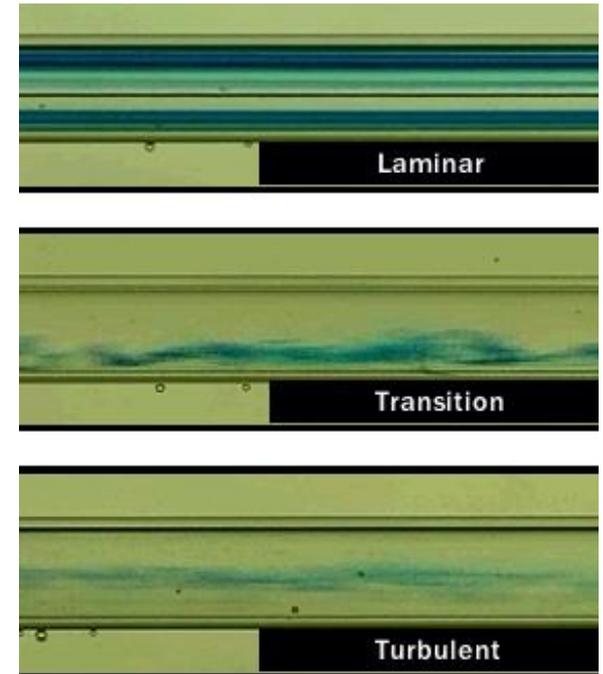


ESCOAMENTO VISCOZO INCOMPRESSÍVEL

- escoamento viscoso pode se classificado em escoamento **laminar** ou **turbulento**. A diferença entre os dois está associada ao fato que no primeiro caso, temos transferência de quantidade de movimento a nível molecular e no segundo a nível macroscópico.

- A diferença no comportamento está associada com as forças que atuam no elemento de fluido. Quanto as forças viscosas dominam em relação as forças de inércia, o escoamento apresenta comportamento laminar. Quando as forças de inércia dominam, o escoamento se comporta como turbulento.



- O comportamento do escoamento depende se o escoamento é laminar ou turbulento
- O parâmetro que mede a razão entre as forças de inércia e viscosas é o **número de Reynolds, Re** definido como

$$Re = \frac{\rho V_c L_c}{\mu}$$

onde: ρ é a massa específica, μ é a viscosidade absoluta. V_c e L_c correspondem a velocidade e dimensão característica do escoamento.

ESCOAMENTO VISCOZO INCOMPRESSÍVEL

equações de conservação

□ Equação da Continuidade: $\mathbf{div} \vec{V} = 0$

□ Equação de Navier – Stokes
(propriedades constantes)

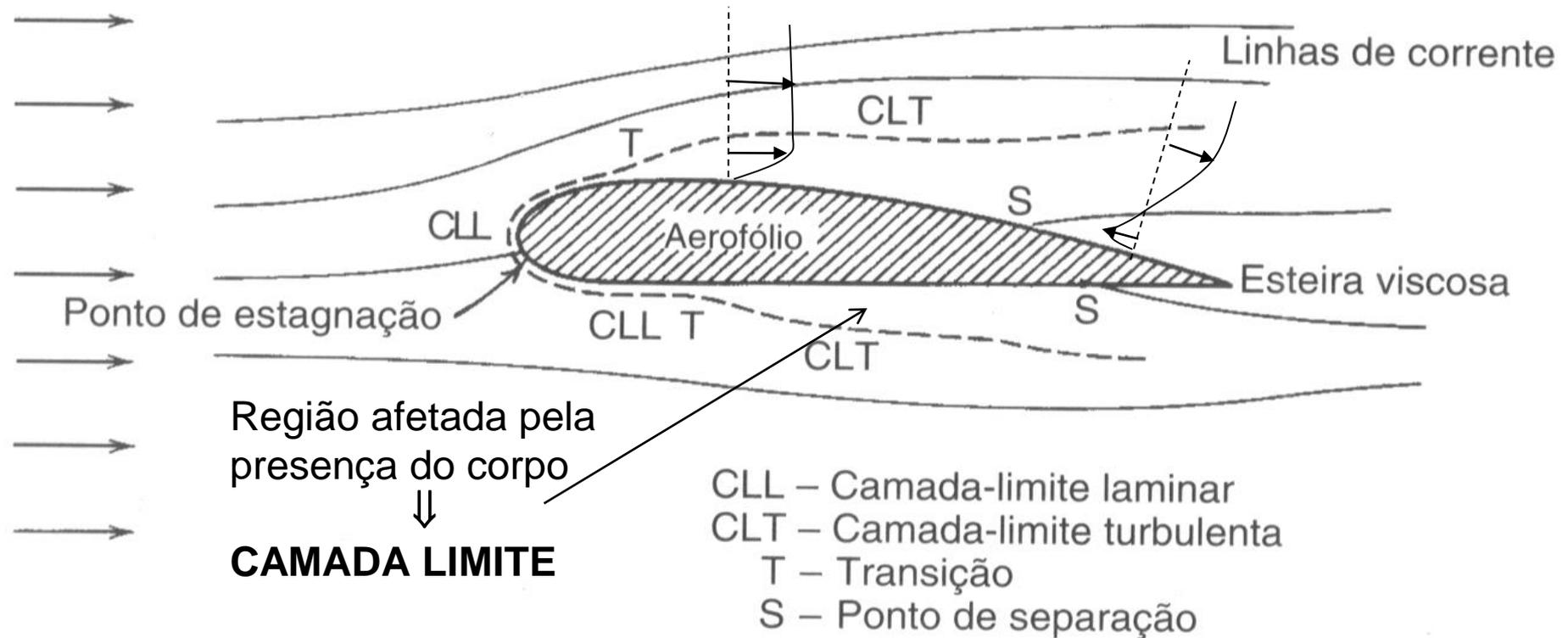
$$\rho \frac{D \vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V}$$

Como os escoamento internos e externos apresentam características diferentes, é portanto conveniente estudá-los separadamente.

ESCOAMENTOS EXTERNOS:

em geral desejamos determinar as forças que atuam no corpo, isto é, força de arraste e sustentação.

U_∞ – Campo de velocidade uniforme a montante

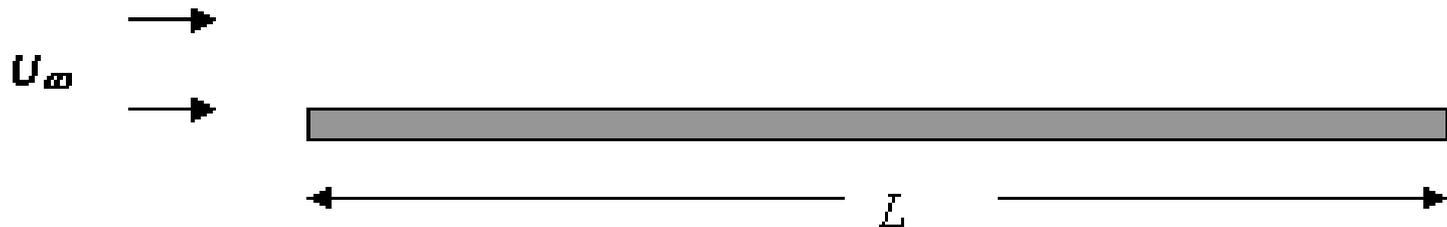


Fora da camada limite, o escoamento não é afetado pela presença do corpo \Rightarrow forças viscosas não são importantes

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**

ESCOAMENTOS EXTERNOS

- A velocidade característica é a **velocidade de aproximação do corpo U_∞**
- A dimensão característica é o **comprimento do corpo na direção do escoamento, L**

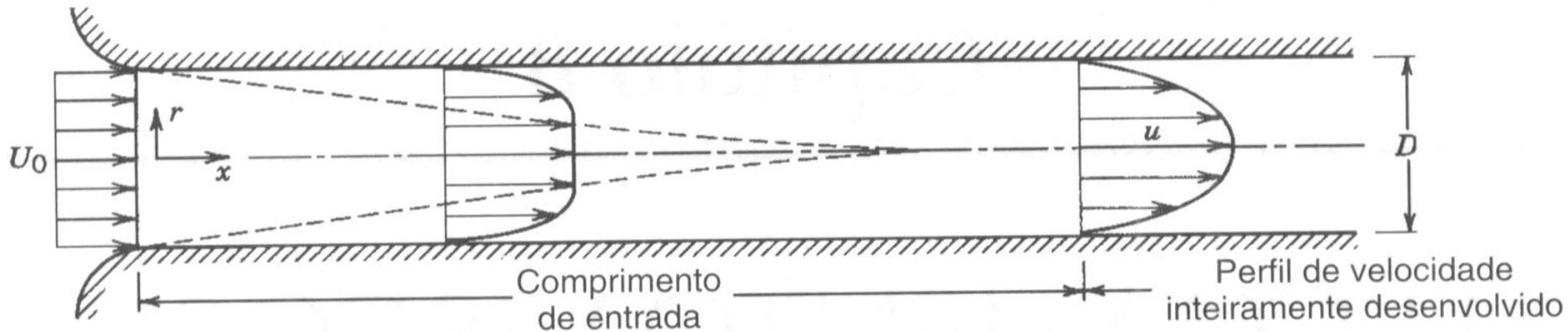


- O número de Reynolds $Re = \frac{\rho U_\infty L}{\mu}$ que caracteriza a transição neste caso é

$Re \leq 5 \times 10^5 \Rightarrow$ laminar

$Re > 5 \times 10^5 \Rightarrow$ turbulento

- **ESCOAMENTOS INTERNOS:** em geral desejamos buscar a relação entre vazão e queda de pressão.



- Em um escoamento interno, longe da região de entrada, observa-se que o escoamento não apresenta variações na sua própria direção, e a pressão varia linearmente ao longo do escoamento. O escoamento é considerado como **hidrodinamicamente desenvolvido**.
- O comportamento na região de entrada de uma tubulação apresenta o mesmo comportamento que o escoamento externo. Portanto, estudaremos escoamentos externos e depois aplicaremos os resultados obtidos para analisar a região de entrada de uma tubulação.

ESCOAMENTOS INTERNOS

- ❑ Considerando que o escoamento como *hidrodinamicamente desenvolvido*.
- ❑ A velocidade característica é a **velocidade média u_m**
- ❑ A dimensão característica é o **diâmetro hidráulico, D_h**

$$u_m = \frac{Q}{A_T} = \frac{1}{A_T} \int u \, dA$$

$$D_h = \frac{4 A_t}{P_m}$$

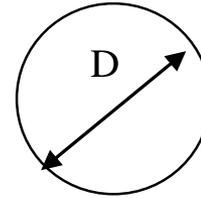
A_t é a área transversal do escoamento e P_m é o perímetro molhado, o fator 4 é introduzido por conveniência.

O número de Reynolds que caracteriza a transição neste caso é

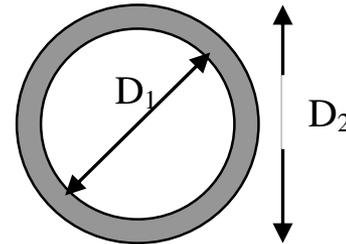
$$\mathbf{Re} = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad \begin{array}{l} \mathbf{Re} \leq 2300 \Rightarrow \text{laminar} \\ \mathbf{Re} > 2300 \Rightarrow \text{turbulento} \end{array}$$

Exemplos:

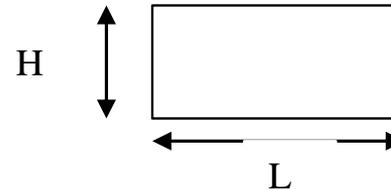
◦ **círculo:** $D_h = \frac{4 \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D$



◦ **espaço anular:** $D_h = \frac{4 \frac{\pi D_2^2 - D_1^2}{4}}{\pi (D_2 + D_1)} = D_2 - D_1$



◦ **retângulo:** $D_h = \frac{4 H L}{2 (H + L)} = \frac{2 H}{1 + H / L}$



◦ **placas planas infinitas:** $D_h = 2 H$



ESCOAMENTOS INTERNOS

- O comprimento da região da entrada depende se o escoamento é laminar ou turbulento. No caso laminar, para um duto circular, pode-se estimar o comprimento da região da entrada como

$$\frac{L_e}{D} = 0,06 \frac{\rho u_m D}{\mu}$$

- Para o n^o. de Reynolds limite $Re = 2300$, temos que $L_e/D \approx 140$
- Para o regime turbulento, como este está associado a uma maior transferência de quantidade de movimento, o desenvolvimento do escoamento ocorre para uma distância menor da entrada, tipicamente, tem-se $L_e/D \approx 40$