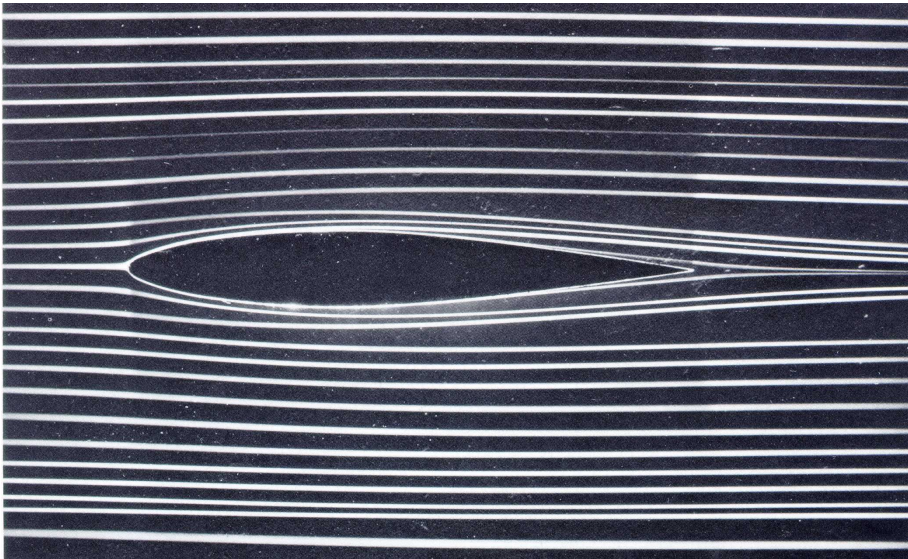


# **Escoamento Externo**

# Escoamento Externo

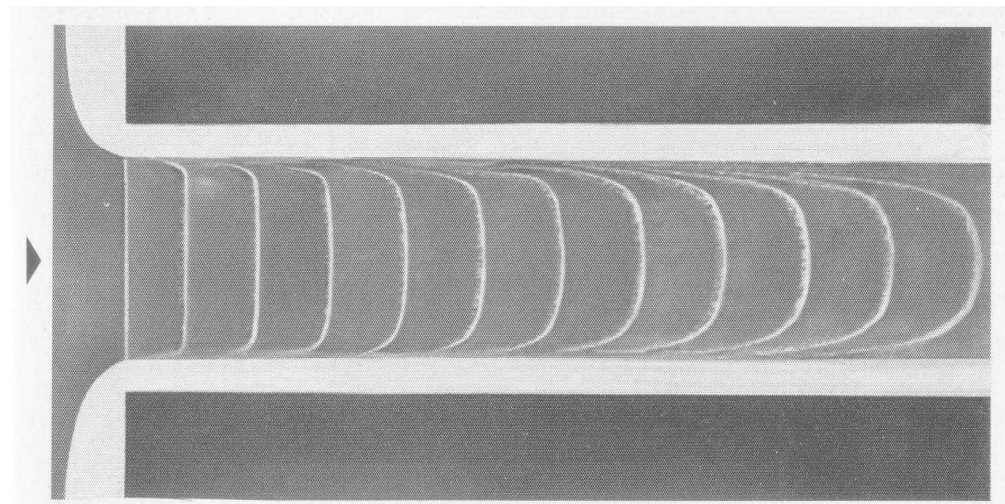
- **Perfil de Velocidades e a lei de não deslizamento**
- **Tensão de cisalhamento e a Lei de Newton**
- **Estado de Forças no Fluido**
- **Características da Camada Limite**
- **Regime de Escoamento: Laminar e Turbulento**
- **Arrasto Viscoso**
- **Efeitos do Gradiente de Pressão**
- **Arrasto de Forma**

# *Escoamento Externo x Interno*

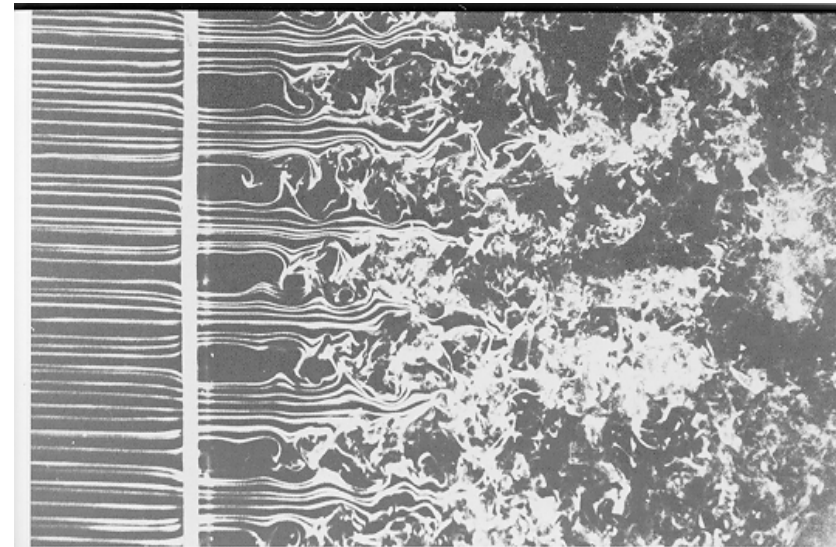
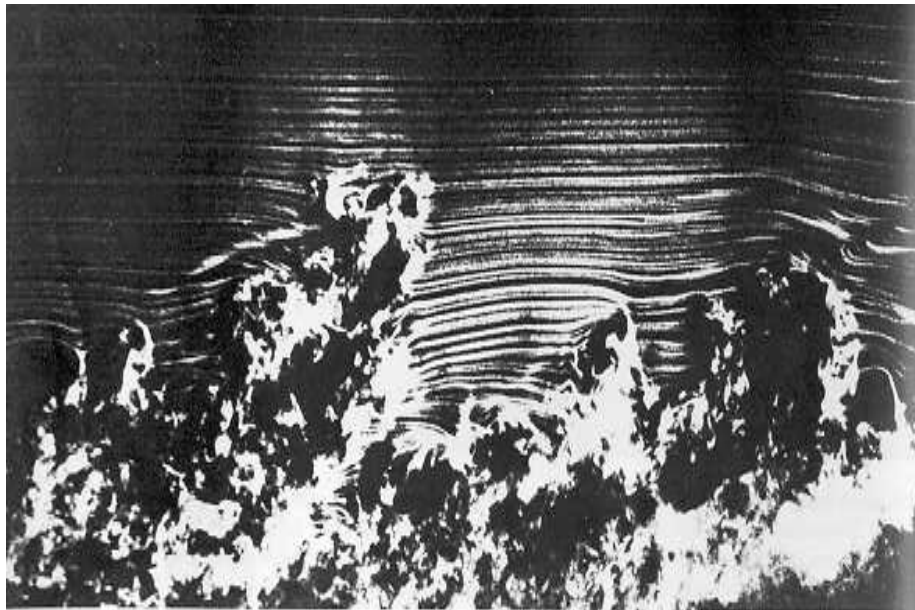
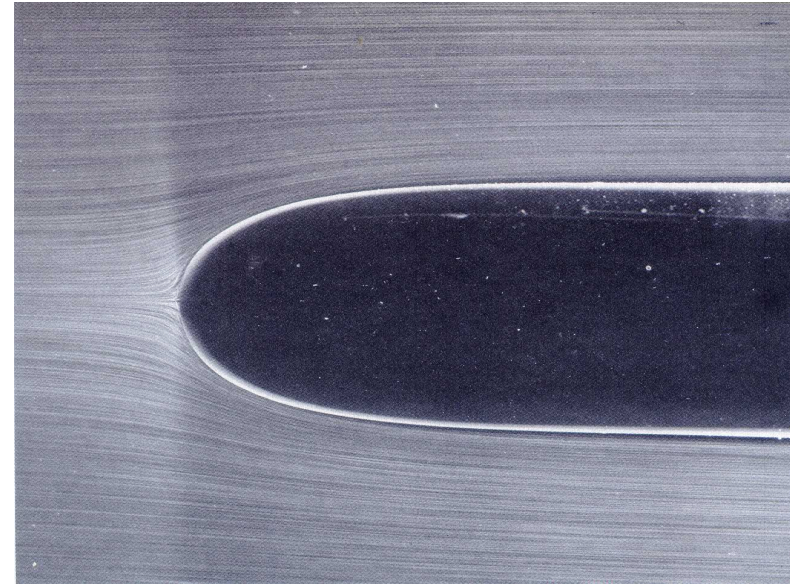
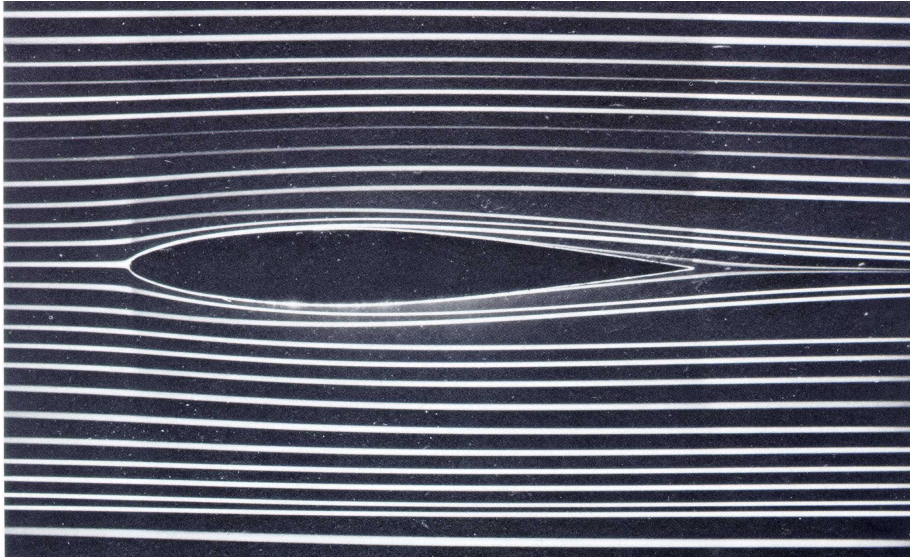


Escoamentos externos não são confinados por paredes .

Escoamentos internos possuem fronteiras que limitam ou restringem o campo de escoamento



# *Escoamento Laminar x Turbulento*



152. Generation of turbulence by a grid. Smoke wires show a uniform laminar stream passing through a  $\frac{1}{16}$ -inch plate with  $\frac{3}{4}$ -inch square perforations. The Reynolds num-

ber is 1500 based on the 1-inch mesh size. Instability of the shear layers leads to turbulent flow downstream. Photograph by Thomas Corke and Hassan Nagib

# Definições

- Escoamento laminar – Escoamento altamente ordenado, onde as partículas de fluido se movem de forma paralela umas às outras.
- Escoamento turbulento – Escoamento altamente desordenado, onde as partículas se movem de forma aleatória.
- A condição de escoamento laminar ou turbulento afeta bastante a potência requerida para bombeamento e as transferências de calor

# Definições

- *Escoamentos onde as variações de densidade são desprezíveis são chamados de incompressíveis.*
- *Neste curso consideraremos apenas escoamentos incompressíveis.*

# Definições

- *Um escoamento pode ser “forçado” ou “natural”.*
- *Escoamento natural (convecção natural) a força gravitacional ou o empuxo promovem o escoamento.*
- *Escoamento forçado (convecção forçada) outros tipos de escoamento.*

# Definição de Fluido

- Qual a diferença entre um fluido e um sólido?
- Um fluido se deforma continuamente quando submetido a uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importa quão pequena é esta tensão.



# Cisalhamento de um sólido (a) e de um fluido (b)

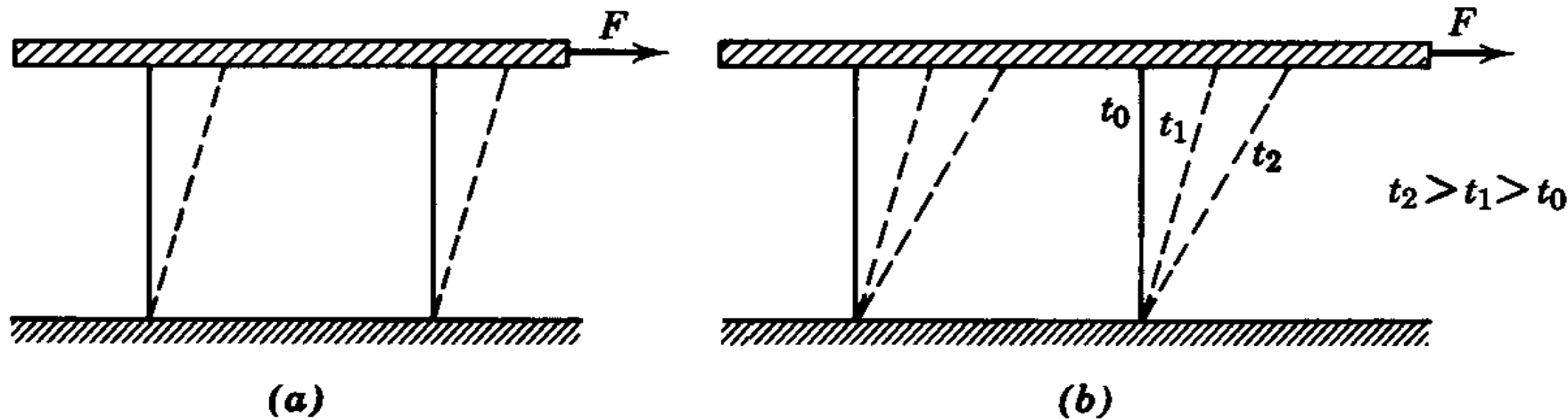


Fig. 1.1 Behavior of (a) solid and (b) fluid, under the action of a constant shear force.

Em (a), as superfícies hachuradas representam placas solidárias a um sólido sendo cisalhado. Em (b), elas representam placas limitando um fluido entre elas

O fluido pode ser óleo, por exemplo.

# Cisalhamento de um sólido (a) e de um fluido (b)

- *Na região de deformação elástica, a tensão de cisalhamento do sólido vale  $\tau = F/A$  onde  $A$  é a área da superfície em contato com a placa sólida.*
- *Entretanto, para o fluido, a placa superior não pára. Ela continua a se mover e o fluido continua a se deformar.*

# Perfil de Velocidades e a Lei de Não Deslizamento

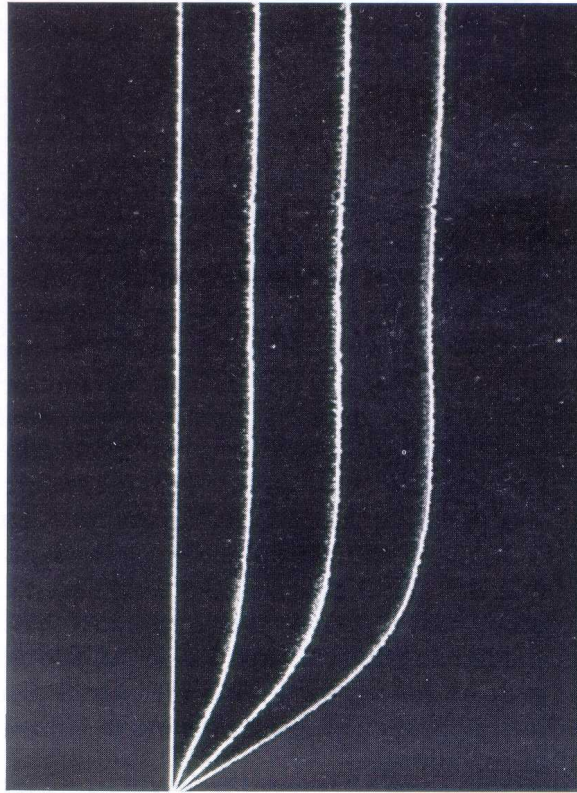


Fig. 21. Velocity profile in the laminar boundary layer (0.01% salt water, free stream velocity 0.6 cm/s, distance from the leading edge 200 mm,  $Re = 1.2 \times 10^2$ , hydrogen bubble method).

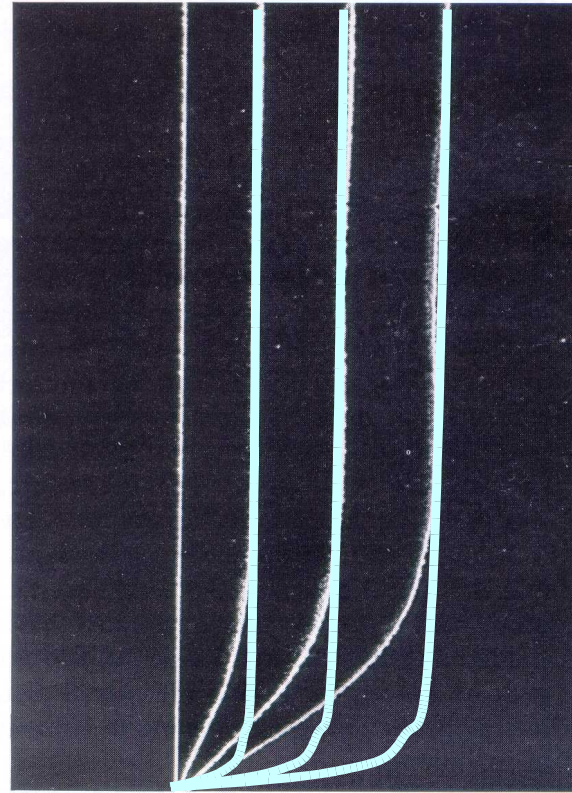
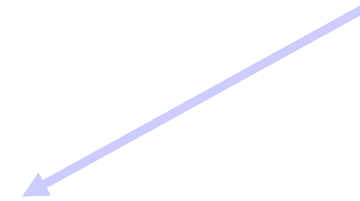


Fig. 21. Velocity profile in the laminar boundary layer (0.01% salt water, free stream velocity 0.6 cm/s, distance from the leading edge 200 mm,  $Re = 1.2 \times 10^2$ , hydrogen bubble method).

Perfil 'médio' de  
Velocidade  
p/ regime  
Turbulento



*O fluido adere à parede sólida. A velocidade do fluido junto à parede é igual à velocidade da parede sólida.*

# Cisalhamento de um fluido

- O fluido muito próximo à parede tende à aderir à ela, movendo-se com uma velocidade  $u$  que tende à zero ao nos aproximarmos da parede. Se a parede abaixo do fluido é estacionária, o fluido junto à parede adere à ela e possui velocidade zero.
- **Condição de não deslizamento** – É a condição de velocidade nula em relação às fronteiras (paredes) limitando o escoamento

# Cisalhamento de um fluido

- Os fluidos são classificados em termos da relação entre tensão de cisalhamento e deformação do fluido .
- Fluidos cuja taxa de deformação é diretamente proporcional (linear) à tensão de cisalhamento aplicada são chamados de **Fluidos Newtonianos**.

# Cisalhamento de um fluido

- *Pode-se mostrar que a tensão de cisalhamento  $\tau$  é dada por*

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

- *O termo  $du/dy$  é chamado de **gradiente de velocidade** e corresponde à **taxa de deformação**.*
- *O coeficiente presente é a viscosidade dinâmica,  $\mu$ .*

# Viscosidade Dinâmica, $\mu$

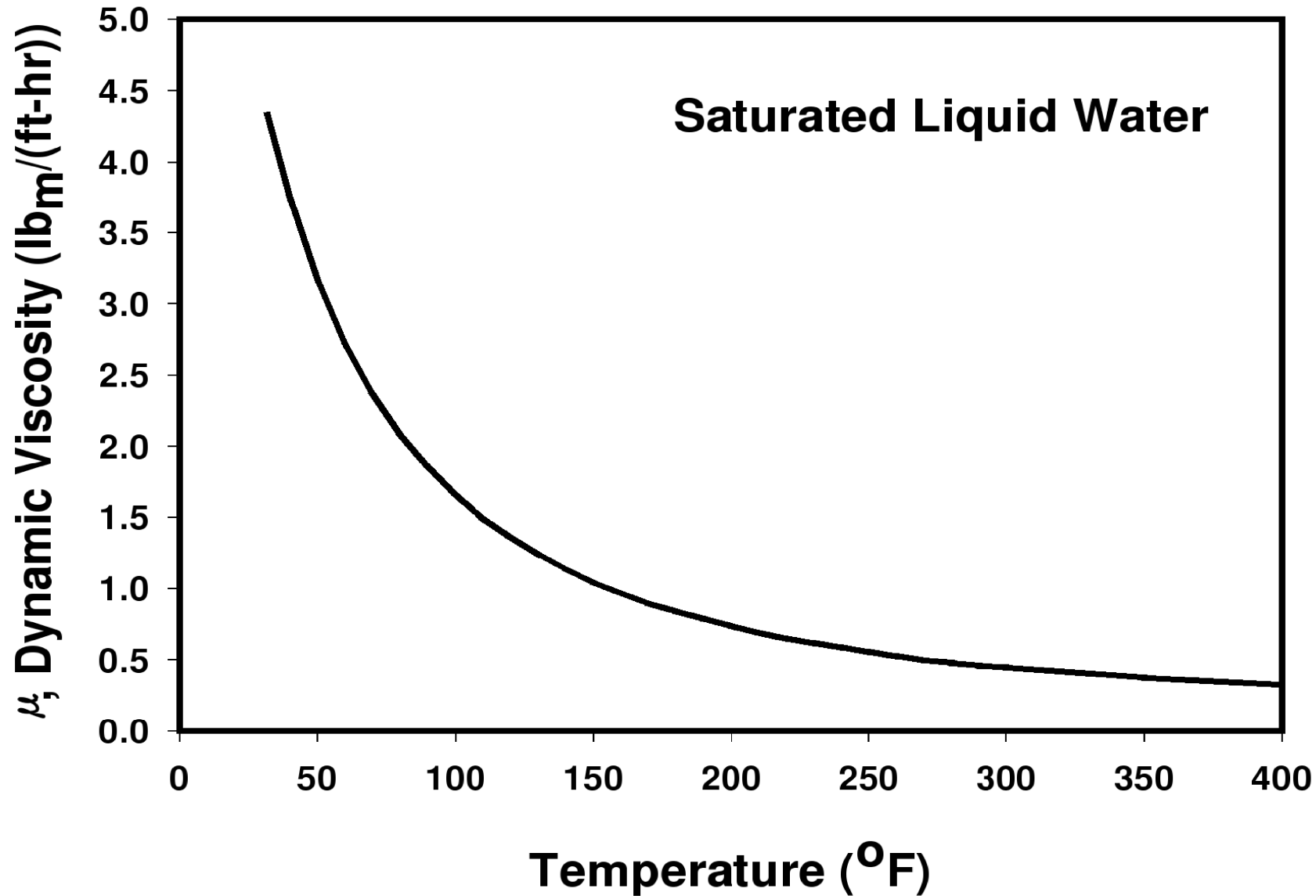
- Propriedade intensiva
- Depende da **Temperatura** e da **Pressão** para uma única fase de uma substância simples.
- A dependência em relação à pressão é geralmente fraca. A dependência em relação à **temperatura** é mais importante.

# Cisalhamento de um fluido

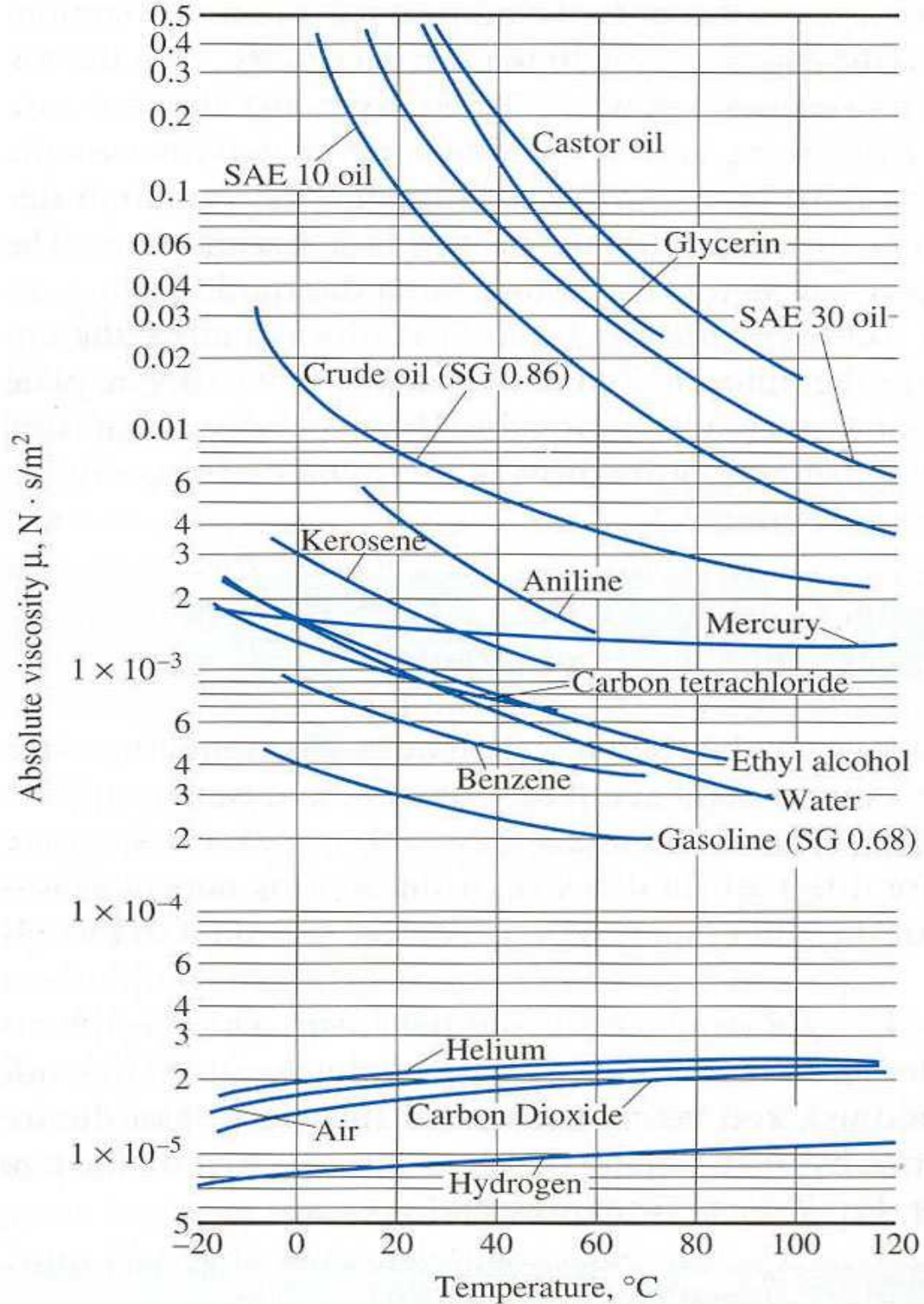
- A maioria dos fluidos utilizados em engenharia são Newtonianos. Exemplos: água, ar, refrigerantes, óleos.
- Exemplos de fluidos não Newtonianos: pasta de dente, lama, espumas.



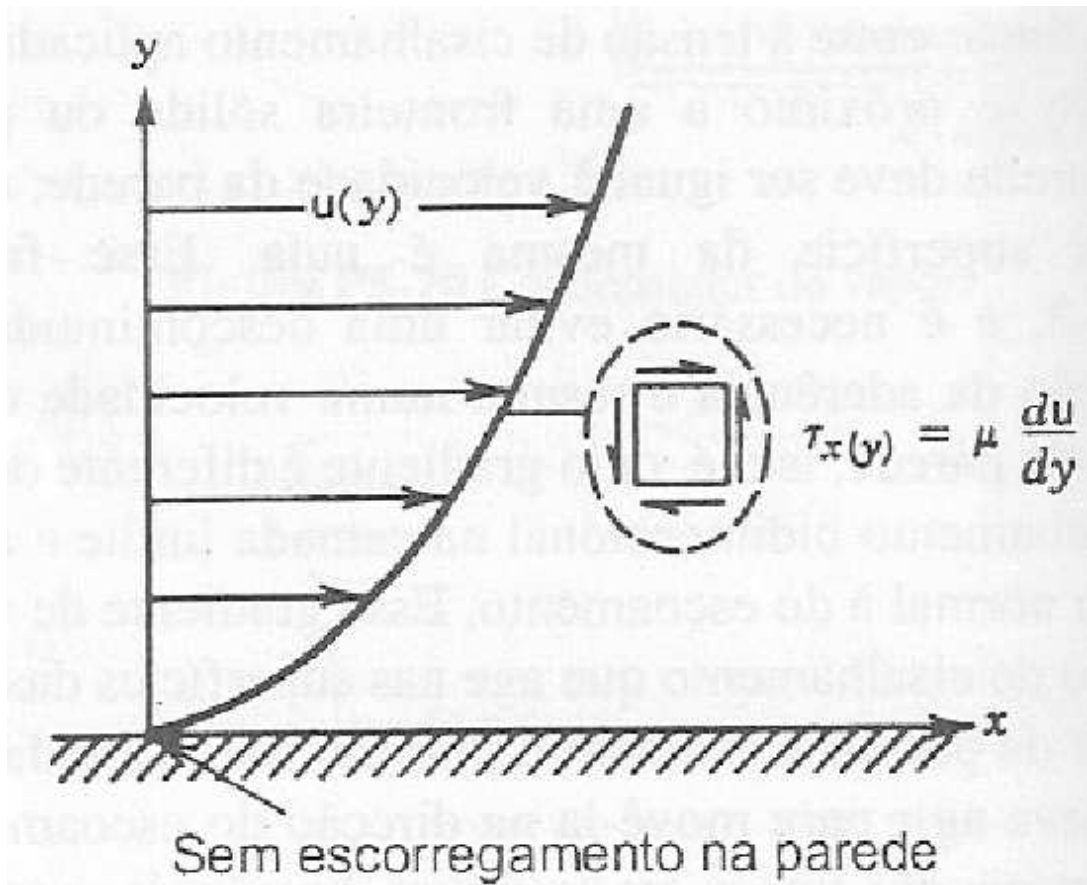
# Viscosidade Dinâmica da água



# Viscosidade dinâmica de alguns fluidos comuns

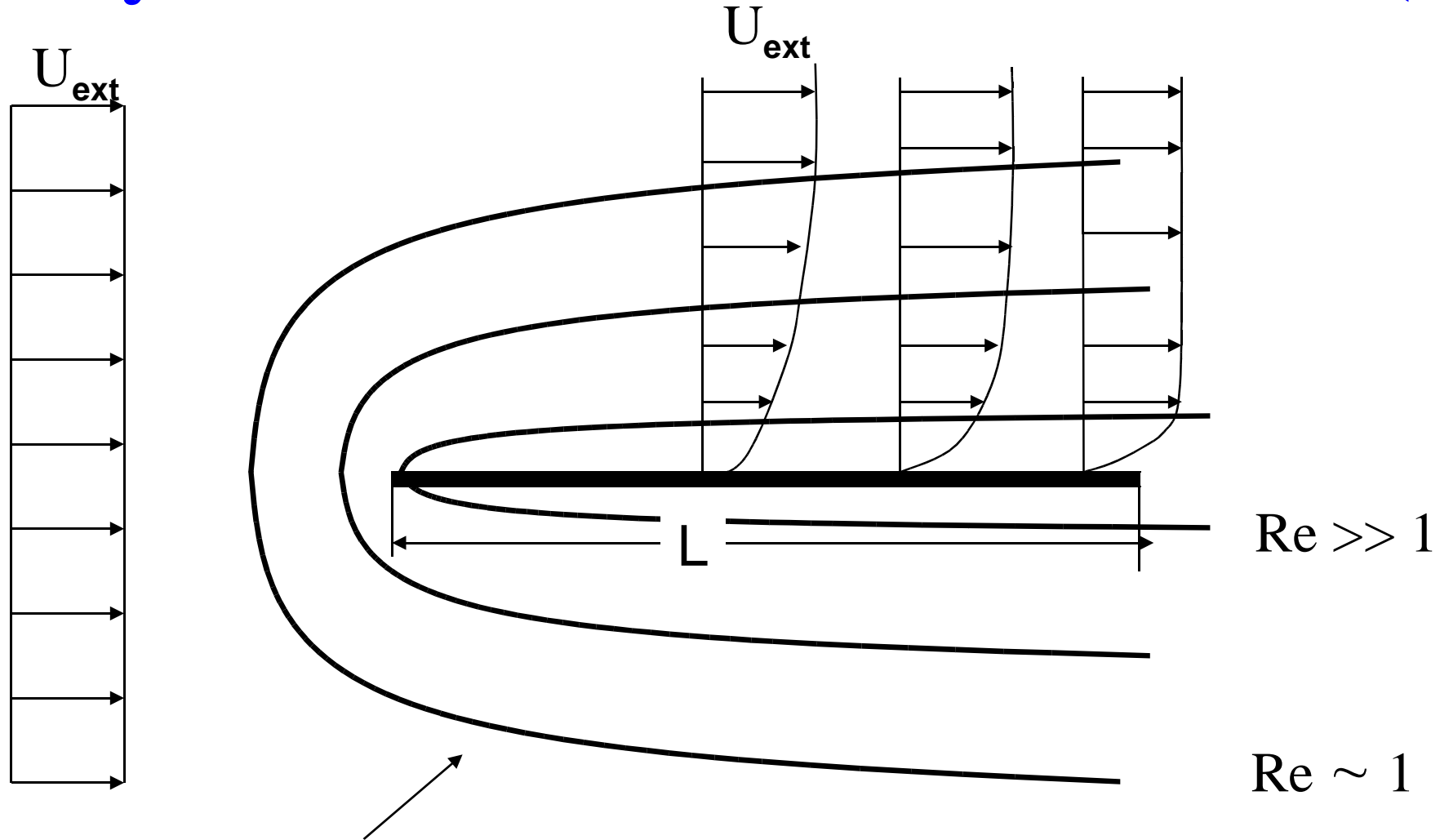


# Estado de Forças no Fluido



$$\text{Re} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{[\text{Termos Inerciais}]}{[\text{Termos Viscosos}]}$$

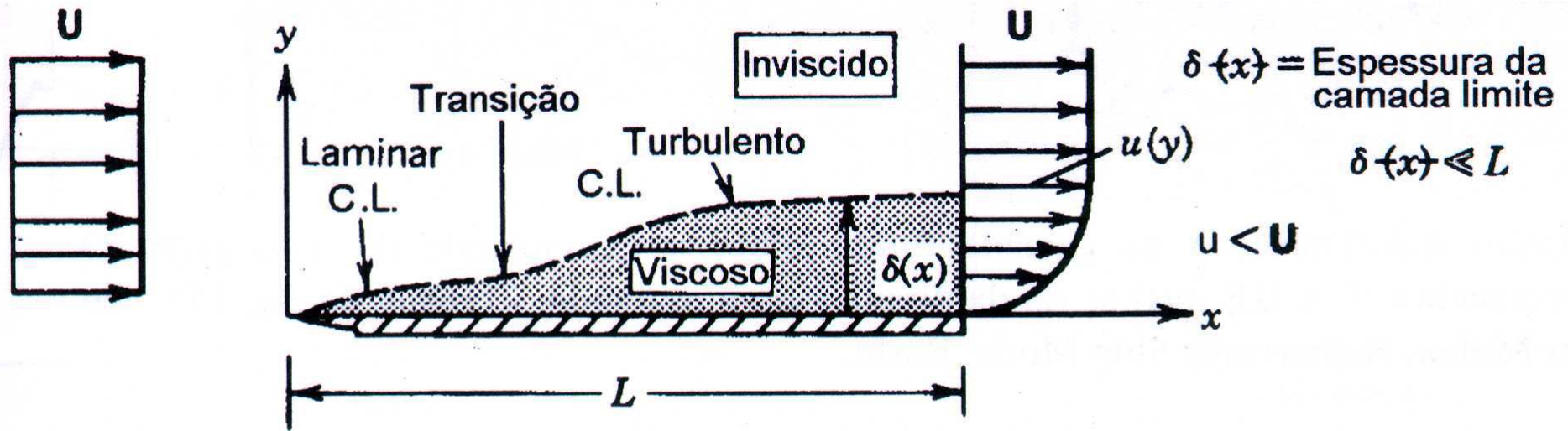
# N. Reynolds e seu Efeito no Escoamento (C.L.)



Região onde predominam  
efeitos viscosos  
com presença de gradientes de  
velocidade

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{[Termos\ Inerciais]}{[Termos\ Viscosos]}$$

# Características da Camada Limite



**Figura 6.2** Camada limite hidrodinâmica sobre uma placa plana.

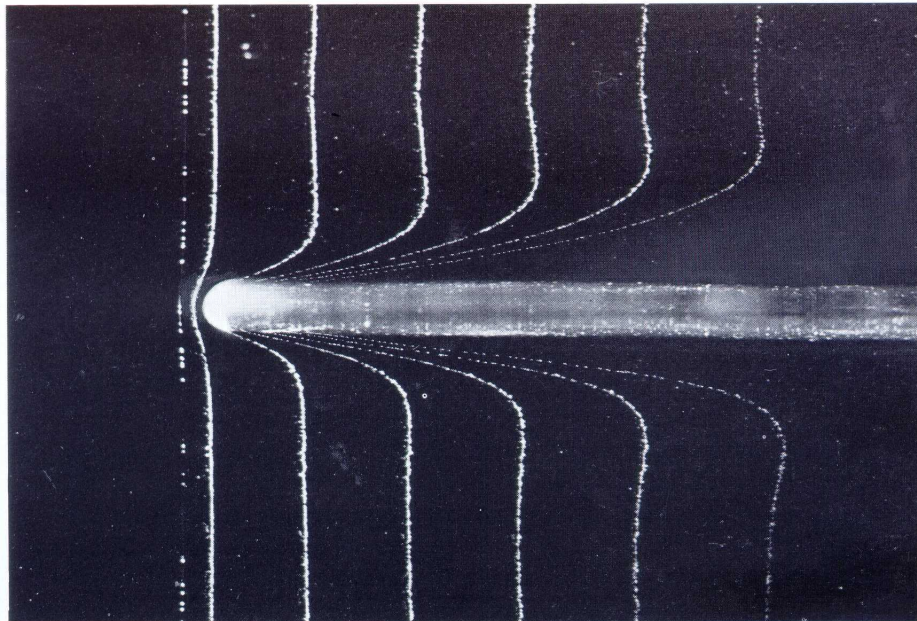


Fig. 20. Development of laminar boundary layer (0.01% salt water, free stream velocity 0.1 cm/s, thickness of the plate 0.5 mm, hydrogen bubble method)

# Características da Camada Limite

- Ocorre para  $Re$  elevados,  $Re \gg 1$
- Perfil velocidades atinge  $U_{ext}$  para uma distância  $\delta$  da parede.  $\delta$  é a espessura da camada limite,  $\delta/L \ll 1$ ,
- A C.L. é uma região de alto gradiente de velocidade confinada próxima a parede sólida
- Externo a C.L.  $U_{ext}$  é governado por Bernoulli, efeitos viscosos ficam confinados na C.L.
- A C.L. pode ser Laminar ou Turbulenta.

# Características da Camada Limite

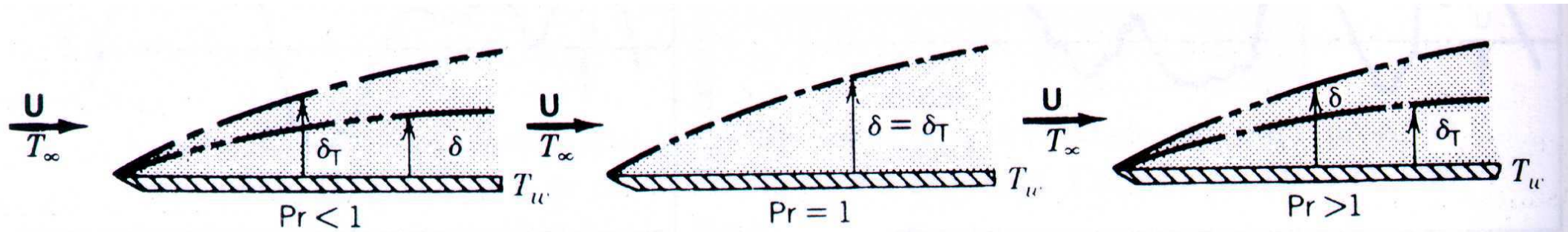


Figura 6-6 Camadas limites térmica e hidrodinâmica num escoamento sobre placa plana.

N. Prandtl, Pr

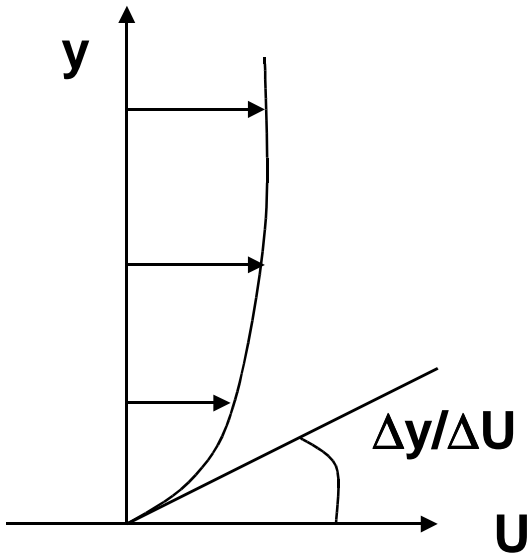
$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\delta}{\delta_T}$$

Onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $\alpha$  é a difusividade térmica.

O Pr pode ser interpretado como a razão entre as espessuras das C.L. Hidrodinâmica e térmica.

# Arrasto Viscoso

- O arrasto viscoso é devido exclusivamente às forças viscosas que atuam nas paredes sólidas.
- A tensão de cisalhamento na parede é localizada. Ela é avaliada pelo produto entre o gradiente de velocidade na parede e a viscosidade dinâmica do fluido.
- Frequentemente ela é expressa por meio do Coeficiente de Atrito,  $C_f$ , de Fanno:



$$\tau_w = \mu \left. \frac{dU}{dy} \right|_{\text{parede}} \quad C_f = \frac{\tau_w}{(1/2)\rho U_{ext}^2}$$

$$D = \frac{1}{2} \rho U_{ext}^2 \cdot C_f \cdot [\text{Área Molhada Corpo}]$$



# Arrasto Viscoso

- A força de arrasto viscoso total num corpo, é avaliada a partir da integração do arrasto localizado ao longo do corpo. Frequentemente ela é expressa em termos do coeficiente de atrito médio

$$\bar{C}_f = \frac{1}{(1/2)\rho U_{ext}^2} \frac{\int_A \tau_w \cdot dA}{A}$$

$$\bar{D} = \frac{1}{2} \rho U_{ext}^2 \cdot \bar{C}_f \cdot A$$

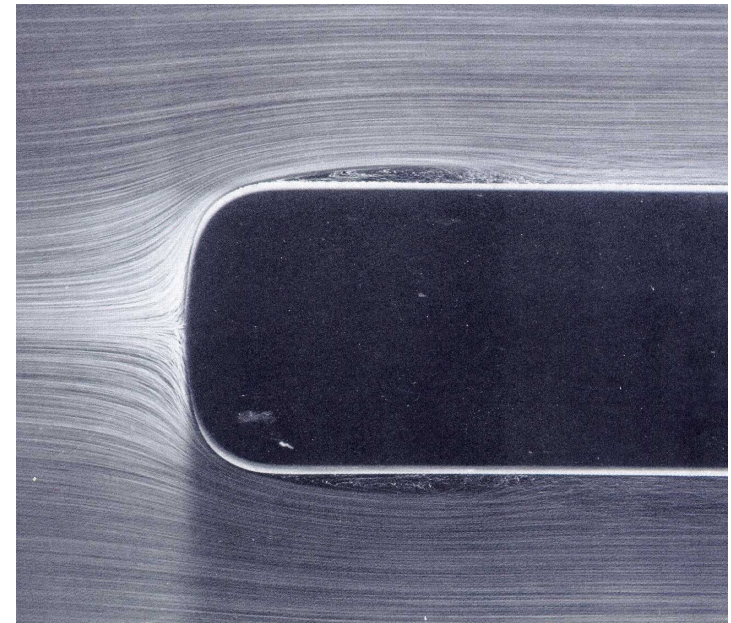
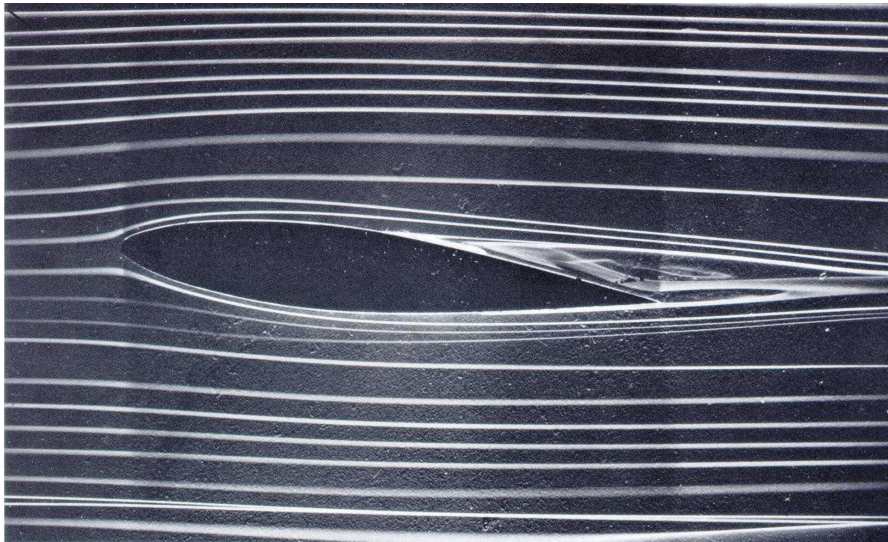
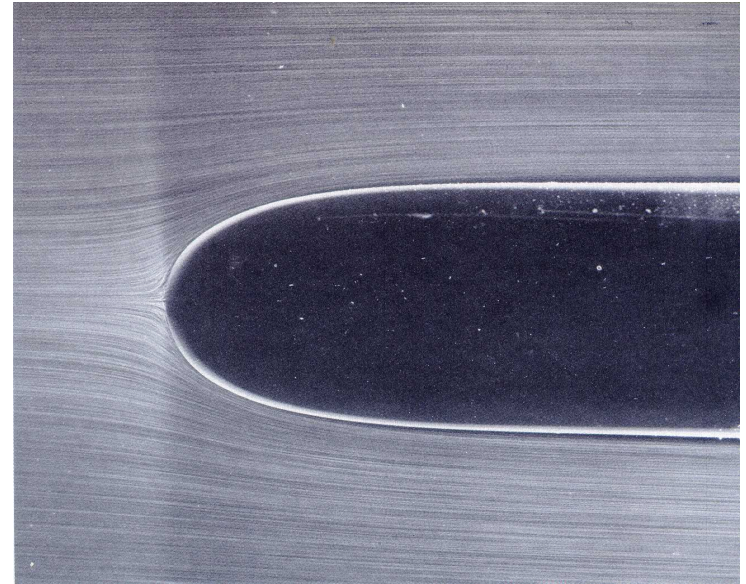
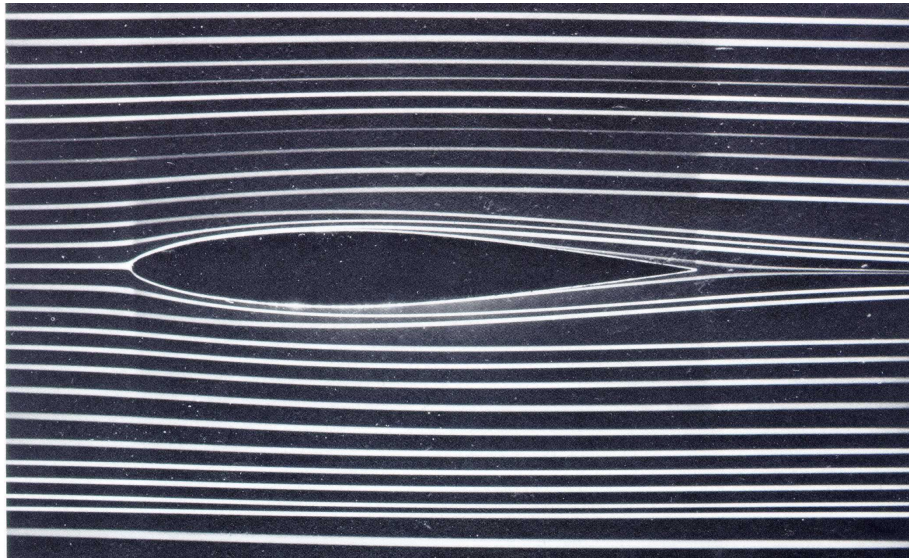
# Arrasto Viscoso

- Arrasto viscoso em uma placa plana com ausência de gradiente de pressão:

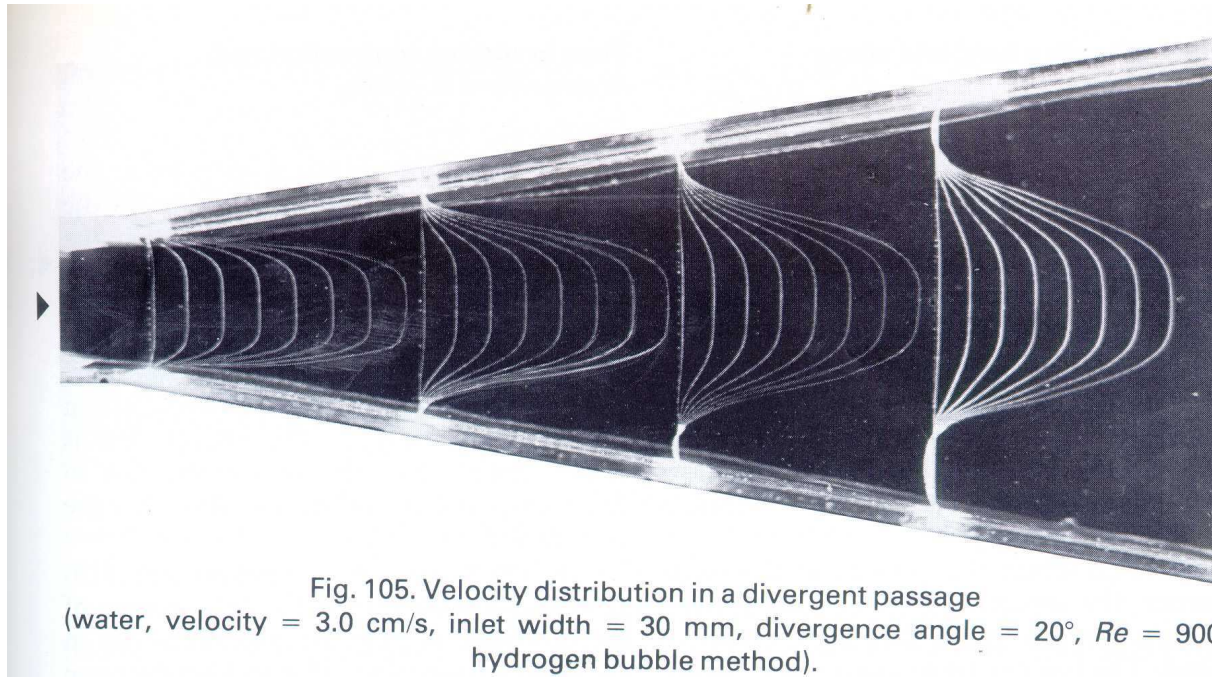
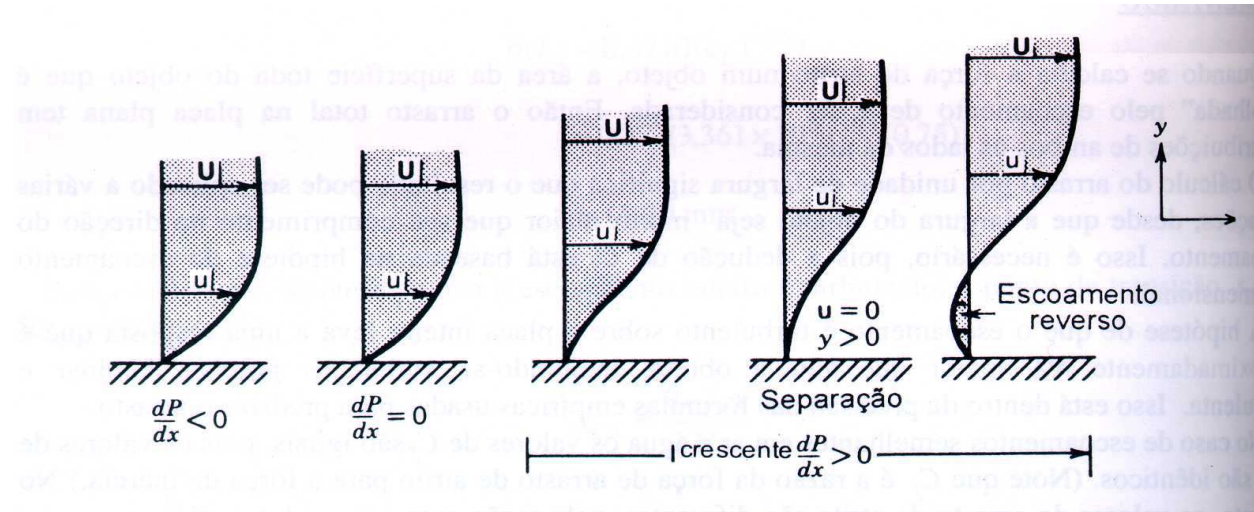
Tabela 6-1 Resumo das relações da camada limite para uma placa plana lisa

Laminar	$Re_x < 5 \times 10^5$
$u/U = f(y\sqrt{U/\nu x})$	Veja Tabela 6-2
$\delta/x = 5,0 Re_x^{-1/2}$	
$\tau_p = 0,332 \rho U^2 Re_x^{-1/2}$	
$C_{fx} = 0,664 Re_x^{-1/2}$	
$\bar{C}_f = 1,328 Re_L^{-1/2}$	
Turbulento	$5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$
$u/U \cong (y/\delta)^{1/7}$	
$\delta/x = 0,371 Re_x^{-1/5}$	
$\tau_p = 0,0296 \rho U^2 Re_x^{-1/5}$	
$C_{fx} = 0,0592 Re_x^{-1/5}$	
$\bar{C}_f = 0,074 Re_L^{-1/5}$	

# Gradiente de Pressão e Separação



# Gradiente de Pressão e Separação



# Gradiente de Pressão e Separação

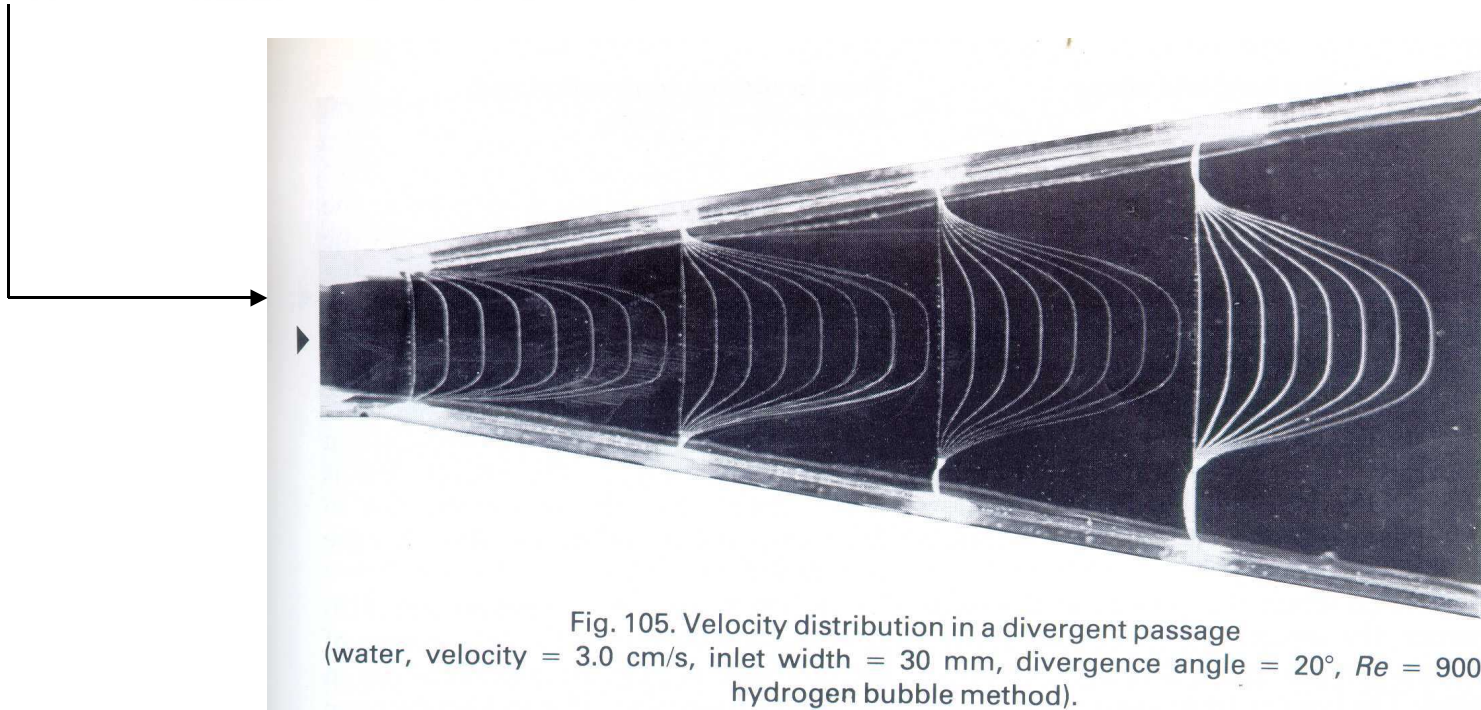
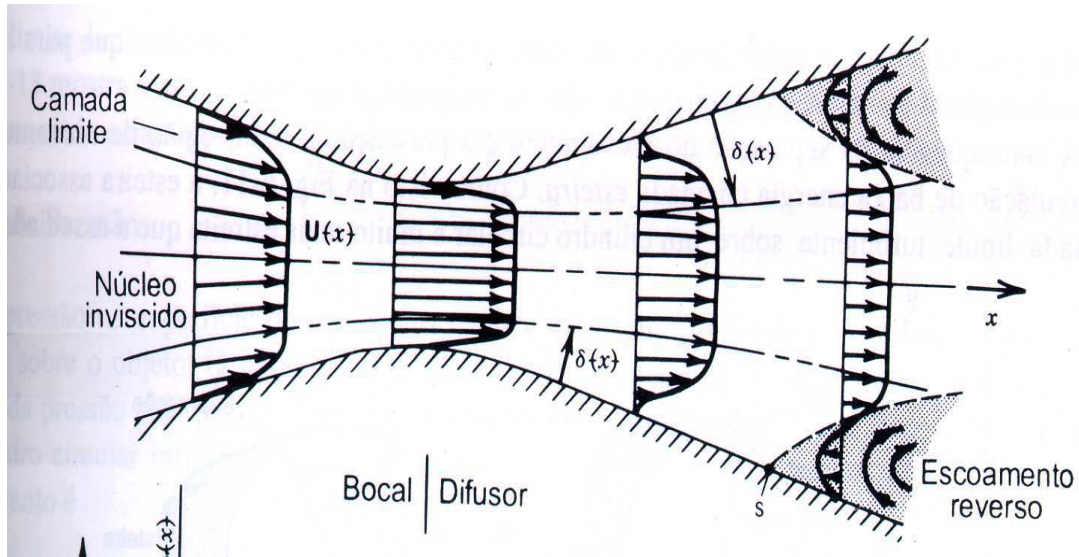
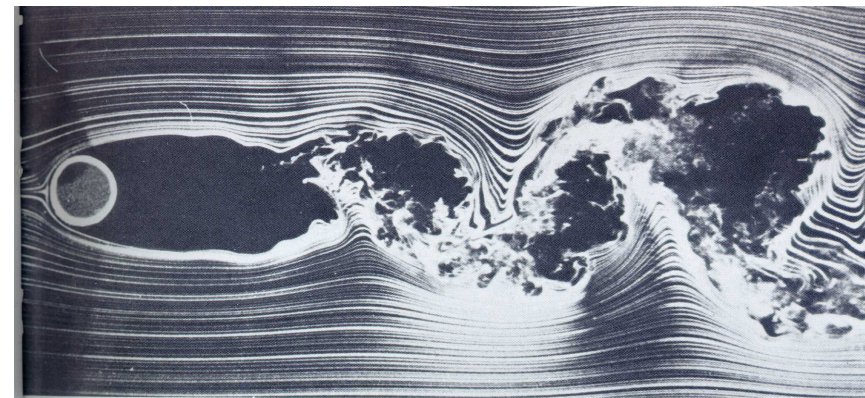
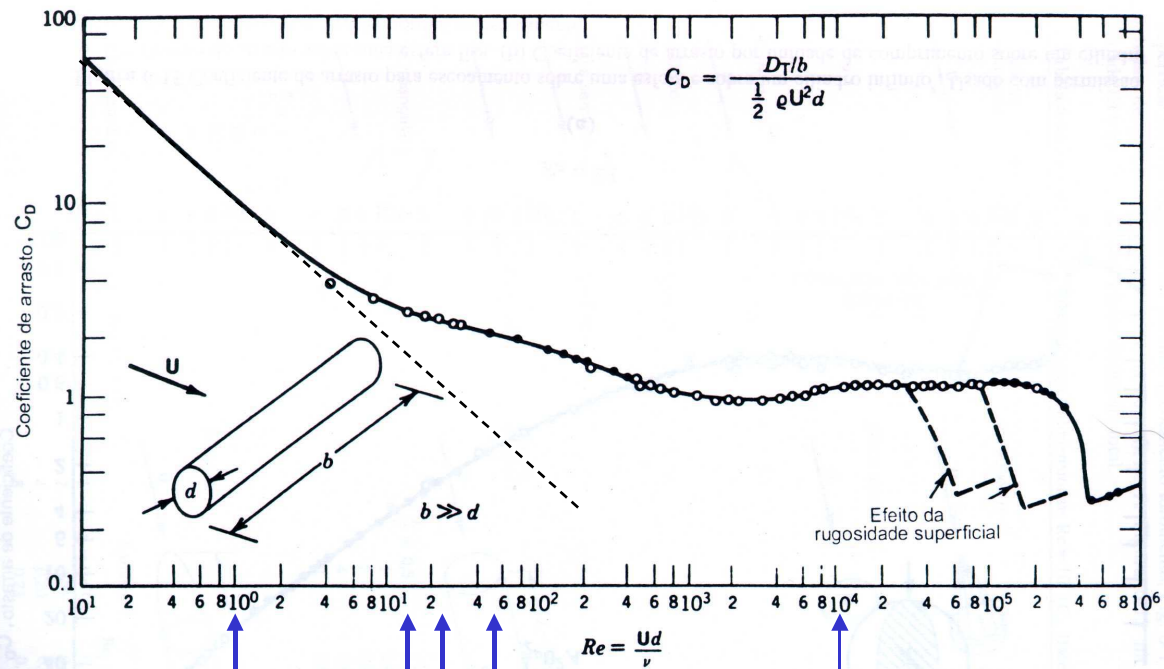


Fig. 105. Velocity distribution in a divergent passage (water, velocity = 3.0 cm/s, inlet width = 30 mm, divergence angle = 20°,  $Re = 900$ , hydrogen bubble method).



48. Circular cylinder at  $Re=10,000$ . At five times the speed of the photograph at the top of the page, the flow pattern is scarcely changed. The drag coefficient consequently remains almost constant in the range of Reynolds

number spanned by these two photographs. It drops later when, as in figure 57, the boundary layer becomes turbulent at separation. Photograph by Thomas Corke and Hassan Nagib

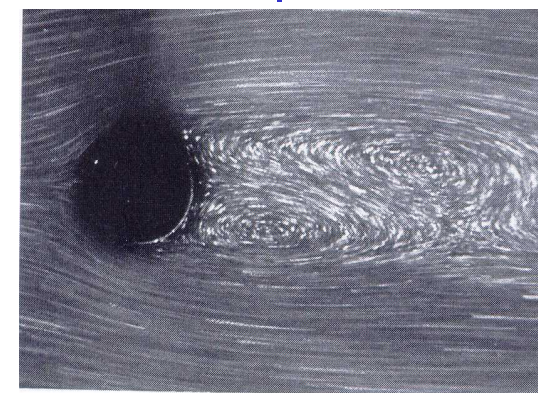
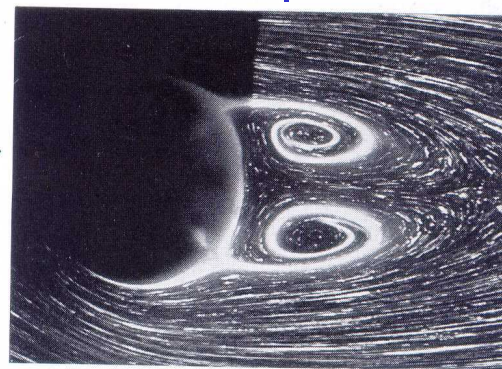
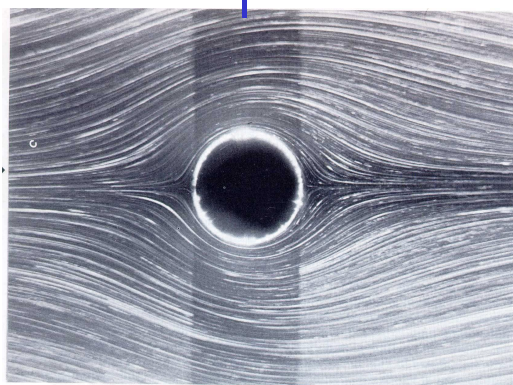


Fig. 3. Flow around a circular cylinder at  $Re = 19$  (water, flow velocity 0.20 cm/s, cylinder diameter 1.0 cm, aluminium powder method and electrolytic precipitation method).

Fig. 4. Flow around a circular cylinder at  $Re = 26$  (water, flow velocity 0.25 cm/s, cylinder diameter 1.0 cm, aluminium powder method).

Fig. 5. Flow around a circular cylinder at  $Re = 55$  (water, flow velocity 0.55 cm/s, cylinder diameter 1.0 cm, aluminium powder method).

# Gradiente de Pressão e Separação

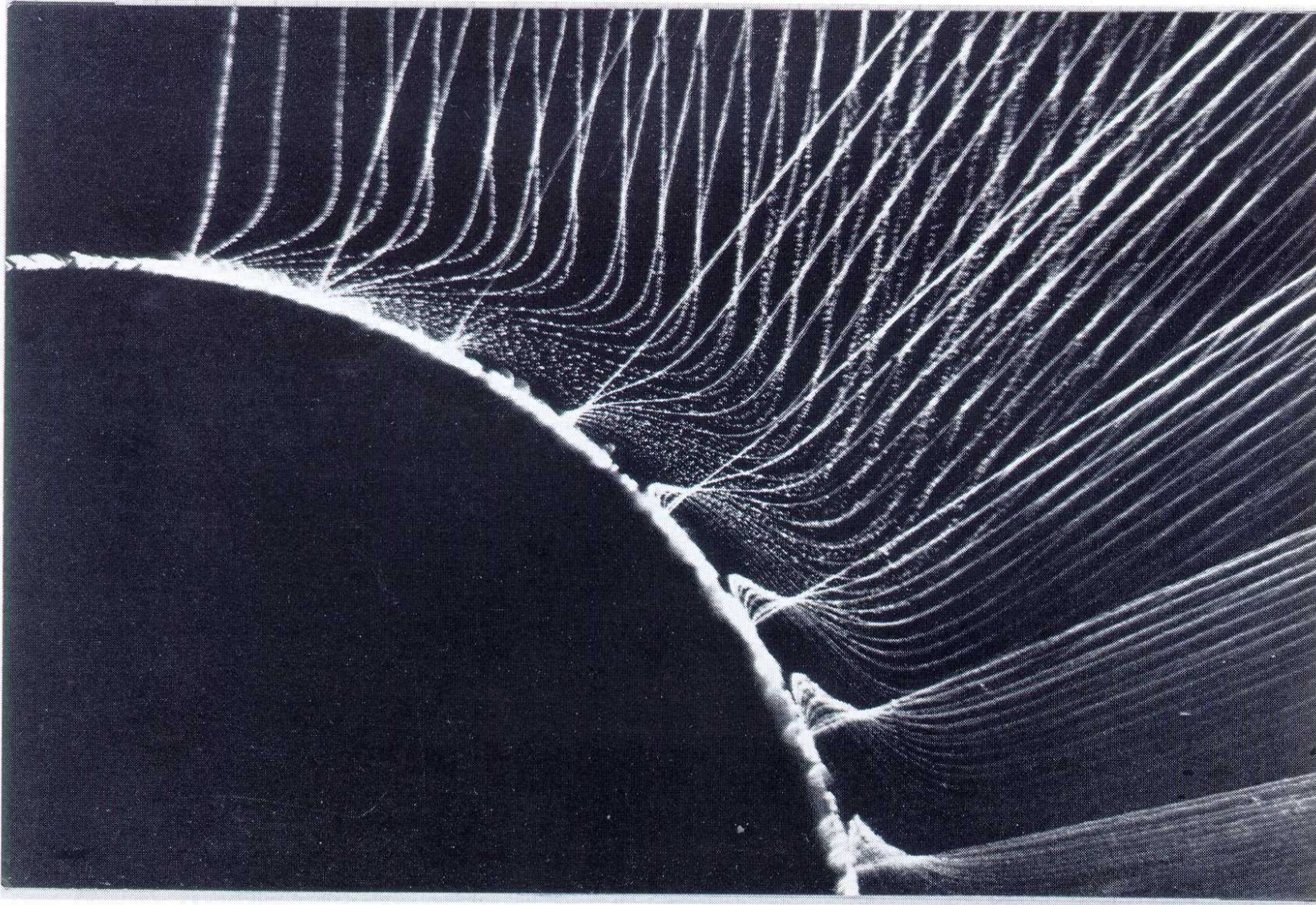


Fig. 22. Water, velocity of motion 2 cm/s, cylinder diameter 70 mm, photographed two seconds after the start of motion,  $Re = 1.2 \times 10^3$ , hydrogen bubble method.

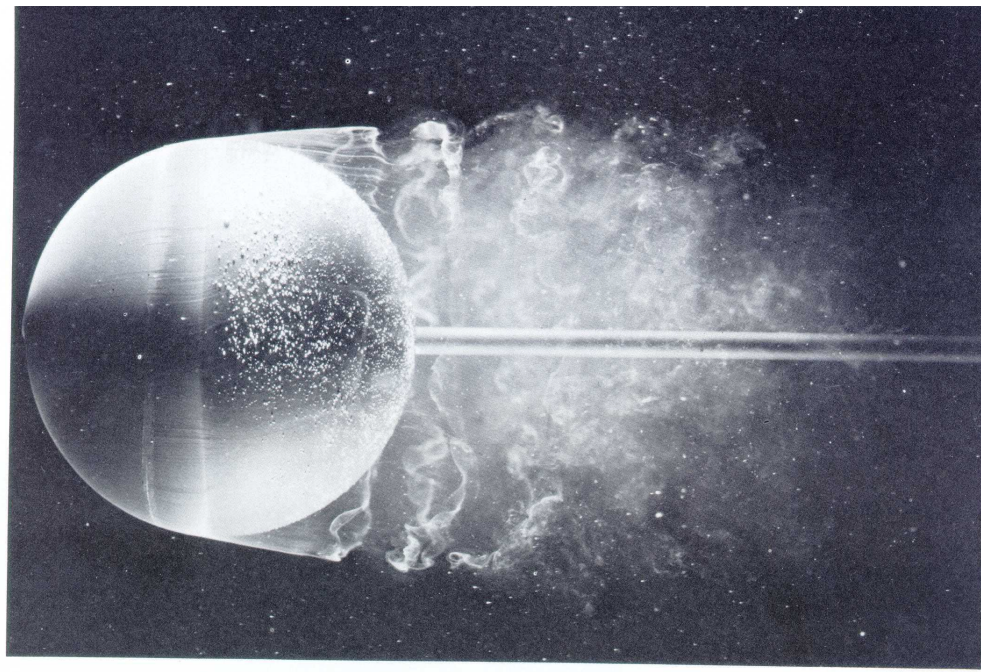
**A Distribuição de Pressão no Corpo  
Causa uma Força Resultante Contrária  
ao Escoamento?**

**A Separação (Descolamento) do  
Escoamento Altera a Distribuição de  
Pressão no Corpo?**

**Ela Tem Influência na Força de Arrasto  
do Corpo?**

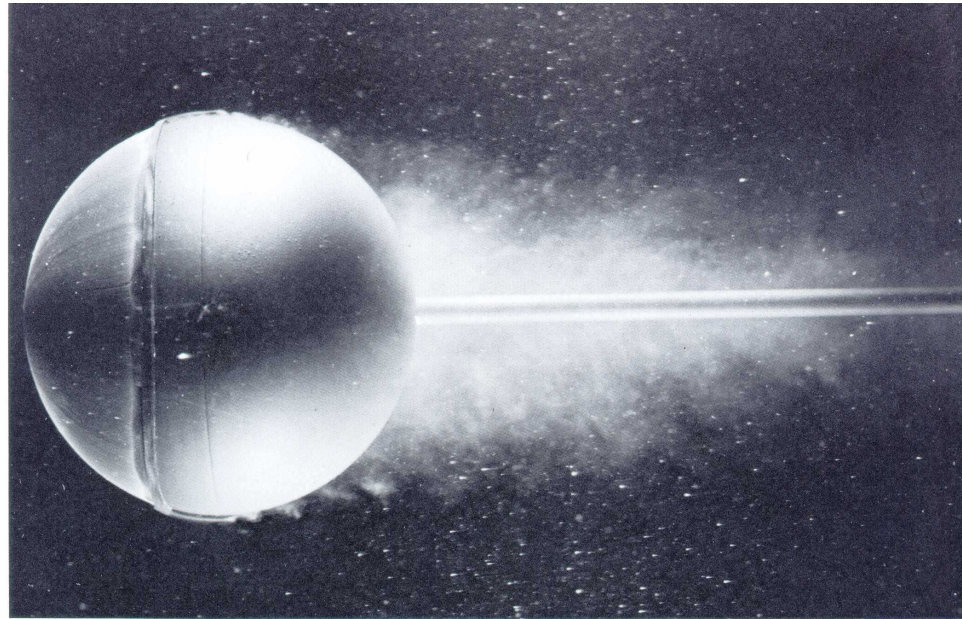


# Arrasto de Forma (Distribuição de Pressão)



55. Instantaneous flow past a sphere at  $R=15,000$ . Dye in water shows a laminar boundary layer separating ahead of the equator and remaining laminar for almost one

radius. It then becomes unstable and quickly turns turbulent. ONERA photograph, Werlé 1980



57. Instantaneous flow past a sphere at  $R=30,000$  with a trip wire. A classical experiment of Prandtl and Wieselsberger is repeated here, using air bubbles in water. A wire hoop ahead of the equator trips the boundary layer. It becomes turbulent, so that it separates farther

rearward than if it were laminar (opposite page). The drag is thereby dramatically reduced, in a way that occurs naturally on a smooth sphere only at a Reynolds number ten times as great. ONERA photograph, Werlé 1980

# Distribuição de Pressão Não Simétrica Em Cilindros

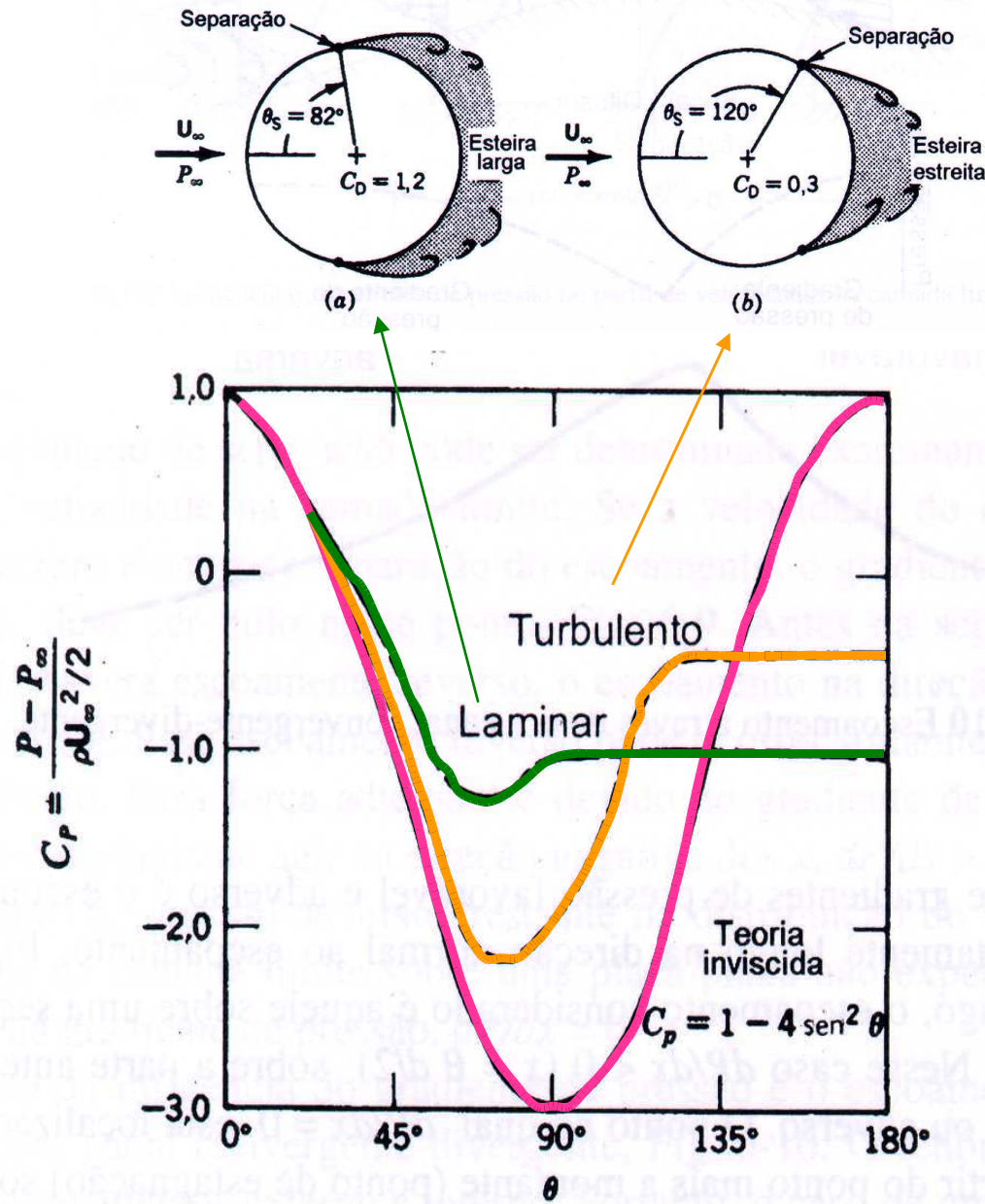


Figura 6-11 Pressão de escoamento e de superfície sobre um cilindro circular infinito normal ao escoamento. (a) Escoamento laminar, (b) Escoamento turbulento.

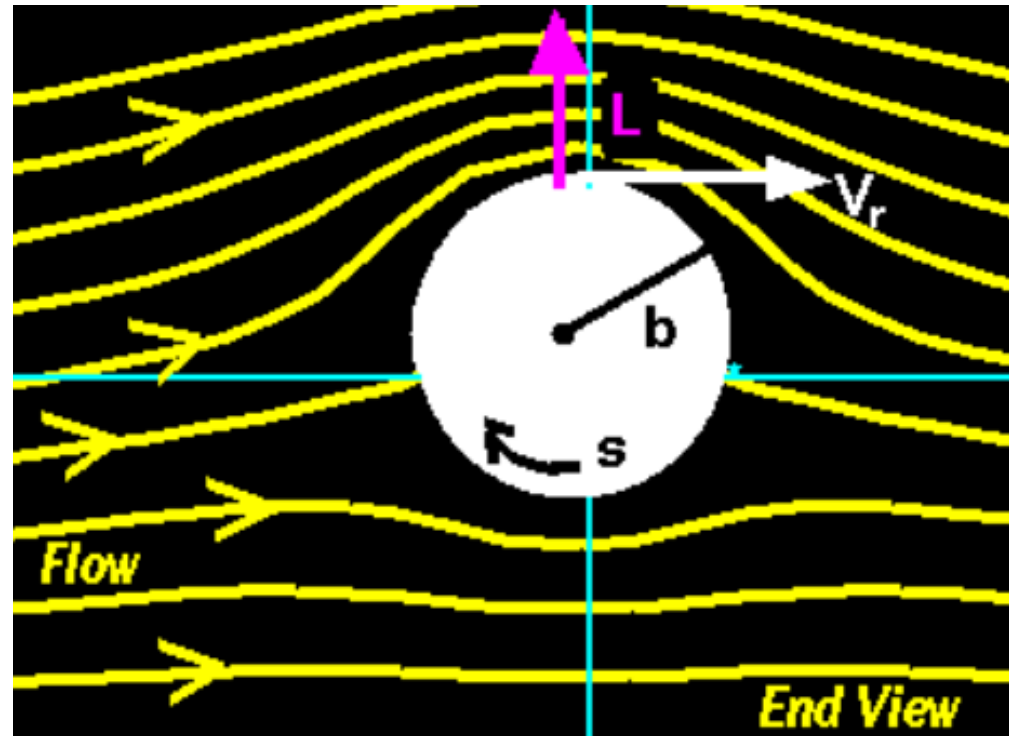
# Questão

- Por que a bola de golf tem “sulcos”? Por que a bola de beisebol tem costura aparente?

# Curiosidade

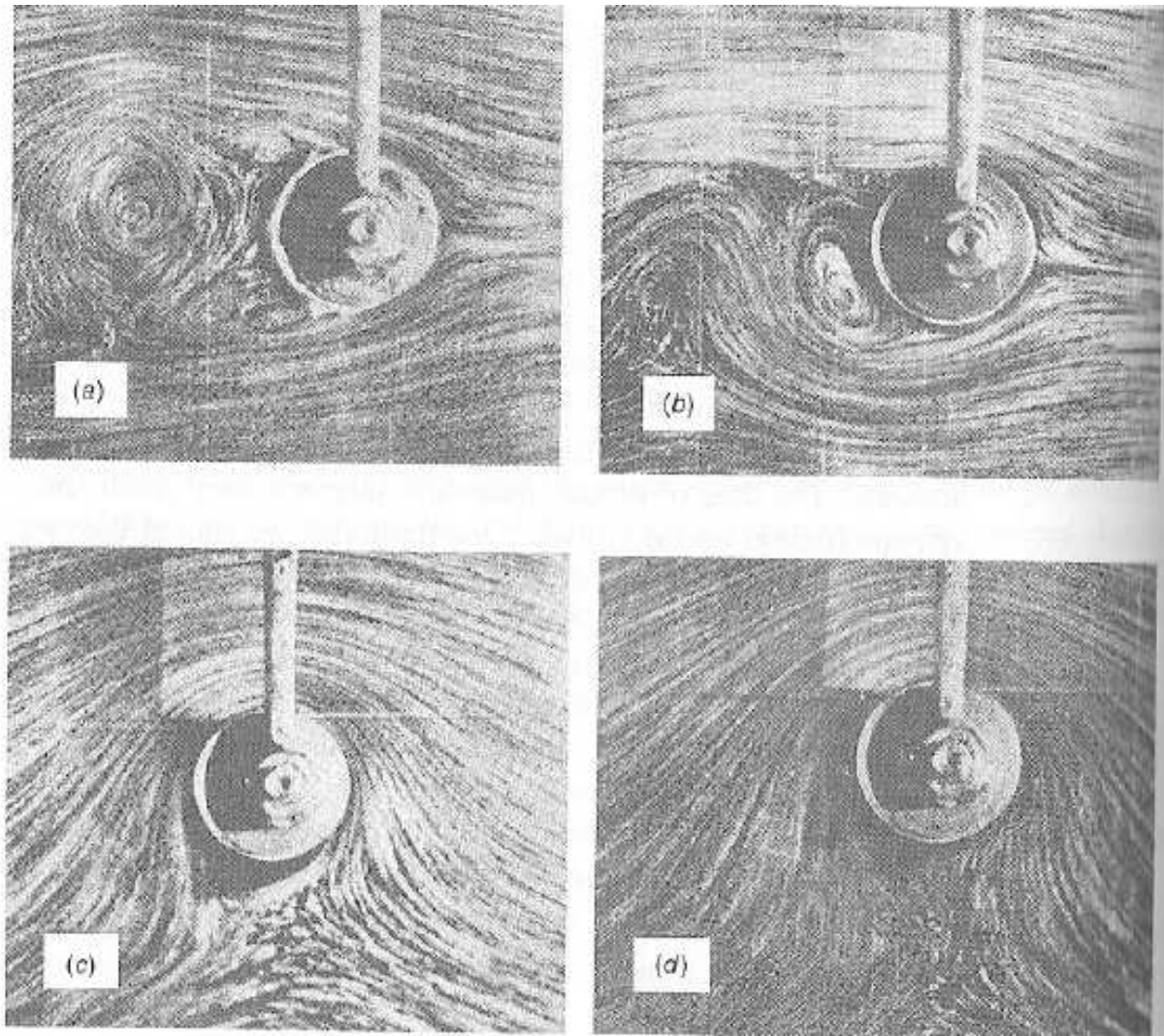
- Por que uma bola de futebol tem uma trajetória curva em um chute de “três dedos”?

# Curiosidade



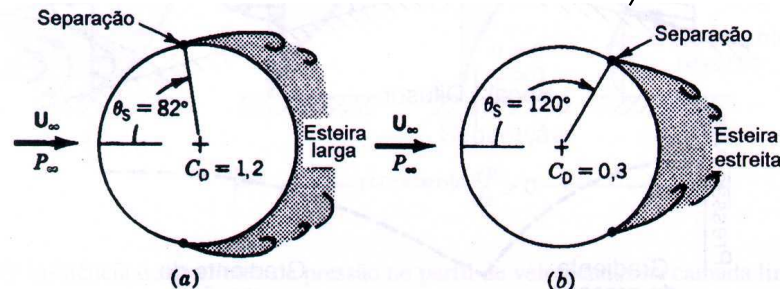
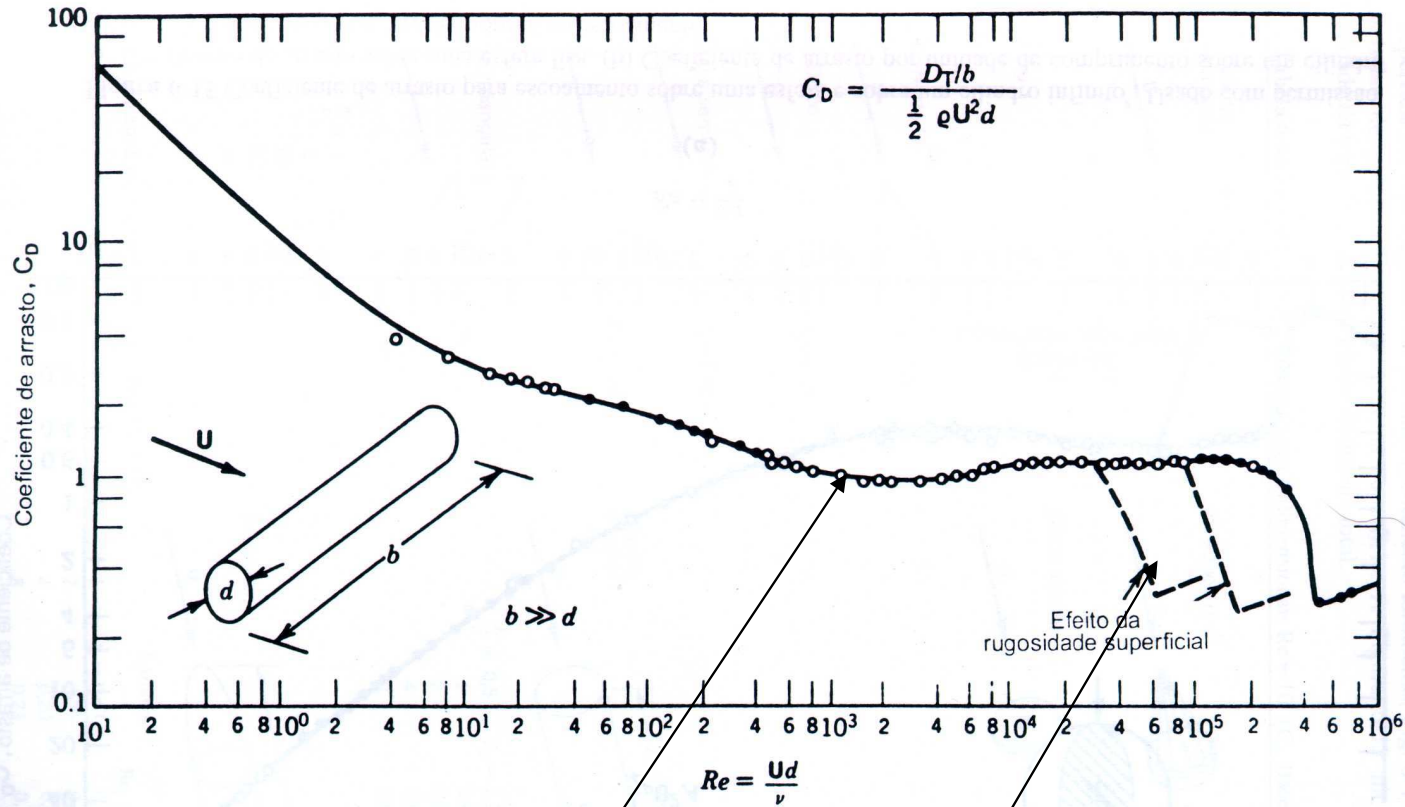
<http://www.mathpages.com/HOME/kmath258/kmath258.htm>

# Curiosidade



**Figure 18.15** Streamlines for flow over a rotating cylinder: (a)  $\Omega = 0$ ; (b)  $r_0\Omega = U$ ; (c)  $r_0\Omega = 4U$ ; (d)  $r_0\Omega = 6U$ . Reprinted with permission from Prandtl and Tietjens (1934).

# Arrasto de Forma (Distribuição de Pressão)



**Camada Limite**

**(a) Laminar & (b) Turbulento**

# **Arrasto de Forma (Distribuição de Pressão)**

**O arrasto de forma é atribuído a distribuição de pressão não simétrica ao redor do corpo. Ela causa uma força resultante na direção oposta ao escoamento.**

$$\bar{D}_P = \int_A P \cdot dA$$



# Arrasto Total

**O arrasto de forma e o viscoso constituem os dois mecanismos que causam a força de arrasto num corpo.**

$$\bar{D}_T = \bar{D}_P + \bar{D}_f$$

**Arrasto  
Total**

**Arrasto  
Forma**

**Arrasto  
Viscoso**

$$C_D = \frac{\bar{D}_T}{(1/2)\rho U_{ext}^2 \cdot A}$$

# Arrasto Total

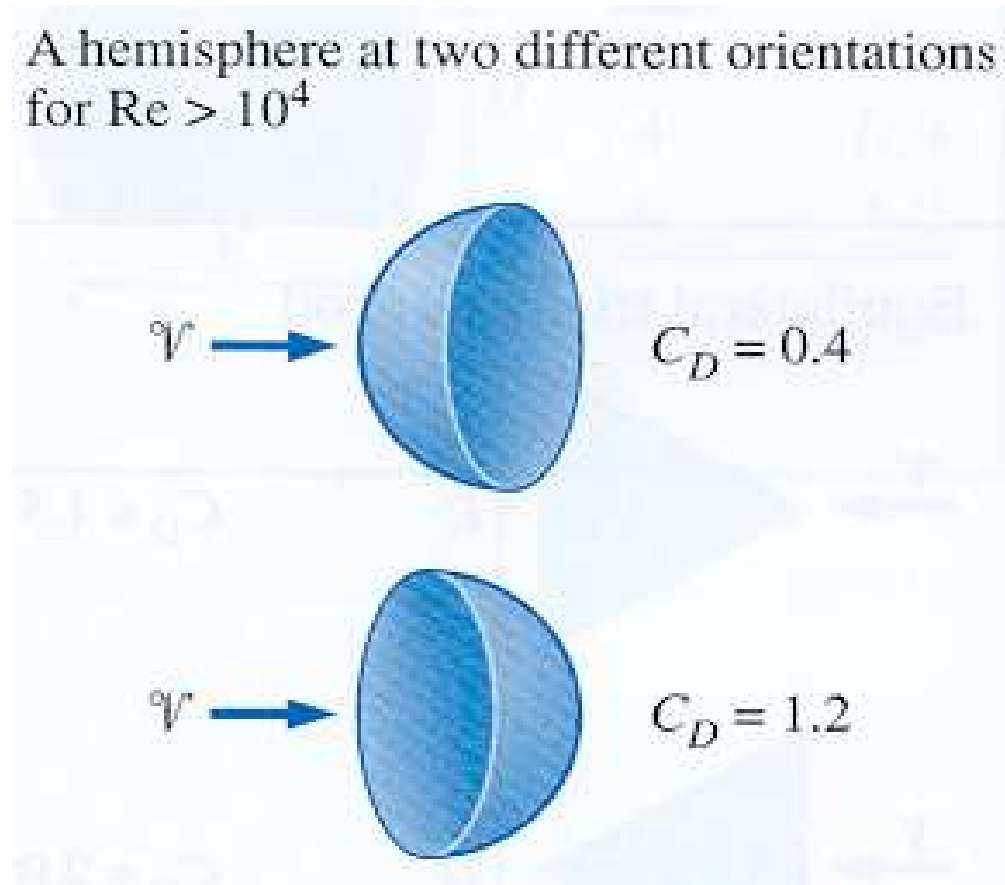
$$F_{D, \text{friction}} = C_{D, \text{friction}} \frac{1}{2} \rho V^2 A$$

$$F_{D, \text{pressure}} = C_{D, \text{pressure}} \frac{1}{2} \rho V^2 A$$

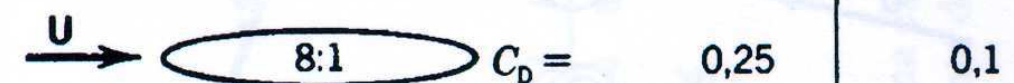
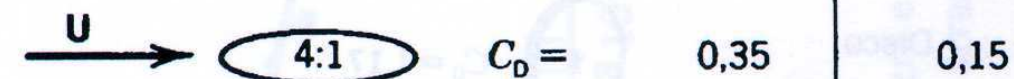
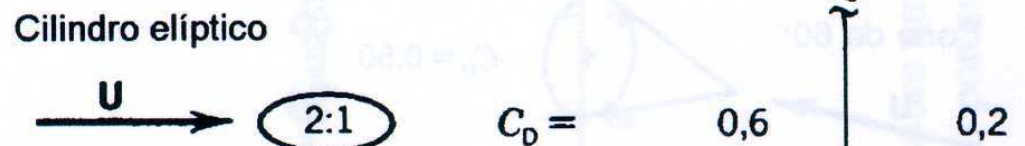
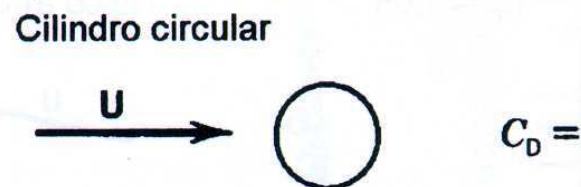
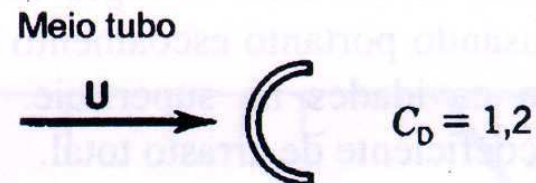
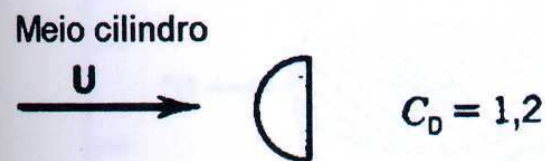
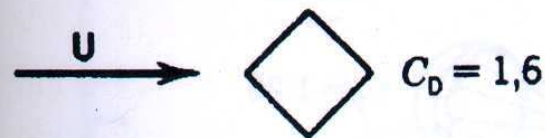
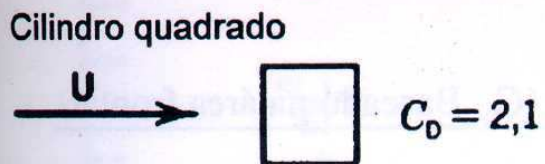
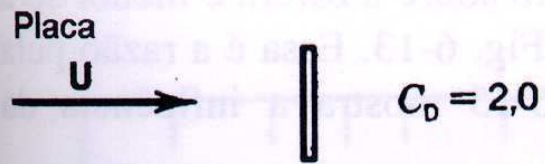
$$F_{D, \text{total}} = F_{D, \text{pressure}} + F_{D, \text{friction}}$$

# Arrasto total

- Depende muito da geometria



**Tabela 6-3** Coeficientes de arrasto de objetos bidimensionais para  $Re \approx 10^5$



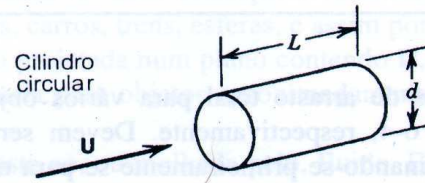
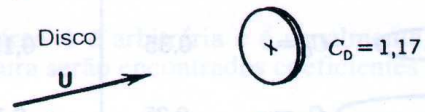
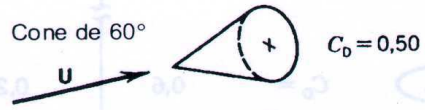
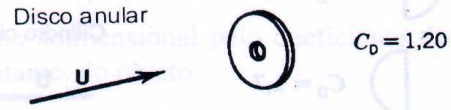
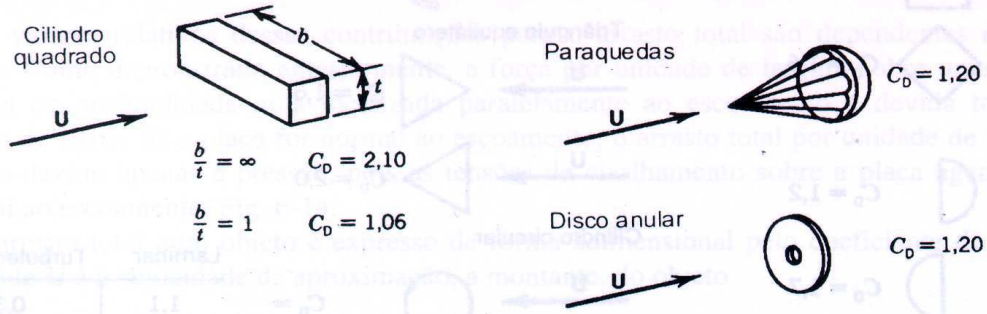
	Laminar	Turbulento
$C_D =$	1,1	0,3
$C_D =$	0,6	0,2
$C_D =$	0,35	0,15
$C_D =$	0,25	0,1

$$C_D = \frac{\text{arrasto/ comprimento unitário}}{\frac{1}{2} \rho U^2 t}$$

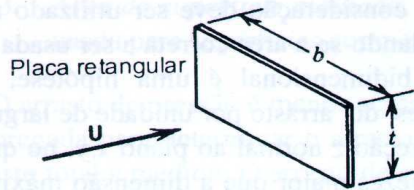
$$Re = \frac{Ut}{\nu}$$

$t =$  Altura projetada normal a  $U$

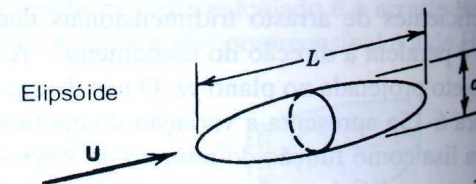
**Tabela 6-4** Coeficiente de arrasto de objetos tridimensionais  $Re \approx 10^5$  ( $C_D$  Baseado na área frontal)



$\frac{L}{d} = 0,5$	$C_D = 1,15$
1	0,90
2	0,85
4	0,87
8	0,99



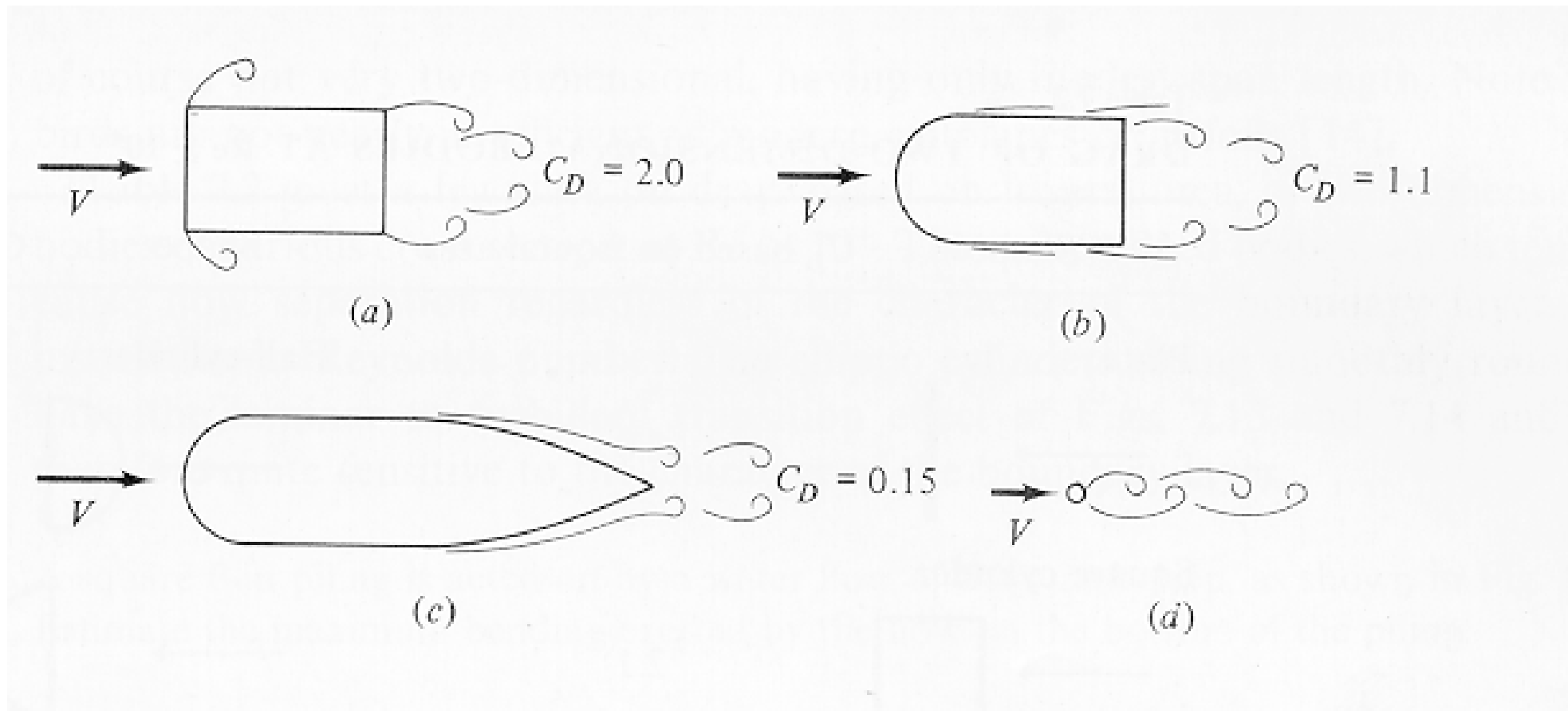
$\frac{b}{t} = 1$	$C_D = 1,18$
5	1,20
10	1,30
20	1,50
$\infty$	2,00

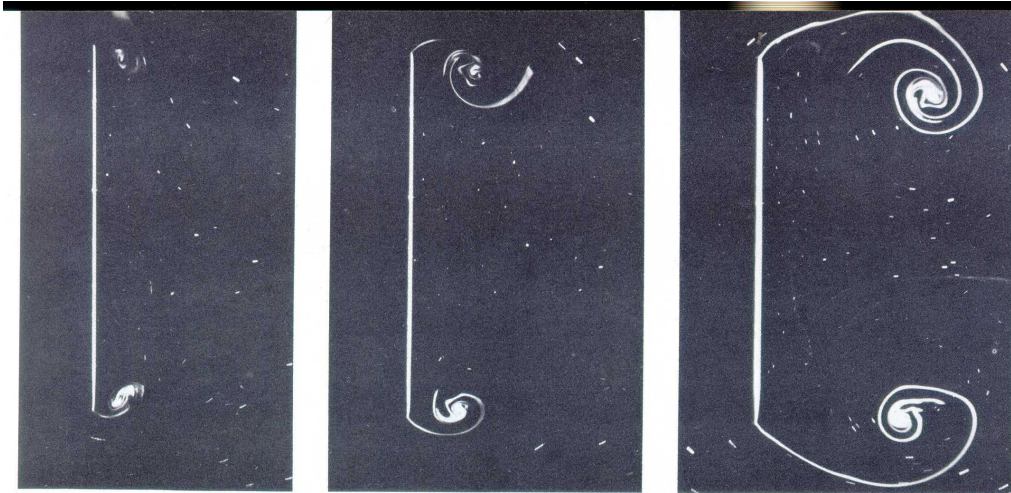


Re baseado em L ou t a altura projetada normal a U

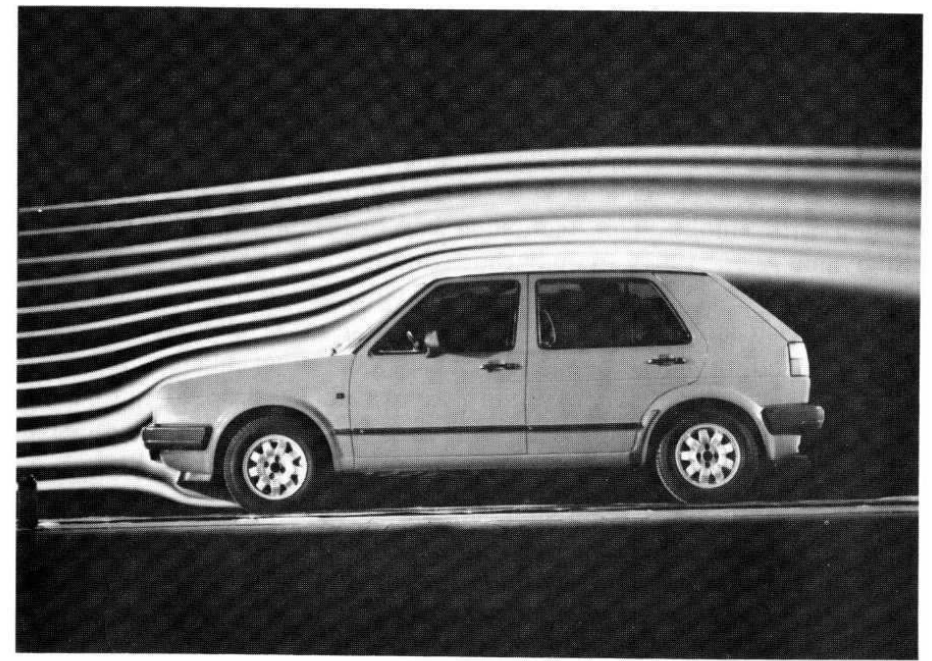
$\frac{L}{d}$	Laminar $C_D$	Turbulento <sup>3</sup>	
		$Re_t \approx 10^6$	$Re_t \approx 10^7$
1	0,47	0,100	0,090
2	0,25	0,055	0,040
4	0,20	0,065	0,041
8	0,23	0,100	0,078

**A importância da forma aerodinâmica na redução do arrasto,  $C_D$  baseado na área frontal do corpo. (a) cilindro retangular; (b) c/ nariz arredondado; (c) c/ nariz e cauda arredondados e; (d) cilindro circular com o mesmo arrasto do caso (c) !**

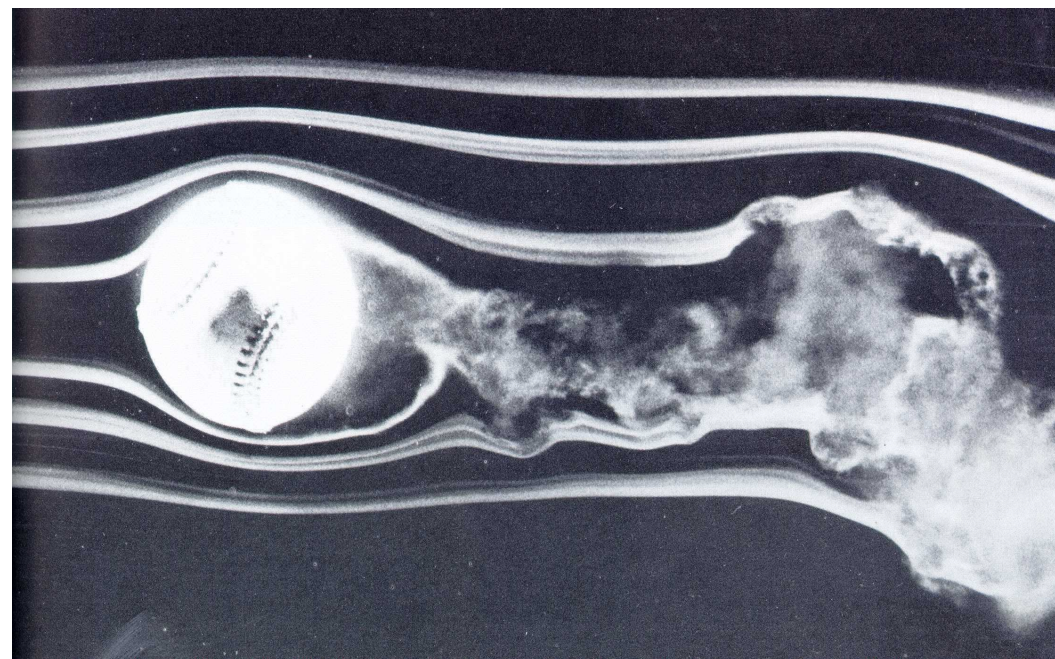




63. Impulsive motion of a flat plate normal to itself. The Reynolds number is 88 based on breadth. White dye generated on the plate by electrolysis of water shows a spiral vortex sheet shed from each edge. The plate has moved 0.079, 0.26, and 0.93 breadths. *Taneda & Honji 1971*



**Fig. 2.13** Smoke lines around a road vehicle in a full-scale wind tunnel. (Courtesy of Volkswagenwerk AG.)



# Questão

- O coeficiente de arrasto de um carro aumenta quando as janelas ou o teto solar estão abertos. Um carro esporte tem área frontal de  $2.04 \text{ m}^2$  e um coeficiente de arrasto de  $0.32$  quando o teto solar e as janelas estão fechados. O coeficiente de arrasto aumenta para  $0.41$  quando o teto solar está aberto. Determine a potência adicional devido a abertura do teto solar consumida pelo carro quando ele se move a (a)  $50 \text{ km/h}$  e (b)  $120 \text{ km/h}$ . Considere a densidade do ar  $1.16 \text{ kg/m}^3$ .