

Corso di MECCANICA DEL VOLO
Modulo Prestazioni

***CAP 2 – Flussi viscosi e resistenza
aerodinamica***

Prof. F. Nicolosi

RESISTENZA AERODINAMICA E INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

OVERVIEW

Flussi non viscosi

Strato limite (*Boundary Layer*)

Numero di Reynolds (*Reynolds Number*)

Gradienti di pressione *Pressure Gradients*

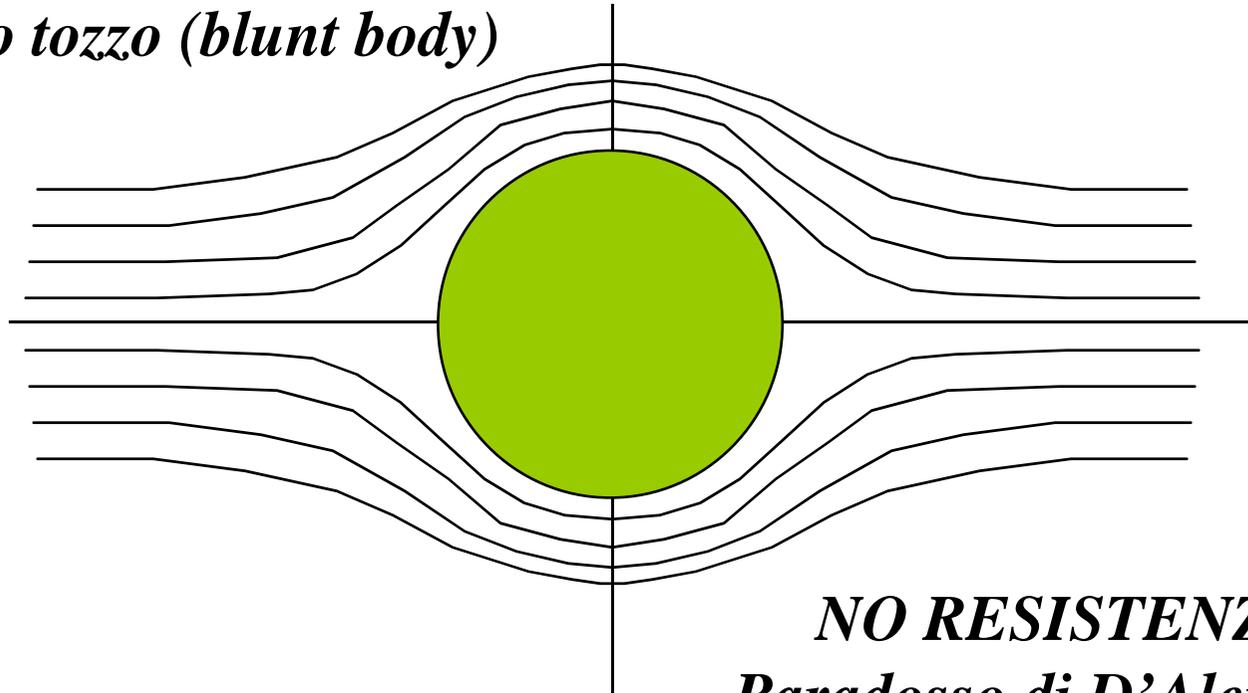
Flusso separato (*Separated Flow*)

Resistenza viscosa (*Viscous Drag*)

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Flusso non viscoso

Corpo tozzo (blunt body)



Note: Non c'è resistenza

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Flusso non viscoso

*Oggetto aerodinamico (streamlined)
profilo*



Portanza ma NON RESISTENZA!

***In entrambi I casi non c'è resistenza
perchè abbiamo trascurato l'attrito***

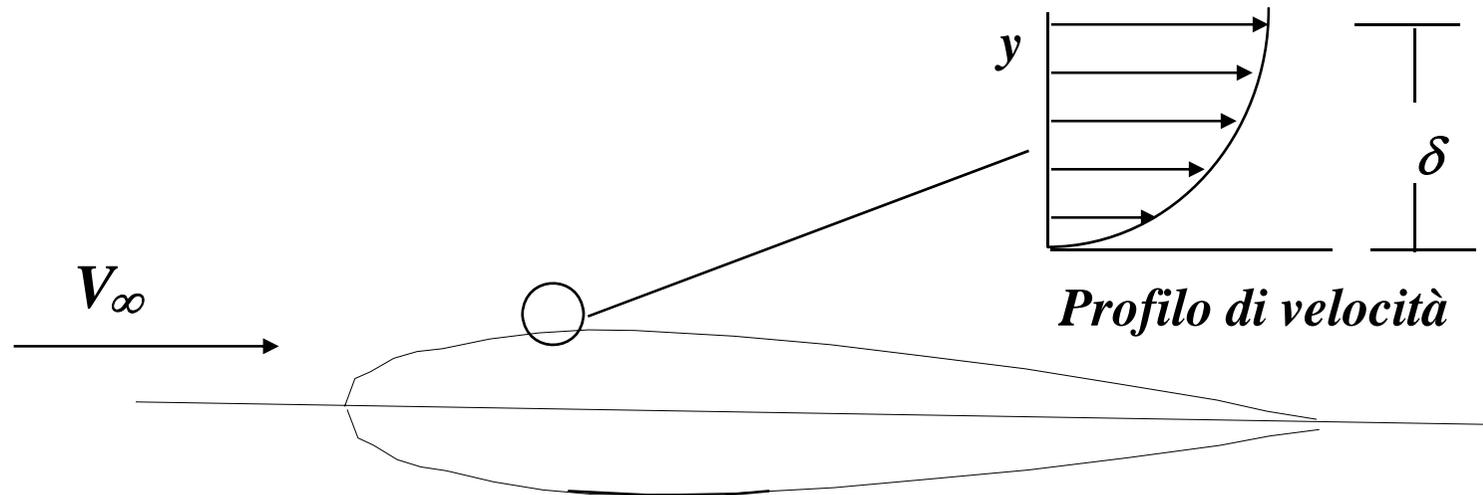
INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Strato limite (*Boundary layers*)

- Nella regione vicina alla superficie di un oggetto, la velocità del flusso è ritardata per l'attrito.
- Questa regione è denominata “strato limite”.
- Al di fuori dello strato limite possiamo considerare il flusso non viscoso (no attrito)

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Strato limite (*Boundary layers*)



δ = spessore di strato limite (*boundary layer thickness*)
la distanza dalla superficie in cui la velocità locale
È uguale al 99% della velocità della corrente indisturbata

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Strato limite (*Boundary layers*)

L'attrito produce uno sforzo tangenziale sul corpo

Lo sforzo tangenziale alla parete è proporzionale a:

- Coefficiente di viscosità , μ
- Derivata (gradiente) della velocità in prossimità della parete

E' questa la sorgente di quella che viene chiamata resistenza d'attrito ("skin friction" drag)

***Sforzo tangenziale
alla parete:***

$$\tau_w = \mu \left(\frac{dV}{dy} \right)_{y=0}$$

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

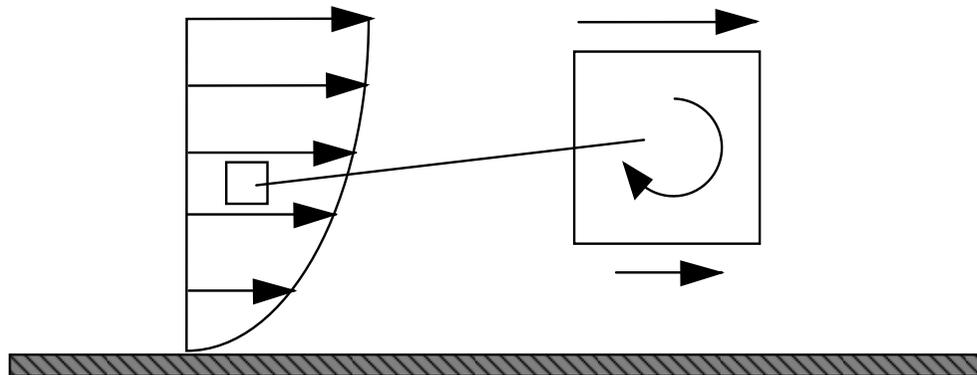
Strato limite (*Boundary layers*)

Inizialmente lo strato limite è “laminare”

Sforzi tangenziali variabili all’interno dello strato limite causano una “rotazione del flusso”

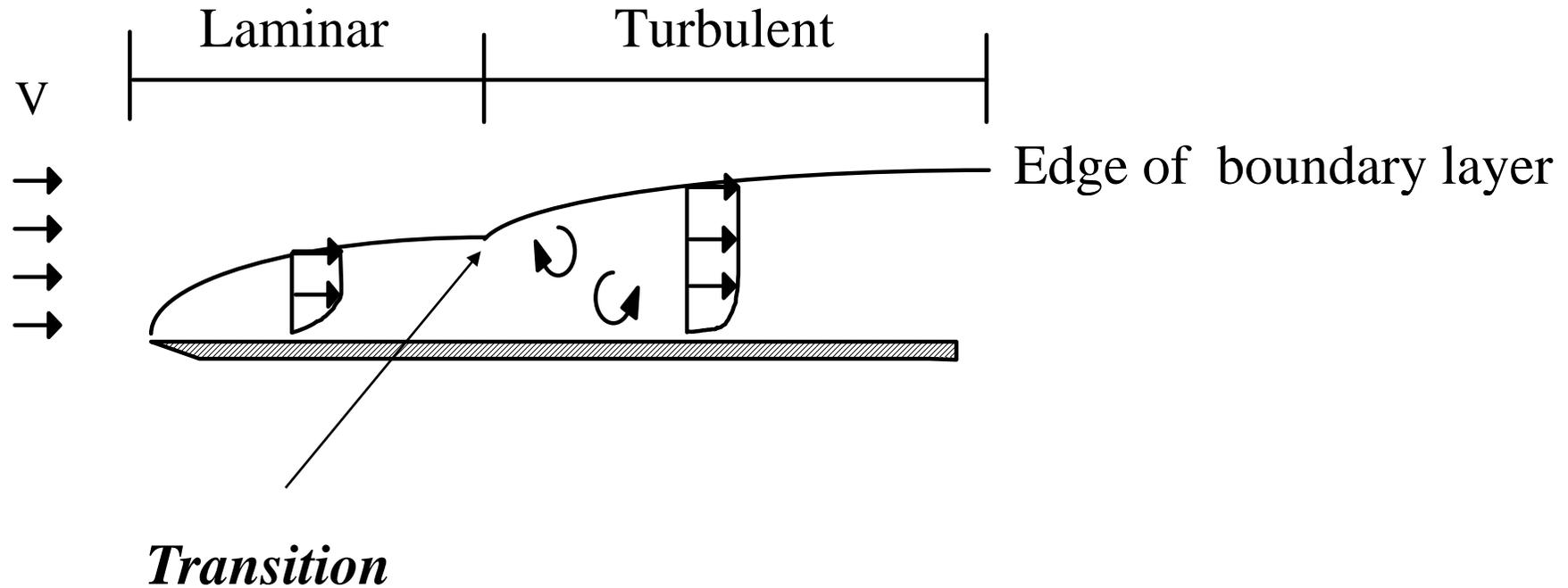
Lo strato limite va verso la “transizione”

Alla fine diventa “turbolento”



INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

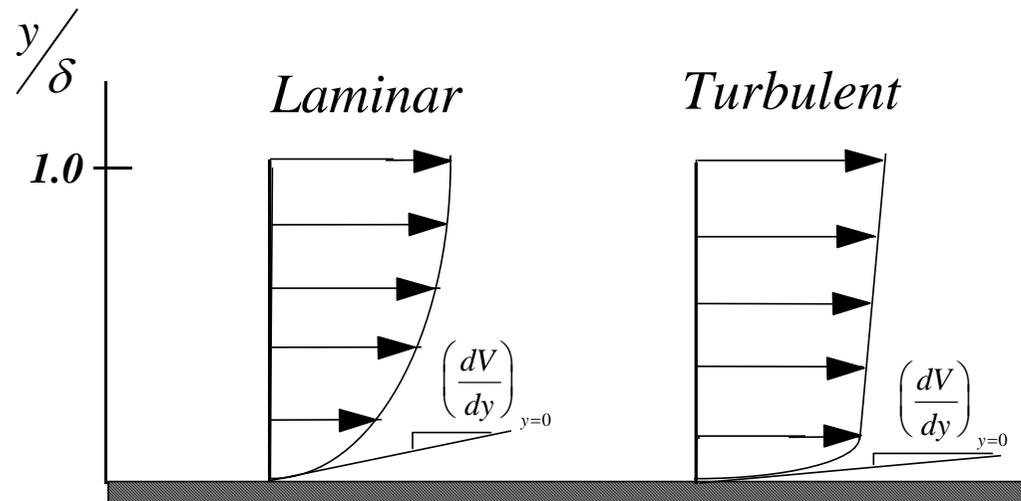
Strato limite (*Boundary layers*)



INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Strato limite (*Boundary layers*)

Un confronto tra I profili di velocità di strato limite laminare e turbolento mostra una certa differenza, specialmente vicino alla parete



Note: $\left. \frac{dV}{dy} \right|_{y=0, lam} < \left. \frac{dV}{dy} \right|_{y=0, turb}$ SO, $\tau_{w, lam} < \tau_{w, turb}$

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Strato limite (*Boundary layers*)

Fattori che influenzano lo strato limite:

- Densità, ρ
Incrementando la densità aumenta lo spessore dello strato limite
- Velocità, V
Incrementando la velocità lo strato limite diventa più sottile
- Distanza lungo la superficie, x
Incrementando la distanza lo strato limite diventa più spesso
- Viscosità, μ
 - Incrementando la viscosità cresce lo spessore di strato limite
 - La viscosità dipende dalla temperatura

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Reynolds number

Questi fattori vengono combinati per definire un importante parametro adimensionale :

Il numero di Reynolds - Reynolds number (Re)

Rappresenta l'importanza relativa tra le forze di tipo inerziale rispetto a quelle di tipo viscoso

Descrive l'importanza relativa dell'attrito nel campo di moto

⇒ Basso Re = attrito significativo

⇒ Alto Re = L'attrito diviene poco importante (ma c'è comunque resistenza)

Per gli aeroplani, tipico $Re = 3-20$ milioni (basato sulla corda alare)

x è la lunghezza caratteristica

(es. La corda per un profilo o la lunghezza per una fusoliera)

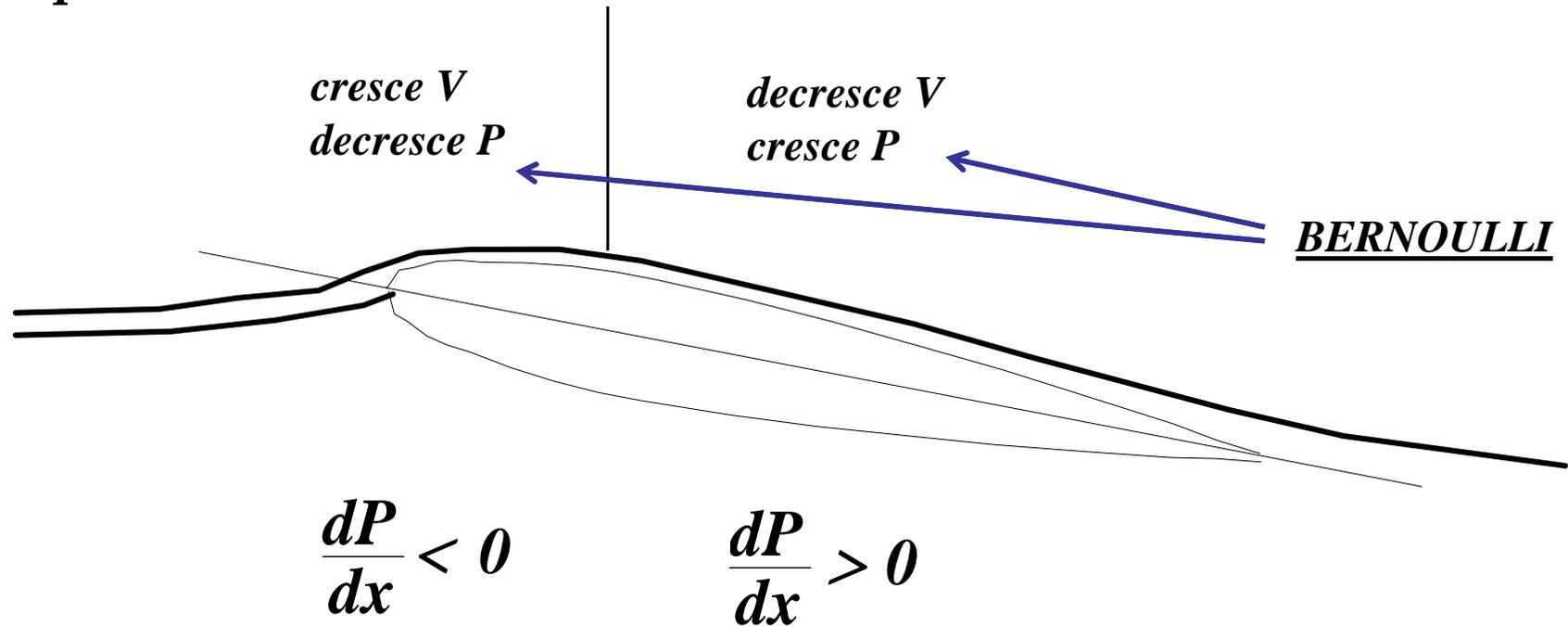
$$Re = \frac{\rho V x}{\mu}$$

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Gradienti di pressione (*Pressure gradients*)

FAVOREVOLE – la regione
con pressione decrescente

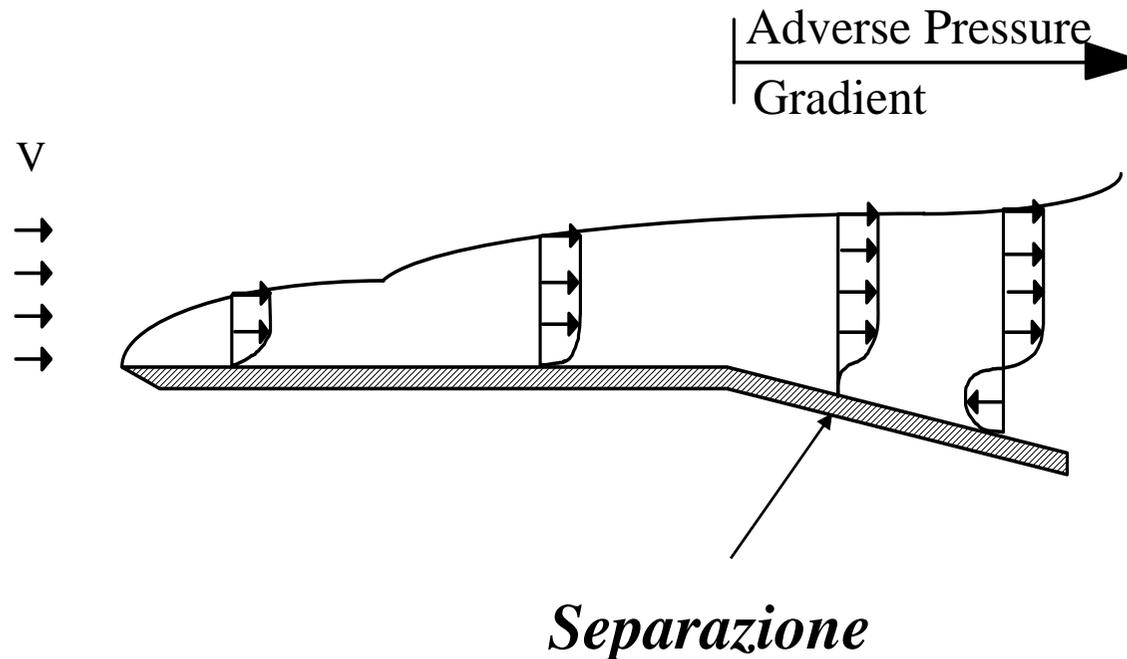
AVVERSO - la regione con
Pressione crescente



INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Flusso separato (*Separated flow*)

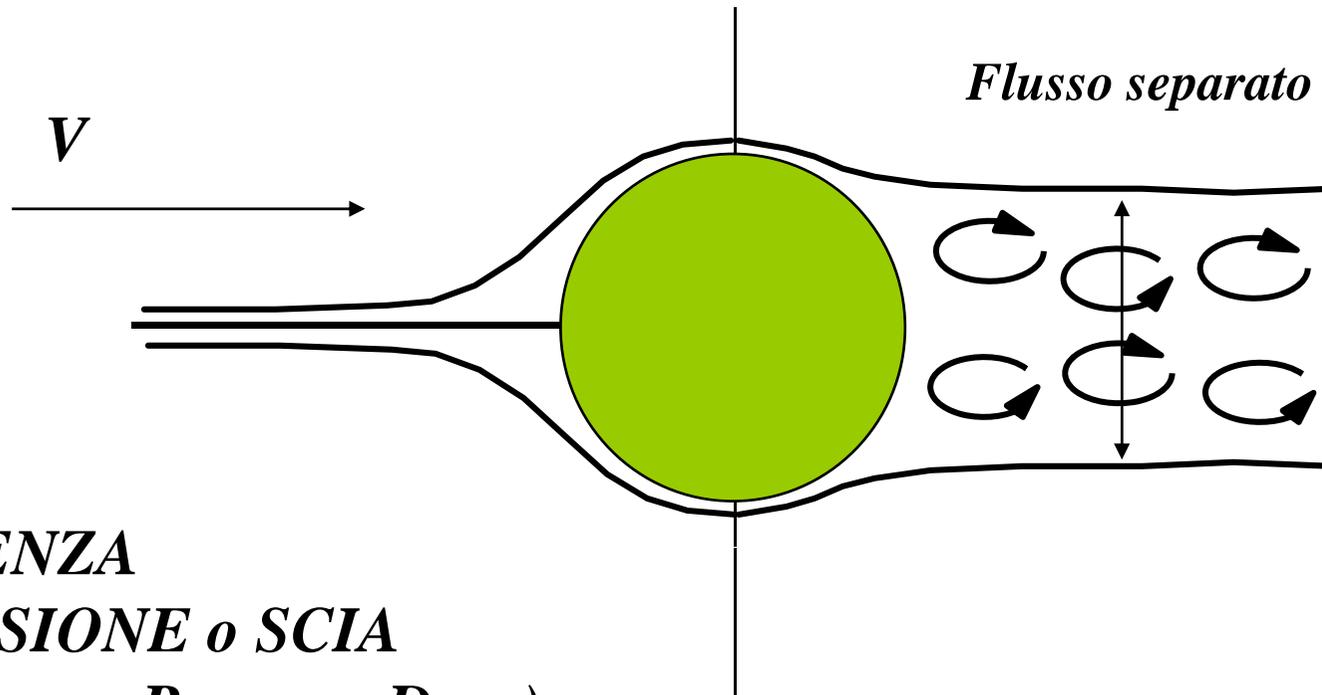
Lo strato limite non riesce a superare forti gradienti di pressione avversi e si separa. Il punto di separazione è quello in cui lo sforzo di attrito va a zero.



INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

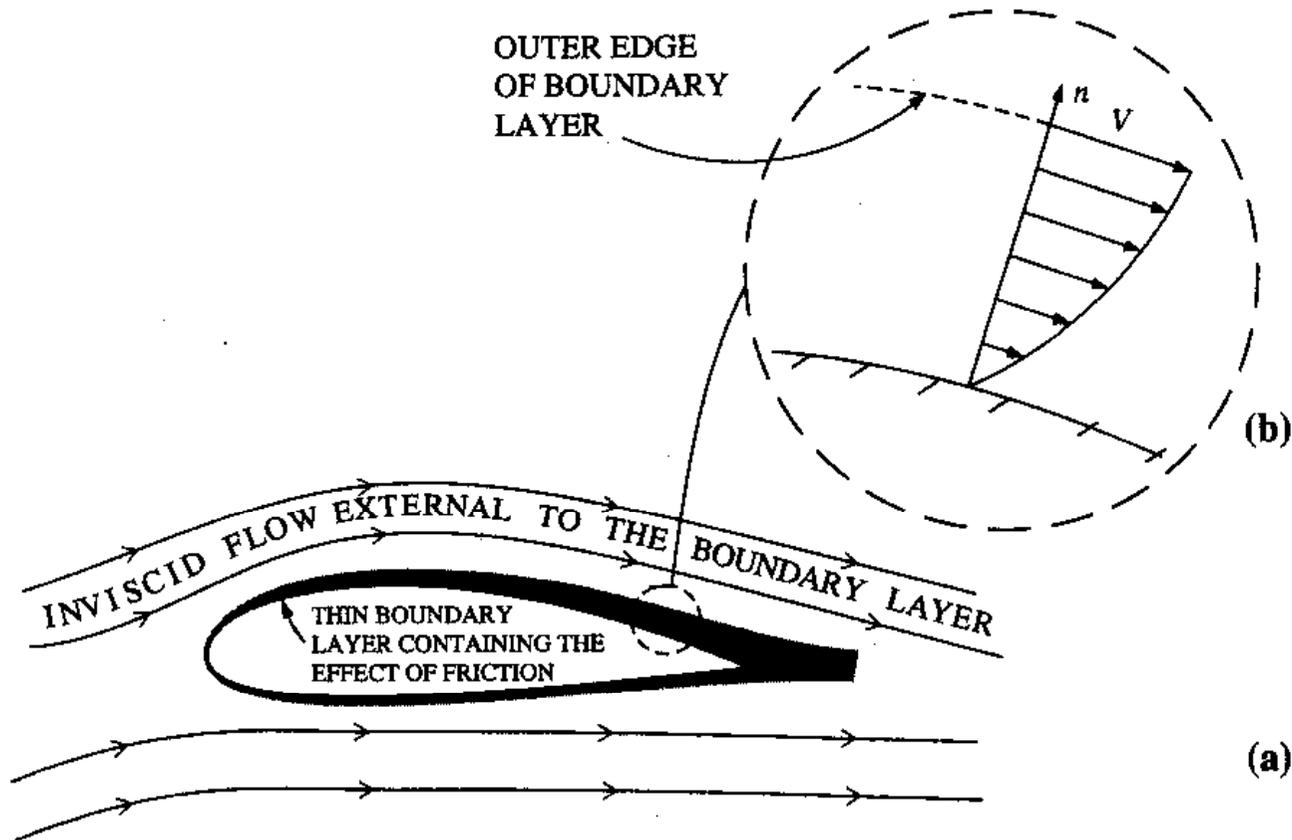
Flusso separato (*Separated flow*)

Sulla parte posteriore di un corpo tozzo c'è un forte gradiente di pressione avverso che il flusso non riesce a superare. Questo causa separazione del flusso.



**RESISTENZA
DI PRESSIONE o SCIA
(*Wake drag or Pressure Drag*)**

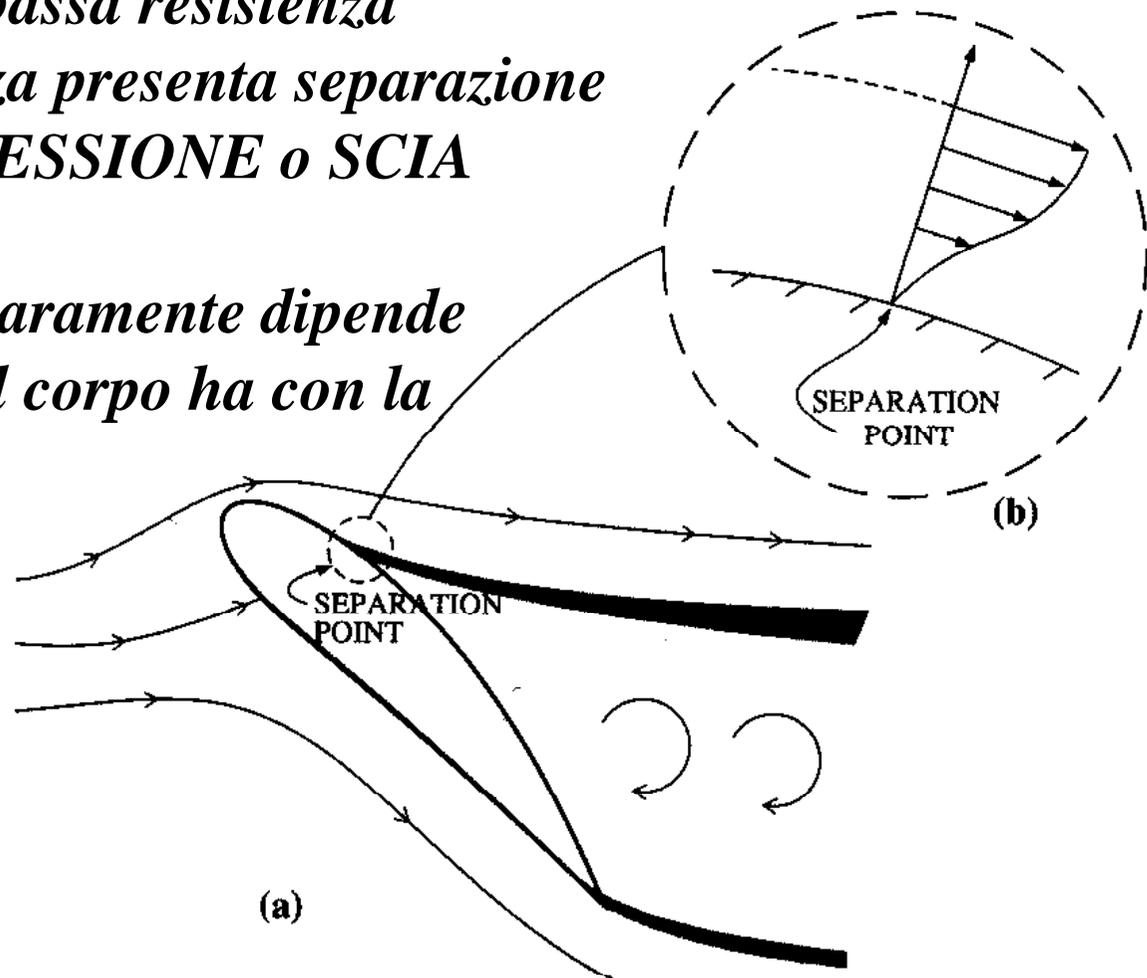
INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI



INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Anche un profilo (che è sottile) ed aerodinamicamente di bassa resistenza (attrito) ad alta incidenza presenta separazione e RESISTENZA DI PRESSIONE o SCIA

Quindi la resistenza chiaramente dipende anche dall'assetto che il corpo ha con la corrente



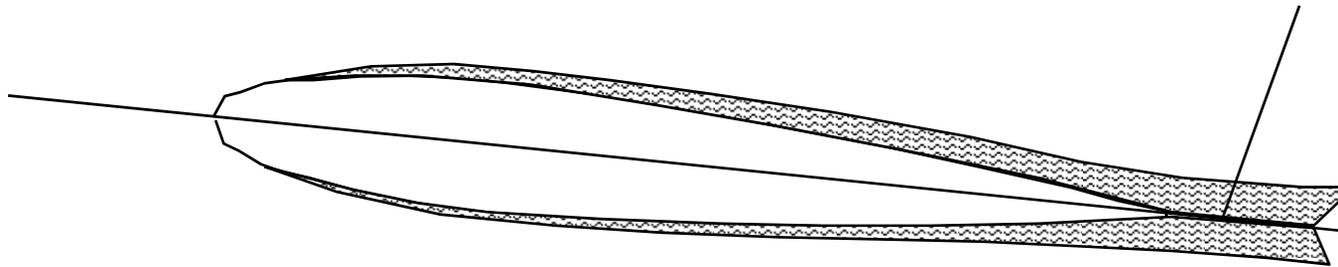
INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Flusso separato (*Separated flow*)

Analogamente , per questo profilo alare.

*Il flusso separato da origine ad una seconda fonte di resistenza, la resistenza di pressione o di scia (*wake drag*).*

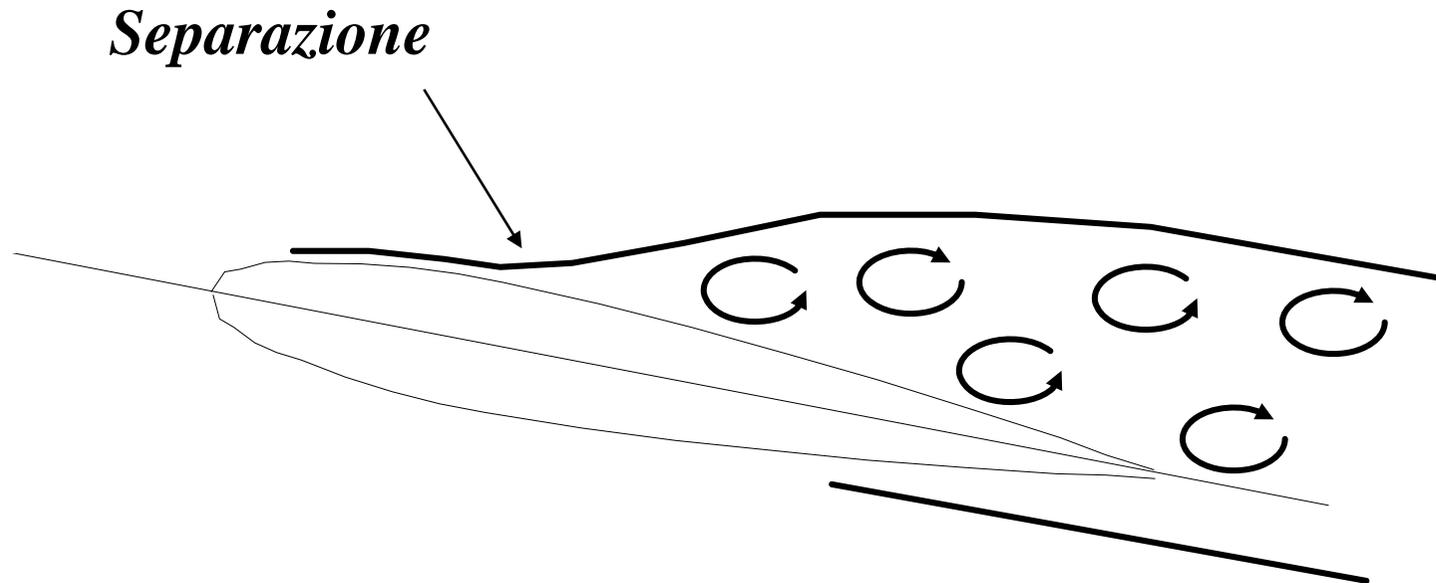
Scia del flusso separato



INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

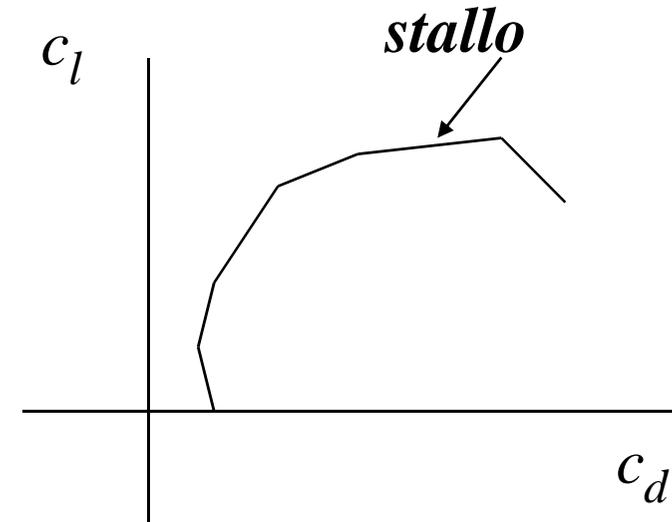
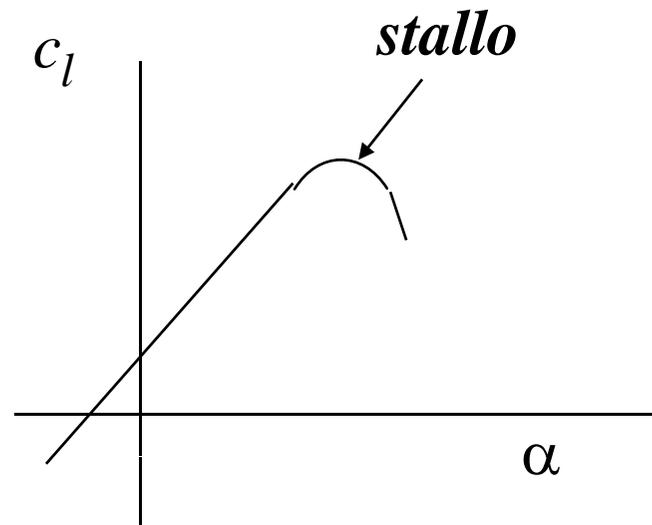
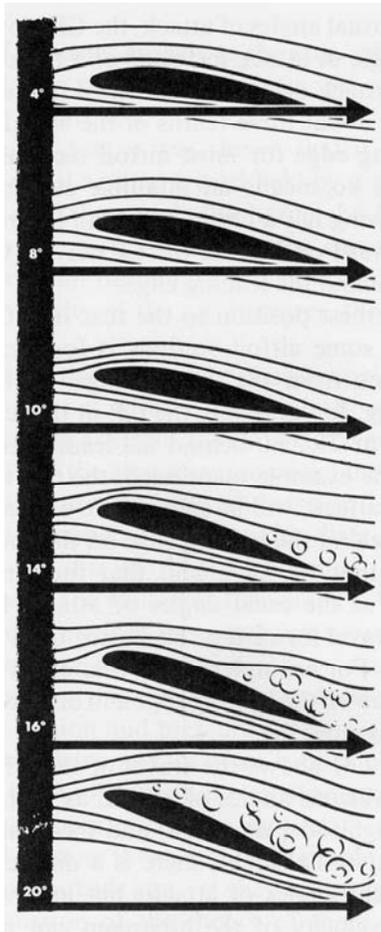
Flusso separato (*Separated flow*)

La separazione ad alti angoli di attacco per i profili ha importanti conseguenze; produce lo STALLO.



INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Flusso separato (*Separated flow*)



Nello stallo, un profilo vede ridurre la propria portanza e crescere fortemente la propria resistenza.

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Resistenza viscosa (*Viscous drag*)

La resistenza totale dovuta agli effetti viscosi è:

$$D_{viscous} = D_{skin\ friction} + D_{Pressure\ drag}$$

$$D_{viscosa} = D_{attrito} + D_{scia}$$

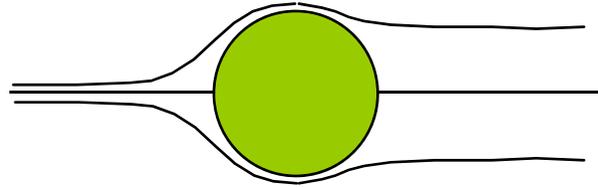
INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Resistenza viscosa (*Viscous drag*)

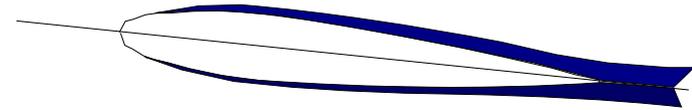
- Abbiamo due tipi di strato limite
“laminare” e “turbolento”
- Strato limite laminare (Laminar boundary layers)
 - Basso valore di resistenza di attrito
 - Non molto capace di superare gradienti avversi
 - Buono per profili ed oggetti aerodinamici
- Strato limite turbolento (Turbulent boundary layers)
 - Possiede alta energia in vicinanza della parete
 - Buone capacità di superare gradienti avversi e ritardare la separazione
 - Alta resistenza d'attrito
 - Buono per corpi tozzi (esempio della pallina da golf).

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

Resistenza viscosa (Viscous drag)



Corpo tozzo (Blunt)



Aerodinamico (Streamlined)

Skin Friction:

Poco importante

Molto importante

Pressure Drag:

Molto importante

Poco importante

*Strato limite
desiderato:*

Turbulento

Laminare

INTRODUZIONE AI FLUSSI VISCOSI

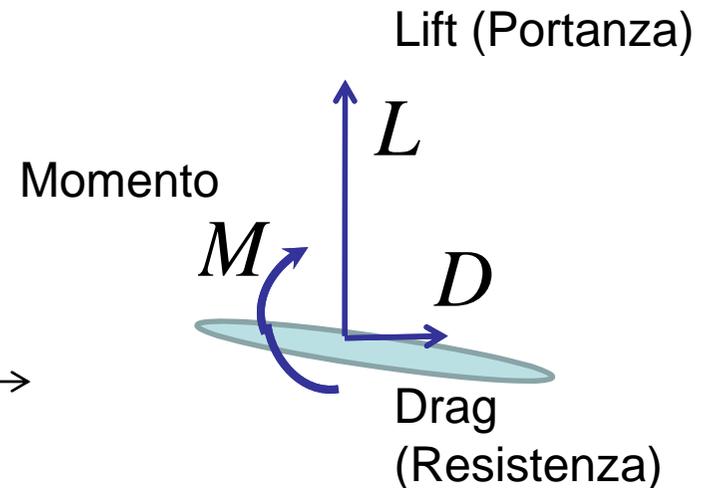
COEFFICIENTI AERODINAMICI

$$C_L = \frac{L}{q \cdot S}$$

$$C_D = \frac{D}{q \cdot S}$$

$$C_M = \frac{M}{q \cdot S \cdot c}$$

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$



$$C_l = \frac{l}{q \cdot c \cdot 1}$$

**Nel caso 2-D al posto di S si sostituisce
S = corda x apertura unitaria e si parla di coefficienti
bidimensionali (per unità di apertura)**

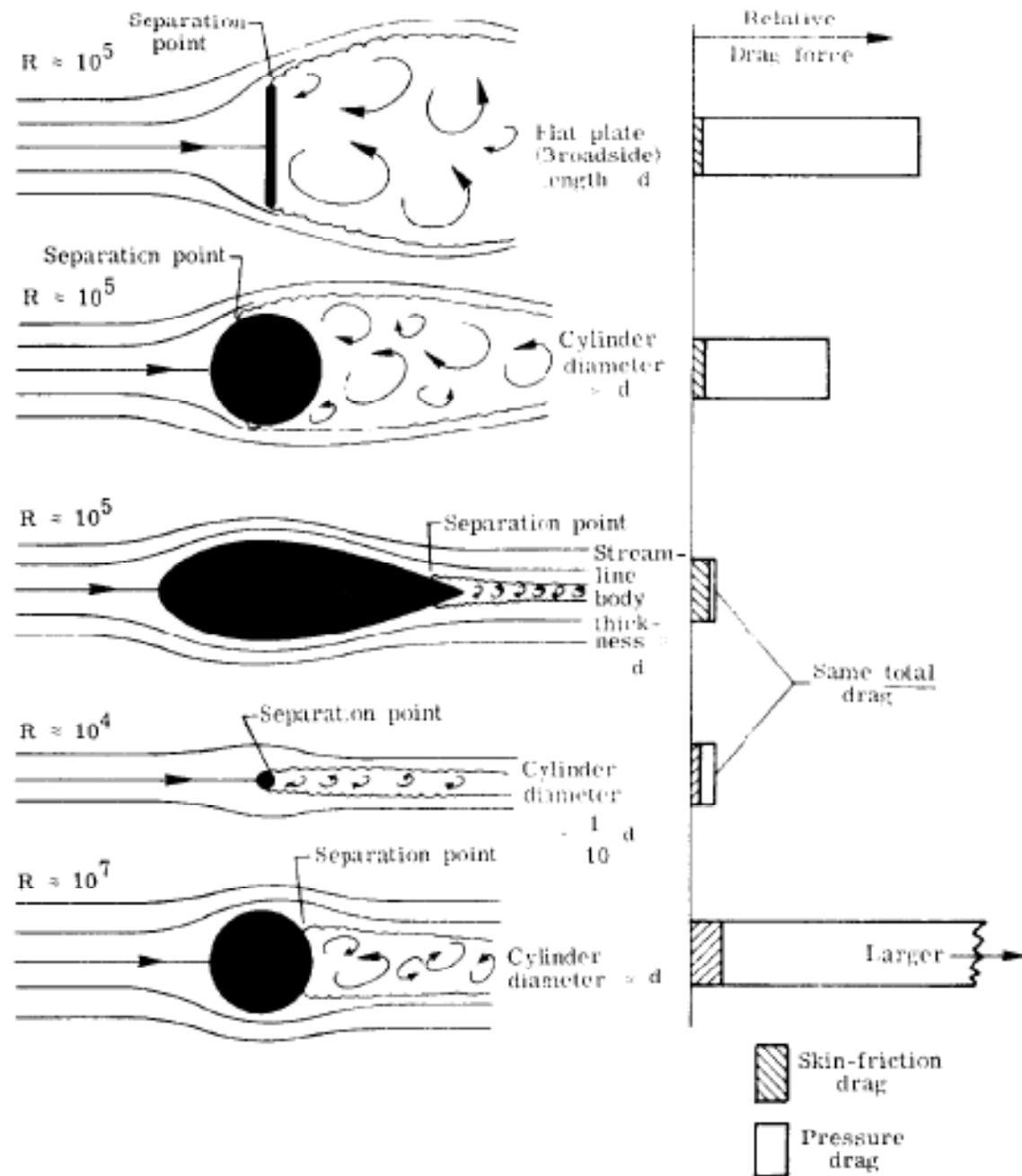


Figure 37.- Effects of streamlining at various Reynolds numbers.

Coefficiente di resistenza – Effetto del Reynolds

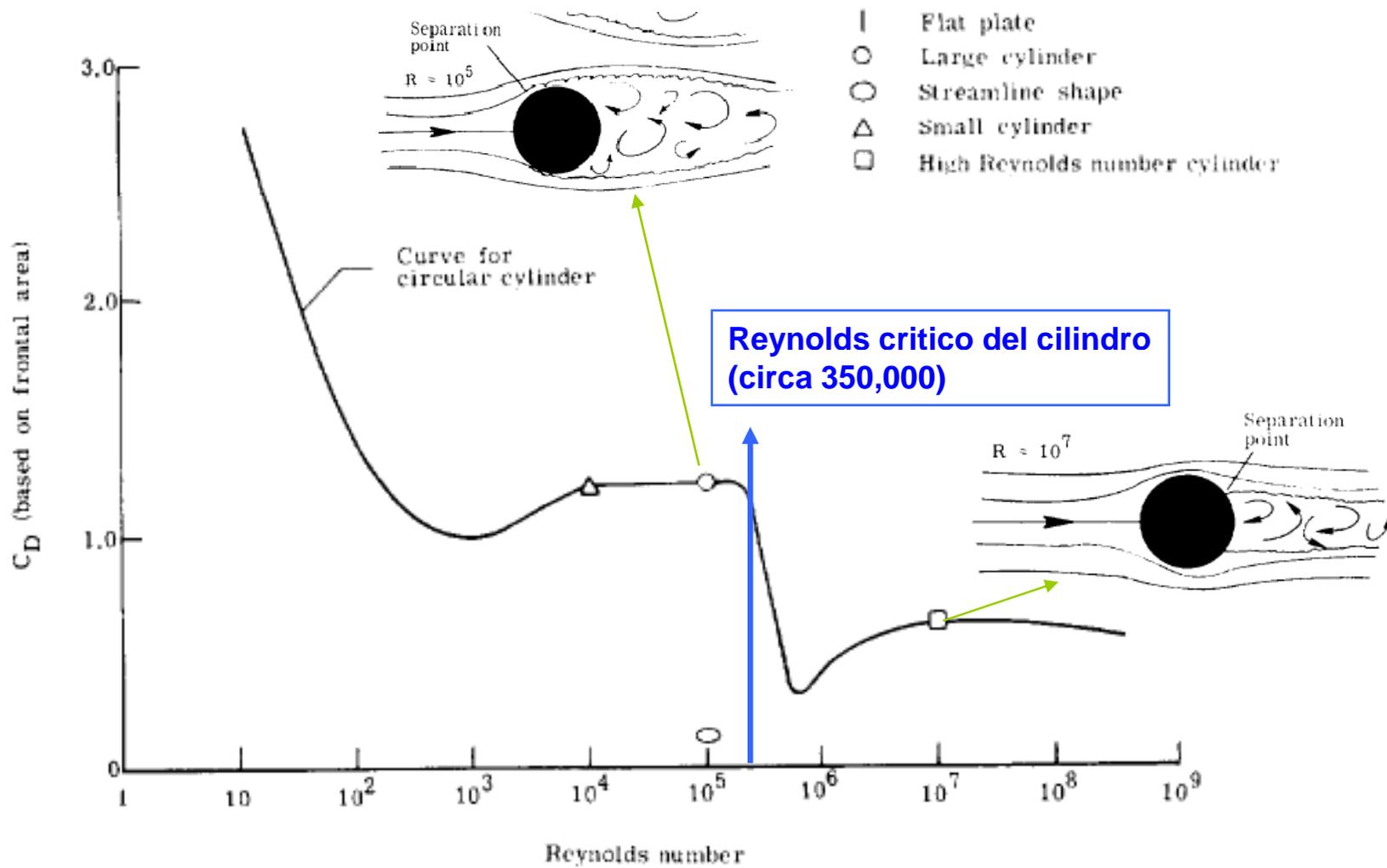
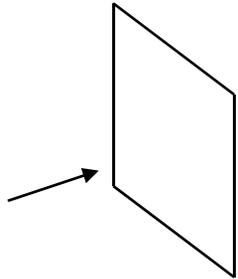


Figure 39.- Drag coefficients as function of Reynolds number.

Coefficienti di resistenza 2D

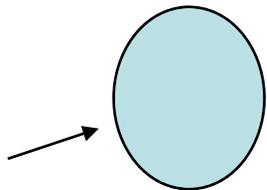
Valori 3D

(si vede che sono circa 1/2 dei corrispondenti valori 2D)



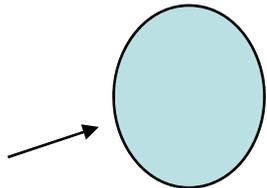
Lastra piana rettangolare

$C_D = 1.20$
Sempre $Re = 10^5$)



Sfera (regime subcritico)

$C_D = 0.50$
 $Re = 10^5$



Sfera ($Re > Re_{cr}$)

$C_D = 0.20$
 $Re > 3 \cdot 10^5$

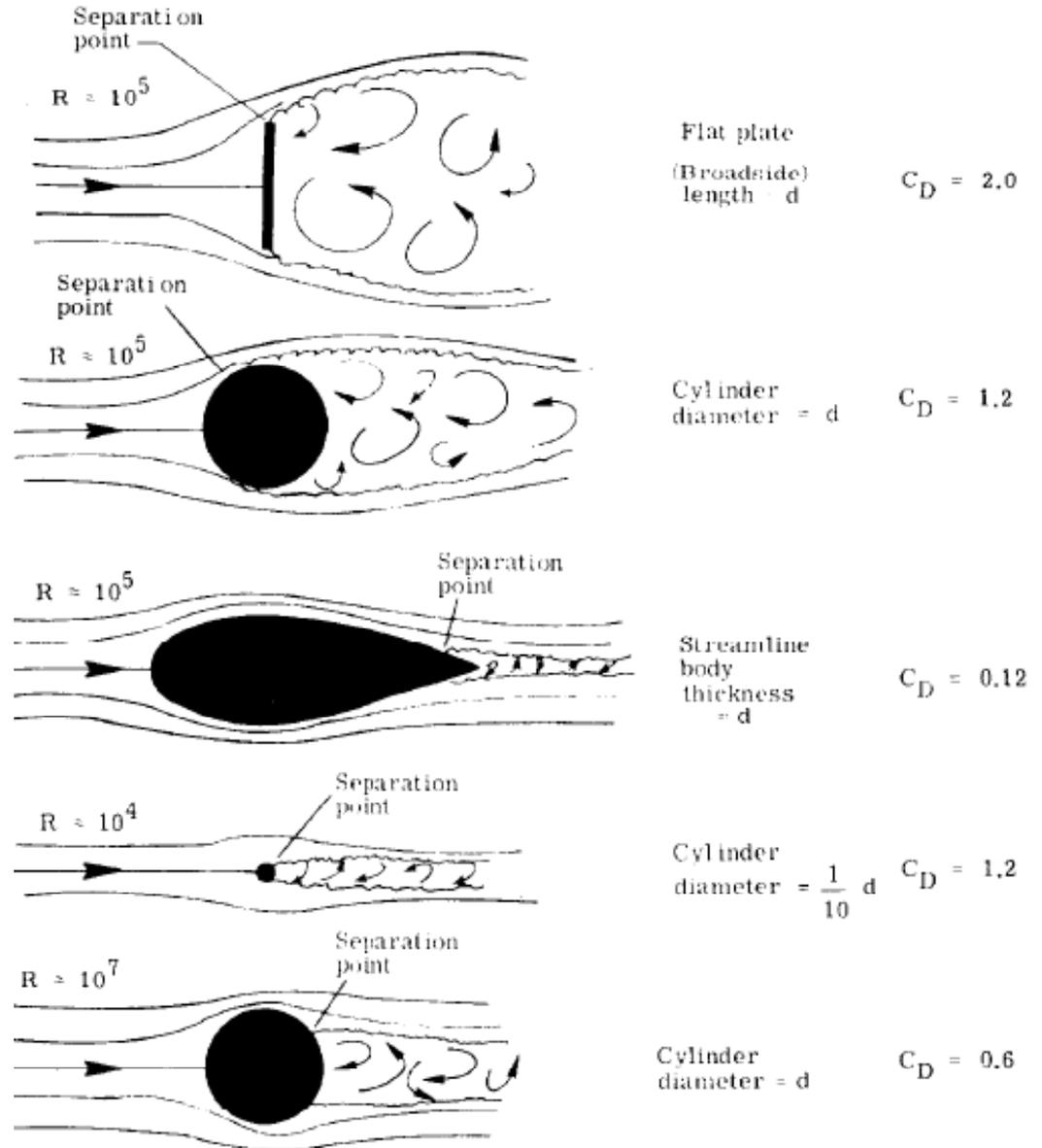
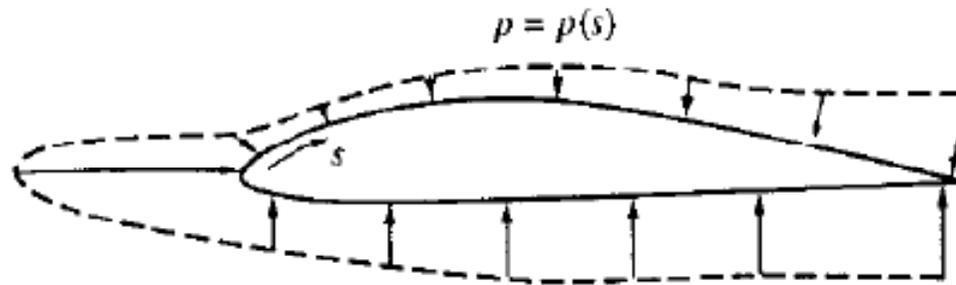


Figure 38.- Drag coefficients of various bodies.

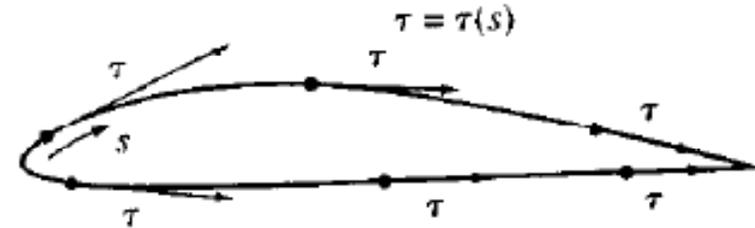
FORZE AERODINAMICHE

$$\mathbf{R} = \iint_S p \mathbf{n} dS + \iint_S \tau \mathbf{k} dS$$

Force due to pressure Force due to friction

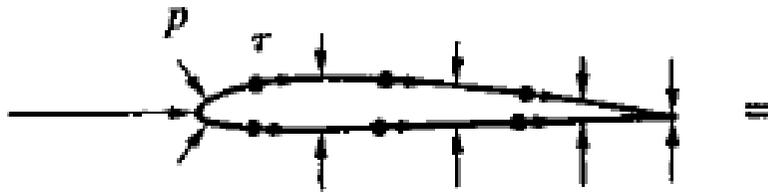


(a) Pressure distribution (schematic only; distorted for clarity)

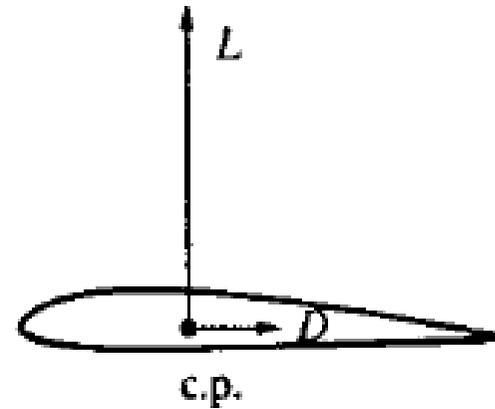


(b) Shear stress distribution

FORZE AERODINAMICHE

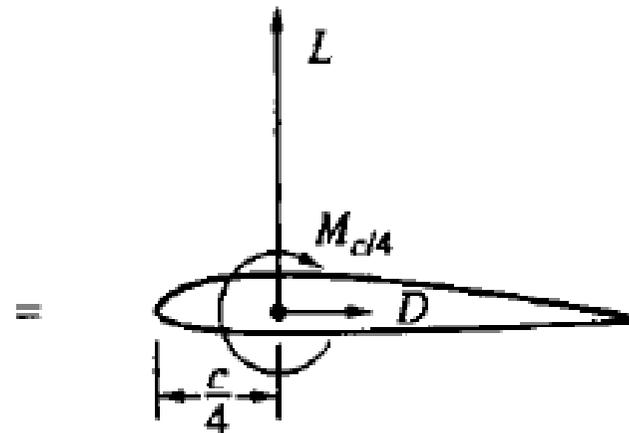


(a) Distributed load



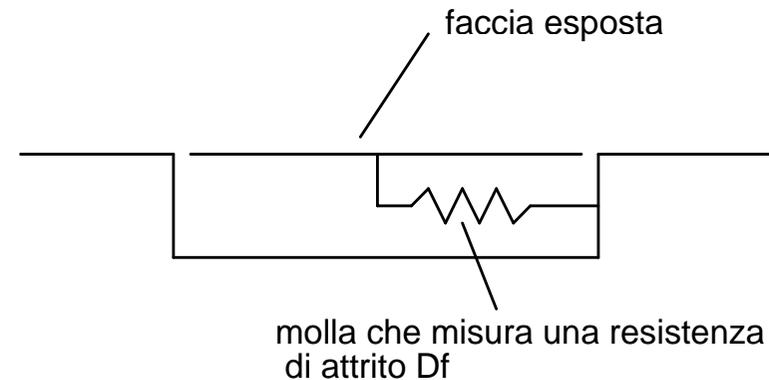
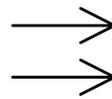
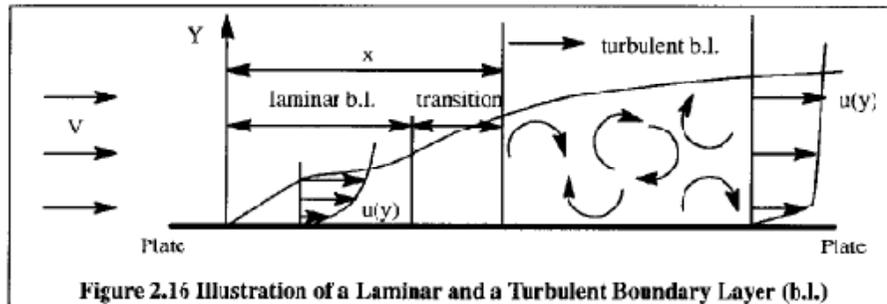
(b) Concentrated force acting through the center of pressure

=> **PORTANZA**
=> **RESISTENZA**
=> **MOMENTO**



FORZE AERODINAMICHE

Attrito e coeff. d'attrito



FLUSSO LAMINARE

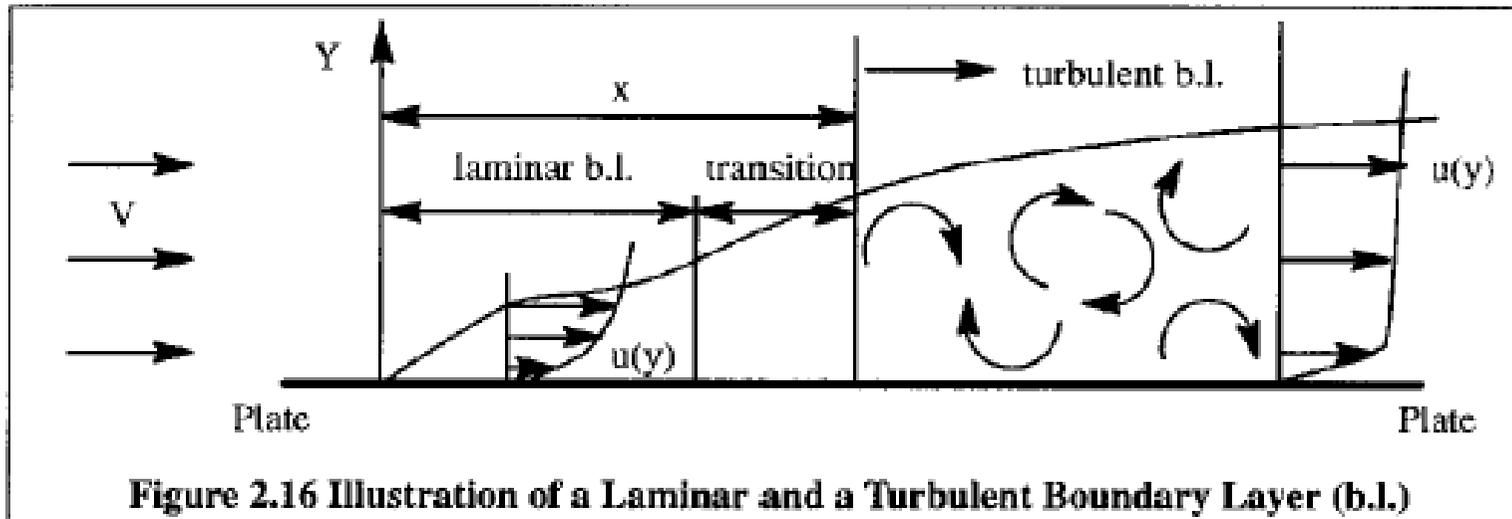
$$c_f = \frac{D_f}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} = \frac{1.328}{\sqrt{R_N}}$$

FLUSSO TURBOLENTO

$$c_f = \frac{0.455}{(\log_{10} R_N)^{2.58}}$$

FORZE AERODINAMICHE

Attrito e coeff. d'attrito

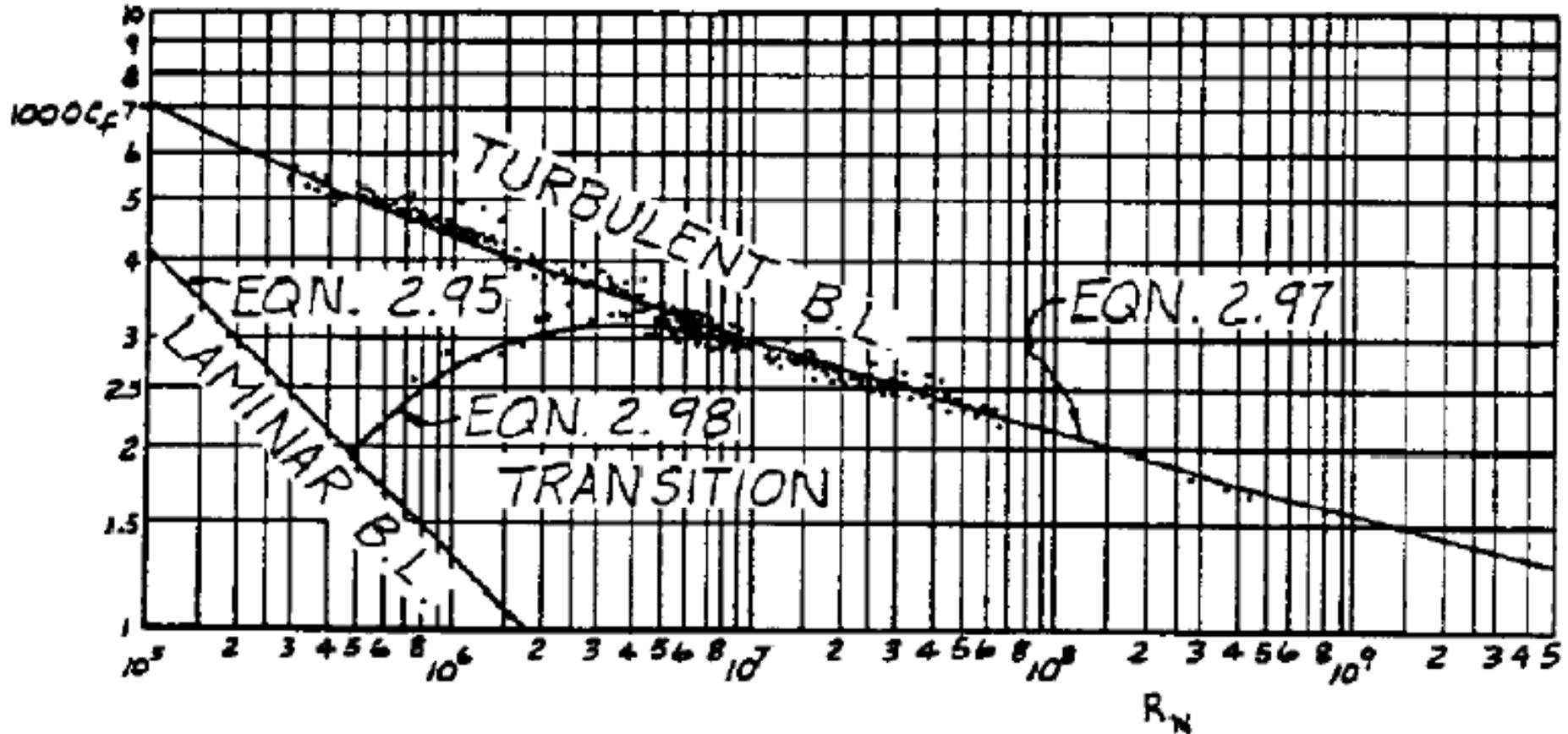


Transizione da flusso laminare a turbolento. In assenza di forti rugosità (transizione imposta) e in assenza di gradienti di pressione (lastra piana appunto) la transizione avviene ad una x tale che il Reynolds locale ha raggiunto un valore tra 0.35 ed 1 milione.

$$\left(R_{N_x}\right)_{\text{crit.}} = \left(V \frac{x}{\nu}\right)_{\text{crit.}} \approx 3.5 \times 10^5 \text{ to } 10^6$$

FORZE AERODINAMICHE

Attrito e coeff. d'attrito



FLUSSO LAMINARE

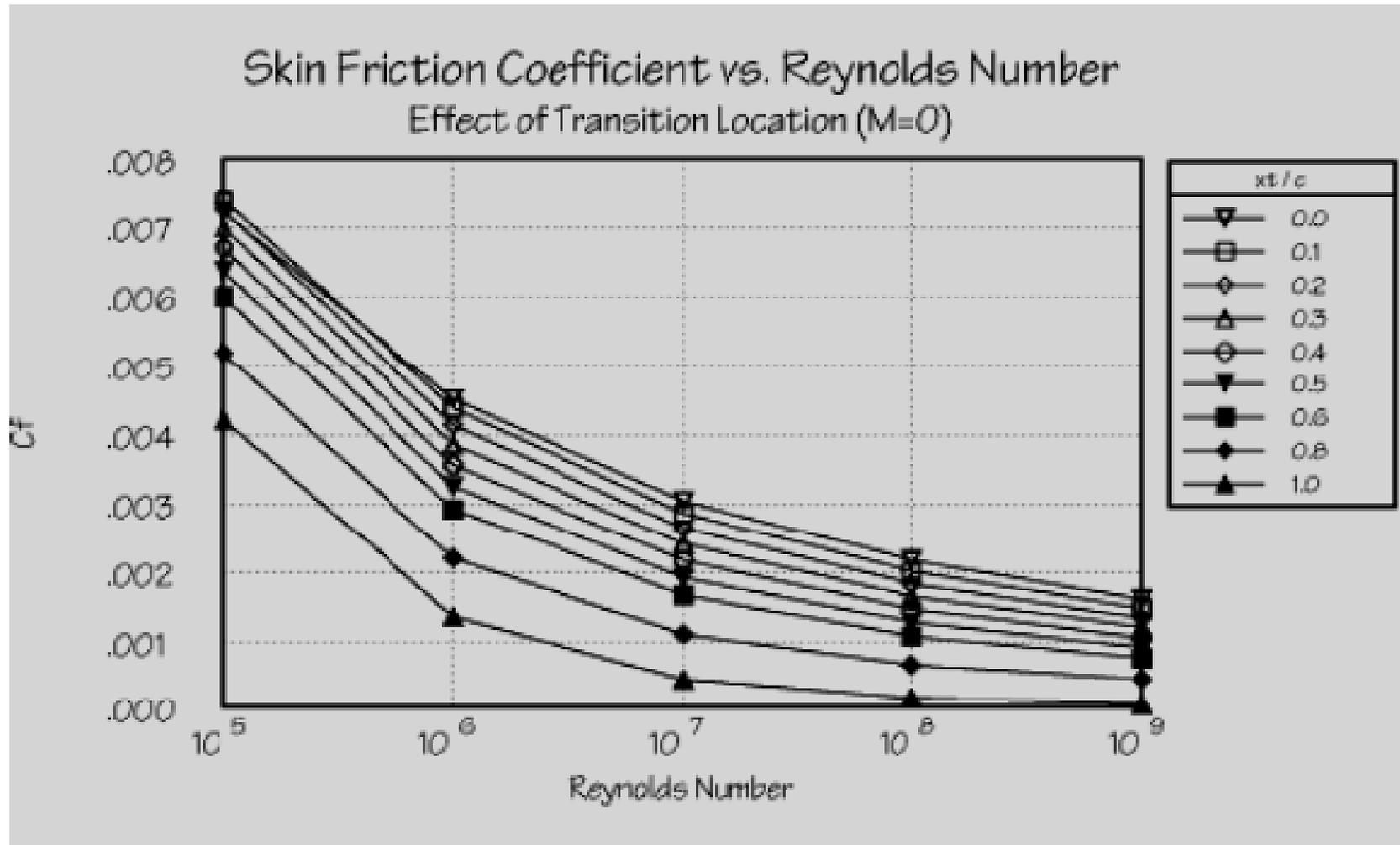
$$c_f = \frac{D_f}{\frac{1}{2}\rho V^2 S} = \frac{1.328}{\sqrt{R_N}}$$

FLUSSO TURBOLENTO

$$c_f = \frac{0.455}{(\log_{10} R_N)^{2.58}}$$

FORZE AERODINAMICHE

Attrito e coeff. d'attrito – effetto transizione



FORZE AERODINAMICHE

Attrito e coeff. d'attrito – effetto transizione

Per calcolare la resistenza di attrito di una lastra in presenza di transizione (parte laminare e parte turbolenta) possiamo usare il diagramma precedente per calcolare un c_f “medio” in relazione al peso della parte laminare rispetto a quella turbolenta.

A rigore per calcolare l'attrito di una lastra piana in presenza di transizione si dovrebbe seguire tale procedura:

$$D = D_1 + (D_2 - D_3)$$

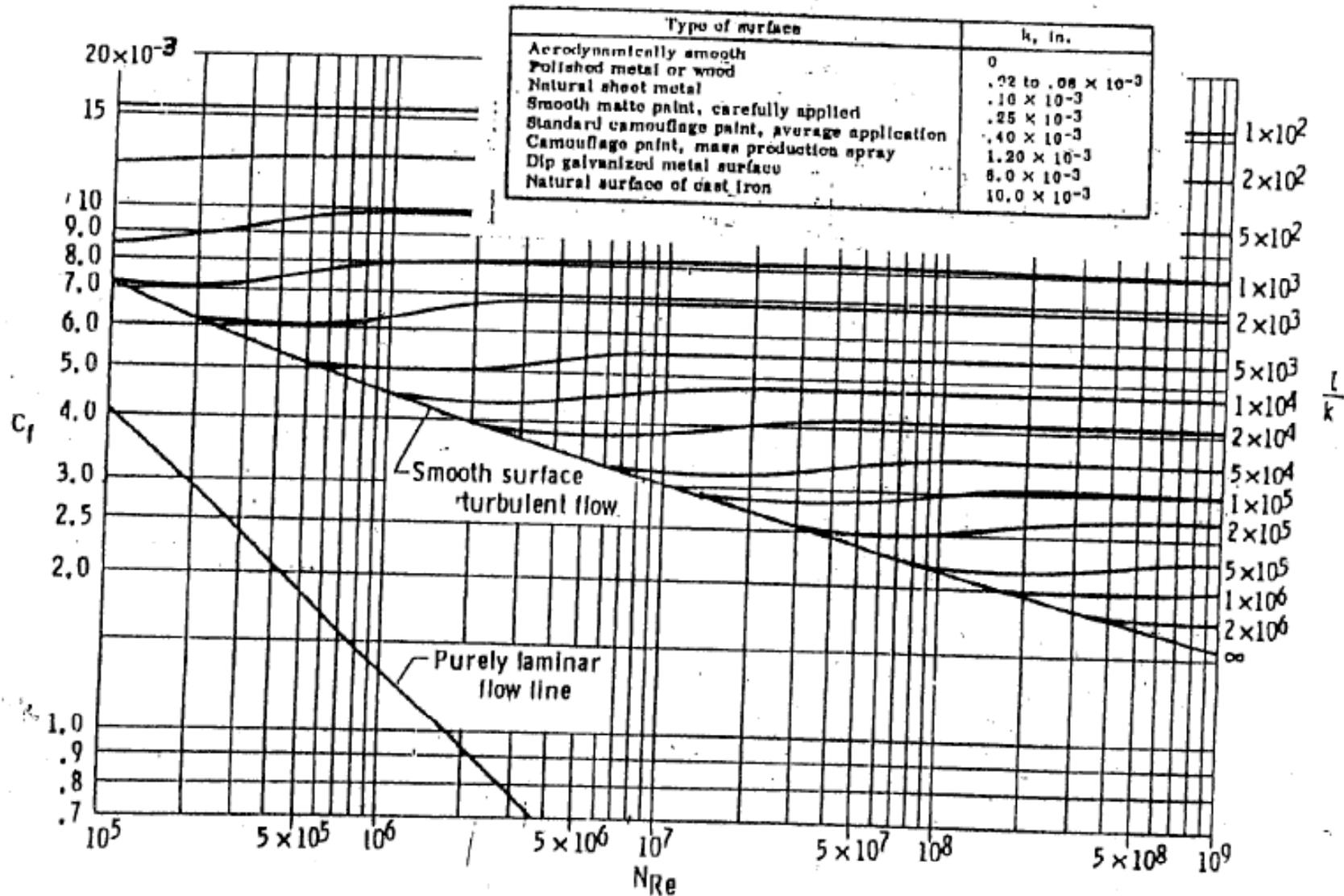
D1: Resistenza di attrito della parte di lastra operante in regime laminare (usare la formula laminare con Reynolds calcolato basato sulla distanza di trans x_{tr})

D2: Resistenza di attrito di tutta la lastra operante in regime turbolento

D3: Resistenza di attrito del primo tratto di lastra operante in regime turbolento (come D1 ma con la formula del c_f turbolento).

FORZE AERODINAMICHE

Attrito e coeff. d'attrito – effetto rugosità superficiale



FORZE AERODINAMICHE

Esempi calcolo resistenza

RESISTENZA DI SCIA

- Dato un palo di diametro pari a 30 cm con vento pari a 100 Km/h (assumere quota $h=0$), calcolare la resistenza per unità di lunghezza (resistenza 2D)
- Calcolare la resistenza offerta da un cartello stradale di dimensioni 30cm x 30 cm con vento pari a 100 Km/h

RESISTENZA DI ATTRITO

- 3) Calcolare la resistenza di attrito (2D, quindi per unità di lunghezza) di una lastra piana di 1 m di corda con velocità del vento pari a 50 m/s. Assumere strato limite tutto turbolento.
- 4) Stesso caso di prima ma con transizione al 20% della lunghezza.
- 5) Assumendo un Reynolds di transizione pari a 1 milione, calcolare la transizione e valutare la resistenza.