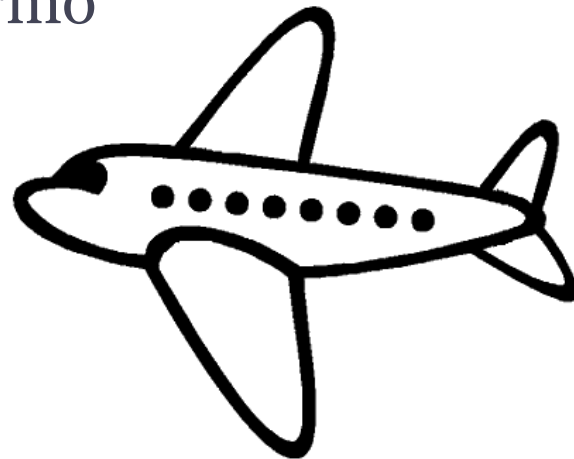
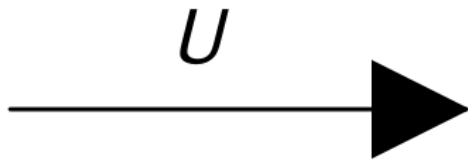


# Escoamentos externos

PME3238 - Fenômenos de Transporte  
Aula 16 – Prof. Dr. Bruno Souza Carmo



# Aplicações



- Aeronaves
- Veículos terrestres
- Embarcações e submarinos
- Edificações

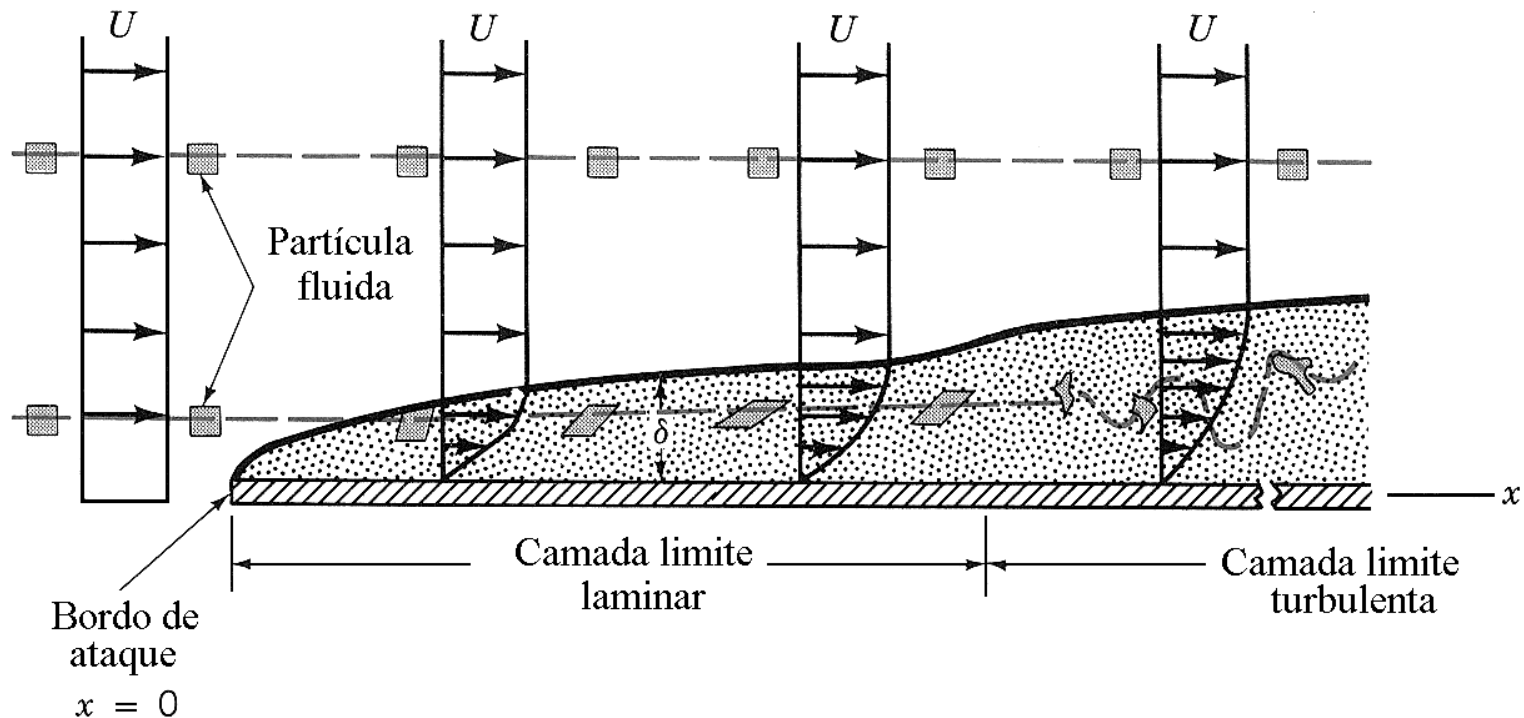


# O colapso da ponte de Tacoma



# Camada limite

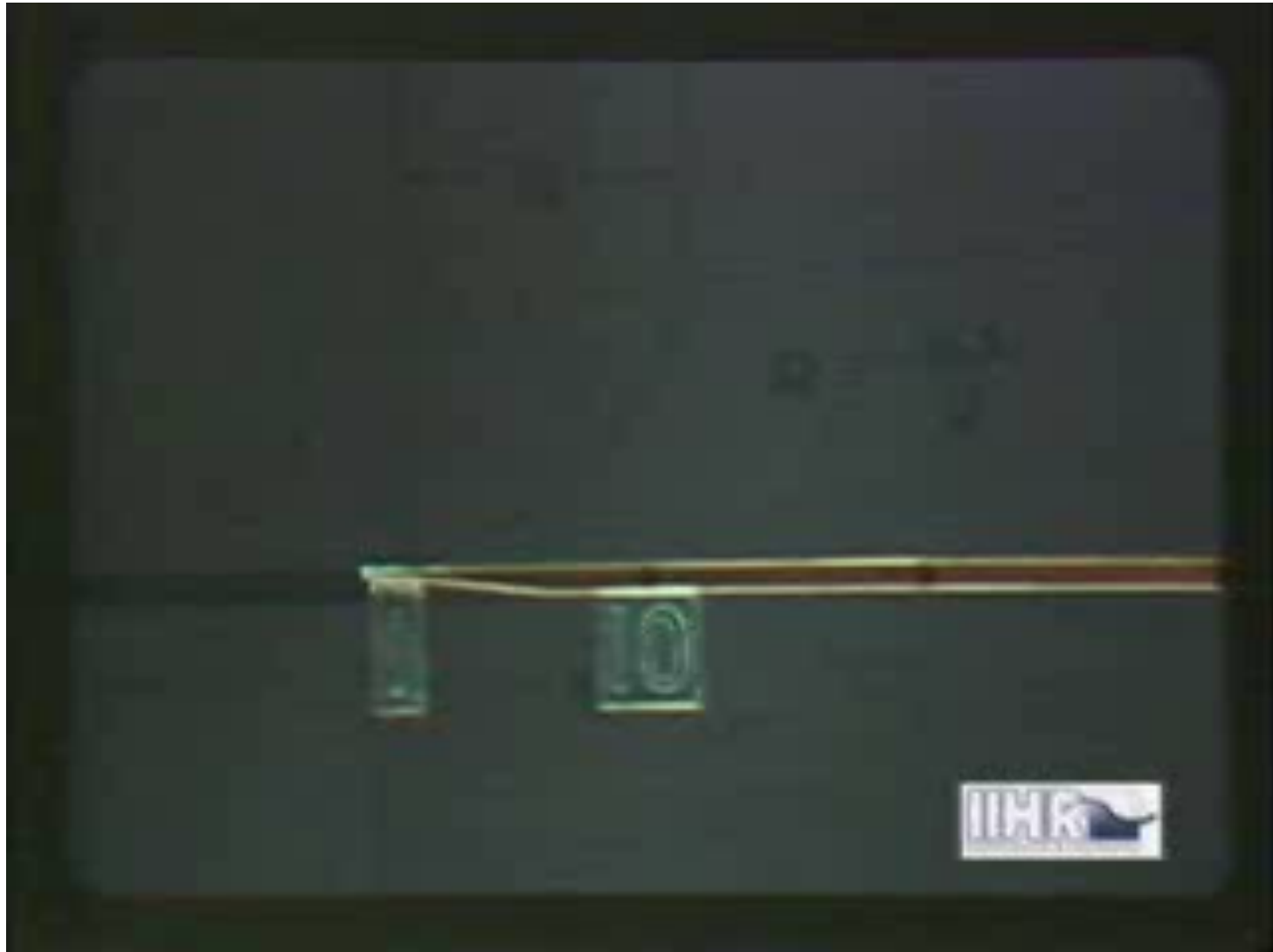
- Camada limite: região delgada próxima à parede, onde as tensões viscosas são importantes



# Camada limite

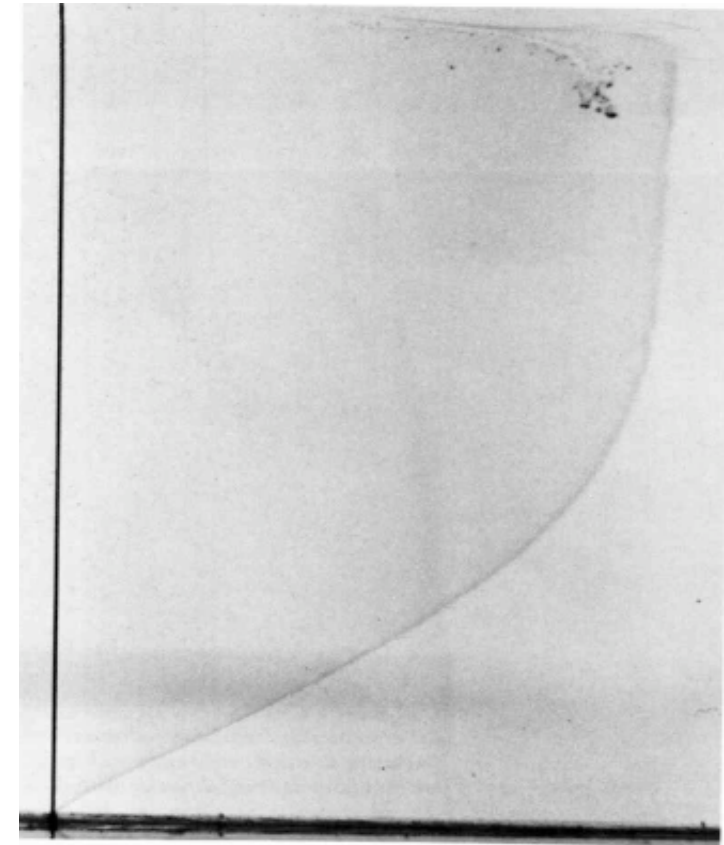


# Camada limite



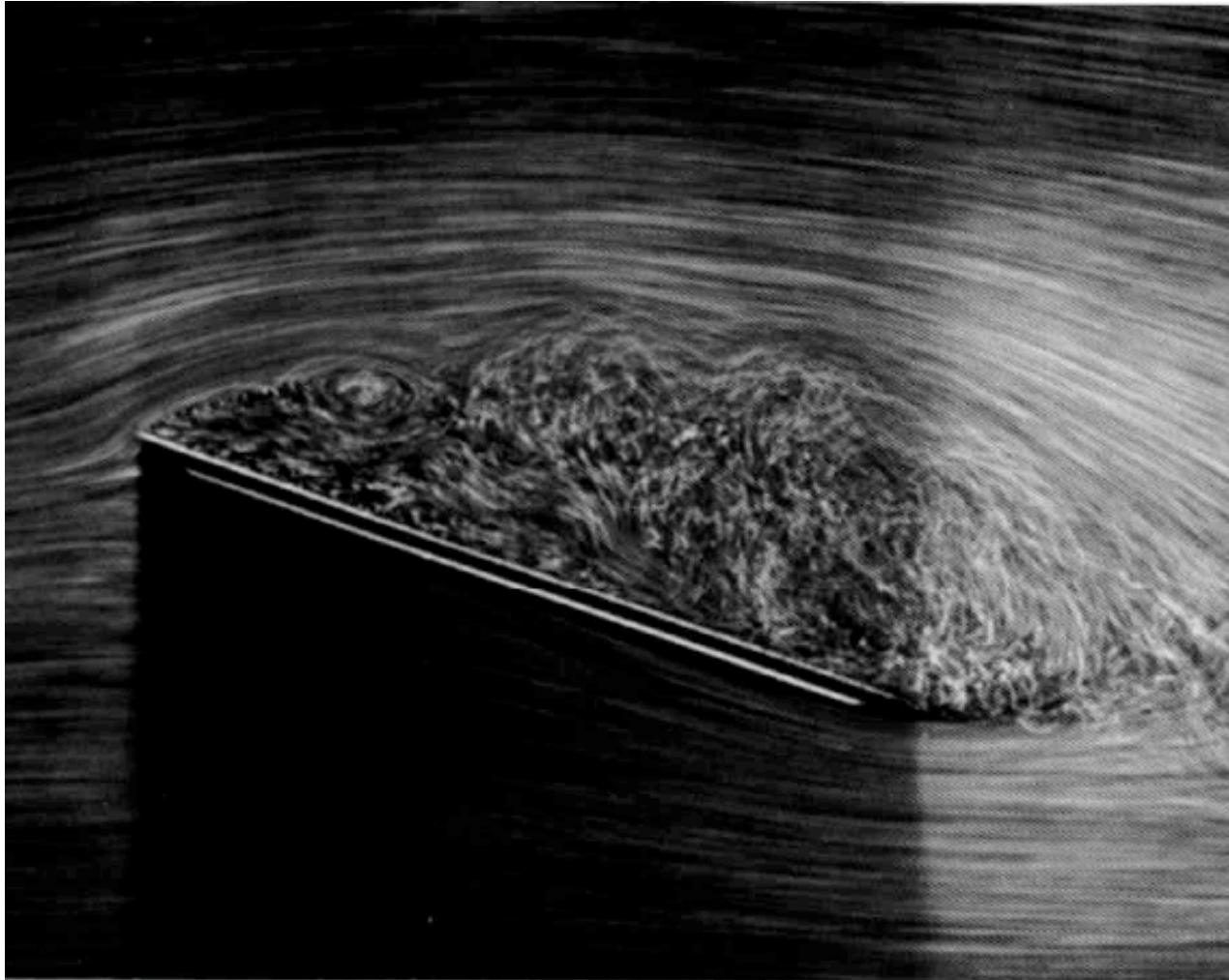
# Características do escoamento na camada limite laminar

- 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



$Re=500$

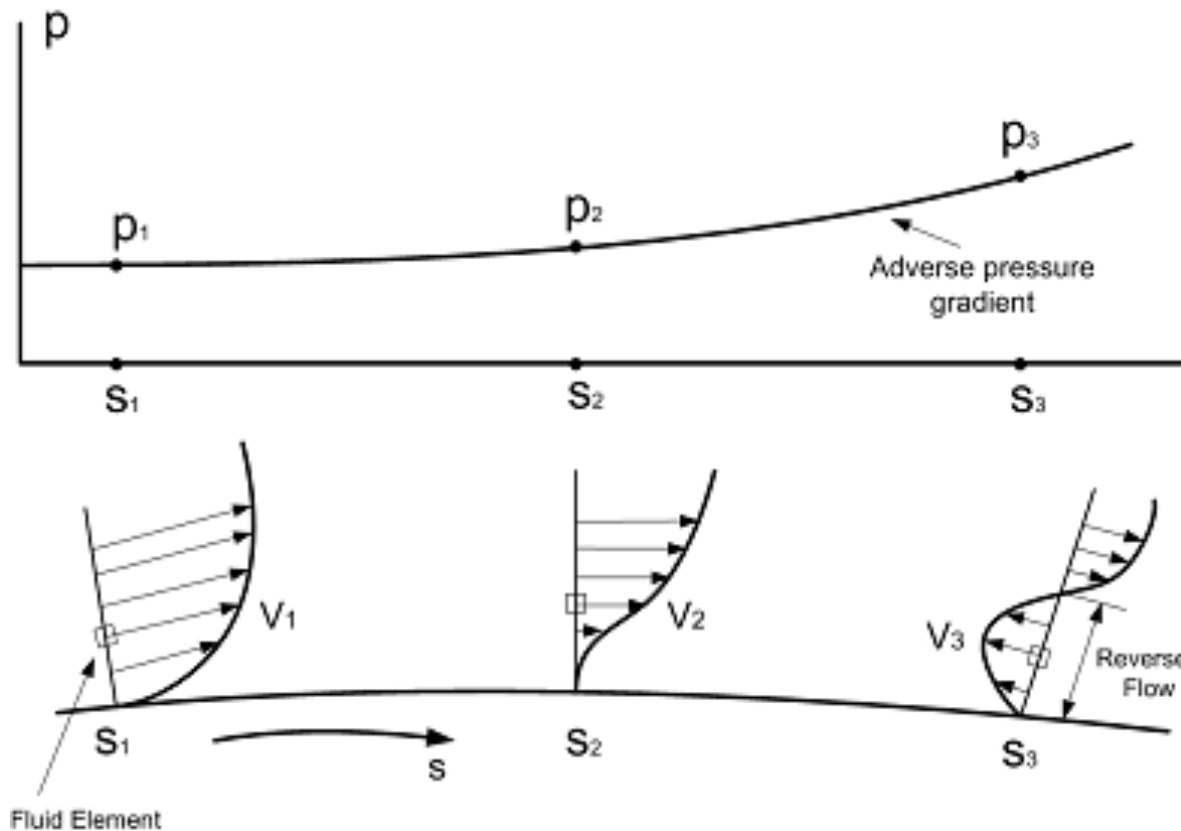
# Separação da camada limite





# Separação da camada limite

- Separação devida ao gradiente adverso de pressão

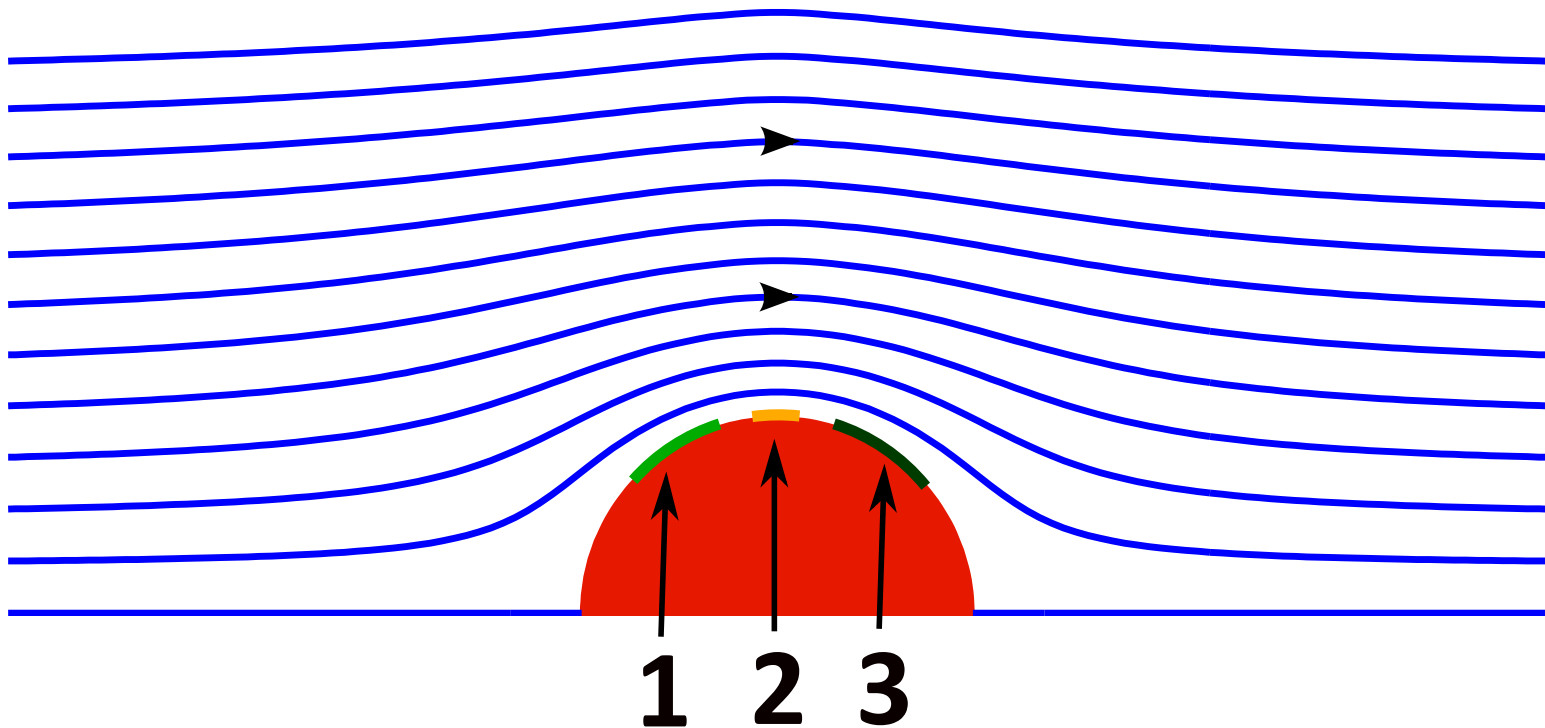


Ponto de separação:

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

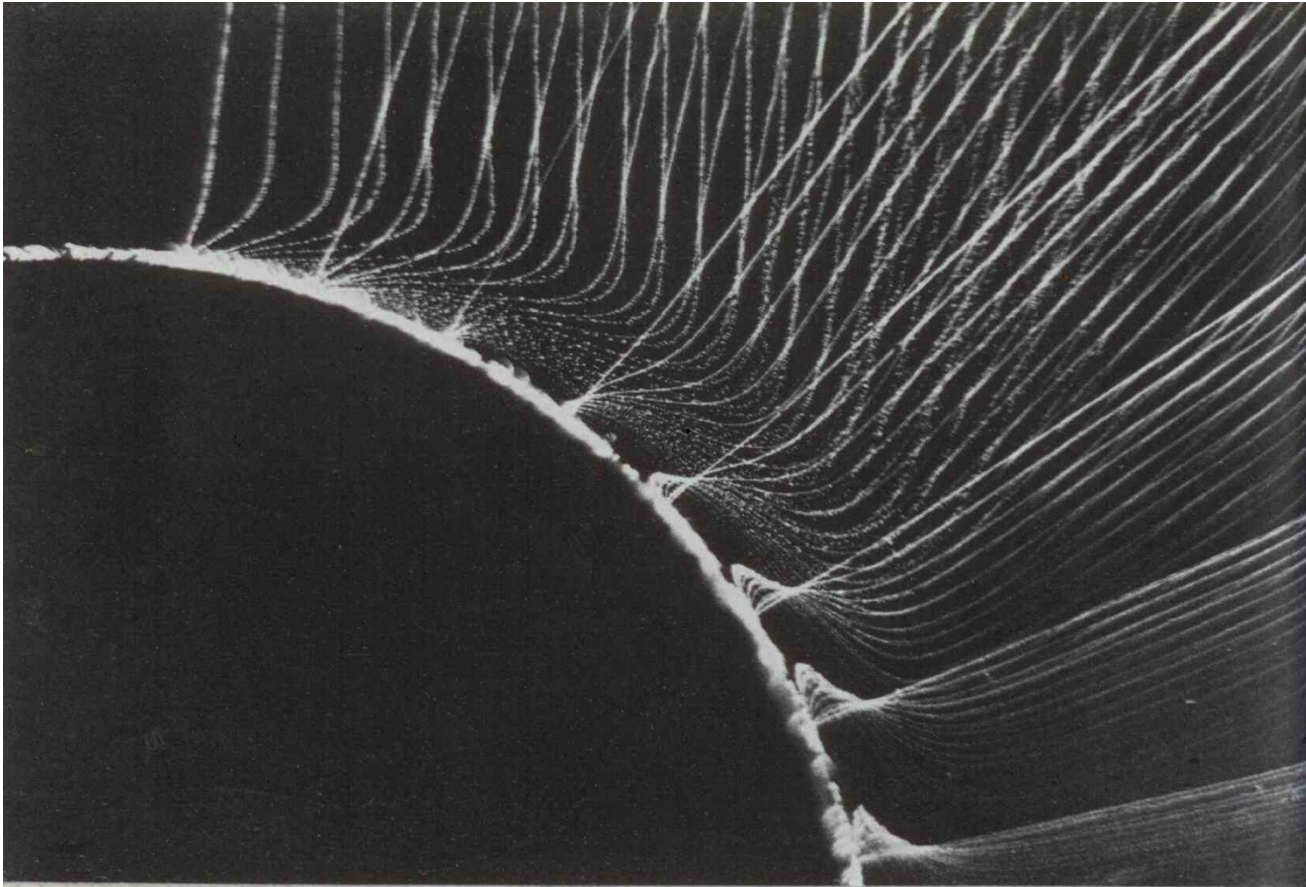
# Questão Conceitual 1

Em que região da superfície do cilindro a camada limite está mais propensa a separar?



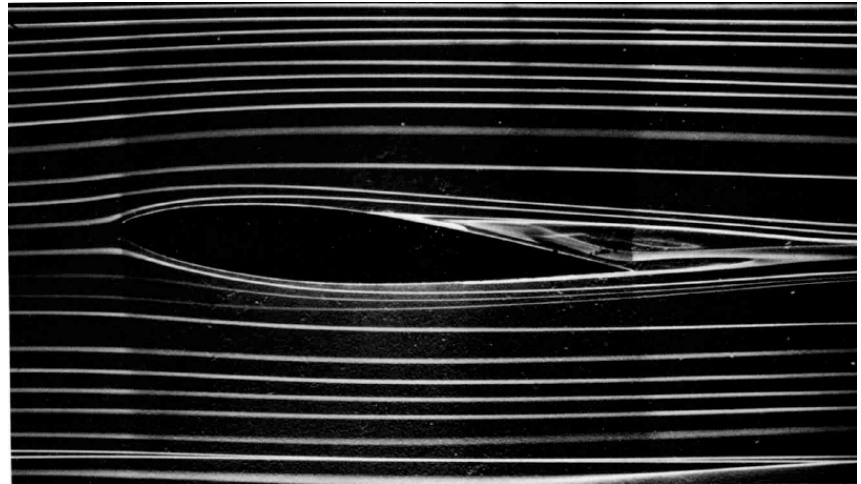
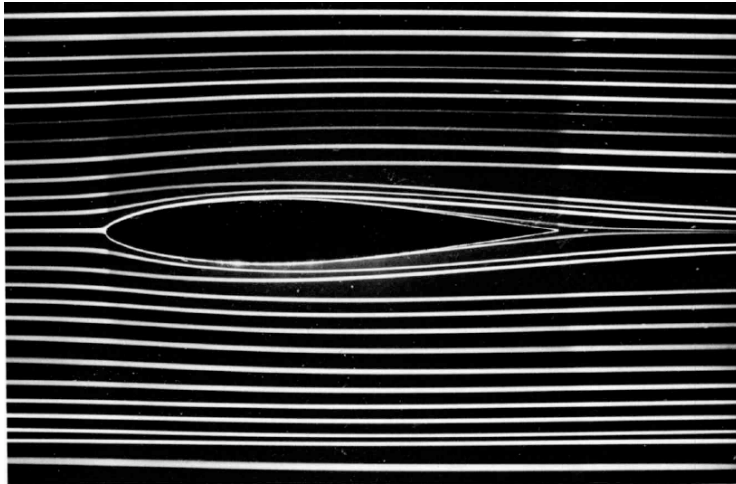
# Separação da camada limite

- Separação da camada limite devida ao gradiente adverso de pressão



# Separação da camada limite

- Separação da camada limite devida ao gradiente adverso de pressão

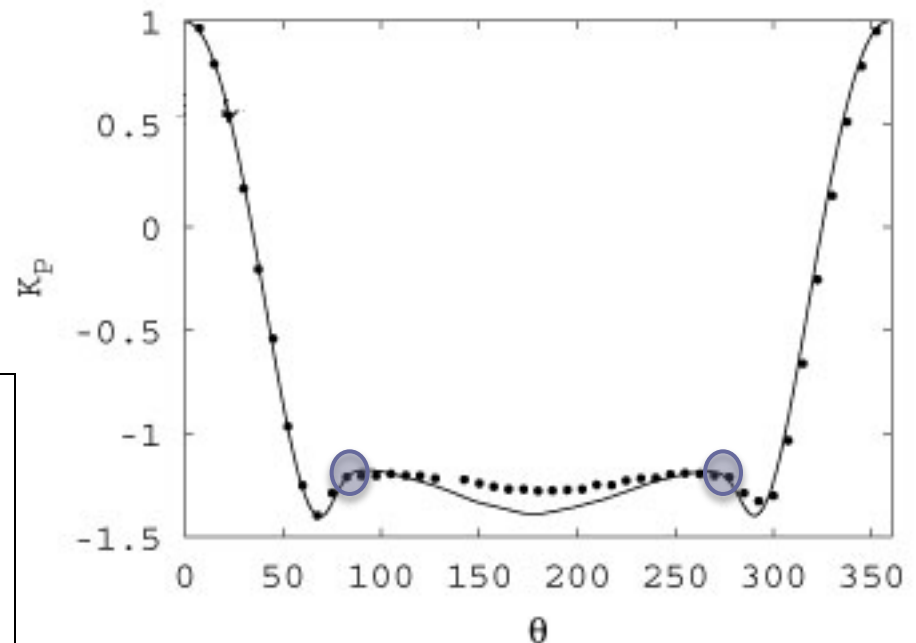
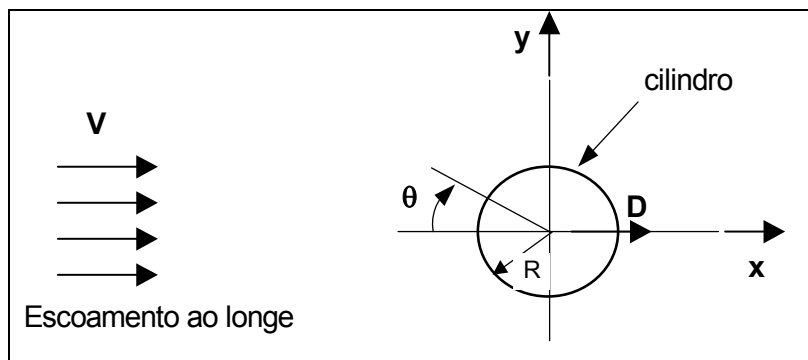


# Separação da camada limite



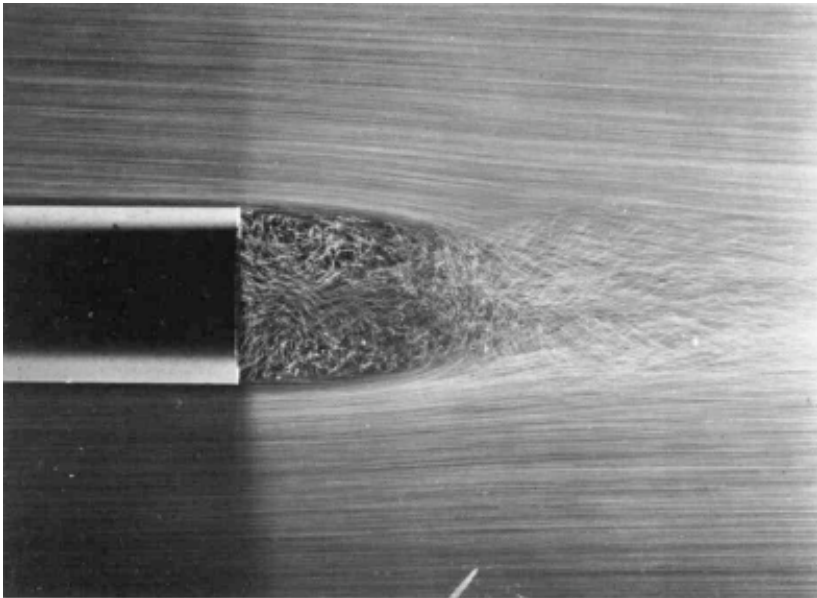
# Separação da camada limite

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

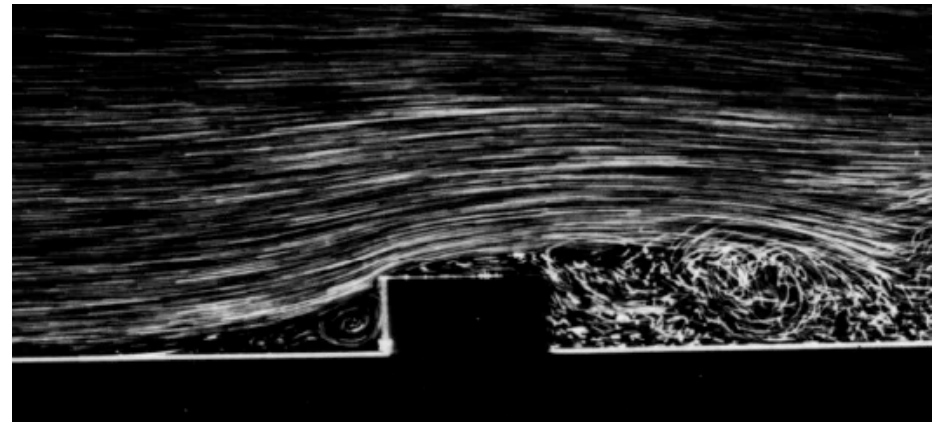


# Separação da camada limite

- Separação devida à geometria



*Corpo  
axissimétrico*



*Degrau*

# Separação da camada limite

Devida à geometria

Devido ao gradiente adverso de pressão

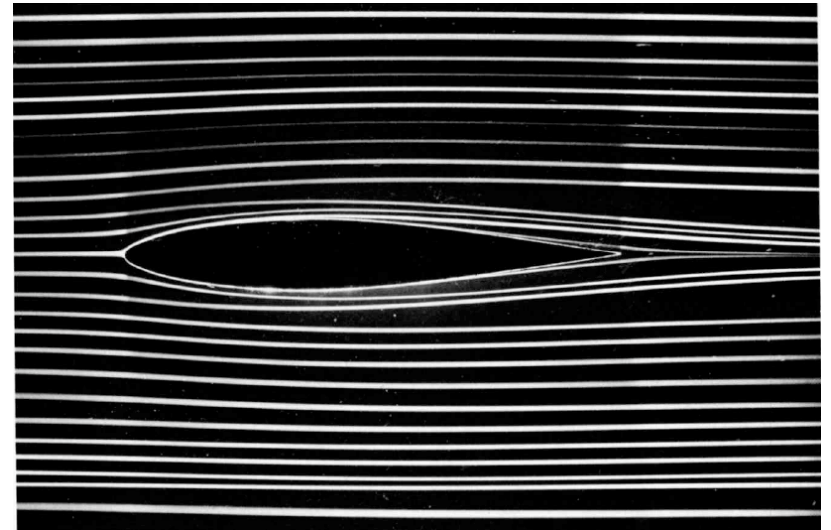
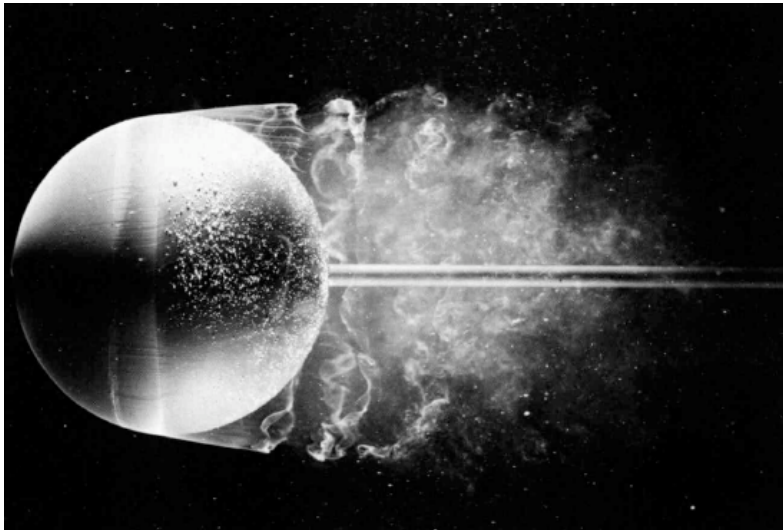
Ponto de separação é fixo!

Ponto de separação depende das condições do escoamento!



# Separação da camada limite

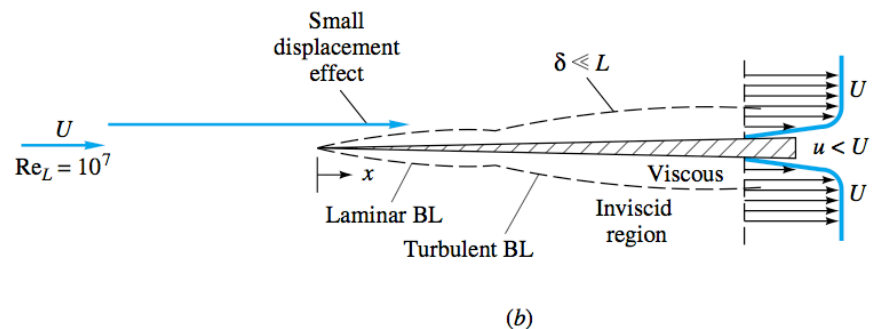
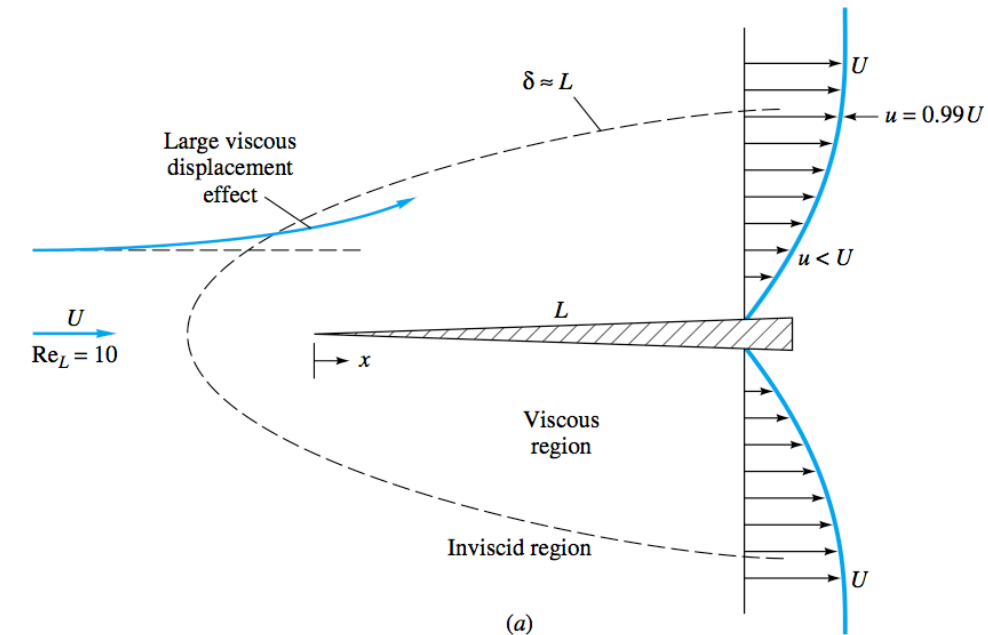
- Corpos rombudos e corpos aerodinâmicos



# Dependência do número de Reynolds

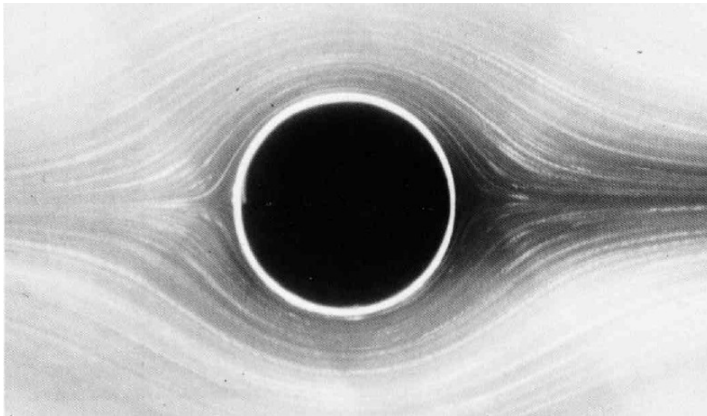
- Corpos aerodinâmicos

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



# Dependência do número de Reynolds

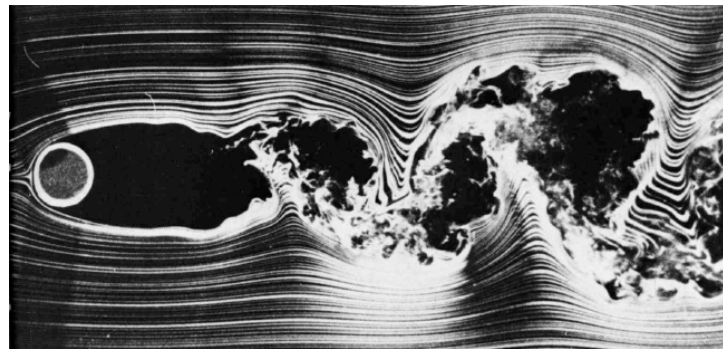
- Corpos rombudos



$Re=0.16$



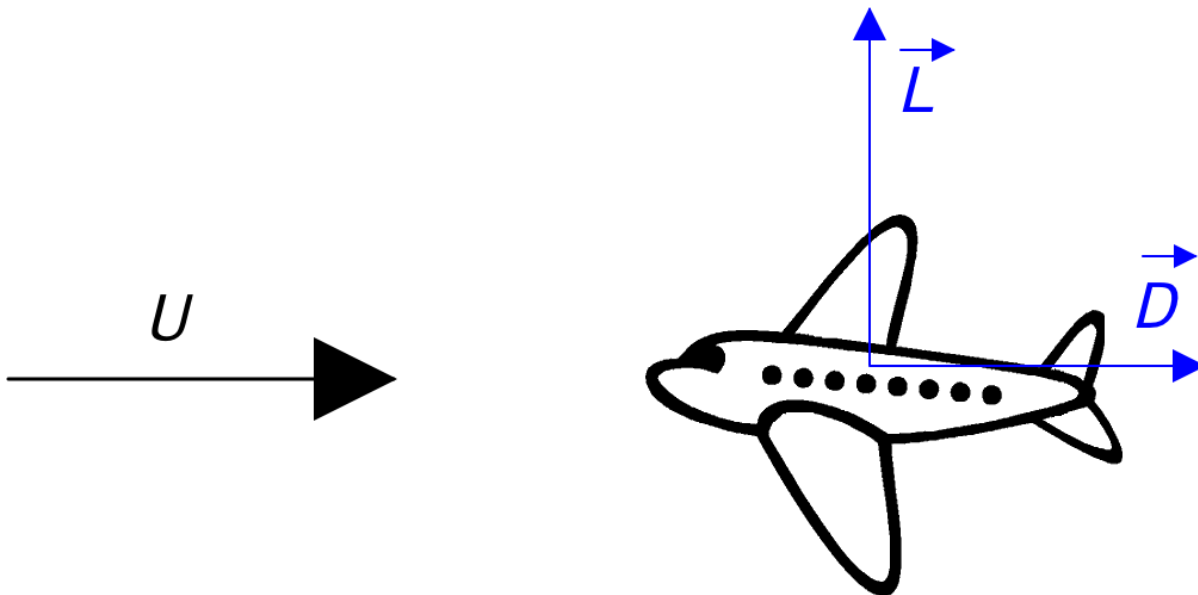
$Re=26$



$Re=10.000$

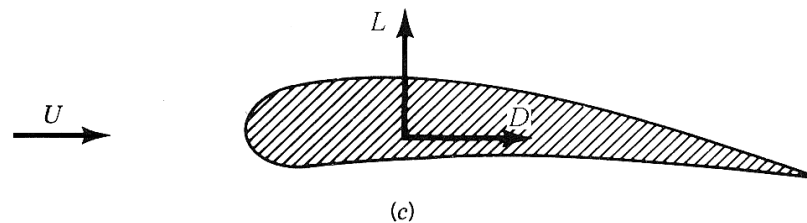
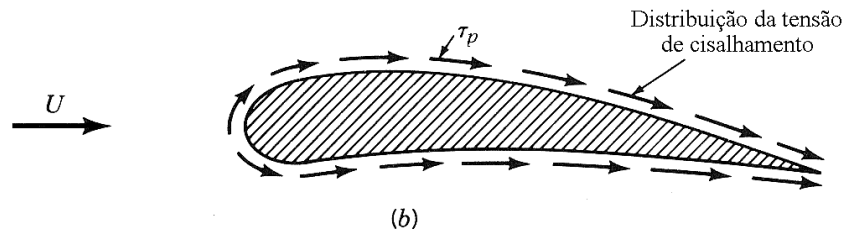
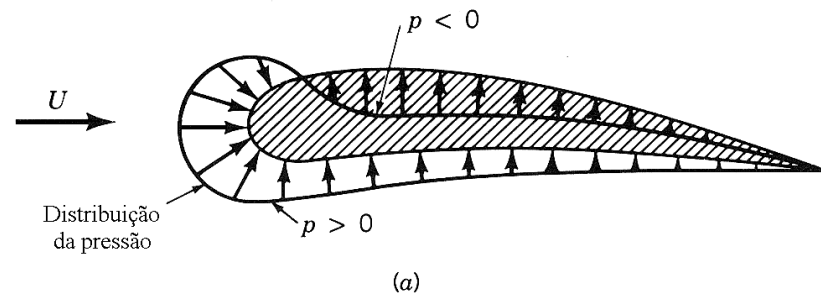
# Forças fluidodinâmicas

- 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

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

$$d\mathbf{F}_{\text{pressao}} = -pd\mathbf{A} \qquad d\mathbf{F}_{\text{cisalhamento}} = \boldsymbol{\tau}_w dA$$

$$D = F_{sx}$$

$$L = F_{sy}$$

# Forças fluidodinâmicas

- Forma adimensional – Coeficientes:

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

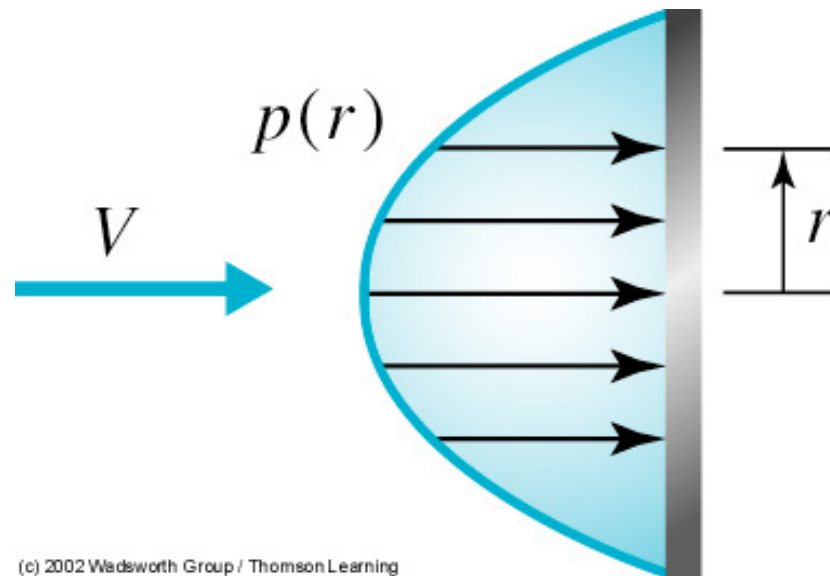
- Coeficiente de sustentação:  $C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$

- Dependência:

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

# Exercícios

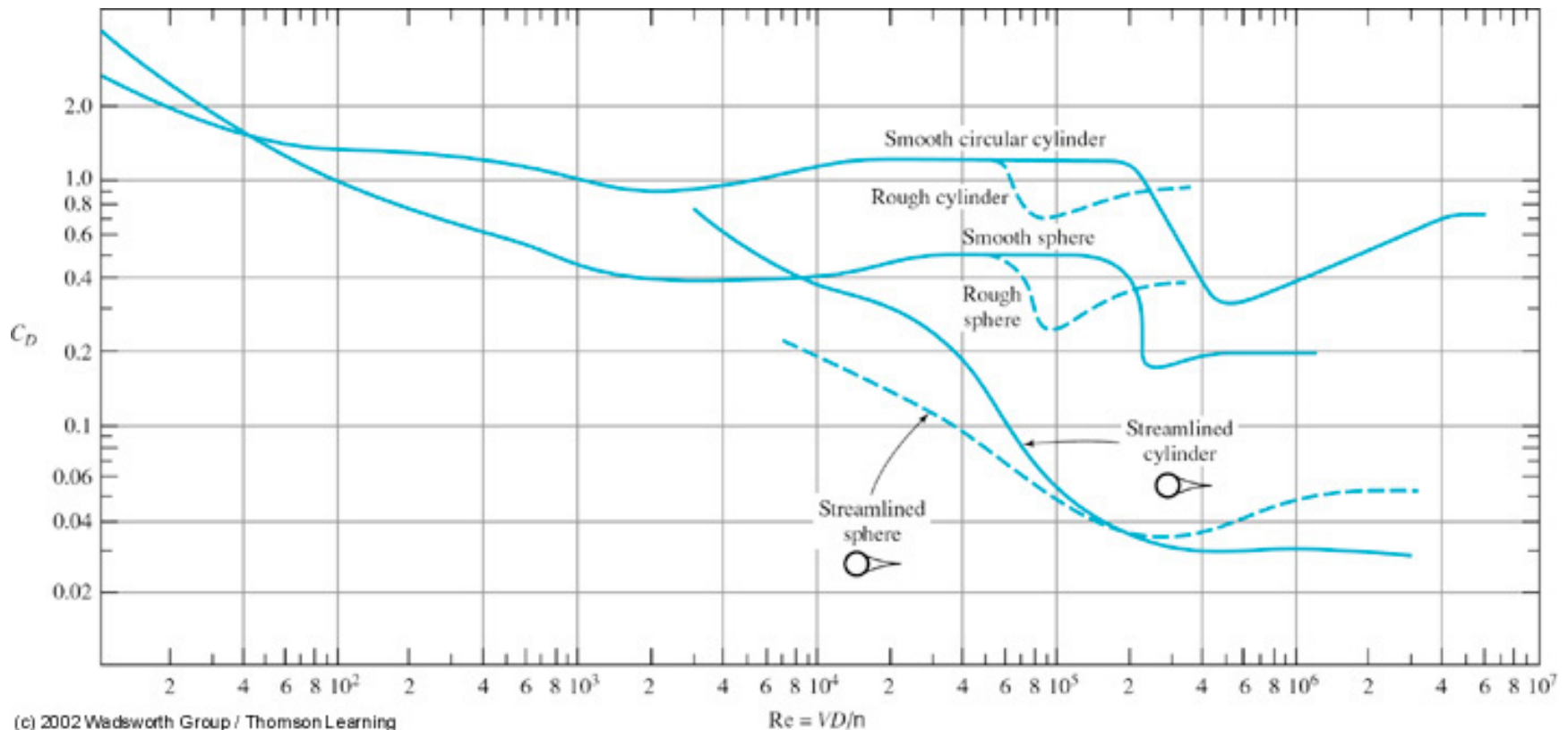
1. A distribuição de pressões na parte frontal de um disco de 2 m de diâmetro é aproximada pela expressão  $p(r) = p_0(1-r^2)$ . Se  $V = 20$  m/s neste escoamento de ar atmosférico a 20 °C ( $\rho = 1,20$  kg/m<sup>3</sup>), estime a força de arrasto e o coeficiente de arrasto para este disco. Suponha que a pressão na parte posterior seja zero e que o arrasto devido ao cisalhamento seja desprezível.



























# Exercícios

2. 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.



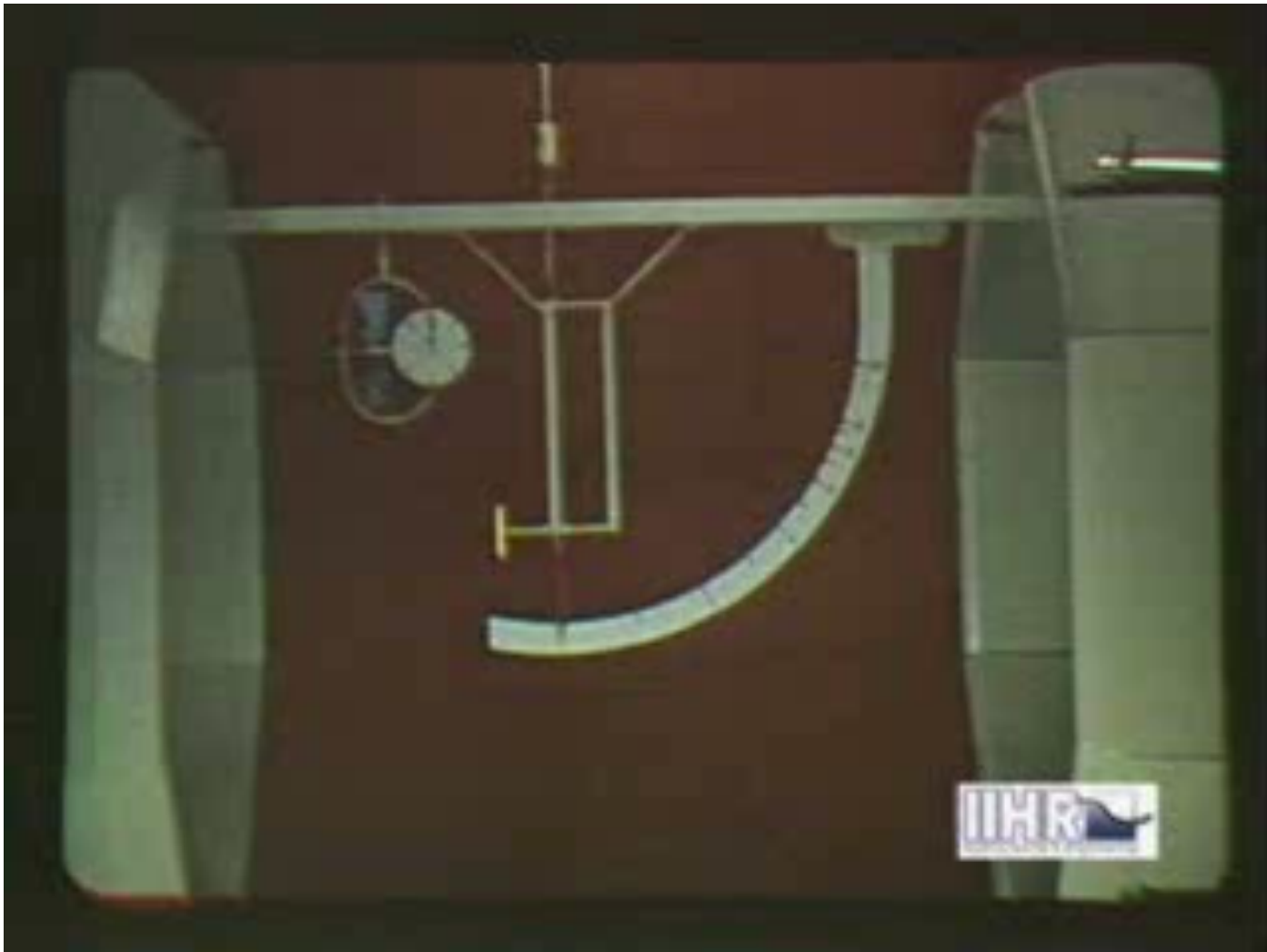
# Arrasto - dependência da forma

- 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)	 STRING 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)		1.42	20)	 V	2.30
10)		1.38	21)		2.20
11)	 CUBE	1.05	22)		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.

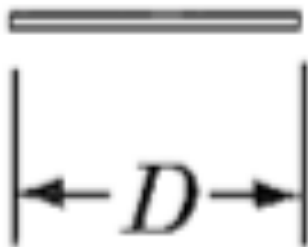
## Questão Conceitual 2

O que acontece com o coeficiente de arrasto desses corpos quando a camada limite passa do regime laminar para o turbulento (o escoamento é da esquerda para a direita)?

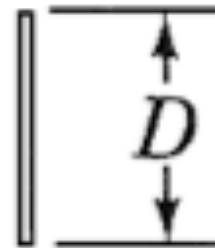
1) aumenta

2) permanece constante

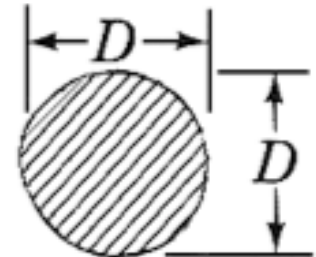
3) diminui



(A)



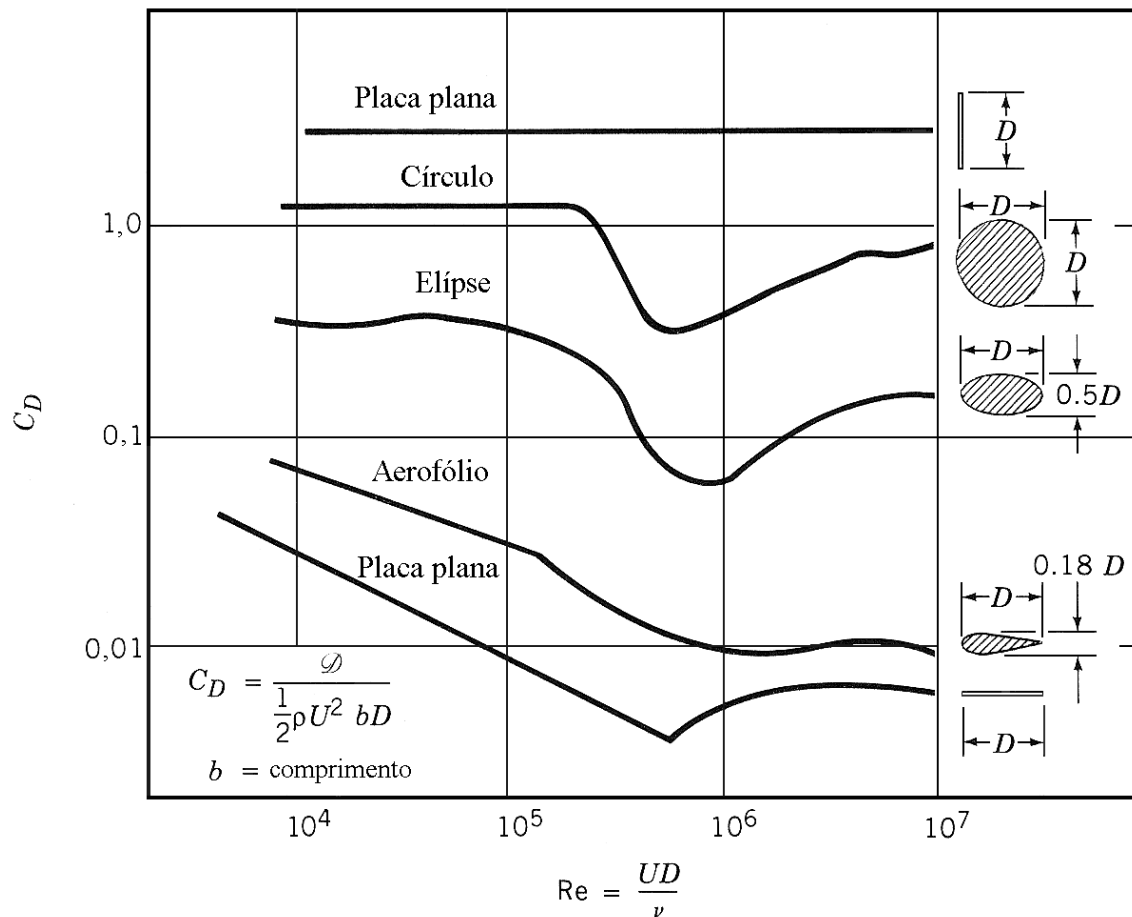
(B)



(C)

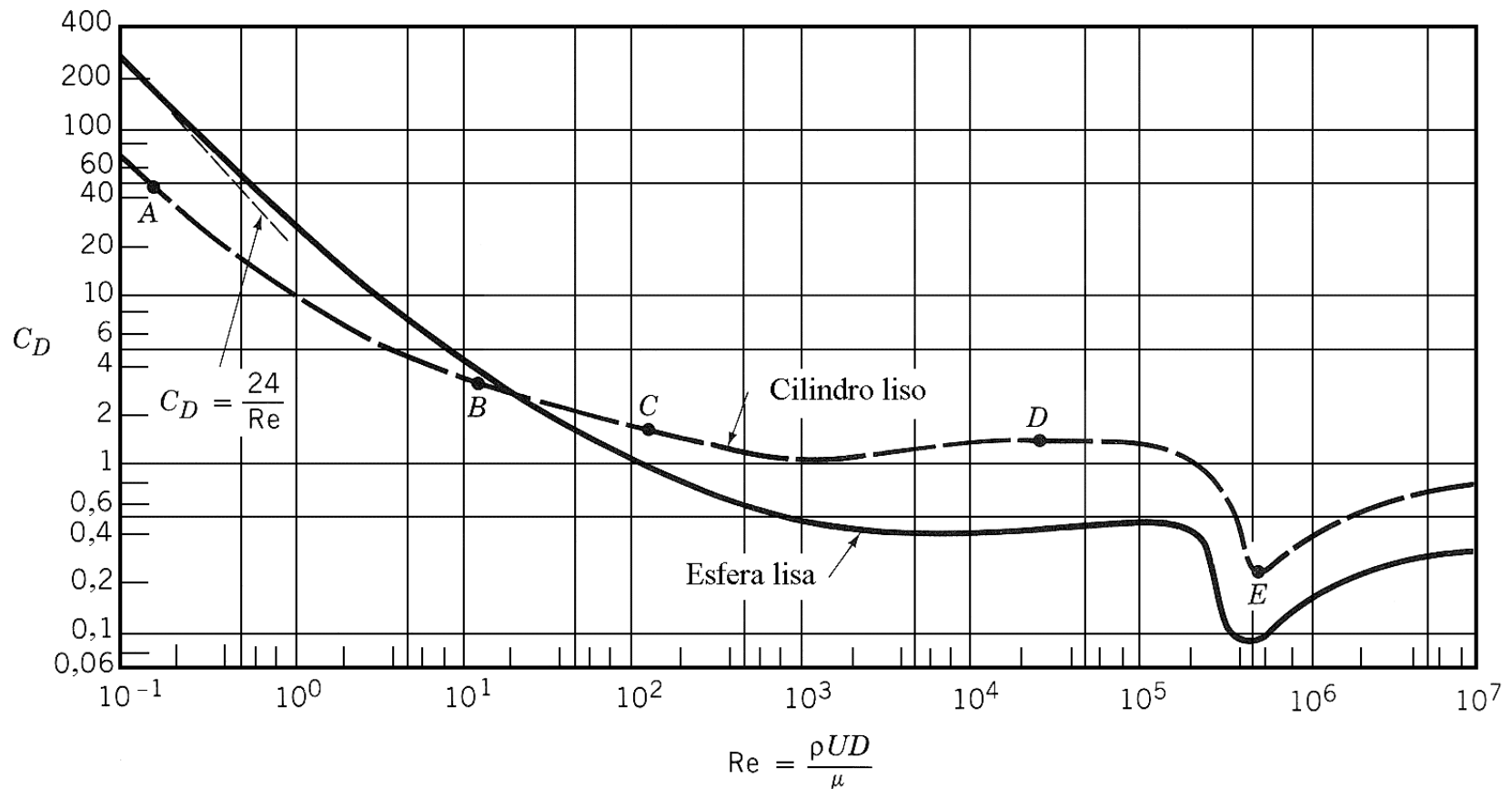
# Arrasto

- Dependência do número de Reynolds



# Arrasto

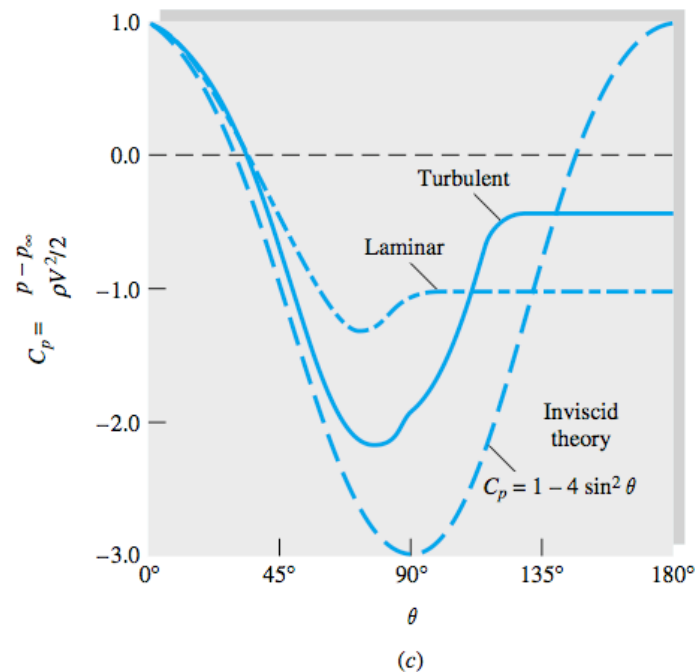
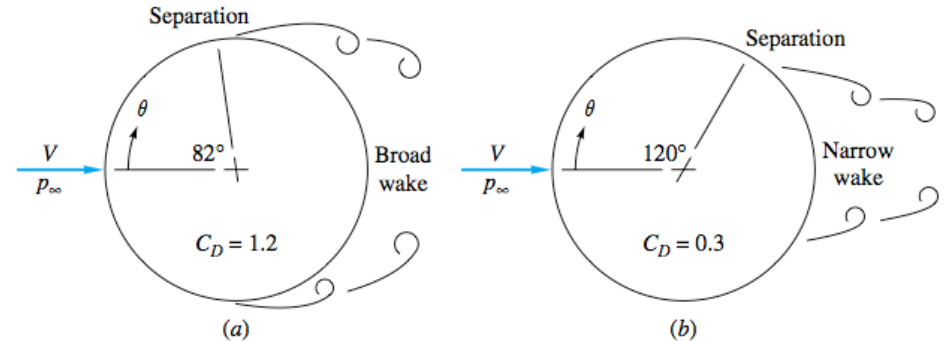
- Dependência do número de Reynolds – corpos rombudos com separação devida a gradiente adverso de pressão



# 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.



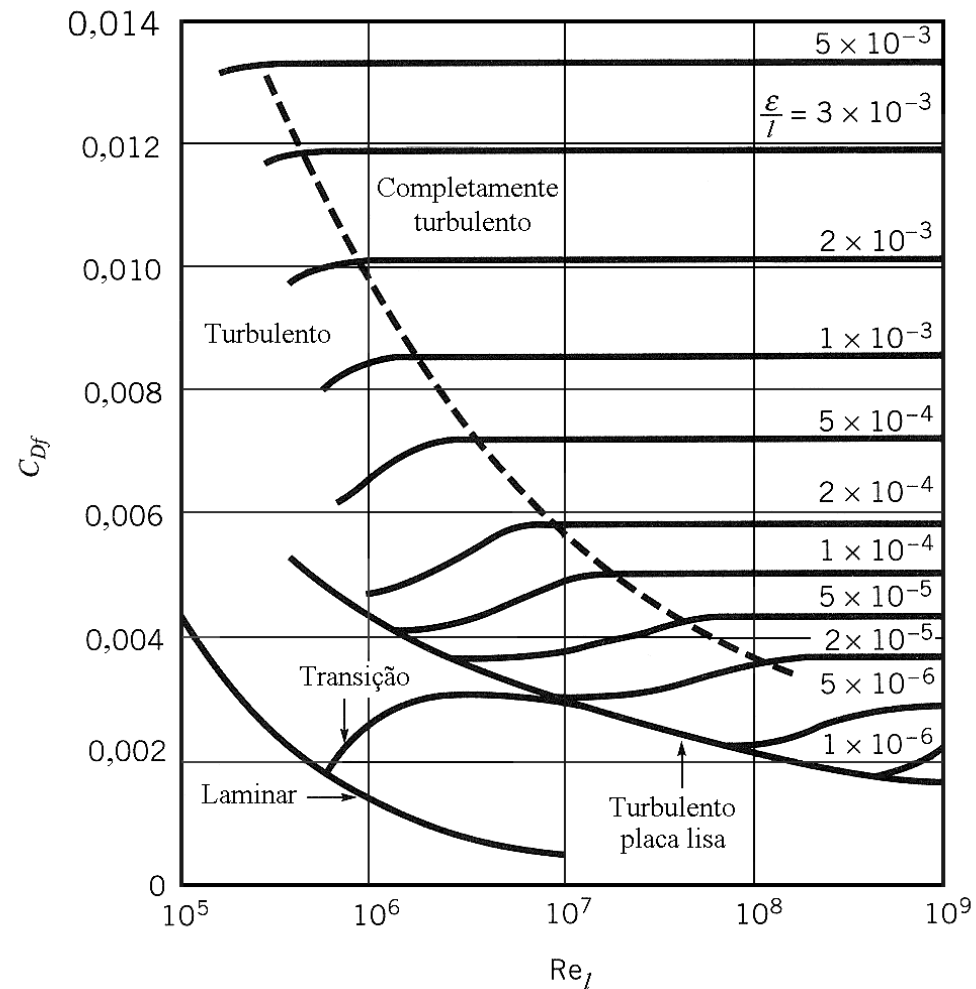


# Arrasto

- Efeito da rugosidade – corpos aerodinâmicos

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

*Placa plana*

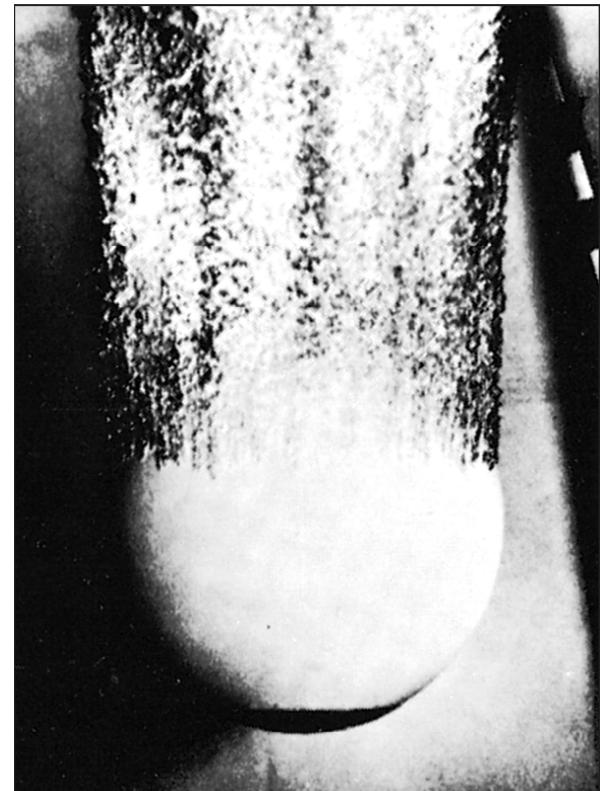


# Arrasto

- Efeito da rugosidade – corpos rombudos



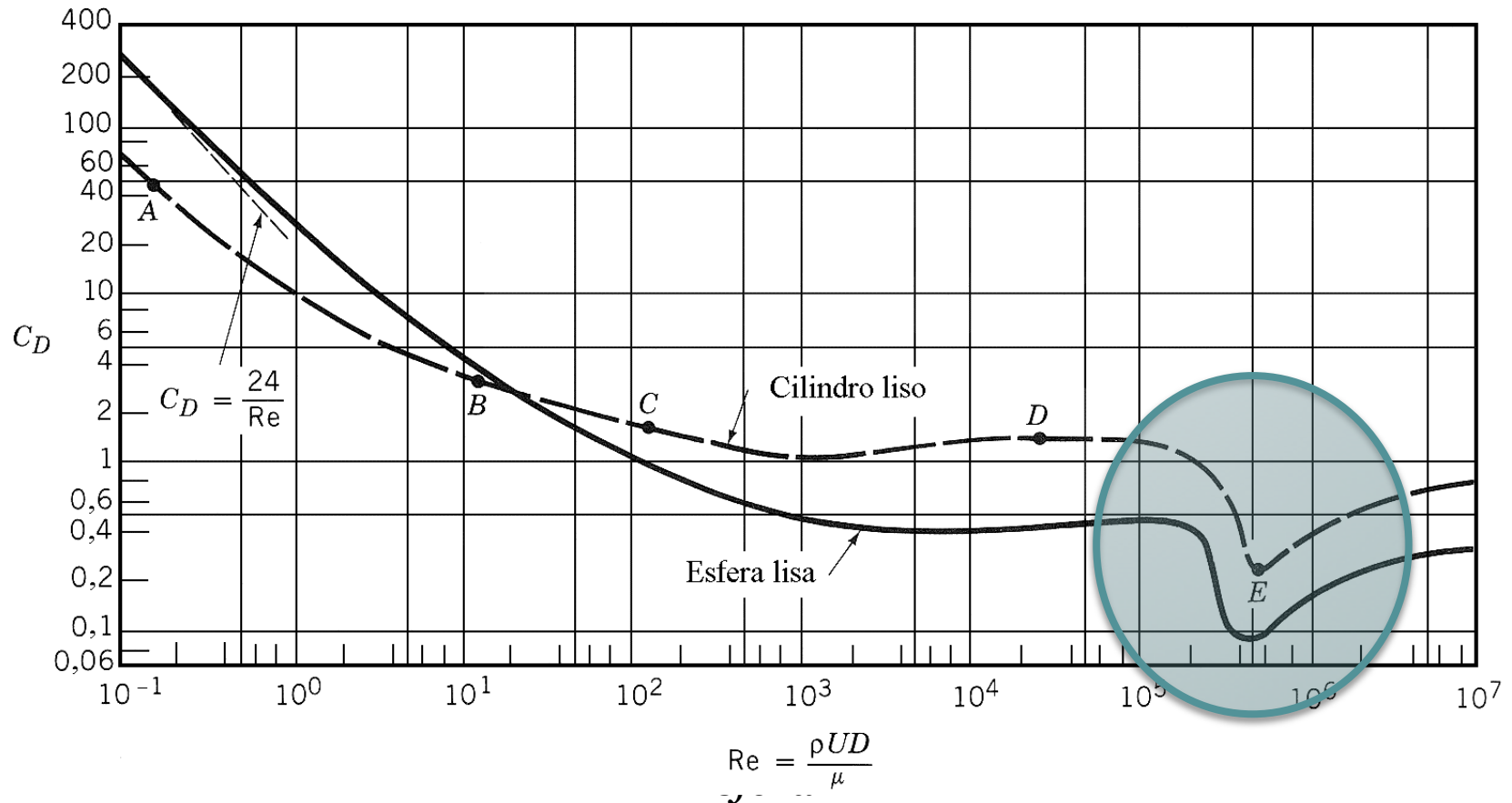
*Esfera lisa*



*Esfera rugosa*

# Arrasto

- Efeito da rugosidade – corpos rombudos



# Questão Conceitual 3

Considere duas medições de força de arrasto feitas com a mesma esfera, nas seguintes configurações

A. Fluido: ar ( $\mu = 1,8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\rho = 1,05 \text{ kg}/\text{m}^3$ ),  
velocidade:  $V$

B. Fluido: água+glicerina (20%) ( $\mu = 1,8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\rho = 1050 \text{ kg}/\text{m}^3$ ), velocidade:  $0,1V$

Se a força de arrasto no experimento A foi  $F$ , aquela medida no experimento B será

o) Impossível responder

1)  $0,01F$

2)  $0,1F$

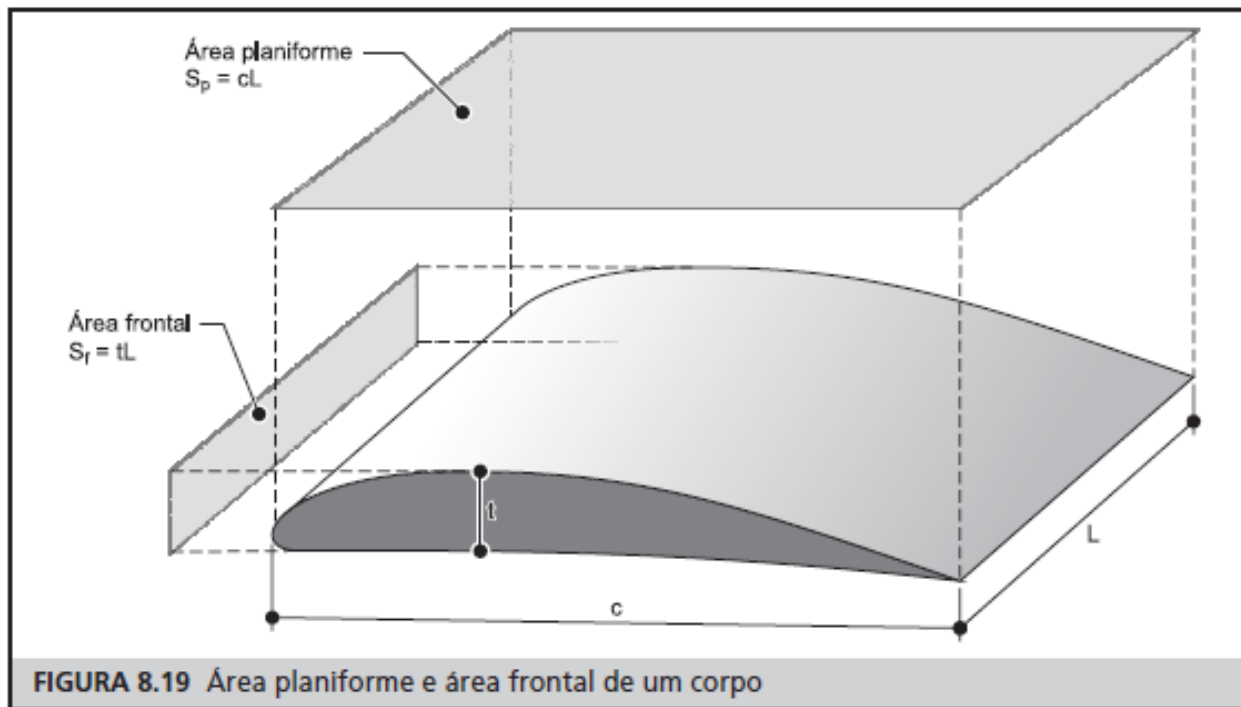
3)  $F$

4)  $10F$

5)  $100F$

# Sustentação

- Fólios

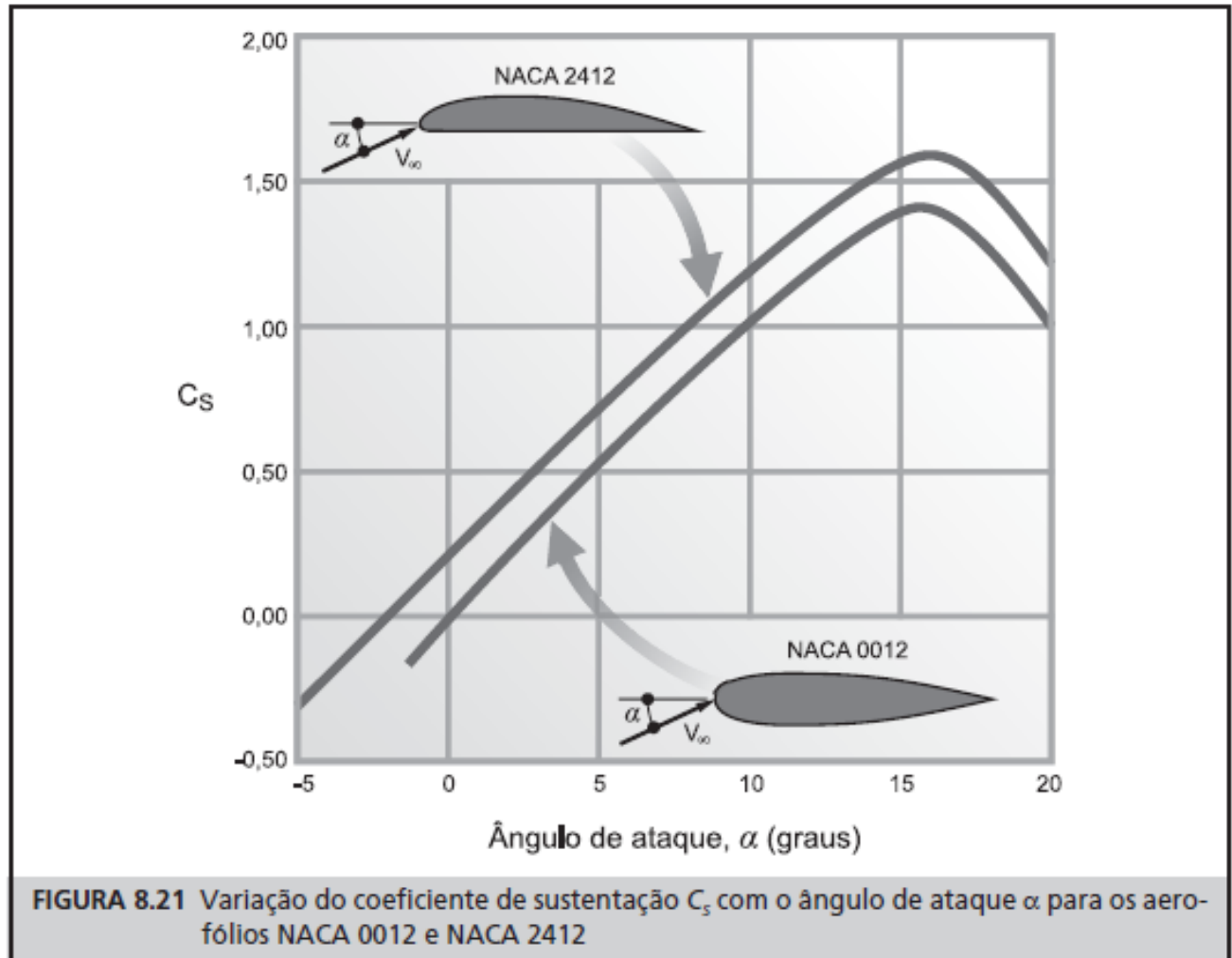


$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 S_p}$$

# Sustentação

- Fólios

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



# Estol

