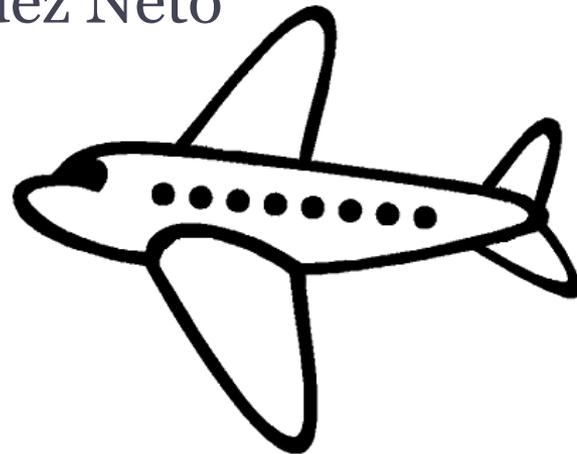
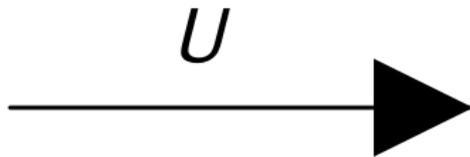


Escoamentos externos

PME3238 - Fenômenos de Transporte

Aula 16 – Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto



Aplicações



- Aeronaves
- Veículos terrestres
- Embarcações e submarinos
- Edificações

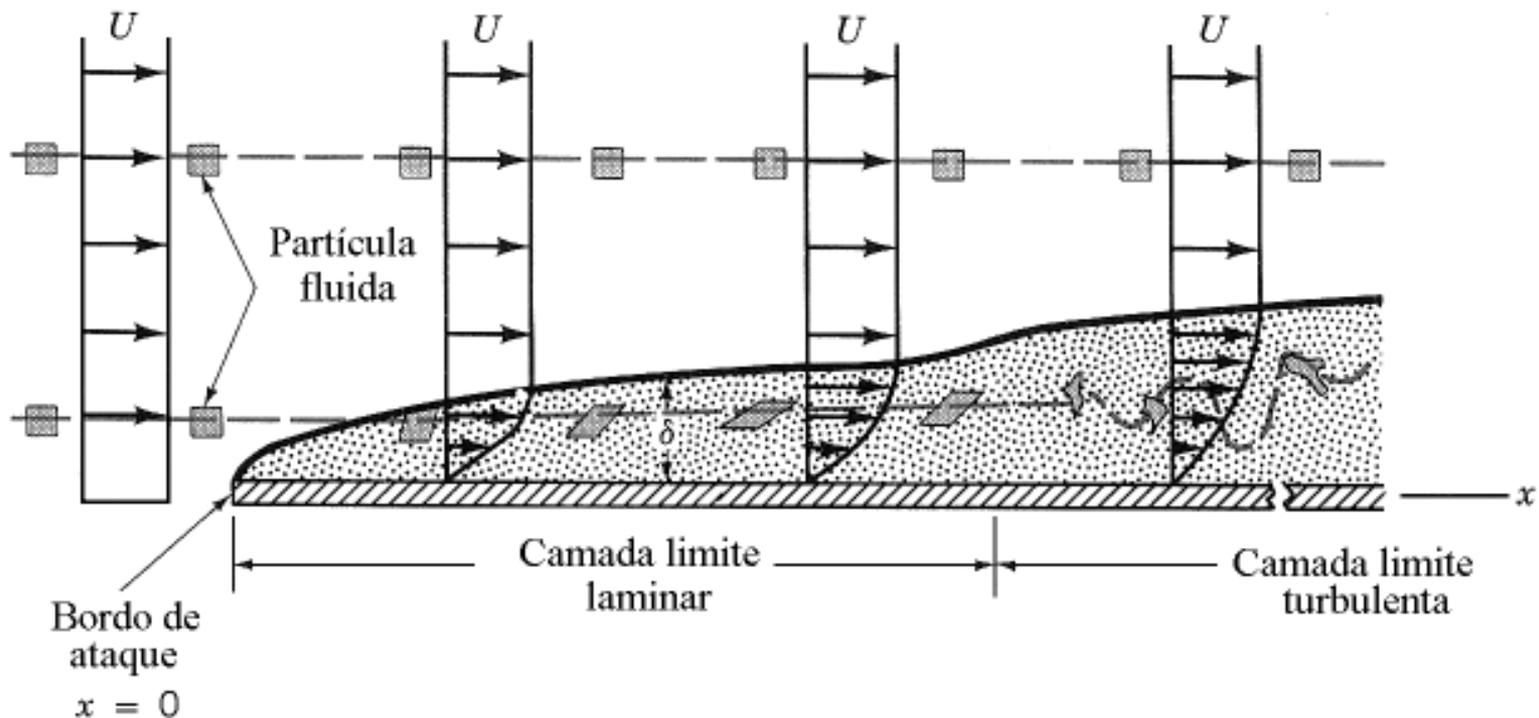


O colapso da ponte de Tacoma



Camada limite

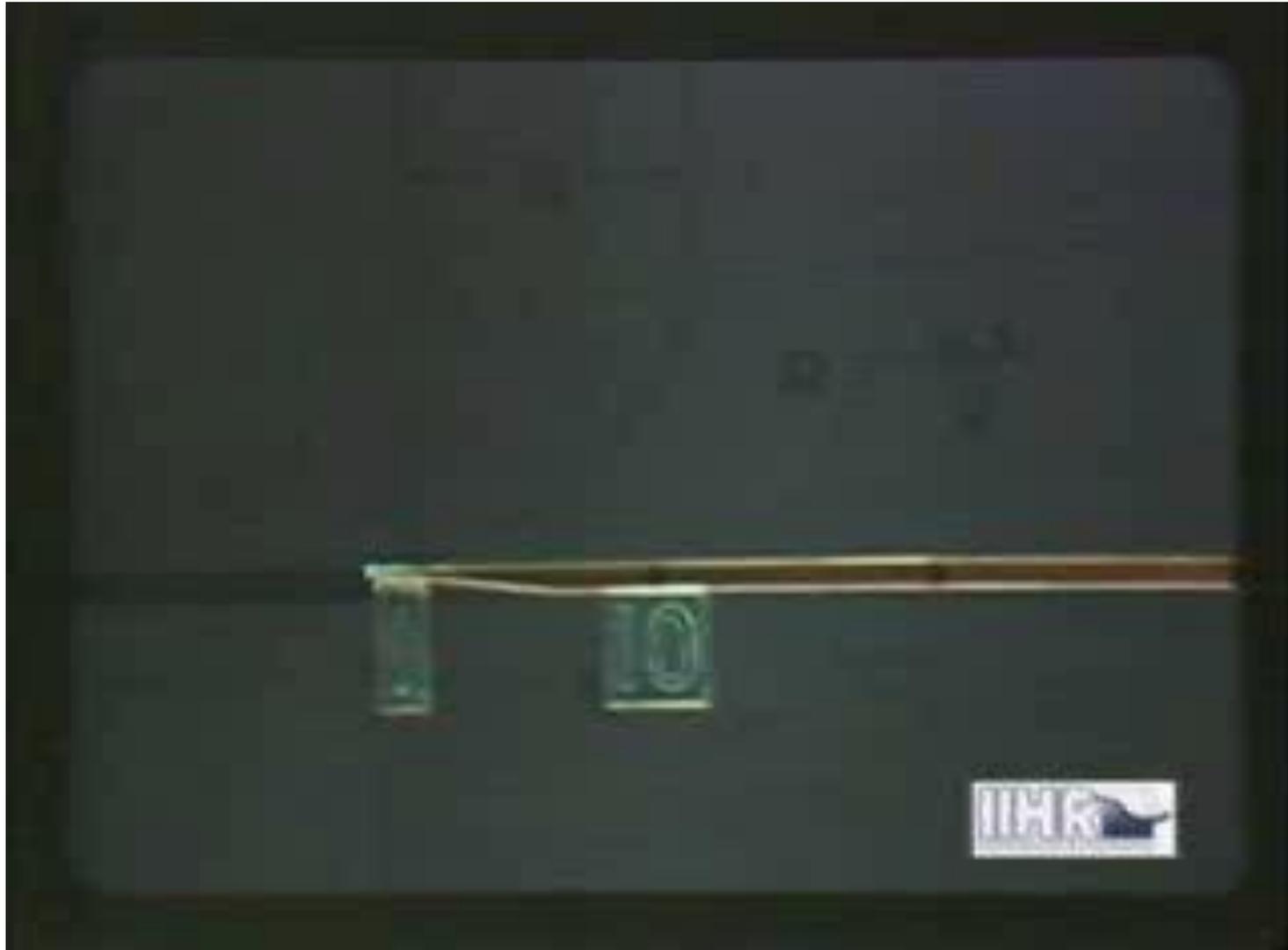
- Camada limite: região delgada próxima à parede, onde as tensões viscosas são importantes



Camada limite

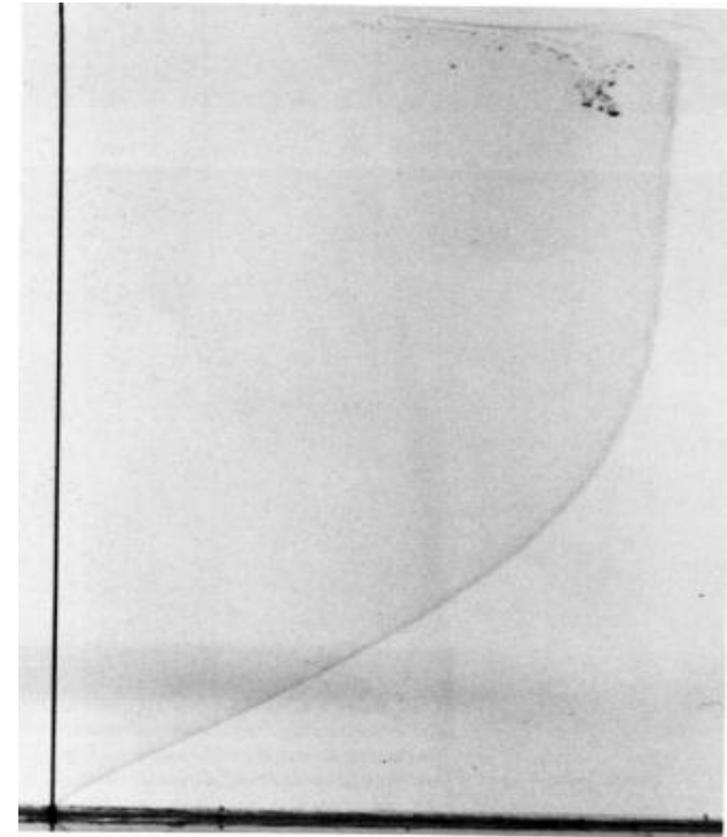


Camada limite



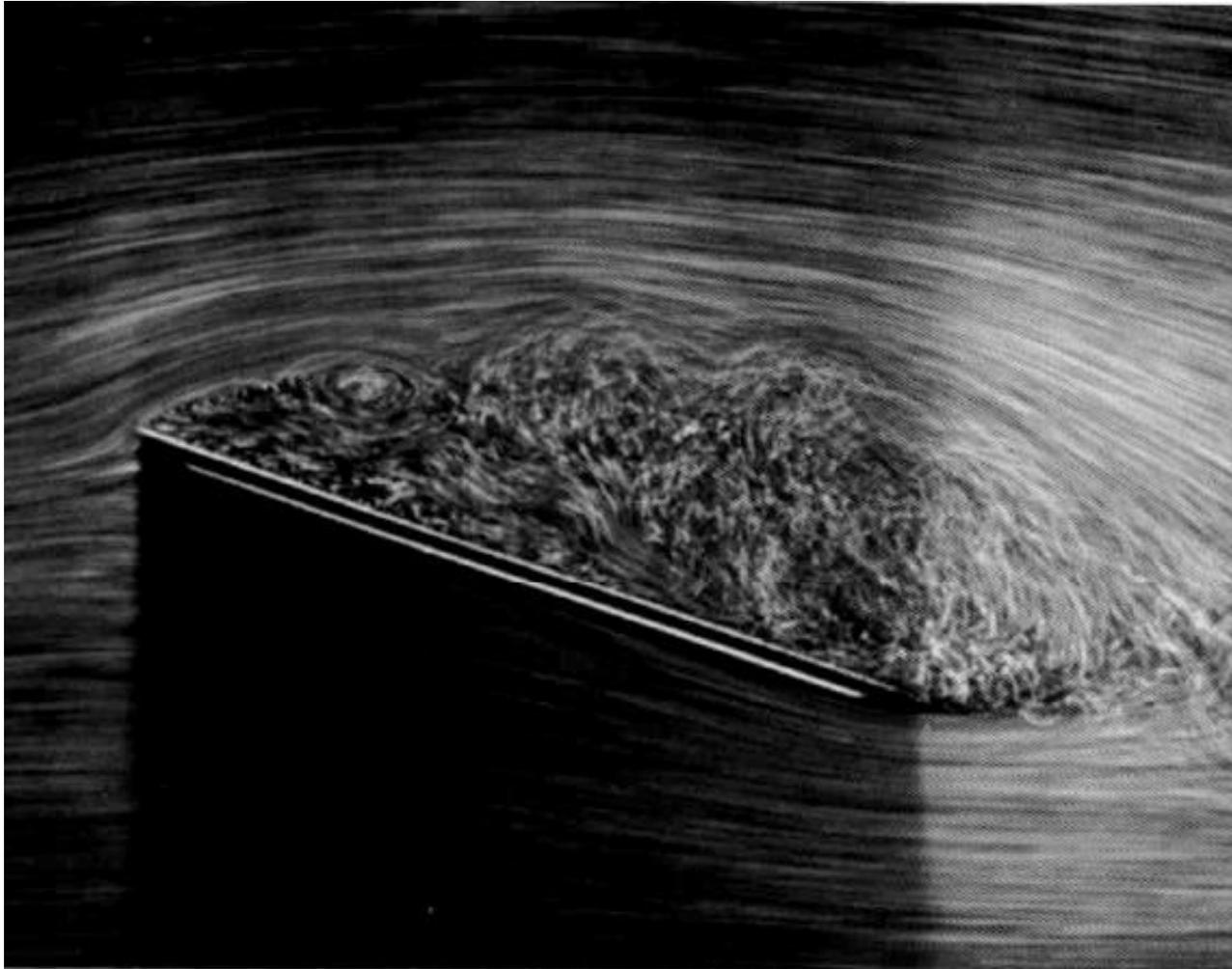
Características do escoamento na camada limite laminar

- Escoamento bidimensional
- $v \ll u$ e $\partial/\partial x \ll \partial/\partial y$
- $u = v = 0$ em $y = 0$ e $u \rightarrow U$ quando $y \rightarrow \infty$
- Pressão é imposta pelo escoamento externo à camada limite



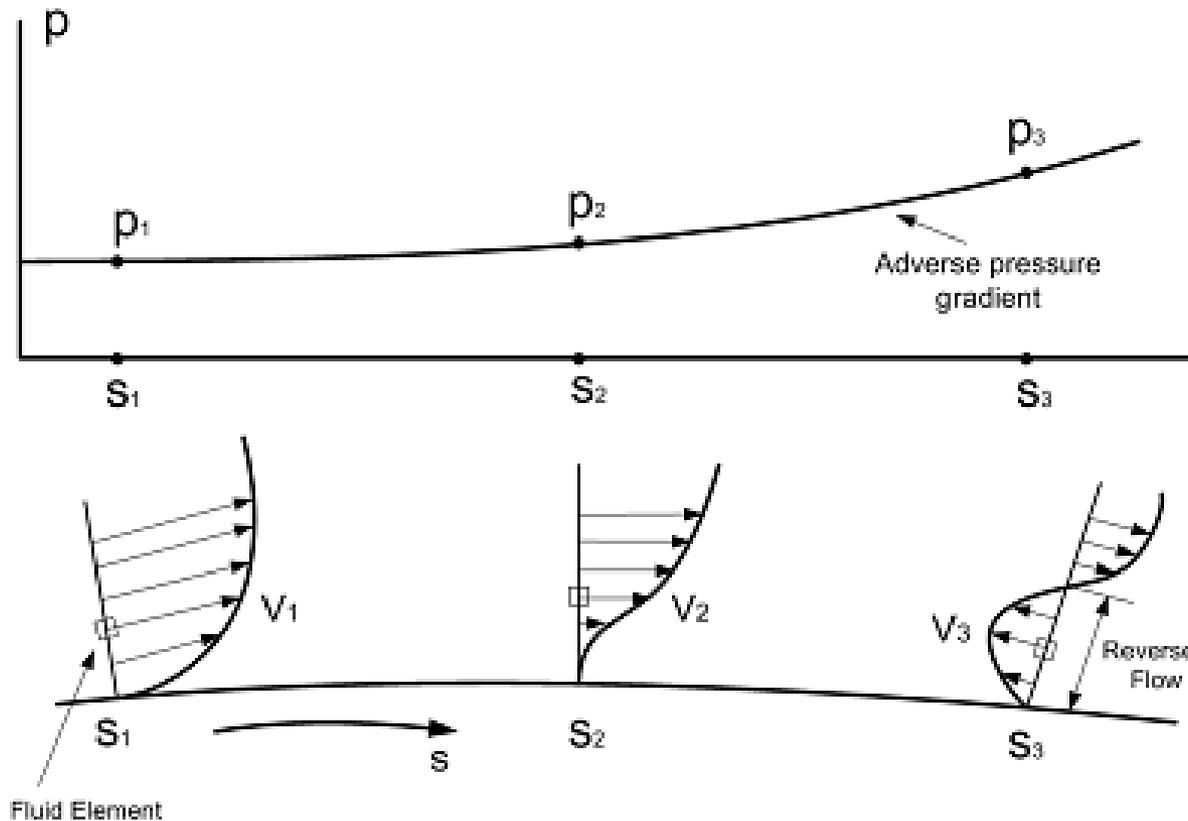
$Re=500$

Separação da camada limite



Separação da camada limite

- Separação devida ao gradiente adverso de pressão

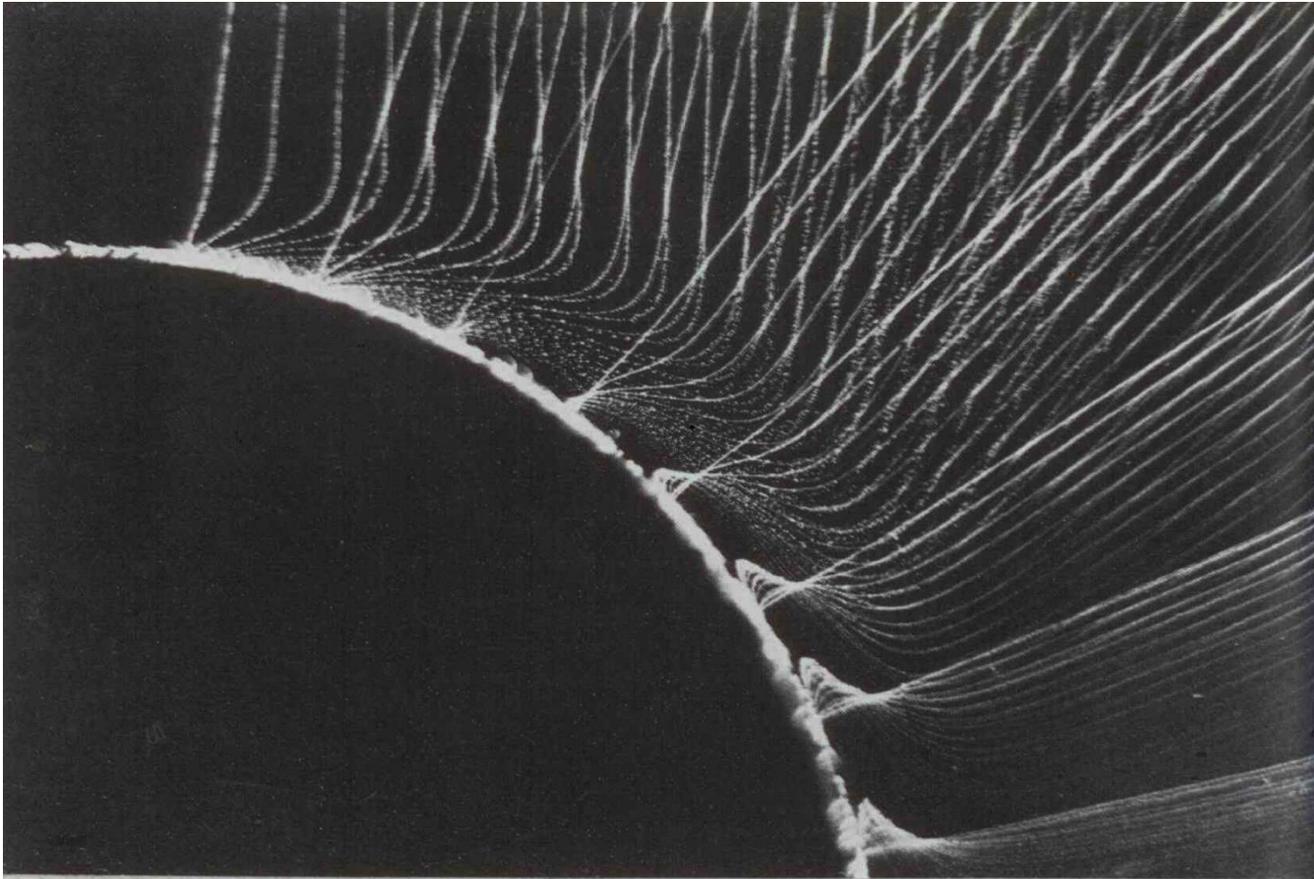


Ponto de separação:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0$$

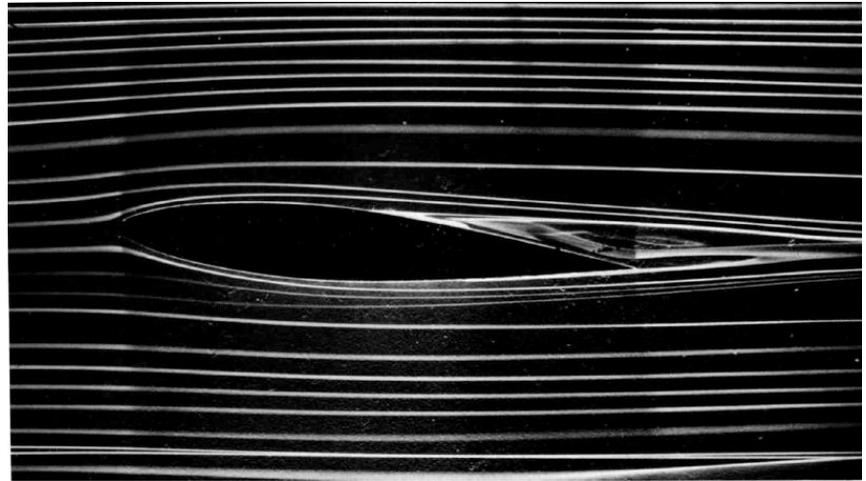
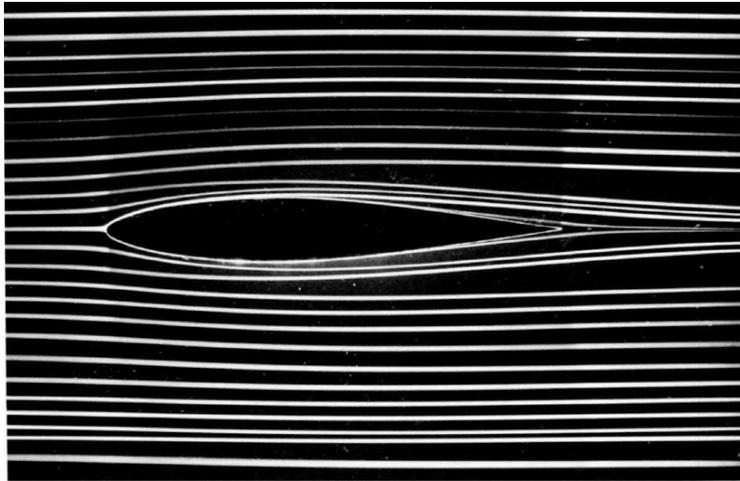
Separação da camada limite

- Separação da camada limite devida ao gradiente adverso de pressão



Separação da camada limite

- Separação devida ao gradiente adverso de pressão

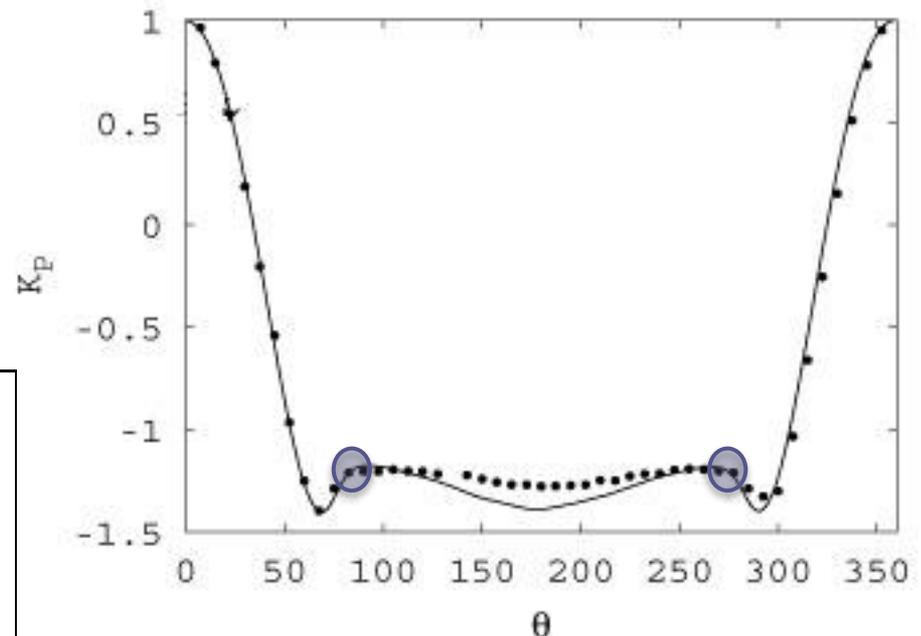
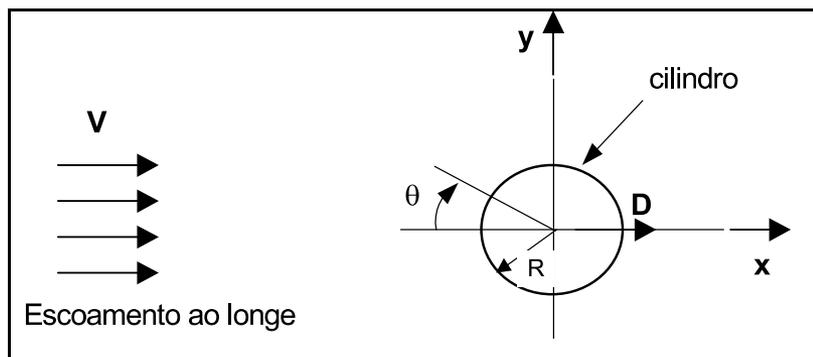


Separação da camada limite



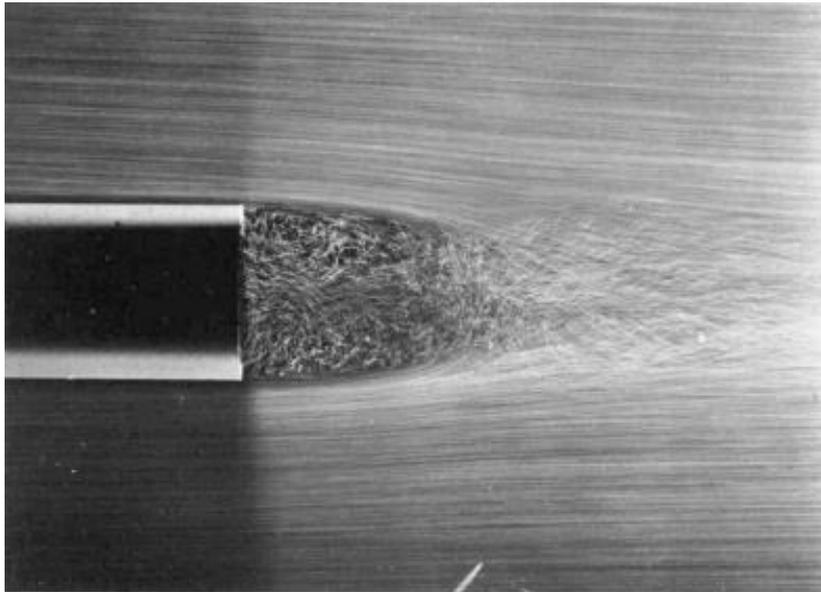
Separação da camada limite

- Separação devida ao gradiente adverso de pressão
 - Identificação do ponto de separação pela distribuição de pressões na superfície

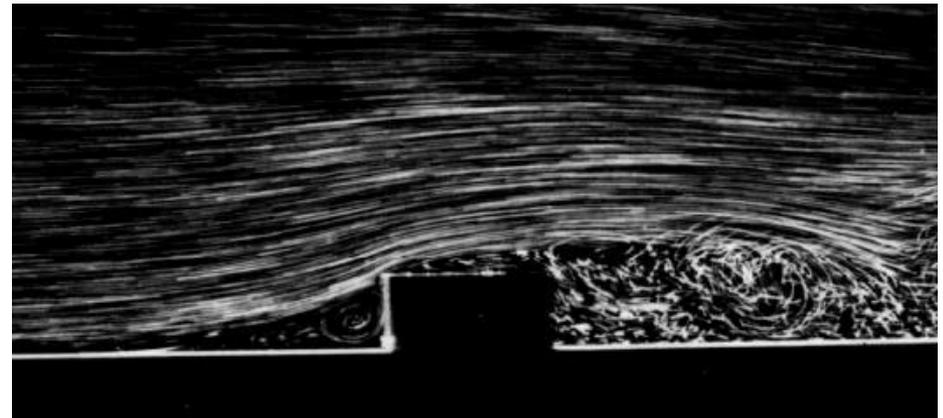


Separação da camada limite

- Separação devida à geometria



*Corpo
axissimétrico*



Degrau

Separação da camada limite

Devida à geometria

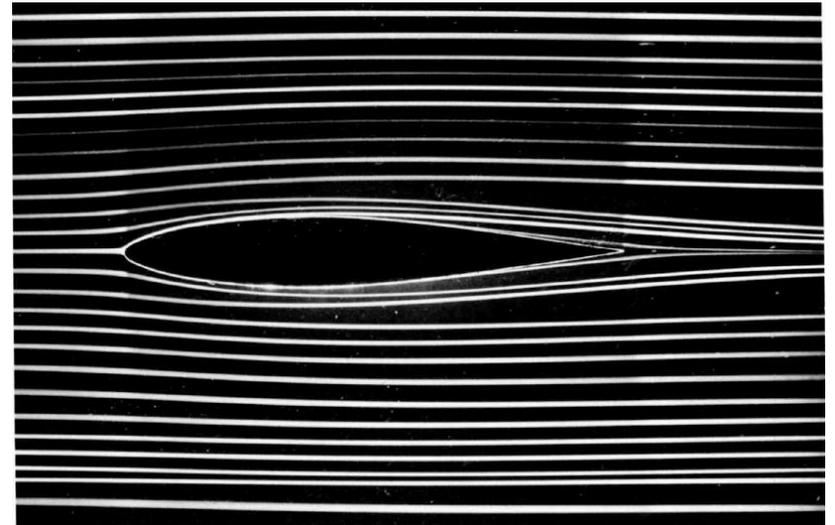
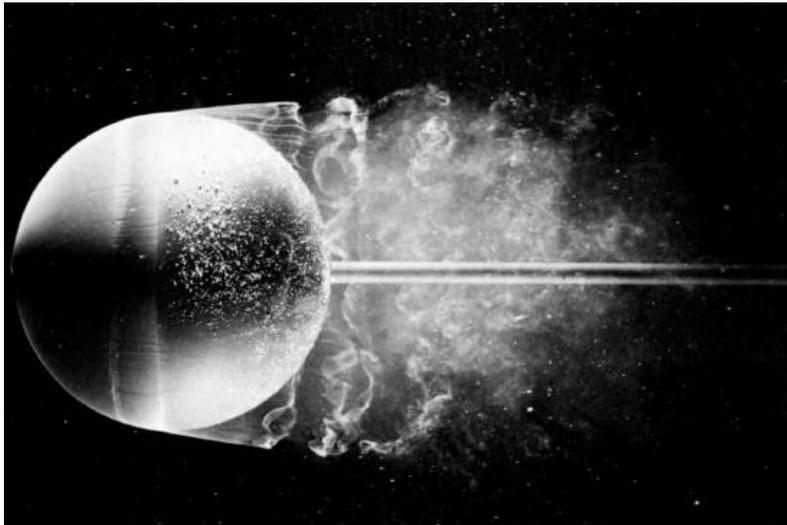
Devido ao gradiente adverso
de pressão

Ponto de separação é fixo!

Ponto de separação depende
das condições do
escoamento!

Separação da camada limite

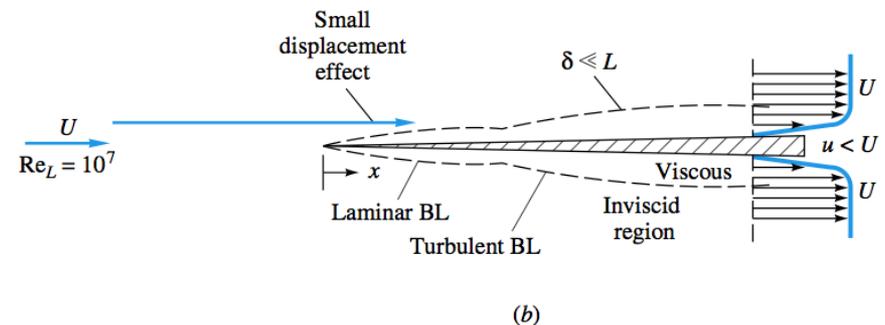
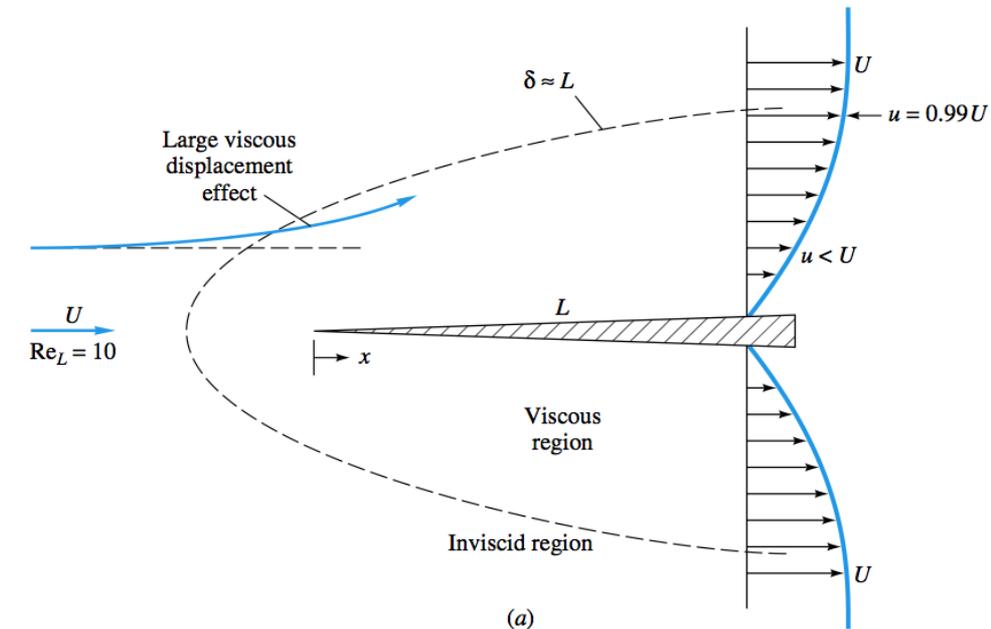
- Corpos rombudos e corpos aerodinâmicos



Dependência do número de Reynolds

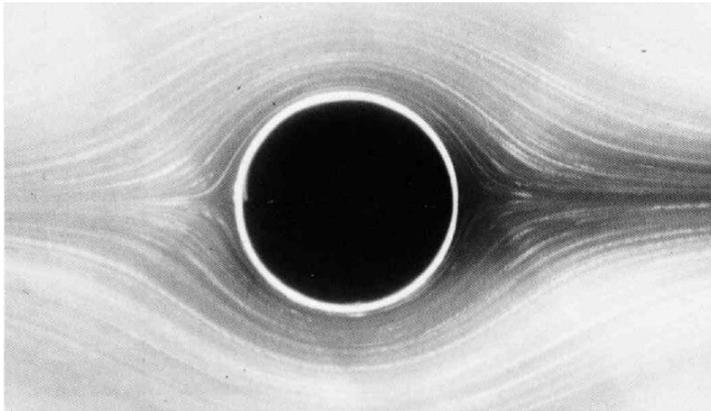
- Corpos aerodinâmicos

Área de influência das tensões viscosas diminui com o aumento de Re .



Dependência do número de Reynolds

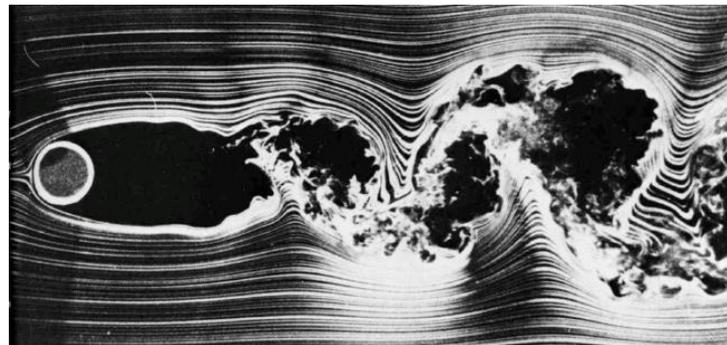
- Corpos rombudos



$Re=0.16$



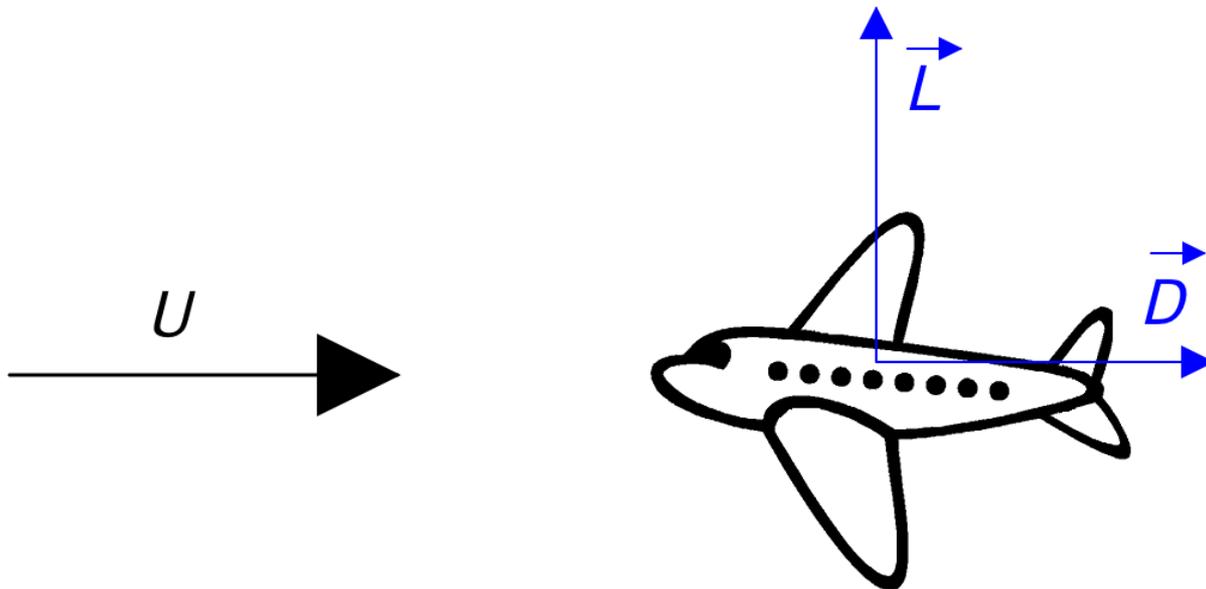
$Re=26$



$Re=10.000$

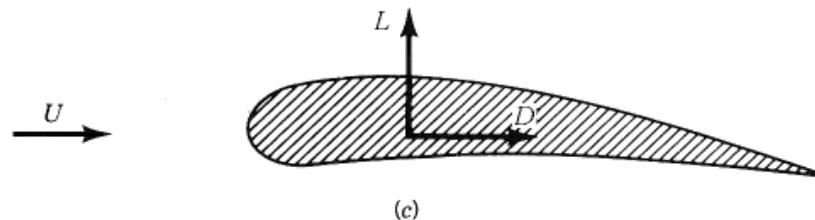
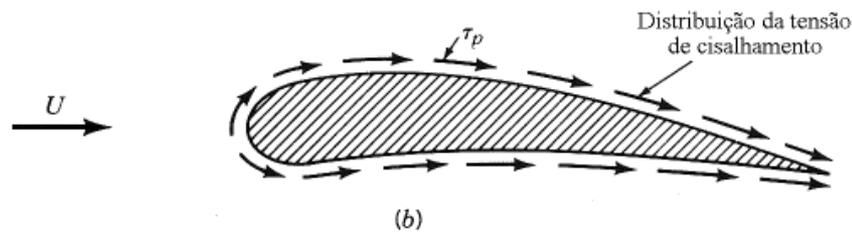
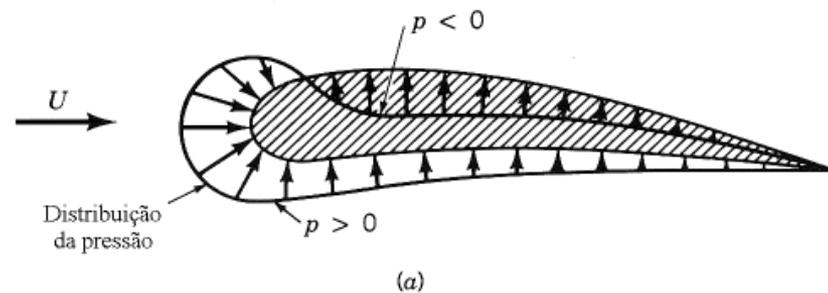
Forças fluidodinâmicas

- Arrasto (D): força na direção do escoamento.
- Sustentação (L): força na direção perpendicular ao escoamento.



Forças fluidodinâmicas

- Origens: forças viscosas e forças de pressão



Forças fluidodinâmicas

- Cálculo das forças

$$\mathbf{F}_s = \int_A d\mathbf{F}_s = \int_A d\mathbf{F}_{\text{pressao}} + \int_A d\mathbf{F}_{\text{cisalhamento}}$$

$$d\mathbf{F}_{\text{pressao}} = -pd\mathbf{A}$$

$$d\mathbf{F}_{\text{cisalhamento}} = \boldsymbol{\tau}_w dA$$

$$D = F_{sx}$$

$$L = F_{sy}$$

Forças fluidodinâmicas

- Forma adimensional – Coeficientes:

- Coeficiente de arrasto: $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$

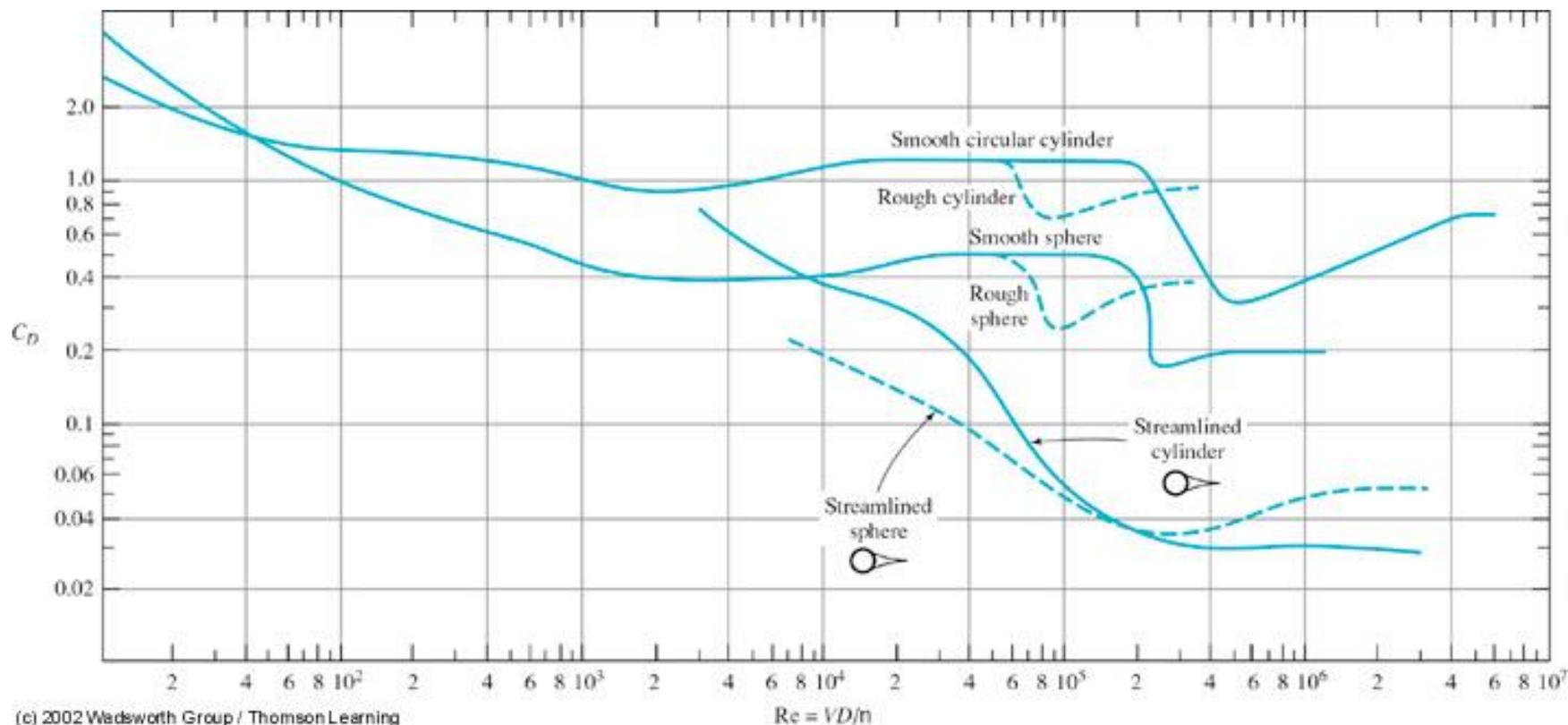
- Coeficiente de sustentação: $C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$

- Dependência:

$$C_D \text{ ou } C_L = \Phi(\text{forma}, Re, \varepsilon/l)$$

Exercícios

1. Uma chaminé cilíndrica com 1 m de diâmetro e 25 m de altura está exposta a um vento uniforme de 55 km/h numa condição tal que $\rho_{\text{ar}} = 1,23 \text{ kg/m}^3$ e $\mu_{\text{ar}} = 1,79 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$. Estime o momento fletor na base da chaminé devido à força do vento.



Solução Exercício 1

Para calcular o momento fletor, vamos assumir que toda a força de arrasto será aplicada no topo da chaminé, logo: $M_F = F_a h = 25F_a$

Para o cálculo da força arrasto: $F_a = C_D \frac{\rho_{ar} V^2 D}{2} Dh$

Calculando o número de Reynolds: $Re = \frac{\rho_{ar} V D}{\mu_{ar}}$ Sendo: $V = 55 \text{ km/h} = 15,3 \text{ m/s}$

Logo: $Re = \frac{1,23 \times 15,3 \times 1}{1,79 \times 10^{-5}} = 1,05 \times 10^6$

Assumindo que a chaminé pode ser considerada um cilindro liso, obtém-se da figura anterior: $C_D = 0,4$

Portanto: $F_a = C_D \frac{\rho_{ar} V^2 D}{2} Dh = 0,4 \frac{1,23 \times (15,3)^2 \times 1}{2} \times 1 \times 25 = 1440 \text{ N}$

Dessa forma: $M_F = 25F_a = 25 \times 1440 = 36000 \text{ N.m}$

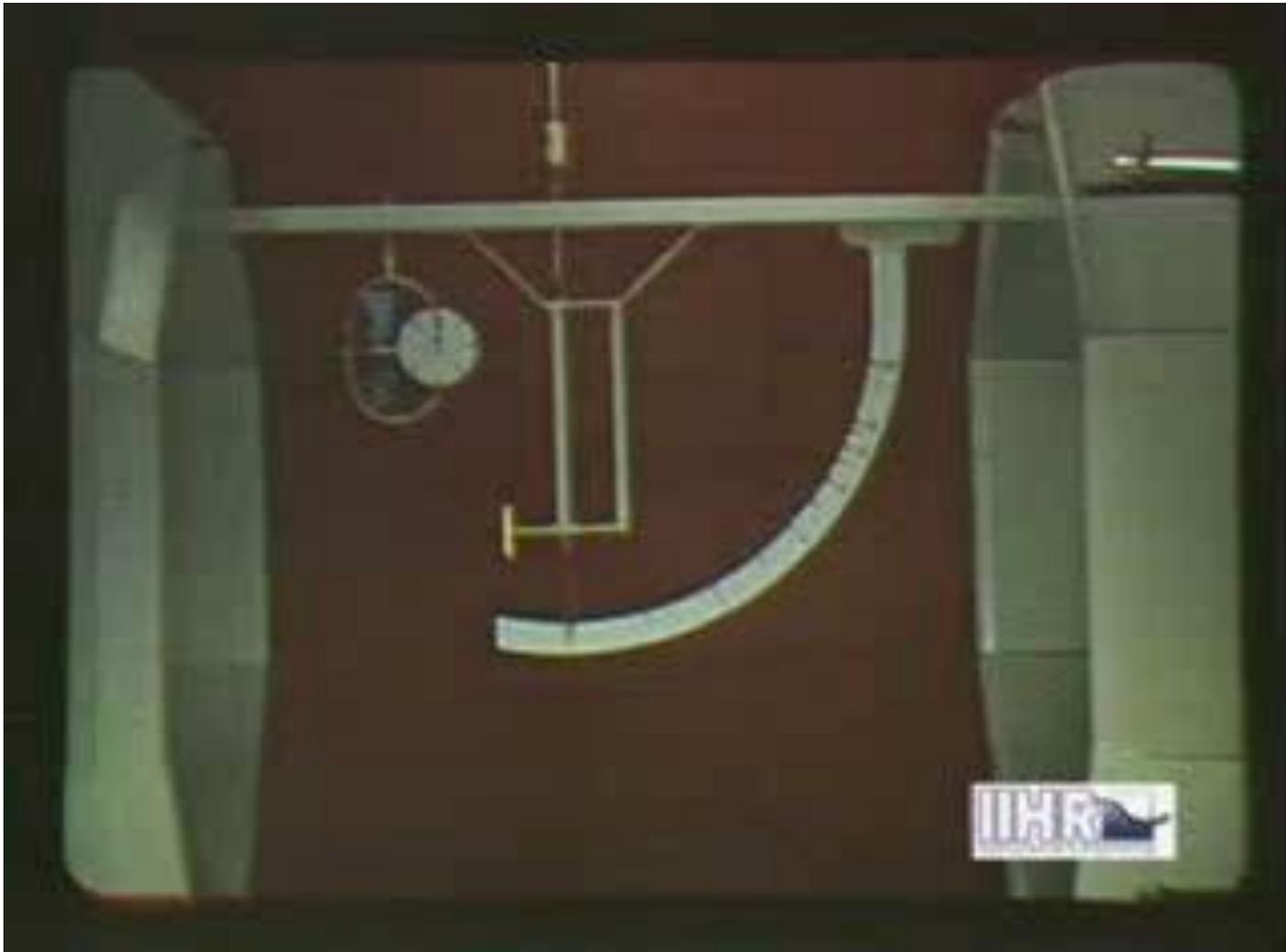
Arrasto - dependência da forma

- As principais responsáveis pelo arrasto são:
 - As forças de **cisalhamento** (viscosas), para corpos **aerodinâmicos**.
 - As forças de **pressão**, para corpos **rombudos**.

SHAPE	C_D	SHAPE	C_D
1)  STING SUPPORT	0.47	12) 	1.17
2) 	0.38	13) 	1.20
3) 	0.42	14) 	1.16
4) 	0.59	15) 	1.60
5)  CUBE	0.80	16) 	1.55
6)  60°	0.50	17) 	1.55
7)  SEPARATION	1.17	18)  VORTEX STREET	1.98
8)  V	1.17	19) 	2.00
9)  V	1.42	20)  V	2.30
10)  V	1.38	21)  V	2.20
11)  CUBE	1.05	22)  V	2.05

$$10^4 < Re < 10^6$$

Arrasto - dependência da forma

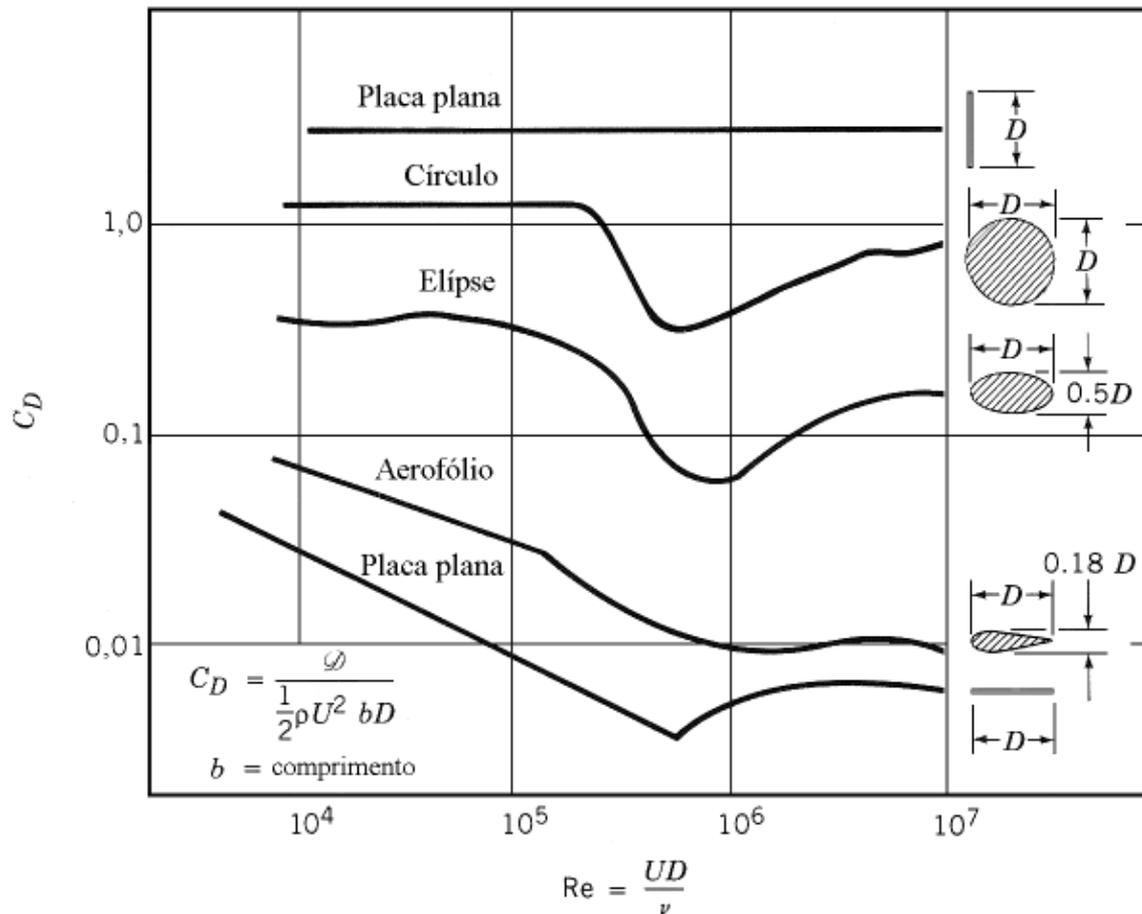


Arrasto - dependência de Reynolds

- A dependência com $Re = VL/\nu$ está relacionada:
 1. Com as tensões viscosas na camada limite;
 2. Com o caráter do escoamento (laminar ou turbulento) na camada limite.
- As tensões de cisalhamento na camada limite turbulenta são maiores que na laminar devido às tensões turbulentas.
- O escoamento na camada limite turbulenta tem mais quantidade de movimento que na laminar, devido às flutuações aleatórias na velocidade.

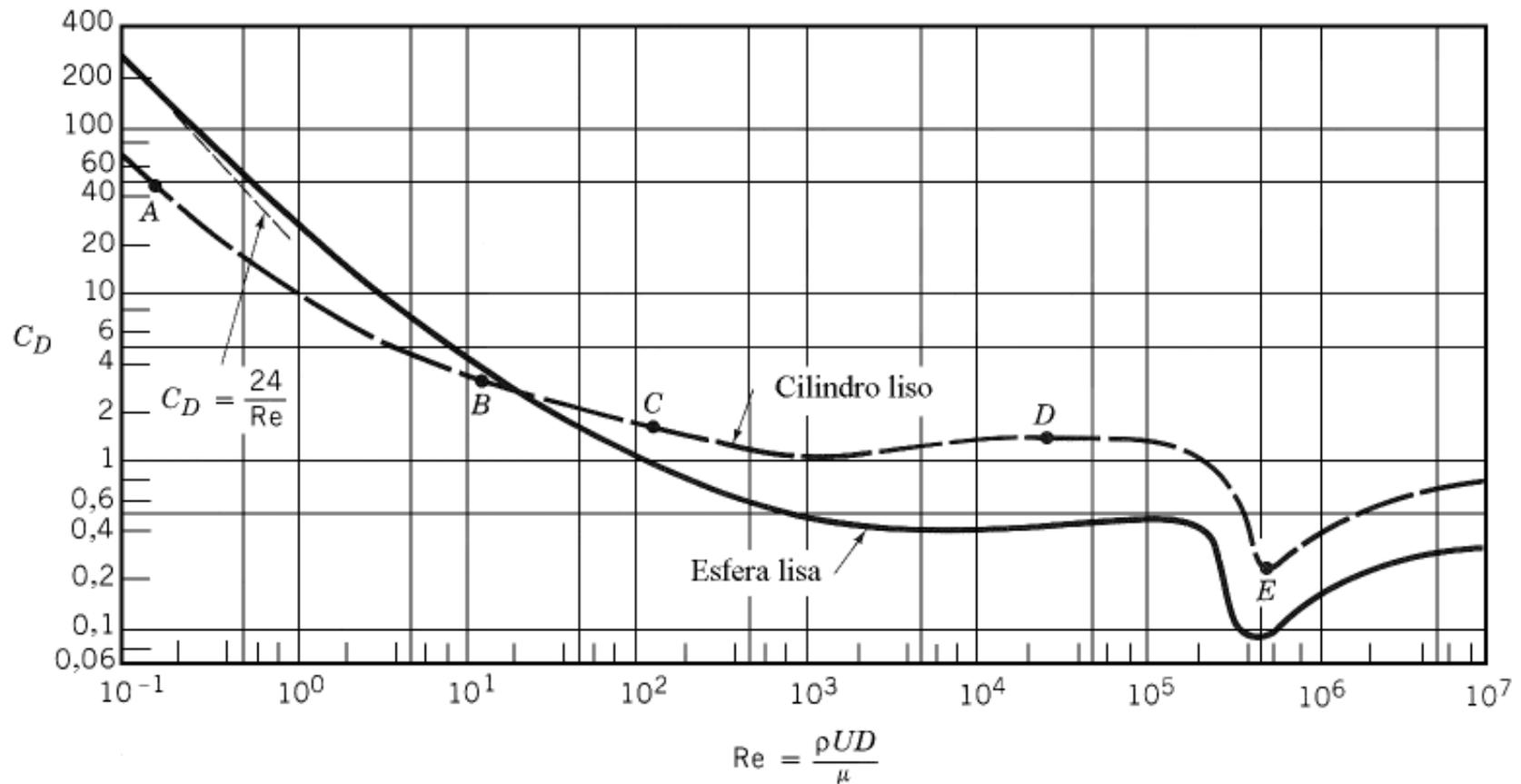
Arrasto

- Dependência do número de Reynolds



Arrasto

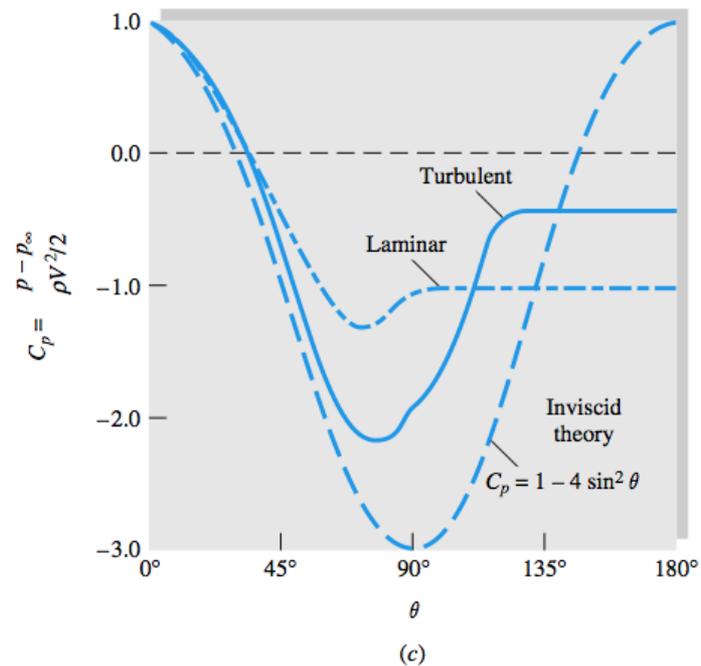
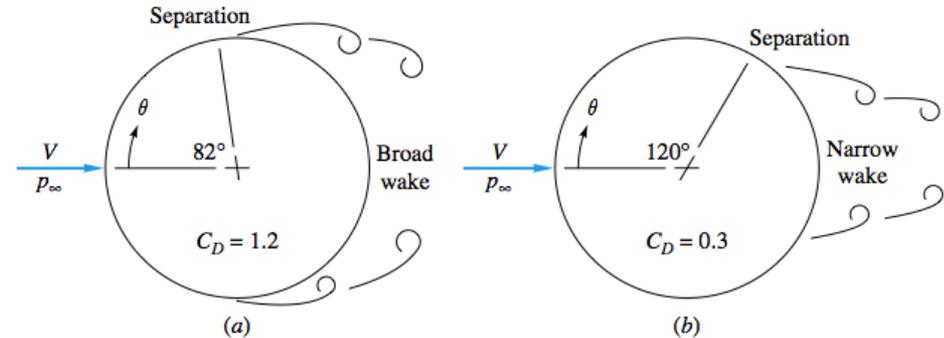
- Dependência do número de Reynolds – corpos rombudos com separação devida a gradiente adverso de pressão



Arrasto

- Efeito da turbulência na camada limite – corpos rombudos com separação devida ao gradiente adverso de pressão

Separação tardia permite uma recuperação de pressão mais eficiente.

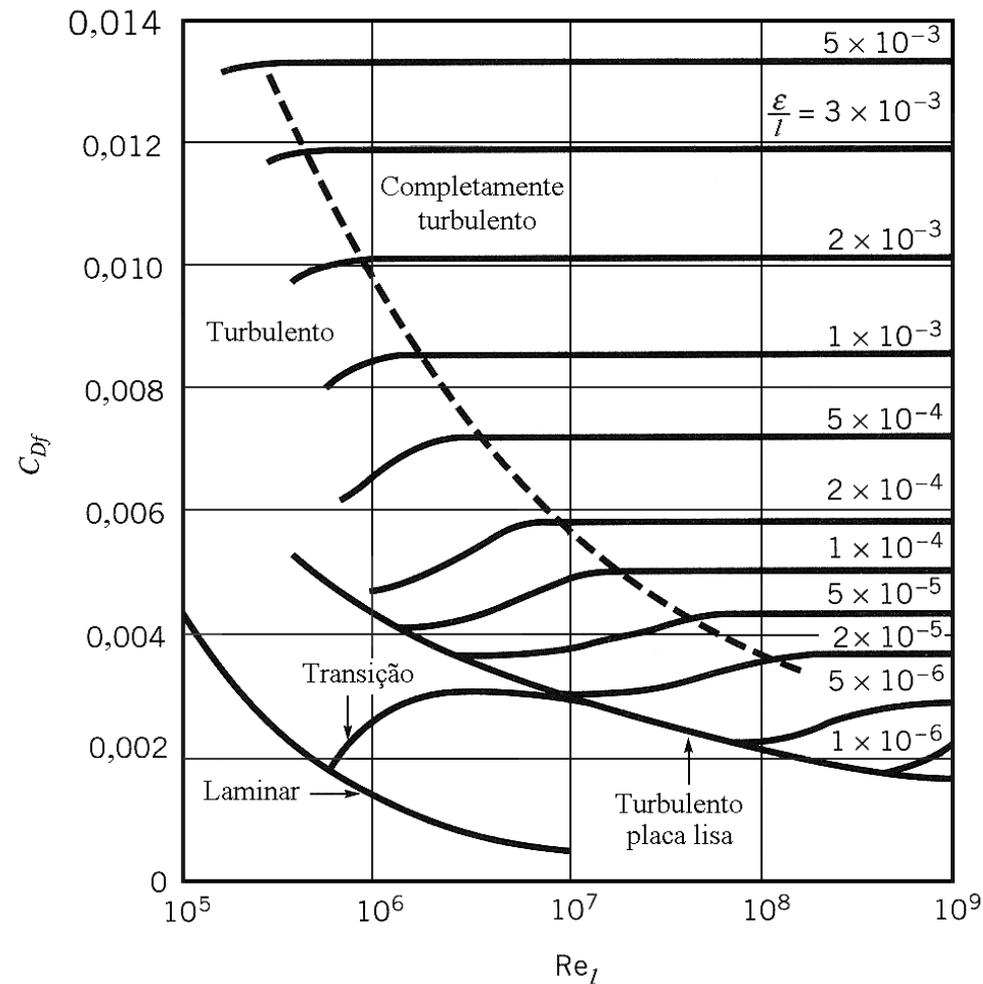


Arrasto

- Efeito da rugosidade – corpos aerodinâmicos

Arrasto é devido principalmente devido ao atrito do escoamento com o corpo

Placa plana

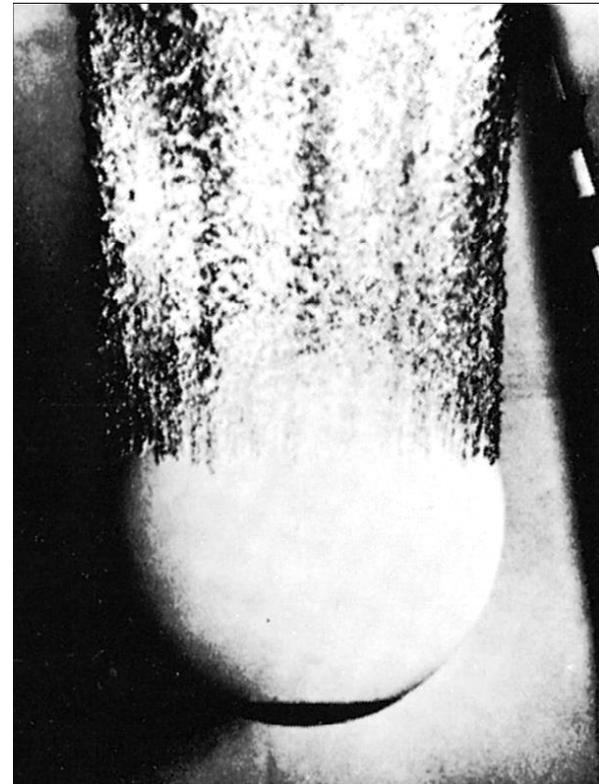


Arrasto

- Efeito da rugosidade – corpos rombudos



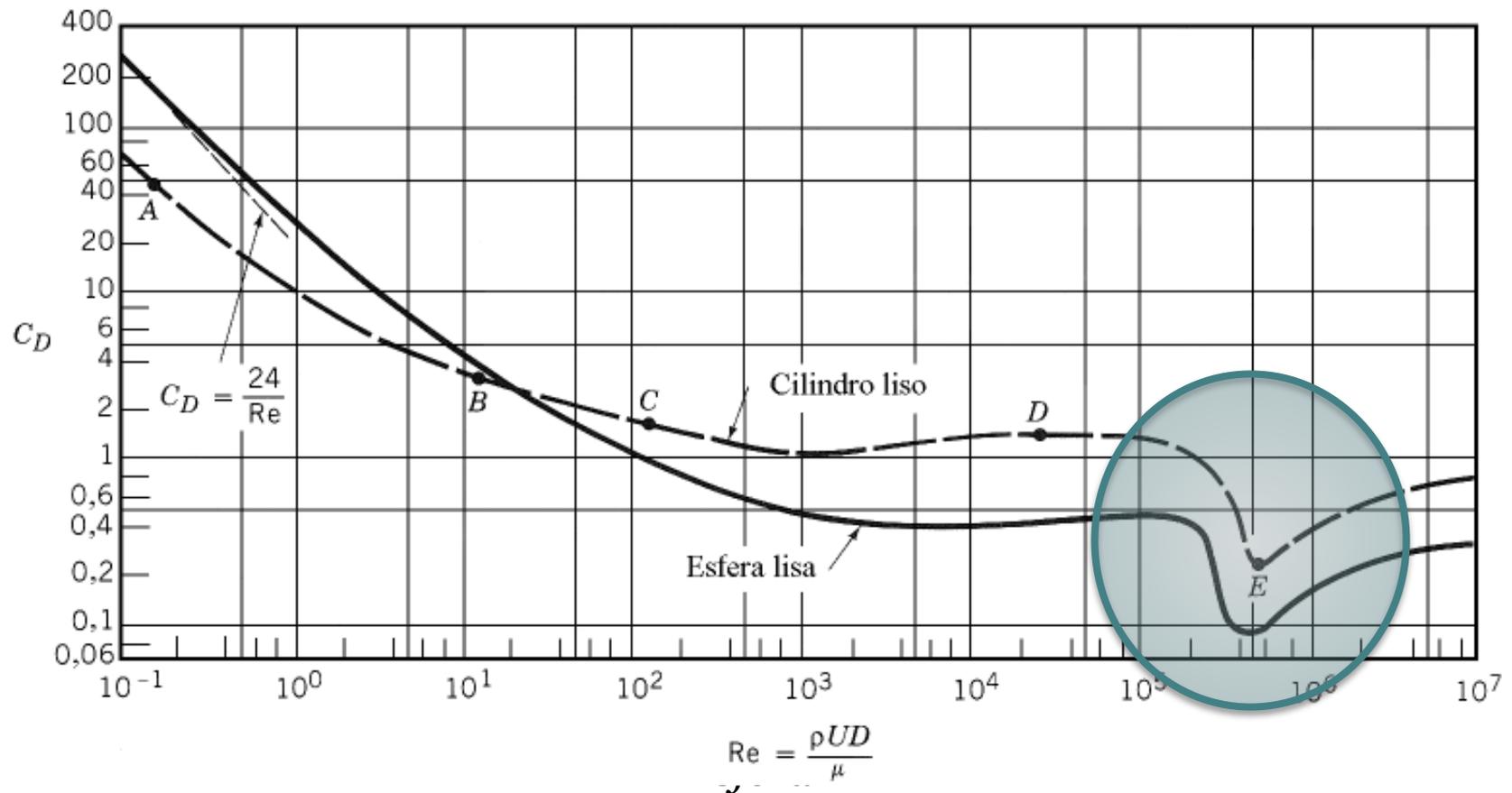
Esfera lisa



Esfera rugosa

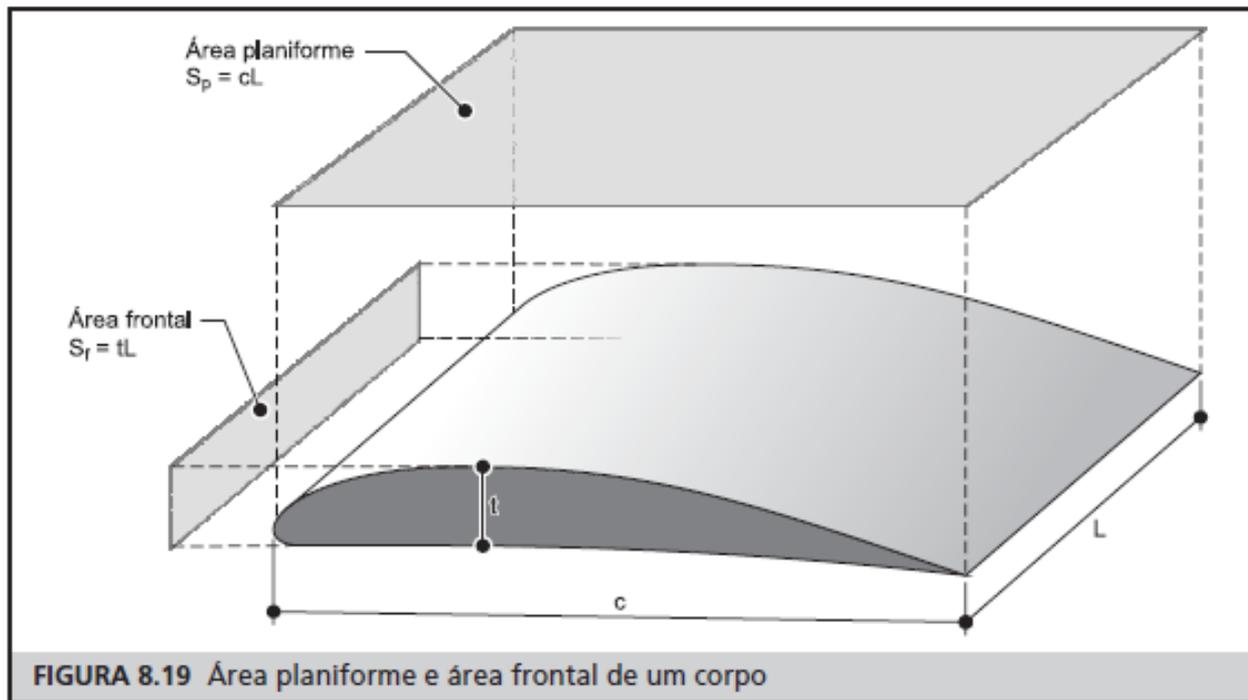
Arrasto

- Efeito da rugosidade – corpos rombudos



Sustentação

- Fólios

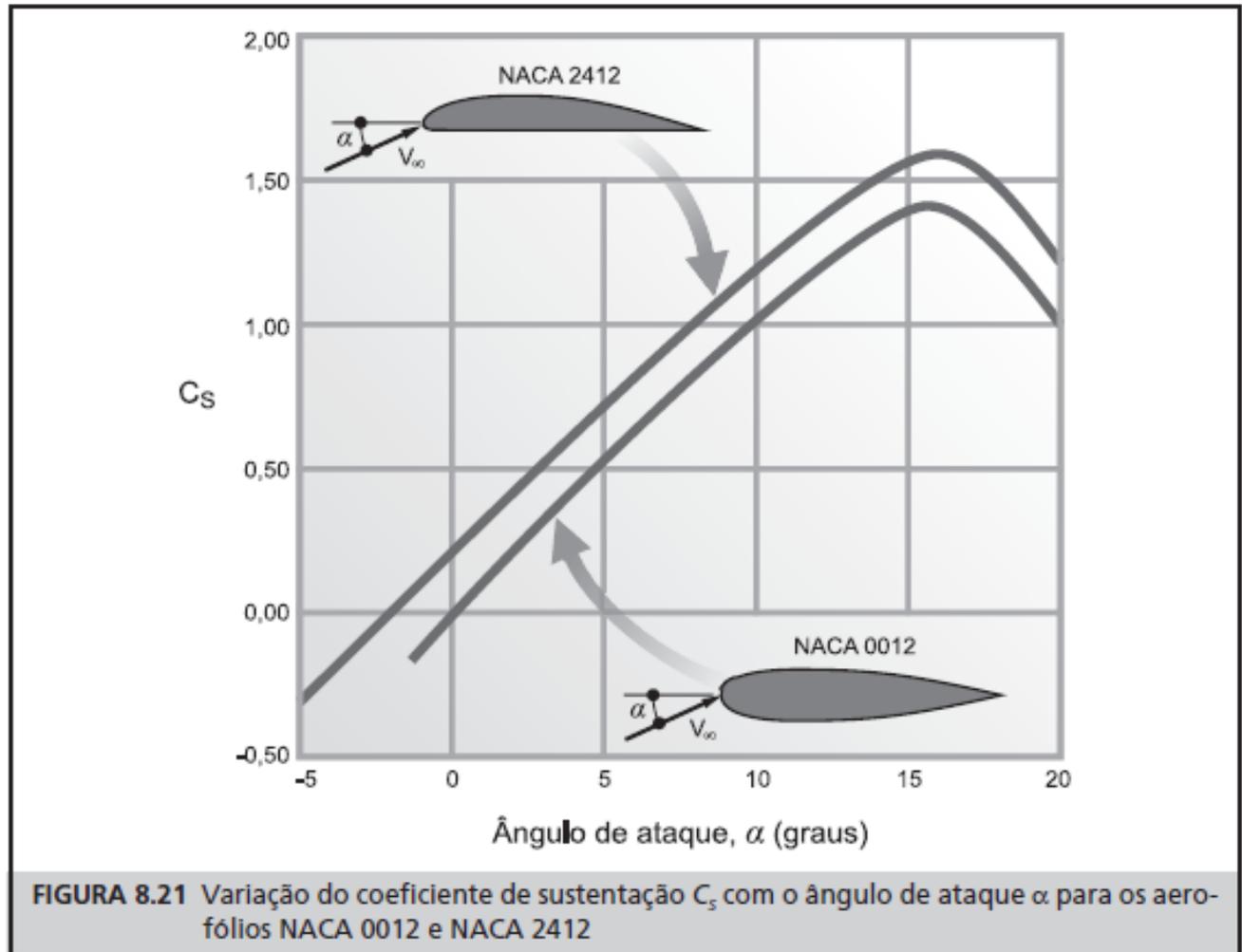


$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_p}$$

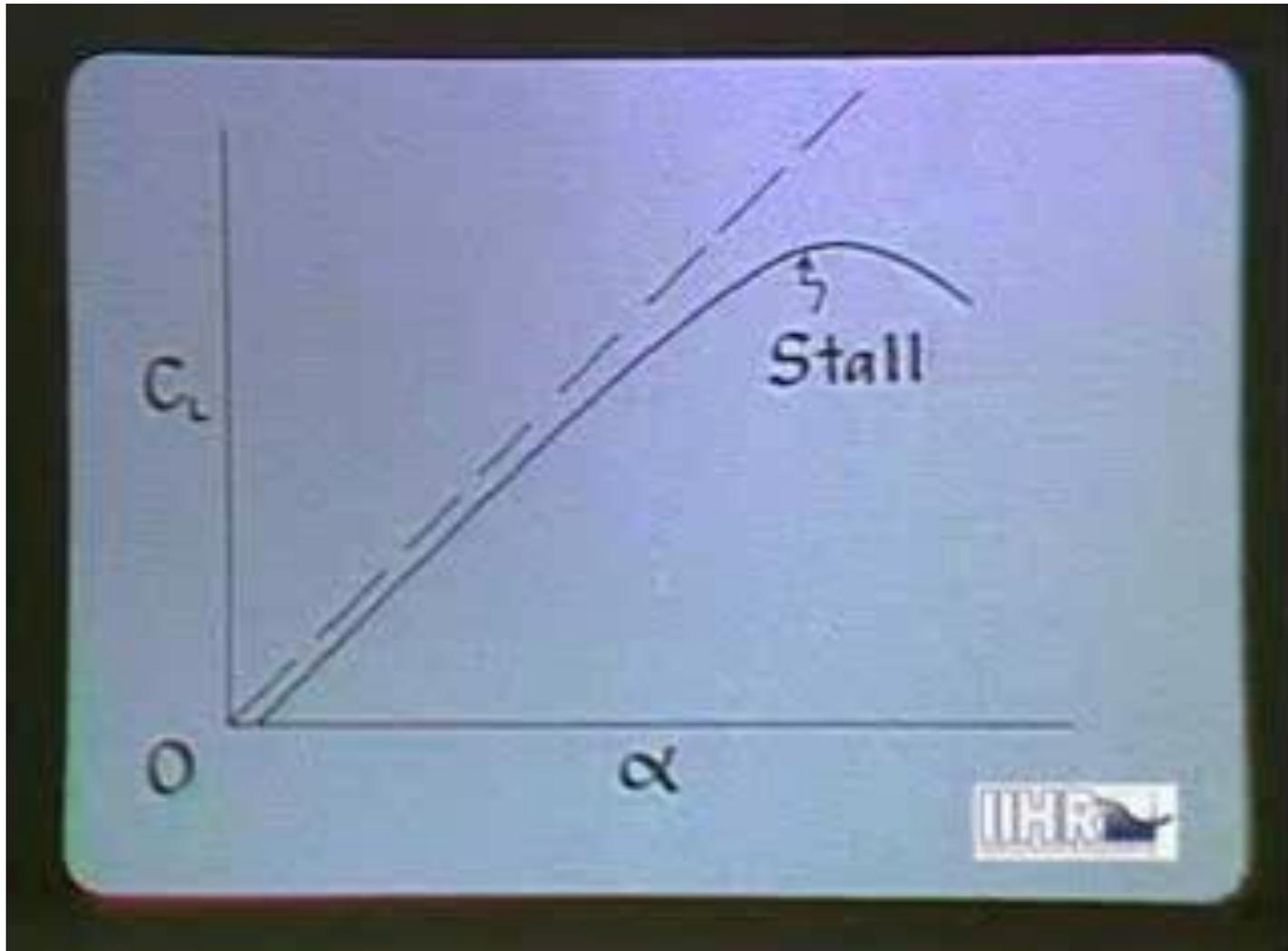
Sustentação

- Fólios

$$C_L = 2\pi \text{sen}(\alpha + \beta)$$



Estol



Exercícios

2. O edifício das Nações Unidas em Nova Iorque pode ser aproximado por um retângulo com 87,5 m de largura e 154 m de altura. Admitindo que $\rho_{\text{ar}} = 1,22 \text{ kg/m}^3$:

- (a) Determine o arrasto neste edifício se o coeficiente de arrasto for 1,3 e a velocidade do vento for uniforme e igual a 20 m/s.
- (b) Repita os cálculos admitindo que o coeficiente de arrasto permanece o mesmo, mas que o perfil de velocidade do vento é típico de uma área urbana ($u = ay^{0,4}$, onde y é a altura em relação ao solo) e que a velocidade do ar no plano médio do edifício é 20 m/s.

Solução Exercício 2

a) Sendo $b=87,5$ m; $h=154$ m; $\rho_{ar} = 1,22$ kg/m³; $C_D=1,3$; $V= 20$ m/s

$$F_a = C_D \frac{\rho_{ar} V^2}{2} b h = 1,3 \times \frac{1,22 \times (20)^2}{2} \times 87,5 \times 154 = 4,27 \times 10^6 N$$

b) Sendo: $u = ay^{0,4}$, onde y =altura em relação ao solo e $V_{ar, \text{plano médio}} = 20$ m/s

$$F_a = \int_0^h C_D \frac{\rho_{ar}}{2} [u(y)]^2 b dy = C_D \frac{\rho_{ar}}{2} b \int_0^h [ay^{0,4}]^2 dy$$

Para $y=b/2=154/2=77$ m; $u_y(77)=20=a(77)^{0,4} \rightarrow a=3,5191$

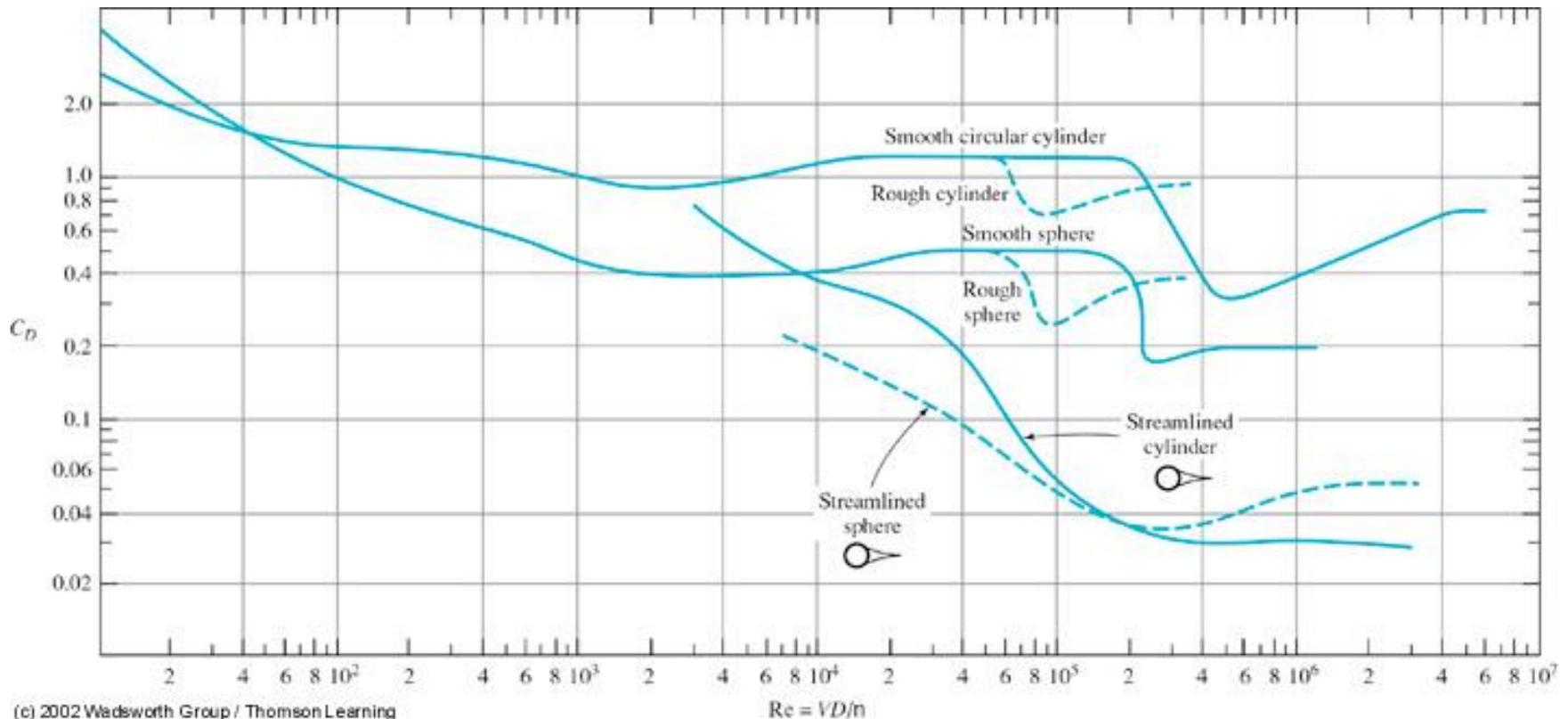
Logo: $u(y) = 3,5191y^{0,4}$

$$\text{Portanto: } F_a = 1,3 \times \frac{1,22}{2} \times 87,5 \times (3,5191)^2 \int_0^{154} y^{0,8} dy = 859,30 \frac{1}{1,8} y^{1,8} \Big|_0^{154}$$

$$F_a = 4,13 \times 10^6 N$$

Exercícios

3. Qual é o arrasto sobre um tanque esférico de armazenagem de água de 10 m de diâmetro e superfície lisa, sujeito a ventos de 80 km/h? (Admita $\rho_{ar} = 1,2 \text{ kg/m}^3$ e $\nu_{ar} = 1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)



Solução Exercício 3

Sendo $D=10$ m; $\rho_{ar} = 1,2$ kg/m³; $v_{ar}=1,6 \times 10^{-5}$ m²/s; $V= 80$ km/h:

$$F_a = C_D \frac{\rho_{ar} V^2}{2} \frac{\pi D^2}{4}$$

Para avaliar C_D , temos que avaliar o número de Reynolds. Logo:

$$Re = \frac{VD}{v_{ar}} = \frac{(80/3,6)}{1,6 \times 10^{-5}} = 1,39 \times 10^6$$

Com base no gráfico do slide anterior: $C_D=0,2$ (esfera rugosa). Logo:

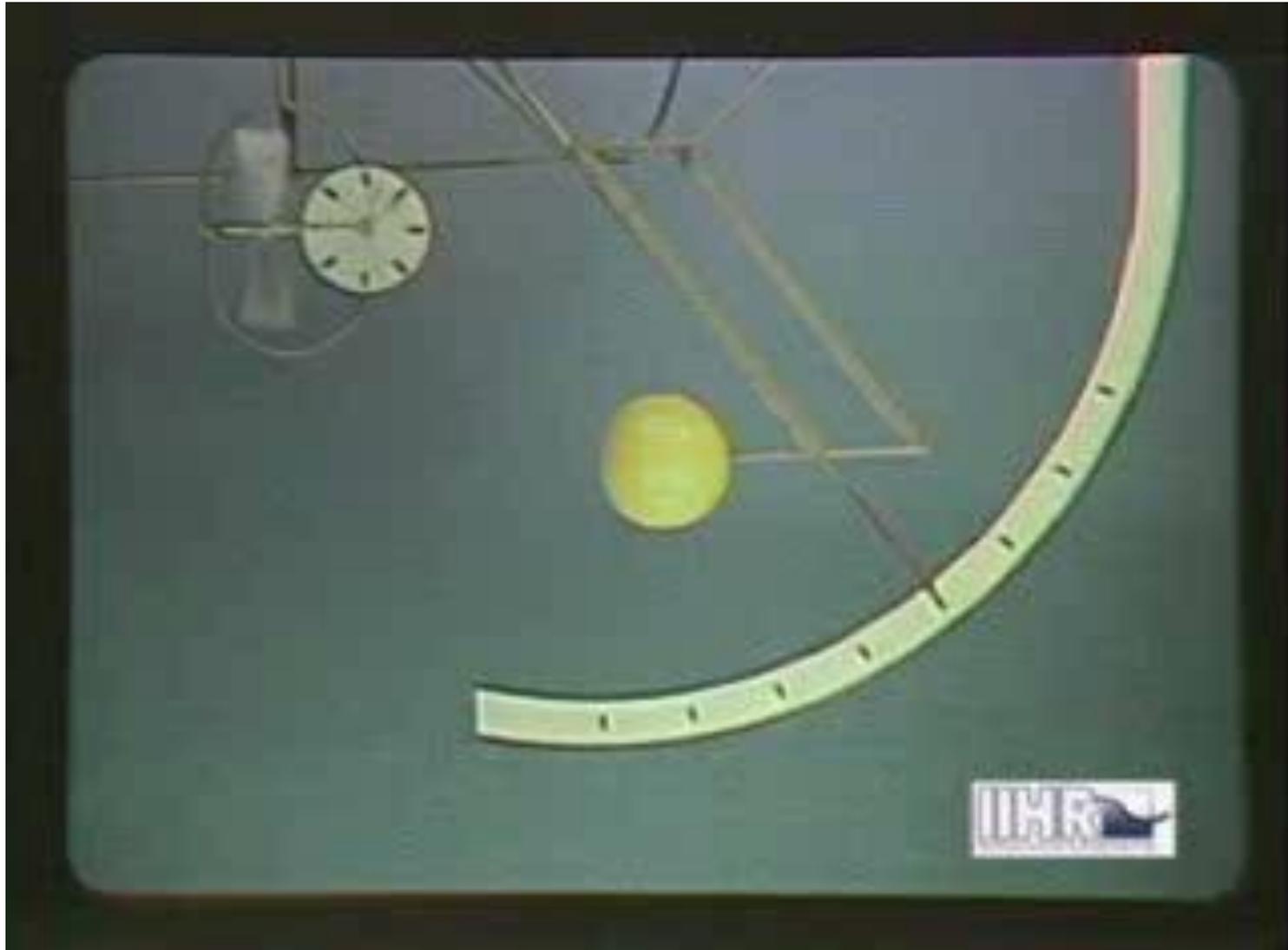
$$F_a = 0,2 \times \frac{1,2 \times 22,2^2}{2} \times \frac{\pi 10^2}{4} = 4645 \text{ N}$$

Forças fluidodinâmicas

- Interferência:

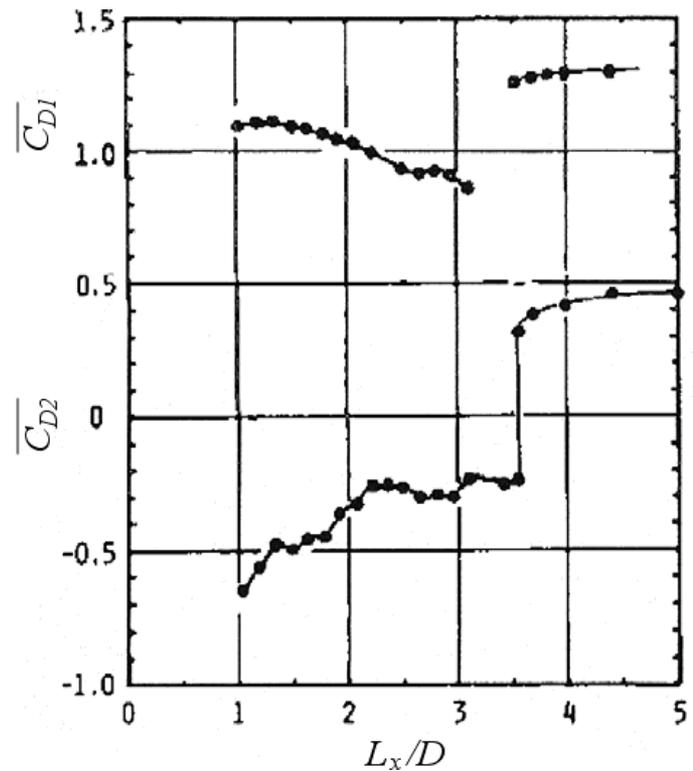
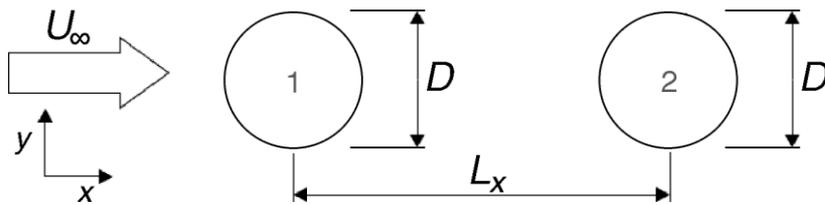
“Quando dois ou mais corpos estão posicionados próximos uns dos outros e imersos na corrente fluida, as forças fluidodinâmicas exercidas sobre cada um deles pode ser completamente diferente daquela observada quando os corpos estão isolados.”

Interferência

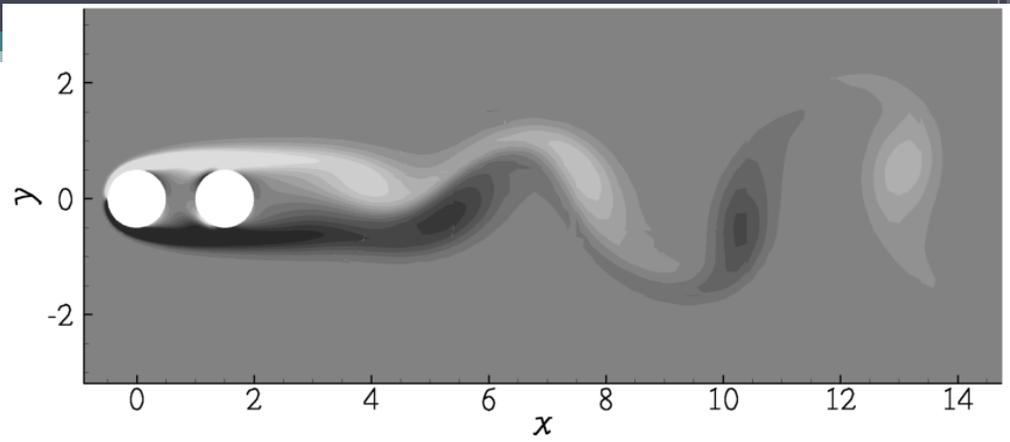


Interferência

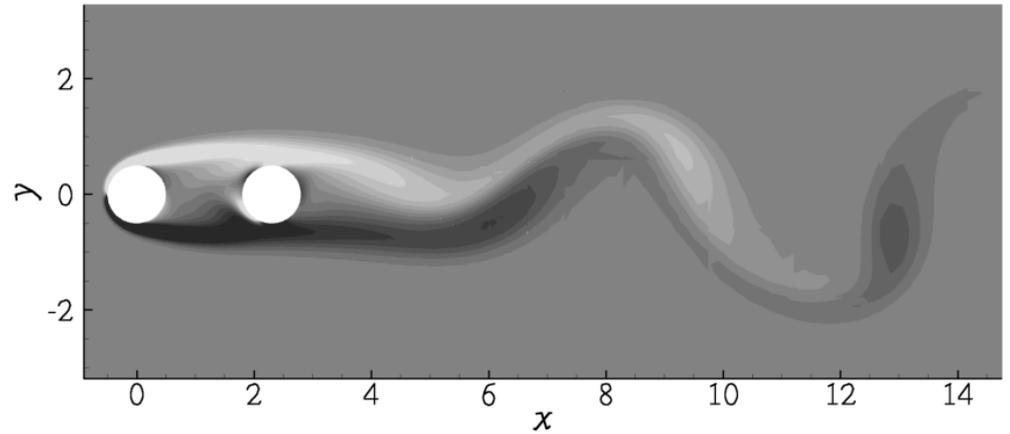
- Cilindros posicionados em “tandem”



$$L_x/D=1,5$$



$$L_x/D=2,3$$



$$L_x/D=5$$

