



# Capitolo 15

## Trasmissione del calore: modalità, equazioni e bilanci energetici

# Obiettivi del capitolo

- L'obiettivo di questo capitolo è di gettare le basi comuni tra le modalità di scambio termico per conduzione (Capitolo 16), convezione (Capitolo 17) e irraggiamento (Capitolo 18)
- Verranno illustrati i concetti fondamentali e i principi che governano i processi di trasmissione del calore
- In seguito si illustrerà come risolvere i problemi relativi ai sistemi termici in ambito ingegneristico

# Sommario

- Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni
- Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore
- Bilancio energetico superficiale

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

La **trasmissione del calore** è il trasferimento di energia che ha luogo a causa di una differenza di temperatura

Ci si riferisce ai vari tipi di processi di trasmissione del calore come modalità, che nel seguito saranno indicate come: **conduzione**, **convezione** e **irraggiamento**

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Conduzione

Il **termine conduzione** indica lo scambio di calore che ha luogo attraverso il mezzo in quiete, solido o fluido, quando è presente un **gradiente di temperatura**

Meccanismo: le attività atomiche e molecolare generano e sostengono gli scambi di energia che avvengono dalle molecole dotate di maggior energia a quelle dotate di minor energia, tramite interazioni tra le particelle.

In presenza di un gradiente di temperatura lo scambio di energia per conduzione avviene nel verso **decrescente della temperatura**.

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

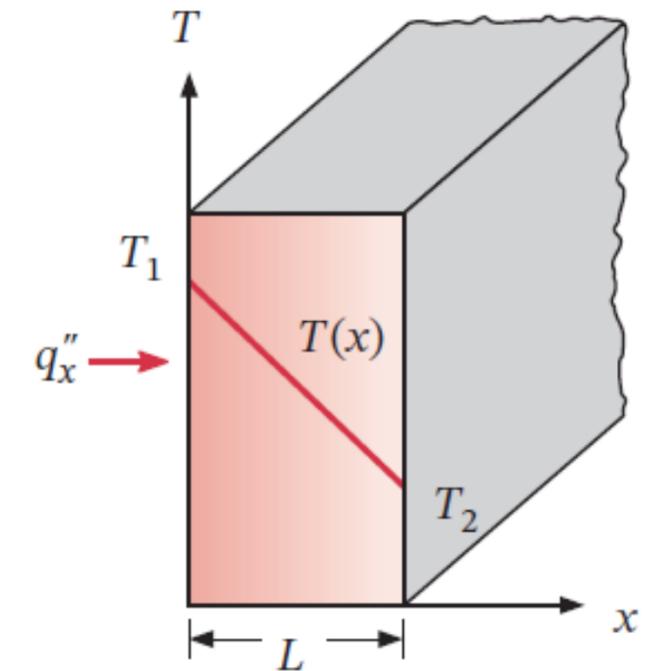
## Conduzione

Per la conduzione termica, l'equazione fondamentale è nota come **legge di Fourier**. Per una piastra piana monodimensionale, con una distribuzione di temperatura  $T(x)$ , tale relazione è espressa come:

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

$q_x''$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) = il calore scambiato nell'unità di tempo nella direzione  $x$  per unità di superficie perpendicolare alla direzione di trasferimento

$\lambda$  è la **conduttività termica** ( $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )

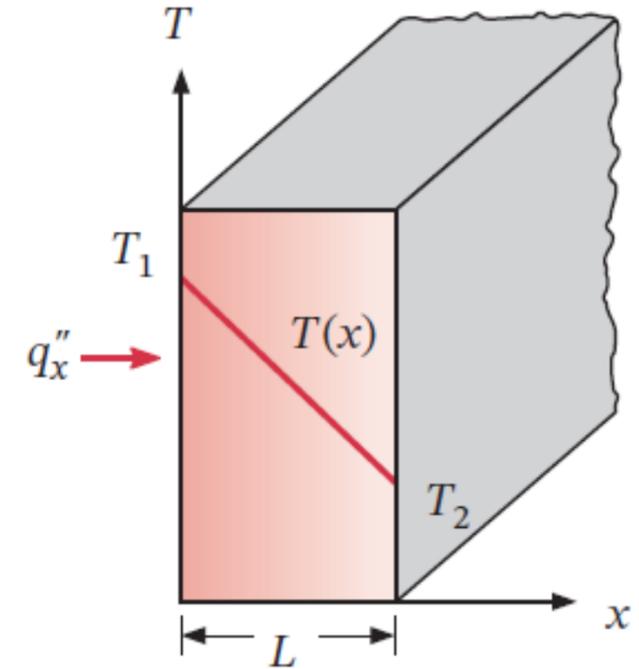


# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Conduzione

In **condizioni stazionarie** e **distribuzione di temperatura lineare**, il **gradiente di temperatura** e il **flusso termico** possono essere espressi come:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad q_x'' = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{L}$$



**Densità di flusso termico** (o, più semplicemente **flusso termico**) ovvero la quantità di calore scambiata nell'unità di tempo per unità di superficie

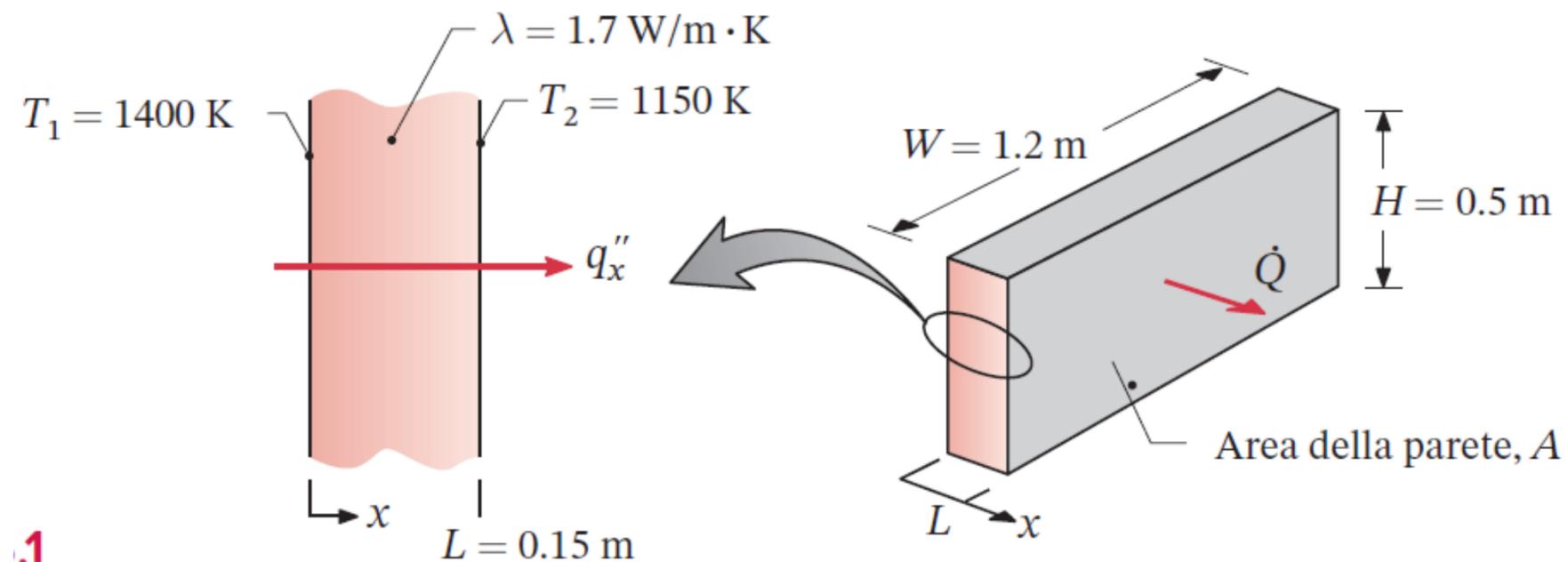
La **potenza termica** scambiata per conduzione (W), attraverso una superficie piana di area A

$$\dot{Q} = q_x'' \cdot A$$

$$q_x'' = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} = \lambda \frac{\Delta T}{L}$$

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Equazione del flusso di calore: legge di Fourier ESEMPIO



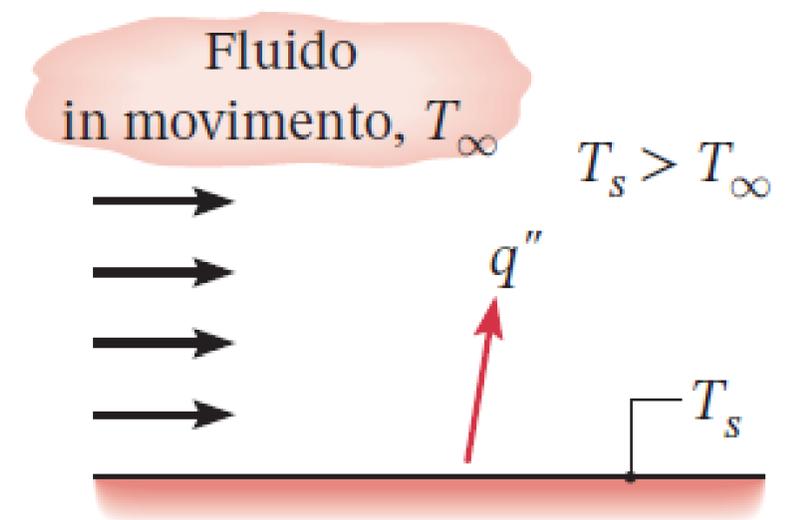
$$q_x'' = \lambda \frac{\Delta T}{L} = 1.7 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot \frac{250 \text{ K}}{0.15 \text{ m}} = 2833 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\dot{Q} = A q_x'' = (HW) q_x'' = (0.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}) 2833 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 1700 \text{ W}$$

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Convezione

- Il termine **convezione** si riferisce allo scambio di calore che avviene tra una **superficie** e un **fluido** che si trovino a differente temperatura e in moto relativo l'uno rispetto all'altra.
- La modalità di scambio di calore per convezione è data da due meccanismi: movimenti molecolari casuali (**conduzione**), e trasporto di massa, ovvero moto macroscopico del fluido (**advezione**).

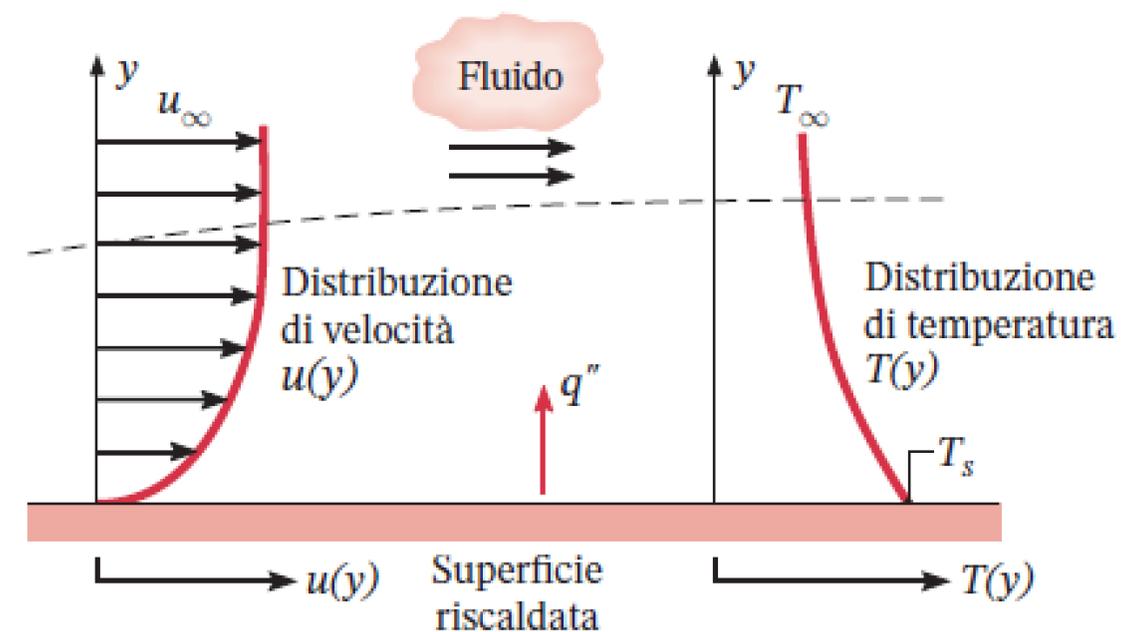


Convezione da una superficie  
a un fluido in movimento

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Convezione

- In caso di moto di un liquido su una superficie, gli effetti della viscosità sono importanti nello **strato limite** dinamico (di velocità) e, per un **fluido newtoniano**, gli sforzi di taglio dovuto all'attrito sono proporzionali al gradiente di velocità.
- Trattando la convezione si studierà lo **strato limite termico**, ossia la regione in cui è presente una distribuzione di temperatura, il cui valore varia da quella del flusso indisturbato  $T_\infty$  a quella della superficie  $T_s$



# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Convezione

- **Convezione forzata**: il flusso è causato da mezzi esterni, come un ventilatore, una pompa o il vento
- **Convezione libera (o naturale)**: il moto è dato dalle forze di galleggiamento, che derivano da differenze di densità causate dalle variazioni di temperatura nel fluido
- **Flusso esterno**: è associato a corpi immersi in una corrente fluida, come nel caso di moto su piastre, cilindri e lamine
- **Flussi interni**: il moto è vincolato dalle superfici del condotto entro cui scorre il fluido

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Convezione

Indipendentemente dalla natura del processo di scambio di calore per convezione, nella prassi ingegneristica il flusso termico si esprime tramite un'equazione, nota come **legge di Newton** (a volte **legge di Newton del raffreddamento** o **legge di Newton per la convezione**)

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

$q'' =$  **flusso termico** ed è proporzionale alla differenza tra le temperature del fluido  $T_\infty$  e della superficie  $T_s$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$h =$  **coefficiente di scambio termico per convezione** ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Convezione

Il **coefficiente convettivo non è** una proprietà termofisica del fluido termovettore. Esso è una **comoda definizione** e dipende dalle condizioni nello strato limite, il quale viene influenzato dalla geometria della superficie, dalla natura del moto del fluido e da una varietà di proprietà termodinamiche e di trasporto del fluido termovettore

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

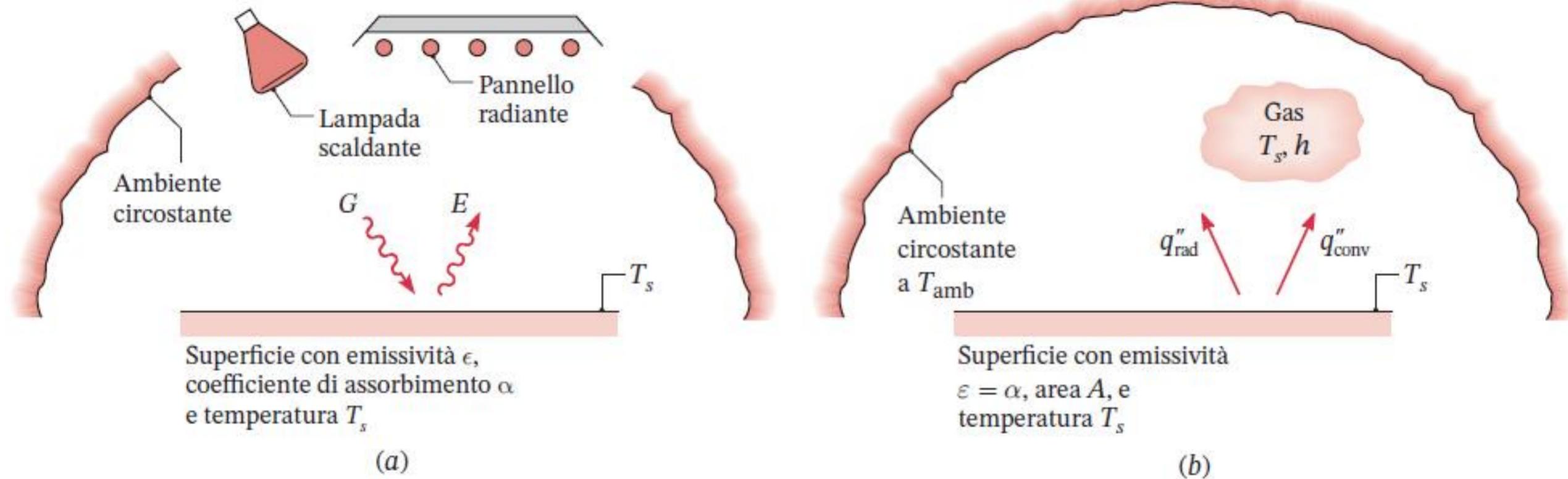
# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Irraggiamento

- Tutte le superfici a **temperatura assoluta** diversa da 0 K emettono energia sotto forma di onde elettromagnetiche. Perciò, in **assenza di mezzi interposti**, c'è sempre un trasferimento netto di calore per irraggiamento tra due superfici a diversa temperatura.
- L'**irraggiamento termico** è energia emessa dalla materia che si trova a una certa temperatura.

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Irraggiamento



Il **potere emissivo della superficie**  $E$  è il coefficiente con il quale l'energia è irradiata per unità di superficie.

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Irraggiamento

Limite massimo al potere emissivo che è dato dalla **legge di Stefan-Boltzmann**

$$E_n = \sigma T_s^4$$

$T_s$  = temperatura assoluta in K della superficie

$\sigma$  = **costante di Stefan – Boltzmann**  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

Una superficie che emette una tale quantità di energia è detta **perfetto emettitore** o **corpo nero**. Il flusso di calore emesso per irraggiamento da una superficie reale è inferiore rispetto a quello di un corpo nero alla stessa temperatura ed è dato da:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

$\varepsilon$  = **emissività**, valore compreso tra 0 e 1

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Irraggiamento

Il flusso termico per irraggiamento ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) che incide su una determinata superficie è detto **irradianza**  $G$

Conoscendo una proprietà delle superfici detta **coefficiente di assorbimento**  $\alpha$ , è possibile stabilire la quantità di energia assorbita nell'unità di tempo per unità di superficie, che è

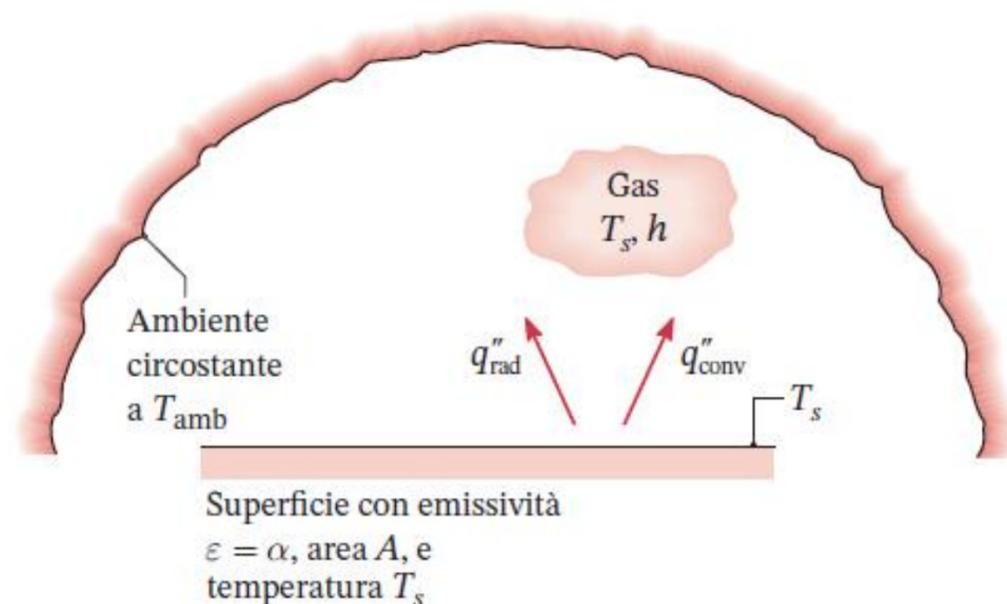
$$G_{ass} = \alpha G$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

# Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

## Irraggiamento

Lo scambio radiativo tra una piccola superficie a  $T_s$ , e una più grande e isoterma che la circonda completamente a temperatura  $T_{amb}$  diversa da  $T_s$ , può essere approssimato come l'emissione da un corpo nero a  $T_{amb}$ , per cui:



$$G = \sigma T_{amb}^4$$

Se  $\alpha = \varepsilon \rightarrow$  **Corpo grigio**

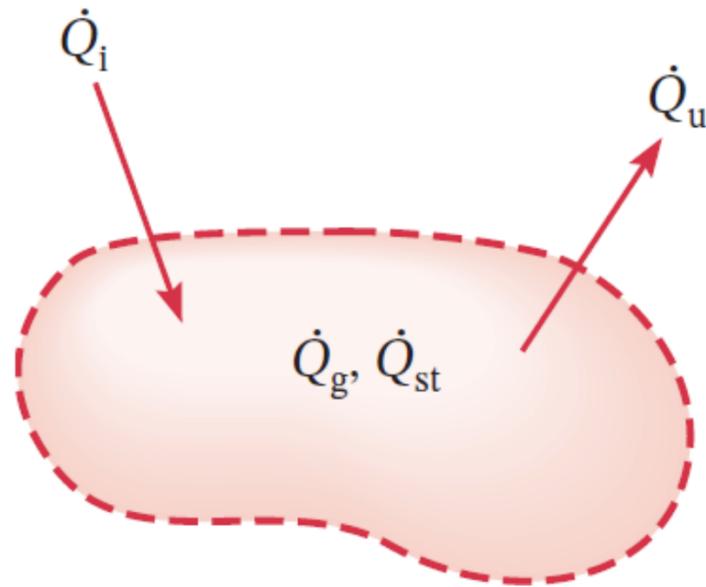
$$q''_{irr} = \varepsilon E_n(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4)$$

$$q''_{irr} = h_{irr} (T_s - T_{amb})$$

$h_{irr} = \varepsilon \sigma (T_s + T_{amb})(T_s^2 + T_{amb}^2)$  coefficiente di scambio termico per irraggiamento

$$q''_{tot} = q''_{conv} + q''_{irr} = h(T_s - T_{\infty}) + h_{irr}(T_s - T_{amb})$$

# Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore



$\dot{Q}_i$  = potenza termica entrante attraverso la superficie del sistema

$\dot{Q}_u$  = potenza termica uscente attraverso la superficie del sistema

$\dot{Q}_g$  = potenza termica generata all'interno del sistema

$\frac{dU}{dt}$  = energia interna immagazzinata nell'unità di tempo all'interno del sistema

**Bilancio energetico** nell'unità di tempo

$$\dot{Q}_i + \dot{Q}_g - \dot{Q}_u = \frac{dU}{dt}$$

**Bilancio energetico** in un intervallo di tempo

$$Q_i + Q_g - Q_u = \Delta U$$

# Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore

Le **potenze entrante** e **uscente** sono fenomeni di superficie, cioè sono associati a processi di scambio termico che avvengono al contorno o sulla superficie del sistema (conduzione, convezione e/o irraggiamento)

La **potenza termica generata** tiene conto della conversione di energia meccanica in energia termica, incluso il passaggio di corrente attraverso una resistenza elettrica, o altri effetti (l'assorbimento elettromagnetico, reazioni chimiche e nucleari)

Ci si riferisce ai fenomeni che portano alla generazione di energia termica come fenomeni volumetrici

$$q_g''' (\text{W}/\text{m}^3) = \frac{\dot{Q}_g (\text{W})}{V (\text{m}^3)}$$

## Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore

Nel caso di un flusso di corrente elettrica attraverso una resistenza, la potenza generata è anche detta potenza elettrica dissipata e può essere espressa come:

$$\dot{Q}_g = I^2 R_e = I^2 R'_e L$$

$I$  = corrente (A)

$R_e$  = resistenza elettrica ( $\Omega$ )

$R'_e$  = resistenza elettrica per unità di lunghezza ( $\Omega/\text{m}$ )

$L$  = lunghezza del conduttore elettrico (m)

L'**energia interna immagazzinata** rappresenta l'energia interna accumulata nel sistema (o persa da esso) nell'unità di tempo.

# Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore

Nell'applicazione del primo principio della termodinamica, nell'unità o in un intervallo di tempo, ai problemi di trasmissione del calore, è opportuno seguire alcune regole:

- Va definito (ad es. marcandolo con una linea tratteggiata) il volume di controllo  $V_c$  più appropriato per il problema in esame.
- Tutti i processi di scambio energetico vanno individuati e rappresentati graficamente da frecce che si dipartono, nell'uno o nell'altro verso, dal volume  $V_c$ . A ciascuna freccia va associato un opportuno simbolo.
- L'equazione di conservazione dell'energia (I Principio) va quindi scritta, esplicitando in modo opportuno i vari termini attraverso le relative leggi di scambio termico.

# Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore

Nell'applicazione del Primo Principio, il volume di controllo può essere *finito* o *infinitesimo (differenziale)*:

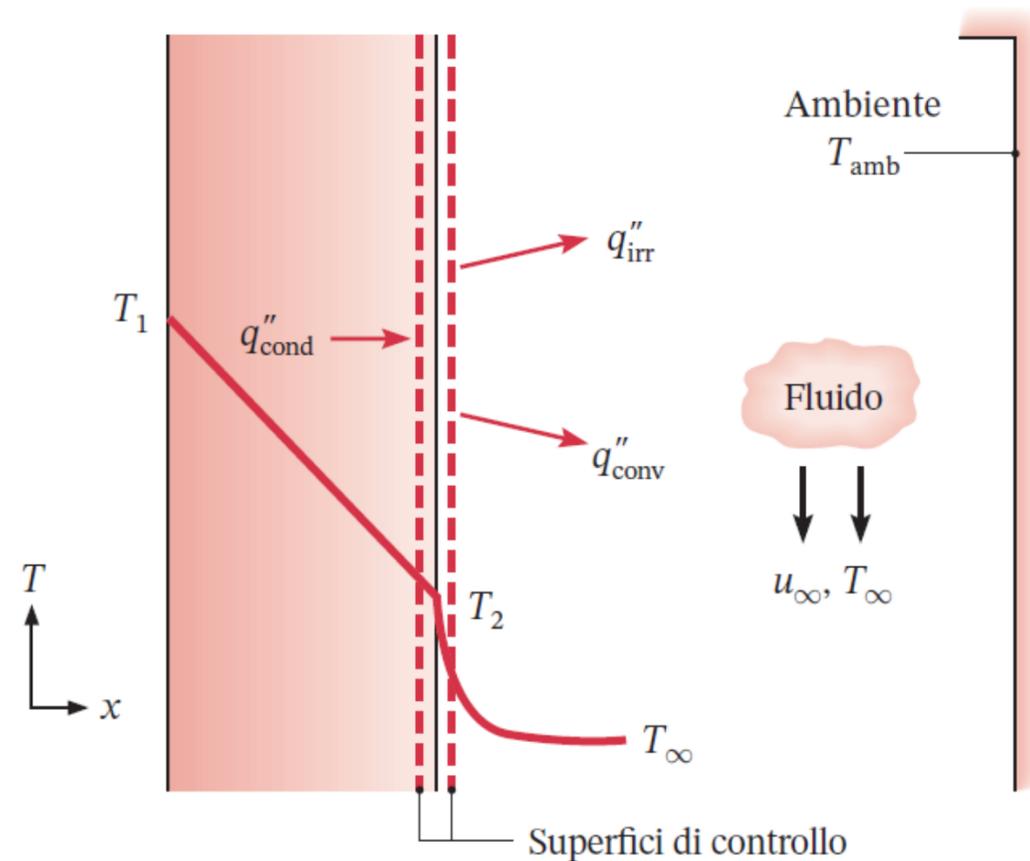
- Nel primo caso otterremo un'equazione che rappresenterà il *comportamento medio* del sistema racchiuso da  $V_c$ .
- Nel secondo caso si otterrà un'equazione differenziale in grado di fornire, qualora risolta, le condizioni in ciascun punto del sistema.

# Metodologia di soluzione dei problemi di scambio termico

Fasi dell'approccio sistematico della soluzione dei problemi di trasmissione del calore:

1. Dati del problema.
2. Incognite.
3. Schema del problema.
4. Ipotesi semplificative.
5. Proprietà termofisiche dei materiali.
6. Analisi e soluzione.
7. Discussione ed osservazioni.

# Bilancio energetico superficiale



Conservazione di energia alla superficie di un mezzo: In questo caso particolare, la superficie di controllo non include massa o volume, i termini relativi alla generazione e all'accumulo non sono più rilevanti ed si considerano solo i fenomeni di superficie:

$\dot{Q}_i - \dot{Q}_u = 0 \rightarrow$  **Bilancio energetico di superficie**,  
valido sia in stazionario sia in transitorio

$$q''_{\text{cond}} - q''_{\text{conv}} - q''_{\text{irr}} = 0$$

# Bilancio energetico superficiale

Identificare le modalità di scambio termico rilevanti

