

TERMOCINETICA

TRASMISSIONE DEL CALORE

Il calore è una forma di energia che si trasferisce **spontaneamente** da un corpo a temperatura più alta verso uno a temperatura più bassa. Questo trasferimento continua fino al raggiungimento dell'equilibrio termico.

Nell'ambito dell'edilizia e della fisica tecnica, comprendere come avvenga questo trasferimento è essenziale per:

- migliorare l'efficienza energetica degli edifici;
- ridurre le dispersioni termiche;
- progettare ambienti termicamente confortevoli.

La trasmissione del calore può avvenire attraverso **tre meccanismi distinti**, che dipendono dallo stato fisico del mezzo (solido, liquido o gassoso) e dalle condizioni di contatto tra i corpi.

MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

1. Conduzione

È il meccanismo che avviene nei **solidi**, senza trasporto macroscopico di materia. Il calore si trasmette per effetto delle **collisioni molecolari** tra particelle vicine.

Più alta è la **conduttività termica** del materiale, più rapidamente avviene il trasferimento.

La legge che descrive la conduzione è la **legge di Fourier**, nella sua forma semplificata unidimensionale:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

dove:

- \dot{q} è il flusso termico specifico (W/m^2);
- λ è la conduttività termica ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$);
- dT/dx è il gradiente di temperatura lungo lo spessore del materiale.

2. Convezione

È il trasferimento di calore che avviene nei **fluidi** (liquidi o gas), dove il **moto del fluido stesso** contribuisce al trasporto energetico. Si distingue in:

- **convezione naturale**, se causata da differenze di densità (aria calda che sale);
- **convezione forzata**, se indotta da ventilatori, pompe, vento, ecc.

La legge che descrive il flusso convettivo è:

$$\dot{q} = h \cdot (T_s - T_f)$$

dove:

- h è il coefficiente di scambio termico convettivo ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);
- T_s è la temperatura della superficie;
- T_f è la temperatura del fluido.

3. Irraggiamento

È il trasferimento di calore che avviene tramite **onde elettromagnetiche**, anche nel **vuoto**. È il meccanismo con cui il Sole trasmette energia alla Terra. Tutti i corpi emettono radiazione in funzione della loro temperatura.

La legge fondamentale è la **legge di Stefan-Boltzmann**:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

dove:

- ε è l'emissività del materiale (da 0 a 1);
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$);
- T è la temperatura assoluta in kelvin.

CONDUZIONE NEL SOLIDO E RESISTENZA TERMICA

Nel caso di un **solido omogeneo**, il calore si propaga **per conduzione** lungo lo spessore del materiale, in assenza di moto della materia. Per studiare questo fenomeno, si fa riferimento alla **legge di Fourier**, che descrive la quantità di calore trasmessa in funzione del gradiente termico.

FLUSSO TERMICO

Il flusso termico specifico, ovvero la quantità di calore che attraversa unità di superficie e di tempo, si calcola con:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

Se la distribuzione di temperatura è lineare (condizione valida per materiali omogenei e isotropi), si può usare la forma semplificata:

$$\dot{q} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{s}$$

dove:

- \dot{q} è il flusso termico specifico (W/m^2);
- λ è la conduttività termica del materiale ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$);
- ΔT è la differenza di temperatura tra le due superfici;
- s è lo spessore del materiale attraversato (m).

RESISTENZA TERMICA

Per facilitare il calcolo dei flussi termici nei materiali, si introduce il concetto di **resistenza termica**, analogo alla resistenza elettrica.

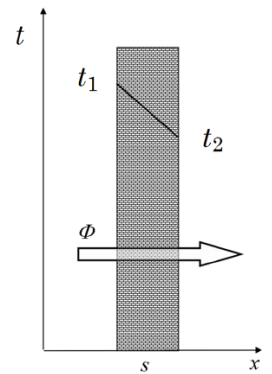
La resistenza termica di uno strato omogeneo è data da:

$$R = \frac{s}{\lambda}$$

Il flusso termico può quindi essere espresso come:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R}$$

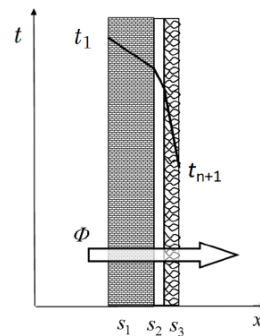
Questa forma è particolarmente utile quando si devono calcolare **flussi termici complessivi** attraverso pareti multistrato o sistemi più complessi.



PARETI MULTISTRATO IN SERIE

Quando una parete è costituita da **più strati di materiali differenti**, ciascuno con diversa conduttività e spessore, il calore attraversa ogni strato **in successione**, generando un flusso termico comune ma con **cadute di temperatura progressive**.

In questi casi, si può considerare che ogni strato abbia una **resistenza termica propria**, e si applica un'**analogia elettrica**: come in un circuito con resistenze in serie, anche qui la **resistenza termica totale** è la somma delle resistenze parziali.



FORMULA DELLA RESISTENZA TERMICA TOTALE

Per una parete con n strati:

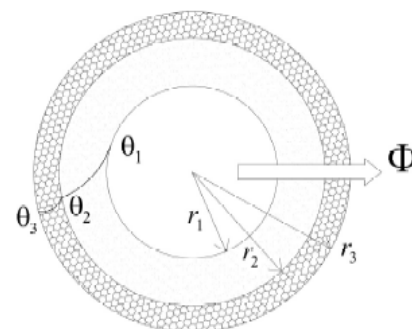
$$R_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}$$

dove:

- s_i è lo spessore dello strato i -esimo;
- λ_i è la sua conduttività termica.

Il flusso termico risultante è:

$$\dot{q} = \frac{\Delta T}{R_{\text{tot}}}$$

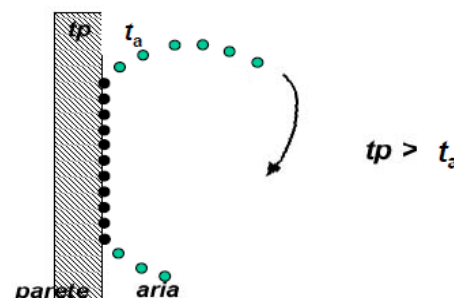


Poiché il **flusso è lo stesso in tutti gli strati**, le **cadute di temperatura** variano da uno strato all'altro in base alla resistenza di ciascuno. Lo strato più isolante avrà il salto termico più marcato.

CONVEZIONE TERMICA

La **convezione** è un meccanismo di trasmissione del calore tipico dei **fluidi** (gas o liquidi), dove il calore si trasferisce **insieme al moto del fluido stesso**.

Avviene ogni volta che una superficie solida è a contatto con un fluido a temperatura diversa.



Le tipologie di convezione sono:

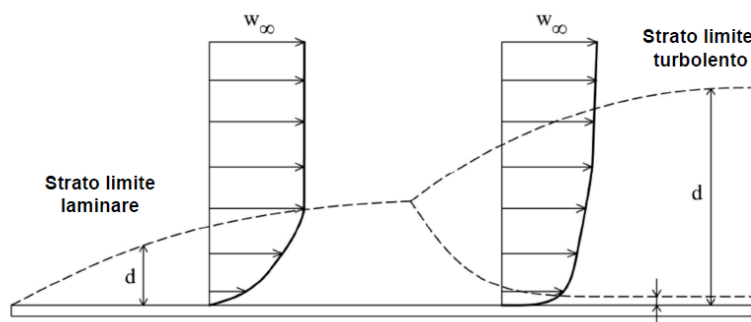
- **naturale**: causata da differenze di densità all'interno del fluido (es. aria calda che sale);
- **forzata**: generata da un moto imposto esternamente, come ventilatori, pompe o vento.

MECCANISMO FISICO

Quando un fluido a temperatura diversa lambisce una superficie, si genera un **gradiente termico locale**. Tuttavia, il fluido **non entra in contatto diretto** con la superficie con tutta la sua massa: a causa della viscosità, **la velocità del fluido è zero proprio sulla superficie**.

Questo porta alla formazione di uno **strato limite**, ossia una sottile fascia del fluido in cui la velocità passa da zero (a contatto con la parete) al valore della corrente principale.

All'interno di questo **strato limite** avviene anche la **transizione di temperatura**: il calore si trasmette dalla superficie al fluido (o viceversa) **prima per conduzione**, e poi si propaga nel fluido grazie al suo movimento.



FLUSSO CONVETTIVO

Il flusso termico per convezione si calcola con la legge empirica:

$$\dot{q} = h \cdot (T_s - T_f)$$

dove:

- h è il coefficiente di scambio termico convettivo ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$);
- T_s è la temperatura della superficie solida;
- T_f è la temperatura del fluido.

COEFFICIENTE CONVETTIVO h

Il coefficiente h **non è una proprietà del materiale**, ma **dipende fortemente dalle condizioni** del sistema:

- natura e velocità del fluido;
- tipo di convezione (naturale o forzata);
- orientamento della superficie (verticale, orizzontale, inclinata);
- presenza di turbolenze, rugosità, e discontinuità geometriche.

Più il moto è veloce e turbolento, **più alto è il valore di h**.

RESISTENZA TERMICA SUPERFICIALE

Per facilitare il calcolo, si introduce la **resistenza termica superficiale**, definita come:

$$R_s = \frac{1}{h}$$

Essa dipende da:

- tipo di fluido (aria, acqua, ecc.);
- direzione del flusso (su, giù, orizzontale);
- rugosità e geometria della superficie.

VALORI CONVENZIONALI

I valori di h possono variare molto, ma in edilizia si utilizzano delle **valori standardizzati** (medi) per semplificare i calcoli:

Situazione	h (W/m ² ·K)
aria ferma (convezione naturale)	2 – 5
aria in moto (convezione forzata)	10 – 100
liquidi in convezione naturale	100 – 1000
acqua in moto forzato (scambiatori)	1000 – 10000

Per l'aria a temperatura ambiente, in condizioni standard:

- superficie interna verticale: $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
- superficie esterna verticale: $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Questi valori sono indicati dalle norme tecniche e si usano per i calcoli semplificati della trasmittanza U.

Il valore della resistenza superficiale cambia anche in base alla **posizione della superficie**:

- **soffitto (flusso verso l'alto)** → convezione ostacolata → resistenza più alta;
- **pavimento (flusso verso il basso)** → convezione favorita → resistenza più bassa.

Applicazione	h_c [W/(m²K)]
Aria, in convezione naturale	1-20
Aria, in convezione forzata	40-250
Vapore d'acqua surriscaldata	25-100
Liquidi organici a bassa viscosità in convezione naturale	80-200
Liquidi organici a bassa viscosità in convezione forzata	300-4000
Oli minerali in convezione forzata	100-1000
Acqua in convezione naturale	250-750
Acqua in convezione forzata	1000-12000
Vapori organici, condensazione	1200-2400
Acqua, ebollizione	1800-45000
Vapore d'acqua, condensazione a film	5000-20000
Vapore d'acqua, condensazione a gocce	25000-100000

Tipo di convezione	Superficie		Flusso	Validità	Formula
	Forma	Inclinazione			
Forzata	Piana	Verticale		$5 \leq w_\infty < 30$ m/s	$h_c = 7,34 \cdot w_\infty^{0,8}$
				$w_\infty < 5$ m/s	$h_c = 5,62 + 0,69 \cdot w_\infty$
Naturale	Piana	Verticale		$Gr < 10^9$	$h_c = 1,37 \cdot (\Delta t/L)^{0,25}$
				$Gr \geq 10^9$	$h_c = 1,75 \cdot (\Delta t)^{0,33}$
		Orizzontale	Ascendente	$Gr < 10^9$	$h_c = 1,40 \cdot (\Delta t/L)^{0,25}$
				$Gr \geq 10^9$	$h_c = 1,88 \cdot (\Delta t)^{0,33}$
			Discendente	$Gr < 10^9$	$h_c = 0,70 \cdot (\Delta t/L)^{0,25}$
	Intercapedine	Verticale		$\Delta t \cdot H^3 \leq 10^{-5}$	$h_c = 0,025/H$
				$10^{-5} < \Delta t \cdot H^3 \leq 2 \cdot 10^{-3}$	$h_c = 0,51 \cdot (\Delta t/H)^{0,25} (L/H)^{0,11}$
				$\Delta t \cdot H^3 > 2 \cdot 10^{-3}$	$h_c = 0,96 \cdot (\Delta t)^{0,33} (L/H)^{0,11}$
		Orizzontale		$\Delta t \cdot H^3 \leq 10^{-5}$	$h_c = 0,025/H$
				$10^{-5} < \Delta t \cdot H^3 \leq 2 \cdot 10^{-3}$	$h_c = 0,55 \cdot (\Delta t/H)^{0,25}$
				$\Delta t \cdot H^3 > 2 \cdot 10^{-3}$	$h_c = 1,01 \cdot (\Delta t)^{0,33}$

IRRAGGIAMENTO TERMICO

L'irraggiamento è una forma di trasmissione del calore che **non richiede un mezzo materiale** per propagarsi: può avvenire **anche nel vuoto**.

Si basa sull'**emissione di energia sotto forma di onde elettromagnetiche** da parte di tutti i corpi aventi temperatura superiore allo zero assoluto (0 K).

Tutti i corpi **emettono** e **assorbono** radiazione termica, con quantità e caratteristiche che dipendono dalla **temperatura** e dalla **natura del materiale**.

LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN

L'emissione totale di energia da parte di una **superficie ideale (corpo nero)** si calcola con:

$$E = \sigma \cdot T^4$$

dove:

- E è la potenza emessa per unità di area (W/m^2);
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$$

- T è la temperatura assoluta in kelvin.

CORPI REALI E CORPO NERO

Il **corpo nero** è un modello ideale che **assorbe tutta la radiazione incidente** su di esso, e che **emette la massima quantità** di energia possibile per una data temperatura.

I **corpi reali**, invece, non si comportano così: per tener conto della loro efficienza emissiva si introduce il parametro **emissività** ε , che varia da 0 a 1:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

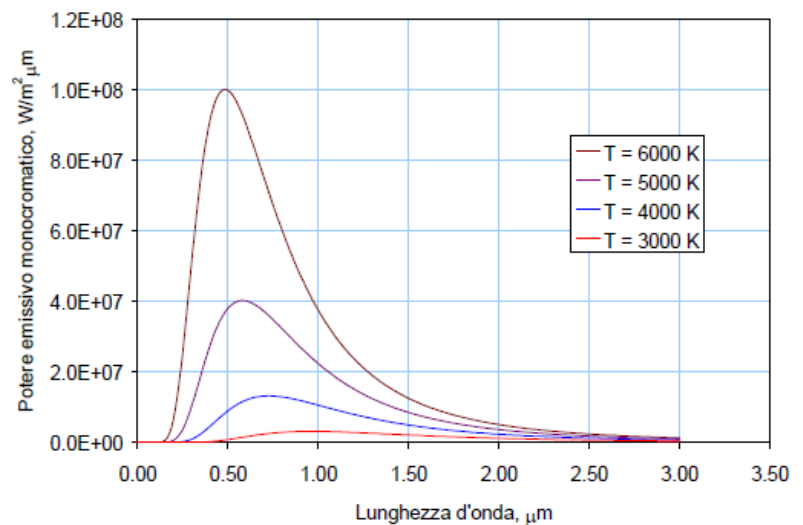
- un **corpo grigio** ha ε costante per tutte le lunghezze d'onda;
- un **corpo selettivo** ha ε variabile (es. vetri basso-emissivi).

SPETTRO E DISTRIBUZIONE DELLA RADIAZIONE

L'energia emessa non è distribuita uniformemente su tutte le lunghezze d'onda:

secondo la **legge di Planck**, la radiazione emessa ha uno spettro caratteristico che dipende dalla temperatura.

All'aumentare della temperatura, **la lunghezza d'onda della massima emissione si sposta verso valori più corti** (legge di Wien).



$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{costante} \quad (\text{legge di Wien})$$

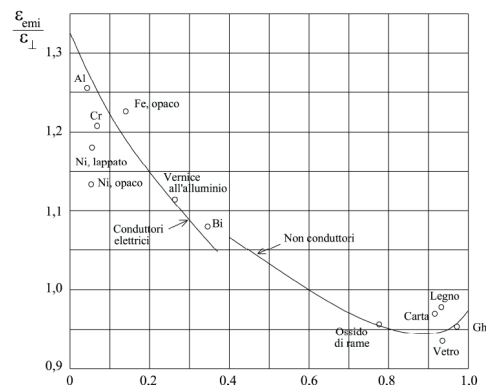
SCAMBIO RADIATIVO TRA SUPERFICI

Quando due superfici si “vedono” (cioè hanno **visibilità reciproca**), si genera uno scambio radiativo netto dato da:

$$\dot{q} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \cdot F_{1 \rightarrow 2} \cdot A_1 \cdot \varepsilon_{\text{eff}}$$

dove:

- T_1, T_2 sono le temperature assolute delle superfici;
- A_1 è l'area emittente;
- $F_{1 \rightarrow 2}$ è il **fattore di forma** (o vista), che quantifica quanta radiazione emessa da 1 arriva su 2;
- ε_{eff} è un coefficiente che tiene conto dell'emissività reciproca.



ASSORBIMENTO, RIFLESSIONE, TRASMISSIONE

Quando una radiazione colpisce una superficie, essa può:

- essere **assorbita** (coefficiente α);
- essere **riflessa** (coefficiente ρ);
- essere **trasmessa** (coefficiente τ).

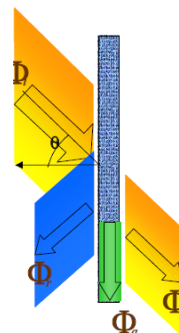
La somma deve essere sempre:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

IRRAGGIAMENTO SOLARE

Il Sole emette una radiazione molto intensa, con uno spettro che copre:

- **ultravioletto** (~7%);
- **visibile** (~46%);
- **infrarosso** (~47%).



L'irraggiamento solare che arriva sulla Terra si misura in:

- **irradianza**: potenza per unità di area ricevuta →

$$G = \frac{\text{potenza}}{\text{superficie}}$$

- **valori tipici**:
 - radiazione solare diretta massima (al suolo): circa 1000 W/m²;
 - radiazione media su superficie inclinata: 150–250 W/m² (invernale) e 300–600 W/m² (estiva).

Le superfici scure e opache **assorbono molto** (alte α , basse ρ); le superfici chiare o riflettenti (es. alluminio) **riflettono la maggior parte** della radiazione solare.

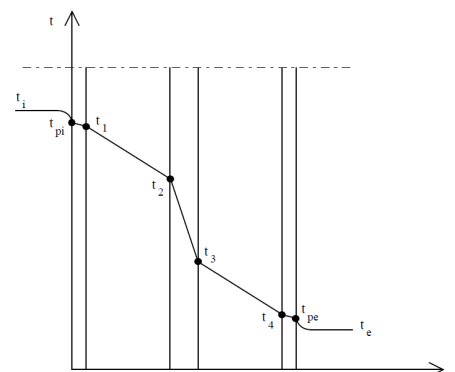
TRASMISSIONE DEL CALORE IN REGIME STAZIONARIO

In regime stazionario, le **temperature non variano nel tempo**, e i **flussi termici sono costanti**. Questo è il caso più comune considerato nei calcoli edilizi semplificati.

BILANCIO TERMICO ATTRAVERSO UN ELEMENTO EDILIZIO

Un elemento edilizio opaco (come una parete) è soggetto a diverse modalità di scambio:

- **irraggiamento solare** sulla superficie esterna;
- **convezione** con l'aria esterna;
- **conduzione** attraverso la stratigrafia del materiale;
- **convezione** con l'aria interna;
- **irraggiamento** tra le superfici interne.



FLUSSO TERMICO NETTO

Il flusso termico netto che attraversa una parete si può calcolare con:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

dove:

- U è il coefficiente globale di trasmissione termica (W/m²·K);
- A è la superficie della parete (m²);
- T_i è la temperatura interna (°C o K);
- T_e è la temperatura esterna (°C o K).

SUPERFICI TRASPARENTI

Per elementi **trasparenti** (es. vetri), si tiene anche conto di:

- **trasmissione termica U**;
- **fattore solare g**, che rappresenta **la quota di radiazione solare che penetra all'interno**, somma di:
 - componente **trasmessa direttamente**;
 - componente **assorbita + riemessa** verso l'interno.

BILANCIO ENERGETICO SEMPLIFICATO

Nella progettazione edilizia, si considerano i **flussi in entrata e in uscita** per ciascun componente dell'involucro.

Questo bilancio consente di valutare:

- il fabbisogno termico per il riscaldamento;
- il contributo gratuito dell'irraggiamento solare;
- le dispersioni per trasmissione.

PARETE MONOSTRATO OMOGENEA

È una parete composta da **un solo materiale**, con proprietà costanti e uniforme lungo tutto lo spessore.

Il flusso termico per unità di area è dato da:

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

dove:

- t_i, t_e sono le temperature dell'aria interna ed esterna [$^{\circ}\text{C}$];
- h_i, h_e sono i coefficienti di scambio termico superficiale interno ed esterno [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$];
- s è lo spessore della parete [m];
- λ è la conducibilità termica del materiale [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$].

PARETE MULTISTRATO

Nel caso di una parete composta da più materiali diversi (es. isolante + mattone), il flusso si calcola considerando tutte le **resistenze termiche in serie**:

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{t_i - t_e}{\frac{1}{h_i} + \sum_{j=1}^n \frac{s_j}{\lambda_j} + \sum_{j=1}^m R_j + \frac{1}{h_e}}$$

dove:

- n è il numero di strati omogenei (conducibilità definita);
- m è il numero di strati non omogenei o con intercapedini;
- s_j/λ_j è la resistenza termica del materiale j -esimo omogeneo;
- R_j è la resistenza termica fornita da materiali non omogenei o intercapedini.

TRASMISSIONE COMBINATA: CONDUZIONE + CONVEZIONE + IRRAGGIAMENTO

Quando una parete **separa due ambienti a temperature diverse**, il calore si trasferisce attraverso **tutti e tre i meccanismi**:

1. **conduzione** all'interno della parete (solida);
2. **convezione** sulla superficie interna ed esterna a contatto con l'aria;
3. **irraggiamento** tra le superfici interne/esterne e l'ambiente circostante.

La trasmissione complessiva è rappresentata così:

- all'esterno: **convezione + irraggiamento** con l'aria e il cielo;
- all'interno: **convezione + irraggiamento** tra le superfici edilizie;
- attraverso la parete: **conduzione pura** (se monolitica), oppure **resistenze in serie** (se multistrato).

Questa composizione completa rappresenta il modello energetico reale del comportamento delle chiusure opache negli edifici.

