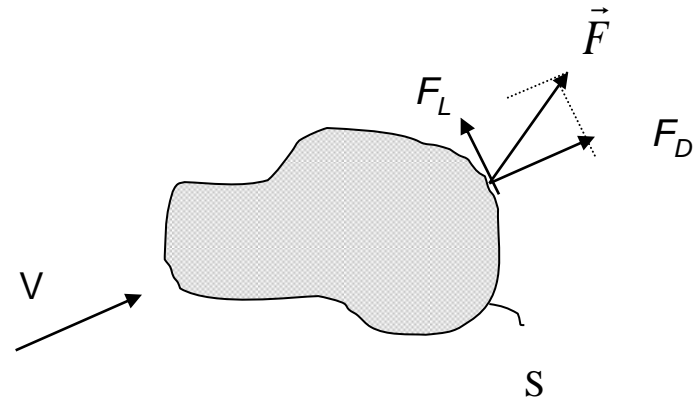


ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS SUBMERSOS



Sempre que há movimento relativo entre um corpo sólido e fluido, o sólido sofre a ação de uma força \vec{F} devido a ação do fluido.

$$\vec{F} = \int_S d\vec{F} = \int_S d\vec{F}_\mu + \int_S d\vec{F}_P = \int_S \tau_s \vec{t} dA - \int_S p \vec{n} dA$$

\vec{F} é a força total que possui contribuição viscosa e de pressão.

\vec{F}_μ é a força viscosa \vec{F}_P a força de pressão.

A força resultante \vec{F} que atua em um corpo devido ao escoamento de um fluido ao redor do corpo pode ser decomposta em uma força de arraste F_D e uma força de sustentação F_L

Força de Arraste (Drag) = F_D = componente da força resultante na direção do escoamento

Força de Sustentação (Lift) = F_L = componente da força resultante na direção perpendicular ao escoamento

É conveniente adimensionar essas forças, para generalizar as análises e os resultados. Define-se então:

Coeficiente de Arraste = C_D

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref}}$$

$$C_D = C_D (\text{ geometria, Re})$$

Coeficiente de Sustentação = C_L

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref}}$$

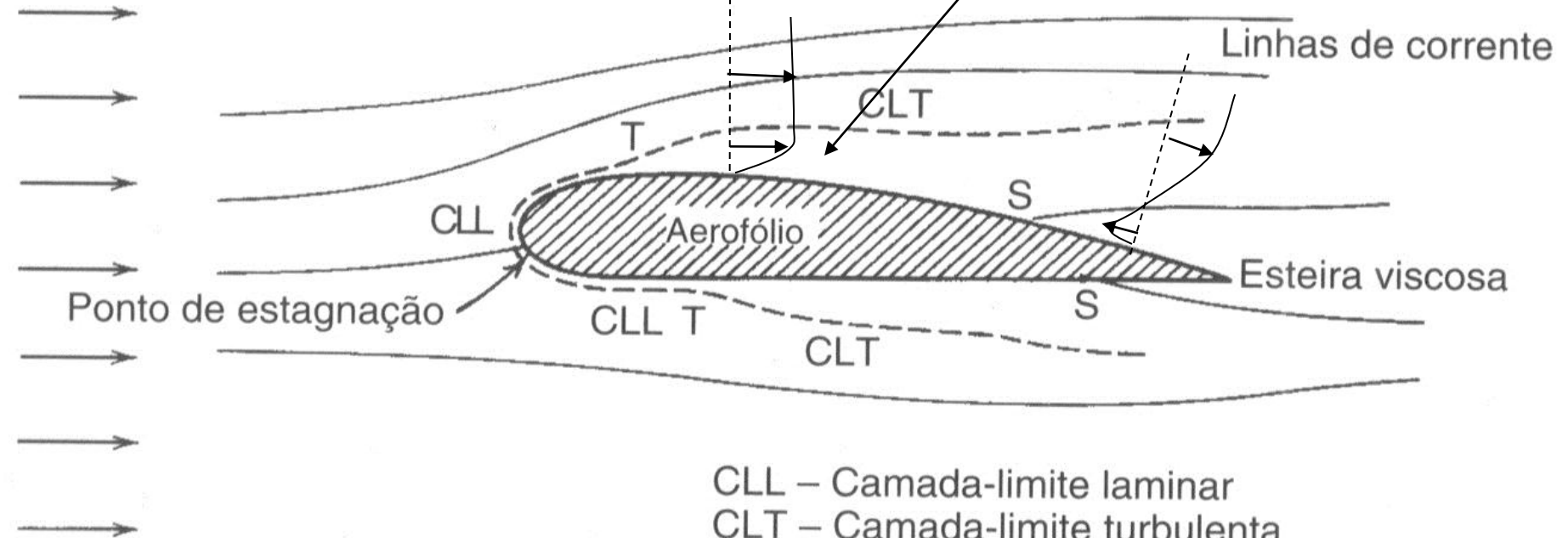
A_{ref} em geral é a área projetada na direção perpendicular ao escoamento

CAMADA LIMITE

Região afetada pela presença do corpo
↓

CAMADA LIMITE

U_∞ – Campo de velocidade uniforme a montante



CLL – Camada-limite laminar
CLT – Camada-limite turbulenta
T – Transição
S – Ponto de separação

Fora da camada limite, o escoamento não é afetado pela presença do corpo \Rightarrow forças viscosas não são importantes

Quando o escoamento na camada limite é desacelerado devido a uma diferença de pressão, pode ocorrer uma reversão do escoamento e a camada limite separa-se da superfície do corpo, formando a **esteira**

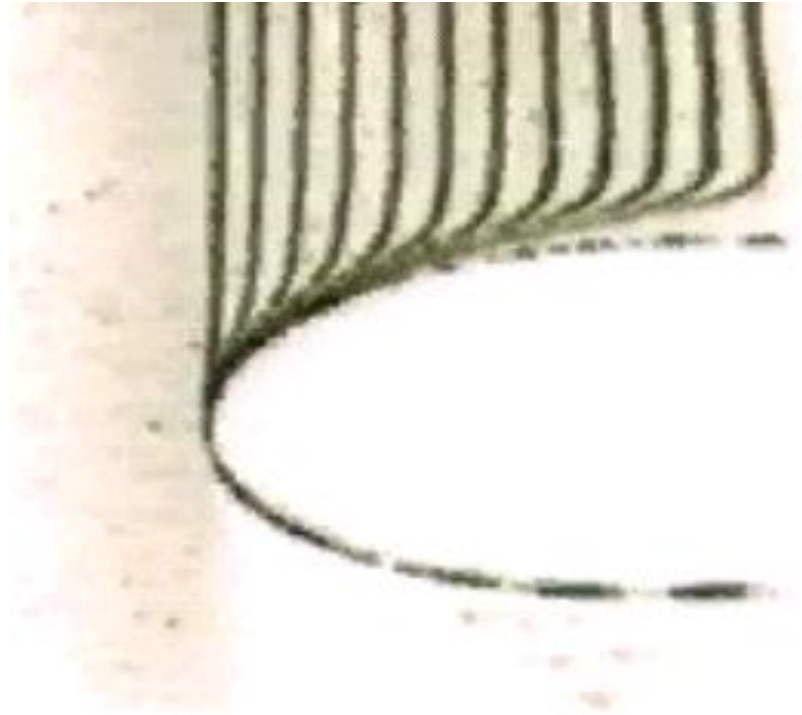
Camada limite sobre uma placa plana

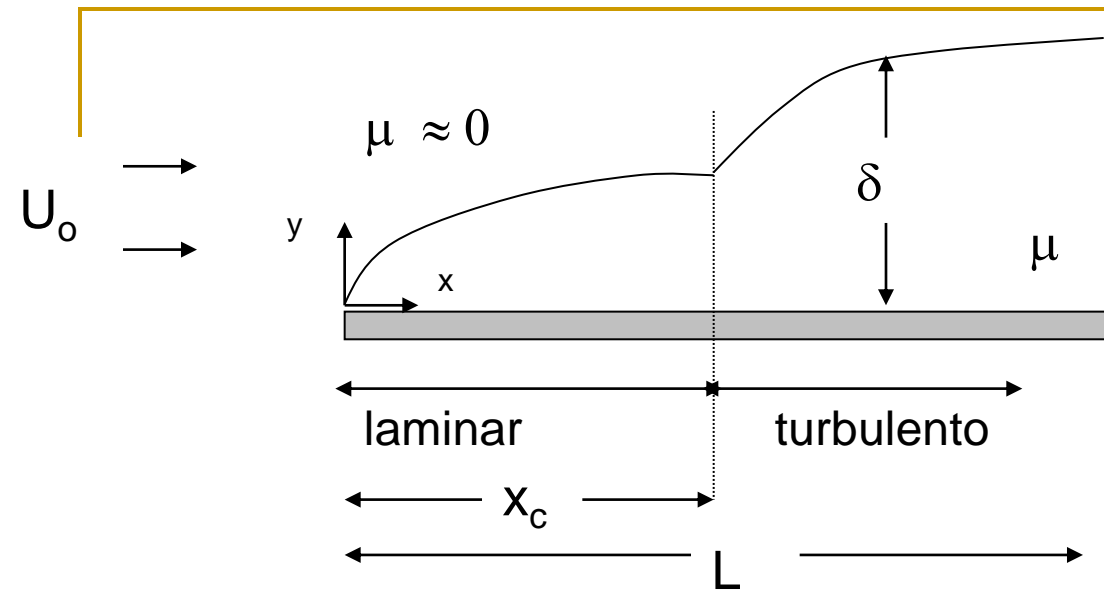
Espessura da camada limite: $\delta(x)$

A espessura da camada limite é pequena, tornando o gradiente de velocidade $\partial u/\partial y$ muito alto \Rightarrow As forças viscosas dentro da camada limite são importantes

A equação de Navier-Stokes pode ser simplificada baseada numa análise dimensional e no fato que δ é pequeno, gerando uma equação mais simples que descreve o escoamento na camada limite.

A espessura da camada limite pode ser calculada a partir da solução desta equação.





número de Reynolds local:

$$\mathbf{Re}_x = \frac{\rho U_0 x}{\mu}$$

Reynolds crítico:

$$\mathbf{Re}_c = \frac{\rho U_0 x_c}{\mu} = 5 \times 10^5$$

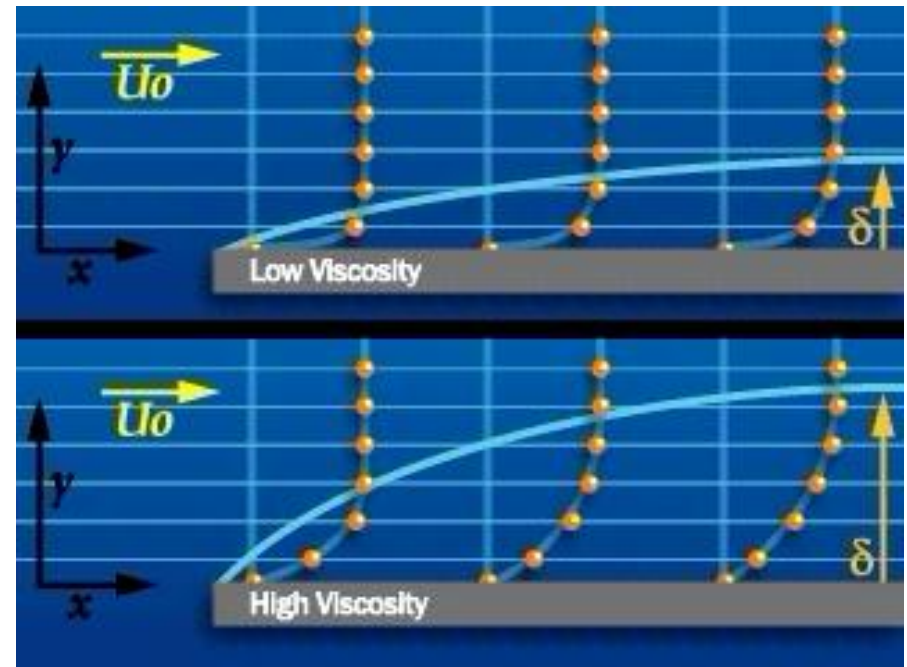
Espeçura da camada limite: $\delta(x)$

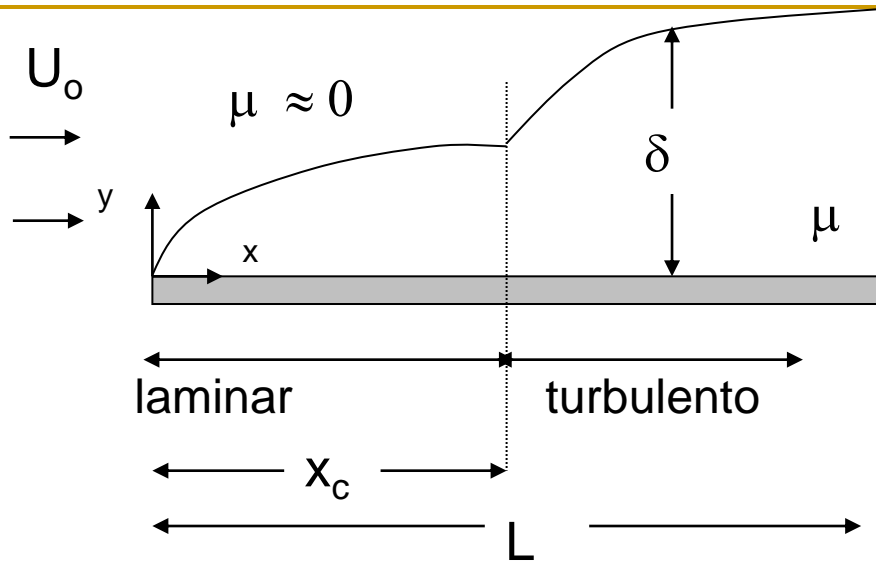
Regime laminar: $Re_x \leq Re_c$

$$\frac{\delta(x)}{x} = \frac{5}{\sqrt{Re_x}}$$

Regime turbulento: $Re_x > Re_c$

$$\frac{\delta(x)}{x} = \frac{0,381}{Re_x^{1/5}}$$





Regime laminar: $Re_x \leq Re_c$

$$\frac{\tau(x)}{0,5 \rho U_o^2} = \frac{0,664}{\sqrt{Re_x}}$$

Regime turbulento: $Re_x > Re_c$

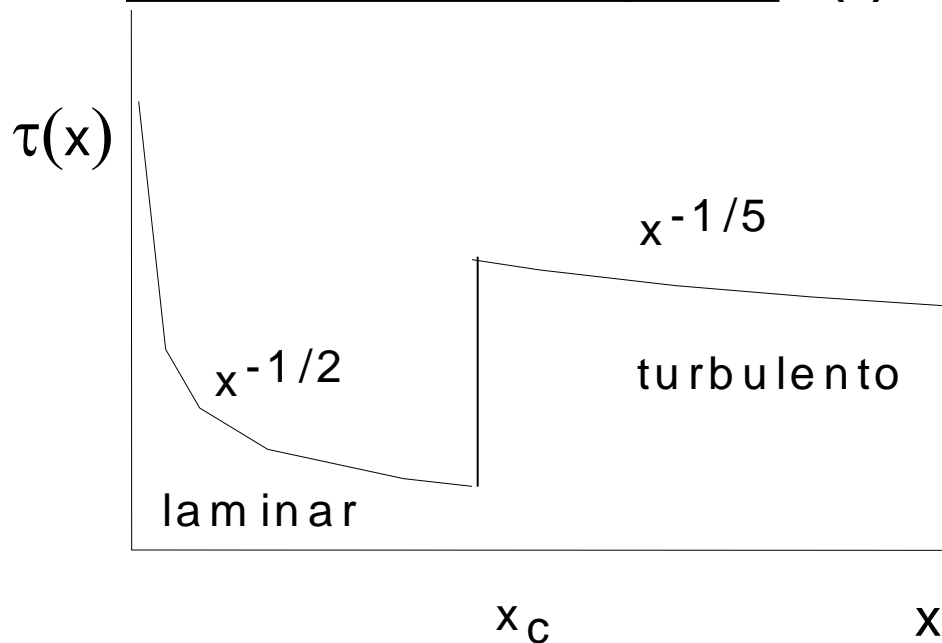
$$\frac{\tau(x)}{0,5 \rho U_o^2} = \frac{0,0592}{Re_x^{1/5}}$$

Força na parede:

$$F = \int_{A_s} \tau(x) dA_s = \int_0^L \tau(x) b dx$$

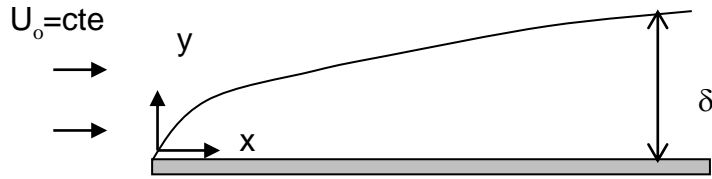
Força de arraste: resultante da força de superfície sobre o corpo na direção do escoamento

Tensão cisalhante na parede: $\tau(x)$



Exemplos

Escoamento sobre Placa Plana Horizontal



$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

área de referência é $A_s = b L$
 coeficiente de arraste ou
 coeficiente de atrito

$$\vec{F} = F_D \vec{i} \quad ; \quad F_D = \int_S \tau_s(x) dA_s = \int_0^L \tau_s(x) b dx = \bar{\tau}_s A_s$$

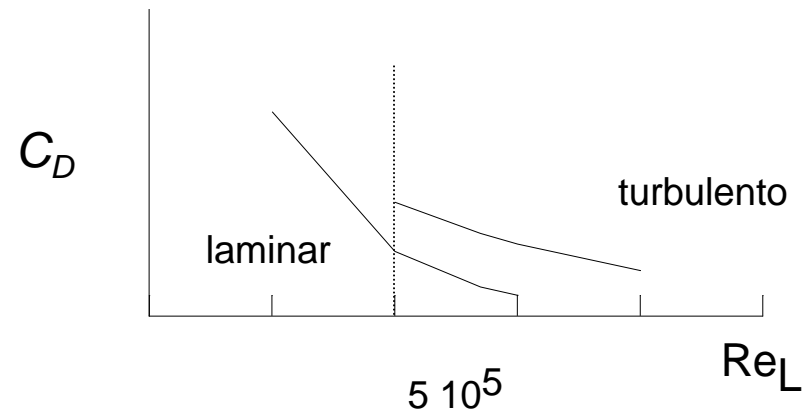
$$C_D = \overline{C_{fL}} = \frac{\bar{\tau}_s}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2}$$

para $Re_x \leq 5 \times 10^5$

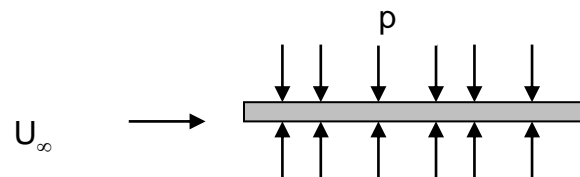
$$C_D = \frac{1,328}{\sqrt{Re_L}}$$

para $5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7$

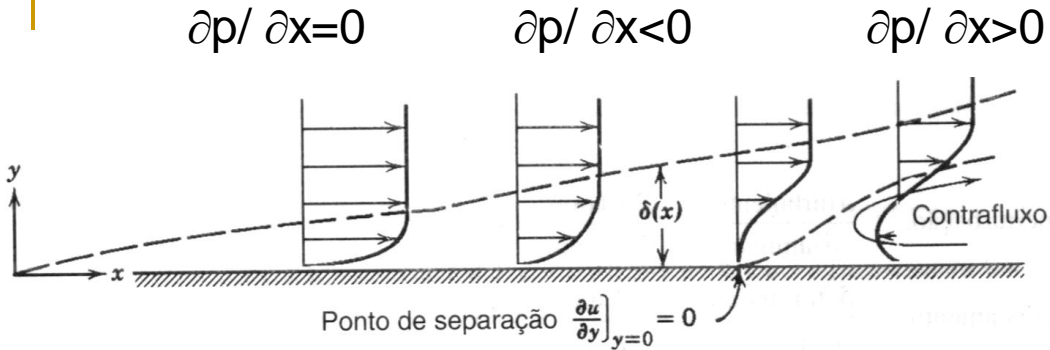
$$C_D = \frac{0,074}{Re_L^{1/5}} - \frac{1740}{Re_L}$$



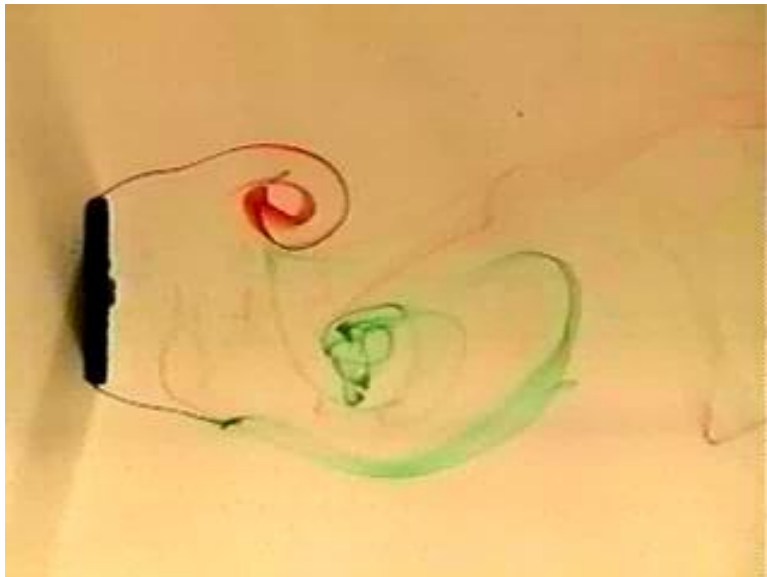
Sustentação: $F_L = 0$



Separação da Camada Limite



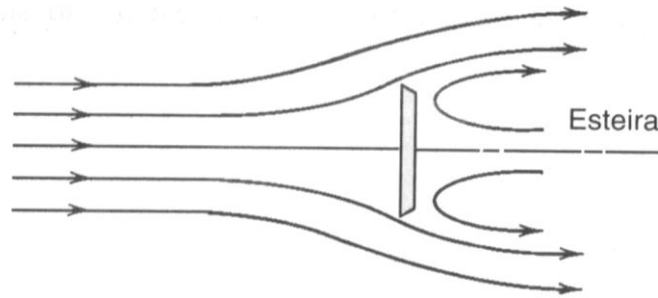
A pressão na região do escoamento separado é baixa, devido à alta energia cinética do escoamento naquela região



A separação altera a força de arraste em corpos

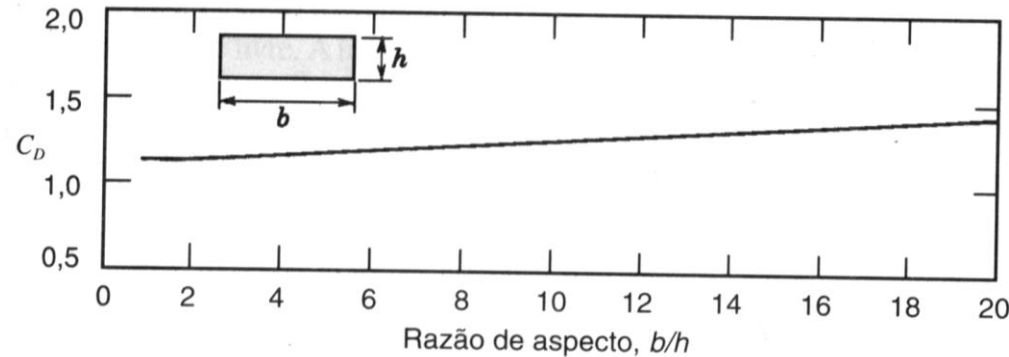
A camada limite sempre se separa em cantos vivos.

■ Escoamento perpendicular a placa plana

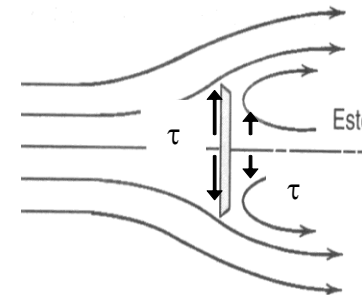


$$\vec{F} = F_D \vec{i} \quad ; \quad F_D = \int_S -p \, dA$$

para $Re \geq 10^3 \Rightarrow F_D = \text{constante}$, só depende da razão de aspecto



O arraste é devido a diferença de pressão a frente e atrás da placa.



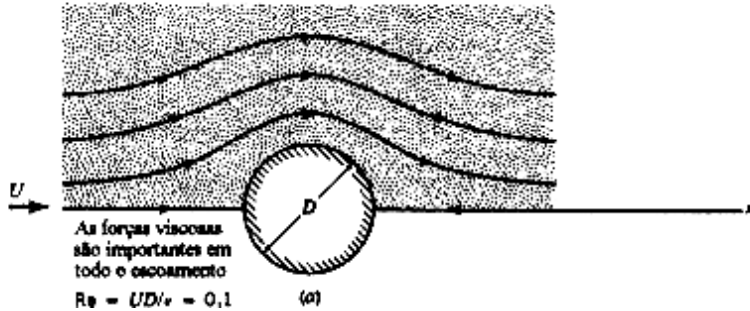
Sustentação
 $F_L=0$

C_D para corpos com cantos vivos são praticamente independentes de Re porque a separação ocorre nos cantos vivos

■ Escoamento ao redor de uma esfera ou cilindro

Nestes casos, temos arraste de pressão e viscoso.

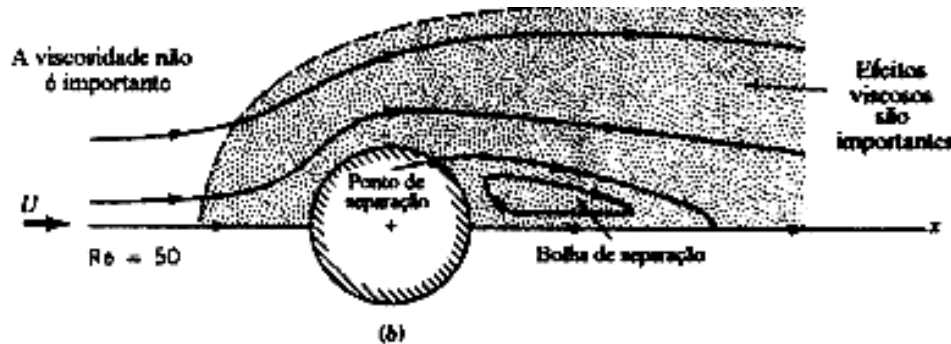
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref}}$$



Para baixos **Re**, $Re < 1$, não há separação e o arraste viscoso predomina.

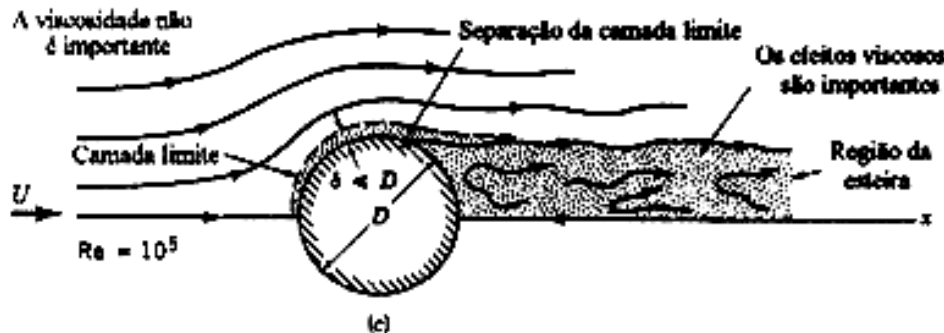
Lei de Stokes para **Esfera**

$$F_D = 3 \pi \mu D V \quad ; \quad A_p = \frac{\pi D^2}{4} \quad \boxed{C_D = \frac{24}{Re}}$$



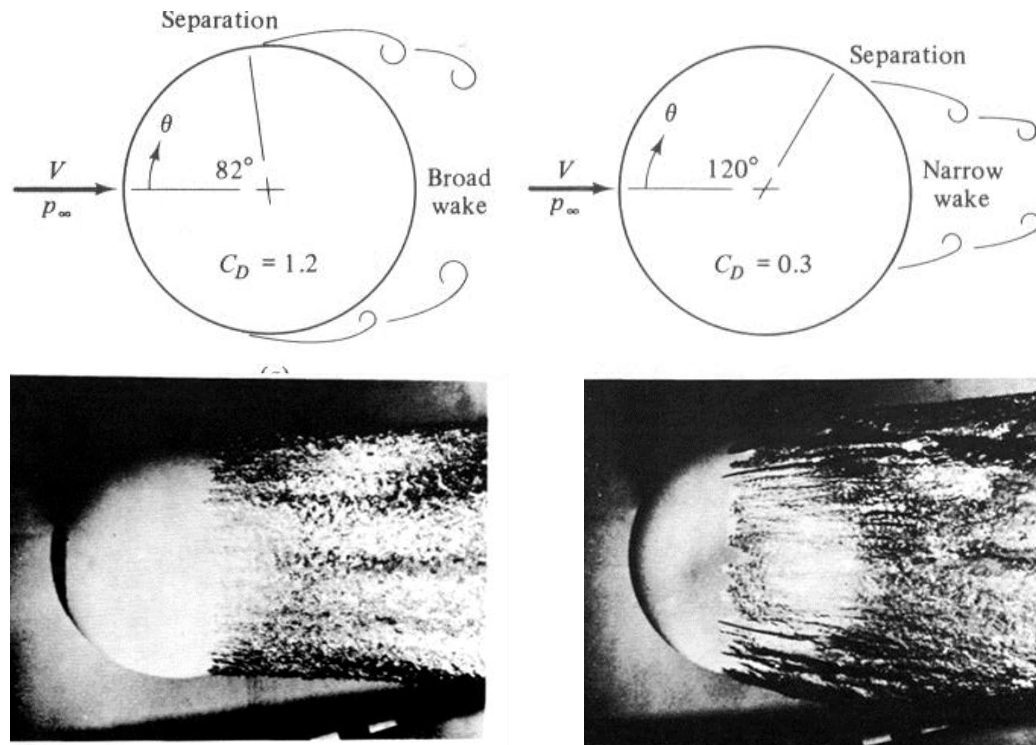
Para **Re** > 10, o arraste de pressão começa a dominar

A medida que o Reynolds cresce, o ponto de separação se move para montante, aumentando o arraste de pressão.



Para $10^3 < Re < 10^5$, o coeficiente de arraste C_D é praticamente independente do no. de Reynolds. O arraste de pressão domina.

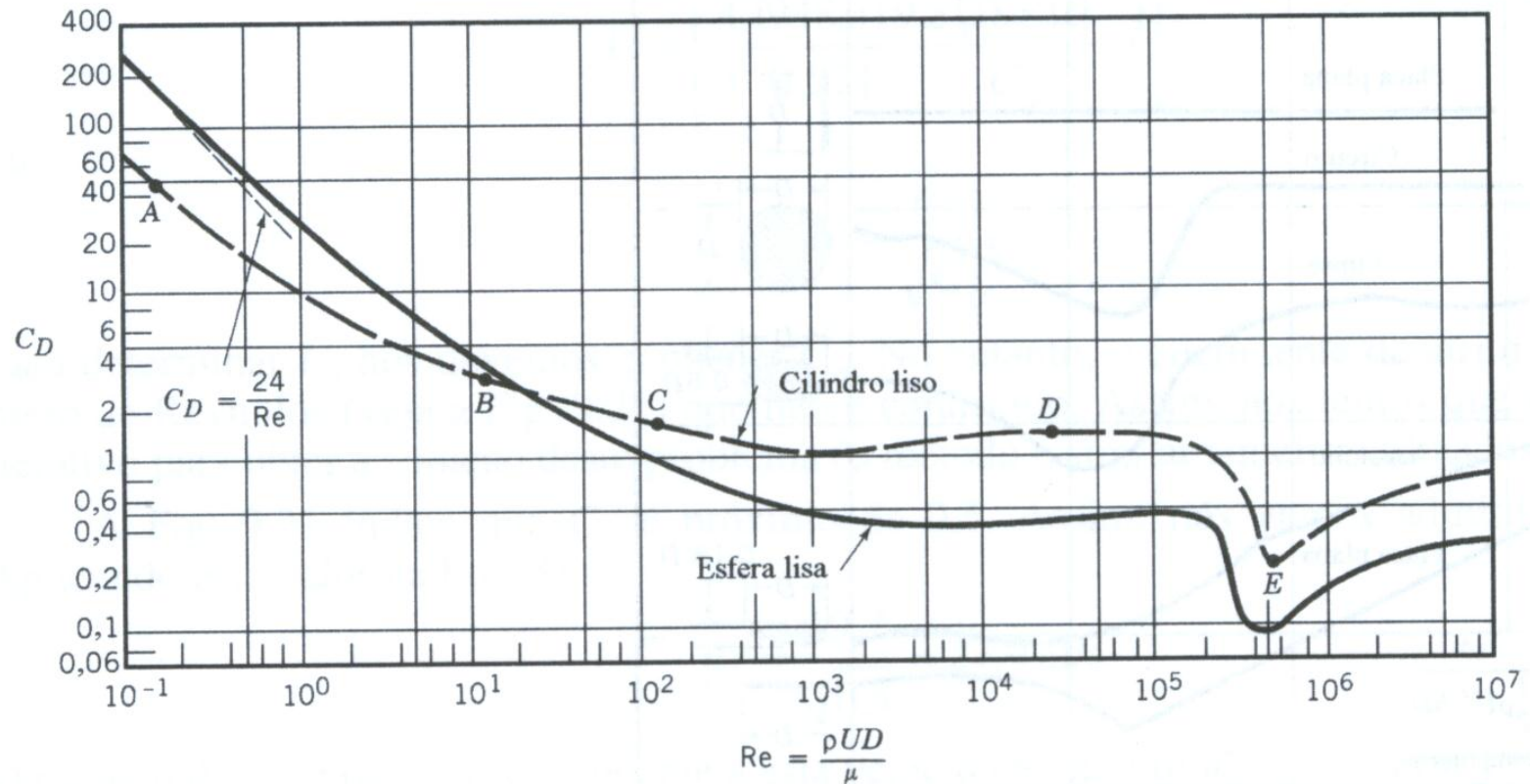
Para $Re < \approx 2 \times 10^5$ o escoamento é laminar, e a separação ocorre na parte frontal da esfera. Aumentando um pouco o número de Reynolds, o regime de escoamento passa para turbulento e o ponto de separação move-se para jusante, reduzindo de forma drástica a contribuição do arraste de pressão, levando a uma queda brusca do coeficiente de arraste C_D .



Obs: A rugosidade da superfície pode alterar o valor do número de Reynolds onde ocorre a transição do escoamento laminar para turbulento, reduzindo o coeficiente de arraste: bola de golfe

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref}}$$

O escoamento ao redor de um cilindro é análogo ao escoamento ao redor de uma esfera.

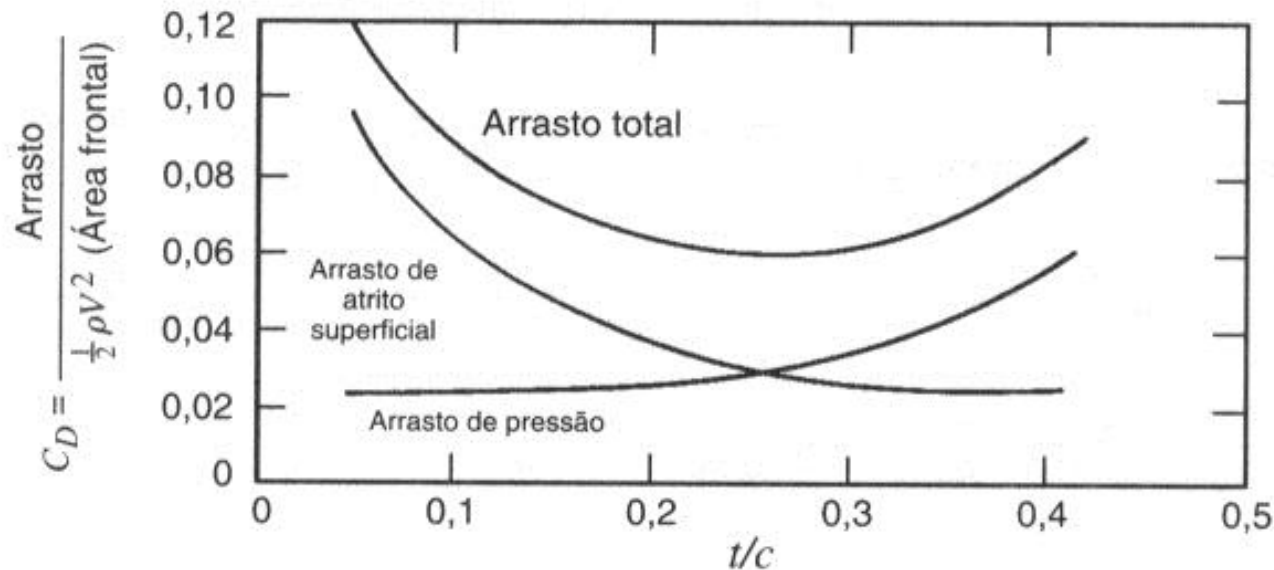
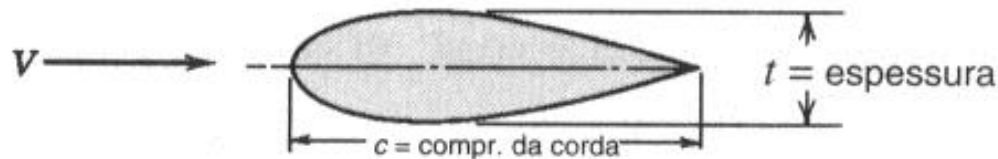


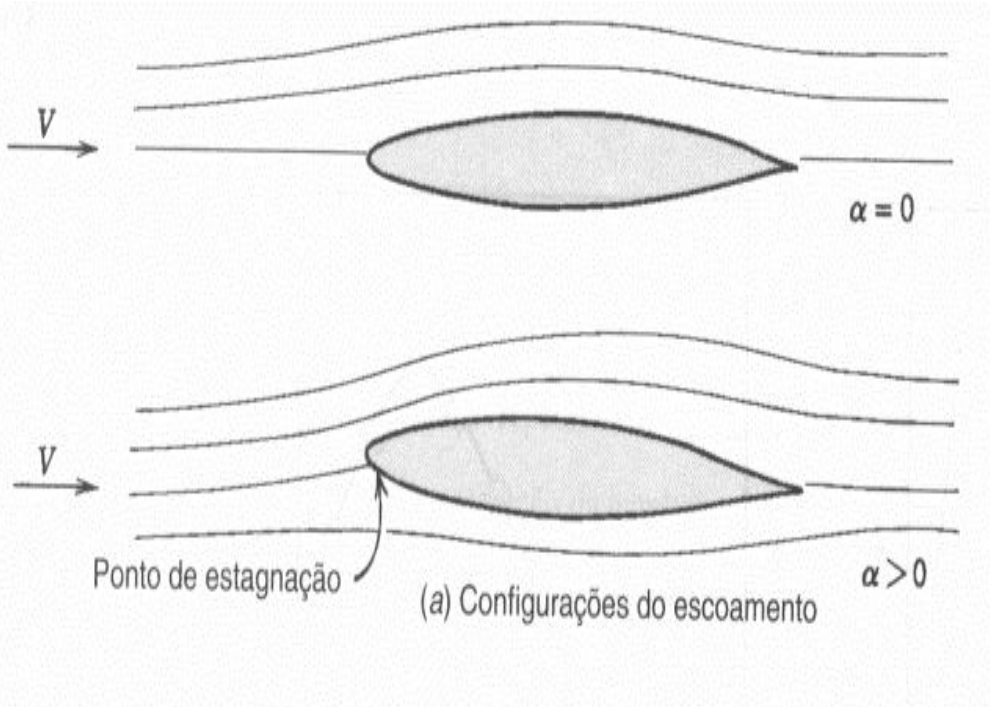
esfera $A_{ref} = \frac{\pi D^2}{4}$

cilindro $A_{ref} = D L$

■ Escoamento ao Redor de Corpos Aerodinâmicos

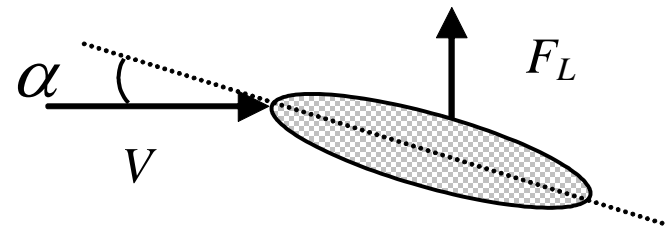
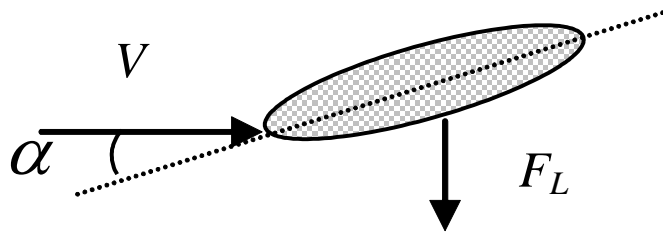
O tamanho das regiões de separação atrás dos corpos pode ser reduzida alterando-se a forma dos corpos. O objetivo na mudança de geometria é reduzir o arraste de pressão. No entanto, ao aumentar a área superficial o arraste viscoso cresce. Deve-se procurar o ponto de mínimo





Escoamento simétrico
 $F_L = 0$

α torna o escoamento
 assimétrico $\Rightarrow F_L \neq 0$



$\alpha = \hat{\text{ângulo de ataque}}$

- **Exemplo 1.** Deseja-se colocar um tubo de pitot a 10 cm da extremidade dianteira de um pequeno dirigível, na parte inferior. A velocidade do dirigível varia entre 40 Km/h e 160 Km/h e a temperatura do ar é 0 °C. Qual deve ser o comprimento da haste do tubo de pitot?

- **Exemplo 2.** Um novo trem aerodinâmico viaja a uma velocidade média de 172 Km/h. Calcule a potência necessária para vencer a resistência superficial ao longo do teto e lados de um trem de 10 vagões. Os vagões possuem 25 m de comprimento; 3,4 m de largura e 4,5 m de altura. O ar está a 5 °C.

- **Exemplo 3.** Uma partícula de poeira radioativa é lançada a 10 000 m de altitude. A densidade da partícula é de 2650 kg/m^3 . Estime o tempo de queda da partícula para as seguintes situações:
(i) diâmetro = $10 \text{ }\mu\text{m}$ (ii) diâmetro = $1 \text{ }\mu\text{m}$

- **Exemplo 4:** Uma chaminé cilíndrica de 1 m de diâmetro e 22 m de altura está exposta a um vento uniforme de 56 km/h nas condições atmosféricas padrão. Estime o momento fletor na base da chaminé devido a força do vento.