

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

Exame de 2ª época, 29 de Janeiro de 2020

Hora : 11:30

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) não é necessário utilizar modelos de turbulência.
- A Simulação das Grandes Escalas (LES) pode ser aplicada a escoamentos estatisticamente permanentes/estacionários.
- Só as soluções de DNS é que são afectadas por erros numéricos.
- Quando se resolvem as equações em média de Reynolds (RANS), determinam-se os valores instantâneos das componentes da velocidade e da pressão.

2. As equações de conservação da massa e balanço de quantidade de movimento para um escoamento bi-dimensional podem-se escrever da seguinte forma:

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

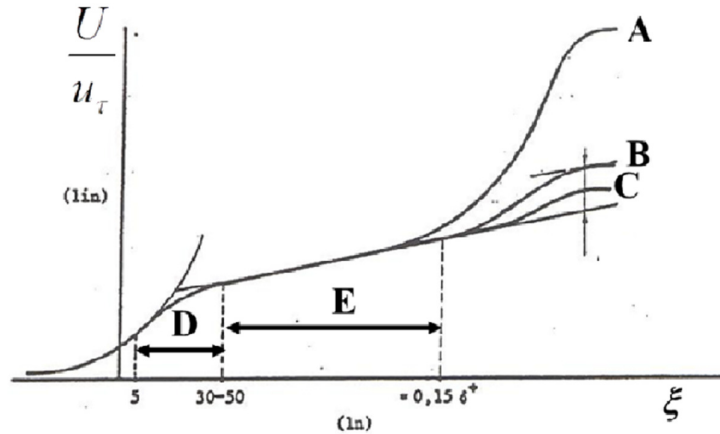
$$\rho \frac{\partial u_x u_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_y u_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \quad (2);$$

$$\rho \frac{\partial u_x u_y}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_y u_y}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

em que x e y são as coordenadas de um referencial Cartesiano, 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.

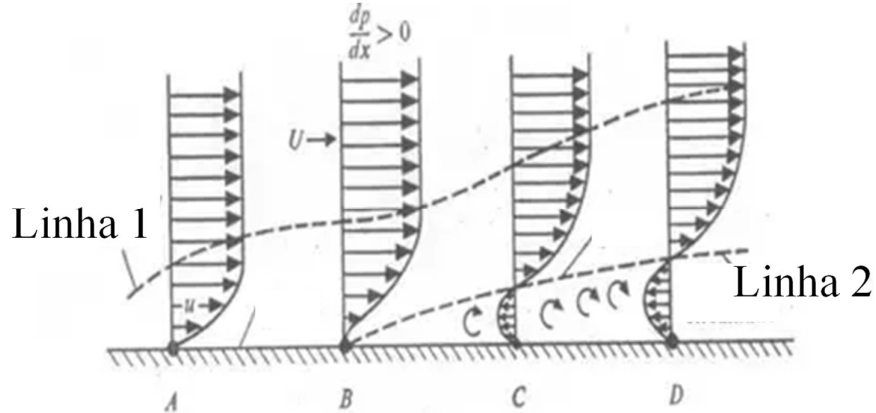
- As equações são válidas para fluidos compressíveis e incompressíveis.
- Os vários termos das equações (2) e (3) representam forças por unidade de volume N/m^3 .
- As equações apresentadas são iguais às equações em média temporal de Reynolds (RANS) se u_x , u_y e p representarem valores médios e μ for a viscosidade efectiva.
- A pressão relativa p é medida em relação à pressão hidroestática.

3. A figura em baixo apresenta os perfis de velocidade horizontal média de três camadas limite turbulentas **para os quais a velocidade exterior U_e é idêntica.**



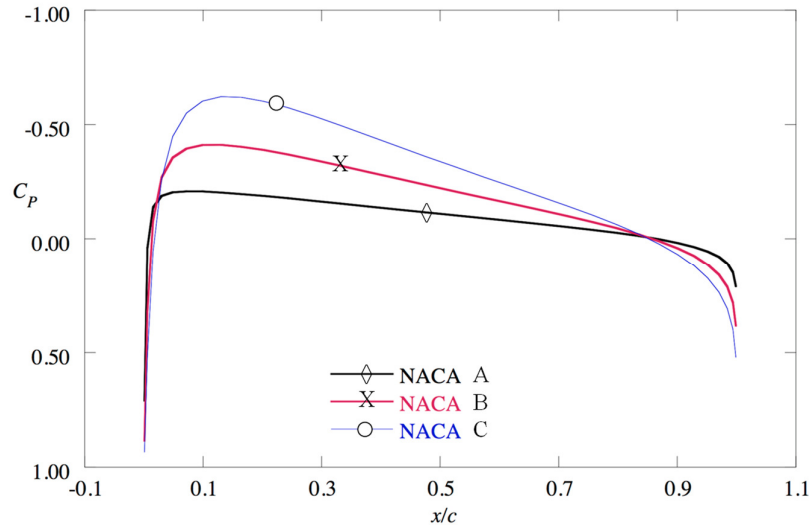
- $\xi = y/\delta$, em que y é a distância à parede e δ é a espessura da camada limite.
- Na região E, a tensão de corte total é dominada pela tensão de Reynolds.
- O perfil A corresponde a uma camada limite em gradiente de pressão adverso.
- O perfil C exibe a maior tensão de corte na parede τ_w dos três perfis.

4. A figura em baixo retirada da WEB ilustra os perfis de velocidade de uma camada limite numa região em que ocorre separação.



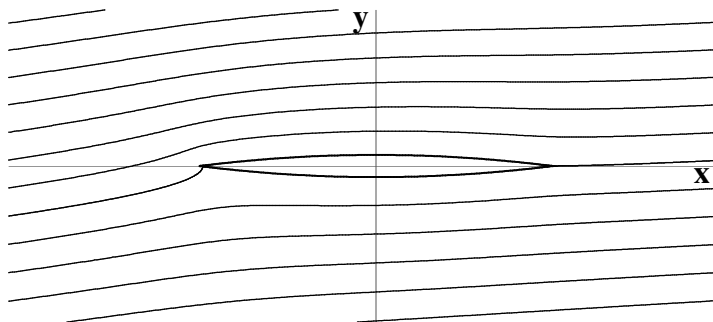
- A linha 2 corresponde à linha de corrente de separação.
- O ponto de separação está localizado em B.
- A linha 1 ilustra a espessura de deslocamento δ^* .
- Os vectores de velocidade no topo dos quatro perfis não deviam ser idênticos.

5. A figura em baixo apresenta o coeficiente de pressão C_p ao longo da corda (x/c) no extradorso e intradorso de três perfis com espessuras relativas iguais a 6%, 12% e 18%. Os perfis pertencem à mesma série NACA e o ângulo de ataque é idêntico para os três perfis.



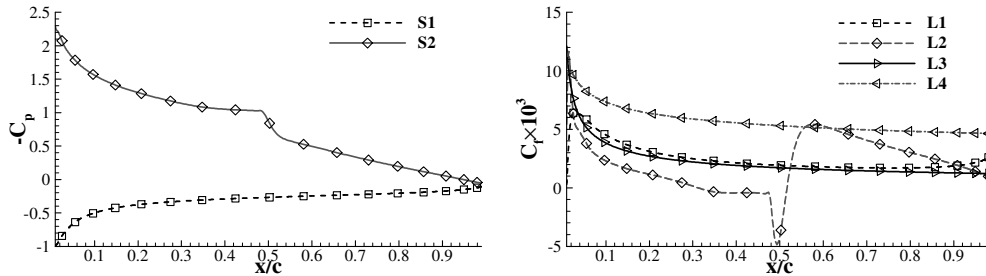
- O perfil A tem 6% de espessura relativa.
- O ângulo de ataque é igual a zeros graus ($\alpha = 0^\circ$).
- Os perfis pertencem à série NACA de 6 dígitos.
- Em escoamento viscoso, na ausência de separação da camada limite e para o mesmo número de Reynolds, o perfil C exibe o menor coeficiente de resistência de atrito.

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 .



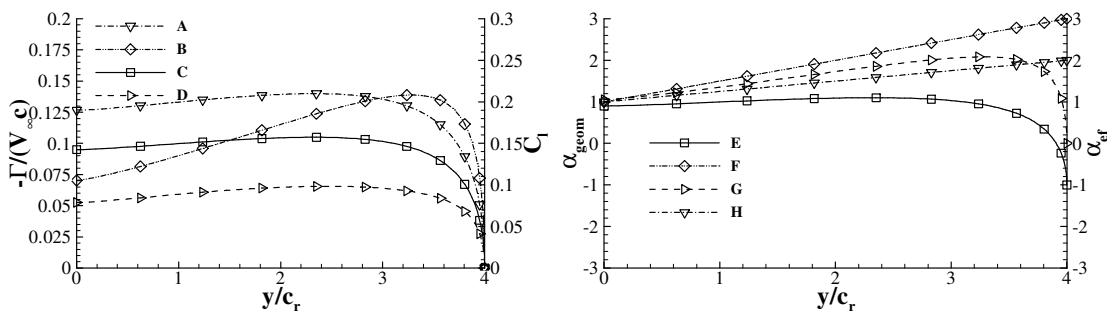
- A transformação conforme $z = f(\zeta)$ **não é** a transformação de Joukowski.
- O escoamento representado na figura gera uma força perpendicular ao eixo x, ou seja alinhada com o eixo y.
- O escoamento exibe dois pontos de estagnação.
- A pequenos ângulos de ataque, o centro de pressão coincide com o centro aerodinâmico.

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 sete graus ($\alpha = 7^\circ$) e a um número de Reynolds baseado na corda c e U_∞ de 3×10^5 . Os resultados foram obtidos com as equações de Navier-Stokes em média temporal de Reynolds suplementadas pelo modelo de viscosidade turbulenta $k-\omega$ SST e um modelo de transição. A figura da direita apresenta ainda C_f para camadas limite em gradiente de pressão nulo em regimes laminar e turbulento



- A linha S2 corresponde ao extradorso do perfil.
- A linha L4 corresponde à camada limite turbulenta em gradiente de pressão nulo.
- A bolha de separação no extradorso do perfil está maioritariamente em regime turbulento, ou seja a distância ente o ponto de separação e o $x_{critico}$ é menor do que a distância entre o $x_{transição}$ e o ponto de recolamento.
- O coeficiente de momento de picada em torno do centro do perfil ($x = 0,5c$) é negativo.

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 efectivo α_e ao longo da semi-envergadura (raíz da asa em $y=0$) de duas asas finitas, uma rectangular 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 tem afilamento.
- A linha D corresponde à distribuição de circulação da asa rectangular.
- As asas estão a um ângulo de ataque $\alpha = 1^\circ$.
- A linha G corresponde ao ângulo de ataque efectivo da asa rectangular.

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

Exame de 2ª época, 29 de Janeiro de 2020

Hora : 11:30

Duração : 3 horas

1ª Parte : Sem consulta

2ª Parte : Consulta livre

2ª Parte

1. O escoamento de um fluido incompressível sobre uma placa plana hidraulicamente lisa foi calculado utilizando as equações da continuidade e de balanço de quantidade de movimento em média temporal de Reynolds. As tensões de Reynolds são determinadas com o modelo de viscosidade turbulenta $k-\omega$ SST. O número de Reynolds baseado na velocidade à entrada V_∞ , comprimento da placa L e viscosidade do fluido ν é igual a $Re = 10^7$. A tabela em baixo apresenta a componente de velocidade paralela à parede V_x e a viscosidade turbulenta ν_t para duas distâncias x_A e x_B do bordo de ataque da placa, uma na região de escoamento laminar e outra na região de escoamento turbulento.

y/L	Re_{x_A}		Re_{x_B}	
	V_x/V_∞	ν_t/ν	V_x/V_∞	ν_t/ν
10^{-6}	0,0194	$1,72 \times 10^{-9}$	0,0135	$1,21 \times 10^{-7}$
10^{-5}	0,1929	$3,76 \times 10^{-4}$	0,1335	$2,93 \times 10^{-2}$
5×10^{-5}	0,8281	$1,16 \times 10^{-2}$	0,3969	3,72
10^{-4}	0,9982	$6,62 \times 10^{-2}$	0,4861	10,35
5×10^{-4}	0,9996	$6,62 \times 10^{-2}$	0,6567	64,91
10^{-3}	1,0000	$6,62 \times 10^{-2}$	0,7264	124,2
5×10^{-3}	1,0000	$6,62 \times 10^{-2}$	0,9370	138,9
$7,5 \times 10^{-3}$	1,0000	$6,62 \times 10^{-2}$	1,0000	0,724
10^{-2}	1,0000	$6,62 \times 10^{-2}$	1,0000	$6,0 \times 10^{-2}$

- a) Identifique qual a secção que corresponde a regime laminar e a que corresponde a regime turbulento. **Justifique quantitativamente a resposta de duas formas distintas.**
- b) Estime o valor de $Re_{x_A} = V_\infty x_A / \nu$ e de $Re_{x_B} = V_\infty x_B / \nu$.
- c) Para Re_{x_B} , estime a razão entre a tensão de corte total e a tensão de corte na parede para $y = 5 \times 10^{-4}L$. . Caso seja necessário, admita que a constante de von Kármán $\kappa = 0.41$. Comente o resultado.

2. Considere o escoamento permanente, bi-dimensional, potencial de um fluido incompressível em torno de um perfil de Joukowski com flecha relativa de $f/c = 0,04$ e espessura relativa de $t/c = 0,12$. O escoamento de aproximação uniforme tem um ângulo de ataque α e um módulo da velocidade igual a U_∞ . O perfil é obtido a partir da transformação conforme de um cilindro circular de raio 1m que satisfaz a condição de Kutta.
- Escreva o potencial complexo que representa o escoamento no plano do cilindro **para o ângulo de sustentação nula**. Indique claramente o sistema de eixos que utilizou.
 - Determine a localização do(s) ponto(s) de estagnação para o ângulo de ataque em que o centro de pressão x_{cp} se encontra no centro do perfil. Justifique a sua resposta.
 - Determine o(s) ângulo(s) de ataque que satisfazem $C_{M_{ca}} = -C_{M_c}$, em que $C_{M_{ca}}$ é o coeficiente de momento de picada em torno do centro aerodinâmico e C_{M_c} é o coeficiente de momento de picada em torno do centro do perfil.
3. A figura 1 apresenta as distribuições do (simétrico) do coeficiente de pressão ($-C_p$) e do coeficiente de tensão de corte superficial ($C_{f_o} = \tau_w / (1/2 \rho U_\infty^2)$) ao longo da corda (x/c) do perfil NACA 0015 a ângulos de ataque de três e dez graus ($\alpha = 3^\circ$ e $\alpha = 10^\circ$) a um número de Reynolds baseado na corda c , velocidade do escoamento de aproximação V_∞ e viscosidade cinemática do fluido ν igual a $Re = 1,8 \times 10^5$. 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.
- Identifique quais os resultados obtidos para cada ângulo de ataque no extradorso e intradorso do perfil (S1, S2, S3 e S4) na figura 1a), (X, Y, LA, LB, LC e LD) nas figuras 1b) e 1c). **Justifique claramente a sua resposta.**

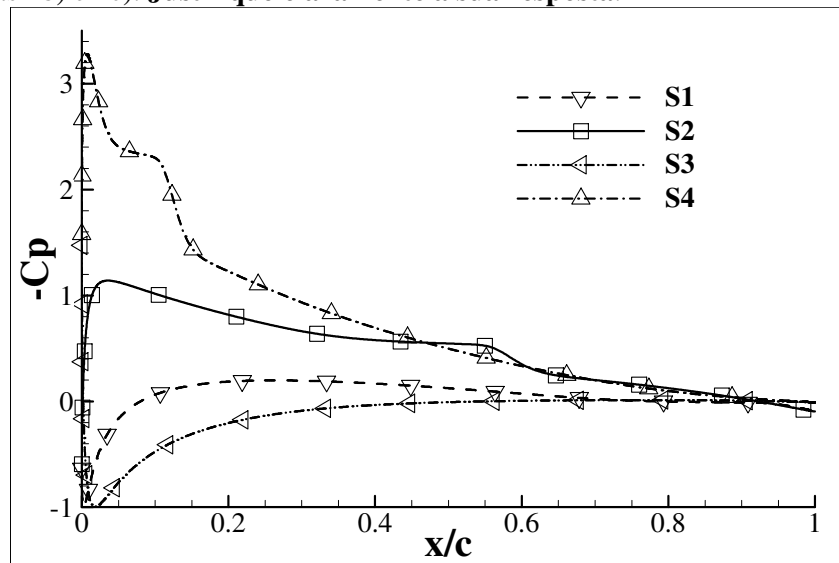


Figura 1a)

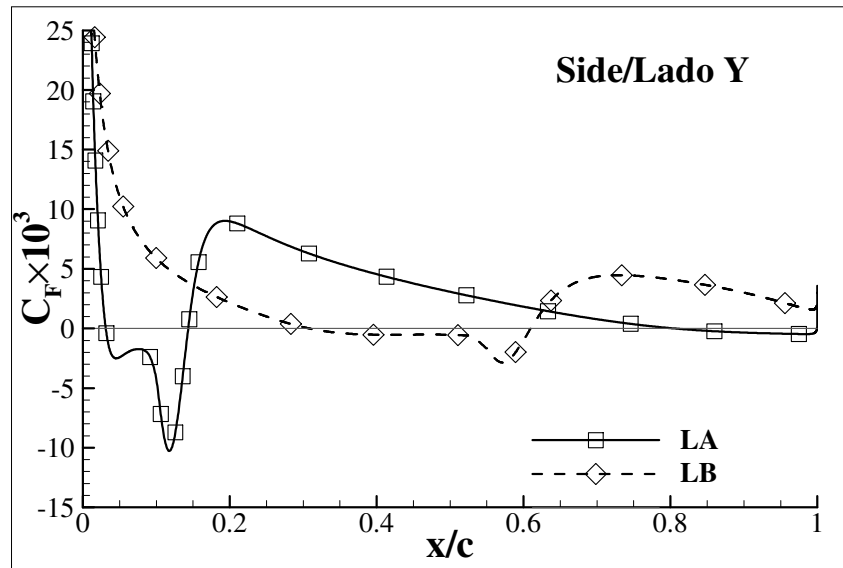


Figura 1b)

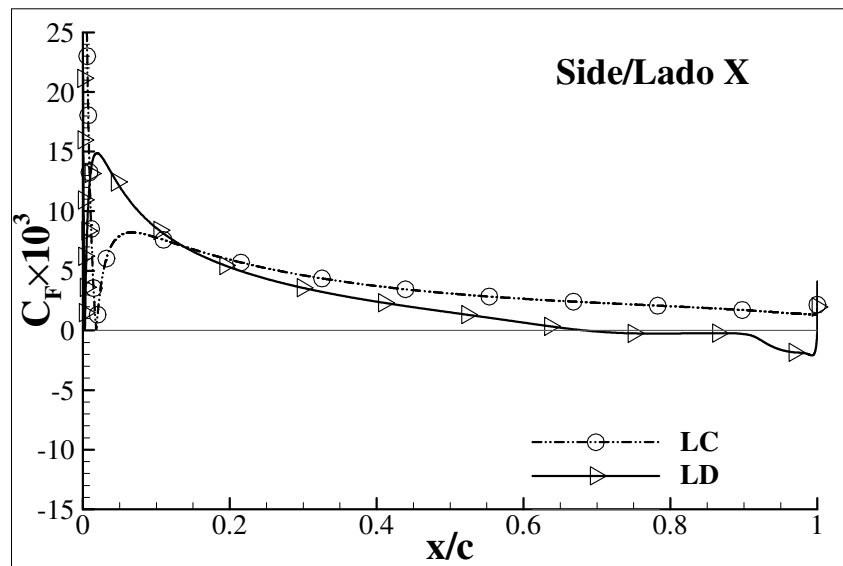


Figura 1c)

- b) Os coeficientes de força de sustentação, resistência, resistência de atrito e resistência de pressão para os dois ângulos de ataque são apresentados na tabela 1. Justifique **quantitativamente** qual o valor que corresponde a cada um dos coeficientes de força dos dois ângulos de ataque.

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
0,0057	0,0145	0,91	0,0223	0,40	0,0088	0,0286	0,0063

Tabela 1

- c) Será possível definir o centro aerodinâmico para esta gama de ângulos de ataque? Justifique a sua resposta.

4. Uma pequena aeronave que pesa 3kN tem uma asa com a mesma secção ao longo da envergadura, sem flecha, diedro e com uma área de $S = 8\text{m}^2$ e alongamento $\Lambda = 10$. A velocidade de cruzeiro a voar a altitude e velocidade constantes é igual a 144km/h. Admita em primeira aproximação que a força de resistência da aeronave se deve apenas à asa.

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

- a) Determine o coeficiente de sustentação à velocidade de cruzeiro.
- b) Determine a força de propulsão mínima à velocidade de cruzeiro admitindo que o coeficiente de resistência de perfil não varia com o ângulo de ataque.
- c) Considere a aeronave a voar com vento de traseira a 15km/h (a favor do movimento) mantendo a velocidade de 144km/h. Sabendo que a asa tem flaps simples e que se pretende manter voo a altitude constante, o que deverão fazer os flaps? Subir, manter-se inalterados ou descer? Como se altera a força de propulsão nestas condições?