

TERMOLOGIA

È la scienza che studia i fenomeni chimico fisici connessi con una particolare forma di energia chiamata ENERGIA TERMICA o CALORE. In particolare si occupa:

- della produzione del calore;
- dei fenomeni connessi con la somministrazione o la sottrazione di calore;
- della trasmissione del calore.

↳ COMBUSTIONE E COMBUSTIBILI

La combustione è una reazione chimica tra una sostanza, i cui elementi possono combinarsi con l'ossigeno (COMBUSTIBILI) e una sostanza che contiene ossigeno (COMBURENTE).

Dal punto di vista industriale sono **combustibili tutte quelle sostanze che bruciano rapidamente producendo elevate quantità di calore**, mentre il comburente è costituito dall'ossigeno contenuto nell'aria, con percentuale in massa pari al 23,2%.

I combustibili di uso industriale devono avere anche altri requisiti: *grande disponibilità, basso costo, facilità di trasporto, facilità di smaltimento dei prodotti della combustione ed essere possibilmente poco inquinanti.*

In base allo stato di aggregazione sono classificati in

SOLIDI LIQUIDI GASSOSI

e sono costituiti, in percentuali variabili a seconda del tipo di combustibile, da CARBONIO (simbolo chimico **C**), IDROGENO (simbolo chimico **H**), ZOLFO (simbolo chimico **S**).

- Sono COMBUSTIBILI SOLIDI: carboni fossili (litantrace, antracite), carbone di legna, coke.
- Sono COMBUSTIBILI LIQUIDI: petrolio grezzo e tutti i suoi derivati (benzine, gasoli, nafta).
- Sono COMBUSTIBILI GASSOSI: metano, il più utilizzato e altri gas derivati dalla trasformazione di combustibili naturali.

Per potere bruciare, in modo completo, una data quantità di combustibile è necessario fornire per ognuno dei componenti del combustibile: carbonio, idrogeno e zolfo una quantità di ossigeno ben precisa. È noto dalla chimica che la quantità di ossigeno strettamente necessaria (QUANTITÀ STECHIOMETRICA), per ognuno dei componenti, assume i seguenti valori:

- per bruciare 1 kg di **C** sono necessari 2,67 kg di **O**
- per bruciare 1 kg di **H** sono necessari 8 kg di **O**
- per bruciare 1 kg di **S** sono necessari 1 kg di **O**

Pertanto, indicando con C, H, S le **percentuali in massa di tali elementi** contenuti in 1 kg di combustibile, la massa teorica di ossigeno $O_{TEORICA}$ necessaria per la completa combustione vale:

$O_{TEORICA} = 2,67 \cdot C + 8 \cdot H + 1 \cdot S - O^*$ dove O^* è la percentuale di ossigeno che eventualmente contiene il combustibile.

Nota la quantità teorica di ossigeno e ricordando che esso è contenuto nell'aria nella percentuale in massa del 23,2% (**ciò vuol dire che per ottenere 1 kg di ossigeno sono necessari $\frac{100}{23,2} = 4,31$ kg**

di aria), si calcola la QUANTITÀ TEORICA DI ARIA A_t^* , necessaria per bruciare 1 kg di combustibile:

$$A_t^* = \frac{100}{23,2} (2,67 \cdot C + 8 \cdot H + S - O^*) = 4,31 \cdot (2,67 \cdot C + 8 \cdot H + S - O^*) \left(\frac{kg_{ARIA}}{kg_{COMBUSTIBILE}} \right)$$

Spesso, anziché la massa teorica di aria, si utilizza il VOLUME TEORICO DI ARIA (alle condizioni di $t = 0^\circ C$ e $p = 101325$ Pa) detto POTERE COMBURIVORO A_t . In questo caso, ricordando che

$$\rho_{ARIA} = 1,293 \frac{kg}{m^3} \quad e \quad che \quad V = \frac{MASSA}{\rho} \quad si \quad ottiene$$

$$A_t = \frac{4,31}{1,293} \cdot (2,67 \cdot C + 8 \cdot H + S - O^*) = 3,33 \cdot (2,67 \cdot C + 8 \cdot H + S - O^*) \left(\frac{m^3}{kg_{COMB.}} \right) \quad POTERE \quad COMBURIVORO$$

Nella tecnica, la combustione avviene con un apporto di aria superiore a quella teorica e viene chiamata ARIA PRATICA A_p :

$$A_p = e \cdot A_t \quad \text{con } e > 1 \quad \text{COEFFICIENTE DI ECCESSO DI ARIA}$$

Il valore del coefficiente "e" varia in funzione del tipo di combustibile e il suo valore aumenta andando dai combustibili gassosi a quelli solidi, dove risulta più difficile l'intima mescolanza tra combustibile e comburente. Si danno i seguenti valori orientativi:

COMBUSTIBILE	coefficiente e	
SOLIDO	$2 \div 3$	Un esasperato eccesso di aria riduce la temperatura dei prodotti della combustione, peggiora lo scambio termico con le superfici cui devono cedere calore aumentando così le perdite allo scarico, cioè i fumi vengono scaricati a temperatura più elevata (PERDITA PER CALORE SENSIBILE NEI FUMI)
LIQUIDO	$1,3 \div 1,4$	
GASSOSO	$1,1 \div 1,2$	

Esercizi

1. Sulla griglia di un apparecchio di combustione si deve bruciare del carbon fossile (LITANTRACE), in pezzi da caricare a mano, della seguente composizione in massa: C = 85%, H = 5%, S = 2%, O* = 4%. Determinare il volume dell'aria pratica necessario per la completa combustione.

Si calcola il potere comburivo:

$$A_t = 3,33 \cdot (2,67 \cdot C + 8 \cdot H + S - O^*) = 3,33 \cdot (2,67 \cdot 0,85 + 8 \cdot 0,05 + 0,02 - 0,04) = 8,82 \frac{m^3}{kg_{COMB.}}$$

Da tabella: per **carbone caricato a mano** $e = 2 \div 1,8$, pertanto il VOLUME DELL'ARIA PRATICA

vale:

$$A_p = e \cdot A_t = 1,8 \cdot 8,82 \cong 15,88 \frac{m^3}{kg_{COMB.}}$$

2. Calcolare il valore dell'aria pratica per la combustione di 1 kg di nafta (gasolio medio) avente la seguente composizione: C = 86%, H = 11%, S = 3%,

Da tabella: per un **gasolio medio** $e = 1,3 \div 1,4$, pertanto il VOLUME DELL'ARIA PRATICA vale:

$$A_p = e \cdot A_t = 1,3 \cdot 3,33 \cdot (2,67 \cdot 0,86 + 8 \cdot 0,11 + 0,03) \cong 14 \frac{m^3}{kg_{COMB.}}$$

Altre importanti caratteristiche dei combustibili sono:

POTERE CALORIFICO (energia interna massica) | È la quantità di calore prodotta dalla combustione completa di 1 kg di combustibile solido o liquido, oppure di 1 m³ di combustibile gassoso allo stato normale, cioè alla temperatura $t = 0^\circ\text{C}$ e alla pressione $p = 101325 \text{ Pa}$.

Si distinguono:

POTERE CALORIFICO SUPERIORE (P.c.s.) | È la quantità di calore prodotta, considerando anche il calore di recupero della condensazione del vapor d'acqua contenuto nei prodotti della combustione (si forma per reazione tra H e O e in più per l'umidità del combustibile)

POTERE CALORIFICO INFERIORE (P.c.i.) | È la quantità di calore prodotta, senza tenere conto del calore recuperabile dalla condensazione del vapor d'acqua. Il P.c.i. è quello che si prende in considerazione nei calcoli tecnici; il suo valore dipende dalla composizione chimica del combustibile.

È l'energia termica utilizzabile che fornisce 1 kg di combustibile. Una relazione che permette di calcolare il POTERE CALORIFICO INFERIORE è la seguente (vedi manuale, pag. 581):

$$P.c.i. = 33,91 \cdot C + 120,35 \cdot \left(H - \frac{O^*}{8} \right) + 9,06 \cdot S - 2,5 \cdot U \left(\frac{MJ}{kg} \right) \quad \text{con } U = \text{umidità del combustibile}$$

Si riportano alcuni valori del P.c.i.

ANTRACITE:	P.c.i. = 32000 kJ/kg
BENZINA AUTO:	P.c.i. = 44000 kJ/kg
METANO:	P.c.i. = 35800 kJ/m ³

LA TEMPERATURA INIZIALE DI COMBUSTIONE	È la temperatura alla quale l'azione di una fiamma provoca l'accensione del combustibile.
LA TEMPERATURA D'IGNIZIONE	È la temperatura alla quale il combustibile si accende spontaneamente, in presenza di aria.

Esercizio

Al banco di prova, un motore a carburazione ha consumato un volume $V = 200 \text{ cm}^3$ di benzina nel tempo $t = 165 \text{ s}$, fornendo la potenza effettiva $P_e = 9,6 \text{ kW}$. Determinare il rendimento totale del motore sapendo che la benzina ha massa volumica $\rho = 0,73 \text{ kg/dm}^3$ e P.c.i. = 44000 kJ/kg .

Per definizione il rendimento vale: $\eta = \frac{P_{EFFETTIVA}}{P_{ASSORBITA}} = \frac{P_e}{P_a}$

Per definizione di potenza si ha: $P_{ASSORBITA} = \frac{ENERGIA_{ASSORBITA}}{\text{tempo}} = \frac{E_a}{t}$

L'energia assorbita dal motore, dovuta alla combustione della benzina, è di tipo termico, cioè calore **Q**. Sapendo quanto calore viene prodotto dalla combustione di 1 kg di benzina, cioè il P.c.i., si può determinare il calore prodotto dalla combustione del volume $V = 200 \text{ cm}^3$ di benzina. TALE VALORE È UGUALE ALL'ENERGIA ASSORBITA DAL MOTORE.

$$E_a = Q = M_{COMB.} \cdot P.c.i. = \rho_{COMB.} \cdot V_{COMB.} \cdot P.c.i. = 0,73 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} \times 0,2 \text{ dm}^3 \times 44000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 6424 \text{ kJ}$$

La potenza assorbita vale: $P_a = \frac{E_a}{t} = \frac{Q}{t} = \frac{6424 \text{ kJ}}{165 \text{ s}} = 38,93 \text{ kW}$

e il rendimento assume il valore $\eta = \frac{P_e}{P_a} = \frac{9,6 \text{ kW}}{38,93 \text{ kW}} = 0,24 \rightarrow \eta = 24\%$

↳ TEMPERATURA E CALORE

La sensazione di caldo o di freddo che si avverte toccando un corpo è una misura soggettiva di una grandezza chiamata TEMPERATURA. A livello molecolare è un indice dello stato di agitazione termica delle molecole o degli atomi costituenti il materiale del corpo.

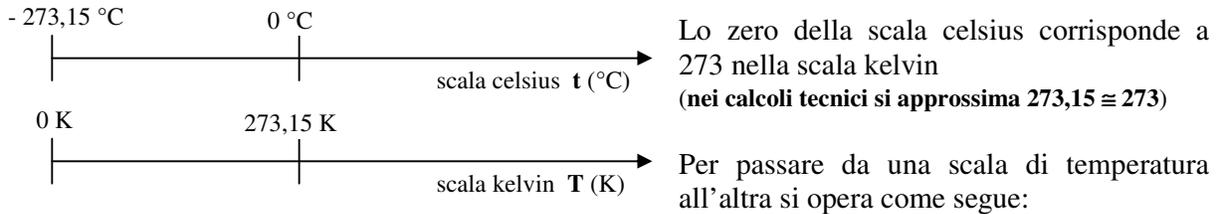
- Se il corpo è solido un aumento di temperatura comporta una **maggiore oscillazione degli atomi** intorno a delle posizioni di equilibrio, con conseguente aumento di volume del corpo (DILATAZIONE TERMICA).
- Se il corpo è gassoso un aumento di temperatura comporta un **aumento della velocità con cui gli atomi** si muovono, con conseguente aumento della loro energia cinetica.

Per la misura della temperatura si utilizzano i TERMOMETRI, che sfruttano, per il loro funzionamento, una proprietà del materiale (proprietà termometrica): ad esempio aumento di volume di un solido, o di un liquido, o di un gas, variazione di resistenza elettrica,

Per assegnare dei valori numerici alla temperatura si deve fissare una scala termometrica; queste vengono definite sfruttando le proprietà di certe sostanze, come, ad esempio i cambiamenti di stato.

- LA SCALA TERMOMETRICA CELSIUS (o CENTIGRADA) ha come valore **0** la temperatura del ghiaccio fondente di acqua distillata alla pressione atmosferica; ha come valore **100** la temperatura di ebollizione dell'acqua distillata alla pressione atmosferica. La CENTESIMA PARTE dell'intervallo di temperatura che definisce i due stati anzidetti è il GRADO CELSIUS ($^{\circ}\text{C}$).
- LA SCALA TERMOMETRICA ASSOLUTA o TERMODINAMICA ha come riferimento il PUNTO TRIPLO DELL'ACQUA ($t = 0,01^{\circ}\text{C}$, $p = 4,58 \text{ mmHg}$), cioè lo stato in cui coesistono contemporaneamente i tre possibili stati di aggregazione dell'acqua: solido, liquido, gassoso. Al punto triplo è stato assegnato il valore $273,16 \text{ K}$ ($\text{K} = \text{kelvin}$), mentre la differenza di temperatura tra il punto del ghiaccio e quello del vapore vale 100 K .

Le due scale di temperatura, da come sono state definite, differiscono solo per l'origine:



$$T = 273 + t \quad \text{esempio: } t = 20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ corrisponde a } T = 273 + 20 = 293 \text{ K}$$

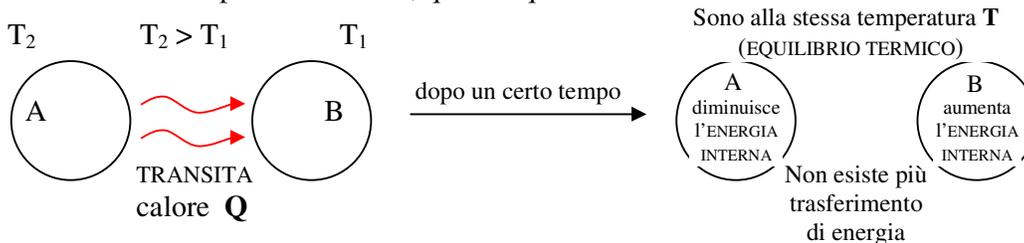
$$t = T - 273 \quad \text{esempio: } T = 300 \text{ K} \text{ corrisponde a } t = 300 - 273 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$$

Mentre una variazione (o differenza) di temperatura nelle due scale è uguale, poichè $1 \text{ }^\circ\text{C} = 1 \text{ K}$

Esempio: $\Delta t = t_2 - t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ con $\begin{cases} t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C} \\ t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$ a questa differenza corrisponde

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (273 + t_2) - (273 + t_1) = 273 + t_2 - 273 - t_1 = t_2 - t_1 \Rightarrow \Delta T = \Delta t$$

Il CALORE è quella **forma di energia che transita spontaneamente** da un corpo a temperatura maggiore a un altro a temperatura minore, quando questi sono in contatto termico.



Quando i due corpi assumono la **stessa temperatura** (EQUILIBRIO TERMICO) **cessa il trasferimento** di energia. Questa energia si chiama calore solo durante il trasferimento; quando il corpo l'ha ceduta/assorbita, questa fa diminuire/incrementare l'energia del corpo stesso (ENERGIA INTERNA).

Per definire l'unità di misura del calore trasferito si considera il sistema costituito da 1 kg d'acqua distillata alla temperatura di $14,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e alla pressione atmosferica. Il calore da trasferire all'acqua per fare aumentare di $1 \text{ }^\circ\text{C}$ la sua temperatura, mantenendo costante la pressione, è definita **KILOCALORIA**.

$Q = 1 \text{ kcal}$

$p = \text{costante}$

1 kg H_2O TEMPERATURA $14,5 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 15,5 \text{ }^\circ\text{C}$ **1 kcal = 4186 J**

Se a due sistemi diversi si trasferiscono uguali quantità di calore Q , si nota che i sistemi assumono una diversa temperatura (quindi **sono diversi gli effetti prodotti**); questa proprietà del sistema si chiama capacità termica C

$$C = \frac{\text{calore trasferito}}{\text{variazione di temperatura}} = \frac{Q}{T_2 - T_1} = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{Q}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{J}}{\text{K}} \equiv \frac{\text{J}}{^\circ\text{C}} \right)$$

Esempio: trasferendo con un accendino la stessa quantità di calore ad una pentola piena d'acqua e alla punta di un ago, gli effetti che ne risultano sono molto diversi

- la temperatura dell'acqua rimane pressoché costante
- la punta dell'ago diventa incandescente.

Questo perché sono diversi i materiali e diverse le masse dei due corpi.

Per potere confrontare capacità termiche di materiali diversi i corpi devono avere la stessa massa. La **capacità termica dell'unità di massa** (cioè riferita a **1 kg**) si chiama CAPACITÀ TERMICA MASSICA (o CALORE SPECIFICO) c

$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m \cdot (T_2 - T_1)} = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{Q}{m \cdot \Delta t} \quad \left(\frac{J}{kg \cdot K} \equiv \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right)$$

Quindi la **capacità termica massica** è la quantità di calore da fornire a un corpo di massa unitaria (1 kg) per elevare di 1 K (o di 1 °C) la sua temperatura.

Questa dipende dal materiale e dall'intervallo di temperatura e, nel **CASO DI GAS**, assume valori diversi a seconda del tipo di riscaldamento

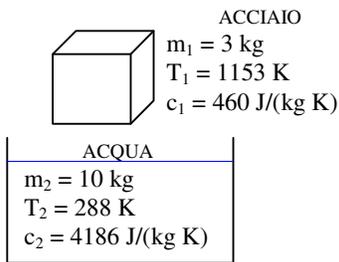
c_v CALORE SPECIFICO A VOLUME COSTANTE se il trasferimento del calore avviene senza variazione di volume del gas;

c_p CALORE SPECIFICO A PRESSIONE COSTANTE se il trasferimento del calore avviene senza variazione di pressione del gas;

$$c_p > c_v \quad \text{per i GAS,} \quad \text{mentre per i SOLIDI} \quad c_p \cong c_v = c$$

ESERCIZIO

Per temprare un pezzo d'acciaio di massa 3 kg, s'immerge in una vasca contenente 10 kg di acqua. La temperatura dell'acciaio è di 1153 K e quella dell'acqua 288 K. Determinare la temperatura del sistema acciaio + acqua.



Immergendo l'acciaio nell'acqua, questo trasferirà una certa quantità di calore che è uguale a quella assorbita dall'acqua (trascurando il calore assorbito dal recipiente che la contiene). Lo scambio termico cesserà quando le due sostanze avranno la stessa temperatura (equilibrio termico).

Chiamando con **T** la TEMPERATURA DEL SISTEMA ACCIAIO + ACQUA si può scrivere:

$$Q = c_1 \cdot m_1 \cdot (T_1 - T) \quad \text{CALORE CEDUTO DALL'ACCIAIO}$$

$$Q = c_2 \cdot m_2 \cdot (T - T_2) \quad \text{CALORE ASSORBITO DALL'ACQUA}$$

Essendo uguali i primi membri saranno uguali i secondi membri, pertanto

$$c_1 \cdot m_1 \cdot (T_1 - T) = c_2 \cdot m_2 \cdot (T - T_2) \quad \text{dove l'incognita è la temperatura } T$$

Sviluppando i prodotti, per elaborazione si calcola:

$$c_1 \cdot m_1 \cdot T_1 - c_1 \cdot m_1 \cdot T = c_2 \cdot m_2 \cdot T - c_2 \cdot m_2 \cdot T_2 \quad \text{mettendo a fattor comune } T$$

$$(c_2 \cdot m_2 + c_1 \cdot m_1) \cdot T = c_1 \cdot m_1 \cdot T_1 + c_2 \cdot m_2 \cdot T_2 \quad \text{da cui si calcola}$$

$$T = \frac{c_1 \cdot m_1 \cdot T_1 + c_2 \cdot m_2 \cdot T_2}{(c_2 \cdot m_2 + c_1 \cdot m_1)} = \frac{460 \times 3 \times 1153 + 4186 \times 10 \times 288}{4186 \times 10 + 460 \times 3} = 315,6 \text{ K} = 42,6^\circ \text{C}$$

↳ TRASMISSIONE DEL CALORE

S'intende il trasferimento di calore che avviene spontaneamente tra corpi che si trovano a diverse temperature, quindi il senso del **FLUSSO TERMICO (quantità di calore trasferito nell'unità di tempo: POTENZA TERMICA)** è sempre diretto dal corpo a temperatura maggiore a quello a temperatura minore.

La trasmissione del calore può avvenire in tre modi diversi:

- per **CONDUZIONE** quando il trasferimento di calore avviene senza trasporto di materia; è la forma tipica di trasmissione dei corpi solidi e dei liquidi in quiete.
- per **CONVEZIONE** quando il trasferimento di calore avviene mediante spostamento di materia (**fluidi in moto**); è tipica dei fluidi sia liquidi che gassosi.
- per **IRRAGGIAMENTO** quando il trasferimento di calore avviene mediante onde elettromagnetiche; è tipica di qualunque corpo sia solido, sia liquido.

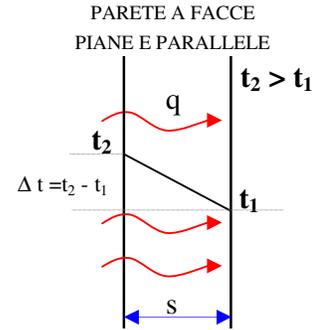
Le leggi che quantificano il valore del calore trasferito nei diversi modi sono note dalla fisica.

➤ *Trasmissione per conduzione*

Non essendoci spostamento di materia, il fenomeno avviene per trasferimento di energia cinetica da una molecola a quelle adiacenti. Infatti in uno stesso corpo solido, dove è maggiore la temperatura, è più grande il moto di agitazione delle molecole, quindi maggiore la loro energia cinetica. Queste molecole trasmettono per urto parte della loro energia a quelle adiacenti e così il fenomeno si propaga in tutto il corpo, fino a quando tutte le molecole avranno la stessa energia cinetica e quindi la stessa temperatura.

Nel campo tecnico interessa calcolare la **quantità di calore** che **nell'unità di tempo** (FLUSSO O POTENZA TERMICA) viene trasferita attraverso una parete le cui facce sono a diversa temperatura. Nel caso di **facce piane e parallele** e di **materiale omogeneo** vale la **LEGGE DI FOURIER**:

in REGIME STAZIONARIO, cioè con le temperature t_1 e t_2 delle facce che rimangono costanti nel tempo, il FLUSSO TERMICO q vale:



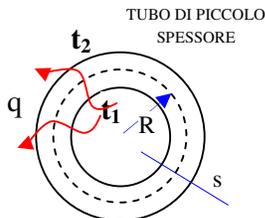
$$\frac{Q}{\tau} = q = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (t_2 - t_1) \text{ con } \left\{ \begin{array}{l} q \left[\frac{J}{s} = W \right] \text{ flusso o potenza termica} \\ \lambda \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \equiv \frac{W}{m \cdot K} \right] \text{ coefficiente di conducibilità o conduttività termica} \\ s [m] \text{ spessore della parete} \\ A [m^2] \text{ superficie di una delle facce} \\ \tau [s] \text{ tempo} \\ Q [J] \text{ il calore trasferito tra le due facce della parete} \end{array} \right.$$

Il **coefficiente di conducibilità termica** è una caratteristica dei materiali: i suoi valori sono tabellati nei manuali. Un materiale che ha un **grande valore** di λ si dice buon conduttore del calore (METALLI), mentre **piccoli valori** di λ sono caratteristici dei materiali coibenti (ISOLANTI TERMICI).

Fisicamente rappresenta il flusso termico che attraversa una parete di spessore 1 m, di superficie 1 m², quando la differenza di temperatura tra le sue facce è di 1 °C o di 1K.

Volendo calcolare la quantità di calore Q trasferita nel tempo τ basta fare: $Q = q \cdot \tau$ ($W \cdot s = J$)

La legge di Fourier è applicabile, con buona approssimazione, anche nel caso di pareti cilindriche di piccolo spessore (TUBI), purché il rapporto tra il suo spessore e il raggio medio risulti:



$$\frac{\text{spessore tubo}}{\text{raggio medio tubo}} = \frac{s}{R} \leq 10$$

In questo caso la superficie A è la *superficie cilindrica interna del tubo*.

Pertanto la legge di Fourier viene utilizzata per il calcolo dello scambio di calore attraverso le pareti delle caldaie o attraverso i tubi degli apparecchi sussidiari delle caldaie, come surriscaldatori ed economizzatori.

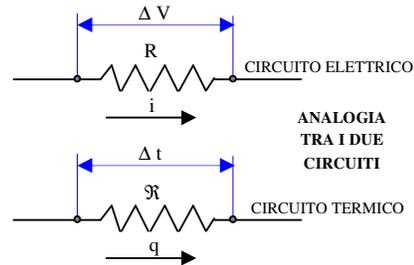
La legge di Fourier può essere scritta nel seguente modo:

$$q = \frac{\lambda \cdot A}{s} \cdot \Delta t \quad \text{formalmente equivalente alla legge di OHM} \quad i = \frac{1}{R} \cdot \Delta V$$

Dal confronto si nota che a $\frac{\lambda \cdot A}{s}$ corrisponde $\frac{1}{R}$ essendo R la RESISTENZA ELETTRICA

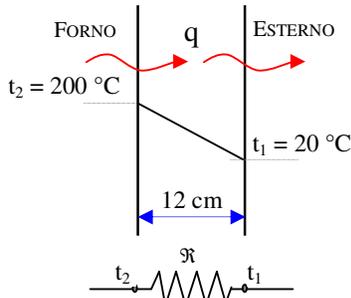
Il termine $\frac{s}{\lambda \cdot A} = \mathfrak{R} \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \equiv \frac{\text{K}}{\text{W}} \right]$ rappresenta la RESISTENZA TERMICA, per cui $q = \frac{1}{\mathfrak{R}} \cdot \Delta t$

Tale analogia torna utile quando si deve calcolare il flusso termico attraverso una parete multistrato (STRATI IN SERIE), cioè costituita da più strati di materiali diversi. Infatti così come si sommano le resistenze in serie di un circuito elettrico, così si sommano le resistenze termiche di una parete multistrato.



Esercizi

➤ Conduzione attraverso una parete semplice



Parete di un forno di mattoni comuni $\left(\lambda = 0,69 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right)$, di spessore 12 cm e superficie $A = 2 \text{ m}^2$.
Determinare il calore Q perso in 1 h attraverso la parete.

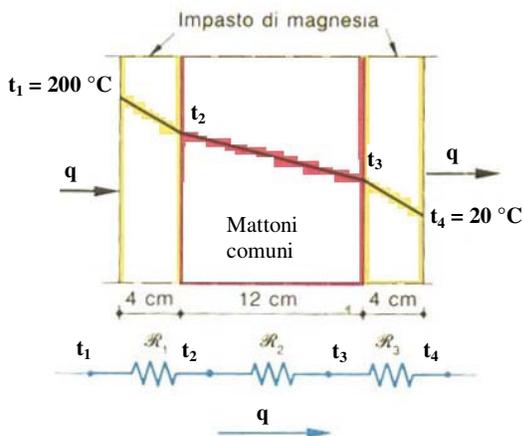
In **regime stazionario** le pareti rimangono a temperatura costante e il flusso termico che attraversa la parete vale:

$$q = \frac{\lambda \cdot A}{s} = \frac{1}{\mathfrak{R}} \cdot \Delta t = \frac{0,69 \times 2}{0,12} = \frac{1}{0,087} \times 180 = 2070 \text{ W}$$

Il calore trasferito attraverso la parete nel tempo $\tau = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ vale: $Q = q \cdot \tau = 2070 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 7452000 \text{ J} = 7452 \text{ kJ}$

➤ Conduzione attraverso una parete composta

I dati sono quelli dell'esercizio precedente, ma la parete del forno è coibentata con due strati d'impasto di magnesia di spessore 4 cm.



Impasto di magnesia: $\lambda_1 = 0,08 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ (a 200 °C)

Mattoni comuni: $\lambda_2 = 0,69 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

Impasto di magnesia: $\lambda_3 = 0,067 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ (a 20 °C)

La resistenza termica di tutti gli strati (RESISTENZE IN SERIE) vale: $\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3$

Ognuna delle resistenze termiche vale:

$$\mathfrak{R}_1 = \frac{s_1}{\lambda_1 \cdot A} = \frac{0,04}{0,08 \times 2} = 0,25 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$\mathfrak{R}_2 = \frac{s_2}{\lambda_2 \cdot A} = \frac{0,12}{0,69 \times 2} = 0,087 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$\mathfrak{R}_3 = \frac{s_3}{\lambda_3 \cdot A} = \frac{0,04}{0,067 \times 2} = 0,30 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$\mathfrak{R} = 0,637 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Pertanto il FLUSSO TERMICO, **costante per ognuno degli strati**, vale:

$$q = \frac{1}{\mathfrak{R}} \cdot \Delta t = \frac{1}{0,637} \times (200 - 20) = 282,6 \text{ W}$$

Il calore trasferito attraverso la parete multistrato nel tempo $\tau = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ vale:

$$Q = q \cdot \tau = 282,6 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 1017268 \text{ J} \cong 1017 \text{ kJ}$$

Il **calore disperso è molto più piccolo** (di circa 7 volte) per l'effetto coibentante dell'impasto di magnesia.

Calcoliamo anche i valori delle temperature negli strati intermedi. Dal momento che le pareti costituiscono un circuito termico con resistenze in serie, il flusso di calore q , che passa attraverso i vari strati, rimane sempre lo stesso. Per il **primo strato** (impasto di magnesia) si può scrivere:

$$q = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} \cdot \Delta t = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} \cdot (t_1 - t_2) \text{ da cui si calcola } (t_1 - t_2) = q \cdot \mathfrak{R}_1 = 282,6 \times 0,25 = 70,65^\circ\text{C}$$

$$t_2 = t_1 - 70,65 = 200 - 70,65 = 129,35^\circ\text{C}$$

Per il **secondo strato** (mattoni comuni) si può scrivere:

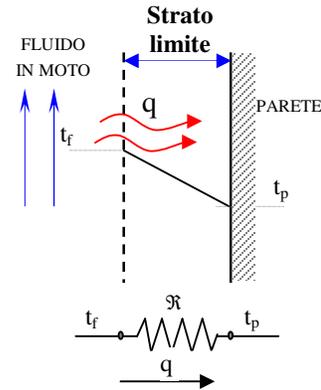
$$q = \frac{1}{\mathfrak{R}_2} \cdot \Delta t = \frac{1}{\mathfrak{R}_2} \cdot (t_2 - t_3) \text{ da cui si calcola } (t_2 - t_3) = q \cdot \mathfrak{R}_2 = 282,6 \times 0,087 = 24,59^\circ\text{C}$$

$$t_3 = t_2 - 24,59 = 129,35 - 24,59 = 104,76^\circ\text{C}$$

Come si può notare il salto di temperatura è tanto maggiore quanto più grande è la resistenza termica e cioè negli strati isolanti.

➤ *Trasmissione per convezione*

Il trasferimento di calore avviene tra un FLUIDO IN MOTO E UNA PARETE o viceversa; in ogni caso esiste uno **spostamento di materia**. Quando un fluido in moto lambisce una parete, in prossimità della stessa parete si ha una forte diminuzione della velocità del fluido, così da formare uno strato, detto STRATO LIMITE, che **costituisce una barriera al flusso di calore**. Questo fatto determina una notevole differenza di temperatura tra quella del fluido e quella della parete da esso lambita. Lo strato limite è tanto maggiore, quanto minore è la velocità del fluido.



Il FLUSSO TERMICO si calcola con la LEGGE DI NEWTON:

$$\frac{Q}{\tau} = q = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_p) \text{ con } \begin{cases} \alpha \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \equiv \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \text{ coefficiente di convezione dello strato limite} \\ t_f \text{ } (^\circ\text{C o K}) \text{ temperatura del fluido} \\ t_p \text{ } (^\circ\text{C o K}) \text{ temperatura della parete} \\ A \text{ } [\text{m}^2] \text{ superficie di scambio} \\ \tau \text{ } [\text{s}] \text{ tempo} \\ Q \text{ } [\text{J}] \text{ il calore trasferito dal fluido alla parete} \end{cases}$$

Anche in questo caso, per l'analogia elettrica si può scrivere:

$$q = \frac{1}{\mathfrak{R}} \cdot \Delta t \text{ con } \mathfrak{R} = \frac{1}{\alpha \cdot A} \left(\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \equiv \frac{\text{K}}{\text{W}} \right)$$

Il coefficiente di convezione α dipende dal tipo di fluido, dalla sua velocità, dalla geometria della parete e dalle sue proprietà termiche; inoltre assume valori diversi a seconda che la convezione è libera o forzata.

Valori indicativi del coefficiente di convezione sono:

CONVEZIONE LIBERA DI ARIA: $\alpha = 5 \div 30 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

CONVEZIONE FORZATA DI ARIA: $\alpha = 30 \div 300 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

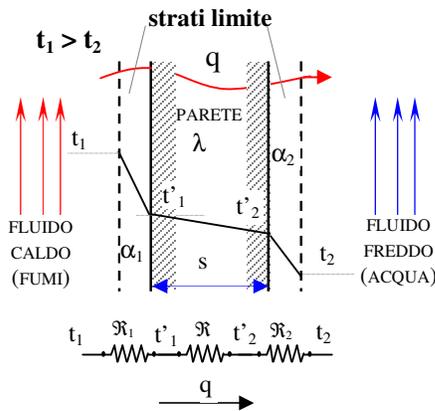
CONVEZIONE FORZATA DI ACQUA: $\alpha = 300 \div 11000 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Il valore di tale coefficiente aumenta all'aumentare della velocità del fluido che lambisce la parete.

➤ *Trasmissione tra due fluidi separati da una parete solida*

È il caso di maggior interesse nelle applicazioni tecniche. La trasmissione del calore tra fluido caldo a temperatura t_1 e fluido freddo a temperatura t_2 si realizza:

- per CONVEZIONE (coefficiente di convezione α_1) tra fluido caldo e parete
- per CONDUZIONE (coefficiente di conduzione λ) all'interno della parete
- per CONVEZIONE (coefficiente di convezione α_2) tra parete e fluido freddo



Il flusso termico q che attraversa gli strati limite e la parete (RESISTENZE IN SERIE) è sempre lo stesso.

La resistenza termica totale è la somma delle singole

resistenze: $\mathfrak{R}_1 = \frac{1}{\alpha_1 \cdot A}$ $\mathfrak{R} = \frac{s}{\lambda \cdot A}$ $\mathfrak{R}_2 = \frac{1}{\alpha_2 \cdot A}$

$$\mathfrak{R}_{TOT.} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot A} + \frac{s}{\lambda \cdot A} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot A} = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{K}$$

dove $K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}$ COEFFICIENTE DI TRASMISSIONE TOTALE o **TRASMITTANZA**

Pertanto, per l'analogia elettrica, il FLUSSO TERMICO vale:

$$\frac{Q}{\tau} = q = \frac{1}{\mathfrak{R}_{TOT.}} \cdot \Delta t = K \cdot A \cdot \Delta t = K \cdot A \cdot (t_1 - t_2) \quad [W]$$

Il valore della TRASMITTANZA K è **fortemente influenzato** dal valore più piccolo tra i coefficienti di convezione degli strati limite e ne assume valori all'incirca uguali.

Così, ad esempio, nel caso di trasmissione di calore tra fumi (FLUIDO CALDO $\alpha_1 = 40 \frac{W}{m^2 \cdot K}$) e acqua (FLUIDO FREDDO $\alpha_2 = 5000 \frac{W}{m^2 \cdot K}$) circolante in un tubo (PARETE $\lambda = 40 \frac{W}{m \cdot K}$) in acciaio di spessore $s = 5$ mm, si calcola:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{40} + \frac{0,005}{40} + \frac{1}{5000}} \cong 39,5 \frac{W}{m^2 \cdot K} \approx \alpha_1$$

Il basso valore del coefficiente di convezione α_1 fa sì che la parete a contatto con i fumi ($\cong 1500$ °C) abbia una temperatura notevolmente inferiore a quella dei fumi (PRODOTTI DELLA COMBUSTIONE).

I **valori pratici della trasmittanza K** sono tabellati in funzione del tipo di applicazione: caldaie, condensatori, radiatori per riscaldamento, e in funzione di temperatura e velocità sia del fluido riscaldante sia di quello riscaldato.

Quando la parete che separa i due fluidi è multistrato, la TRASMITTANZA si calcola con la seguente

relazione generale:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

essendo s_i lo spessore dello strato i -esimo e λ_i il relativo coefficiente di conduzione del materiale dello strato i -esimo.

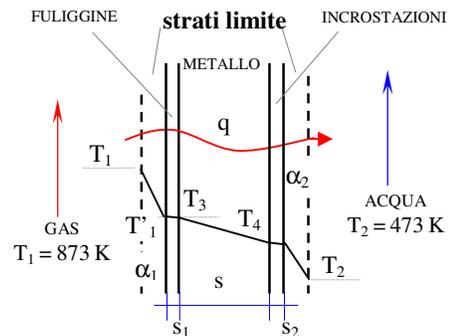
Esercizio

Una parete metallica ($s = 1 \text{ cm}$, $\lambda = 50 \frac{W}{m \cdot K}$) è lambita su una faccia da gas di combustione ($T_1 = 873 \text{ K}$), che ha depositato uno strato di fuliggine ($s_1 = 1 \text{ mm}$, $\lambda_1 = 0,1 \frac{W}{m \cdot K}$). L'altra faccia è a contatto con acqua ($T_2 = 473 \text{ K}$) che formato uno strato d'incrostazioni ($s_2 = 2 \text{ mm}$, $\lambda_2 = 1,2 \frac{W}{m \cdot K}$).

Considerando i coefficienti di convezione degli strati limite

$$\alpha_1 = 40 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{e} \quad \alpha_2 = 5000 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{si valutino:}$$

- il FLUSSO TERMICO q per unità di superficie ($A = 1 \text{ m}^2$)
- la TEMPERATURA della faccia della parete metallica T_3 dalla parte dei fumi.



$$q = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \Rightarrow \frac{q}{A} = K \cdot (T_1 - T_2) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \text{FLUSSO TERMICO PER UNITÀ DI SUPERFICIE}$$

dove

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{40} + \left(\frac{0,001}{0,1} + \frac{0,01}{50} + \frac{0,002}{1,2} \right) + \frac{1}{5000}} = 27 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Per una superficie unitaria $A = 1 \text{ m}^2$, si calcola:

$$\frac{q}{A} = q = K \cdot (T_1 - T_2) = 27 \times (873 - 473) = 10800 \frac{W}{m^2}$$

Il FLUSSO TERMICO q che attraversa ogni strato è costante:

- per lo **strato limite** (LATO GAS) si può scrivere ($A = 1 \text{ m}^2$)

$$q = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} \cdot (T_1 - T_1') \quad \text{da cui si calcola} \quad (T_1 - T_1') = q \cdot \mathfrak{R}_1 = q \cdot \frac{1}{\alpha_1} = 10800 \times \frac{1}{40} = 270 \text{ K}$$

$$T_1' = T_1 - 270 = 873 - 270 = 603 \text{ K}$$

- per lo **strato di fuliggine** si può scrivere ($A = 1 \text{ m}^2$)

$$q = \frac{1}{\mathfrak{R}_{s_1}} \cdot (T_1' - T_3) \quad \text{da cui si calcola} \quad (T_1' - T_3) = q \cdot \mathfrak{R}_{s_1} = q \cdot \frac{s_1}{\lambda_1} = 10800 \times \frac{0,001}{0,1} = 108 \text{ K}$$

$$T_3 = T_1' - 108 = 603 - 108 = 495 \text{ K} = 222 \text{ }^\circ\text{C}$$