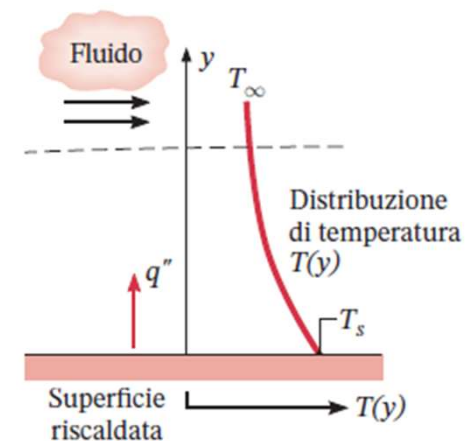
Abbandoniamo temporaneamente la conduzione (ci ritorneremo poco più avanti) per introdurre alcuni concetti fondamentali delle modalità di scambio termico per convezione e irraggiamento, necessarie per proseguire.

Ricordiamo che la **convezione** si compone di **conduzione** (scambio di energia a livello **microscopico**) e **advezione** (trasporto di energia a livello macroscopico per **trasporto di massa**) in un **mezzo fluido** (gas, liquido).

Tale modalità di scambio termico si verifica quando un **fluido** ad una certa **temperatura indisturbata** T_∞ (a sufficiente distanza dalla superficie) viene a contatto con una **superficie** (es. parete, copertura) a **differente temperatura** T_s . Ricordiamo che è sempre una differenza di temperatura ($T_\infty - T_s$) a dare origine allo scambio termico.

Si creerà una zona a ridosso della superficie, detta **strato limite termico**, dove la temperatura del fluido **varierà velocemente** nello spazio lungo y (direzione ortogonale alla superficie) tra la temperatura della superficie T_s e quella indisturbata T_∞ . Tale variazione è **tanto più rapida quanto più intenso è il moto** (velocità) **del fluido**.

Se il **fluido** fosse **ipoteticamente immobile** (velocità nulla), si avrebbe **solo conduzione**, che ha comunque luogo in un fluido.



Esempio: parete calda che riscalda un fluido

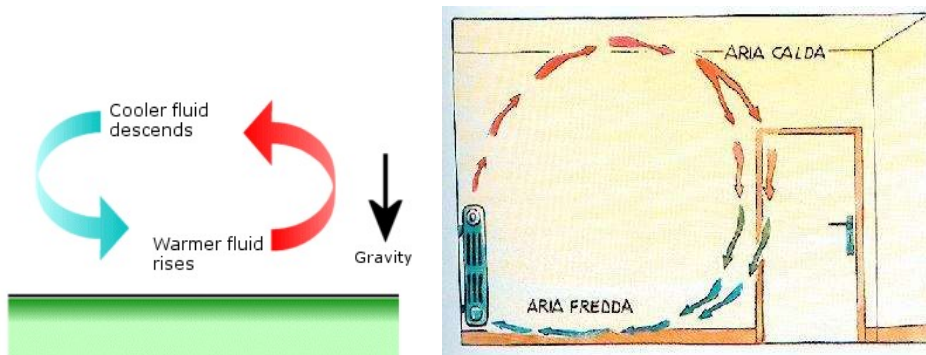
Convezione: forzata e naturale

Le condizioni di **moto del fluido** influenzano **fortemente** lo scambio termico convettivo.

Si distinguono **due tipologie** di convezione in funzione delle **cause del moto del fluido**:

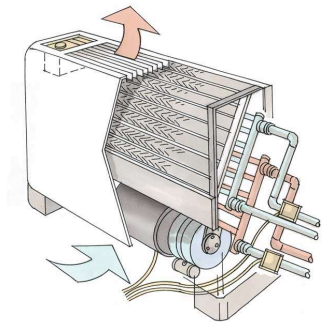
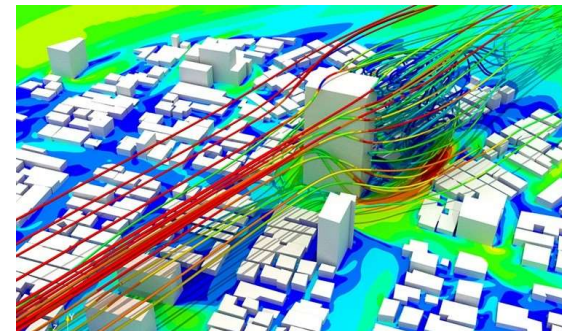
Convezione naturale o libera

Cause **interne**: il moto è causato dalle **forze di galleggiamento** che hanno luogo per effetto di variazioni di temperatura nel fluido



Convezione forzata

Cause **esterne**: il moto è causato da mezzi esterni (**vento, ventilatore, pompe, ecc.**)



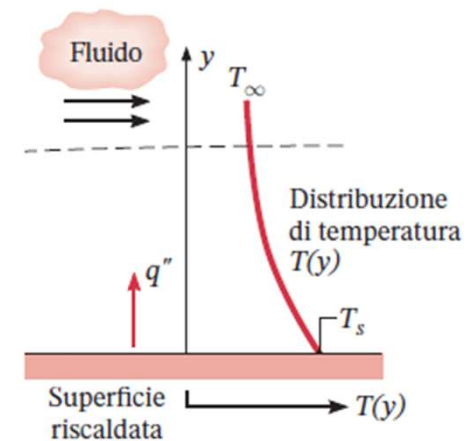
Convezione: legge di Newton

Indipendentemente dalle condizioni di moto e di tutti gli altri fattori, la legge fondamentale della convezione è la **legge di Newton**:

$$q'' = h \cdot (T_S - T_\infty)$$

- q'' [W/m²] = **flusso termico** (= potenza termica [W] scambiata tra superficie e fluido, per unità di superficie [m²])
- h [W/(m² · K)] = **coefficiente di scambio termico convettivo**
- T_S [K oppure °C] = temperatura della superficie
- T_∞ [K oppure °C] = temperatura del fluido indisturbato

Come da secondo principio, ed in analogia alla conduzione, il **flusso termico** è sempre orientato **nel verso decrescente delle temperatura**. Nel caso di fluido più caldo della superficie (es. convezione tra superficie esterna di una parete e aria esterna in estate) il flusso sarà orientato dal fluido verso la superficie.



Esempio: parete calda che riscalda un fluido

Convezione: coefficiente convettivo

A differenza della **legge di Fourier per la conduzione** ($q'' = -\lambda \frac{dT}{dx}$), nella quale la **conduttività termica** λ era una **proprietà del materiale** (poiché descrive un fenomeno microscopico), il coefficiente convettivo h nella **legge di Newton** ($q'' = h \cdot (T_S - T_\infty)$) **non dipende solo dal tipo di fluido**, ma anche (e soprattutto) dalle **condizioni del moto** (fenomeno macroscopico):

Processo	h (W/m ² · K)
Convezione naturale	
Gas	2-25
Liquidi	50-1000
Convezione forzata	
Gas	25-250
Liquidi	100-20.000

ORDINE DI GRANDEZZA DI TIPICI h_c	
Condizione convettiva	h_c [W/(m ² K)]
AERIFORME, convezione NATURALE	6 ÷ 30
AERIFORME, convezione FORZATA	30 ÷ 300
OLIO, convezione FORZATA	60 ÷ 1500
ACQUA, convezione FORZATA	300 ÷ 10000
ACQUA, in EBOLLIZIONE	3000 ÷ 60000
VAPORE ACQUEO, in CONDENSAZIONE	6000 ÷ 120000

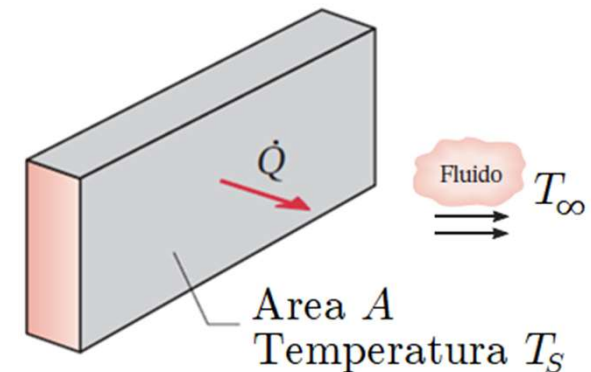
Convezione: potenza termica e resistenza convettiva

Flusso termico scambiato per convezione (legge di Newton):

$$q'' = h \cdot (T_S - T_\infty) = \underbrace{h}_{U_{conv}} \cdot \Delta T \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

Potenza termica $\dot{Q}$ scambiata per convezione:

$$\dot{Q} = A \cdot q'' = A \cdot h \cdot (T_S - T_\infty) = \frac{T_S - T_\infty}{\underbrace{\frac{1}{A \cdot h}}_{R_{conv}}} = \frac{\Delta T}{R_{conv}} \quad [\text{W}]$$



Resistenza termica convettiva R_{conv} e **resistenza termica specifica** R''_{conv} :

$$R_{conv} = \frac{1}{A \cdot h} \quad \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$$

$$R''_{conv} = A \cdot R_{conv} = \frac{1}{h} \quad \left[\frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$$

Le resistenze (termiche) convettive R_{conv} sono **inversamente proporzionale al coefficiente convettivo** h .

Esercizio 4 (potenza termica per convezione)

Dato un edificio cubico di lato 8 m, calcolare la **potenza termica totale** scambiata per **convezione** verso l'**aria esterna** quando quest'ultima ha una **temperatura indisturbata** $T_{\infty} = 5\text{ °C}$ mentre tutte le superfici esterne dell'edificio sono a temperatura $T_s = 8\text{ °C}$. Le pareti interessate dallo scambio sono le **4 verticali** laterali, per le quali il **coefficiente convettivo** è $h_{vert} = 10\text{ W/(m}^2\text{K)}$, e la **copertura**, per la quale il **coefficiente convettivo** è $h_{cop} = 30\text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Questo **non è un calcolo realistico** della potenza termica dispersa da un edificio poiché stiamo fissando la temperatura esterna delle pareti T_s . Fissata la temperatura interna e quella dell'aria esterna, T_s dipenderà, come vedremo, dalle caratteristiche di isolamento delle pareti.

Resistenza termica totale di parete (composita)

Nel caso di una **parete** (eventualmente anche composita, ossia composta da strati di materiale diverso) che **scambia calore per convezione** con un fluido (es. aria) attraverso le **superfici laterali**, vale ancora, in **condizioni stazionarie**, la legge della **somma delle resistenze termiche**, **comprese quelle convettive**:

$$R_{tot} = R_{conv,1} + R_{cond,A} + R_{cond,B} + R_{conv,3} =$$

$$= \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{\lambda_A A} + \frac{L_B}{\lambda_B A} + \frac{1}{h_3 A} \quad \left[\frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$$

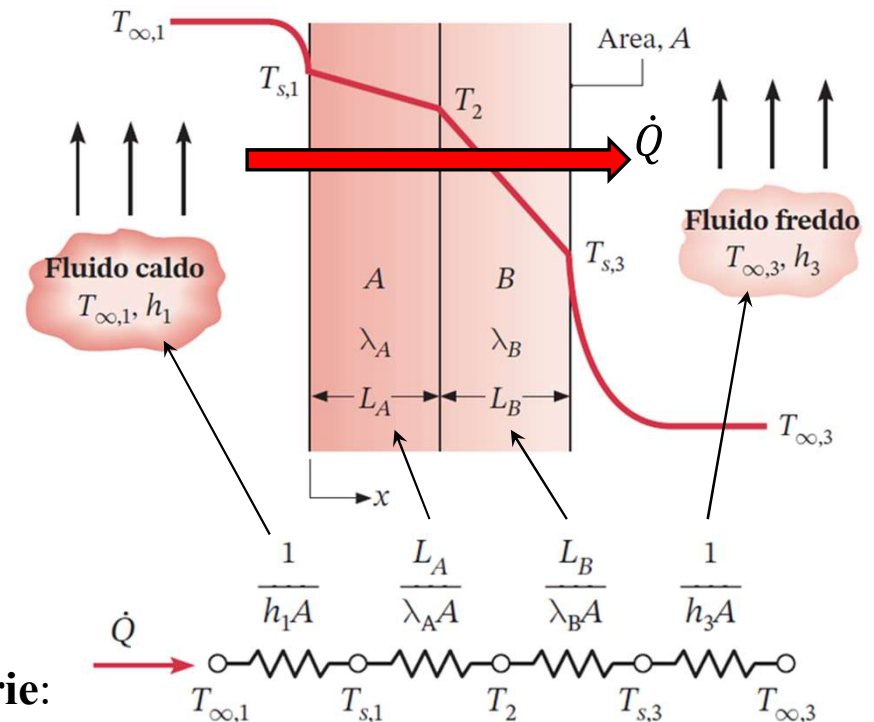
Resistenza termica specifica R'_{tot} :

$$R'_{tot} = A \cdot R_{tot} = \frac{1}{h_1} + \frac{L_A}{\lambda_A} + \frac{L_B}{\lambda_B} + \frac{1}{h_3} \quad \left[\frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} \right]$$

Potenza termica scambiata $\dot{Q}$:

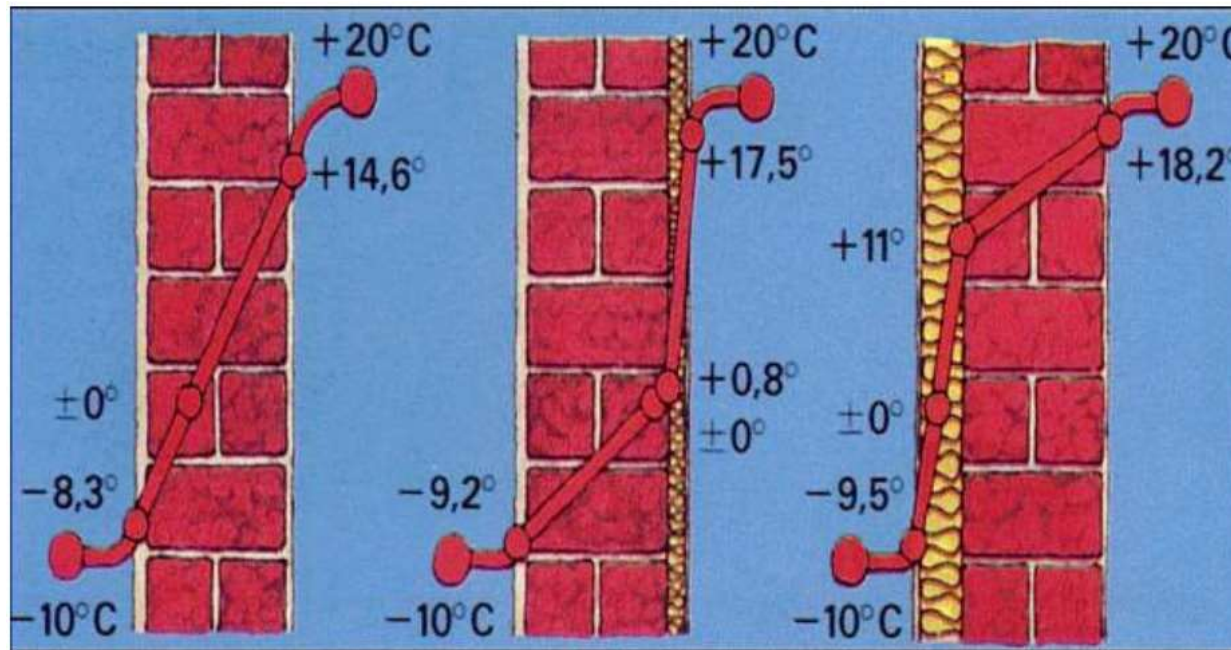
$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,3}}{R_{tot}} \quad [\text{W}]$$

Nella **rete elettrica equivalente** le resistenze sono tutte in **serie**:



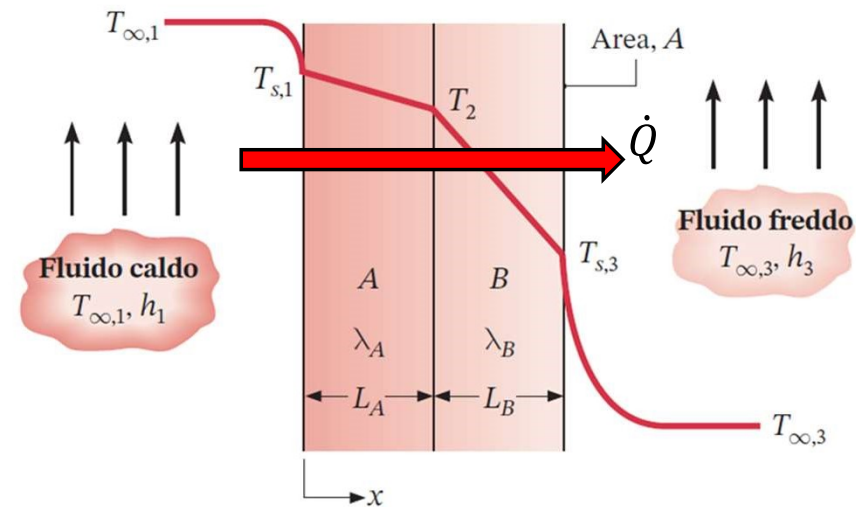
Isolamento parete composita

Andamento della temperatura in una parete composita al variare della **presenza e posizione dello strato isolante**:



Esercizio 5 (parete composta con convezione)

Si consideri una **parete piana** costituita da **due strati** *A* (laterizio, conduttività $\lambda_A = 2 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, spessore $L_A = 15 \text{ cm}$) e *B* (isolante, conduttività $\lambda_B = 0.03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, spessore $L_B = 10 \text{ cm}$), calcolare il flusso termico $q''_x [\text{W/m}^2]$ quando le temperature (indisturbate) dell'aria interna ed esterna sono $T_{\infty,1} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{\infty,3} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Si calcoli inoltre la temperatura della superficie interna, $T_{s,1}$.

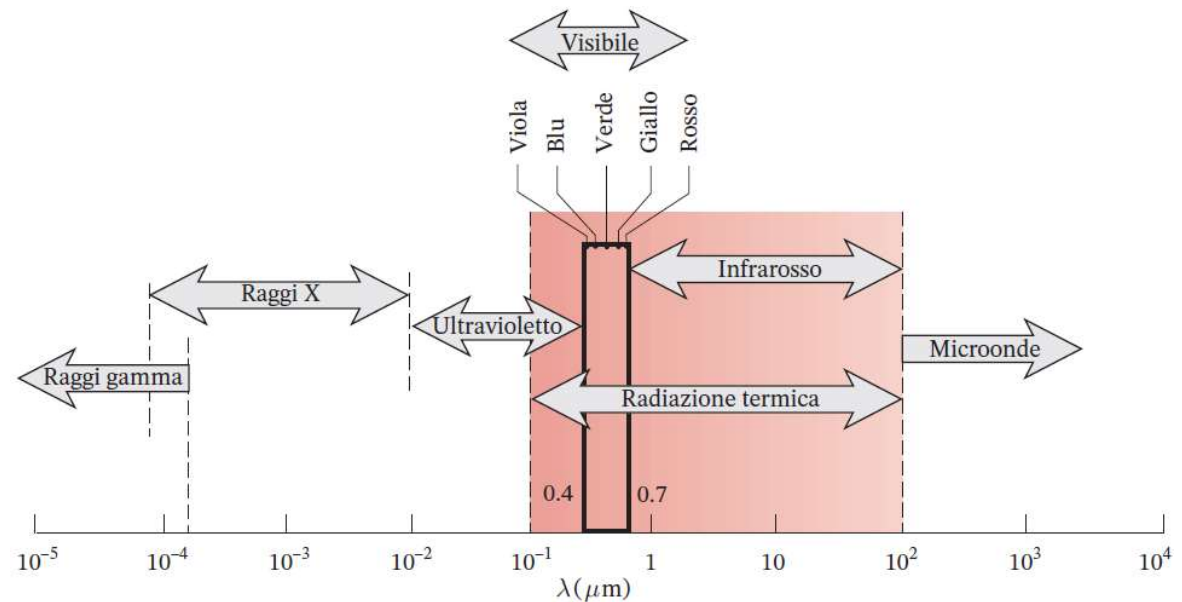
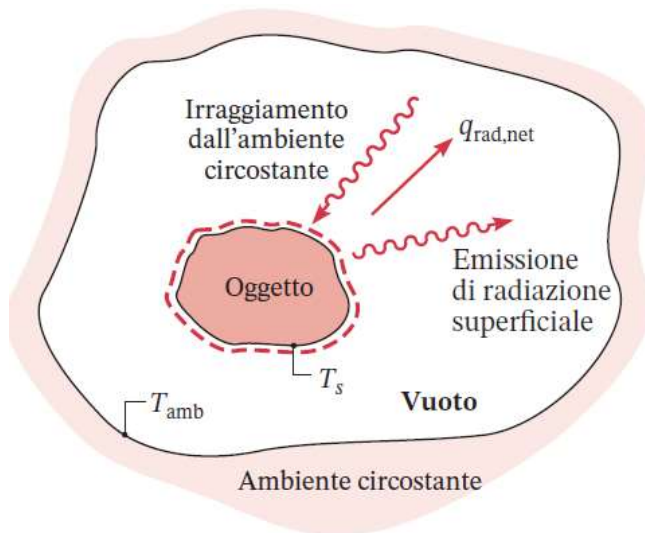


Irraggiamento (radiazione termica)

Modalità di trasmissione del calore che avviene tramite **radiazione elettromagnetica**, per la quale un corpo emette **potenza termica** a causa della sua **temperatura**.

La **radiazione termica** è quella relativa alla zona intermedia dello spettro elettromagnetico che comprende parte di **raggi ultravioletti (UV)**, tutto la **radiazione visibile** e gli **infrarossi (IR)**.

Le **lunghezze d'onda** λ [$\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$] della radiazione termica sono comprese tra 0.1 e 100 μm .

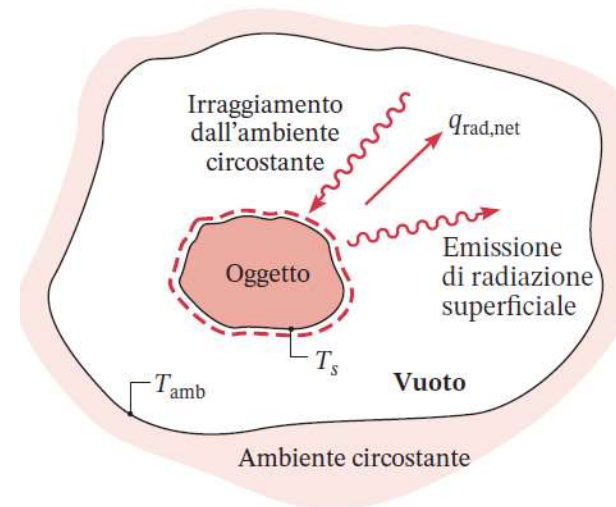


Potere emissivo

Descrive la **potenza termica** [W], emessa sotto forma di **radiazione**, per **unità di superficie** [m²] in tutte le direzioni nello spazio:

- Potere emissivo **spettrale** $E_\lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}} \right]$: potenza emessa ad **una particolare lunghezza d'onda** λ
- Potere emissivo **totale** $E \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$: potenza globalmente emessa su **tutte le lunghezze d'onda**

$$E = \int_0^{+\infty} E_\lambda(\lambda) d\lambda$$



Corpo nero

Superficie ideale utilizzata come riferimento per modellare i fenomeni di scambio termico radiativo:

1. Assorbe **tutta la radiazione incidente**
2. Nessun'altra superficie può emettere più potenza di un corpo nero
3. Emette in egual misura in **tutte le direzioni nello spazio (emettitore diffuso)**

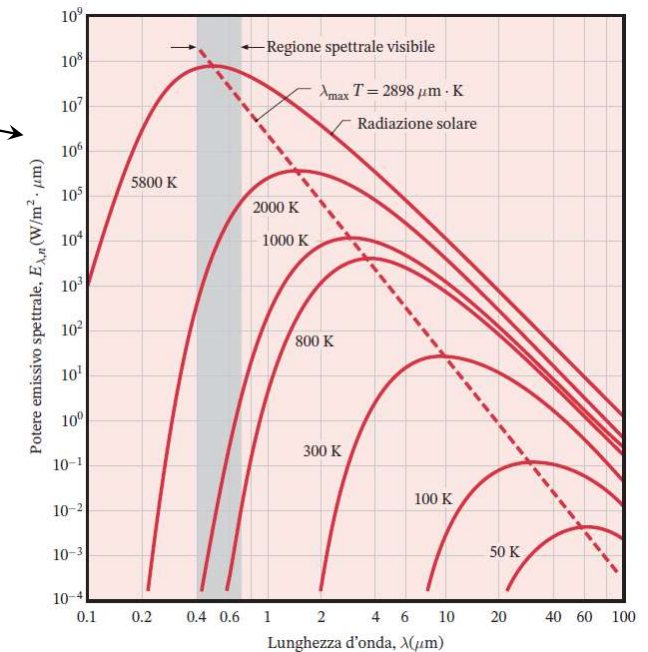
- Potere emissivo **spettrale** $E_{\lambda,n}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}$
- Potere emissivo **totale** $E_n(T) = \sigma \cdot T^4$, detta anche **legge di Stefan-Boltzmann**

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

Il potere emissivo totale di corpo nero E_n dipende dalla **quarta potenza della temperatura T** .



Nell'ambito dell'irraggiamento le temperature vanno intese in **senso assoluto**, quindi **sempre in Kelvin [K]**.



Emissività

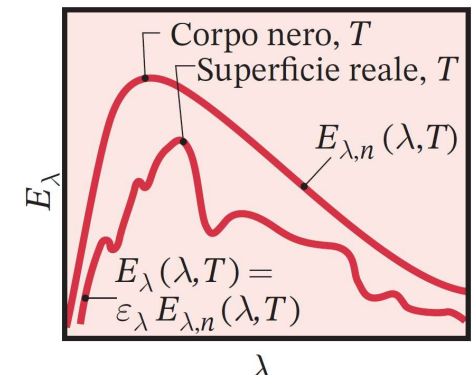
Le **superfici reali** emettono, per definizione, **sempre meno del corpo nero** che funge da riferimento.

Il potere emissivo delle superfici reali viene caratterizzata dall'**emissività**:

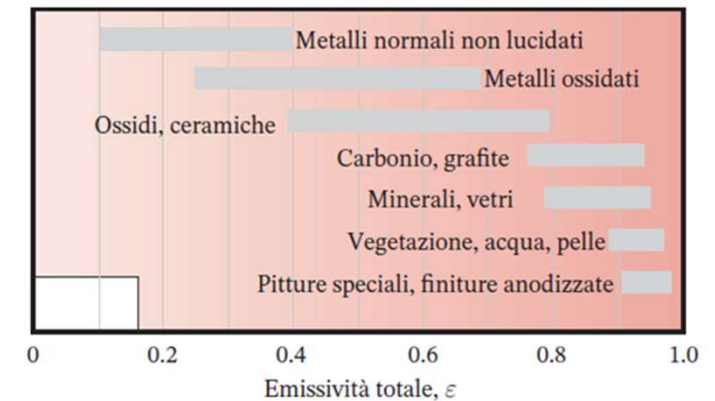
$$\varepsilon_\lambda = \frac{\text{Potere emissivo corpo reale}}{\text{Potere emissivo corpo nero}} = \frac{E_\lambda}{E_{\lambda,n}} \quad [-]$$

In generale, l'emissività dipende dalla lunghezza d'onda λ e dalla temperatura T .

Se l'**emissività** è **costante** sulla parte di spettro di interesse, ossia se è **indipendente dalla lunghezza d'onda** λ per le lunghezze d'onda tipiche della radiazione termica, si parla di **corpo grigio**.



L'**emissività totale** ε $[-]$ è quella **media** su tutto lo spettro di interesse:



Irradianza

Una superficie, oltre ad emettere radiazione, la riceve dall'ambiente in cui si trova.

L'**irradianza totale** G [W/m²] è la potenza termica che, sotto forma di radiazione, incide da tutte le direzioni nello spazio a tutte le lunghezze d'onda, per unità di superficie. L'irradianza totale G si scompone in 3 parti:

1. **Riflessa** G_{rif}
2. **Assorbita** dal corpo G_{ass}
3. (**Trasmessa** attraverso il corpo G_{tr} se il corpo non è opaco, es. vetro)

Nei casi di interesse con mezzi opachi ($G_{tr} = 0$), si ha quindi:

$$G_{rif} + G_{ass} = G$$

e dividendo per G :

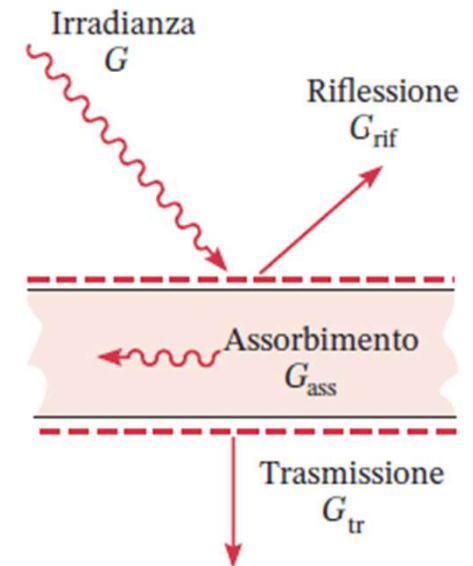
$$\frac{G_{rif}}{G} + \frac{G_{ass}}{G} = \frac{G}{G} = 1$$

$$\rho + \alpha = 1$$

ρ = coefficiente di riflessione [-]

α = coefficiente di assorbimento [-]

Si dimostra che **se il corpo è grigio** si ha $\alpha = \varepsilon$, cioè **coefficiente di assorbimento = emissività**



Scambio termico radiativo in una cavità

Consideriamo lo scambio radiativo tra una **piccola superficie grigia e opaca** a temperatura T_S , e una **superficie più grande** che la circonda completamente (cavità) a temperatura T_{amb} . Essendo la superficie piccola, essa interferirà molto poco con l'emissione radiativa della cavità, il cui **potere emissivo** può essere approssimato a quello di **corpo nero** alla temperatura T_{amb} , ossia $E_n(T_{amb})$. L'**irradianza** G incidente sulla piccola superficie coinciderà quindi con quella emessa dalla cavità:

$$G = E_n(T_{amb}) = \sigma \cdot T_{amb}^4$$

e la frazione di irradianza **assorbita** dalla piccola superficie sarà:

$$G_{ass} = \alpha \cdot G = \alpha \cdot \sigma \cdot T_{amb}^4$$

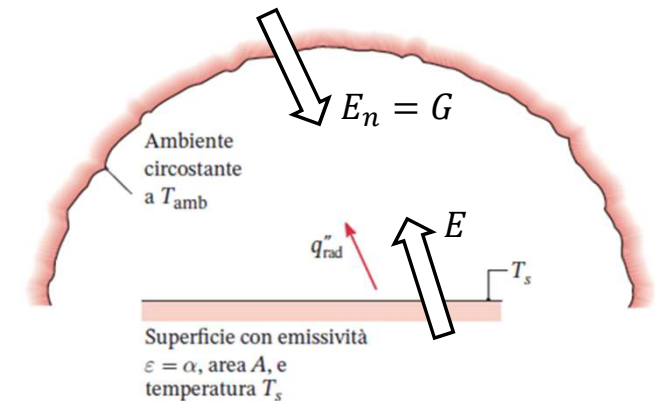
Il **potere emissivo** E della piccola superficie sarà quella di corpo grigio, determinata dalla sua **emissività** ε e dalla sua **temperatura** T_S :

$$E = \varepsilon \cdot E_n(T_S) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_S^4$$

Il bilancio di primo principio (conservazione energia) sarà quindi:

$$q''_{rad} = E - G_{ass} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_S^4 - T_{amb}^4)$$

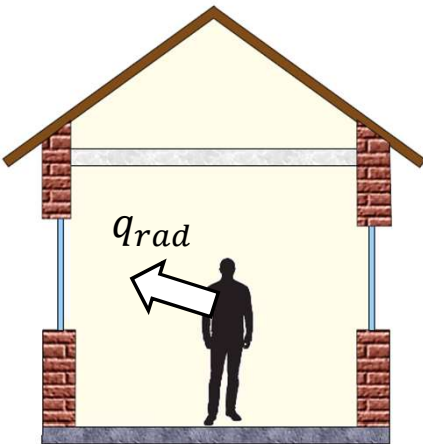
avendo ricordato che per un **corpo grigio** $\alpha = \varepsilon$.



Anche qua le temperature vanno intese in **senso assoluto**, quindi **sempre in Kelvin [K]**.

Esercizio 6 (scambio radiativo in cavità)

Calcolare la **potenza termica netta** q_{rad} [W] scambiata per **irraggiamento** tra la superficie di un uomo, considerata come **superficie grigia e diffusa** con emissività $\varepsilon = 0.9$, area $A = 2\text{m}^2$ e temperatura $T_S = 28^\circ\text{C}$, e le superfici interne di un edificio con temperatura $T_{amb} = 15^\circ\text{C}$, approssimabili come corpo nero. La costante di Stefan-Boltzmann vale $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$. Calcolare il coefficiente di scambio termico radiativo h_{rad} definito da $q''_{rad} = h_{rad} \cdot (T_S - T_{amb})$. Calcolare poi anche la potenza termica q_{conv} [W] scambiata per convezione tra l'uomo e l'aria ambiente considerata a temperatura $T_\infty = 19^\circ\text{C}$ quando il coefficiente convettivo vale $h = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.



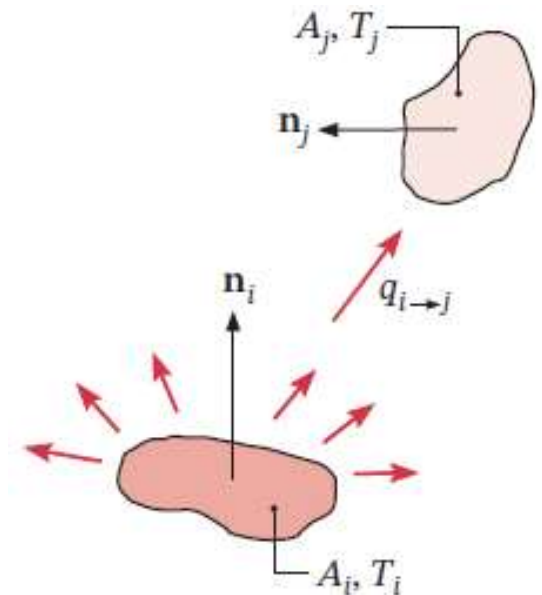
Fattore di vista

Quando si considera lo scambio termico radiativo tra **più di due superfici** a temperature diverse, è necessario introdurre i **fattori di vista** (o **fattori di forma**) che tengono conto della **disposizione geometrica relativa** di coppie di superfici (quanto una superficie i «vede» una superficie j).

Il fattore di vista F_{ij} è definito come la frazione della radiazione che lascia la superficie i che viene intercettata dalla superficie j :

$$F_{ij} = \frac{\dot{Q}_{i \rightarrow j}}{A_i J_i}$$

- $\dot{Q}_{i \rightarrow j}$ è il flusso radiativo [W/m^2] che lasciando la superficie i , viene intercettata dalla superficie j
- $J_i = E_i + G_{rif,i}$ [W/m^2] è il flusso radiativo che lascia la superficie i in tutte le direzioni (= potere emissivo E_i + irradianza riflessa $G_{rif,i}$)



Fattore di vista

I fattori di vista dipendono **esclusivamente** dalla **forma** e **disposizione geometrica** delle superfici e sono tipicamente tabellate per diverse configurazioni elementari di superfici 2D/3D.

