

Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento Perfil de velocidade média, U

1. Evolução linear na sub-camada linear, $y^+ < 5$

$$U^+ = y^+$$

2. Evolução semi-logarítmica na lei da parede,
 $y^+ > 30 - 50$, $y < 0,1 - 0,2\delta$

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad k = 0,41 \quad C \cong 5,2$$

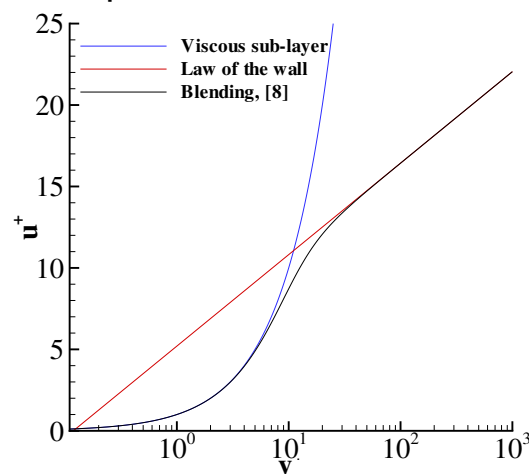
3. Transição contínua de 1 para 2 ao longo da camada tampão

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento Perfil de velocidade média, U

3. Transição contínua de 1 para 2 ao longo da camada tampão

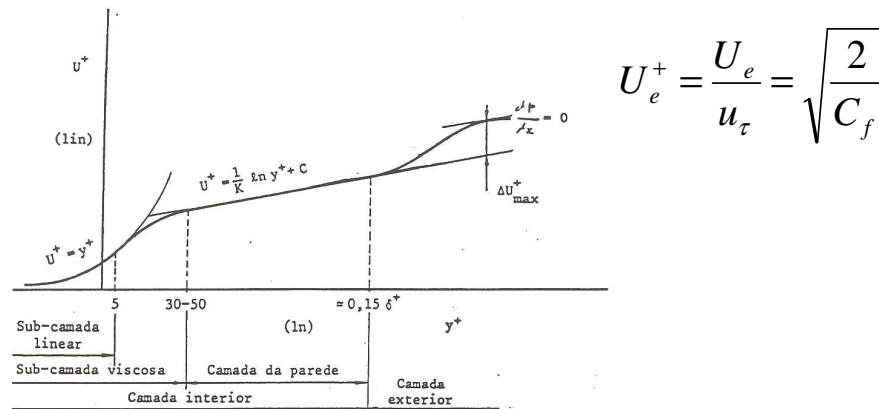


Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Escoamento em Regime Turbulento

Perfil de velocidade média, U

4. Desvio do perfil em relação à lei semi-logarítmica onde a velocidade tende para U_e^+



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Escoamento em Regime Turbulento

Perfil de velocidade média, U

- Componente de esteira

$$\Delta U^+ = U^+ - \left(\frac{1}{K} \ln(y^+) + C \right) = \frac{\Pi}{K} w \left(\frac{y}{\delta'} \right)$$

- Função de esteira de Coles (empírica)

$$w \left(\frac{y}{\delta'} \right) = 1 - \cos \left(\pi \frac{y}{\delta'} \right)$$

- $y = \delta'$ é a cota a que ocorre o desvio máximo da distribuição de velocidade em relação à lei da parede

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica



Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento

Perfil de velocidade média, U

- Intensidade da componente de esteira

$$\Delta U_{\max}^+ = 2 \frac{\Pi}{\kappa}$$

- Perfil de velocidade média fora da sub-camada viscosa

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C + \frac{\Pi}{\kappa} \left(1 - \cos\left(\pi \frac{y}{\delta^+}\right) \right)$$

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica



Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento

Escoamentos auto-preservados

- Equação integral de von Kármán

$$\frac{d}{dx} (\rho U_e^2 \theta) = \tau_w + \delta^* \frac{dP}{dx}$$

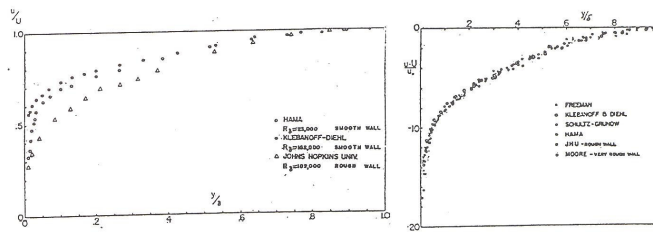
- Parâmetro de história

$$\beta = \frac{\delta^*}{\tau_w} \frac{dP}{dx}$$

- Escoamento auto-preservado, $\beta = \text{constante}$

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Aerodinâmica

 Escoamento em Regime Turbulento
 Escoamentos auto-preservados


- Parâmetro de equilíbrio de Clauser

$$G = \sqrt{\frac{2}{C_f}} \frac{H-1}{H} = \frac{\int_0^h \left[\frac{U_e - U}{u_\tau} \right]^2 dy}{\int_0^h \left[\frac{U_e - U}{u_\tau} \right] dy}$$

- Para escoamento em gradiente de pressão nulo e Reynolds suficientemente elevado G é constante

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Aerodinâmica

 Escoamento em Regime Turbulento
 Formas simplificadas do perfil de velocidade média

- Perfil tipo potência

$$\frac{U}{U_e} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{n}}$$

- Parâmetros integrais

$$\frac{\delta^*}{\delta} = \frac{1}{n+1} \quad \frac{\theta}{\delta} = \frac{n}{(n+1)(n+2)} \quad H = 1 + \frac{2}{n}$$

Escoamento em Regime Turbulento

Formas simplificadas do perfil de velocidade média

- Perfil tipo potência $\frac{U}{U_e} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}}$

1. Não respeita a evolução da sub-camada linear

2. Não respeita a lei da parede

3. $\frac{\partial U}{\partial y} \neq 0$ em $y = \delta$

4. $\frac{\partial U}{\partial y} = \infty$ em $y = 0$

Escoamento em Regime Turbulento

Formas simplificadas do perfil de velocidade média

- Perfil tipo potência $\frac{U}{U_e} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}}$

- Por comparação com resultados experimentais

$$\frac{dP}{dx} = 0 \rightarrow n \approx 7$$

$$\frac{dP}{dx} < 0 \rightarrow n \approx 7-10$$

$$\frac{dP}{dx} > 0 \rightarrow n \approx 3-7$$

Escoamento em Regime Turbulento

Escoamento em gradiente de pressão nulo

- Integração da equação integral de von Kármán

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\tau_w}{\rho U_e^2}$$

- Perfil tipo potência

$$\frac{U}{U_e} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}$$

- τ_w obtido a partir de uma lei de fricção para tubos em escoamento completamente desenvolvido

$$\lambda = \frac{4\tau_w}{1/2\rho U_{med}^2} = 0,3164 R_e^{-1/4} \quad R_e = \frac{U_{med} D}{\nu}$$

$$U_{med} = 0,8U_{max} \quad \delta \approx R \quad U_e \approx U_{max}$$

Escoamento em Regime Turbulento

Escoamento em gradiente de pressão nulo

- Tensão de corte na parede

$$\frac{\tau_w}{\rho U_e^2} = 0,0225 \left(\frac{\nu}{U_e \delta}\right)^{\frac{1}{4}}$$

- Equação integral de von Kármán com δ como variável dependente

$$\frac{7}{72} \frac{d\delta}{dx} = 0,0225 \left(\frac{\nu}{U_e \delta}\right)^{\frac{1}{4}}$$

Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento Escoamento em gradiente de pressão nulo

- Admitindo regime turbulento desde $x=0$ ($\delta=0$)

$$\frac{\delta}{x} = 0,37R_{e_x}^{-1/5} \quad \frac{\delta^*}{x} = 0,046R_{e_x}^{-1/5}$$

$$\frac{\theta}{x} = 0,036R_{e_x}^{-1/5} \quad H = 1,29$$

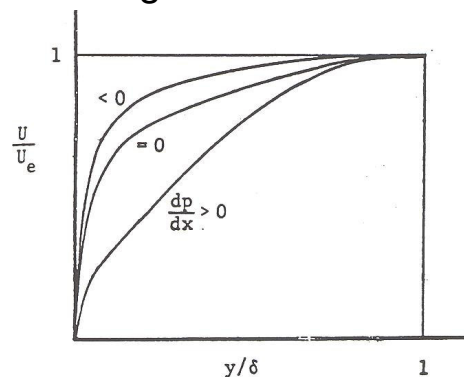
$$C_f = 0,0576R_{e_x}^{-1/5} \quad C_D = 0,072R_{e_x}^{-1/5}$$

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento Efeito do gradiente de pressão

- Qualitativamente o efeito é semelhante ao analisado em regime laminar



- Perfil mais cheio para gradiente favorável menos cheio para gradiente adverso

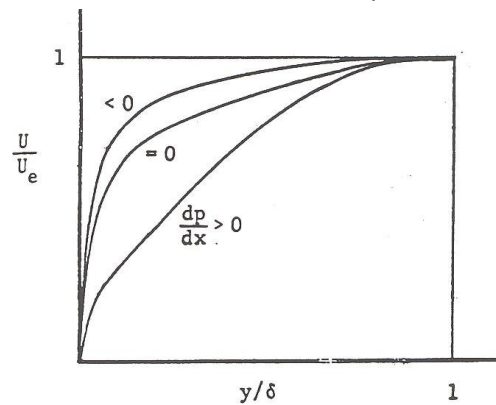
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento

Efeito do gradiente de pressão

- Gradientes de velocidade média na zona exterior do perfil fundamentais para o arrastamento (produção de energia cinética da turbulência proporcional aos gradientes de velocidade média)



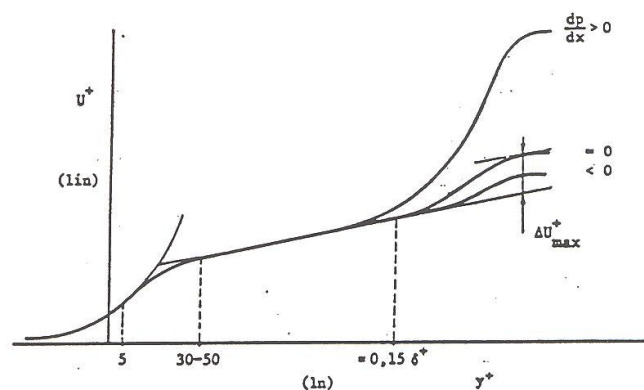
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento

Efeito do gradiente de pressão

- Efeito na camada da parede



- Validade da lei da parede em escoamento separado é bastante duvidosa

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Escoamento em Regime Turbulento

Efeito do gradiente de pressão

- Escoamento em regime turbulento resiste mais à separação do que em regime laminar.
 1. Perfil de velocidade mais cheio junto à parede
 2. Difusão muito superior à difusão em regime laminar (separação depende da razão entre força de pressão e força de corte)

Escoamento em Regime Turbulento

Método de Head

- Equação integral de von Kármán

$$\frac{d\theta}{dx} + \theta \frac{H + 2}{U_e} \frac{dU_e}{dx} = \frac{C_f}{2}$$

- Velocidade de arrastamento, V_E

$$V_E = \frac{d}{dx} \int_0^\delta U dy = \frac{d}{dx} [U_e (\delta - \delta^*)]$$

- Factor de forma, H_1

$$H_1 = \frac{\delta - \delta^*}{\theta}$$

Escoamento em Regime Turbulento Método de Head

- Equação proposta pelo método

$$\frac{d}{dx}(U_e \theta H_1) = U_e F(H_1) \quad H_1 = G(H)$$

- Ajuste experimental a $F(H_1)$ e $G(H)$

$$F(H_1) = 0,0306(H_1 - 3)^{-0,6169}$$
$$H_1 = G(H) = \begin{cases} 0,8234(H - 1,1)^{-1,287} + 3,3 & \Leftarrow H \leq 1,6 \\ 1,5501(H - 0,6778)^{-3,064} + 3,3 & \Leftarrow H > 1,6 \end{cases}$$

Escoamento em Regime Turbulento Método de Head

- Correlação de Ludwig-Tillman para obter C_f

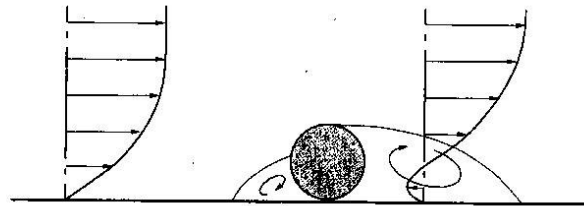
$$C_f = 0,246 \times 10^{-0,678H} \times R_{e_\theta}^{-0,268}$$

- Separação prevista para $H \approx 2.4 - 2.8$
- Solução numérica com um método de Runge-Kutta

Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento Controlo de Camada Limite

- Transição forçada: rugosidade ou arame de transição. Objectivo é retardar ou evitar a ocorrência de separação da camada limite

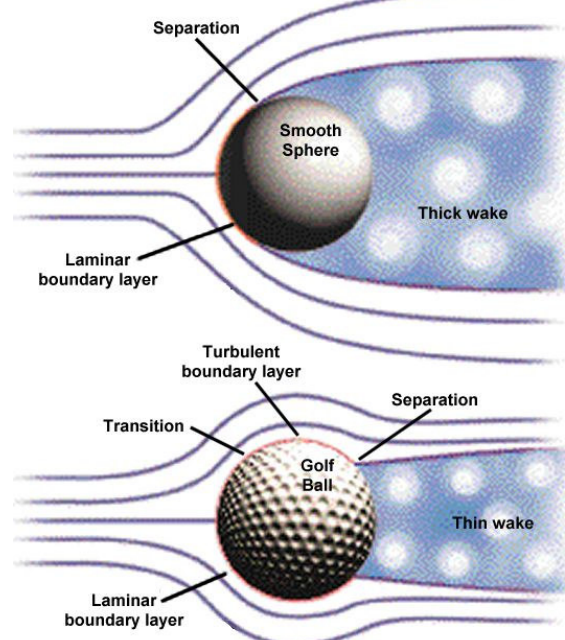


$$R_{e_{arame}} = \frac{U_e d_{arame}}{\nu} \geq 826 \quad \text{Critério de Gibbings}$$

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Aerodinâmica

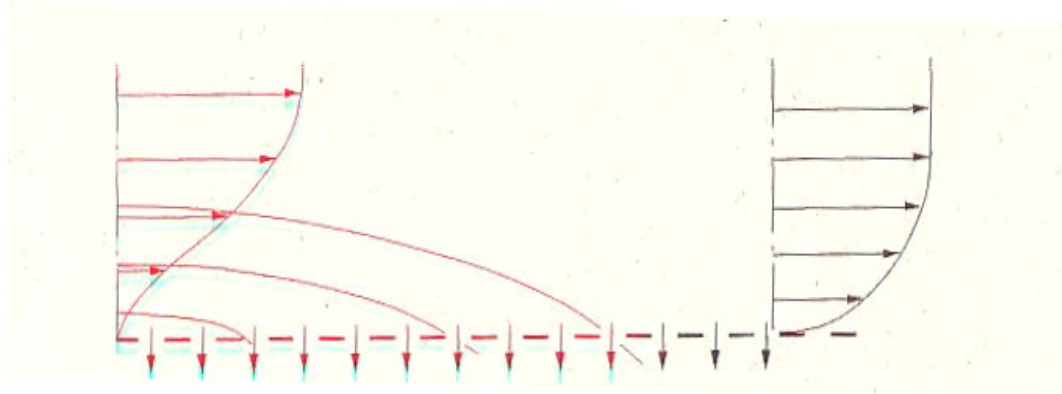
Escoamento em Regime Turbulento Controlo de Camada Limite



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Escoamento em Regime Turbulento Controlo de Camada Limite

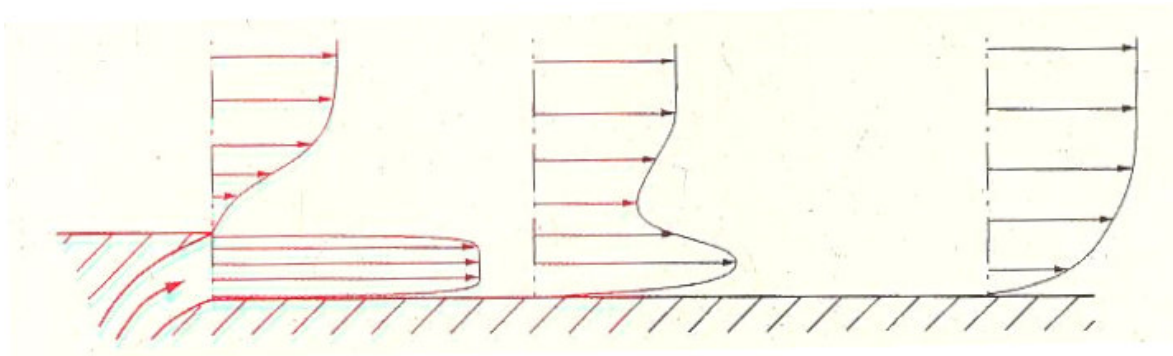
- Sucção na parede. Retarda (ou evita) a separação da camada limite e atrasa a transição a regime turbulento



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Escoamento em Regime Turbulento Controlo de Camada Limite

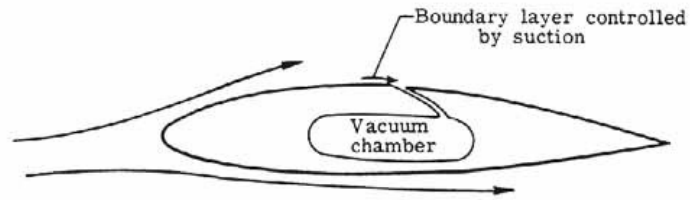
- Sopros. Retarda ou evita a separação da camada limite, mas favorece a transição a regime turbulento



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Aerodinâmica

Escoamento em Regime Turbulento Controlo de Camada Limite



(a) Suction of boundary layer.



(b) Reenergizing the boundary layer.