

Resistenza e Portanza

Definizioni

Forze e momenti sui corpi in moto relativo

Coefficienti di resistenza e di portanza

Forme affusolate e corpi tozzi

Separazione della corrente

Resistenza di attrito e di forma

Coefficienti di resistenza per le forme più comuni

Resistenza della lastra piana

Resistenza di cilindri e sfere

Effetto della scabrezza sui corpi tozzi

N.B.: Questo indice NON è esaustivo e NON sostituisce il libro di testo

Alcune immagini sono prese dal libro di testo (Meccanica dei Fluidi, Y.A.Cengcek e J.M. Cimballa, Ed. It G. Cozzo e C. Santoro) per scopi didattici

Definizione

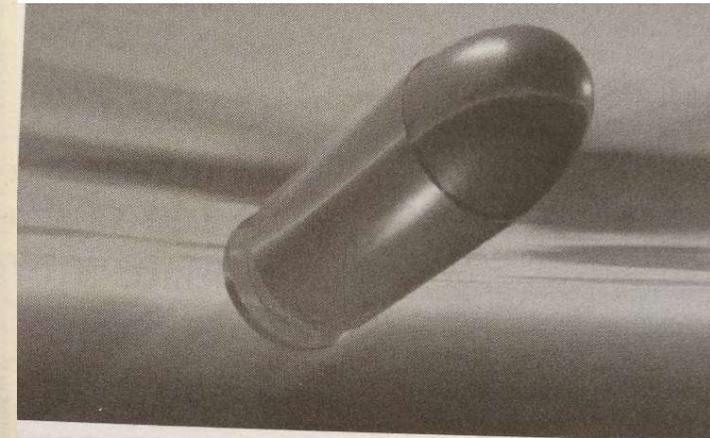
Il moto di un fluido intorno ad un corpo (fermo o in moto relativo rispetto al fluido) sviluppa una forza di trascinamento che può essere non allineata alla direzione del moto.

Esempi:

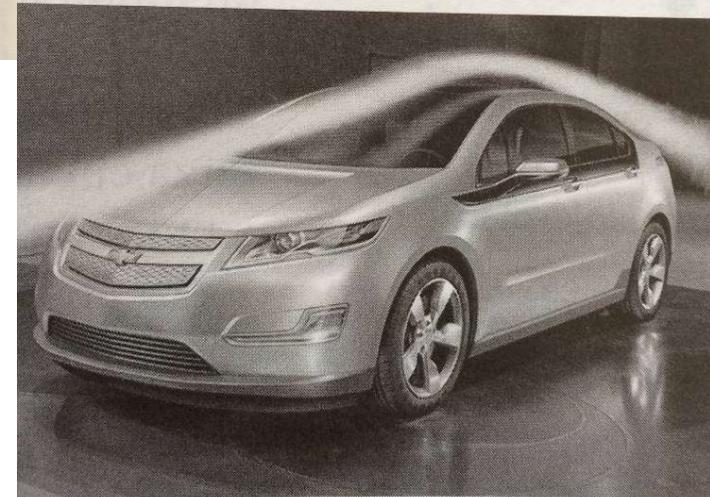
Azione del vento sulle strutture
edifici,
cavi elettrici,
ciminiere,
strutture di ponti
.....



Azioni fluidodinamiche intorno a corpi mobili:
aerei, navi, automobili
proiettili
particelle solide trasportate dal vento in aria
particelle portate all'interno dei polmoni
.....



(b) proiettile



(c) automobile

Impostazione del problema

Nei casi generali il moto è non stazionario e tridimensionale, in quanto:

- tale è la turbolenza anche nel caso in cui il moto è in media riconducibile ad un moto stazionario uni- o bi-dimensionale
- Possono essere presenti fenomeni non stazionari non riconducibili ad un moto medio (per esempio un aereo in fase di decollo o atterraggio, una automobile in fase di accelerazione, un sommergibile in fase di risalita...)
- Quando le condizioni di progetto lo permettono, si cerca di schematizzare il problema, considerando:
 - il moto stazionario
 - sfruttando tutte le simmetrie geometriche possibili per ridurre il numero di direzioni spaziali (simmetria assiale...)
 - Il flusso incomprimibile

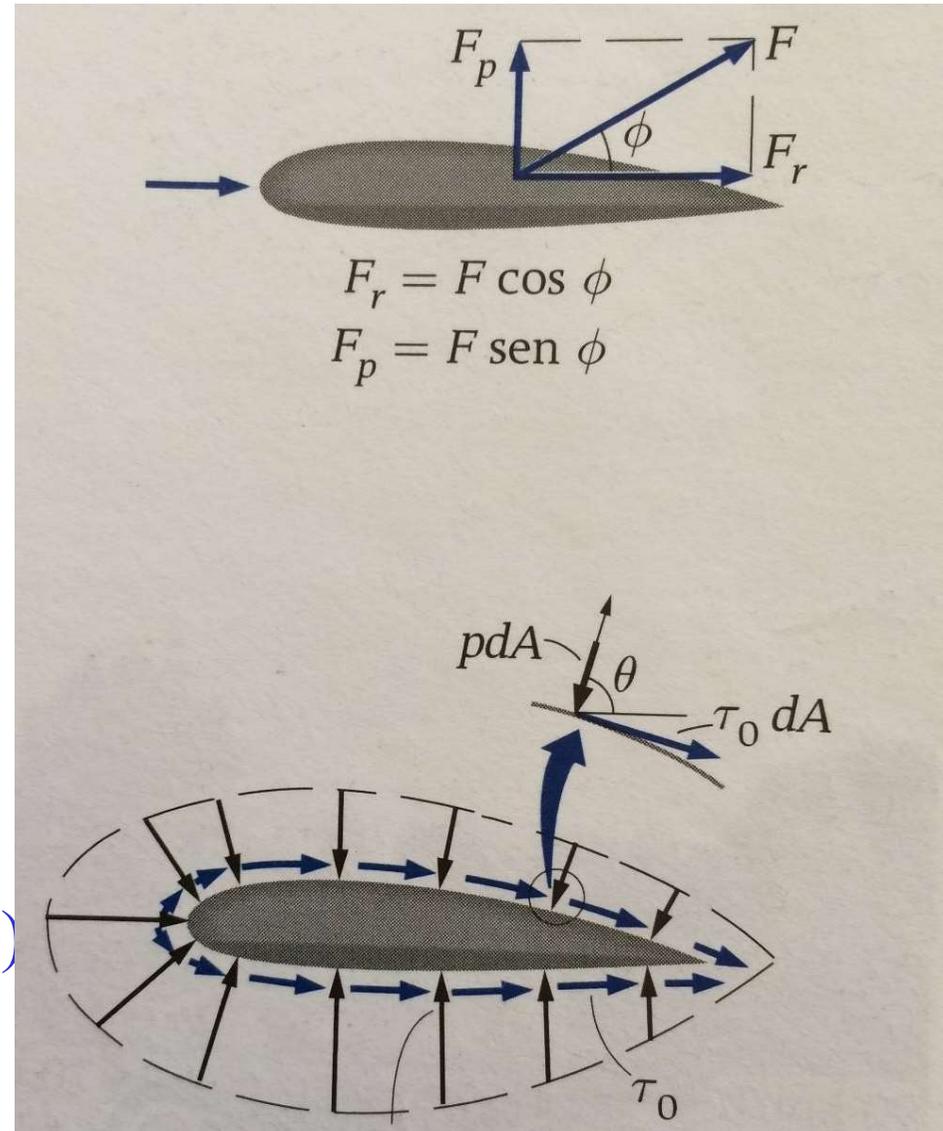
Forze sui corpi in moto relativo

Un corpo ha una forma **aerodinamica** quando le sue linee geometriche sono allineate alla direzione media del flusso.

Un corpo ha una forma tozza, se provoca una forte variazione delle linee di corrente
Nota: un corpo di forma aerodinamica può comportarsi come un corpo tozzo se disposto trasversalmente rispetto alla direzione della corrente

Forza risultante scomponibile in:

- Resistenza (in direzione del moto medio)
- Portanza (in direzione, verticale, ortogonale al moto medio)
- Forza laterale, in direzione ortogonale al piano contenente le due forze)



Momenti sui corpi in moto relativo

Le forze che si sviluppano generano

Momenti di rotazione:

Momento di rollio, intorno alla direzione del moto medio

Momento di imbardata, intorno alla direzione della portanza

Momento di beccheggio intorno alla direzione della forza laterale

Per un corpo in moto in un fluido altrimenti in quiete:

Il momento di rollio e il momento di imbardata sono nulli
se il corpo ha simmetria rispetto al piano che contiene la resistenza

Se il corpo ha simmetria assiale è disposto con l'asse parallelo alla
direzione del moto, unica forza presente è la resistenza

Calcolo delle forze

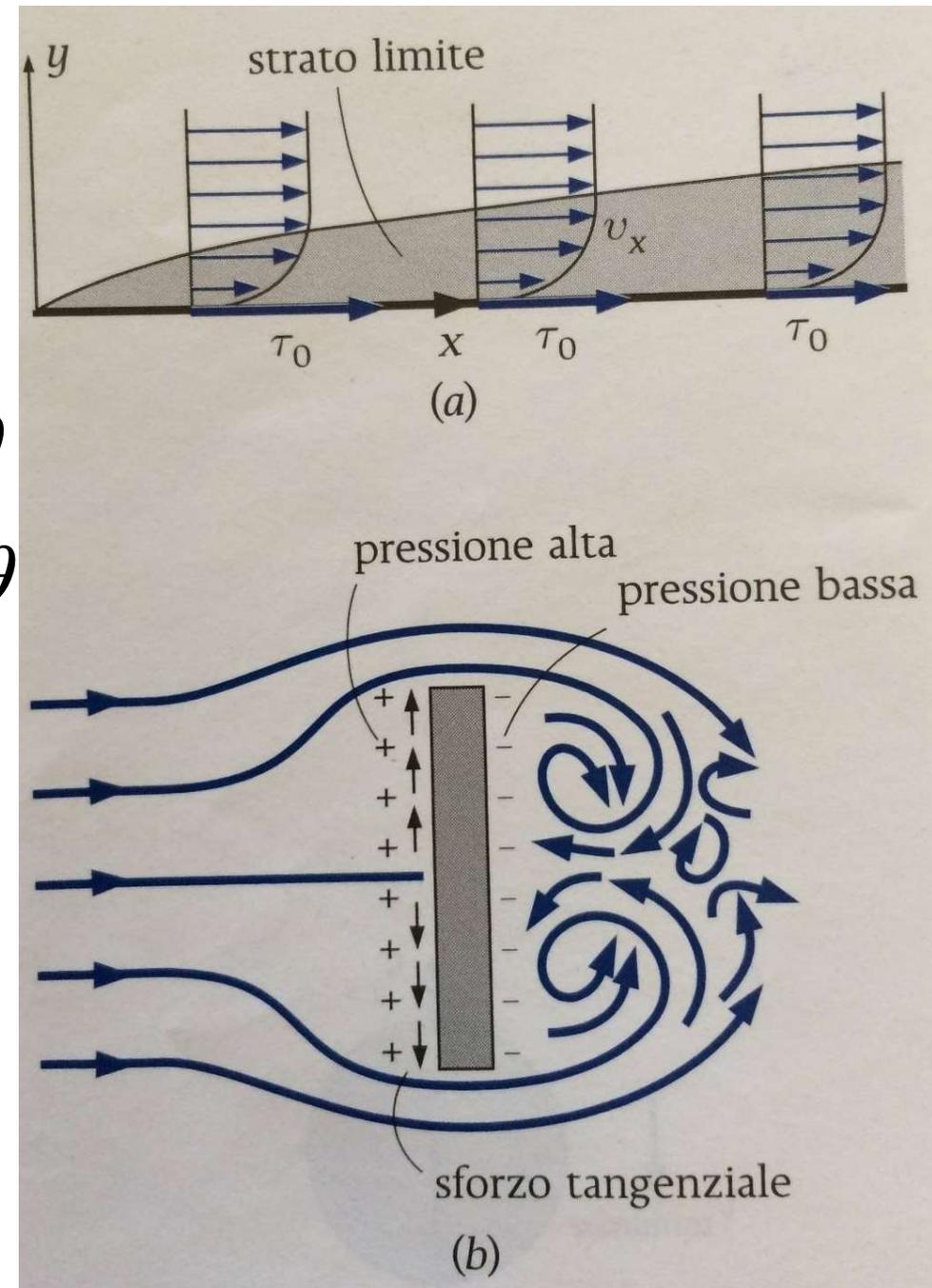
Se θ è l'angolo formato tra la normale all'elementino dA e la direzione del moto medio, la forza elementare è scomponibile in:

$$dF_r = -pdA \cos \theta + \tau_0 dA \sin \theta$$

$$dF_p = -pdA \sin \theta + \tau_0 dA \cos \theta$$

e, integrando su tutta la superficie, si ottengono F_r e F_p

In pratica tale calcolo è possibile se si conoscono le distribuzioni spaziali degli sforzi sul corpo (per esempio Mediante simulazione numerica)



Contributi alle forze

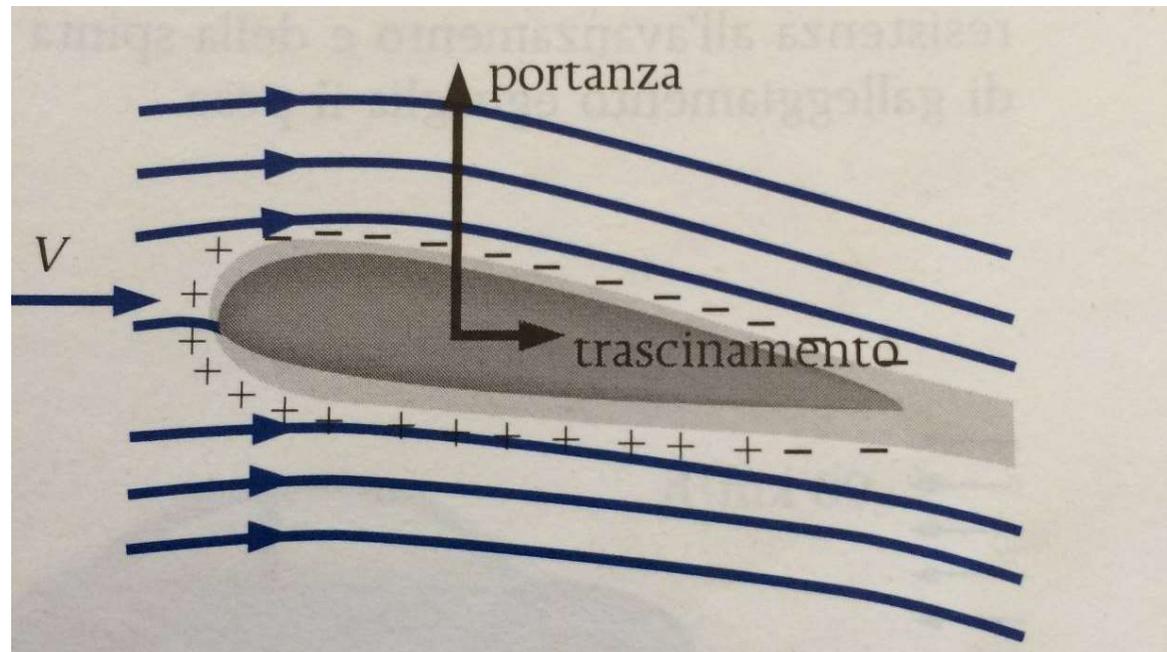
L'attrito contribuisce a :

- quasi totalità della resistenza su corpi affusolati disposti lungo le linee di flusso

La pressione contribuisce:

- in maniera significativa alla resistenza per corpi tozzi
- praticamente totalmente allo sviluppo della portanza

La portanza può essere determinata con buona approssimazione utilizzando la teoria dei fluidi ideali e applicando il teorema di Bernoulli sulle linee di corrente al di sotto e al di sopra del corpo



Coefficienti

E' opportuno esprimere in forma adimensionale le forze introducendo, rispettivamente, il coefficiente di resistenza e di portanza:

$$C_r = \frac{F_r}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

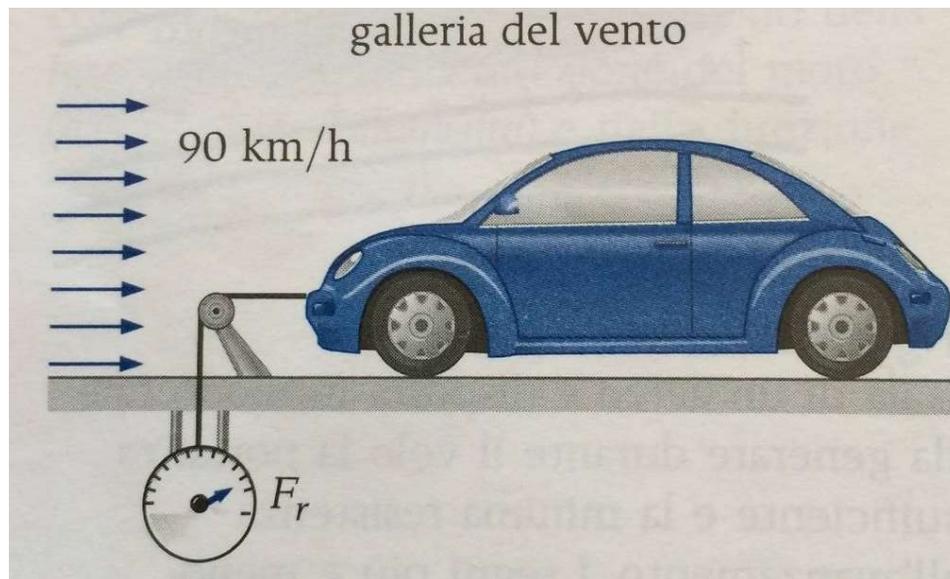
$$C_p = \frac{F_p}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

V è la velocità della corrente e A (per corpi affusolati) è l'area proiettata sulla direzione del moto

Tali coefficienti si determinano in generale per via sperimentale

ESEMPIO 11.1 Determinazione del coefficiente di resistenza di un'automobile

Per determinare il coefficiente di resistenza di un'automobile, vengono condotti dei test in galleria del vento, in scala 1:1. Provando nelle condizioni di pressione $p = p_{\text{atm}}$, temperatura $T = 21^\circ\text{C}$ e velocità $V = 90\text{ km/h}$ (Figura 11.9), viene misurata un'azione di trascinamento $F_r = 265\text{ N}$. L'area frontale dell'automobile è $A = 2,07\text{ m}^2$. Determinare il coefficiente di resistenza C_r .



Ipotesi **1** Il moto è permanente e l'aria è incompressibile. **2** La sezione trasversale della galleria del vento è grande abbastanza da poter considerare indefinito il campo di moto dell'aria attorno all'automobile. **3** L'auto poggia su un tapis roulant che scorre alla stessa velocità dell'aria, per simulare le reali condizioni di moto.

Proprietà La densità dell'aria a 1013 hPa e a 21°C è $\rho = 1,20\text{ kg/m}^3$.

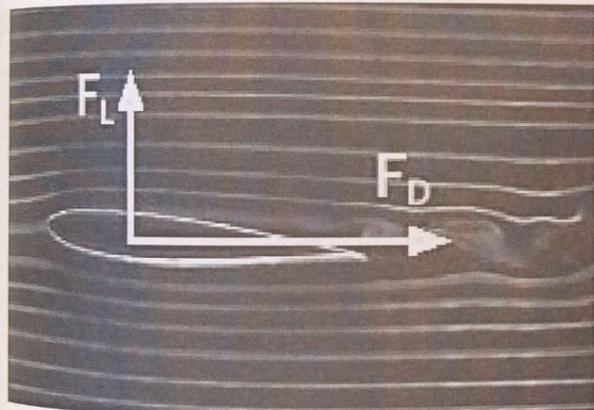
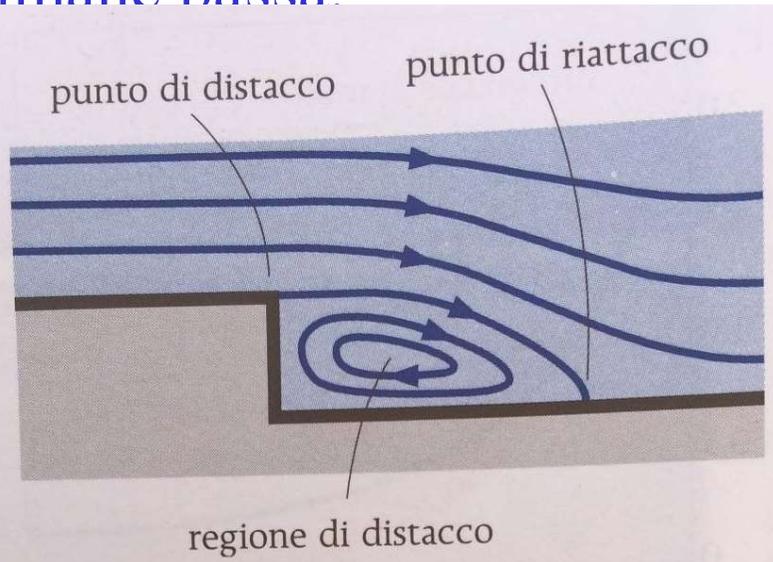
Analisi Per la 11.5, si ha

$$C_r = \frac{2F_r}{\rho V^2 A} = \frac{2 \times 265}{1,2 \times \left(\frac{90 \times 1000}{3600}\right)^2 \times 2,07} = 0,341$$

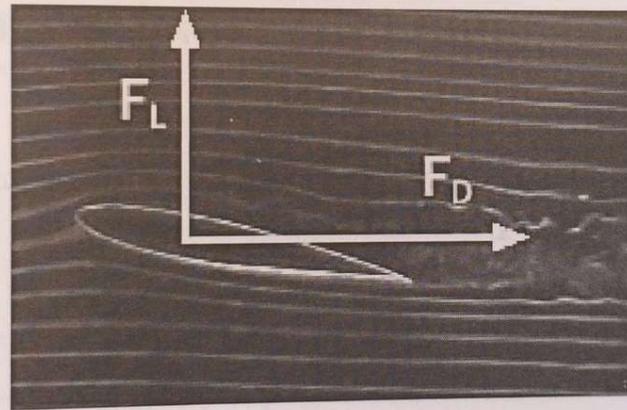
Discussione Il valore del coefficiente di resistenza dipende dalle condizioni di prova e varia al variare di tali condizioni, per esempio con il numero di Reynolds. Quindi, il confronto tra i valori del coefficiente di resistenza di automobili diverse è significativo solo se tali coefficienti sono stati determinati nelle stesse condizioni. Questo dimostra l'importanza dello sviluppo di procedure standard di test.

Separazione della corrente

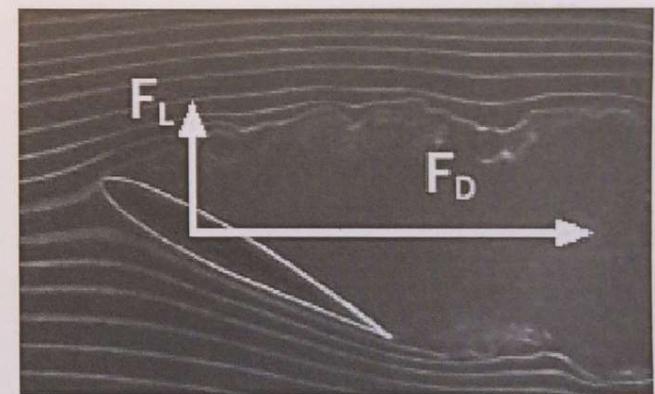
Quando le linee geometriche del corpo non sono allineate lungo le linee di flusso, le linee di corrente non riescono a deviare su curvature molto forti e il flusso si separa, formando vortici a bassa velocità nei quali la pressione rimane bassa.



(a) 5°



(b) 15°



(c) 30°

Resistenza di attrito e di forma

Per quanto detto, a seconda della forma del corpo rispetto alla direzione della corrente, le linee di corrente possono:

- fluire lungo la direzione del moto parallele alla superficie del corpo
- allontanarsi dal corpo, generando, a valle, ampie zone di flusso vorticoso (dette zone di separazione) nelle quali le velocità sono molto basse e la pressione stessa è molto bassa.

Nel primo caso, la resistenza è dovuta essenzialmente all'attrito
(resistenza di attrito)

Nel secondo caso la resistenza è dovuta essenzialmente alla caduta di pressione tra la parte anteriore del corpo e la parte posteriore
(resistenza di forma)

coefficienti di attrito e di forma

Coefficiente di attrito

$$C_a = \frac{F_a}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

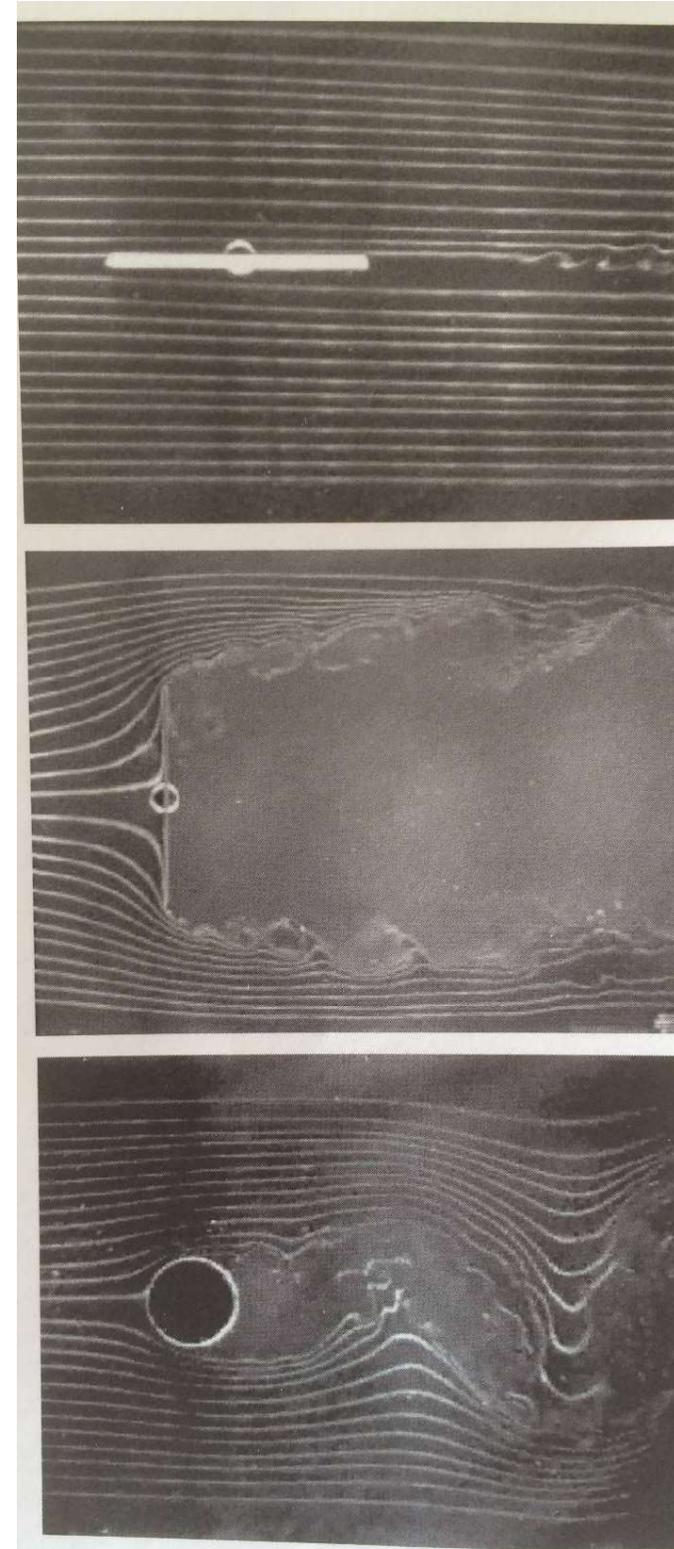
Coefficiente di forma

$$C_f = \frac{F_f}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

da notare che:

nei riguardi dell'attrito
è importante la superficie bagnata

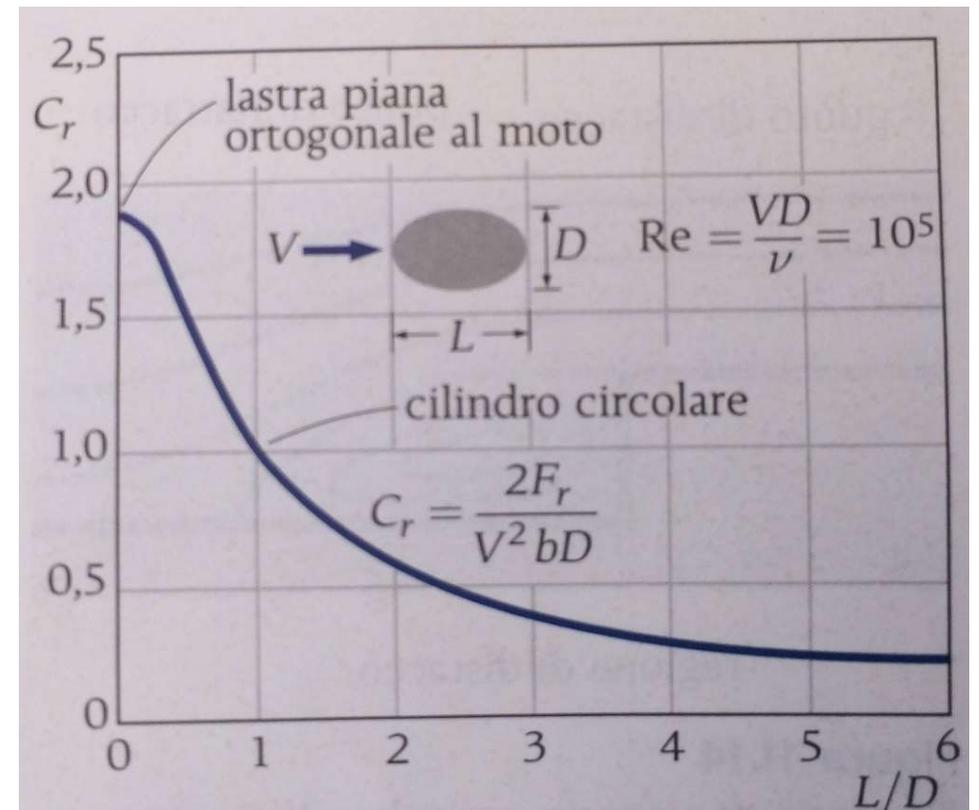
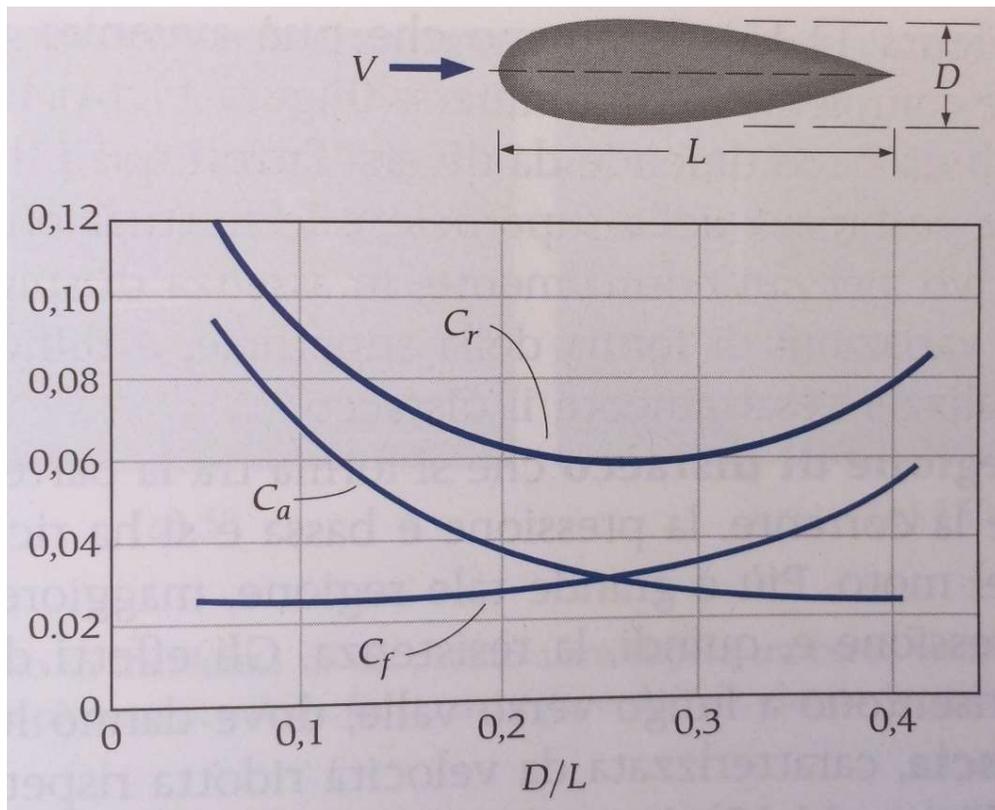
nei riguardi della forma è importante
l'area proiettata lungo della figura



Riduzione della resistenza con la sagomatura

La variazione di geometria, andando verso un affusolamento del corpo produce

- Una riduzione della resistenza di forma (si riduce la separazione di valle)
- Un aumento della resistenza di attrito (aumento della superficie su cui si sviluppa la forza d'attrito)



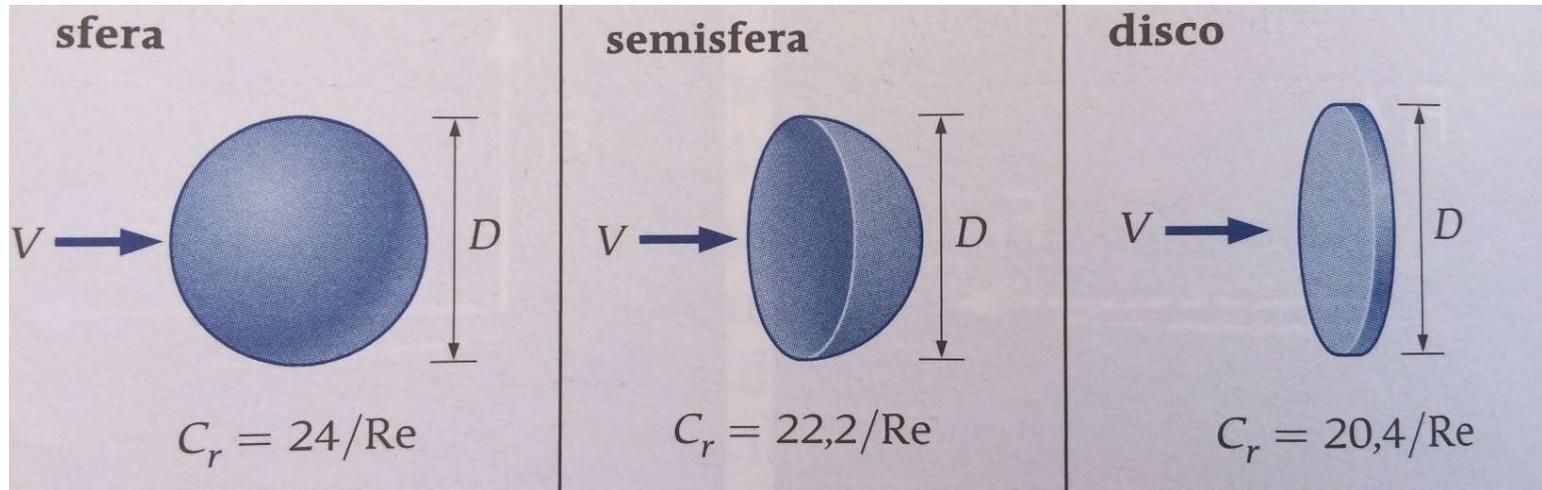
Coefficiente di resistenza per forme comuni

Il coefficiente di resistenza è:

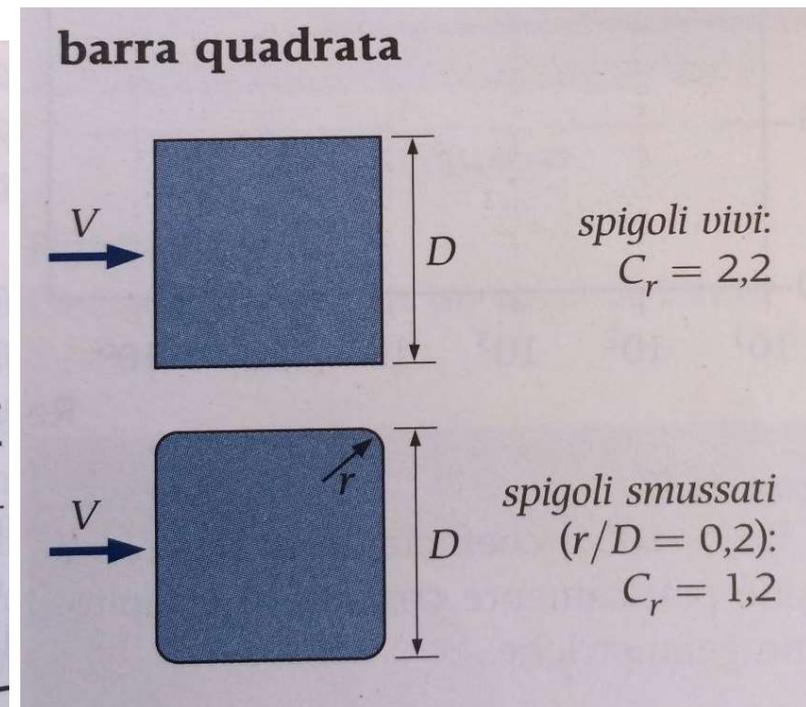
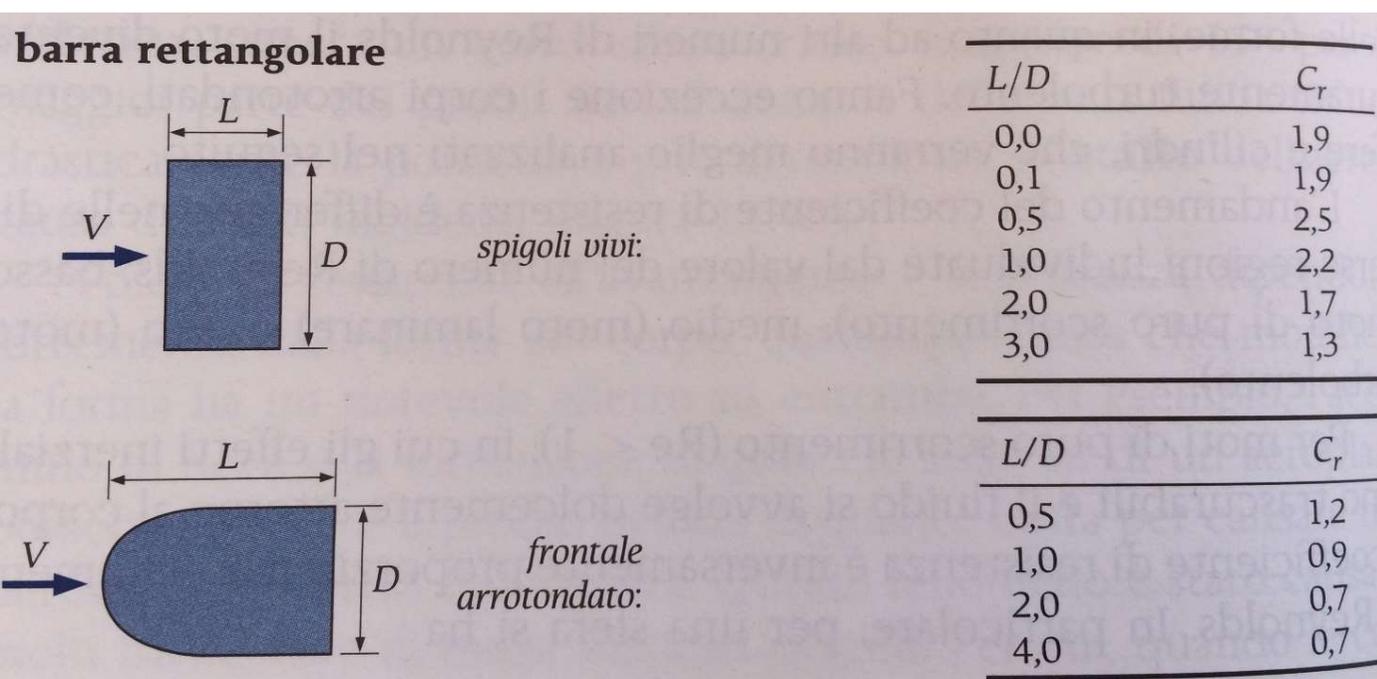
- In genere, funzione di Re per $Re < 10^4$
- Distinguiamo tre regioni di flusso:
 - Flusso di puro scorrimento ($Re < 1$) in cui gli effetti inerziali sono trascurabili e il gradiente di pressione si bilancia con le forze viscosse
 - Flusso laminare $1 < Re < 10^4$ (ma il limite superiore dipende da caso a caso), dove il moto è regolato dalla viscosità e dall'inerzia. Il trasferimento di quantità di moto tra strati adiacenti resta di tipo viscoso
 - Flusso turbolento nel quale il moto è istantaneamente di tipo caotico, e il trasferimento di quantità di moto tra strati adiacenti è di tipo turbolento

Coefficiente di resistenza per forme comuni

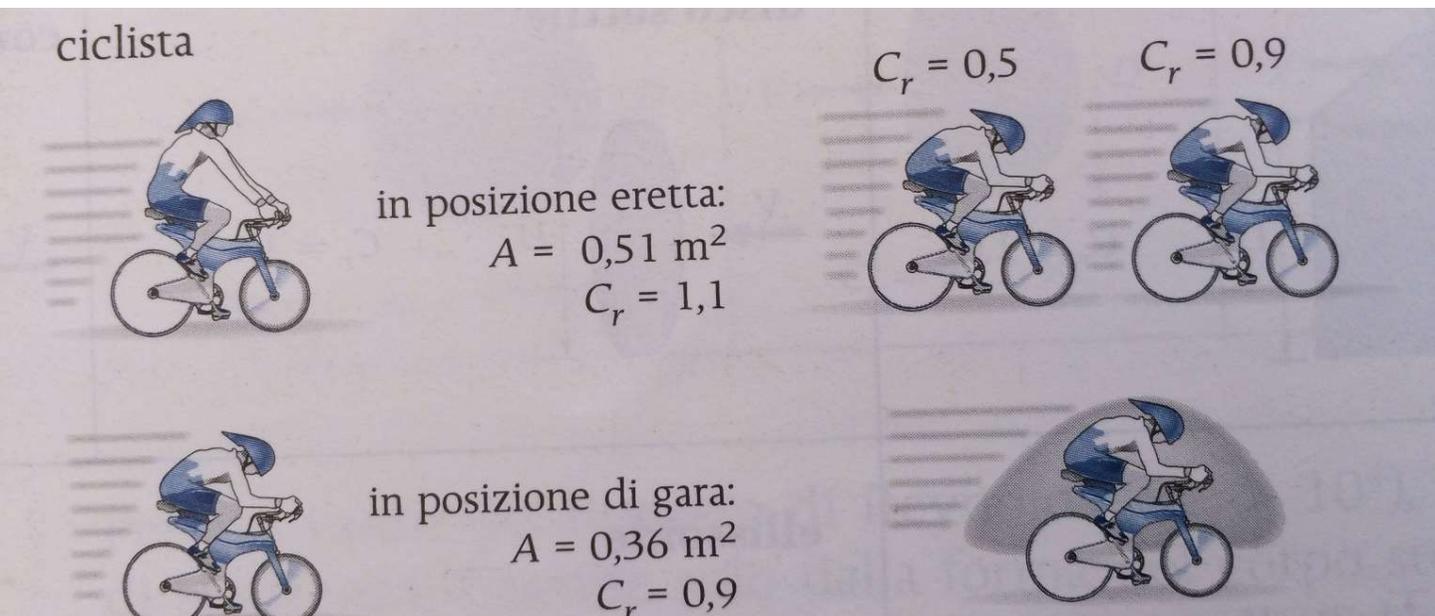
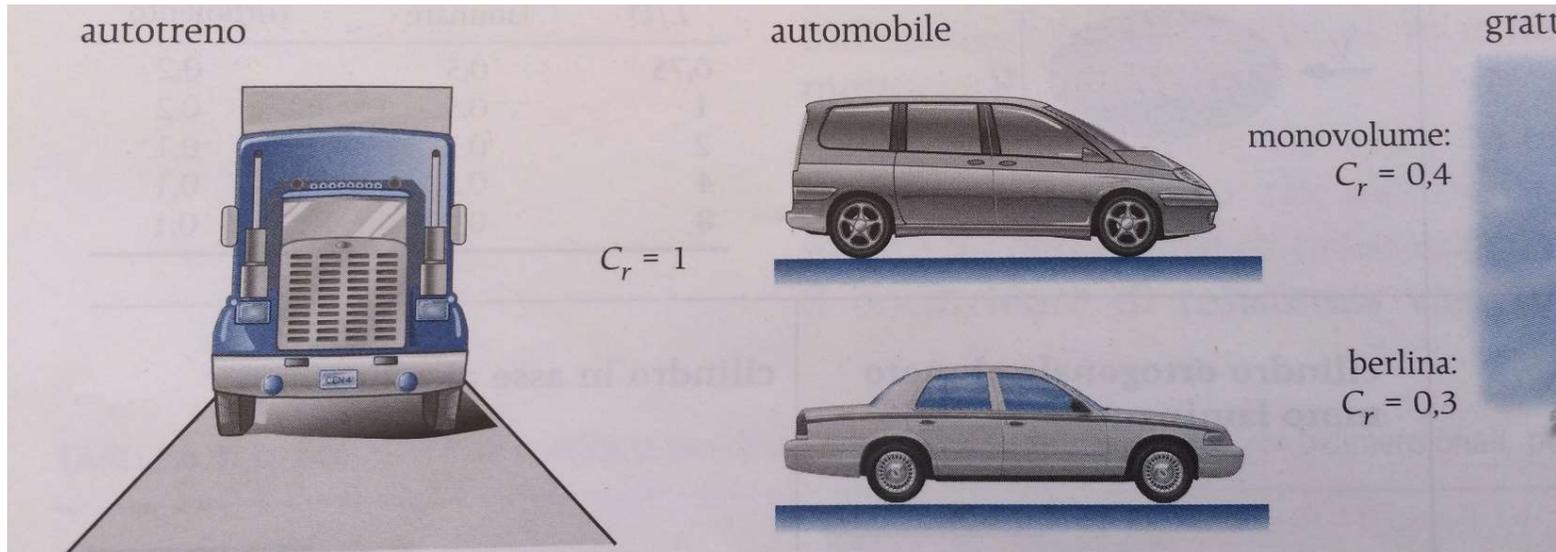
Da notare che i coefficienti possono variare se cambia l'orientamento della figura geometrica rispetto al flusso



$Re < 1$



Coefficiente di resistenza nella vita reale



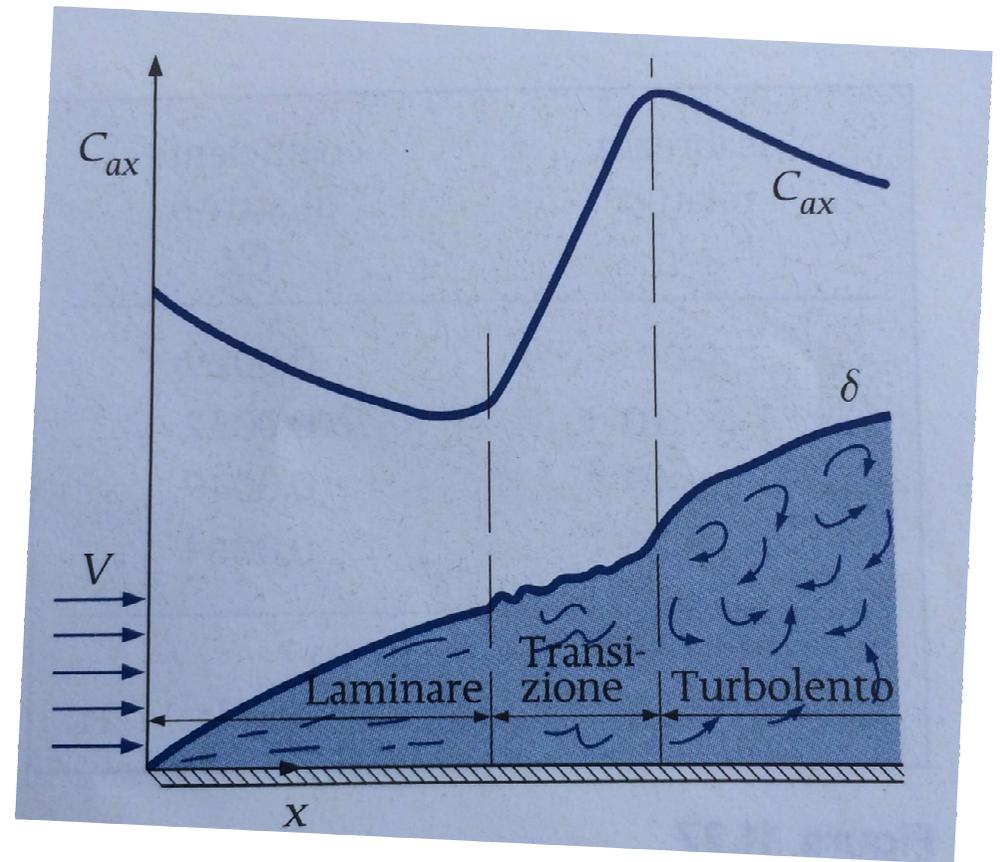
Lastra piana parallela liscia

In questo caso la resistenza di forma è nulla e l'unica forma di resistenza è quella di attrito

Si definisce $Re_x = \frac{Vx}{\nu}$

In regime Laminare $C_{ax} = \frac{0.664}{Re_x^{0.5}}$

In regime turbolento $Re_x > 10^5$
 $C_{ax} = \frac{0.059}{Re_x^{0.2}}$



Lastra piana parallela: coefficienti medi

E' utile esprimere i coefficienti mediati su tutta la lunghezza della lastra

Se il moto è laminare su tutta la lastra $Re_L < 10^5$

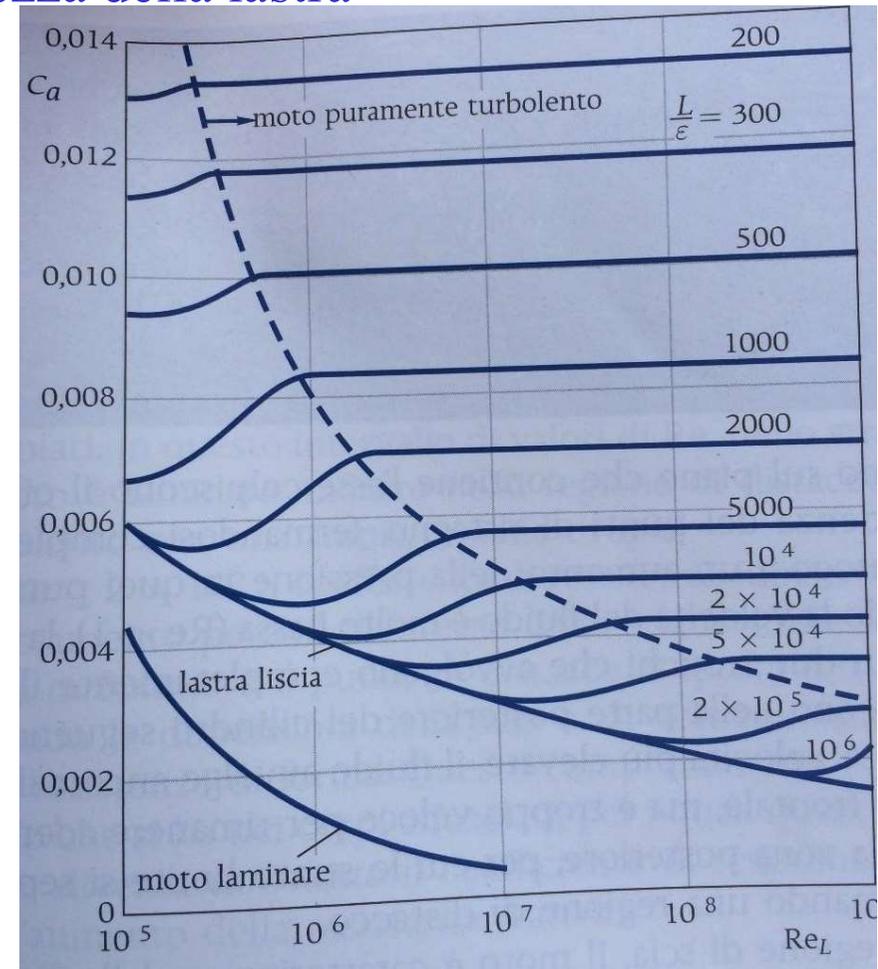
$$C_a = \frac{1.33}{Re_L^{0.5}}$$

Se il moto è turbolento su tutta la lastra $Re_L > 10^5$

$$C_a = \frac{0.074}{Re_L^{0.2}}$$

Su parete scabra in regime assolutamente turbolento

$$C_a = \left(1.89 - 1.62 \log \frac{\varepsilon}{L} \right)^{-2.5}$$

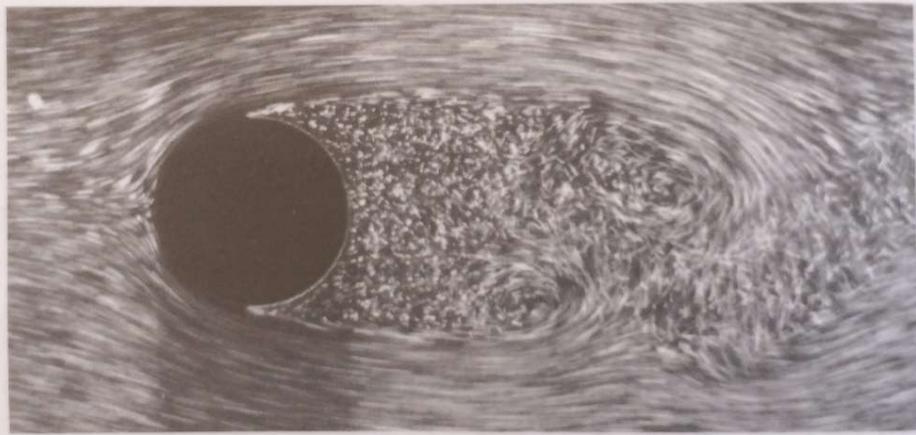


Moto attorno a cilindri e sfere

Il campo di moto è fortemente dipendente dal numero di Re

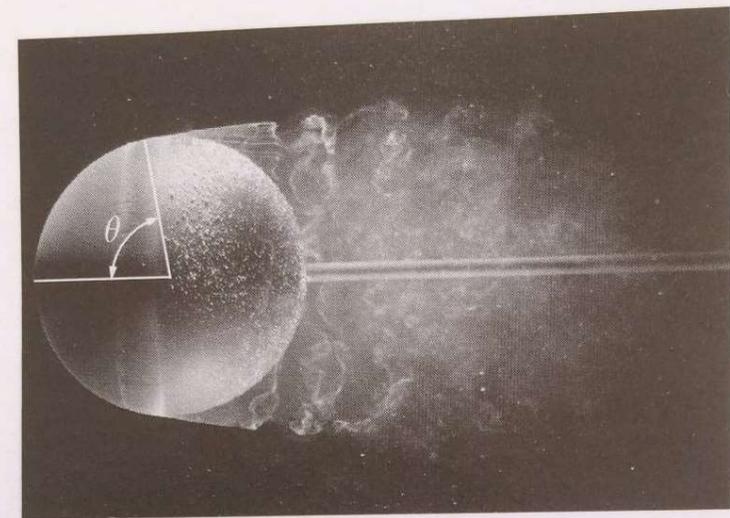
- $Re < 1$: Il trasporto è dominato dalla viscosità. Le linee di corrente sono simmetriche tra zona anteriore e posteriore. Il flusso non si separa.
- $Re \approx 10$ il flusso si separa nella zona posteriore dando origine a vortici stazionari e simmetrici
- $90 < Re < 10^3$ Distacco dei vortici di scia in maniera alternata. Questo provoca una forza laterale periodica a media nulla.
- $10^3 < Re < 10^5$ Il coefficiente di resistenza è circa costante. La scia di valle è turbolenta, lo strato limite di monte è laminare.
- $Re = 2 \times 10^5$ il coefficiente di resistenza ha un brusco abbassamento perché lo strato limite diventa turbolento, il punto separazione si sposta verso poppa

Moto attorno a cilindri e sfere

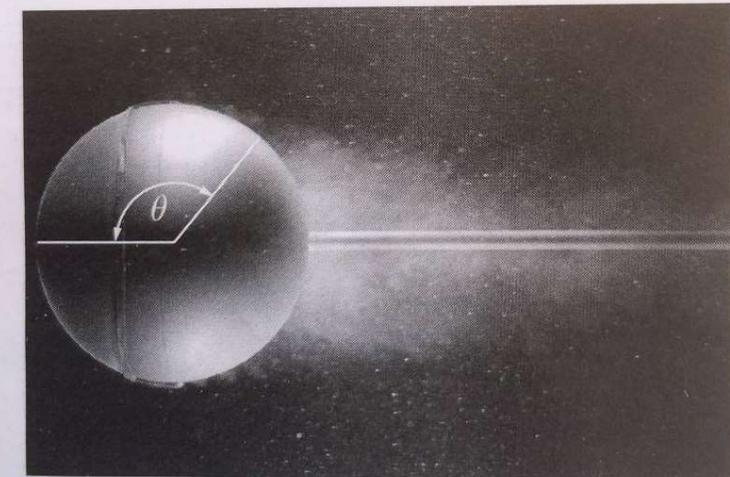


$Re=2000$ Scia alternata

$Re=15000$

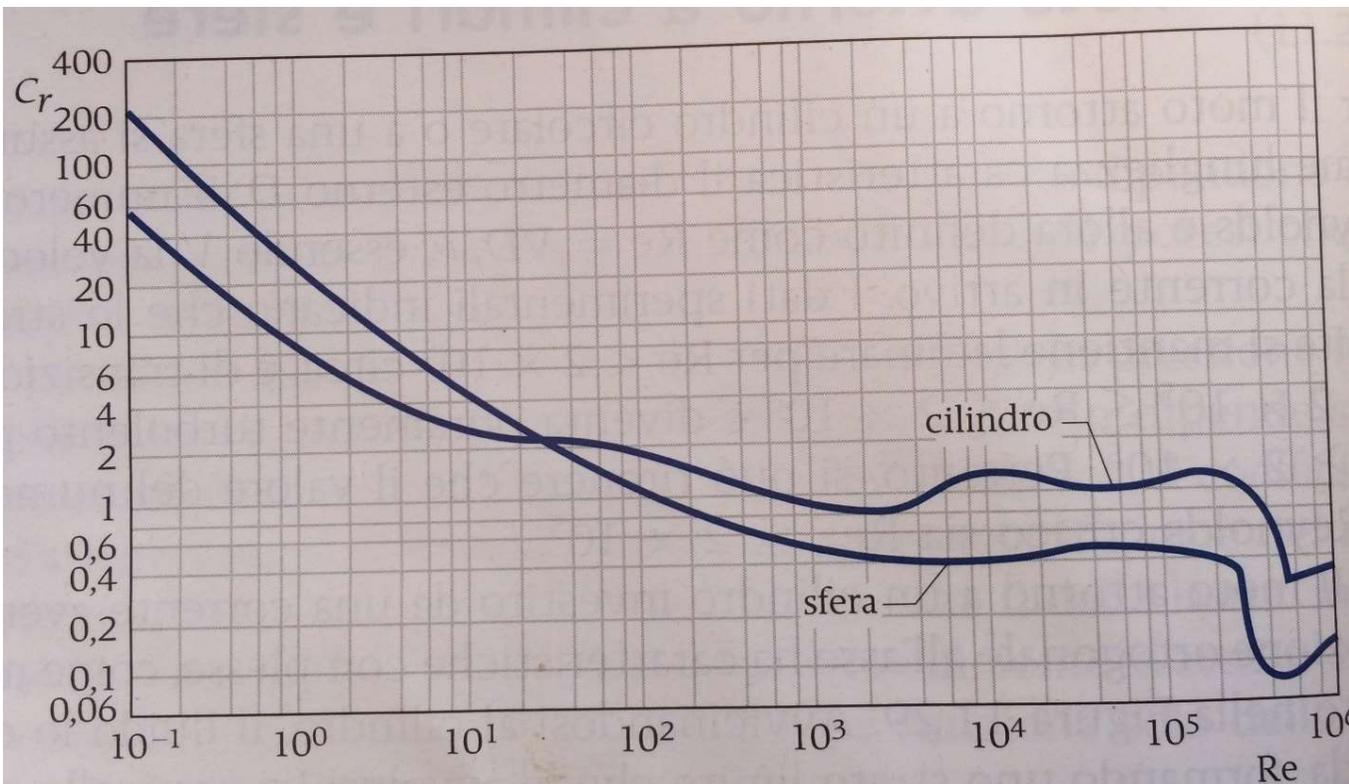


$Re=30000$ (a)



(b)

C_r in funzione di Re



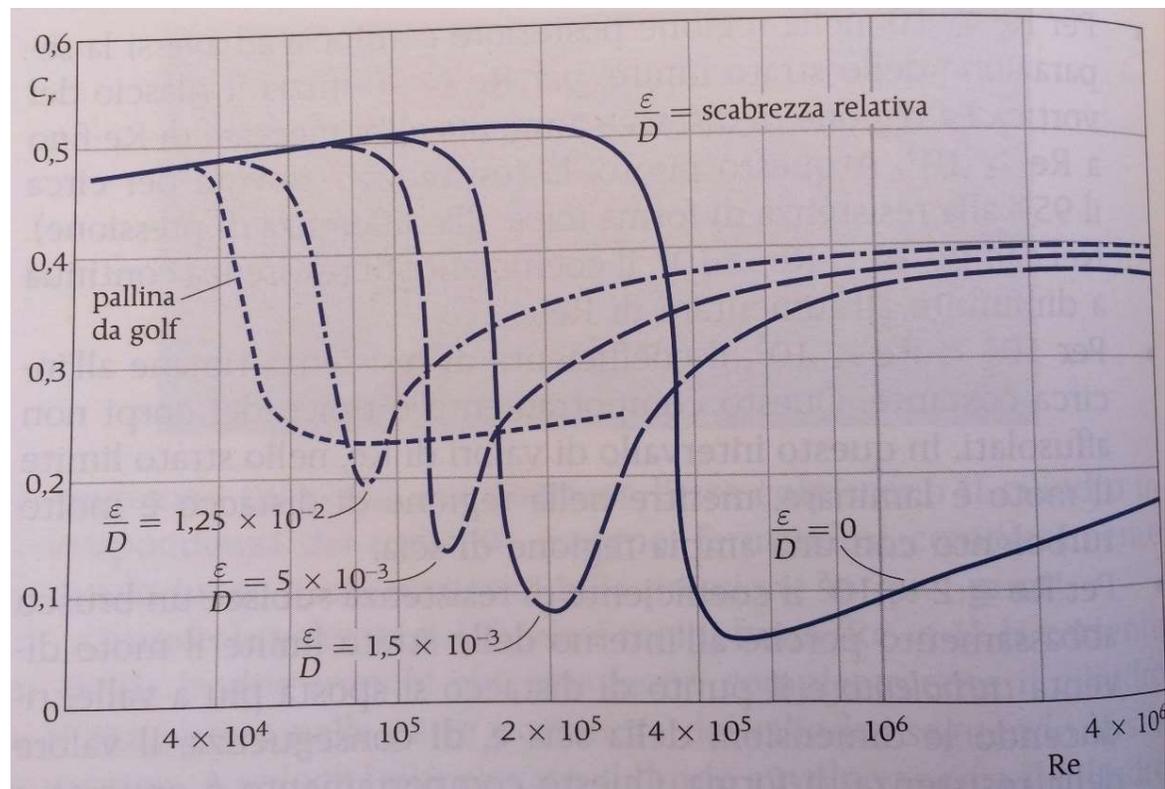
Moto attorno a cilindri e sfere: scabrezza

La scabrezza sui corpi tozzi può avere effetti benefici:

Anticipa la transizione alla turbolenza dello strato limite laminare e quindi ritarda la separazione

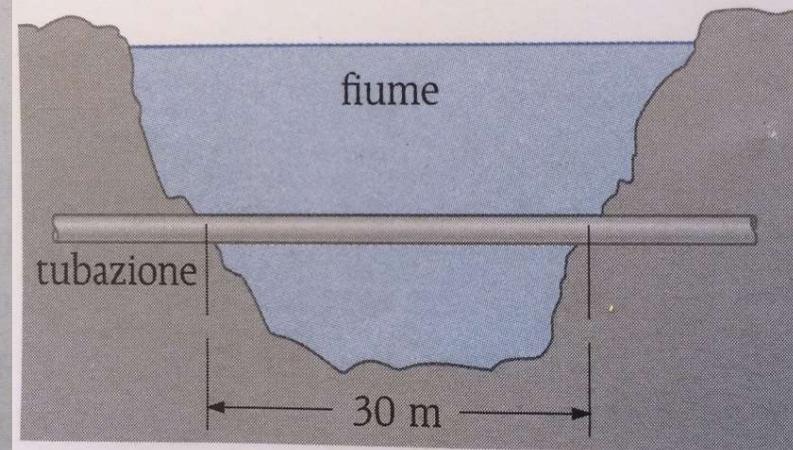
L'effetto è di una notevole riduzione del C_r in un ampio range di valori di Re

Il comportamento asintotico è comunque di aumento del C_r con la scabrezza



ESEMPIO 11.2 Forza di trascinamento agente su una tubazione immersa in un corso d'acqua

Una tubazione di diametro esterno $D = 115$ mm attraversa un corso d'acqua in una sezione larga $L = 30$ m (Figura 11.34), nella quale la corrente ha una velocità media $V = 2$ m/s. La temperatura dell'acqua è di 15 °C. Determinare l'azione di trascinamento esercitata dalla corrente sulla tubazione completamente immersa.



Ipotesi 1 La superficie esterna della tubazione può essere considerata liscia. **2** Il moto della corrente è permanente e ha direzione perpendicolare all'asse della tubazione.

Proprietà La densità e la viscosità dell'acqua a 15 °C valgono rispettivamente $\rho = 999,1$ kg/m³ e $\mu = 1,138 \times 10^{-3}$ Pa·s.

Analisi Per il numero di Reynolds

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{999,1}{1,138 \times 10^{-3}} \times 2 \times 0,115 = 2,02 \times 10^5$$

la Figura 11.30 dà $C_r \cong 1,2$. Per la 11.5, essendo l'area frontale della tubazione $A_f = LD$, l'azione di trascinamento vale

$$F_r = \frac{1}{2} C_r \rho V^2 LD = 0,5 \times 1,2 \times 999,1 \times 2^2 \times 30 \times 0,115 = 8270 \text{ N}$$