



# Fisica Tecnica (Modulo 1)- LM4

## Fisica Tecnica – L23

A.A. 2021-2022





# Lezione n. 15

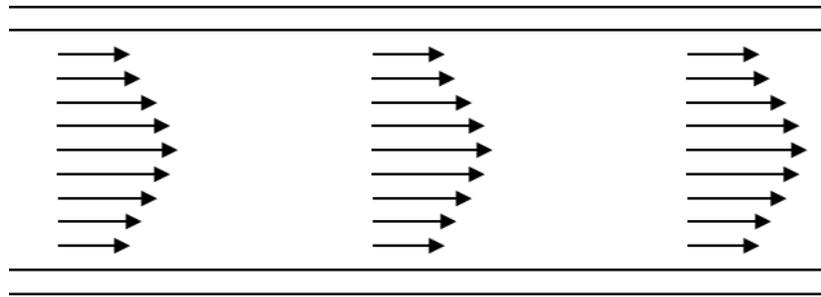
## Convezione termica forzata



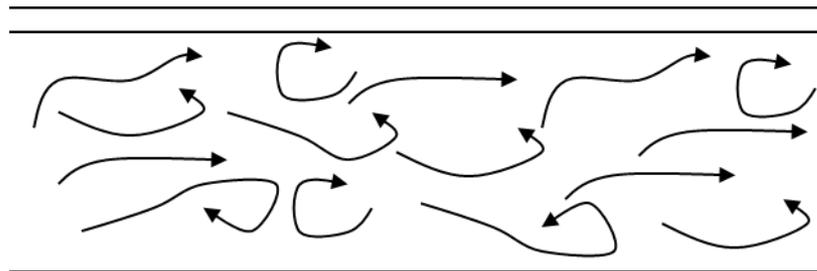
**Convezione forzata:** meccanismo di scambio termico tra un corpo ad una certa temperatura superficiale ed un **fluido messo in movimento da un agente meccanico** esterno (es. pompa di circolazione o ventilatore).

Condizioni di moto: ***laminare o turbolento*** (modelli fluidodinamici ideali a cui ricondurre le condizioni reali di moto).

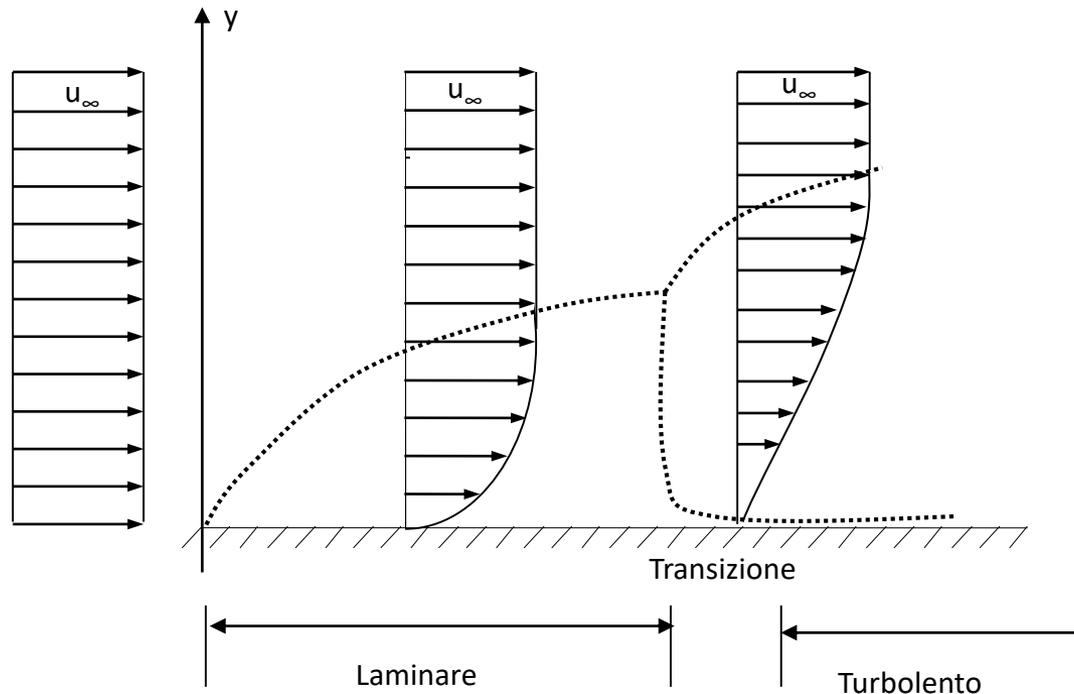
**Moto laminare:** **traiettorie ben definite e ordinate** delle particelle fluide **parallele le une alle altre** (linee di corrente) senza componenti di moto trasversali.



**Moto turbolento:** **mescolamento disordinato** delle particelle fluide, crescente al crescere del grado di turbolenza, moto caratterizzato **solo mediamente e statisticamente** da un'unica direzione e un **unico verso**.

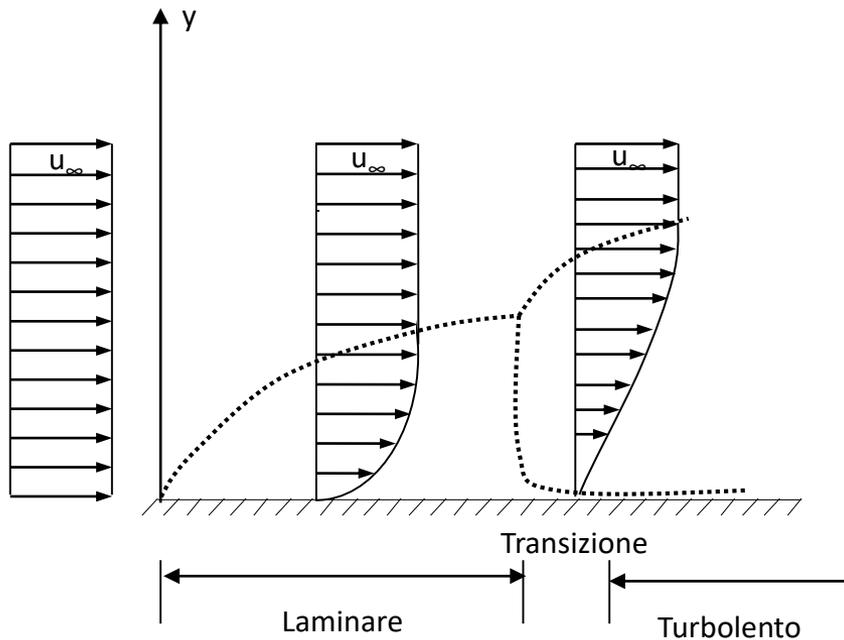


**Flusso esterno di un fluido** (es. aria) a temperatura  $T_\infty$  su una **piastra calda** a temperatura  $T_s$  **parallela alla corrente** (superficie di scambio termico piana o con curvatura poco accentuata, assimilabile a superficie piana - es. **pale di una turbina idraulica**)



A partire dalla sezione di imbocco, **velocità nulla del fluido** rispetto alla piastra **nelle zone di contatto** (condizione di aderenza)

**Aumento della velocità** allontanandosi dalla piastra **fino al valore indisturbato  $u_\infty$** .



Scambio termico **conduttivo** nella **zona di contatto** tra fluido e parete (velocità relativa nulla).



**Aumento dell'energia cinetica** delle particelle di fluido



**Moto** verso regioni a **più bassa temperatura** e **cessione di energia** per urti alle particelle che occupano tali zone.

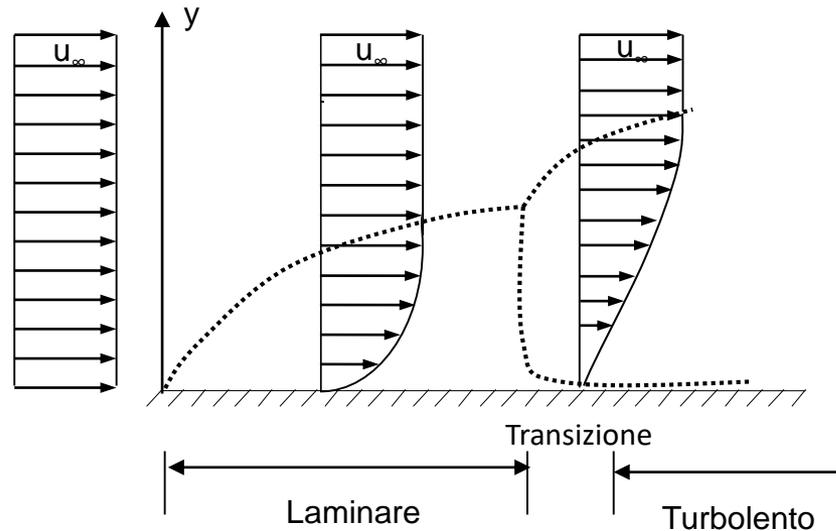
Fenomeno dovuto contemporaneamente a **trasferimento di energia** di tipo conduttivo e **trasporto di massa**.



Necessario definire le **condizioni fluidodinamiche del moto** per risolvere il problema termico.

**Moto laminare** → **scambio termico** puramente **conduttivo** (solo moti delle particelle a livello sub-microscopico)

**Moto turbolento** → **mescolamento delle particelle** mediante spostamenti trasversali e **trasferimento di energia** attraverso urti → meccanismo tanto più efficace quanto maggiore è il grado di turbolenza → alla conduzione si aggiungono **effetti più propriamente convettivi**.



Azione delle **forze viscosse** (tangenziali) tra i vari strati di fluido → rallentamento delle particelle

**Strato aderente alla parete fermo** rispetto ad essa → azione di **rallentamento dello strato adiacente** e così via con quello successivo fino ad **esaurirsi in corrispondenza** del valore indisturbato **della velocità ( $u_\infty$ )**.

**Tensione o sforzo viscoso** (livello microscopico): **unica azione** che ha luogo nel caso di **moto laminare** - azione di **trascinamento del** fluido nei confronti della superficie nella direzione del moto (resistenza superficiale).

**Nel moto turbolento: sforzi viscosi ed interazioni tra le particelle** a livello macroscopico (**sforzi turbolenti**).

**Forze di attrito o viscosi** (fluidi newtoniani: acqua ed aria con buona approssimazione).

Relazione di Newton: 
$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy}$$

Sulla superficie della parete: 
$$\tau_s = \mu \cdot \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0}$$

$\tau_s$ : tensione viscosa [N/m<sup>2</sup>]

$\mu$ : viscosità dinamica  $\left[ \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m}{m/s} = \frac{N \cdot s}{m^2} = \mathbf{Pa \cdot s} = \frac{kg \cdot \frac{m}{s^2} \cdot s}{m^2} = \frac{kg}{m \cdot s} \right]$

Per la misura della **viscosità dinamica** anche utilizzato il **poise**: **1 poise = 0,1 Pa s**

**Viscosità cinematica:**  $\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left[ \frac{kg}{m \cdot s} \cdot \frac{m^3}{kg} = \frac{m^2}{s} \right]$

La viscosità cinematica si misura anche in **stoke**: **1 stoke = 1 cm<sup>2</sup>/s = 0,0001 m<sup>2</sup>/s**.

Viscosità cinematica **molto utilizzata nei problemi termici**.

Anche detta **diffusività viscosa** o momento viscoso (stesse dimensioni della diffusività termica).

Strettamente **collegata alla temperatura**: nei liquidi **diminuisce** all'aumentare di questa, mentre **nei gas aumenta**.

**Determinazione** dello sforzo viscoso **complessa** (presuppone la conoscenza del profilo di velocità).

**Relazione approssimata** (valida per flussi esterni):

$$\tau_s = c_f \cdot \frac{\rho \cdot u_\infty^2}{2} \quad \left[ \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m^2}{s^2} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot \frac{1}{m^2} = \frac{N}{m^2} \right]$$

$c_f$ : coefficiente d'attrito

$\rho$ : densità del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

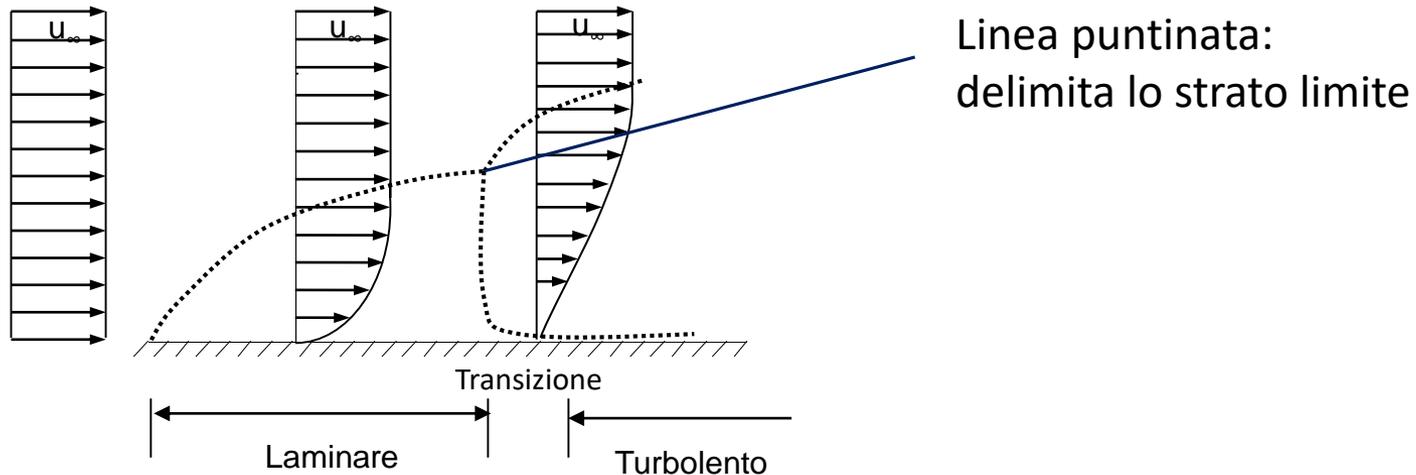
$u_\infty$ : velocità indisturbata del fluido (m/s).

**Forza d'attrito:**  $F_f = c_f \cdot A_s \cdot \frac{\rho \cdot u_\infty^2}{2} \quad [N]$

## Strato limite fluidodinamico o di velocità

**Regione** di fluido entro la quale si hanno **variazioni di velocità** ed in cui sono presenti **significative forze viscosi**.

**Spessore** dello strato limite: **distanza dalla parete** in corrispondenza della quale la **velocità del fluido** raggiunge il **99% di quella indisturbata**.



**Spessore** dello strato: **augmenta** a partire **dalla sezione di attacco**, dove è nullo (solo le particelle a contatto con la parete rallentate, il resto del fluido si muove indisturbato)

**Augmenta** man mano che **il moto del fluido procede** (quantità di fluido sempre **crescenti** sono **interessate da fenomeni viscosi** → rallentate).

**Nello strato limite: moto laminare** fino ad **una certa distanza** dal bordo di attacco e diventa poi **turbolento** passando attraverso una **zona di transizione**.

**Numero di Reynolds:** gruppo adimensionale che permette di **determinare le condizioni del moto** in convezione forzata

$$Re = \frac{\rho \cdot u_{\infty} \cdot l}{\mu} = \frac{u_{\infty} \cdot l}{\nu} \quad \left[ \frac{\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{m}{s} \cdot m}{\frac{kg}{m \cdot s}} \right]$$

$\rho$ : densità del fluido (kg/m<sup>3</sup>);

$u_{\infty}$ : velocità del fluido indisturbato (m/s);

$l$ : grandezza geometrica lineare caratteristica della geometria del sistema (m);

$\mu$ : viscosità dinamica del fluido (kg/m s);

$\nu$ : viscosità cinematica del fluido (m<sup>2</sup>/s).

l assume il valore della **dimensione geometrica** che **caratterizza la configurazione**.

**Es. moto di un fluido in un condotto a sezione circolare: diametro**

**Moto di un fluido su una parete:** distanza dalla sezione d'imbocco crescente lungo la direzione del moto.

In corrispondenza di una **distanza x dalla sezione di imbocco** ( $x = 0$ ) → **numero di Reynolds locale:**

$$Re_x = \frac{\rho \cdot u_{\infty} \cdot x}{\mu} = \frac{u_{\infty} \cdot x}{\nu}$$

**Distanza critica:** distanza dal bordo di attacco alla quale il **moto nello strato limite è diventato completamente turbolento** → **Reynolds critico**.

In convezione forzata su lastra piana: *Reynolds critico* circa  $5 \times 10^5$ .

**Numero di Reynolds:** rapporto tra le **forze di inerzia** (proporzionali alla quantità di moto del fluido) e le **forze viscosse**.

**Re basso** finché lo **strato limite** è caratterizzato da **intense forze viscosse** (prevalenti sulle forze d'inerzia) → **moto laminare** nello **strato limite**.

All'aumentare dello **spessore** dello **strato limite**: **forze viscosse** sempre **meno efficaci** → si impone **regime di turbolenza** (strato limite instabile).

**All'interno dello strato limite** si genera un **regime turbolento**

Solo un **sottile strato a ridosso della parete** caratterizzato da moto quasi **laminare** (**sottostrato laminare**).

Oltre la **distanza critica**: regime di **turbolenza completamente sviluppato**.

La **finitura superficiale** della parete (es. rugosità) **influenza la turbolenza** accelerando la **transizione da moto laminare a moto turbolento** nello strato limite.

Talvolta **create "ad hoc" asperità** sulle superfici (scambio termico più efficace)

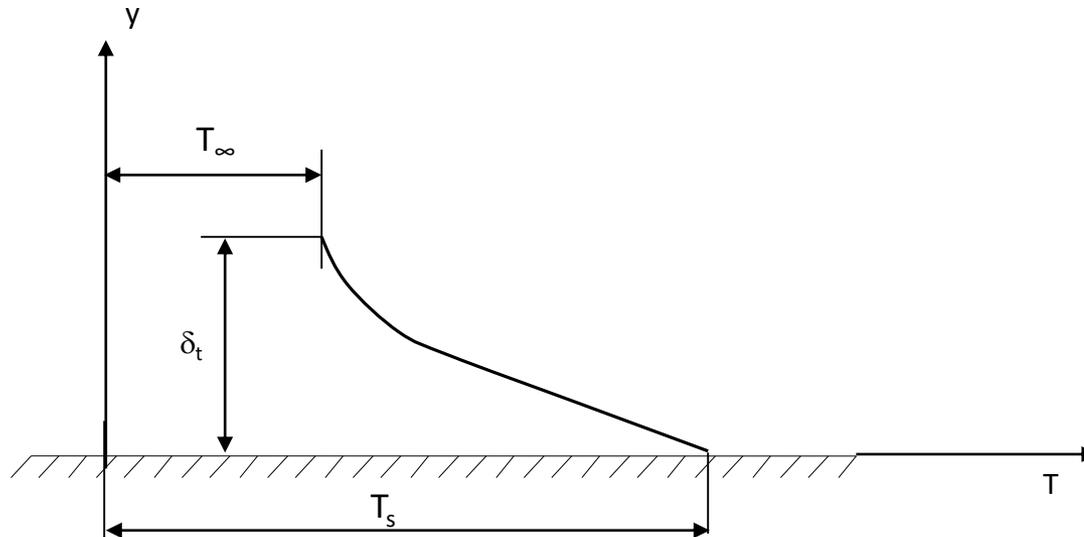
**Moto turbolento:** fenomeno **complesso** per lo studio del quale si ricorre sovente a **relazioni di carattere sperimentale**.

## Strato limite *termico*

Fluido in moto convettivo forzato che lambisce una lastra piana.

$T_\infty$ : temperatura della corrente libera (indisturbata)

$T_s$ : temperatura della parete



Fluido a contatto con la parete: assume la sua stessa temperatura e scambia calore con gli strati adiacenti dando vita ad un processo a catena  $\rightarrow$  profilo di temperatura del fluido variabile da  $T_s$  fino a  $T_\infty$ .

**Strato limite termico:** regione a contatto con la superficie caratterizzata da significative variazioni di temperatura in direzione perpendicolare ad essa.

**Spessore dello strato limite termico:** quello in corrispondenza del quale si verifica la seguente uguaglianza:

$$T - T_s = 0,99 \cdot (T_\infty - T_s)$$

Procedendo **nella direzione del moto** → **aumento dello spessore** dello strato limite (lo **scambio termico** interessa strati di fluido sempre più distanti dalla parete).

**Strato limite fluidodinamico** e **strato limite termico** si sviluppano contemporaneamente nella direzione del moto. Quello **fluidodinamico** ha **forte influenza** sul **fenomeno termico** convettivo.

**Numero di Prandtl**

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \left[ \frac{\frac{Kg}{m \cdot s} \cdot \frac{J}{kg \cdot K}}{\frac{J}{s \cdot m \cdot K}} \right]$$

Mette in **relazione** che le **grandezze fluidodinamiche** e quelle **termiche**.

Se **Pr assume valori bassi (metalli liquidi)**:  $\alpha > \nu \rightarrow$  piccoli gradienti di temperatura ed elevati gradienti di velocità  $\rightarrow$  **strato limite termico molto più spesso di quello fluidodinamico**.

Se **Pr assume valori elevati (oli)**:  $\alpha < \nu \rightarrow$  elevati gradienti di temperatura e piccoli gradienti di velocità  $\rightarrow$  **strato limite termico molto più sottile di quello fluidodinamico**.

**Acqua: Pr** circa pari a **10**.

**Gas: quantità di moto e calore** si dissipano quasi **con la stessa intensità**.

**Velocità del fluido bassa**  $\rightarrow$  **trasporto di energia** prevalentemente **conduttivo** (poco influenzato dal mescolamento tra le particelle di fluido).

**Elevate velocità**  $\rightarrow$  **mescolamento preponderante**  $\rightarrow$  **moto turbolento**  $\rightarrow$  **potenza termica trasmessa elevata** anche con un **gradiente di temperatura ridotto**

**Basse velocità**  $\rightarrow$  fenomeno termico **fortemente dipendente dal gradiente di temperatura**  $\rightarrow$  **conduzione termica importante**.

**Scambio termico convettivo forzato** tra parete e fluido: il **fluido che aderisce alla parete** assume la sua **stessa temperatura ( $T_s$ )**, allontanandosi da essa la temperatura **tende al valore indisturbato ( $T_\infty$ )**.

**Strato a contatto con la parete: solo conduzione** (aderenza del fluido alla parete) → **elevato gradiente di temperatura** → **allontanandosi** dalla parete il **gradiente diminuisce** (trasporto di energia dovuto in modo prevalente al movimento del fluido).

**All'interfaccia tra fluido e parete** relazione fondamentale della conduzione termica:

$$\dot{Q}_{parete-fluido} = -\lambda \cdot A \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}$$

Potenza equivalente a quella **convettiva scambiata tra parete e fluido**:

$$-\lambda \cdot A \cdot \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0} = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)$$

Introducendo una **lunghezza L caratteristica** del sistema, si ottiene:

$$\begin{aligned} -\lambda \cdot A \cdot \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0} = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) &\Rightarrow \frac{h_c}{\lambda} = -\frac{\left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0}}{(T_s - T_\infty)} \Rightarrow \frac{h_c \cdot L}{\lambda} = -\frac{\left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0}}{\frac{(T_s - T_\infty)}{L}} \\ &\Rightarrow \frac{h_c \cdot L}{\lambda} = -\frac{\left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0}}{\frac{(T_s - T_\infty)}{L}} \end{aligned}$$

**Numero di Nusselt:**

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} \left[ \frac{\frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot m}{\frac{W}{m \cdot K}} \right]$$

Numero di Nusselt estremamente significativo: rapporto tra **gradiente termico** in corrispondenza della **parete** e **gradiente termico di riferimento**.

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} = \frac{\left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0}}{\frac{(T_s - T_\infty)}{L}}$$

Può anche essere visto come il **rapporto** tra la **conduttanza unitaria convettiva** e quella **conduttiva**:

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} = \frac{h_c}{\frac{\lambda}{L}}$$

Infine come **gradiente termico** riferito alla **temperatura adimensionalizzata**:

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} = - \frac{d \frac{T - T_\infty}{T_s - T_\infty}}{d \frac{y}{L}}$$

**Determinazione del numero di Nusselt** → soluzione del problema convettivo → consente il calcolo del coefficiente di scambio termico:

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} \Rightarrow h_c = Nu \cdot \frac{\lambda}{L}$$

**Ulteriore interpretazione** del numero di **Nusselt**: rapporto tra **potenza termica convettiva** effettivamente scambiata tra parete e fluido e **quella** che verrebbe **scambiata** qualora il **fluido fosse in quiete** (calore trasmesso **solo per conduzione**).

$$\dot{Q}_{parete-fluido} = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_s - T_\infty}{L}$$

Da cui:

$$\frac{\dot{Q}_{conv}}{\dot{Q}_{cond}} = \frac{h_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty)}{\lambda \cdot A \cdot \frac{T_s - T_\infty}{L}} = \frac{h_c \cdot L}{\lambda} = Nu$$

**Elevato numero di Nusselt: scambio termico convettivo efficace.**

Fluidi in **condotti in convezione forzata: Nu = 100 ÷ 1000.**

Nu = 1: trasmissione del calore attraverso lo strato di fluido puramente conduttiva.

Soluzione del problema convettivo:

- **Problema fluidodinamico** (equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto) all'interno dello strato limite fluidodinamico
- **Problema termico** (equazione della conservazione dell'energia) nello strato limite termico.
- Determinazione del **campo di velocità** e dell'**andamento delle temperature**  $T(x,y) \rightarrow$  **numero di Nusselt**.

**Soluzione molto complessa  $\rightarrow$  metodi numerici.**

**In alternativa: approccio empirico** correlando **dati sperimentali** (temperatura e flusso termico) in condizioni controllate mediante i **tre gruppi adimensionali Re, Pr e Nu**.

$$Nu = f(Re, Pr)$$

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$$

in cui gli esponenti **m ed n** e la **costante C** assumono di volta in volta **valori caratteristici** della **configurazione**.