Fisica Tecnica (Modulo 1)- LM4
Fisica Tecnica – L23

A.A. 2021-2022

Prof. Paolo ZAZZINI Dipartimento INGEO Università "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara

Lezione n. 14

Principi generali di Convezione termica

Prof. Paolo ZAZZINI Dipartimento INGEO Università "G. d'Annunzio" Chieti-Pescara

Meccanismo fondamentale di **scambio termico** tra un **solido** ed un **fluido in movimento** a **diverse temperature**.

Si compone di:

Scambio termico di tipo **conduttivo** tra corpo e strati di fluido adiacenti

Trasporto di energia a distanza mediante **moto** macroscopico del fluido, detto **convettivo**.

Trasferimento di energia da zone più calde a zone più fredde mediante **urti tra le particelle** a diversa temperatura (diverso contenuto di energia)

- **Convezione naturale**: **moto** del fluido **provocato da cause naturali** (differenza di temperatura)

  Es. scambio termico tra **aria e radiatore** di un ambiente: l'aria a contatto col radiatore si scalda, diminuisce di densità → **moto ascensionale** → nuova aria fredda attirata dal basso (depressione) → **moto convettivo naturale**.

- **Convezione forzata**: **moto** del fluido **provocato da agente meccanico** esterno (pompa o ventilatore).

  Es. scambio termico tra acqua e parete interna di un tubo in un impianto di riscaldamento: acqua calda cede calore al tubo → necessario isolamento per limitare dispersioni. Movimento dell'aria provocato da pompa di circolazione → moto convettivo forzato

Problemi di convezione termica **descritti** analiticamente da **equazioni della fluidodinamica** combinate con il **principio di conservazione dell'energia** (I principio della termodinamica).

Notevoli difficoltà nella determinazione delle **soluzioni analitiche** (complessità geometrica e fluidodinamica del fenomeno) → **metodi numerici** o **sperimentali** associati all'analisi dimensionale per definire **gruppi adimensionali** in grado di descrivere il fenomeno

Legge di Newton (1701)

$$\dot{Q} = h_c \cdot A \cdot (t_s - t_\infty)$$

h_c: coefficiente medio di scambio termico convettivo $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

A: area di scambio $[m^2]$

t_s: temperatura della superficie $[°\,C]$

t_∞: temperatura del fluido indisturbato $[°\,C]$

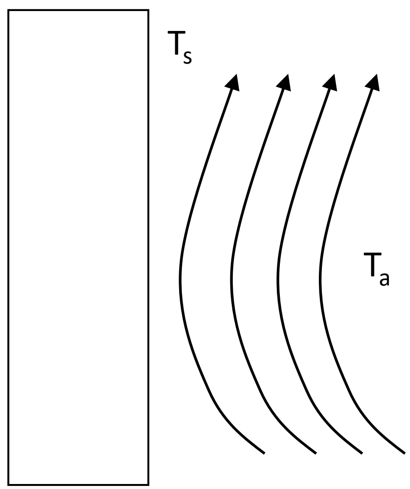
Valida sia in **convezione naturale** che **forzata**

Problema fondamentale della convezione termica: **determinazione del coefficiente di scambio termico**

Dipende da:

- **proprietà** fisiche **del fluido;**
- **condizioni termo-fluidodinamiche** del fenomeno;
- **geometria** del sistema.

Nella relazione di Newton **h_c è preso in valore medio**.



Scambio termico convettivo tra **aria** a temperatura **T_a** e **parete** a temperatura superficiale **T_s** :

Coefficiente di scambio termico **variabile** in vari punti della parete

h_c esprime la **media spaziale**.

Convezione naturale: **h_c** in **funzione del ΔT** (molte espressioni di h_c reperibili in letteratura in varie configurazioni geometriche.

Convezione forzata: **h_c** in **funzione della velocità** del fluido.

Conduttanza convettiva: $C = h_c \cdot A \quad \left[\frac{W}{K}\right] \Rightarrow \dot{Q} = C \cdot \Delta T \quad [W]$

Conduttanza convettiva unitaria: $C_u = h_c \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right] \Rightarrow \phi = C_u \cdot \Delta T \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$

Resistenza convettiva: $R = \frac{1}{C} = \frac{1}{h_c \cdot A} \quad \left[\frac{K}{W}\right] \Rightarrow \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} [W]$

Resistenza convettiva unitaria: $R_u = \frac{1}{C_u} = \frac{1}{h_c} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right] \Rightarrow \phi = \frac{\Delta T}{R_u} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$

Condizioni di moto del fluido:

Flusso comprimibile: densità variabile in funzione di pressione e temperatura (es. gas).

Flusso incomprimibile: valore costante della densità rispetto a temperatura e pressione (es. liquidi)

Numero di MACH: $\boldsymbol{Ma = \frac{u_\infty}{c}}$

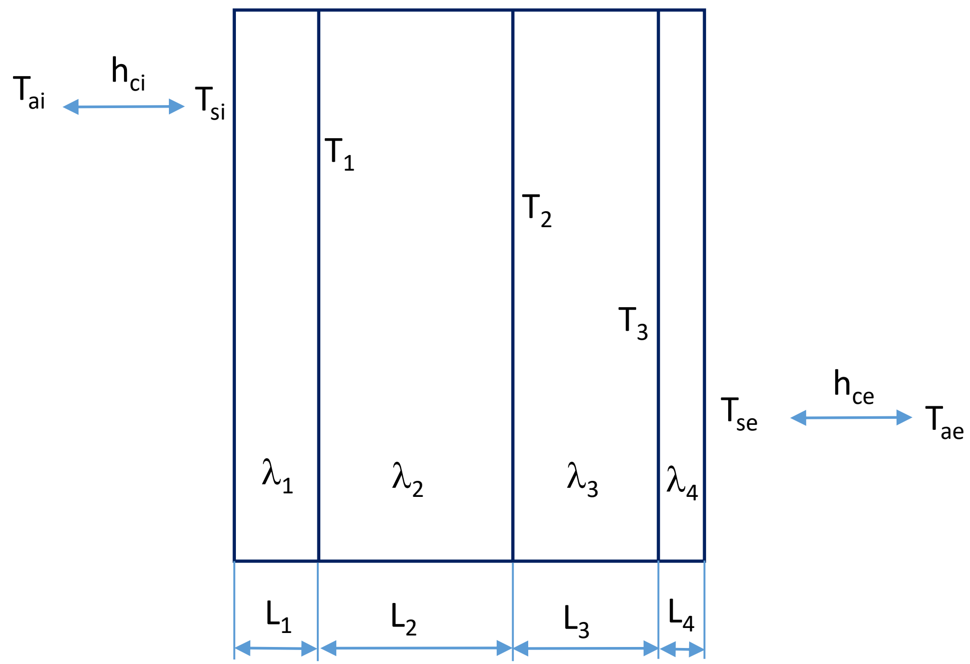
u_∞: velocità del **fluido indisturbato** (m/s)

c: velocità del **suono in aria** in condizioni normali = **344 m/s**

Ma < 0,3 ⇒ flusso **incomprimibile** → **aria incomprimibile** fino a $\boldsymbol{u_\infty}$ **= 103,2 m/s**

Meccanismi combinati di convezione e conduzione termica

Parete piana multistrato di **separazione tra due ambienti** a diversa temperatura



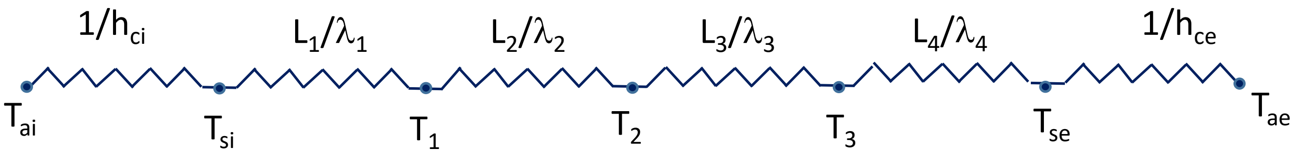
Scambi convettivi (liminari) tra **aria interna e superficie interna** della parete (**h_{ci}**)

Scambi convettivi (liminari) tra **superficie esterna** della parete **aria esterna** (**h_{ce}**)

Scambi conduttivi nei **vari strati interni** di materiale (laterizio, intonaco, isolante etc.)

Analogia elettrica

Sei **resistenze in serie**: due convettive quattro conduttive



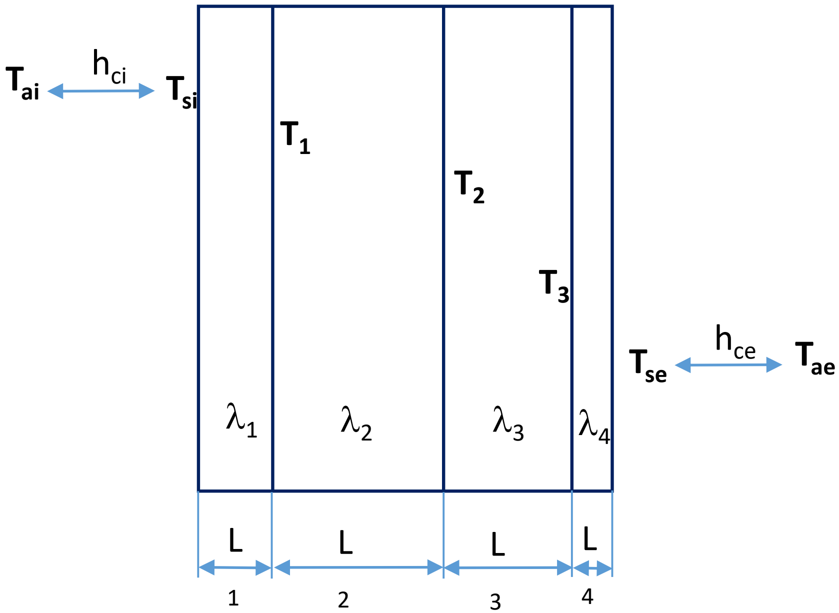
$$R_{u,tot} = \frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{L_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_{ce}}$$

$$\phi = \frac{(T_{ai} - T_{ae})}{R_{u,tot}} = \left(\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{L_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_{ce}}\right)^{-1} \cdot (T_{ai} - T_{ae})$$

$$\dot{Q} = \phi \cdot A = \left(\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{L_4}{\lambda_4} + \frac{1}{h_{ce}}\right)^{-1} \cdot A \cdot (T_{ai} - T_{ae})$$

Calcolo delle **temperature all'interfaccia** tra i singoli strati

Regime stazionario → flusso termico totale = flusso termico in ogni singolo strato.



$$\boxed{\phi = \frac{1}{R_{u,tot}} \cdot (T_{ai} - T_{ae})}$$

$$\phi = h_{ci} \cdot (T_{ai} - T_{si}) \Rightarrow T_{si} = T_{ai} - \phi \cdot \frac{1}{h_{ci}}$$

$$\phi = \frac{(T_{ai} - T_1)}{\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1}} \Rightarrow T_1 = T_{ai} - \phi \cdot \left(\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1}\right)$$

$$\phi = \frac{(T_{ai} - T_2)}{\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2}} \Rightarrow T_2 = T_{ai} - \phi \cdot \left(\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2}\right)$$

$$\phi = \frac{(T_{ai} - T_3)}{\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3}} \Rightarrow T_3 = T_{ai} - \phi \cdot \left(\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3}\right)$$

$$\phi = \frac{(T_{ai} - T_{se})}{\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{L_4}{\lambda_4}} \Rightarrow T_{se} = T_{ai} - \phi \cdot \left(\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{L_4}{\lambda_4}\right)$$

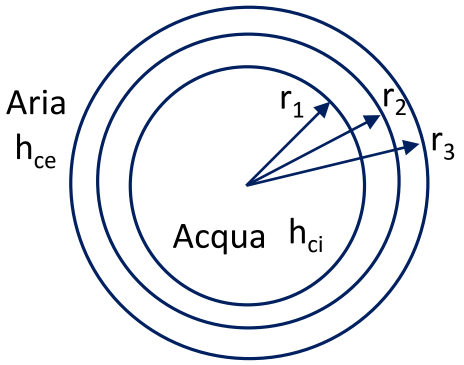
Parete cilindrica multistrato con scambi liminari convettivi

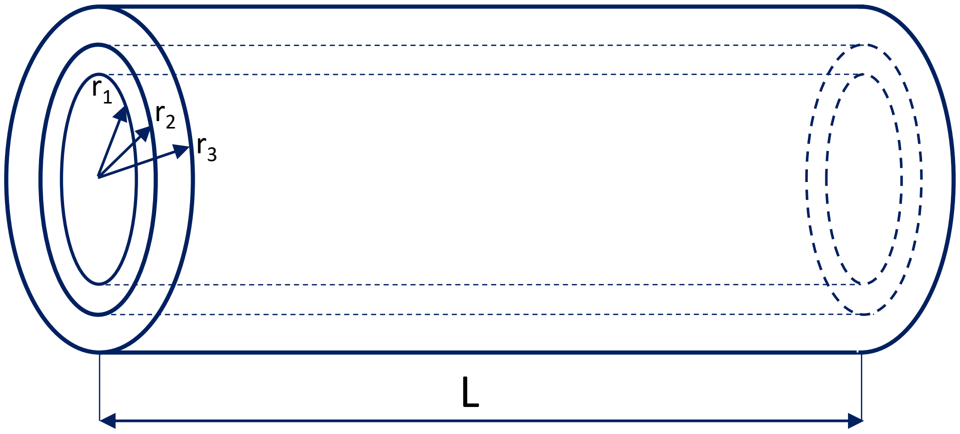
Sistema costituito da **due strati cilindrici coassiali** di **diverso materiale** e **conducibilità.**

Scambi termici convettivi all'interno ed all'esterno del tubo.

Es. **Tubo isolato** esternamente che trasporta **acqua** calda in un **impianto di riscaldamento**

- h_{ci}: coefficiente di scambio convettivo tra **acqua e superficie interna** del tubo;
- h_{ce}: coefficiente di scambio convettivo tra **aria superficie esterna** del tubo;
- T_a: temperatura dell'**acqua** interna al tubo;
- T_e: temperatura dell'**aria** esterna al tubo.





Hp: Temperatura del fluido interno $\mathbf{T_a}$ **maggiore** di quella del fluido esterno $\mathbf{T_e}$ → **flusso termico uscente**.

Lo strato di **isolante esterno** serve a **limitare la dispersione** aumentando la resistenza termica dell'intero sistema.

Metodo dell'analogia elettrica → **quattro resistenze in serie**: **due convettive** (interna ed esterna) e **due conduttive** (spessore del tubo e materiale isolante).

- In **geometria piana**: **aumento dello spessore** dell'isolante → **aumento della resistenza** termica.

- **In geometria cilindrica** due fattori contrastanti: **aumento dello spessore** dell'isolante → **aumento della resistenza termica** (limitazione delle dispersioni) ma anche della **superficie esterna del sistema** (incremento degli scambi convettivi).

⇓

Determinazione del **valore ottimale** dello **spessore dell'isolante**.

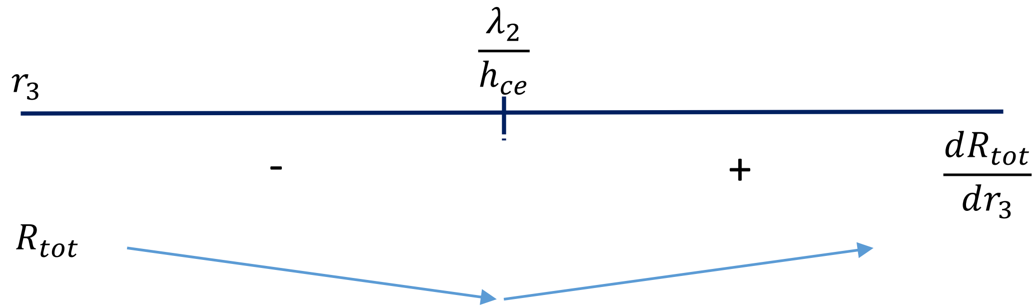
Resistenza termica totale

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = \frac{1}{2\pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_{ci}} + \frac{ln\frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot L \cdot \lambda_1} + \frac{ln\frac{r_3}{r_2}}{2\pi \cdot L \cdot \lambda_2} + \frac{1}{2\pi \cdot r_3 \cdot L \cdot h_{ce}}$$

Andamento di **R_{tot} al variare di r_3**

Derivata prima della funzione: $$\frac{dR_{tot}}{dr_3} = \frac{\frac{1}{r_3}}{2\pi \cdot L \cdot \lambda_2} - \frac{\frac{1}{r_3^2}}{2\pi \cdot L \cdot h_{ce}}$$

$$\frac{dR_{tot}}{dr_3} = 0 \Rightarrow \frac{\frac{1}{r_3}}{2\pi \cdot L \cdot \lambda_2} - \frac{\frac{1}{r_3^2}}{2\pi \cdot L \cdot h_{ce}} = 0 \Rightarrow \frac{1}{2\pi \cdot L \cdot \lambda_2} = \frac{1}{2\pi \cdot L \cdot h_{ce} \cdot r_3} \Rightarrow \boldsymbol{r_3} = \frac{\boldsymbol{\lambda_2}}{\boldsymbol{h_{ce}}}$$



Raggio minimo dell'isolante (raggio critico). Solo valori superiori a λ_2/h_{ce} consentono **aumento della resistenza all'aumentare dello spessore**