

# Escoamentos sobre corpos imersos



Prof. Marcos Tadeu Pereira

PME3222 – 2020

# Escoamentos sobre corpos imersos

Escoamentos ao redor de aviões, carros, edifícios, estruturas, navios, submarinos, cabos, peixes, plantas, etc.

Informações obtidas por meios:

- **teóricos** (limitadas por causa da complexidade dos fenômenos) e
- **experimentais** (túneis de vento, tanques de prova, túneis de cavitação e ensaios em modelos em escala).

Uso abundante de coeficientes levantados experimentalmente

Todos devem acessar o site do MIT abaixo, que possui uma coleção excepcional de vídeos sobre mecflu, feitos no início da década de 1960 pelo National Committee for Fluid Mechanics Films, nos EUA. Estes vídeos nos ajudam muito a compreender a natureza dos fenômenos com fluidos.

<http://web.mit.edu/hml/ncfmf.html>

Vejam especialmente os vídeos:

Fundamental Boundary Layers

Flow visualization

Flow instabilities

Eulerian Lagrangian Description

## Características gerais dos escoamentos externos

Força que atua nos corpos imersos é resultado da interação entre o corpo e o fluido.

Sistema de coordenadas é sempre fixado no corpo (independente de ele estar se movimentando ou não, seja um avião ou um edifício)

Admite-se velocidade ao longe constante no tempo e no espaço.

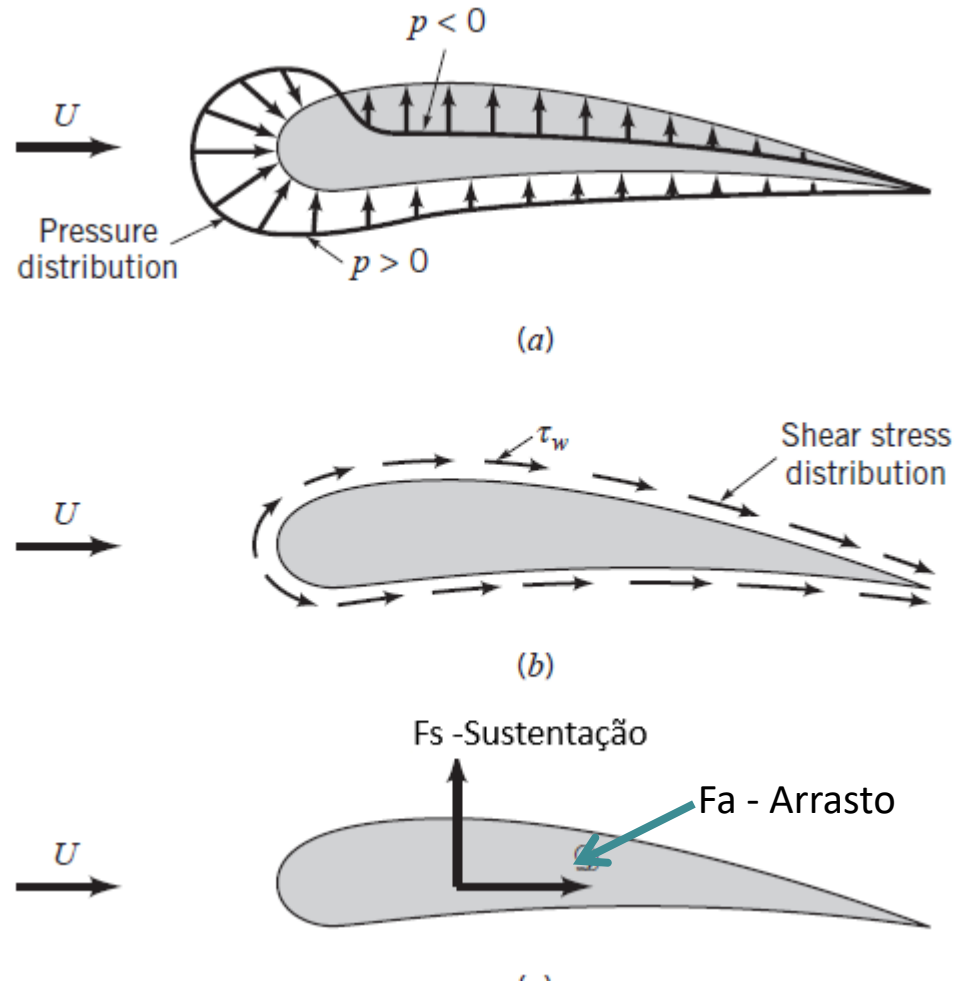
Tomar cuidado com os efeitos de borda.

# Arrasto e Sustentação

Movimento fluido/corpo imerso:

Tensão de cisalhamento na parede  $\tau_p$  provocada pelos efeitos viscosos.

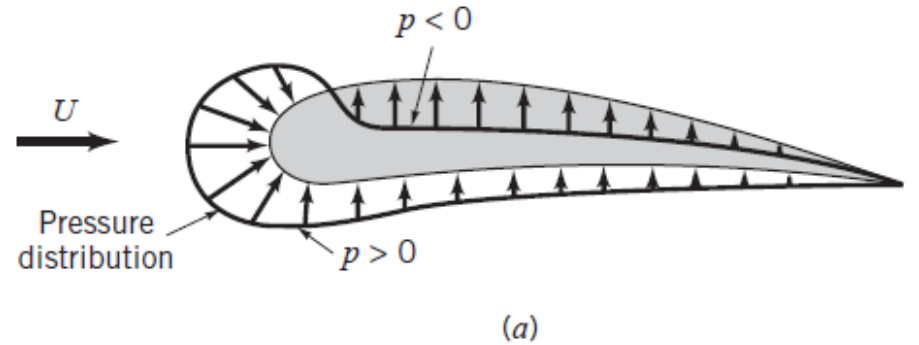
Tensão normal devida a pressão



# Arrasto e Sustentação

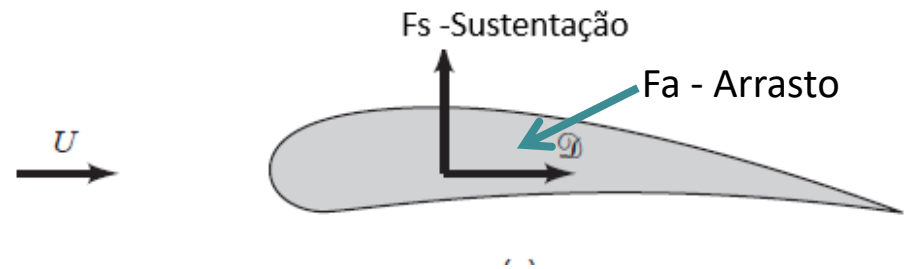
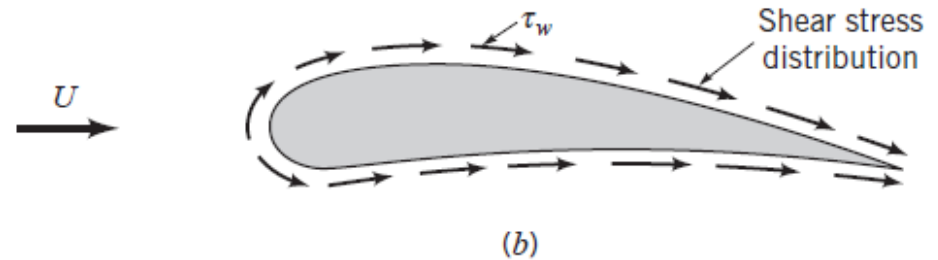
Na direção escoamento:

**Força de Arrasto  $F_A$**   
(ou  $F_D$  drag force)



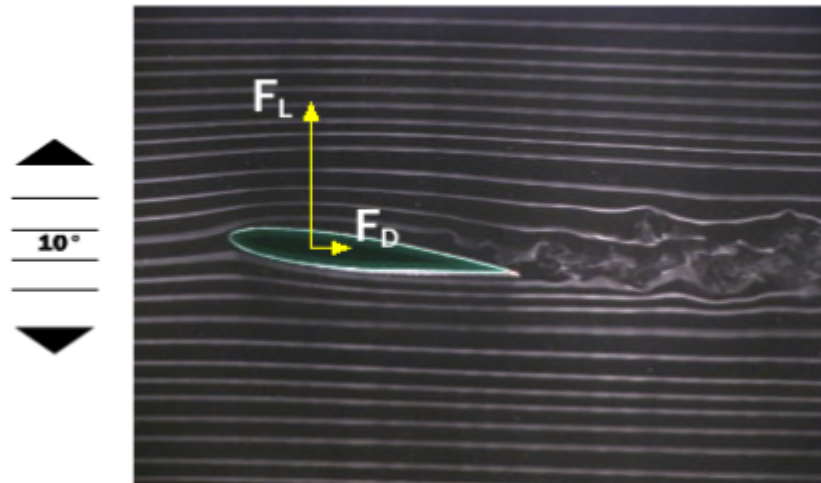
Na direção normal ao escoamento:

**Força de Sustentação  $F_s$**   
(ou  $F_L$  lift force)

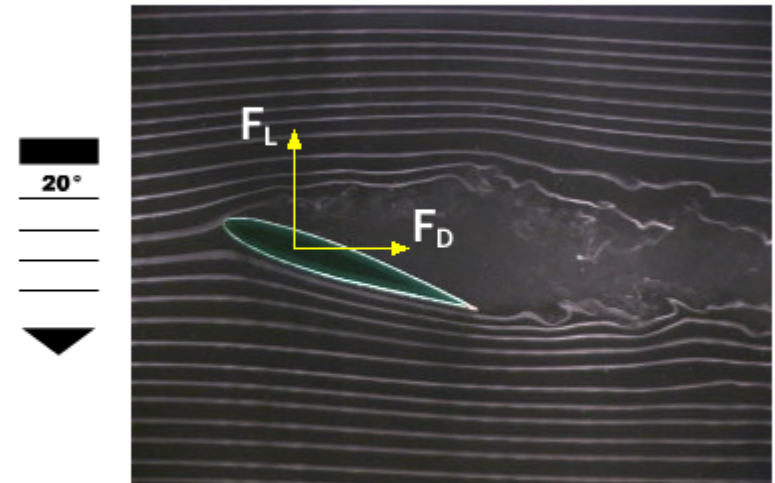


Ambas obtidas pela integração das tensões normais e de cisalhamento mostradas nas figuras

# Forças de Arrasto $F_A$ ou Drag $F_D$ e Forças de Sustentação $F_S$ ou Lift $F_L$



© Stanford University



© Stanford University

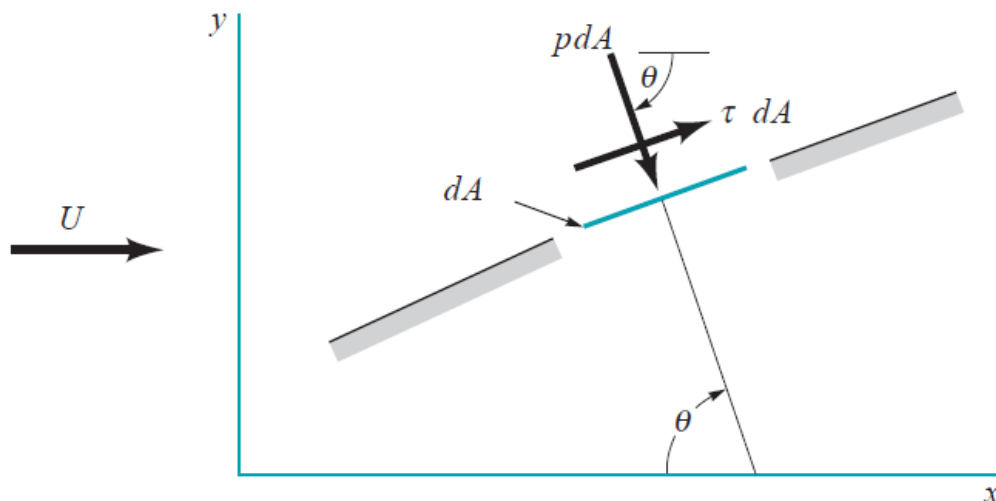
Dois tipos de tensão agem: Tensão Normal devido a pressão e Tensão de Cisalhamento na parede, devido aos efeitos viscosos

A componente da força resultante na direção do escoamento é chamada de Força de Arrasto  $F_A$  ou  $F_D$  e na direção normal ao escoamento é a Força de Sustentação  $F_S$  ou  $F_L$ .

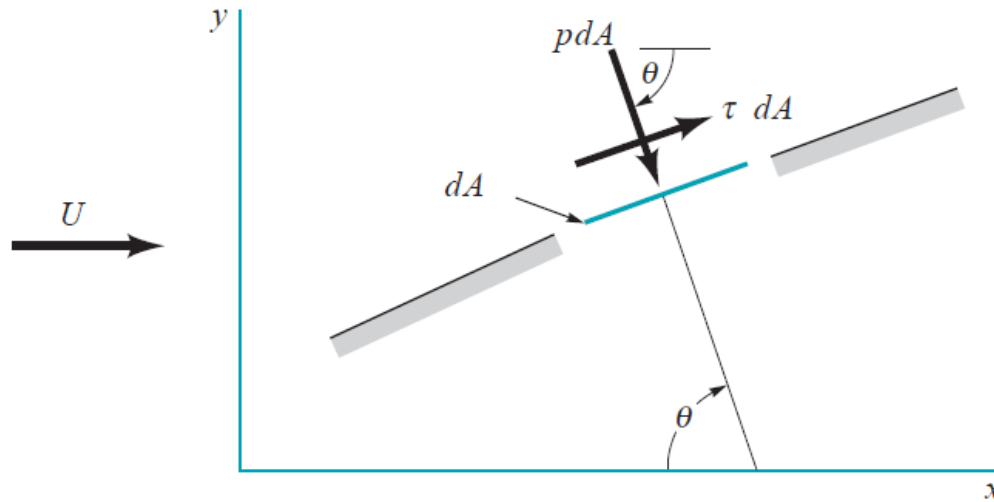
Vamos aplicar a 2ª lei de Newton para estudar a relação entre as forças de arrasto e de sustentação.

Para isso vamos tomar um trecho infinitesimal da superfície de um perfil de asa imerso em um escoamento de fluido.

Basicamente agem as forças normais, de pressão, e as tangenciais, de cisalhamento.







$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau dA)\sin\theta$$

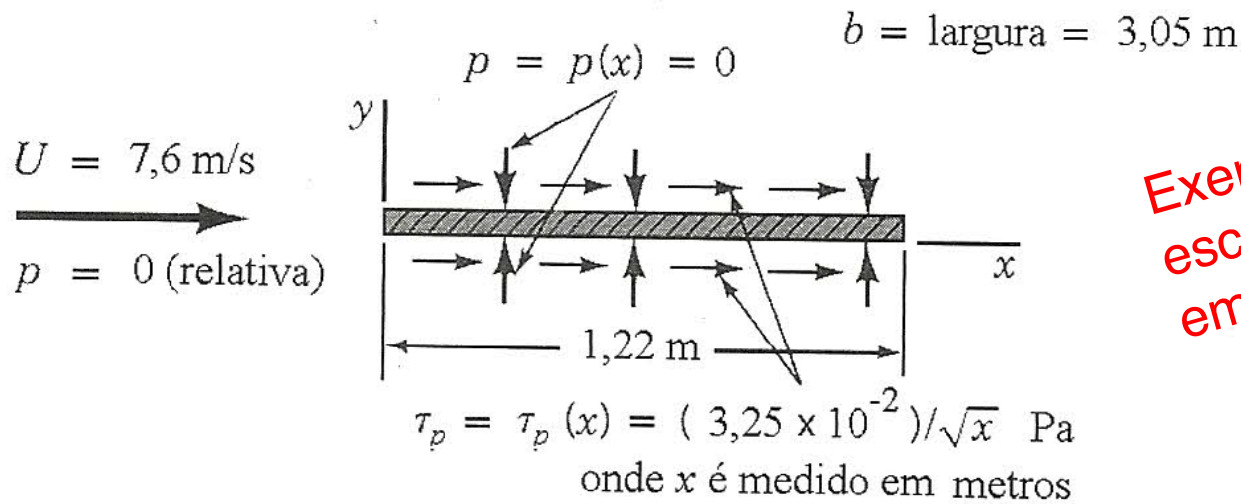
$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau dA)\cos\theta$$

$$F_A = \int dF_x = \int p\cos\theta dA + \int \tau\sin\theta dA$$

$$F_S = \int dF_y = -\int p\sin\theta dA + \int \tau\cos\theta dA$$

equações 1

Observar que o arrasto, por ex., pode ser tanto de pressão quanto de viscosidade!



Exercício de escoamento ar em placa plana

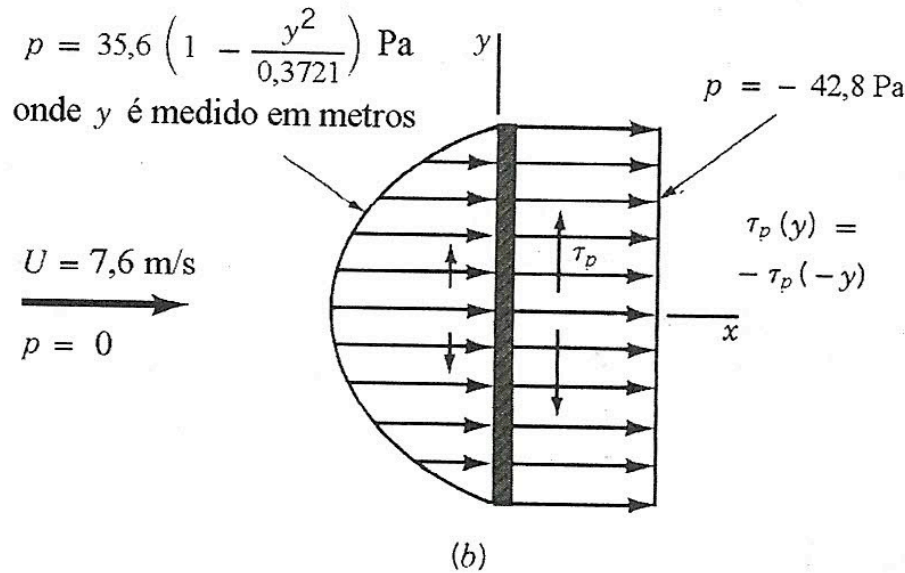
$$F_A = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau \sin \theta dA \quad \text{e} \quad (a) \quad F_S = \int dF_y = - \int p \sin \theta dA + \int \tau \cos \theta dA$$

Notar que  $\theta = 90^\circ$  na face superior e  $\theta = 270^\circ$  na inferior:

$$F_A = \int_{sup} \tau_p dA + \int_{inf} \tau_p dA = 2 \int_{sup} \tau_p dA = =$$

$$2 \int_0^{1,22} \frac{3,25 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{x}} \cdot 3,05 dx = 0,198 [2\sqrt{x}] (0 \leq x \leq 1,22) = 0,44 \text{ N}$$

$$F_S = - \int_{sup} p dA + \int_{inf} p dA = 0 \text{ não há sustentação.}$$



Exercício de escoamento ar em placa plana

Neste caso,  $\theta = 0^\circ$  na posição frontal e  $\theta = 180^\circ$  na posterior

$$\mathbf{F}_A = \int_{frente} p dA + \int_{post} p dA = \int_{y=-0,61}^{y=0,61} \left[ 35,6 \left( 1 - \frac{y^2}{0,3721} \right) - (-42,8) \right] (3,05) dy = 247,6 \text{ N}$$

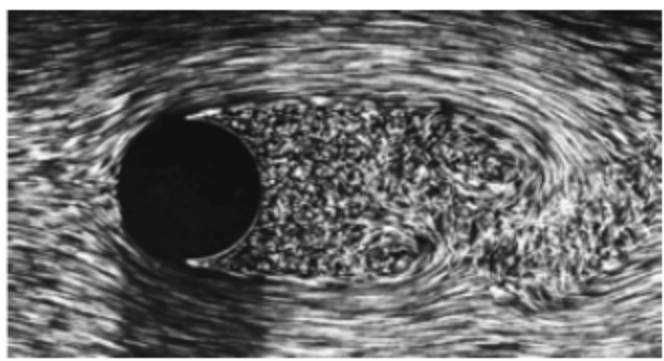
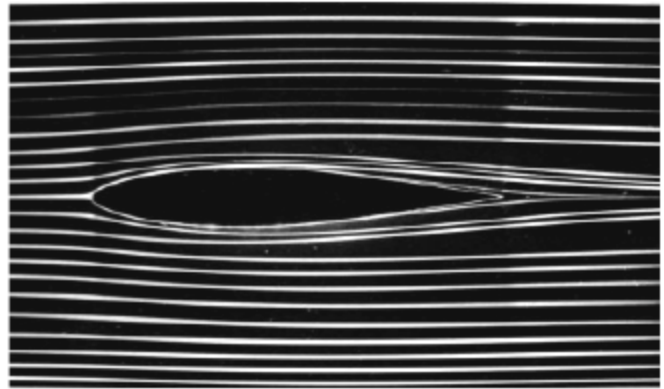
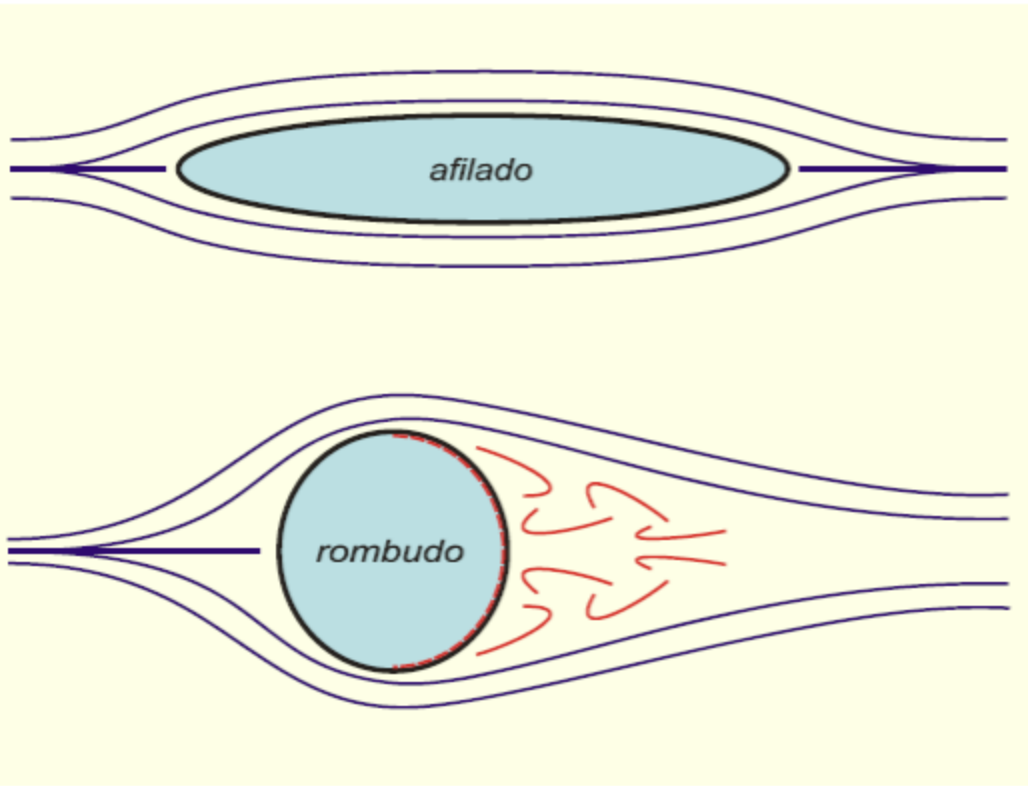
$$\mathbf{F}_S = \int_{frente} \tau_p dA + \int_{post} \tau_p dA = 0$$

As equações 1 são difíceis de utilizar porque normalmente não conhecemos as distribuições de pressão e de tensões de cisalhamento. Para contornar, definem-se **coeficientes adimensionais de arrasto e de sustentação**, determinados por meio de Análise Dimensional auxiliada por técnicas experimentais e numéricas

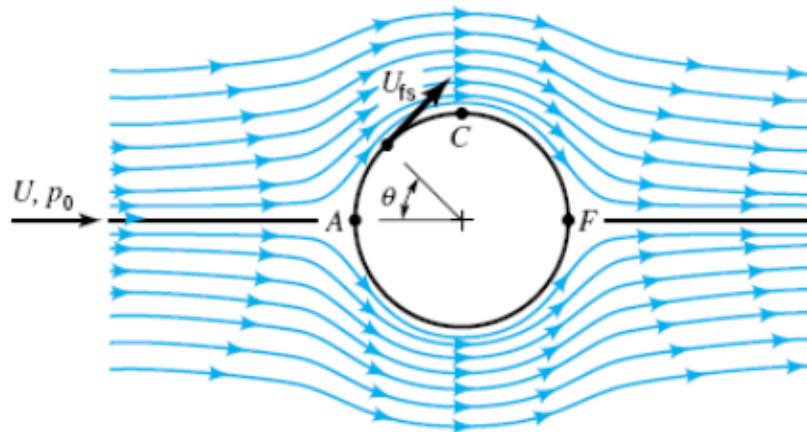
$$C_a = \frac{F_a}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{e} \quad C_s = \frac{F_s}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

A é uma área característica do corpo, normalmente a área frontal, como vista por um observador que olha na direção paralela à do escoamento.

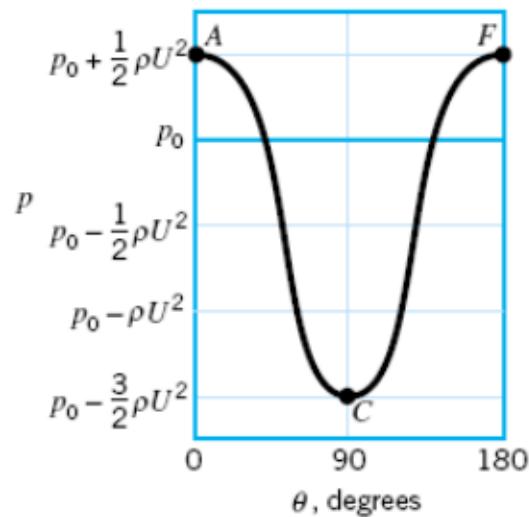
$$C_{A \text{ ou } S} = \Phi \left( \text{fator de forma}, Re, Ma, Fr, \frac{\varepsilon}{l} \right)$$



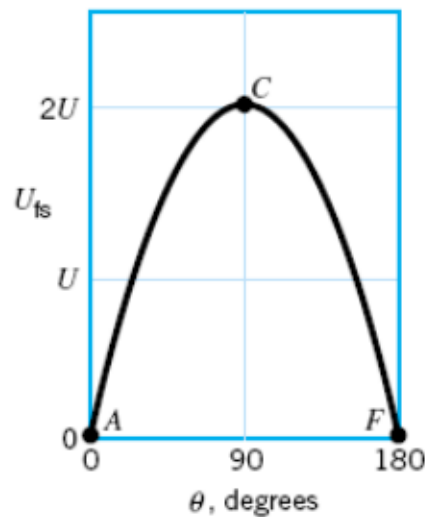
# Escoamento ideal (invíscido)



(a)



(b)

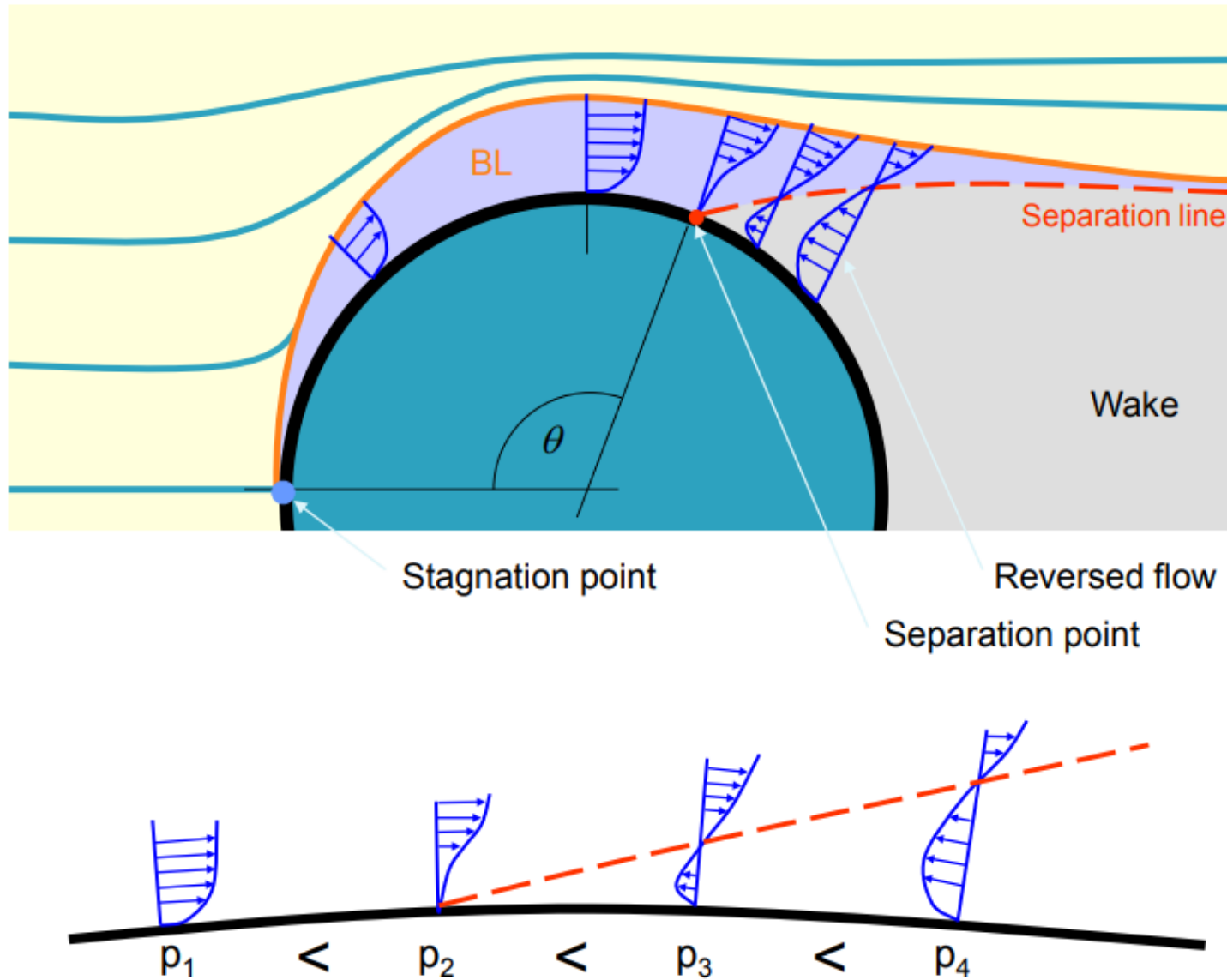


(c)

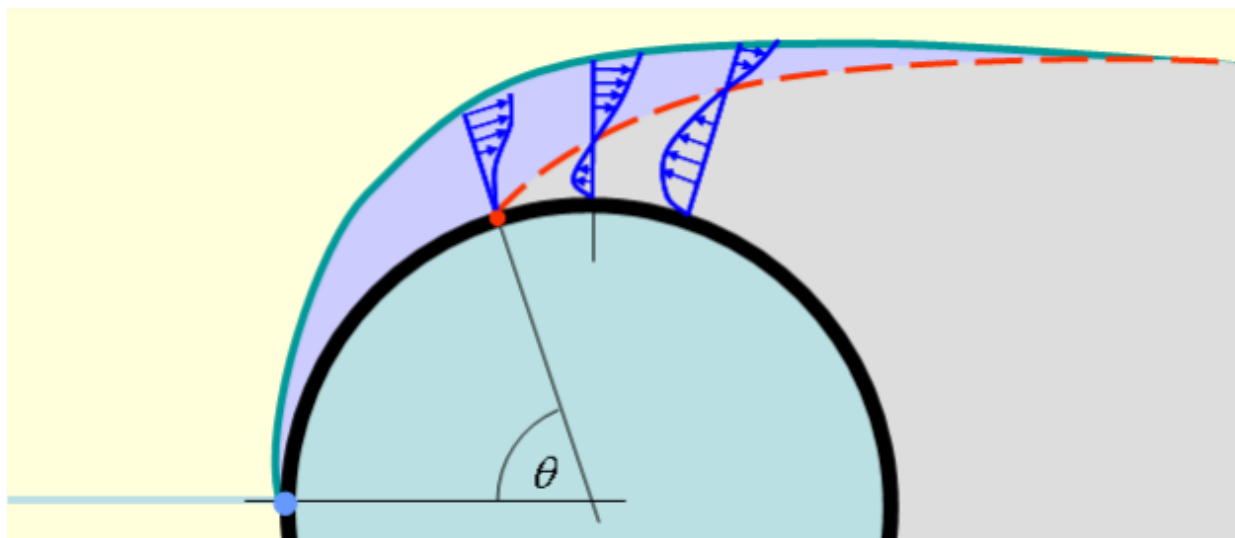
■ FIGURE 9.16

Inviscid flow past a circular cylinder: (a) streamlines for the flow if there were no viscous effects, (b) pressure distribution on the cylinder's surface, (c) free-stream velocity on the cylinder's surface.

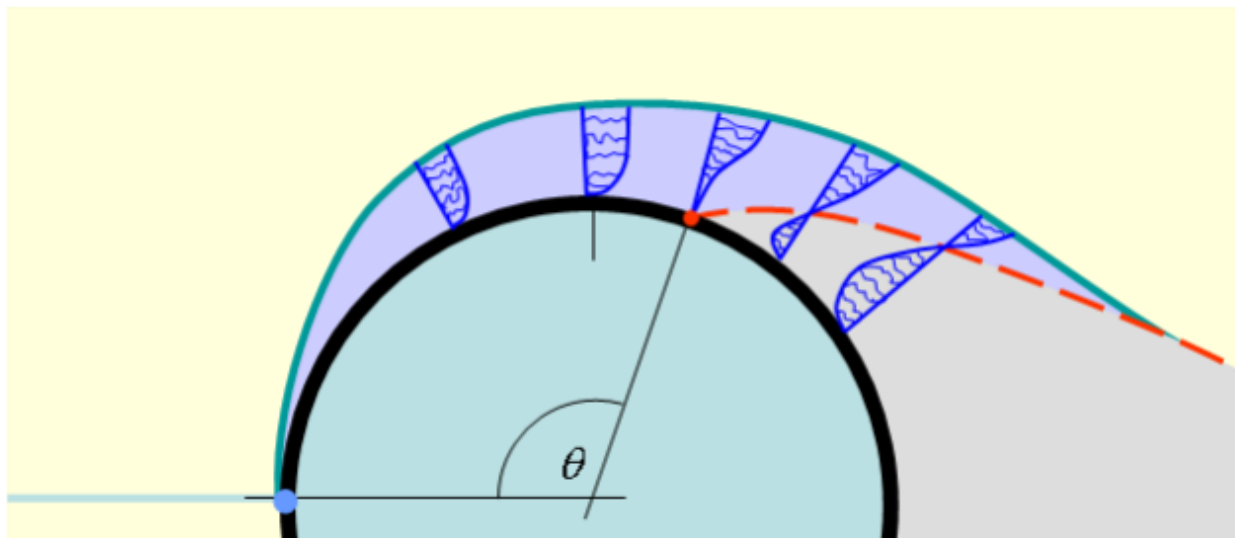
# Separação do escoamento



# Separação em regimes laminar e turbulento

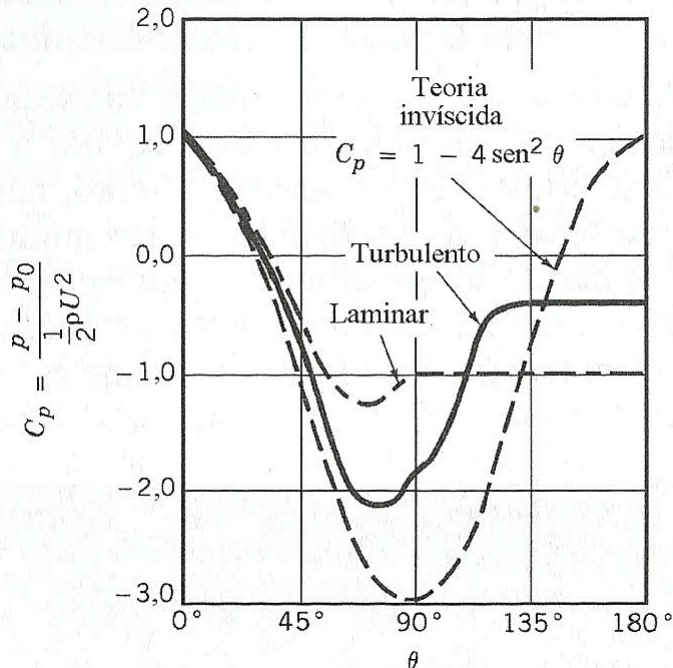
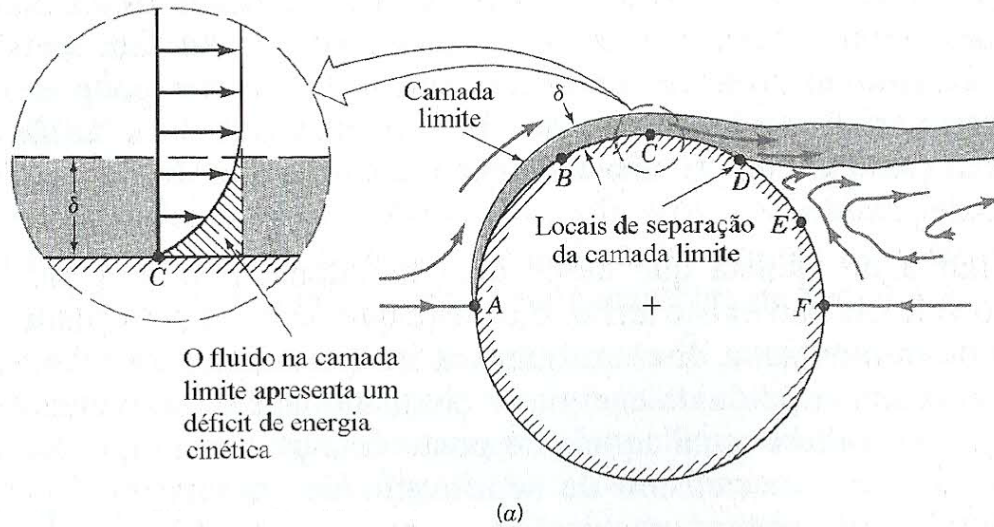


Laminar  
Boundary Layer



Turbulent  
Boundary Layer

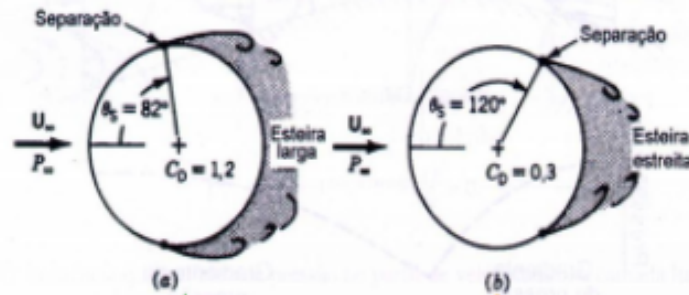
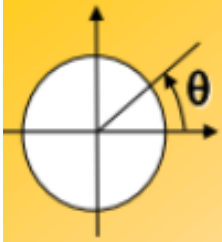




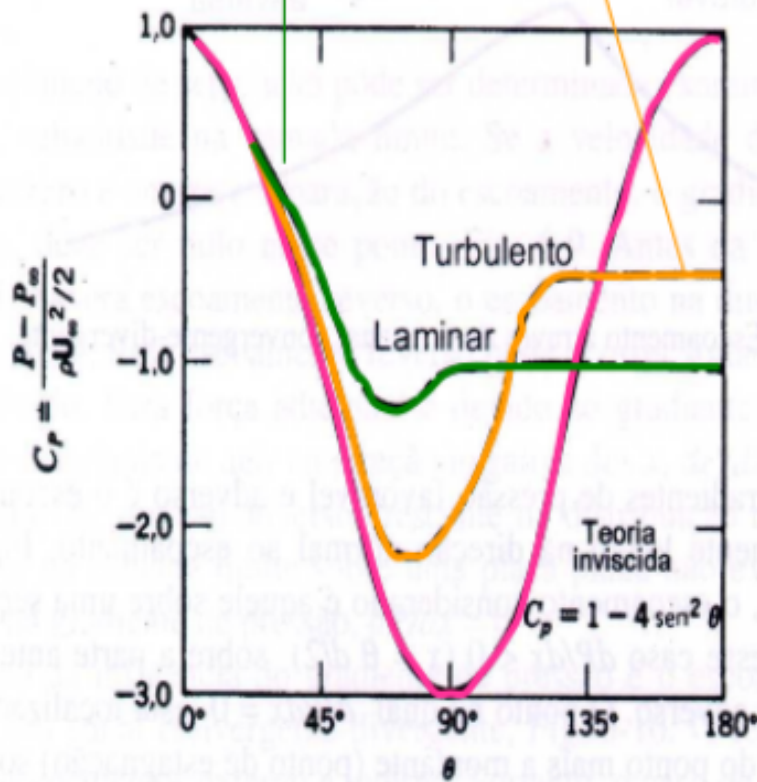
Coeficiente de pressão

Se há  $\mu$ , a partícula que sai de A não chega a F: gasta energia com atrito e não consegue vencer o gradiente de pressão. C.L. separa

Paradoxo d'Alembert: arrasto é zero num escoamento invíscido, mas com viscosidade muito pequena não é zero.

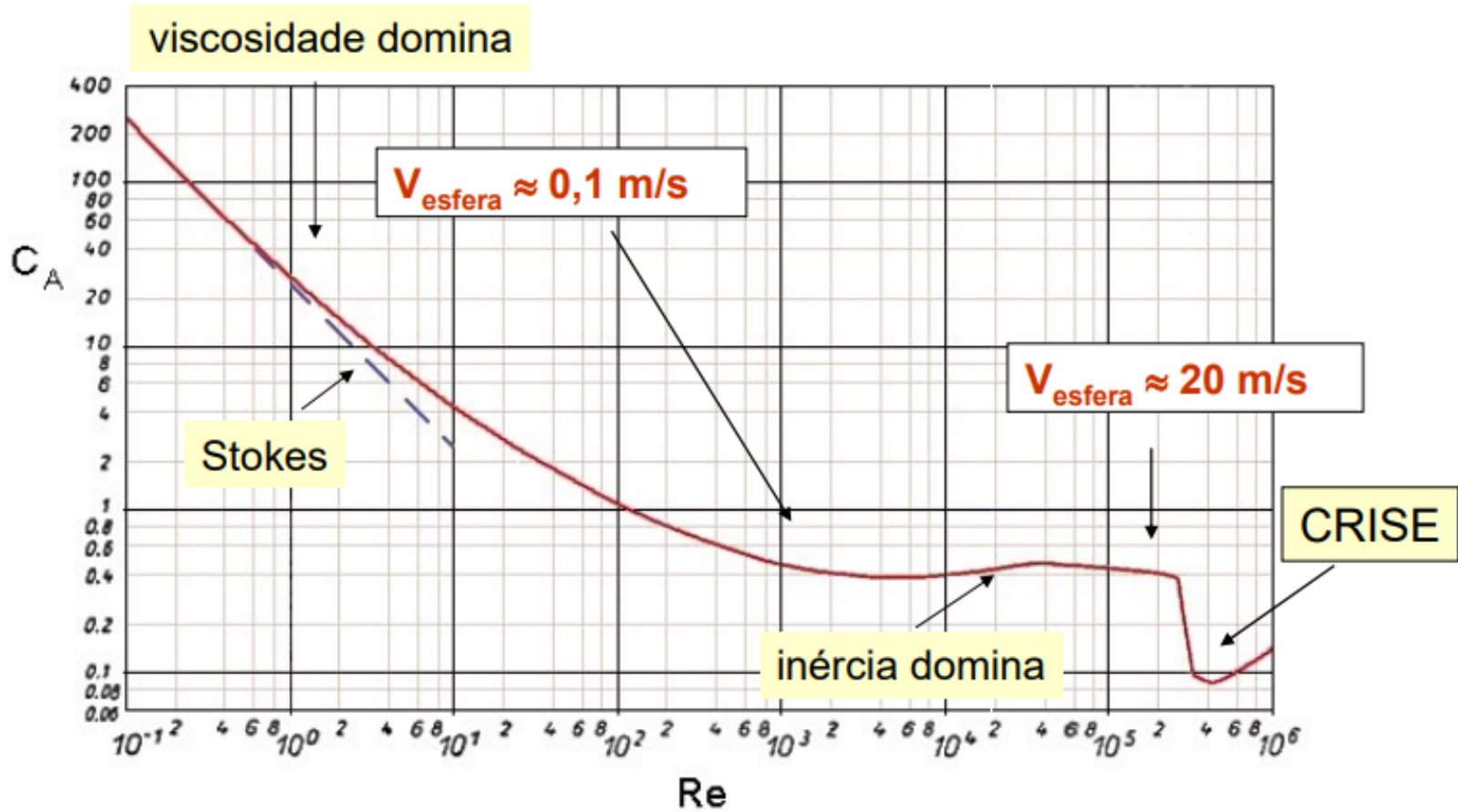


## Distribuição de Pressão Em Cilindros para escoamento Laminar, Turbulento e Potencial



**Figura 6-11** Pressão de escoamento e de superfície sobre um cilindro circular infinito normal ao escoamento. (a) Escoamento laminar, (b) Escoamento turbulento.

# Coeficiente de Arrasto de uma Esfera Lisa

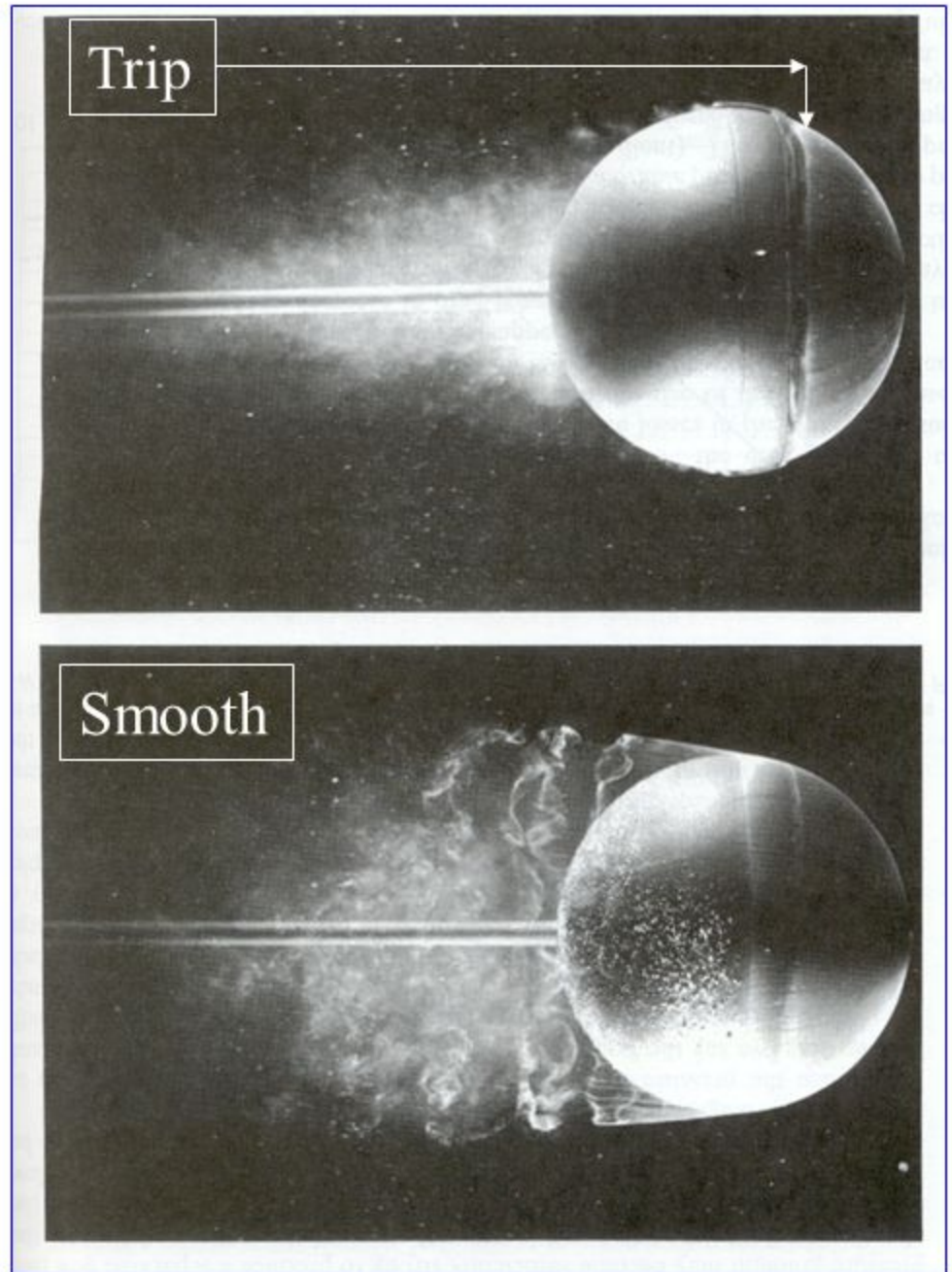


# Flow over a sphere.

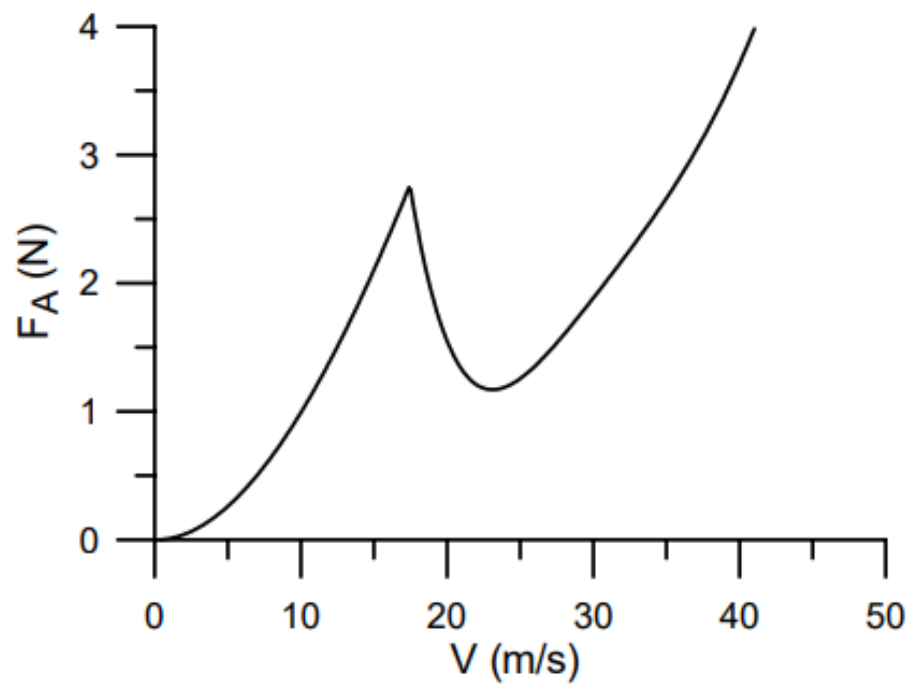
Trip:  $Re = 30,000$   
(with trip wire  
turbulent separation)

Smooth:  $Re = 15,000$   
(laminar separation)

From Van Dyke,  
*Album of Fluid Motion*  
Parabolic Press, 1982  
Original photographs by  
Werle, ONERA, 1980

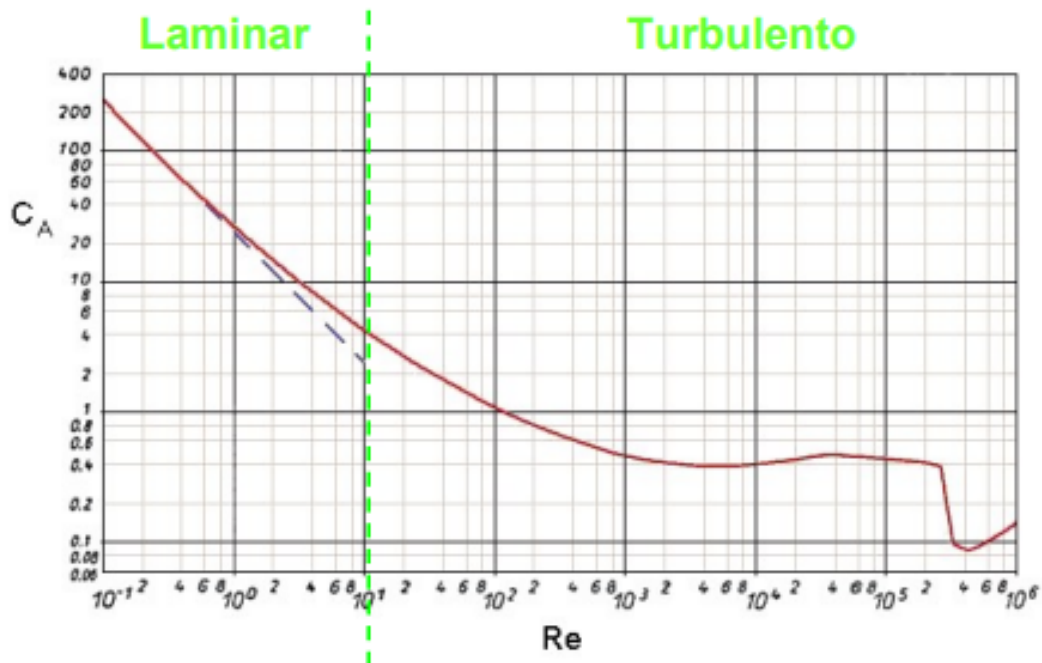


# Crise Aerodinâmica



Esfera lisa

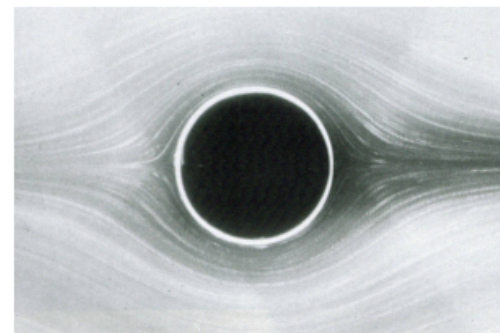
# Escoamento Laminar e Turbulento



## Escoamento Laminar

$$Re \ll 1 \Rightarrow C_a = 24/Re \Rightarrow F_a = (3\pi\eta D) V$$

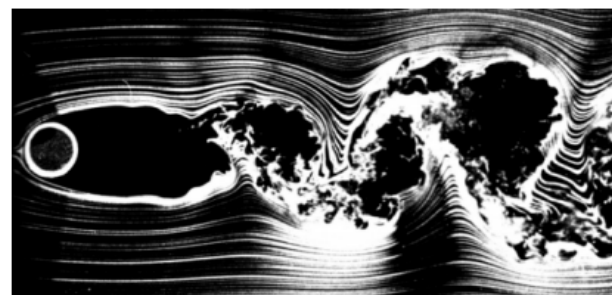
“atrito linear”

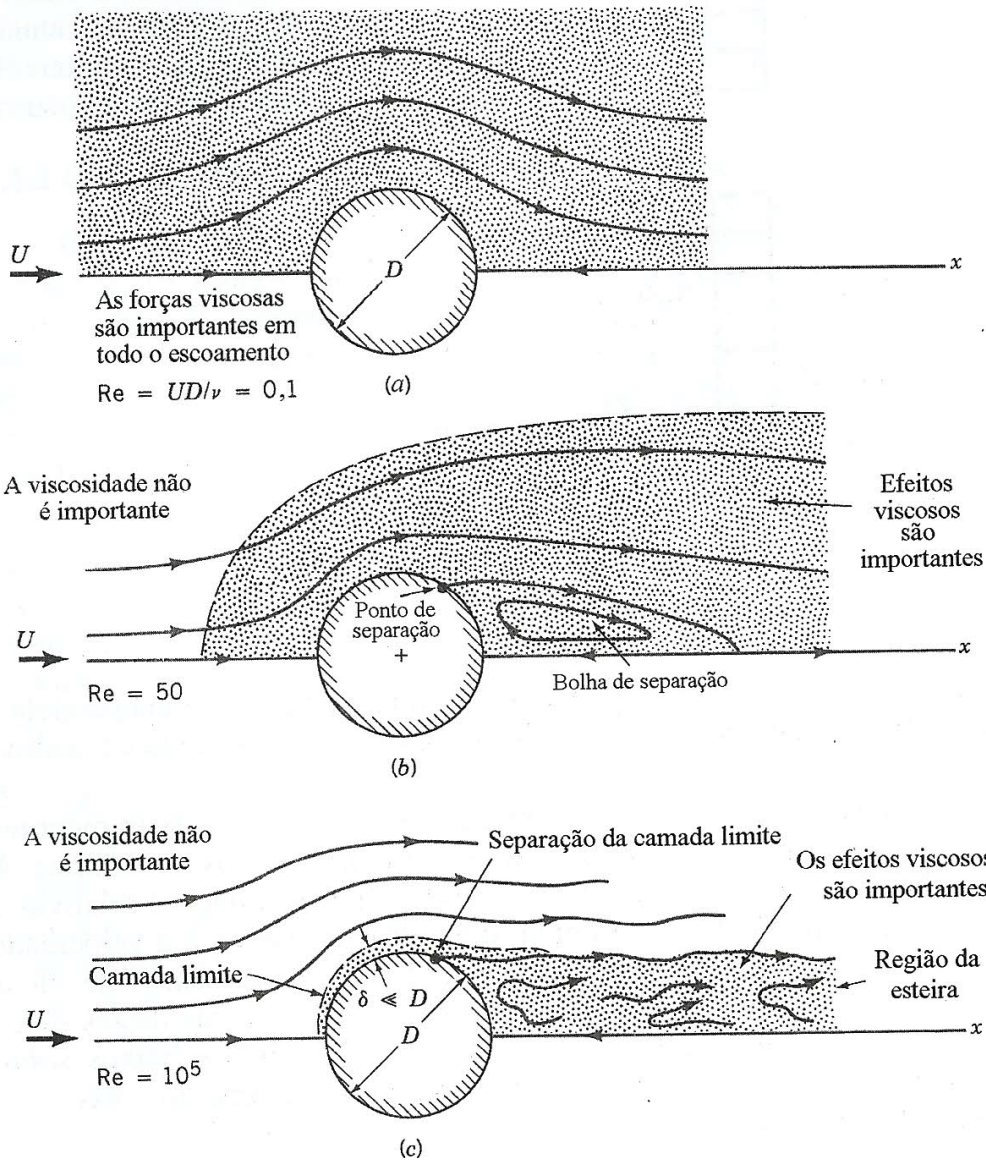


$Re = 0.16$   
(cilindro)

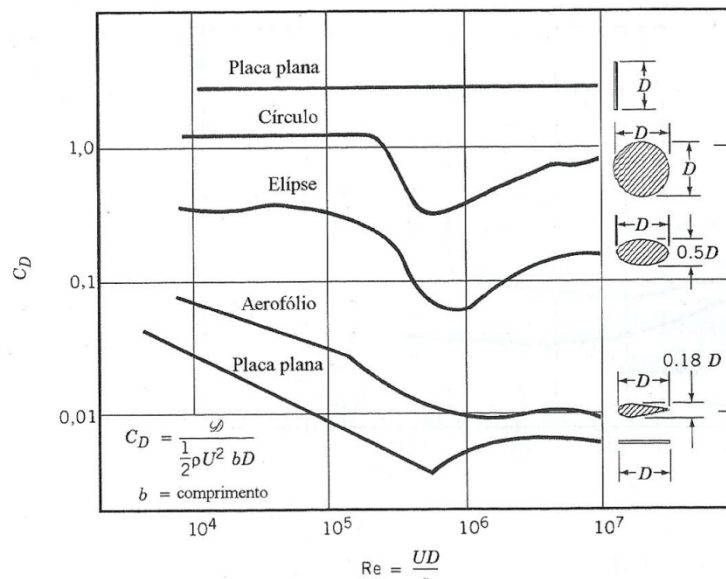
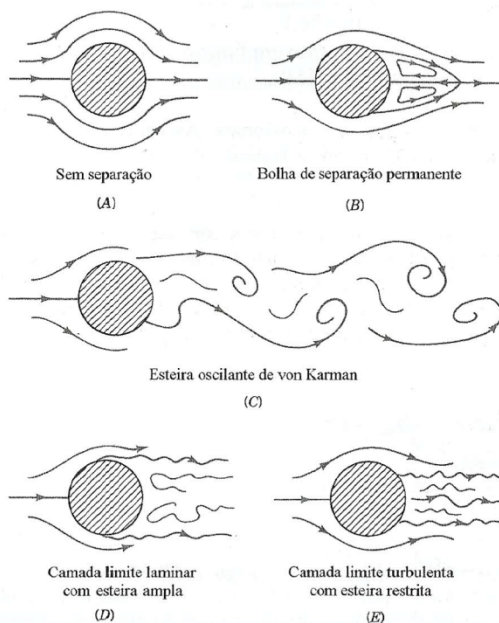
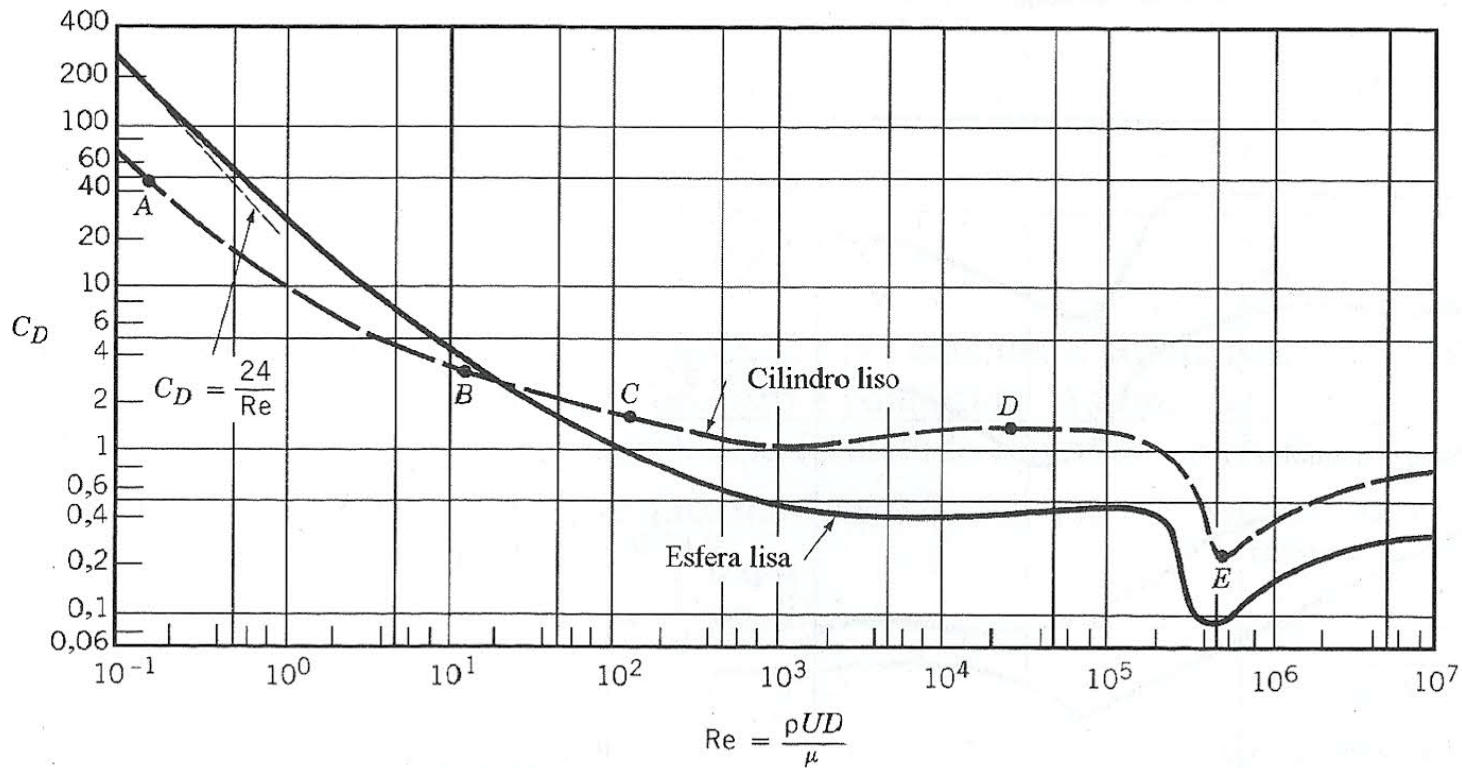
## Escoamento Turbulento

$$10^3 < Re < 10^5 \Rightarrow C_a \approx 0,4 - 0,5 \Rightarrow F_a \approx 0,2 \rho AV^2$$

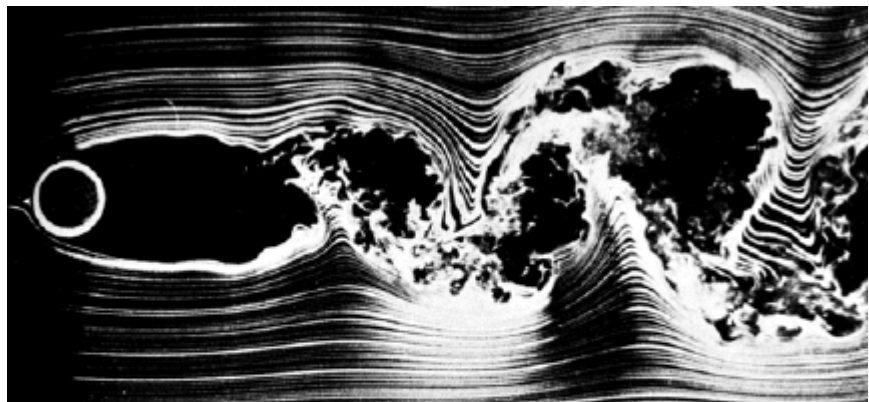
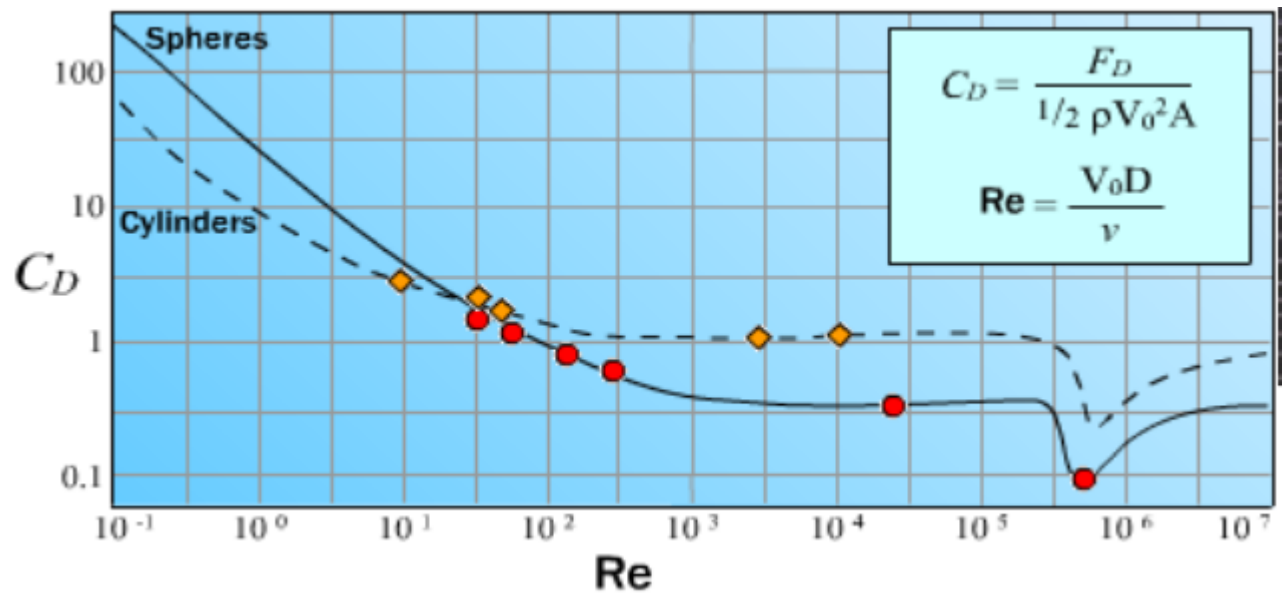




Escoamento viscoso: baixo, médio e alto número de Reynolds

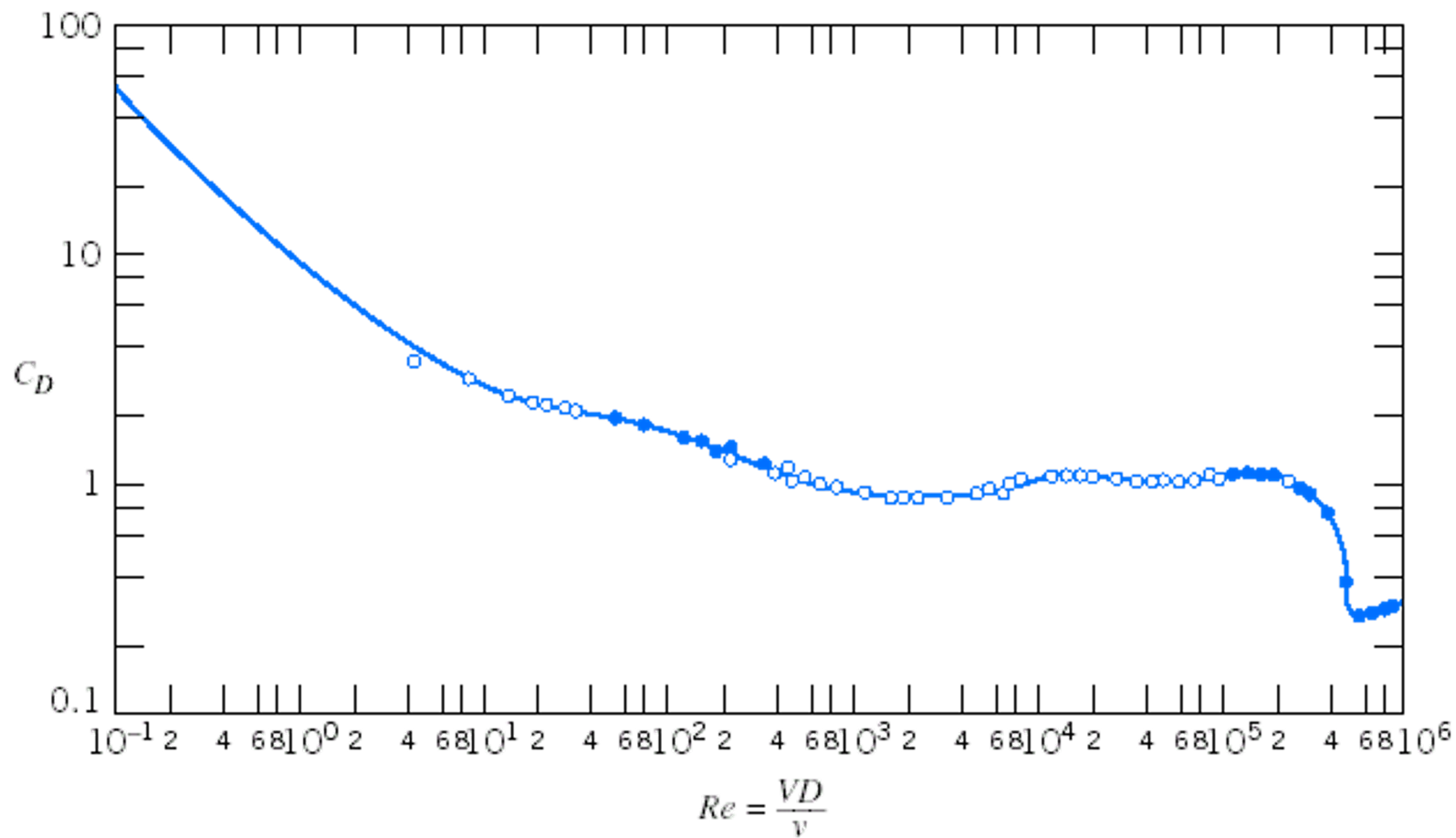






© T. Corke & H. Nagib

Cylinder:  $Re = 10^4$ . The flow near the front is still laminar and steady, but the wake is now time-dependent and distorted.



**Fig. 9.13** Drag coefficient for a smooth circular cylinder as a function of Reynolds number [3].

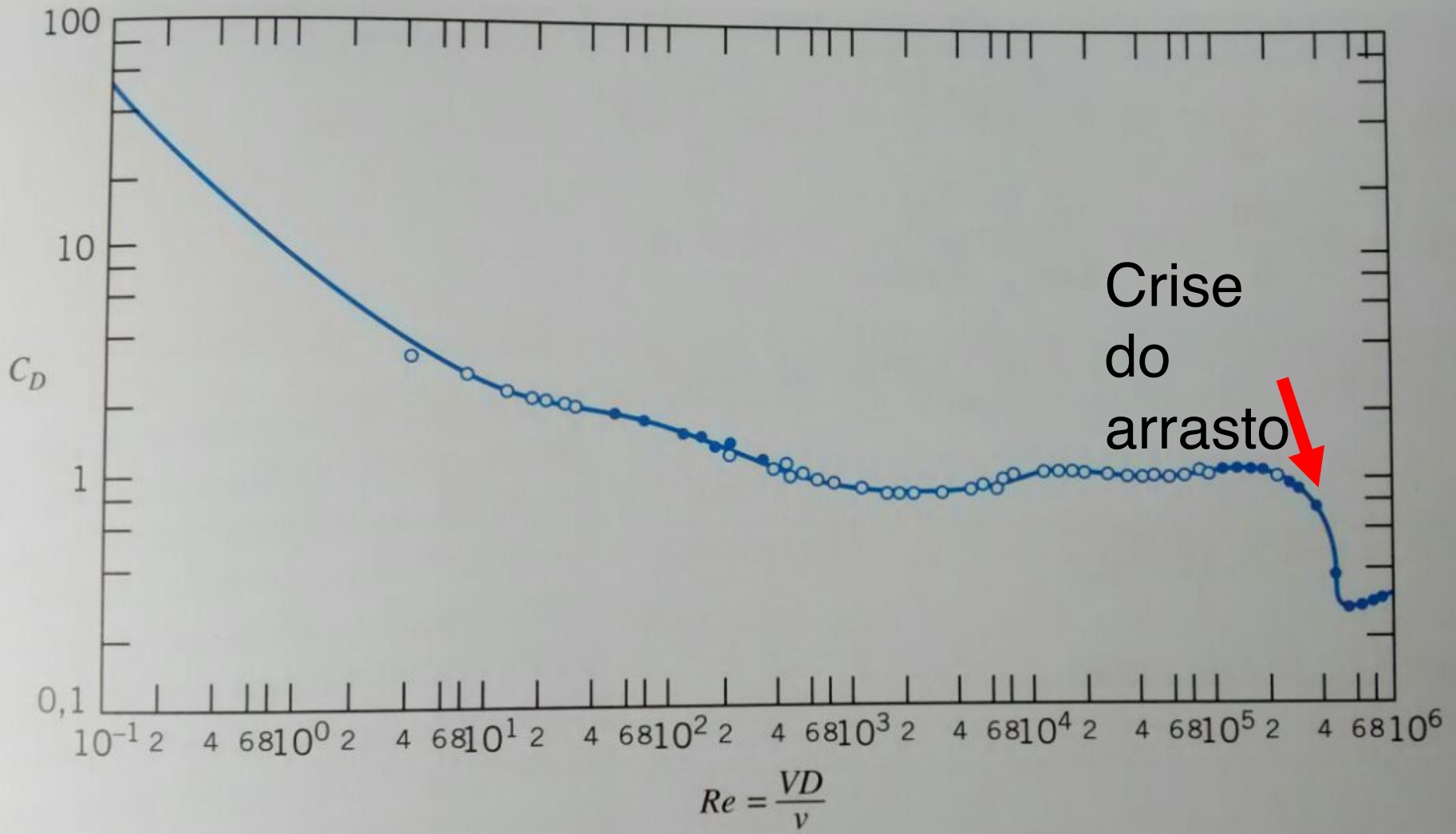
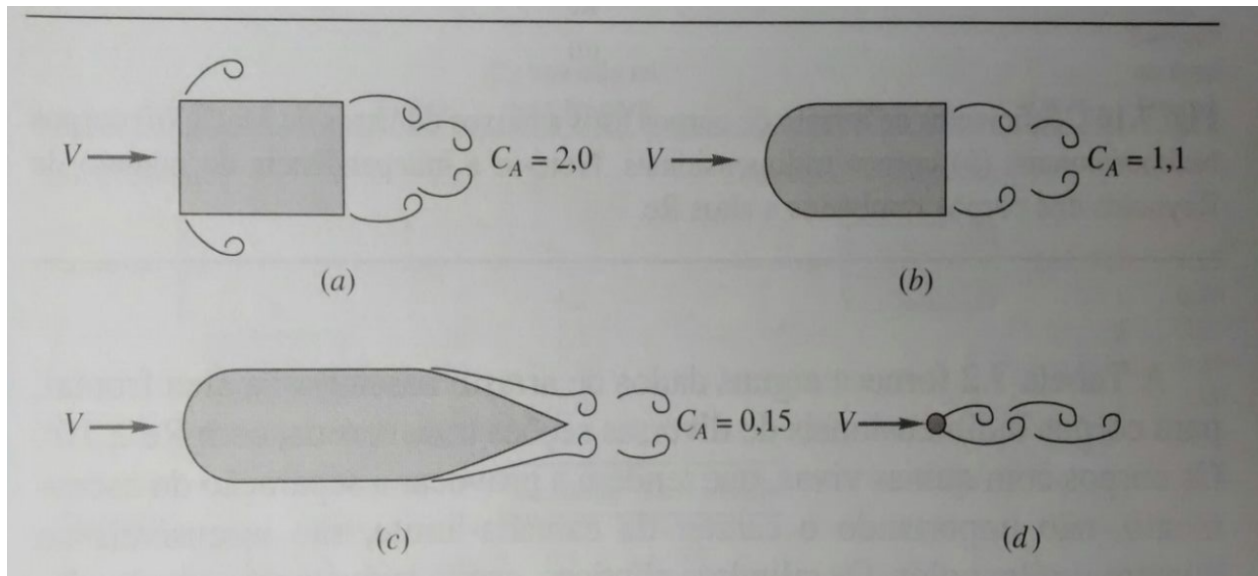


Tabela 7.2 Arrasto de corpos bidimensionais com  $Re \geq 10^4$

Forma	$C_A$ baseado na área frontal	Forma	$C_A$ baseado na área frontal	Forma	$C_A$ baseado na área frontal
Cilindro quadrado:		Semicilindro:		Placa:	
	2,1		1,2		2,0
	1,6		1,7	Placa fina normal a uma parede:	
Semitubo:		Triângulo equilátero:			1,4
	1,2		1,6		
	2,3		2,0	Hexágono:	
					1,0
					↑ 0,7



## Crise do arrasto e Separação

A crise do arrasto surge para um corpo rombudo (cilindro, p.ex.) quando a camada limite se torna turbulenta ao se desenvolver ao longo de uma superfície com gradiente de pressão adverso. O resultado é que a esteira fica mais fina e o arrasto se torna menor no ponto de separação.

# Separação

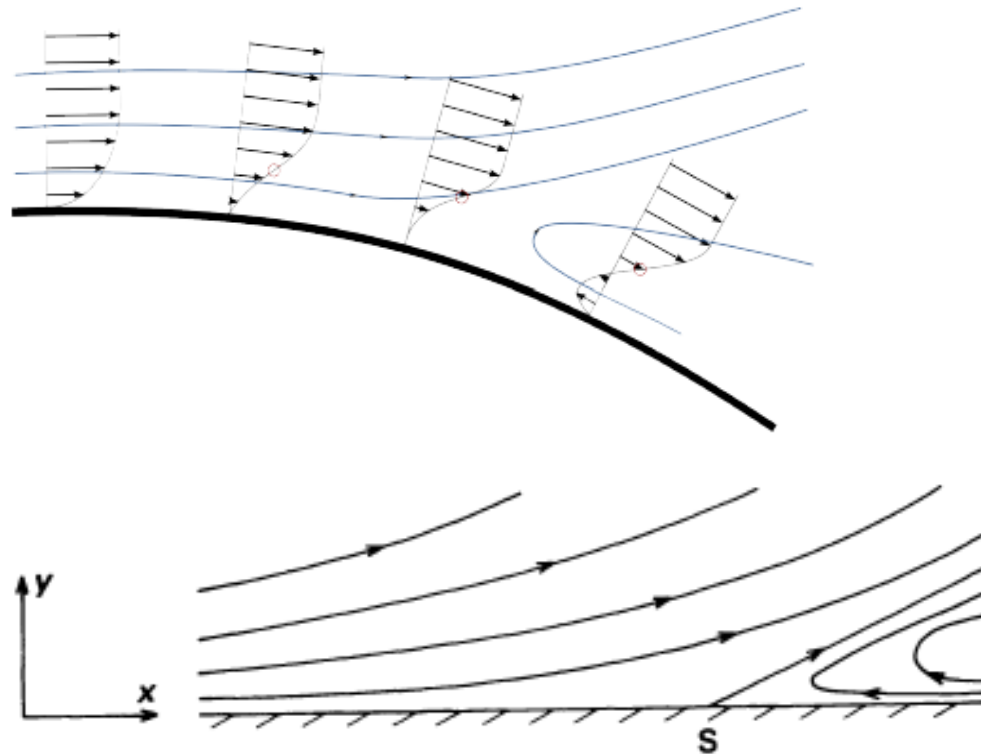
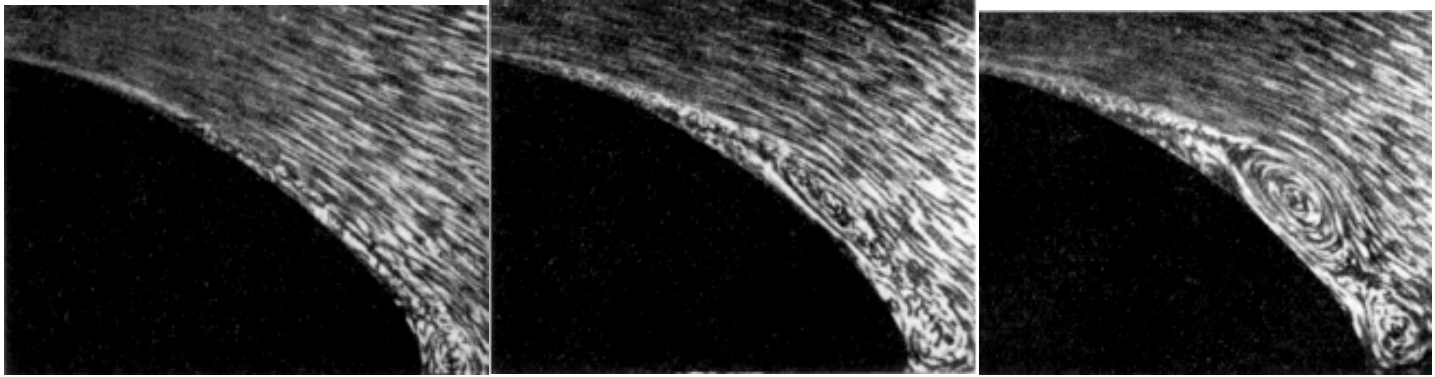
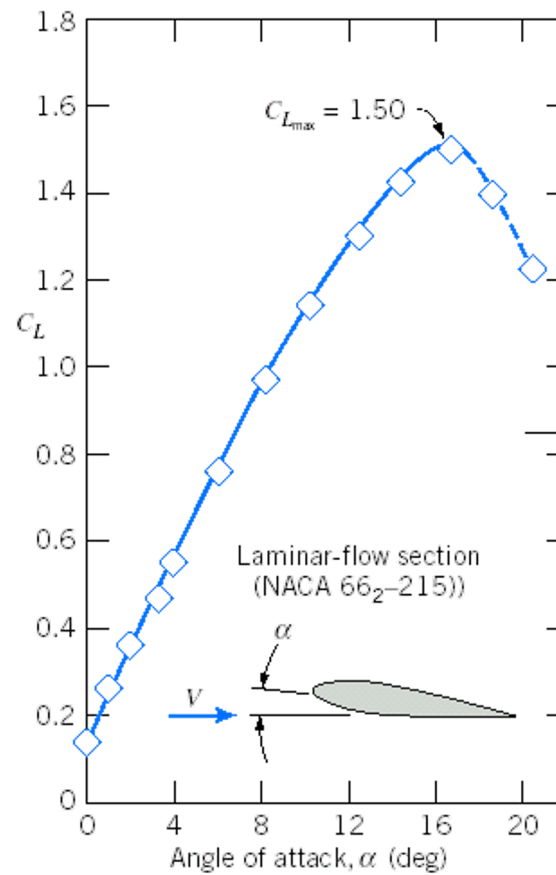
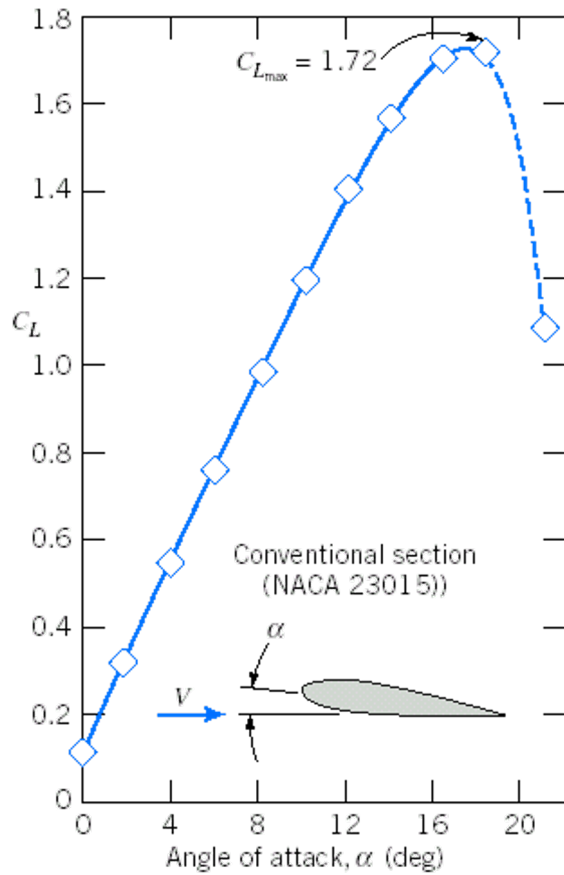
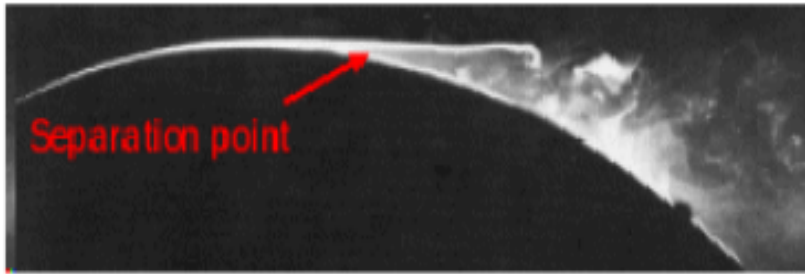


FIG. 12.3 Typical streamline pattern in vicinity of separation point.

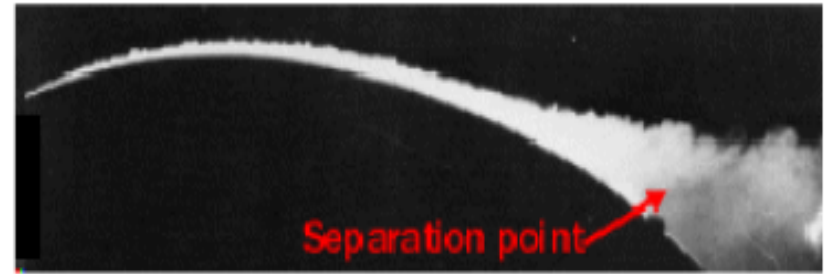
- Examples: NACA 23015; NACA 66<sub>2</sub>-215



# Separação



*Laminar Separation*



*Turbulent Separation*

Devido aos efeitos viscosos, uma partícula de fluido sofre perda de energia enquanto escoar. Esta perda faz com que a partícula não tenha energia suficiente para vencer o gradiente de pressão adverso e, num certo ponto, o escoamento se separa, pelo equilíbrio de energia. Neste ponto (o ponto de separação) o gradiente de velocidades e a tensão de cisalhamento são nulos.

