

# Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



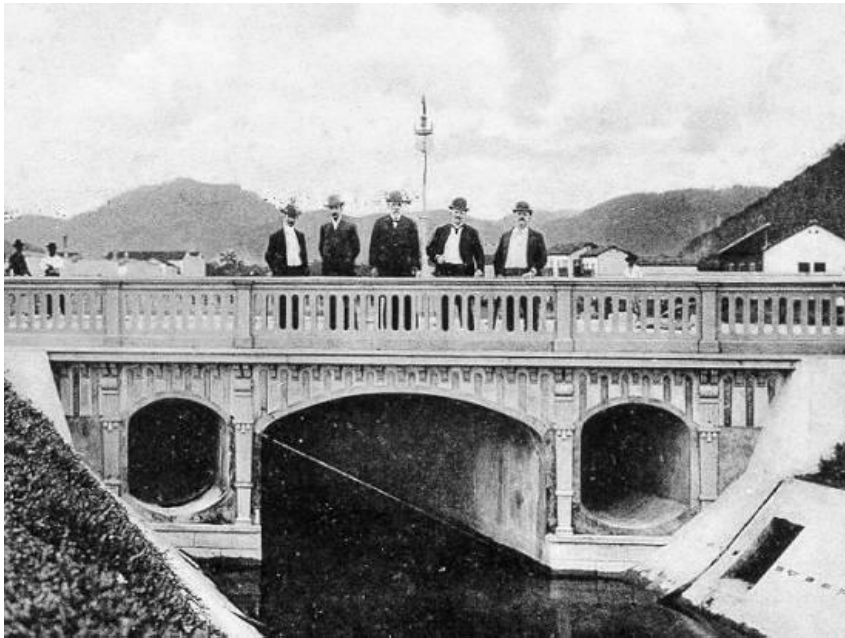
# Escoamento externo



Escoamento interno



Escoamento externo



<http://hotelchacaradomosteiro.com.br/conheca-historia-dos-canais-de-santos/>

Escoamento em canal aberto



- A viscosidade e o gradiente de pressão são os efeitos dominantes nos escoamentos internos.
- A viscosidade e gravidade são os efeitos dominantes nos escoamentos em canais abertos.
- A viscosidade só tem efeito em uma região estreita próxima à superfície, camada limite, e na esteira à jusante de corpos em escoamento externos.

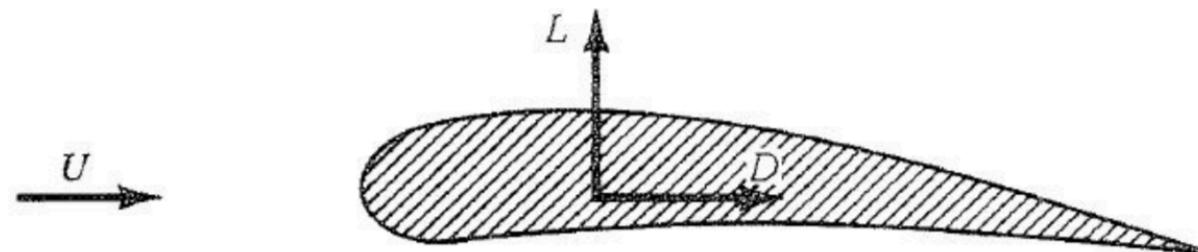
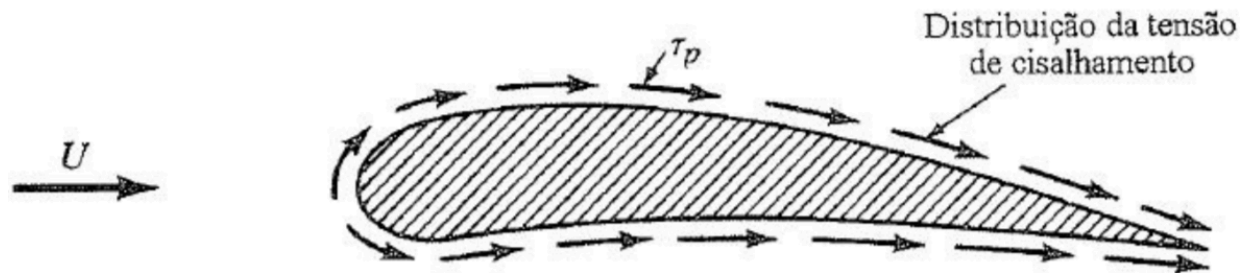
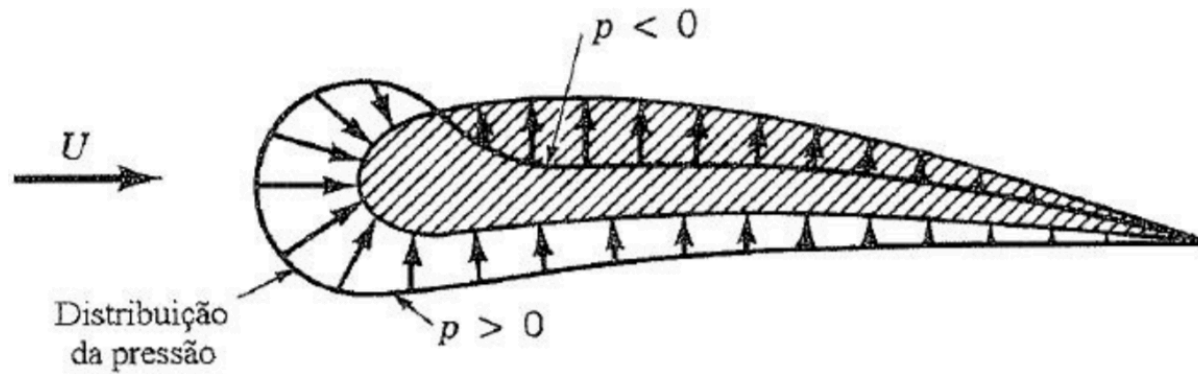


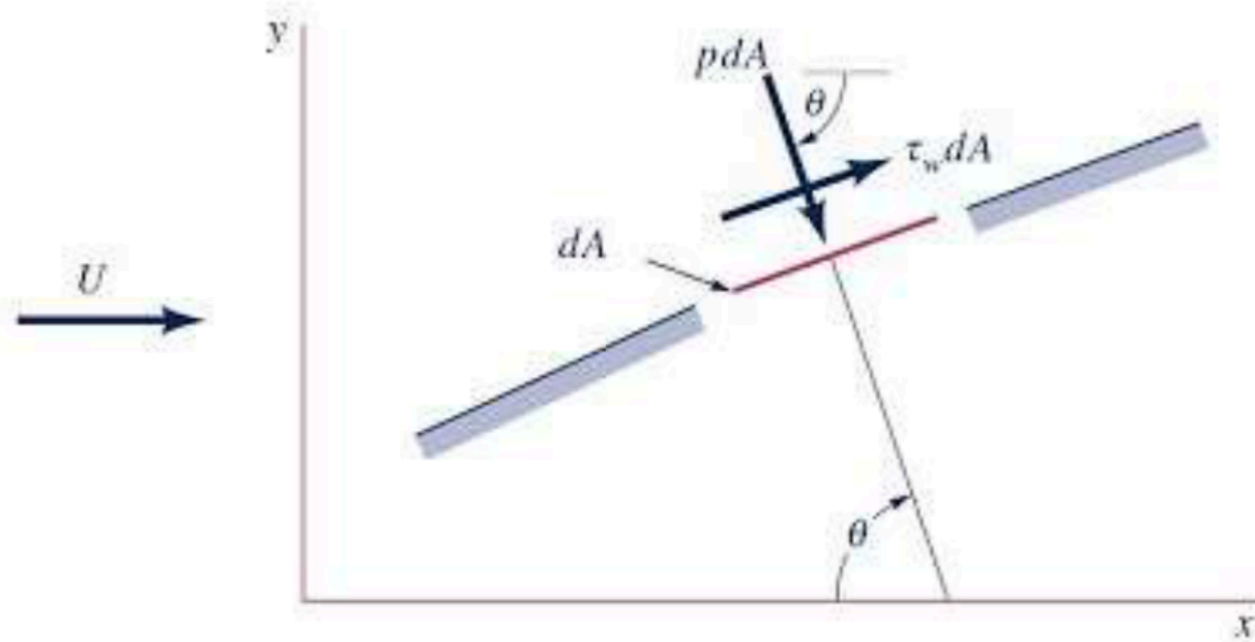
# O que houve e por que?





# Arrasto e Sustentação





$$D = \int dF_x = \int p \cdot \cos \theta \cdot dA + \int \tau_p \cdot \sin \theta \cdot dA$$

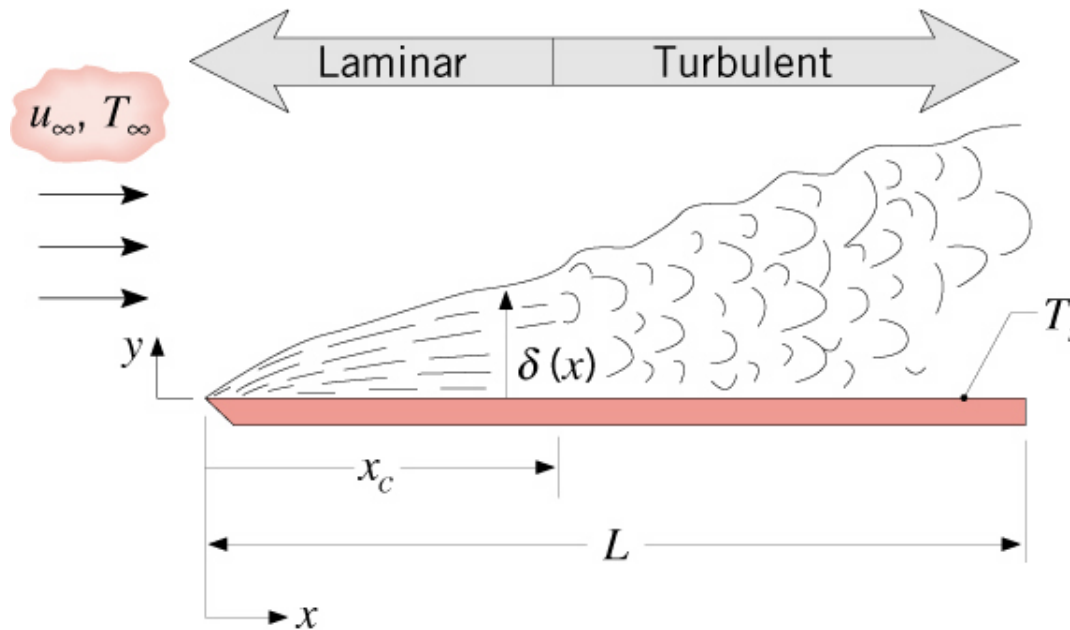
$$L = \int dF_y = - \int p \cdot \sin \theta \cdot dA + \int \tau_p \cdot \cos \theta \cdot dA$$



$$C_D = \frac{D}{(1/2) \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A_{ref}}$$

$$C_L = \frac{L}{(1/2) \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A_{ref}}$$

onde  $A_{ref}$  é uma área de referência;  $\rho$  é a massa específica do fluido; e  $U$  é a velocidade na região não perturbado (ao longe; em muitas referências esta velocidade é simbolizada por  $V_\infty$ ).



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

- A camada limite pode se desenvolver livremente;
- As condições na camada limite podem ser inteiramente laminares, mistas ou turbulentas;
- Para determinar as condições calcule o número de Reynolds e compare com:

Se  $Re_L < Re_{x,c}$  temos escoamento laminar;

Se  $Re_L > Re_{x,c}$  temos escoamento turbulento a partir de  $x_c / L = Re_{x,c} / Re_L$



- $Re_{x,c}$  depende das condições na corrente livre e da rugosidade da placa, usaremos:

$$Re_{x,c} = 5 \times 10^5$$



*Espessura da camada limite:*

$$\delta = \frac{5,0}{\sqrt{u_\infty / \nu x}} = \frac{5x}{\sqrt{\text{Re}_x}}$$

**Coeficiente de atrito médio:**

$$C_D = 1,328 \text{Re}_L^{-1/2}$$



*Espessura da camada limite:*

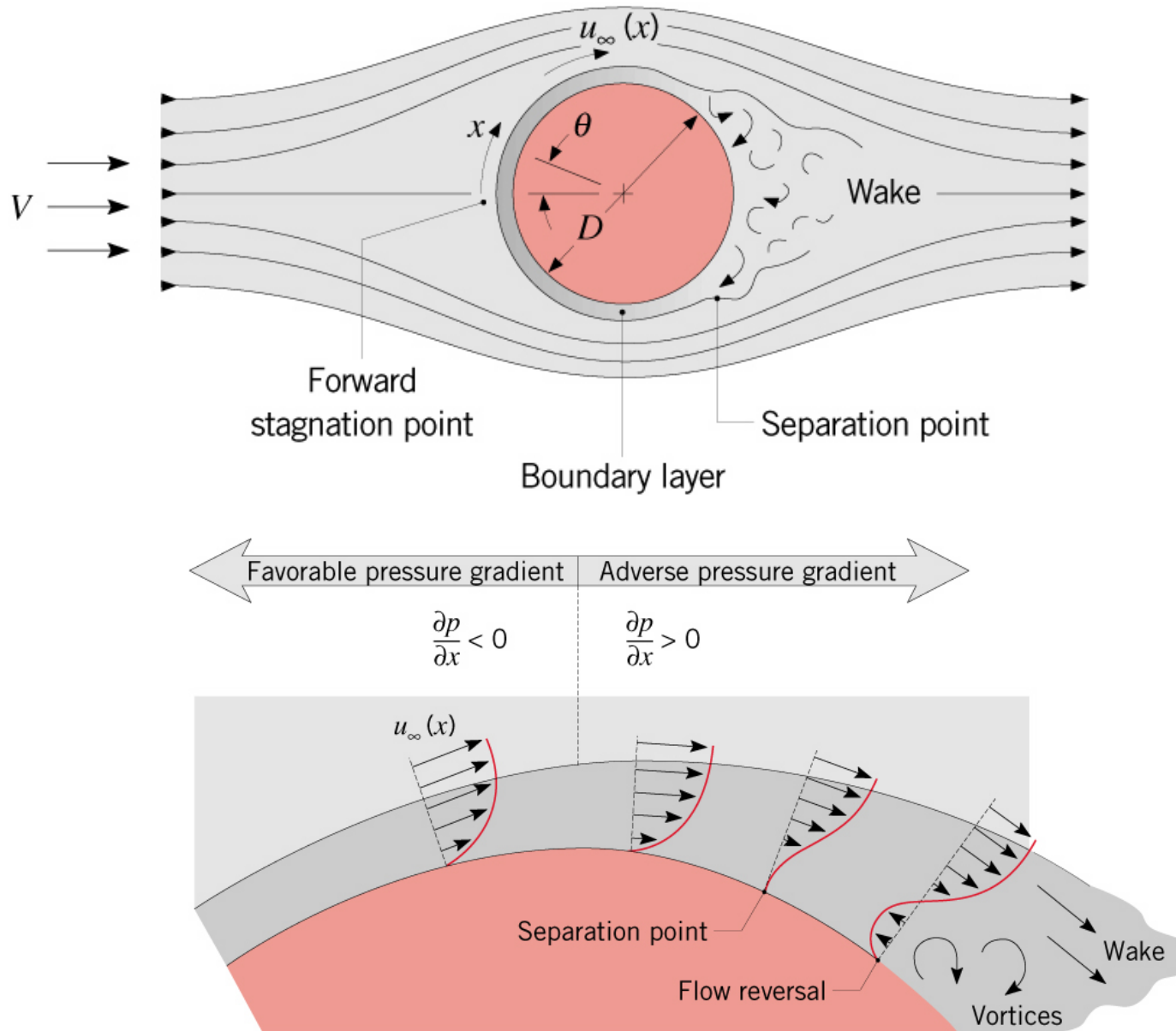
$$\frac{\delta}{x} = 0,37 \text{Re}_x^{-1/5} \quad 5 \times 10^5 \leq \text{Re}_L \leq 10^7$$

*Para escoamento turbulento sobre toda a placa:*

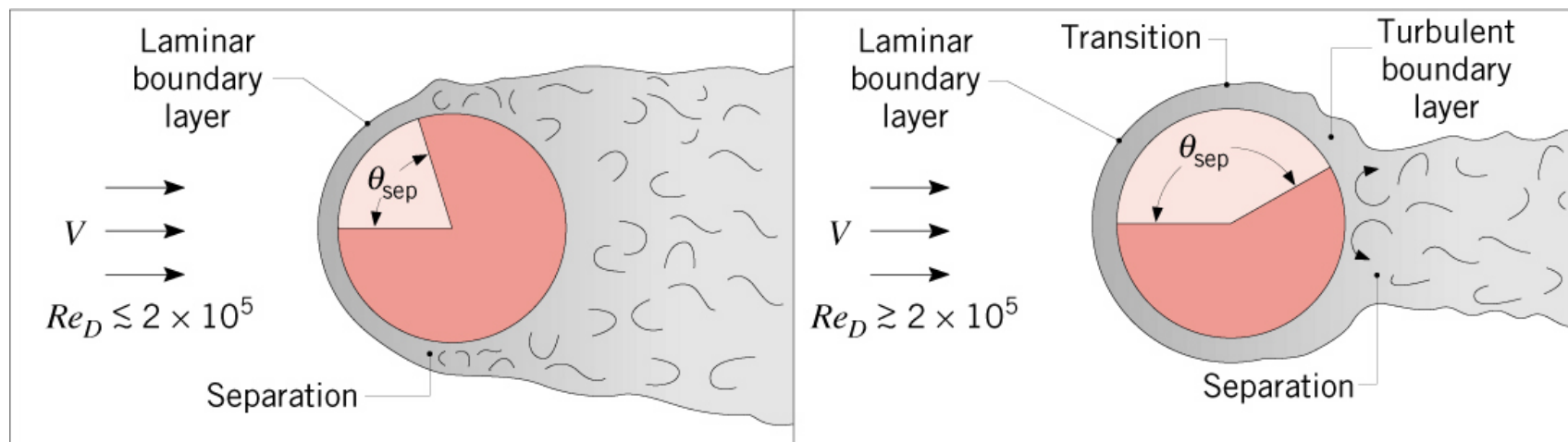
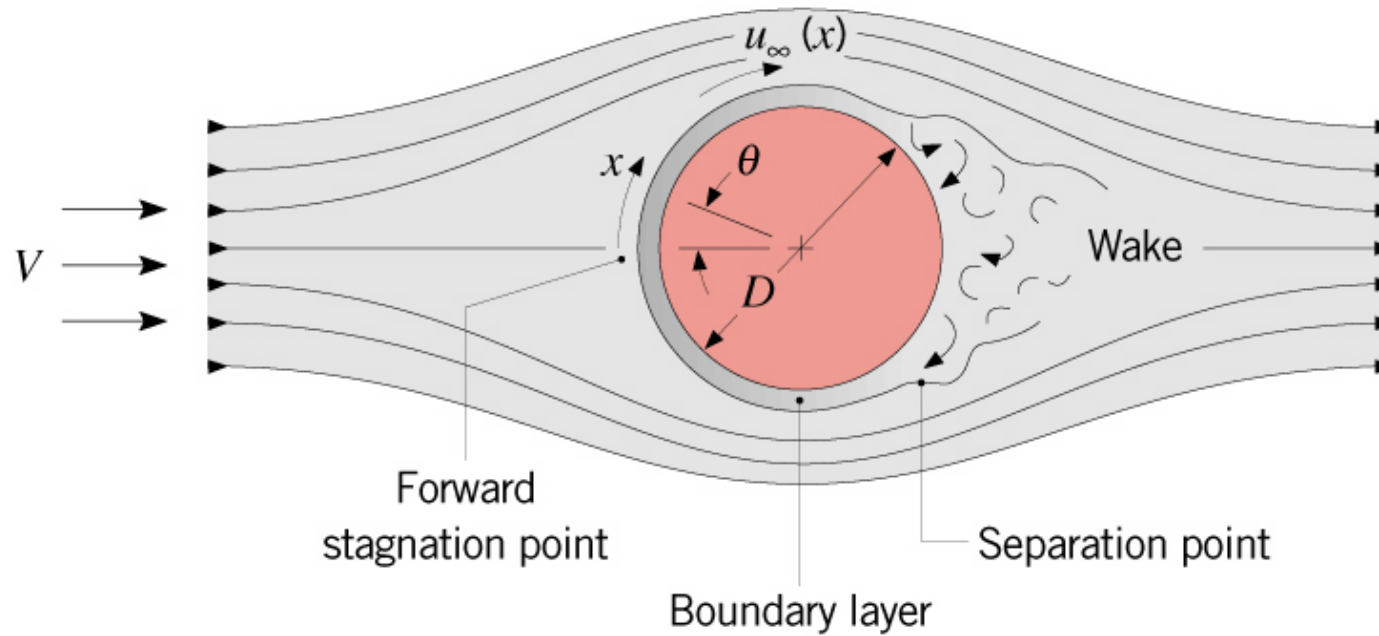
$$C_{Df} = \frac{0,072}{\text{Re}_L^{1/5}}$$



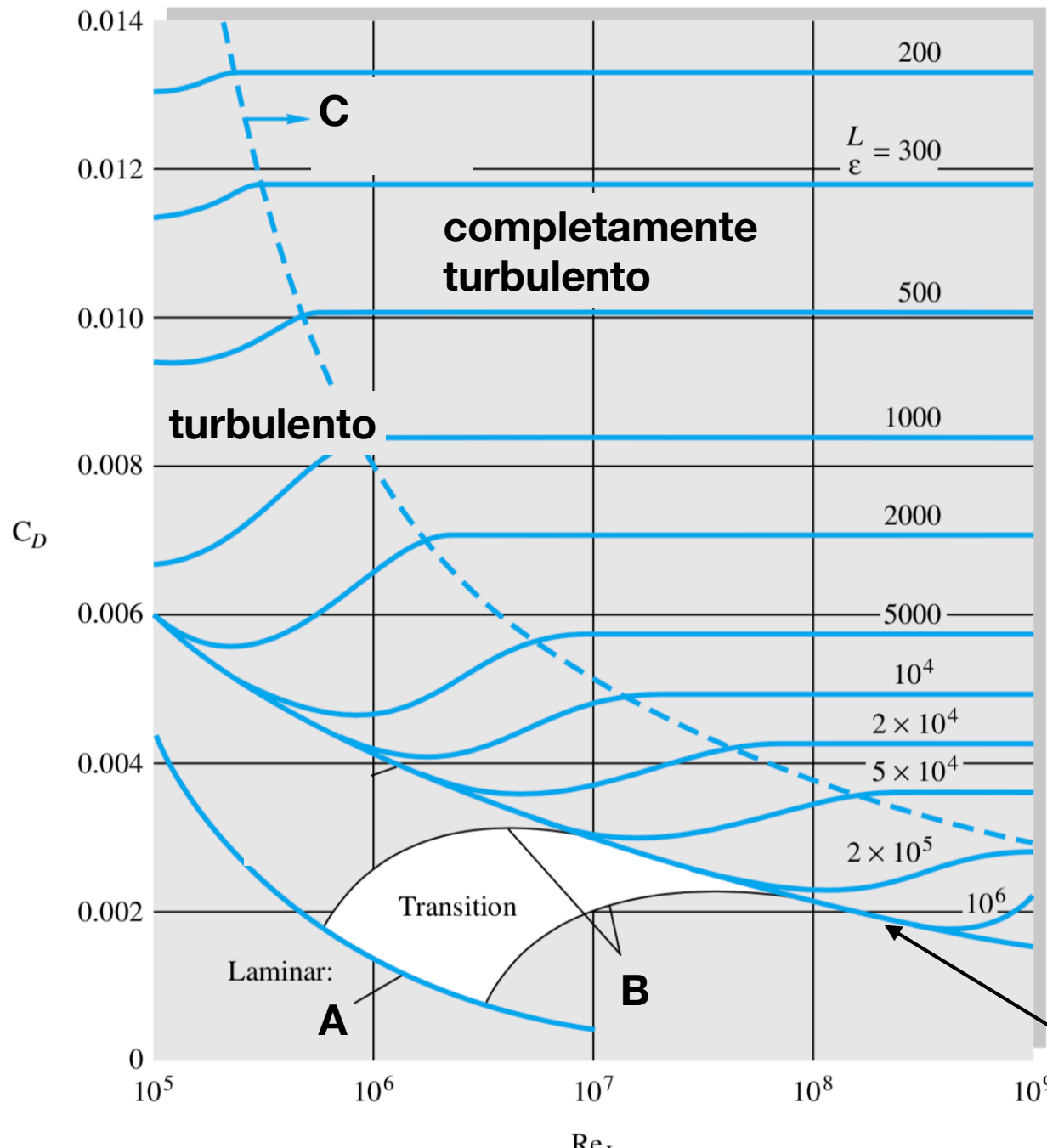
# Cilindro em escoamento cruzado



# Cilindro em escoamento cruzado



# Coeficiente de arrasto



$C_{Df}$  sobre placas planas lisas ou rugosas, para escoamentos laminares como turbulentos. Semelhante ao diagrama de Moody para escoamentos em dutos.

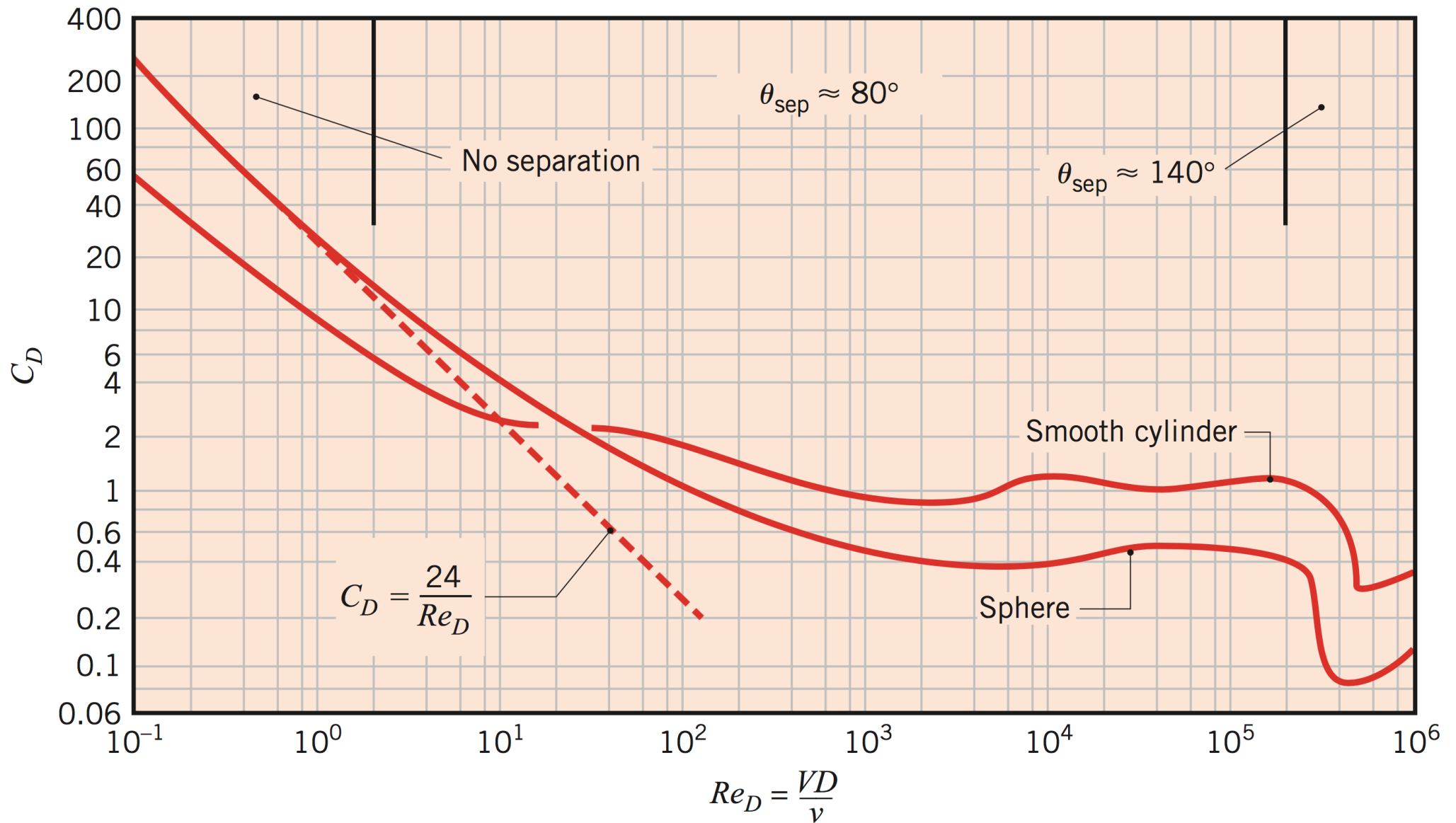
$$\mathbf{A}: C_D = 1,328 Re_L^{-1/2}$$

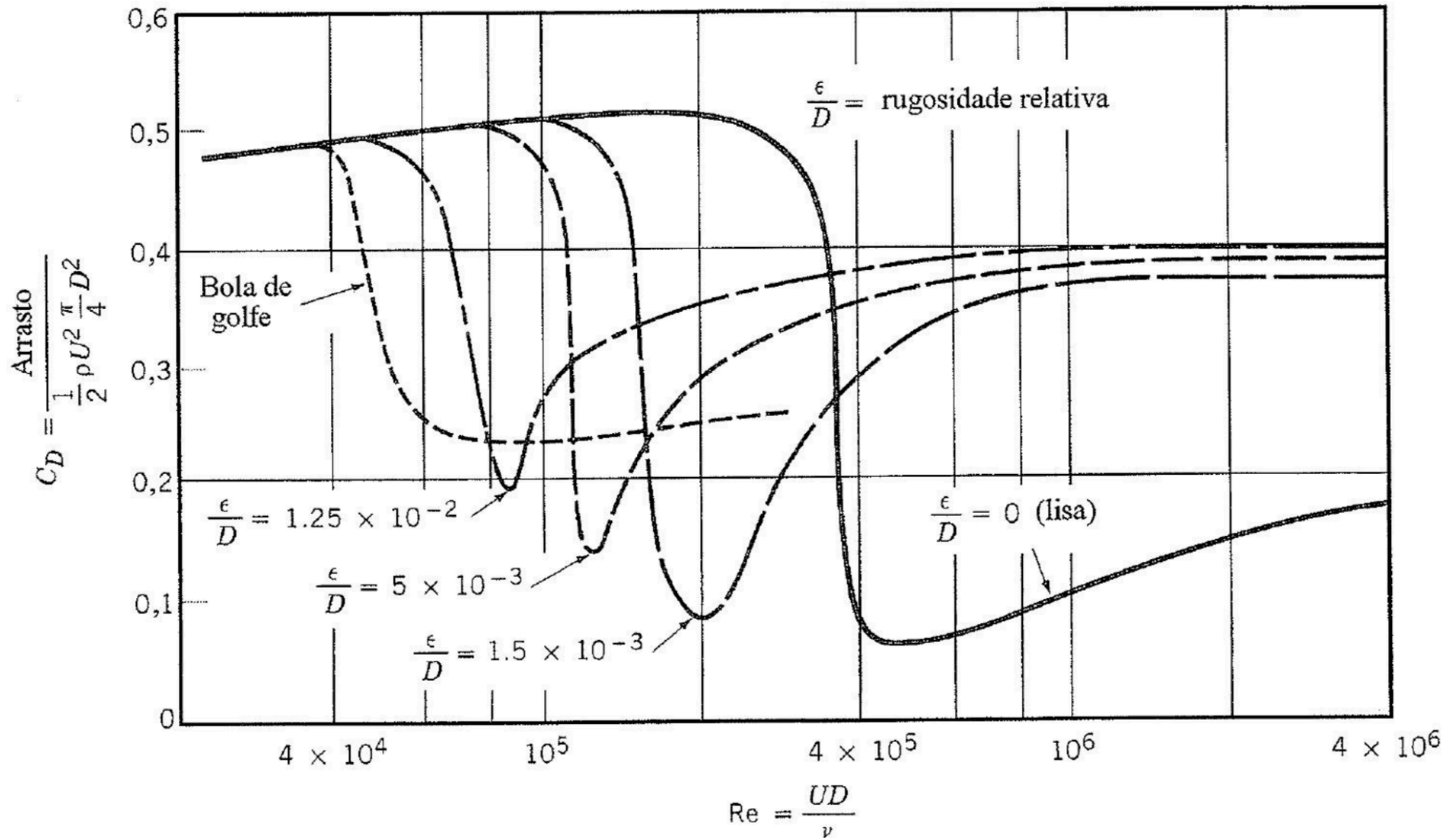
$$\mathbf{B} \quad C_D \approx \begin{cases} \frac{0.031}{Re_L^{1/7}} - \frac{1440}{Re_L} & Re_{trans} = 5 \times 10^5 \\ \frac{0.031}{Re_L^{1/7}} - \frac{8700}{Re_L} & Re_{trans} = 3 \times 10^6 \end{cases}$$

$$\mathbf{C} \quad C_D \approx \left( 1.89 + 1.62 \log \frac{L}{\epsilon} \right)^{-2.5}$$

turbulento  
placa lisa

# Coeficiente de arrasto cilindro e esferas lisas





# Vamos falar de futebol?



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



Fonte: [https://www.youtube.com/watch?v=J\\_YdC12siWM](https://www.youtube.com/watch?v=J_YdC12siWM)



# Vamos falar de futebol?



Teamgeist  
2006



Jabulani  
2010



Cafusa  
2013

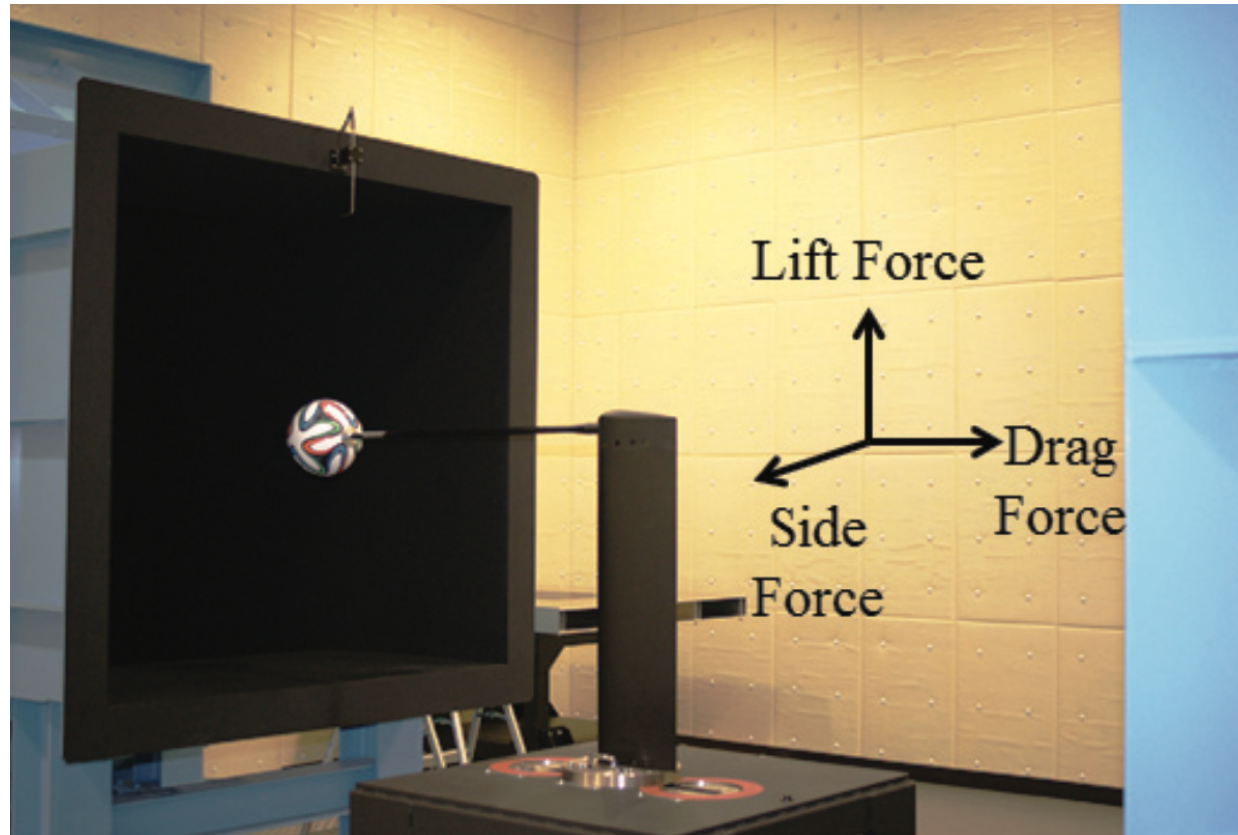


Brazuca  
2014



Futsal

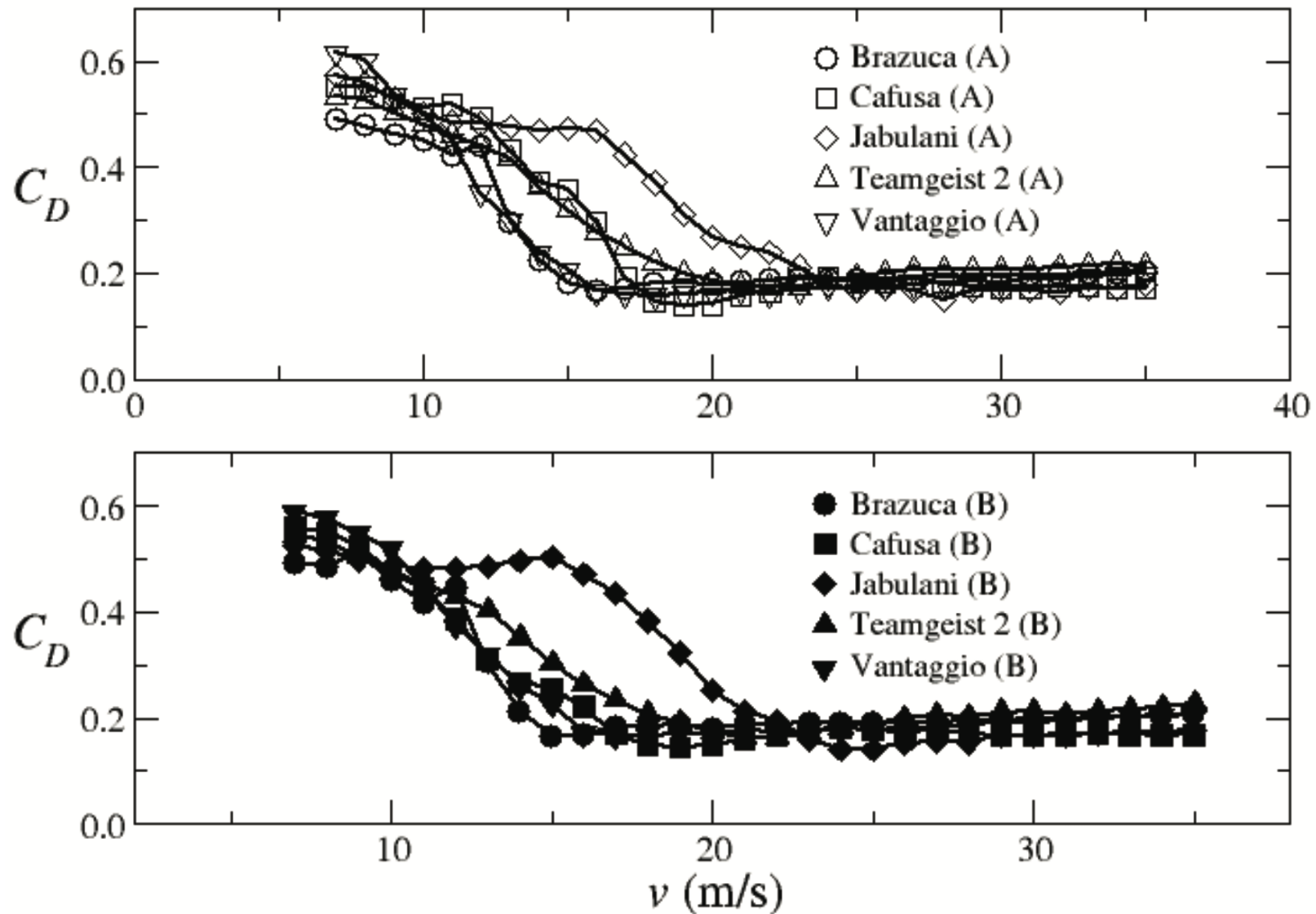
# Vamos falar de futebol?



$$7 \text{ m/s} \leq v \leq 35 \text{ m/s}$$

$$10^5 < \text{Re} < 5 \times 10^5$$





John Eric Goffa, Chad Michael Hobsona, Takeshi Asaib, Sungchan Hongb  
Wind-tunnel experiments and trajectory analyses for five nonspinning soccer balls. Procedia Engineering 147 (2016) 32 – 37

# Vamos falar de golfe?



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo

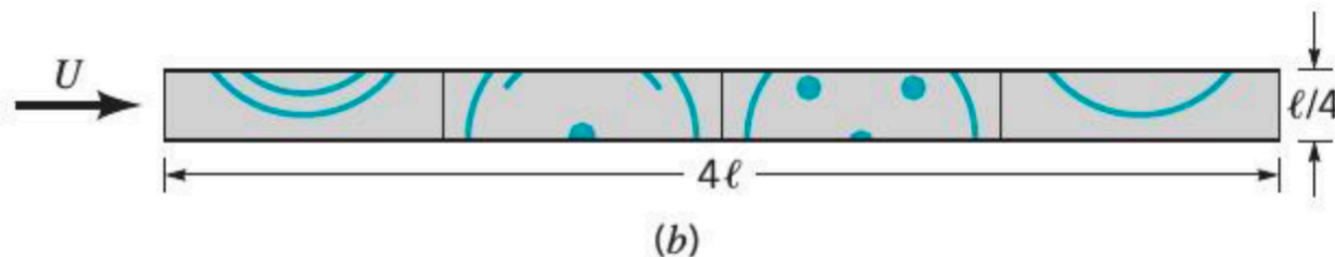
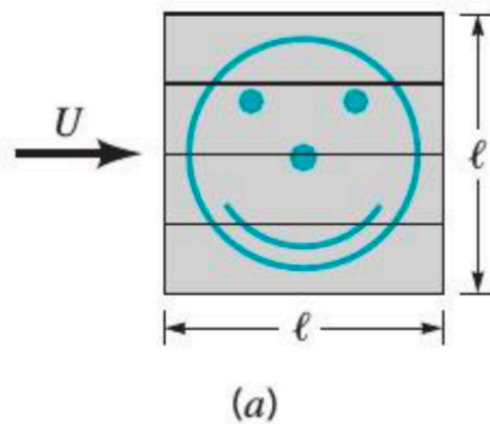


Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=fcjaxC-e8oY\>

# Exercício 1



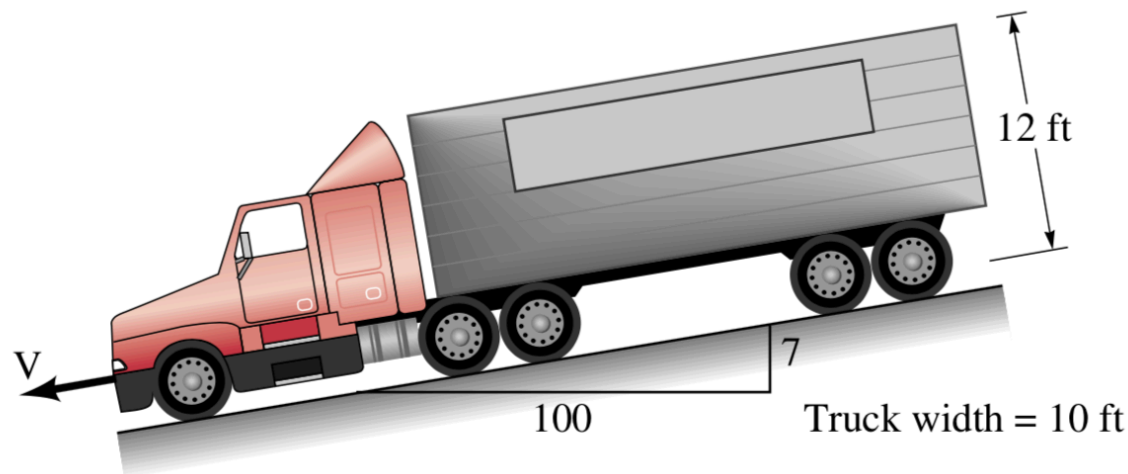
**Enunciado:** A placa quadrada mostrada na figura (a) abaixo foi cortada em quatro placas iguais e arranjada do modo indicado na figura (b). Determine a razão entre o arrasto na placa original (caso a) e aquele que ocorre no novo arranjo (caso b). Admita que as camadas limite são laminares. Justifique, fisicamente, sua resposta. [Munson, 9.28, 4a Edição]



## Exercício 2



**Enunciado:** Um caminhão com massa total igual a 22,7 toneladas, perdeu o freio e desce a ladeira de concreto indicada na figura abaixo. A velocidade terminal do caminhão,  $V$ , é determinada pelo equilíbrio das forças peso, resistência ao rolamento e arrasto aerodinâmico. Admita que a resistência ao rolamento é igual a 1,2% do peso do caminhão e que o coeficiente de arrasto é 0,96 quando o defletor de ar na cabine não está presente e 0,70 quando está presente. Determine a velocidade terminal do caminhão nestas duas situações. [Munson, 9.55, 4a Edição]

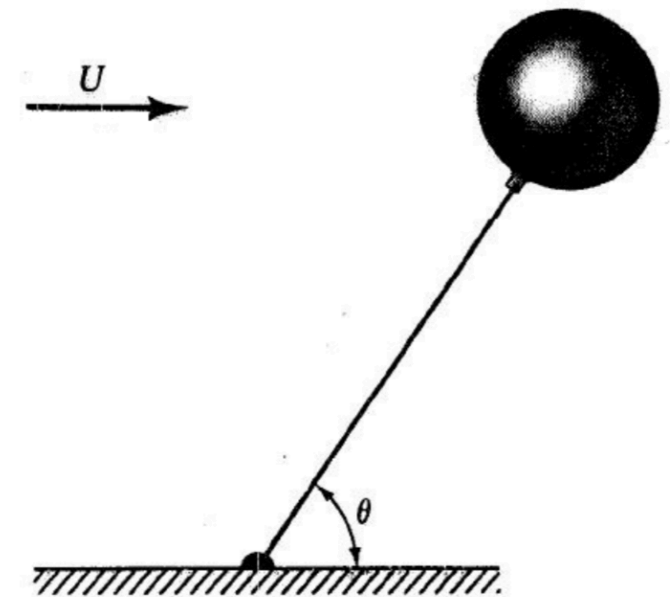




# Exercício 3



**Enunciado:** Uma bóia esférica de plástico (peso específico =  $2041 \text{ N/m}^3$ ) está ancorada no fundo de um rio do modo indicado na figura ao lado. Sabendo que o coeficiente de arrasto da boia é igual a 0,5 e o ângulo  $\theta$  vale  $60^\circ$ , estime a velocidade do rio. [Munson, 9.61, 4a Edição]



# Exercício 4



**Enunciado:** Um avião Boeing 747 pesa  $2,58 \times 10^6$  N quando carregado com combustível e 100 passageiros. Nesta condição, a velocidade para decolagem é 225 km/h. Com a mesma configuração (i.e. ângulo de ataque, posicionamento de flapes, etc.), qual é a velocidade de decolagem do avião carregado com 327 passageiros? Admita que cada passageiro com bagagem pesa 890 N. [Munson, 9.93, 4a Edição]

# Exercício proposto 1



**Enunciado:** Um ventilador de teto com cinco pás gira a 100 rpm. Se cada pá apresenta comprimento e largura iguais a 0,8 e 0,1 m, estime o torque necessário para vencer o atrito nas pás. Admita que as pás se comportam como placas planas. [Munson, 9.36, 4a Edição]

Resp.: 0,0438 N.m.

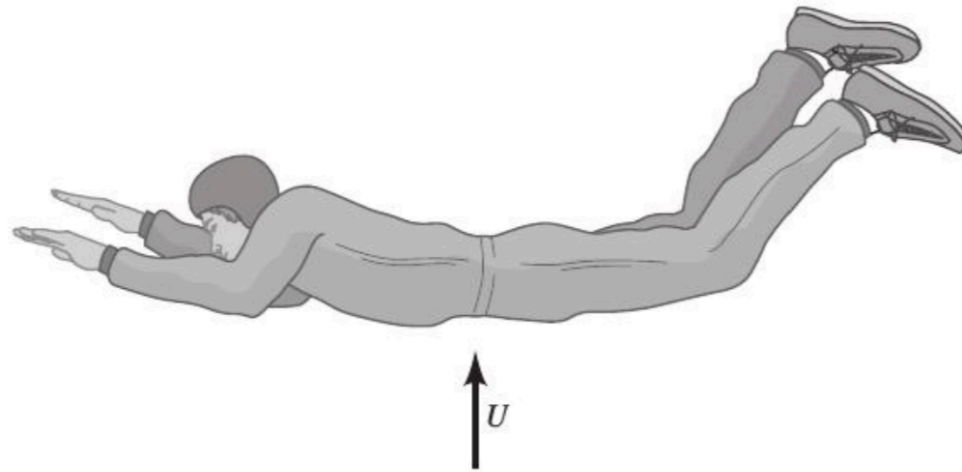
# Exercício proposto 2



**Enunciado:** A figura abaixo que nós podemos utilizar um túnel de vento vertical para praticar pára-quedaismo. Estime a velocidade vertical necessária para sustentar uma pessoa (a) curvada e (b) deitada. Admita que a massa da pessoa é igual a 75 kg e que os coeficientes de arrasto são aqueles indicados na Figura 9.30 (livro texto).

[Munson, 9.59, 4a Edição]

Resp.: (a) 70,6 m/s; (b) 37,2 m/s.







- a) realizar a medição da velocidade do ar com o uso de um tubo de Pitot estático, aplicando a equação de Bernoulli;
- b) determinar a distribuição de pressões e de coeficiente de pressão na superfície do cilindro;
- c) determinar a força de arrasto e o coeficiente de arrasto associados às pressões;
- d) analisar o comportamento do escoamento na região próxima ao cilindro, determinando suas características (laminar, turbulento) e observando o fenômeno da separação.

# Laboratório: aparato



Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo



