

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Aerodinâmica
1º Semestre 2019/20

Exame de 1ª época, 10 de Janeiro de 2020

Hora : 18:30

Duração : 3 horas

1ª Parte : Sem consulta

2ª Parte : Consulta livre

Nome :

Número:

1ª Parte

Em cada alínea, assinale com verdadeiro (V) ou falso (F) cada um dos quadrados, sabendo que podem existir todas as combinações possíveis de verdadeiro e falso. A cotação das respostas é a seguinte:

Quadrado correctamente preenchido 0,25 valores.

Quadrado em branco 0

Quadrado incorrectamente preenchido -0,15 valores.

1. Nos modelos matemáticos para simular escoamentos **turbulentos**:

- Em simulação numérica directa (DNS) o escoamento é sempre tri-dimensional mas pode ser permanente (estacionário).
- As incógnitas da Simulação das Grandes Escalas (LES) são idênticas às das equações em média de Reynolds (RANS).
- As soluções de DNS não são afectadas por erros numéricos.
- O escoamento é sempre estatisticamente permanente/estacionário quando se resolvem as equações em média de Reynolds (RANS).

2. As equações de conservação da massa e balanço de quantidade de movimento para uma camada limite, bi-dimensional de um fluido incompressível podem-se escrever da seguinte forma:

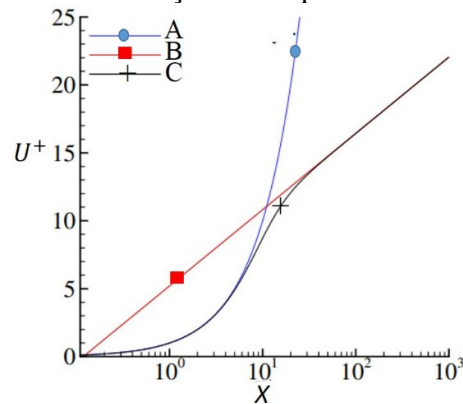
$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (1);$$

$$\rho \frac{\partial u_x u_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_y u_x}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \quad (2)$$

em que x é a direcção paralela à parede, y é a direcção perpendicular à parede, u_x e u_y são as componentes da velocidade, p é a pressão relativa, ρ é a massa específica do fluido e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

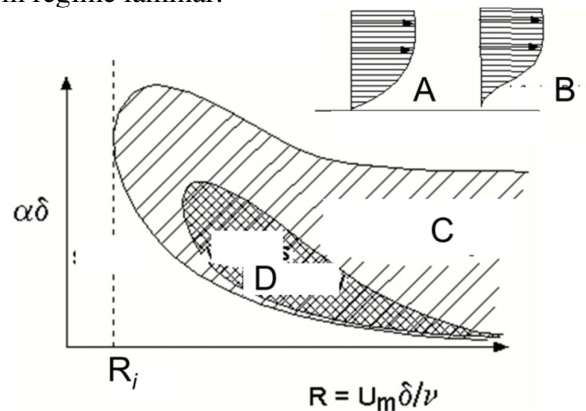
- A equação de balanço de quantidade de movimento na direcção y reduz-se a $dp/dy \cong 0$.
- O gradiente de pressão (dp/dx) é determinado pela solução de fluido perfeito do escoamento exterior à camada limite.
- As equações apresentadas só são válidas para regime turbulento.
- A pressão relativa p é medida em relação à pressão atmosférica.

3. A figura em baixo representa o perfil de velocidade horizontal média de um escoamento turbulento na vizinhança de uma parede



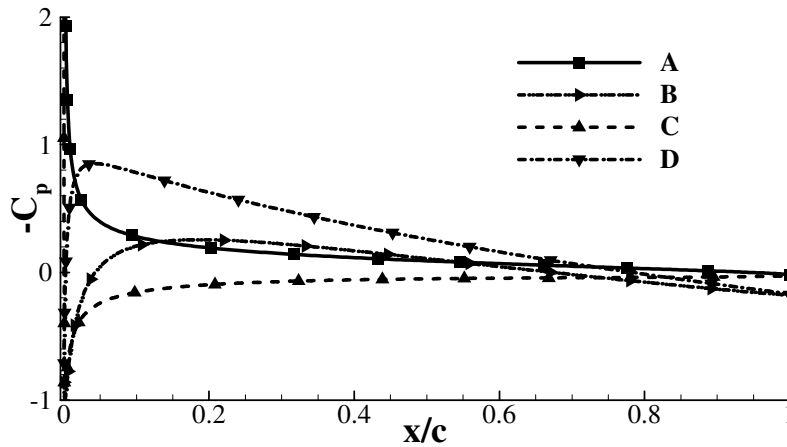
- A variável $X = y^+ = u_\tau y / \nu$.
- A linha C é obtida a partir da definição de tensão de corte total na camada tampão.
- A linha B corresponde à sub-camada linear.
- A linha A é obtida a partir da integração de $\tau_w = \mu \partial U / \partial y$ em que y é a coordenada perpendicular à parede, U é a componente da velocidade média paralela à parede, τ_w é a tensão de corte na parede e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

4. A figura em baixo representa as curvas de estabilidade neutra de perfis de velocidades de camadas limite em regime laminar.

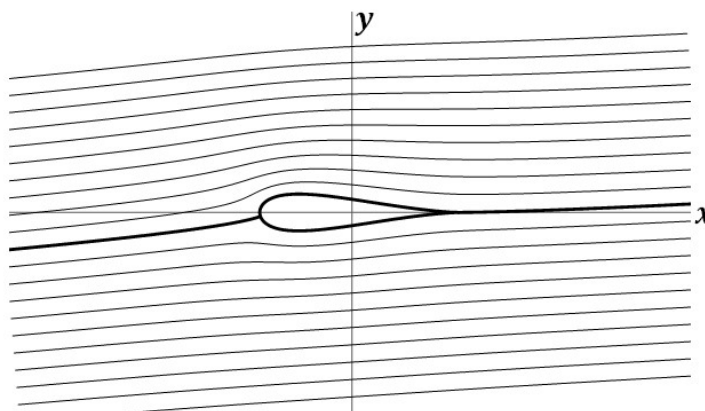


- R_i corresponde ao número de Reynolds crítico.
- A região C corresponde à região estável do perfil de velocidades A.
- A região D é típica de escoamentos em gradiente de pressão favorável.
- Este tipo de análise de estabilidade é válido para transição imposta pelo escoamento exterior (by-pass transition).

5. A figura em baixo apresenta o simétrico do coeficiente de pressão $-C_p$ ao longo da corda de dois perfis simétricos, um fino e um outro espesso, ao mesmo ângulo de ataque positivo. As distribuições de pressão foram determinadas em fluido perfeito utilizando uma transformação conforme de um cilindro circular.

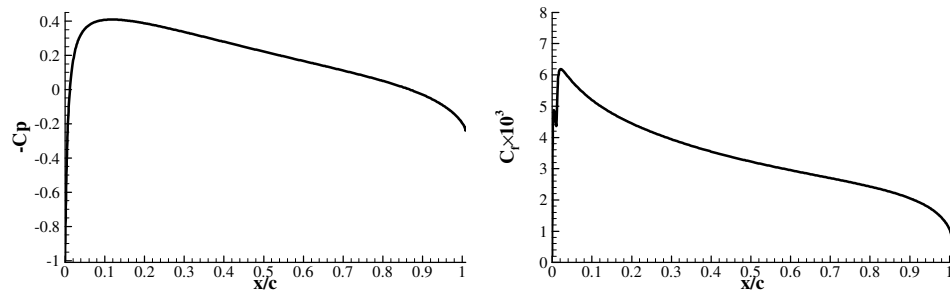


- A linha A corresponde ao extradorso do perfil espesso.
- O ponto de estagnação está na mesma coordenada (x/c) para os dois perfis.
- A linha C corresponde ao intradorso do perfil fino.
- Os dois perfis exibem o mesmo coeficiente de resistência.
6. A figura em baixo apresenta o escoamento em torno de um perfil obtido a partir da transformação conforme $z = f(\zeta)$ do escoamento permanente, bi-dimensional, potencial de um fluido incompressível em torno de um cilindro circular de raio 1m **centrado na origem do referencial ζ** .



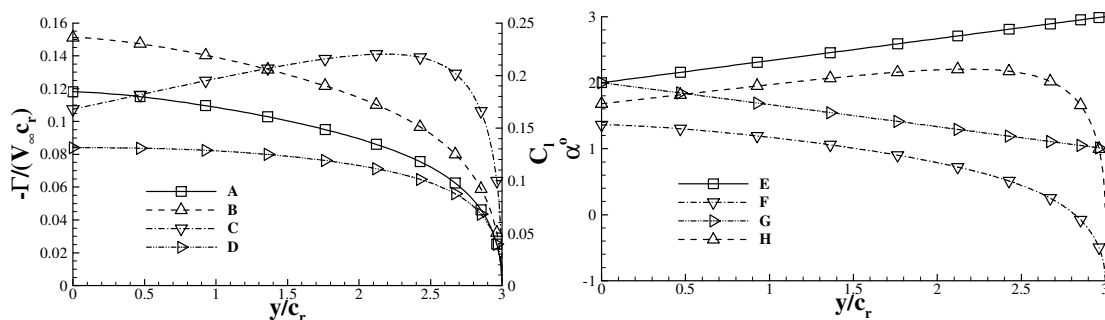
- A transformação conforme $z = f(\zeta)$ é a transformação de Joukowski.
- Para gerar o escoamento representado na figura, há um vórtice de intensidade negativa no centro do cilindro.
- A corda do perfil é maior do que 4m.
- O centro de pressão está localizado no centro do perfil ($x=0$).

7. A figura em baixo apresenta **as distribuições** do (simétrico) do coeficiente de pressão ($-C_p$) e do coeficiente de tensão de corte superficial ($C_f = \tau_w / (1/2 \rho U_\infty^2)$) ao longo da corda (x/c) de um determinado perfil a um ângulo de ataque de zero graus ($\alpha = 0^\circ$) e a um número de Reynolds baseado na corda c e U_∞ de 6×10^6 . Os resultados foram obtidos com as equações de Navier-Stokes em média temporal de Reynolds suplementadas pelo modelo de viscosidade turbulenta $k-\omega$ SST.



- O coeficiente de momento em torno do centro aerodinâmico é igual a zero.
- A estimativa do coeficiente de resistência de atrito a partir de uma camada limite em gradiente de pressão nulo produz um valor menor do que o obtido no cálculo.
- O perfil pertence à série NACA de 6 dígitos.
- A transição de regime laminar a turbulento ocorre para uma coordenada (x/c) menor do que a esperada para transição natural.

8. A figura em baixo apresenta a distribuição de circulação Γ , coeficiente de sustentação C_l , ângulo de ataque geométrico α_{geom} e ângulo de ataque efetivo α_e ao longo da semi-envergadura (raíz da asa em $y=0$) de duas asas finitas, uma retangular e outra com afilamento, ao mesmo ângulo de ataque. Uma das asas tem uma secção simétrica e a outra tem uma secção com curvatura positiva. c_r é a corda na raíz da asa.



- A asa com secção simétrica é retangular.
- A linha **D** corresponde à distribuição de circulação da asa que tem torção negativa.
- As duas asas têm o mesmo alongamento Λ .
- O coeficiente de sustentação da asa com torção positiva corresponde à linha **C**.

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Aerodinâmica
1º Semestre 2019/20

Exame de 1ª época, 10 de Janeiro de 2020

Hora : 18:30

Duração : 3 horas

1ª Parte : Sem consulta

2ª Parte : Consulta livre

2ª Parte

1. Pretende-se aproximar um perfil de velocidades de uma camada limite utilizando a equação

$$\frac{U}{U_e} = C_1 \tanh\left(C_2 \frac{y}{\delta}\right) \quad \leftarrow y \leq \delta,$$

em que U é a componente da velocidade paralela à parede, U_e é a velocidade do escoamento exterior, y é a coordenada perpendicular à parede, δ é a espessura da camada limite e C_1 e C_2 são constantes.

- a) Determine a relação entre C_1 e C_2 ou os valores de C_1 e C_2 se possível.
- b) O perfil proposto pode ser boa aproximação para uma camada limite laminar em gradiente de pressão nulo? **Justifique quantitativamente a sua resposta.**
- c) Para $C_1 = 1,0045$ e $C_2 = 3,054$ obtem-se $\theta/\delta = 7/72$. Pode-se obter uma boa aproximação de uma camada limite turbulenta em gradiente de pressão nulo utilizando apenas este perfil e a equação integral de von Kármán? **Justifique quantitativamente a sua resposta.**

$$\begin{aligned} \tanh(x) &= \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)}; \quad \sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}; \quad \cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}; \\ \int_0^1 C_1 \tanh\left(C_2 \frac{y}{\delta}\right) d\frac{y}{\delta} &= \frac{C_1}{C_2} \ln[\cosh(C_2)]; \quad \int_0^1 C_1^2 \tanh^2\left(C_2 \frac{y}{\delta}\right) d\frac{y}{\delta} = C_1^2 \left(1 - \frac{\tanh(C_2)}{C_2}\right); \\ \frac{\partial(U/U_e)}{\partial(y/\delta)} &= \frac{C_1 C_2}{\cosh^2(C_2 y/\delta)} \end{aligned}$$

2. Considere o escoamento permanente, bi-dimensional, potencial de um fluido incompressível em torno de um cilindro circular. O cilindro tem um raio de 1m e está centrado em $\zeta_o = \xi_o + i\eta_o$. O escoamento de aproximação uniforme faz um ângulo α com o eixo real ξ e tem uma velocidade com um módulo igual a U_∞ . No centro do cilindro existe um vórtice de intensidade Γ que garante que a intersecção do cilindro com o eixo real positivo é um ponto de estagnação. O perfil representado na figura 1 foi obtido a partir da transformação conforme de Kármán-Trefftz

$$z = k \frac{(\zeta+1)^k + (\zeta-1)^k}{(\zeta+1)^k - (\zeta-1)^k},$$

e tem um ângulo interno do bordo de fuga $\tau = 14,4^\circ$.

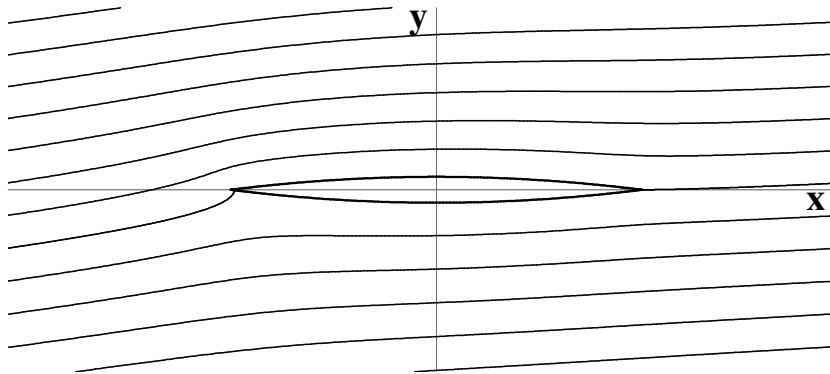


Figura 1

- a) Identifique as características geométricas do perfil e escreva o potencial complexo que representa o escoamento no plano do cilindro em função do ângulo de ataque α indicando claramente o sistema de eixos que utilizou.
 - b) Determine o coeficiente de sustentação C_l do perfil no plano transformado a pequenos ângulos de ataque. **Comente o resultado.**
 - c) Para o(s) ângulo(s) de ataque que satisfazem $C_p > -3$ ($C_p = (p - p_\infty)/(1/2 \rho U_\infty^2)$), determine o número de pontos da superfície do perfil que exibem $C_p = 0$. **Justifique claramente a sua resposta.**
3. A figura 2 apresenta as distribuições do (simétrico) do coeficiente de pressão ($-C_p$) e do coeficiente de tensão de corte superficial ($C_{f_0} = \tau_w/(1/2 \rho U_\infty^2)$) ao longo da corda (x/c) do perfil Eppler 374 (curvatura positiva) a um ângulo de ataque de sete graus ($\alpha = 7^\circ$) e a um número de Reynolds baseado na corda c , velocidade do escoamento de aproximação V_∞ e viscosidade cinemática do fluido ν igual a $Re = 3 \times 10^5$. Os resultados foram obtidos com as equações de Navier-Stokes em média temporal de Reynolds suplementadas pelo modelo de viscosidade turbulenta $k-\omega$ SST com um modelo de transição. A figura 2b) apresenta ainda C_f para camadas limite em gradiente de pressão nulo em regimes laminar e turbulento.
- a) Identifique quais os resultados obtidos para o extradorso e intradorso do perfil (S1 e S2) na figura 2a). Identifique na legenda da figura 2b) (L1, L2, L3 e L4) quais as linhas que correspondem ao extradorso e intradorso do perfil, camada limite laminar em gradiente de pressão nulo e camada limite turbulenta em gradiente de pressão nulo. **Justifique claramente a sua resposta.**
 - b) Os coeficientes de força de sustentação, resistência, resistência de atrito e resistência de pressão são apresentados na tabela 1. Justifique **quantitativamente** qual o valor que corresponde a cada um dos coeficientes de força.

C_1	C_2	C_3	C_4
0,014	1,12	0,0045	0,0095

Tabela 1

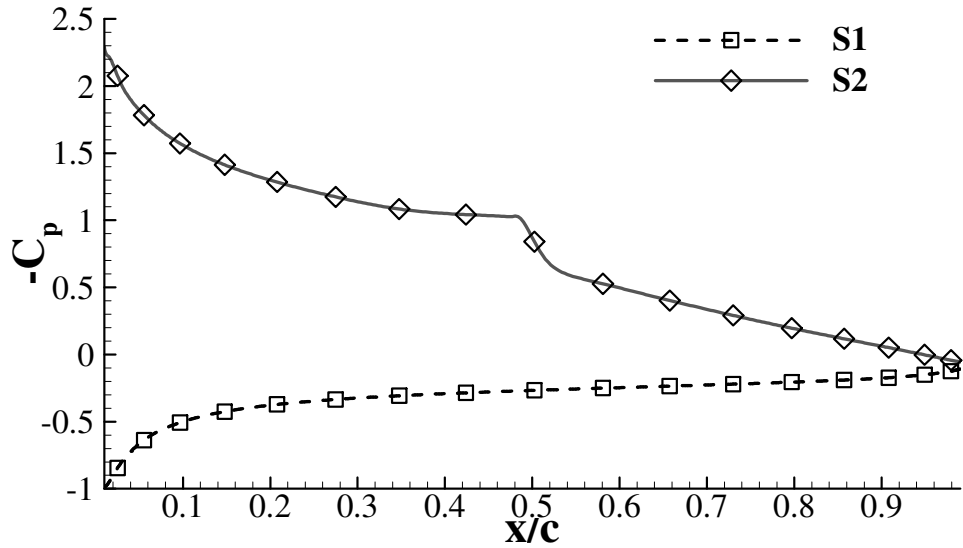


Figura 2a)

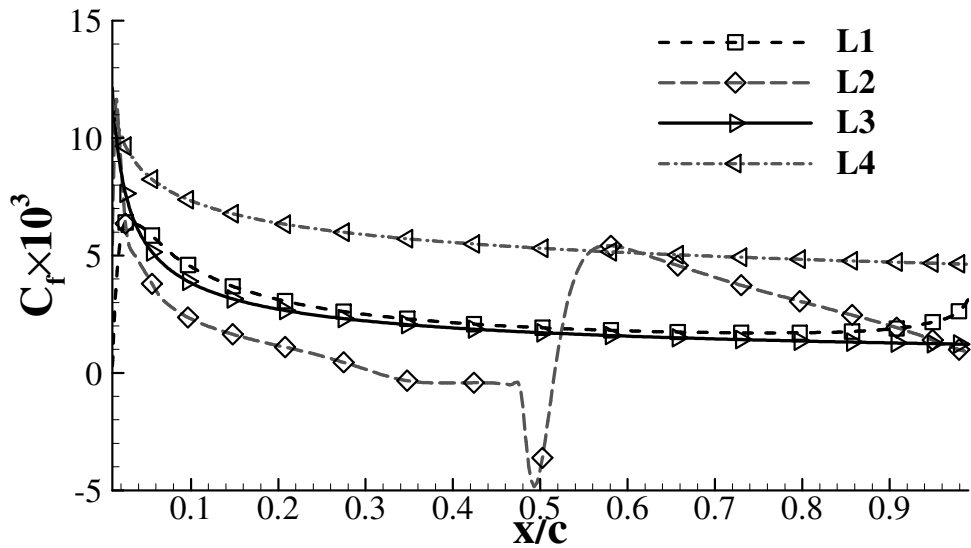


Figura 2b)

- c) Sabendo que as células junto ao perfil têm todas a mesma altura h , determine o valor de h/c sabendo que os resultados numéricos apresentam $y_{\max}^+ = 0,14$, $y_{\text{med}}^+ = 0,02$ e $y_{\min}^+ = 5,4 \times 10^{-4}$, em que y^+ corresponde à altura das células junto ao perfil em coordenadas da parede.
4. Uma pequena aeronave tem uma asa com a mesma seção ao longo da envergadura, sem flecha, diedro e torção e com uma área de $S = 8\text{m}^2$ e alongamento $\Lambda = 8$. Os coeficientes aerodinâmicos da asa a pequenos ângulos de ataque são:

$$C_L = 5,03(\alpha + 0,035) \text{ com } (\alpha \text{ em radianos})$$

$$C_D = 0,006 + 0,0523C_L^2.$$

Admita em primeira aproximação que a força de resistência da aeronave se deve apenas à asa e que a distribuição de circulação é elíptica.

$$v_{\text{ar}} = 1,51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \rho_{\text{ar}} = 1,2 \text{ kg/m}^3.$$

- a) Determine os coeficientes de força aerodinâmica **da secção da asa** e indique de que tipo de perfil se trata.
- b) Determine o peso da aeronave sabendo que a aeronave foi projectada para obter a força de propulsão mínima quando voa numa zona sem vento.à velocidade de cruzeiro de 144km/h.
- c) Se a asa voar com vento frontal a 10km/h (contrário ao movimento), qual a trajectória que tem de adoptar para permanecer a voar à velocidade de 144km/h (subir, manter-se a altitude constante ou descer)? Determine a força de propulsão nessas condições.