

Hidrodinâmica I

Resistência friccional do casco



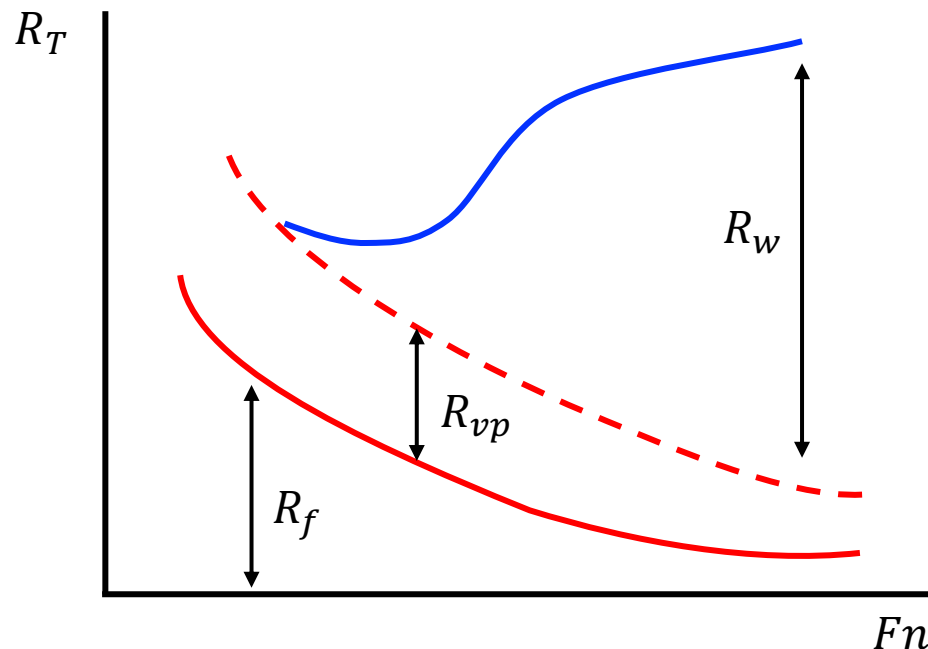
PNV3323 – Hidrodinâmica I

Resistência ao Avanço

Identificamos três componentes responsáveis pela resistência hidrodinâmica total do casco:

$$R_T = R_f + R_{vp} + R_w$$

Dois números adimensionais são relevantes na caracterização do escoamento e das componentes de força:



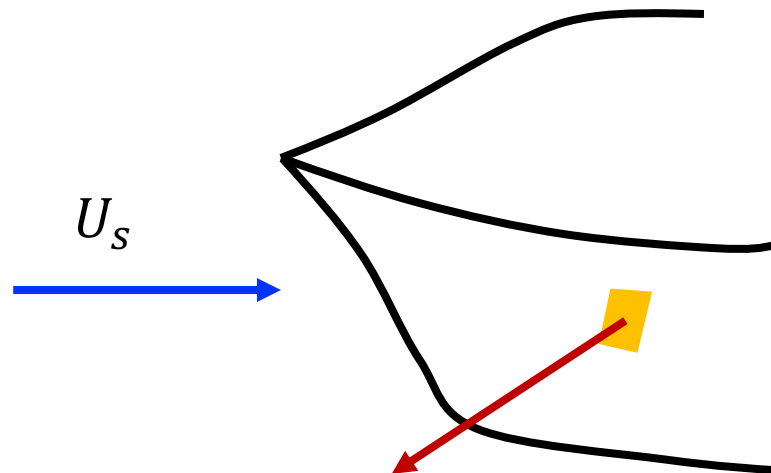
$$\frac{F_{inercias}}{F_{viscosas}} \propto \frac{\rho L^3 \left(\frac{U^2}{L}\right)}{\mu \left(\frac{U}{L}\right) L^2} = \frac{\rho U L}{\mu} = Re$$

$$\frac{F_{inercias}}{F_{gravitacionais}} \propto \frac{\rho L^3 \left(\frac{U^2}{L}\right)}{\rho L^3 g} = \left(\frac{U^2}{gL}\right) = Fn^2$$

Resistência Friccional (R_f)

Considerações iniciais:

- É **proporcional à área molhada do casco** (S_w);
- O **atrito dependerá** essencialmente **do nível de turbulência** do escoamento local;
- Pode ser significativamente impactada pelo **nível de rugosidade da superfície**.



$$dR_f = \tau_w(Re)dS_w$$

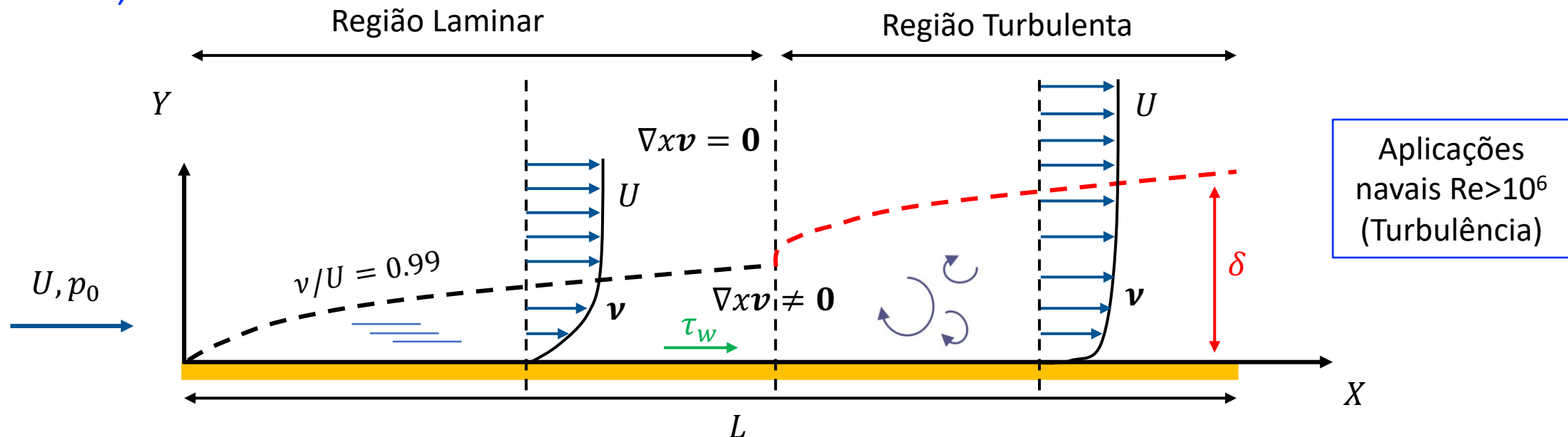
Resistência Friccional (R_f)



Resistência Friccional (R_f)

Duas abordagens principais:

1. Coeficiente de atrito em palca-plana + correções empíricas. **Combinada a ensaios para a obtenção de R_{pv} e R_w .**
2. Solução numérica do escoamento turbulento baseada no método RANSE (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations). **Dificuldade com Re altos, tratamento região da esteira, etc.**



Resistência Friccional (R_f)

Teoria de Camada-Limite Laminar

Escoamento permanente, 2D:

$$\mathbf{v}(x_1, x_2) = v_1(x_1, x_2) \bar{e}_1 + v_2(x_1, x_2) \bar{e}_2, \quad \text{e} \quad p(x_1, x_2)$$

As Equações de Prandtl para a CL laminar:

Hipóteses: $\frac{\delta}{L} \ll 1$

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} \ll \frac{\partial v_1}{\partial x_2}$$
$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial x_1^2} \ll \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_2^2}$$

$$p = p(x_1) \rightarrow p = p_0 = cte$$

↑
Placa plana

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0$$

$$\rho \left(v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} \right) \simeq \mu \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_2^2}$$

2 equações
p/ 2 incógnitas
(v_1, v_2)

Resistência Friccional (R_f)

Lembrando que para um Fluido Newtoniano

$$\tau_w = \tau_{1,2}(x_2 = 0) = \mu \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} \right)_{x_2=0}$$

E, a partir dessa expressão, podemos obter o *coeficiente de atrito* para uma **placa-plana** em regime laminar (comprimento L x largura b):

$$F_f = b \int_0^L \tau_w(x_1) dx_1$$

$$C_f = \frac{F_f}{1/2 \rho L b U^2}$$

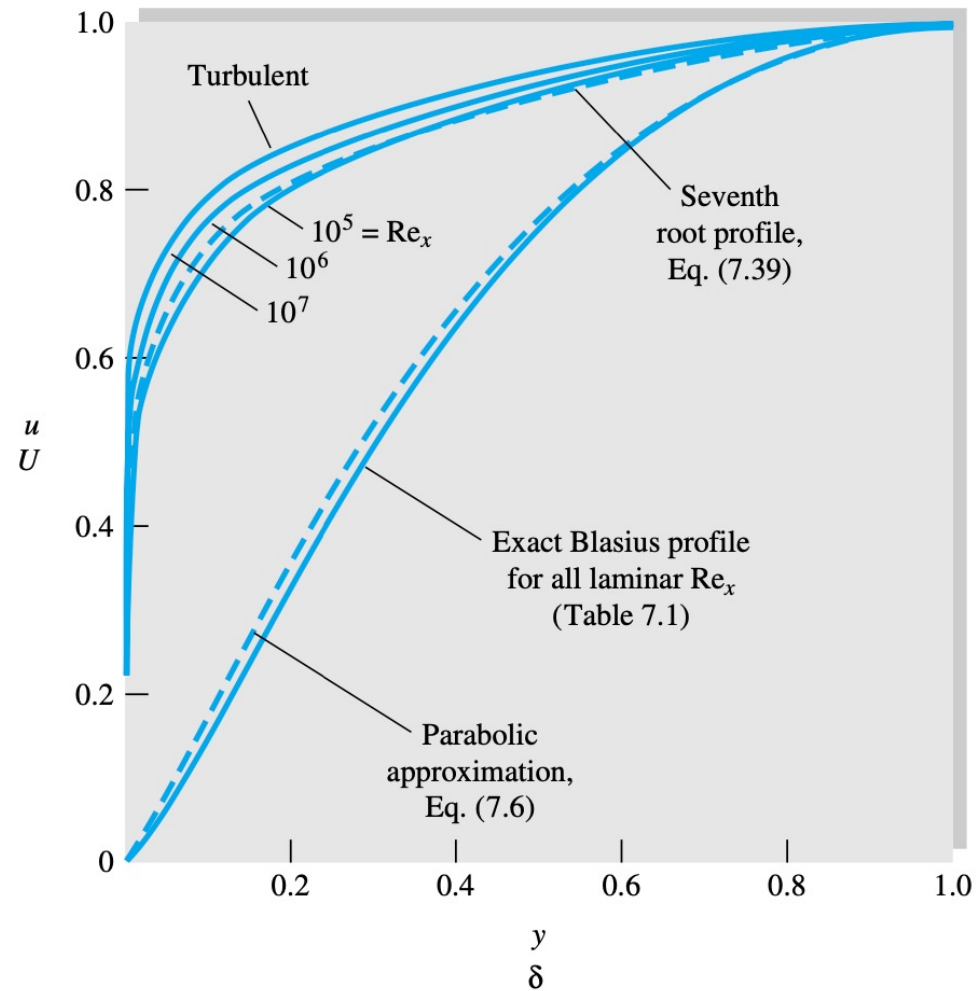


Empregando a solução
exata de Blasius

$$C_f(Re) = \frac{1.328}{\sqrt{Re}}$$

$$\tau_w(x_1) = 0.332 U^{3/2} \sqrt{\frac{\rho \mu}{x_1}}$$

Resistência Friccional (R_f)



White, Frank M. "Fluid mechanics, 1999." *Me Graw-Hill* (1979)

Resistência Friccional (R_f)

Teoria de Camada-Limite Turbulenta

Escoamento transiente, 2D?:

$$\mathbf{v}(x_1, x_2, t) = v_1(x_1, x_2, t) \bar{e}_1 + v_2(x_1, x_2, t) \bar{e}_2, \quad \text{e} \quad p(x_1, x_2, t)$$

Retomando as Equações de Prandtl para a CL na placa, mas retendo agora a variação no tempo:

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} \right) \simeq \frac{\mu \partial^2 v_1}{\partial x_2^2}$$

2 equações
p/ 2 incógnitas
(v_1, v_2)

Necessitamos de uma
estratégia para tratar as
variações no tempo.

Resistência Friccional (R_f)

Reynolds propoe que a **velocidade** instantânea é dada pela soma da **velocidade média** e **flutuações**. Essa hipótese, junto com algumas considerações adicionais (ver, p. ex., *White, F.M., Viscous Fluid Flow*, pgs. 453-55), permite chegar nas Equações Médias de Reynolds para a CL turbulenta (*Reynolds- Averaged Navier-Stokes Eqs - RANSE*):

$$\frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0$$
$$\rho \left(v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} \right) = \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\mu \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_2^2} - \rho \overline{v'_1 v'_2} \right)$$

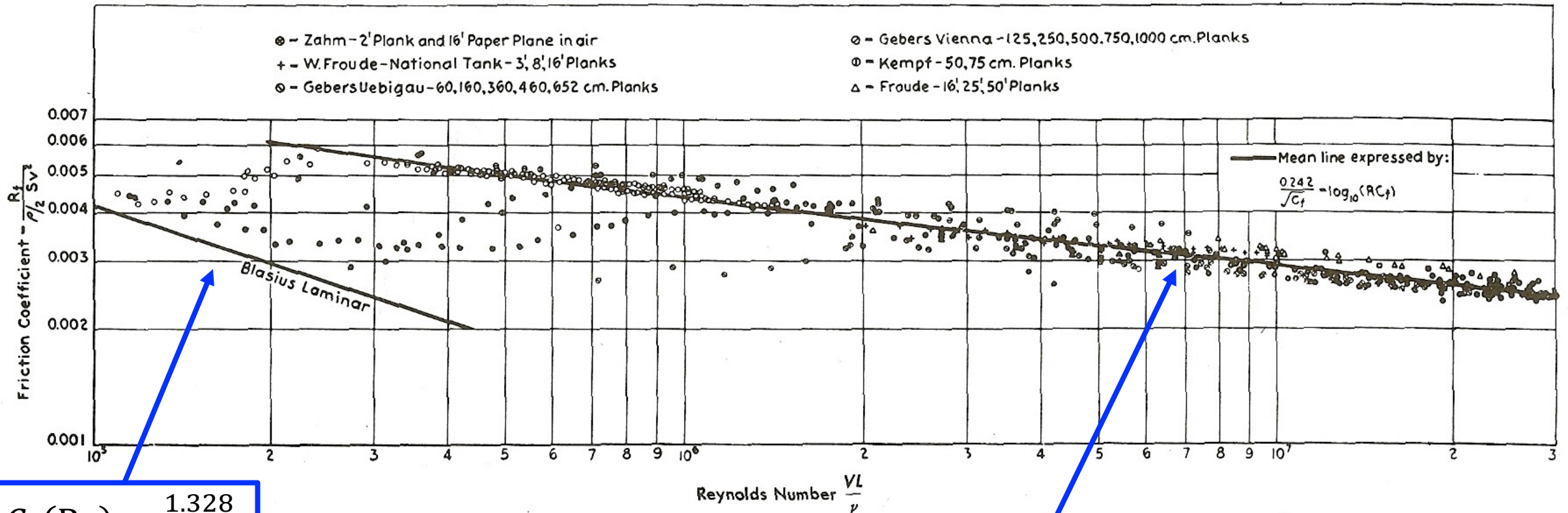
Modelo de turbulência

$$\overline{v'_1 v'_2} = f(x_1, x_2, v_1, v_2)$$

Requer modelo adicional para as tensões aparentes de Reynolds: Modelo de comprimento de mistura (Prandtl)+perfil logarítmico de velocidades na camada-limite (von Kármán)

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_f(Re)}} = \log_{10}(Re \cdot C_f(Re))$$

Resistência Friccional (R_f)



$$C_f(Re) = \frac{1.328}{\sqrt{Re}}$$

Lewis, 1988 (PNA)

$$\frac{0.242}{\sqrt{C_f(Re)}} = \log_{10}(Re \cdot C_f(Re))$$