

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTES NA FORMAÇÃO DE GELO NA BORDA DE ATAQUE DE UM AEROFÓLIO

Rafael A. da Silveira

Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC, Caixa Postal 476, 88040-000 Florianópolis SC, Brasil.
silveira@sinmec.ufsc.br

Clovis R. Maliska

Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC, Caixa Postal 476, 88040-000 Florianópolis SC, Brasil.
maliska@sinmec.ufsc.br

Resumo. *O objetivo deste trabalho é mostrar a influência dos parâmetros meteorológicos e atmosféricos na formação de gelo na borda de ataque de um aerofólio. O modelo físico usado para prever a formação de gelo é baseado no modelo do programa Lewice, desenvolvido na NASA. Este consiste de cinco etapas básicas: geração da geometria, solução do escoamento, cálculo das trajetórias das partículas de água que incidem no corpo, balanços de energia e massa para a obtenção das taxas de congelamento, e a modificação da geometria com a adição da espessura de gelo calculada. Como o escoamento é modelado como potencial, é necessário fazer um cálculo de camada limite para a obtenção do coeficiente de transferência de calor na superfície. Os parâmetros físicos que afetam os perfis de gelo são a velocidade, temperatura, conteúdo de água líquida e o diâmetro das partículas de água. Para cada parâmetro foram simulados quatro casos e alguns comentários são feitos acerca dos perfis de gelo obtidos.*

Palavras chave: formação de gelo, aerodinâmica, condições ambientes.

1. Introdução

Quando uma aeronave voa através de uma nuvem, partículas de água supergeladas aderem à estrutura, especialmente na borda de ataque das asas, formando uma lâmina de água sobre a superfície. Dependendo das condições meteorológicas, esta água congela, formando uma camada de gelo que afeta diretamente as características de sustentação da aeronave. Inicialmente, a solução do escoamento e o cálculo das trajetórias das partículas são feitos para a superfície limpa. As taxas de congelamento são determinadas por um balanço de massa e de energia em cada segmento que define a geometria. Finalmente, especificando um passo de tempo, a espessura de gelo é calculada e a geometria é então modificada. O procedimento é repetido para o próximo instante de tempo, iniciando com o cálculo do escoamento sobre a nova geometria e seguindo as demais etapas até que o tempo de cálculo desejado seja atingido.

As formas dos perfis de gelo que são obtidas estão diretamente ligadas às condições ambientes. Por isso, a intenção deste trabalho é verificar, isoladamente para cada caso, como estes parâmetros afetam estes perfis, de modo que a física do problema possa ser mais bem compreendida.

2. Formulação Matemática

Esta seção descreve o modelo utilizado para a previsão do processo de formação de gelo. O fenômeno físico em questão é complexo, especialmente quanto ao comportamento termodinâmico do sistema ar-água-gelo-superfície. Neste trabalho, apenas as equações mais importantes são fornecidas. A descrição do modelo físico com todas as suas equações pode ser encontrada em Silveira (2001-a).

2.1. Geração da Geometria

O primeiro passo é definir a geometria a ser analisada. Os aerofólios NACA das séries 4 e 5 dígitos (Mason, 2000) foram utilizados nas simulações. Na validação do modelo, que foi feita em Silveira (2001-a) e não é repetida aqui, foram utilizadas geometrias simples como placa plana, cilindros e elipses. A geração de malha não é necessária, pois neste modelo, o escoamento é resolvido pelo método dos painéis (Hess e Smith, 1967) que utiliza somente as coordenadas do corpo.

2.2. Solução do escoamento

O coeficiente de pressão, a distribuição de velocidade e a localização do ponto de estagnação são obtidos com o cálculo do escoamento. A equação governante dos escoamentos potenciais é a equação de Laplace, dada por

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

onde ϕ , neste caso, é a função potencial de velocidades. Esta equação é resolvida com o método dos painéis, que consiste em considerar a superfície como um conjunto de segmentos (painéis) e distribuir fontes e circulações

(escoamentos elementares) em cada painel. Este método é bastante conhecido e muito utilizado, principalmente na área aeronáutica, e não será apresentado aqui. Uma completa descrição deste método pode ser encontrada em Mason (2000) e Silveira (2001-a).

2.2.1. Cálculo da camada limite

Pelo fato de o escoamento ser potencial, faz-se necessário o cálculo da espessura da camada limite térmica para obter o coeficiente de transferência de calor em cada segmento. Os efeitos de turbulência são devidos às rugosidades decorrentes do acúmulo de água. Então, um modelo de turbulência é usado para contabilizar o aumento causado por este efeito no coeficiente de transferência de calor. O ponto de transição é encontrado calculando a seguinte expressão:

$$Re_k = U_k k_s / \nu \quad (2)$$

onde U_k é a velocidade na altura da rugosidade, k_s é a altura da rugosidade em cada painel e ν é a viscosidade cinemática do ar. Se Re_k for maior que 600, o ponto de transição foi encontrado.

Antes da transição, o escoamento é laminar. Nesta região, o método de Smith-Spalding (Shclighting, 1979) é usado. A espessura da camada limite térmica no centro de cada painel, neste caso, é dada por

$$\delta_t^2 = \frac{46.72\nu}{U^{2.87}} \int_0^x U^{1.87} dx \quad (3)$$

onde x é a coordenada superficial medida a partir do ponto de estagnação. O número de Nusselt pode ser obtido como

$$Nu_c(x) = 2c / \delta_t \quad (4)$$

onde c é a corda (comprimento da geometria). O número de Nusselt para o fluxo turbulento (Wright, 1995) é dado por

$$Nu_c(x) = \frac{(C'_f / 2) Re_x Pr}{Pr_t + (C'_f / 2)^{0.5} [0.52(Re_{k,r})^{0.45} Pr^{0.8}]} \quad (5)$$

onde Pr é o número de Prandtl para escoamento laminar, Pr_t é o número de Prandtl para escoamento turbulento e

$$Re_{k,r} = u_r k_s / \nu \quad (6)$$

onde

$$u_r = U(C'_f / 2)^{0.5} \quad (7)$$

O coeficiente de atrito, C'_f , é obtido a partir de

$$\frac{C'_f}{2} = \left[\frac{0.41}{\log(864\delta_2 / k_s + 2.568)} \right]^2 \quad (8)$$

e a espessura de momentum é dada por

$$\delta_2 = \frac{0.36\nu^{0.2}}{U^{3.29}} \left(\int_0^x U^{3.86} dx \right)^{0.8} \quad (9)$$

O modelo apresentado em Wright (1995) considera a altura da rugosidade como uma função do fator de molhamento, que é uma função do ângulo de contato da partícula com a superfície. Neste trabalho é feita uma simplificação: a altura da rugosidade é constante ao longo da superfície e o seu valor é um dado de entrada do programa. A influência desta simplificação é mostrada em Silveira (2001-a).

2.3. Trajetórias das Partículas

A localização do ponto onde as partículas atingem o corpo deve ser conhecida para o cálculo dos limites da região de impacto e da eficiência de coleta local. Para isso, suas trajetórias devem ser obtidas. Cada partícula é considerada como uma pequena esfera que não afeta o escoamento, mas que sofre o arrasto aerodinâmico, como mostra a Fig. (1).

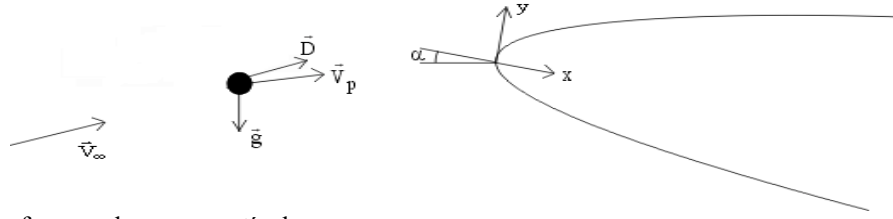


Figura 1. Balanço de forças sobre uma partícula

As equações do movimento para as trajetórias são dadas por

$$m\ddot{x} = -D \cos \gamma + mg \sin \alpha \quad (10)$$

$$m\ddot{y} = -D \sin \gamma - mg \cos \alpha \quad (11)$$

onde α é o ângulo de ataque e

$$\gamma = \tan^{-1}[(\dot{y}_p - v)/(\dot{x}_p - u)] \quad (12)$$

sendo (\dot{x}_p, \dot{y}_p) as componentes da velocidade da partícula e (u, v) as componentes da velocidade do escoamento na posição da partícula. O arrasto é definido como

$$D = C_d \rho_a V^2 A_p / 2 \quad (13)$$

onde V é a velocidade relativa da partícula em relação ao escoamento, A_p é a área projetada da partícula e ρ_a é a densidade do ar. O coeficiente de arrasto é definido pela seguinte relação, encontrada em White (1991):

$$C_d = \frac{24}{Re_{d_p}} + \frac{6}{1 + (Re_{d_p})^{0.5}} + 0.4 \quad (14)$$

onde d_p é o diâmetro da partícula e

$$Re_{d_p} = V d_p / \nu \quad (15)$$

Os limites da região de impacto são calculados com um processo iterativo. Inicialmente, é escolhida uma trajetória que atinge o corpo. A seguir, é escolhida outra trajetória que passa acima do corpo (para o limite superior). A trajetória intermediária entre estas duas é calculada. Se esta atingir a geometria, ela será a nova trajetória que atinge o corpo. Caso contrário, será a nova trajetória que passa acima do corpo. O processo é repetido com cálculo da trajetória intermediária até que a distância entre as posições iniciais da trajetória da partícula que atinge a geometria e a que passa acima dela seja menor que um valor especificado. Para o limite inferior, o processo é análogo.

A eficiência de coleta local representa a fração do conteúdo de água líquida capturada por aquela posição da superfície. Também representa o desvio sofrido pelas trajetórias devido à ação do escoamento.

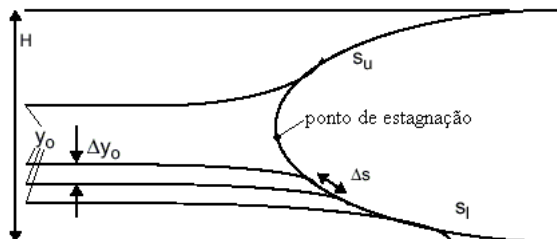


Figura 2. Limites da região de impacto e posição inicial das trajetórias

De acordo com a Fig. (2), o valor da eficiência de coleta local, β , é dada por

$$\beta = \Delta y_0 / \Delta s \quad (16)$$

onde s é a posição na superfície medida a partir do ponto de estagnação.

2.4. Modelo Termodinâmico

Para calcular as taxas de congelamento, balanços de energia e massa são realizados em volumes de controle localizados na superfície entre os limites da região de impacto. A superfície considerada é sempre a mais externa. Isto é, quando não há formação de gelo, é a superfície do corpo e quando há gelo, será a superfície do gelo. Quando as partículas aderem à geometria, uma fina camada de água é formada na superfície. Assim, os volumes de controle terão uma espessura muito pequena. Desta forma, o balanço de energia é considerado como superficial e a temperatura resultante, T_s , será a temperatura do filme de água que, após o balanço de massa, resultará na taxa de congelamento. Os balanços iniciam no segmento adjacente ao ponto de estagnação e avançam em direção ao limite da região de impacto, com um processo em marcha, para cada segmento nas superfícies superior e inferior.

2.4.1. Balanço de energia

Os fluxos de calor podem ser esquematizados como mostra a Fig. (3). Logicamente, cada um destes fluxos possui uma dedução matemática, porém, somente a forma final de cada equação será mostrada. Mais detalhes sobre a obtenção destas expressões podem ser encontrados em Wright (1995) e Silveira (2001-a).

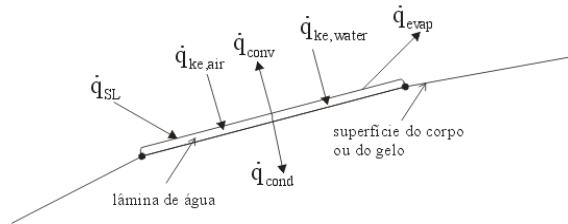


Figura 3. Balanço de calor

De acordo com a Fig. (3), a equação que descreve este balanço é escrita na forma

$$\dot{q}_{evap} + \dot{q}_{cond} + \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{ke,air} + \dot{q}_{ke,water} + \dot{q}_{SL} = 0 \quad (17)$$

O calor que é perdido por **evaporação** de água na superfície é dado por

$$\dot{q}_{evap} = \dot{m}_{evap} L_v \quad (18)$$

onde L_v é o calor latente de vaporização da água e

$$\dot{m}_{evap} = \frac{h_c}{c_{p,air}} \frac{MW_{water}}{MW_{air}} L^{-2/3} \left[\frac{P_{v,\infty}}{P_\infty} r_h - \frac{P_{v,s}}{P_o} \frac{T_o}{T_s} \left(\frac{P_o}{P_e} \right)^{1/\gamma} \right] \quad (19)$$

Aqui, h_c é o coeficiente de transferência de calor, $c_{p,air}$ é o calor específico do ar, MW é o peso molecular, L é o número de Lewis ($k/pc_p D_{AB}$), P_v é a pressão de vapor e r_h é a umidade relativa do ar. Os subscritos são: ∞ (condição ambiente), s (propriedade na superfície), e (propriedade na borda da camada limite) e o (propriedade total ou saturada).

A calor perdido por **condução** para o interior do aerofólio é obtido modelando o corpo como um sólido semi-infinito e assumindo que a temperatura da superfície exibe um salto no tempo inicial, dado pela temperatura de recuperação adiabática. Desta forma, o termo de condução é dado pela seguinte expressão:

$$\dot{q}_{cond} = -k(T_{rec} - T_s) / \sqrt{\pi \alpha t} \quad (20)$$

onde α e k são a difusividade e a condutividade térmica do material que compõe o aerofólio respectivamente, e

$$T_{rec} = T_\infty \{1 + r[(P/P_o)^{(1-\gamma)/\gamma} - 1]\} \quad (21)$$

é a temperatura de recuperação adiabática, sendo r o fator de recuperação dado por $Pr^{1/2}$ para a parte laminar e $Pr^{1/3}$ para a parte turbulenta do escoamento.

Os fluxos de calor **sensível e latente** são contabilizados considerando duas quantidades que devem ser somadas no balanço: a água do impacto das partículas e a água que escoou pela superfície. Se nenhuma água congela, há apenas calor sensível para a água atingir a temperatura final T_s . Esta parcela é expressa, para a água do impacto e para a água que escoou, por

$$\dot{q}_{SL} = \dot{m}_{imp} c_{p,water} (T_s - T_\infty) \quad (22)$$

$$\dot{q}_{SL} = \dot{m}_{rb,in} c_{p,water} (T_s - T_{rb}) \quad (23)$$

onde T_{rb} é a temperatura da água que escoo pela superfície vinda do painel anterior, \dot{m}_{imp} é o fluxo de massa do impacto das partículas e $\dot{m}_{rb,in}$ é o fluxo de massa da água que escoo vinda do painel anterior.

Se parte da água congela, há calor sensível para a água atingir a temperatura de congelamento ($T_{mp} = 273.15$ K) e calor latente para a solidificação. O total de calor sensível e latente, para as duas quantidades de água, é dado por

$$\dot{q}_{SL} = \dot{m}_{imp} \left[c_{p,water} (T_\infty - T_{mp}) + \left(c_{p,ice} T_{mp} \left(1 - \frac{\rho_{ice}}{\rho_{water}} \right) + c_{p,ice} \Delta T_m + L_f \right) \frac{T_{mp} + \Delta T_m - T_s}{\Delta T_m} \right] \quad (24)$$

$$\dot{q}_{SL} = \dot{m}_{rb,in} \left[c_{p,water} (T_{rb} - T_{mp}) + \left(c_{p,ice} T_{mp} \left(1 - \frac{\rho_{ice}}{\rho_{water}} \right) + c_{p,ice} \Delta T_m + L_f \right) \frac{T_{mp} + \Delta T_m - T_s}{\Delta T_m} \right] \quad (25)$$

onde L_f calor latente de fusão do gelo e ΔT_m é um pequeno intervalo no qual a água congela (próximo de 10^{-5}).

Finalmente, se toda a água congela, existem três termos a serem computados: calor sensível para a água atingir a temperatura de congelamento, calor latente durante a mudança de fase e calor sensível para o gelo atingir a sua temperatura final T_s . As expressões que representam estes fluxos para as duas parcelas de água são

$$\dot{q}_{SL} = \dot{m}_{imp} \left[c_{p,water} (T_\infty - T_{mp}) + c_{p,ice} T_{mp} \left(1 - \frac{\rho_{ice}}{\rho_{water}} \right) + c_{p,ice} (T_{mp} + \Delta T_m - T_s) + L_f \right] \quad (26)$$

$$\dot{q}_{SL} = \dot{m}_{rb,in} \left[c_{p,water} (T_{rb} - T_{mp}) + c_{p,ice} T_{mp} \left(1 - \frac{\rho_{ice}}{\rho_{water}} \right) + c_{p,ice} (T_{mp} + \Delta T_m - T_s) + L_f \right] \quad (27)$$

O termo $(T_{mp} + \Delta T_m - T_s)/\Delta T_m$ que aparece em Eq. (24) e Eq. (25) é definido como a fração de congelamento, que é substituído por uma função da temperatura, já que o balanço é realizado para determinar o valor de T_s . A fração de congelamento é a fração de água líquida que congela naquele painel. Se $N_f = 0$, nenhuma água congela. Se $N_f = 1$, toda a água congela e, se $0 < N_f < 1$, parte da água congela.

O **aquecimento cinético** que ocorre na superfície é devido a dois fatores: aquecimento devido ao atrito do ar e o aquecimento devido ao impacto das partículas. Estes fluxos são dados pelas seguintes expressões (Wright, 1995):

$$\dot{q}_{ke,air} = h(T_{rec} - T_\infty) \quad (28)$$

$$\dot{q}_{ke,water} = \dot{m}_{imp} V_\infty^2 / 2 \quad (29)$$

O calor perdido por **convecção** é dado por

$$\dot{q}_{conv} = h(T_\infty - T_s) \quad (30)$$

Substituindo todos estes fluxos na Eq. (17), a expressão resultante é uma equação não-linear para T_s , já que os demais parâmetros físicos dependem da temperatura. Esta equação é resolvida iterativamente, utilizando o método de Newton-Raphson. Somente um dos três pares de equações do fluxo de calor sensível e latente é usado, dependendo do valor da fração de congelamento. Reescrevendo a Eq. (17) como $F(T_s) = 0$, a temperatura é corrigida como

$$T_{new} = T_{old} - F(T_{old}) / (dF(T_{old}) / dT_{old}) \quad (31)$$

2.4.2. Balanço de Massa

Após a fração de congelamento ser obtida, um balanço de massa é realizado para obter-se as taxas de congelamento em cada segmento da superfície. Considerando a lâmina de água de temperatura T_s como um pequeno volume de controle, o balanço de massa pode ser esquematizado como mostra a Fig. (4).

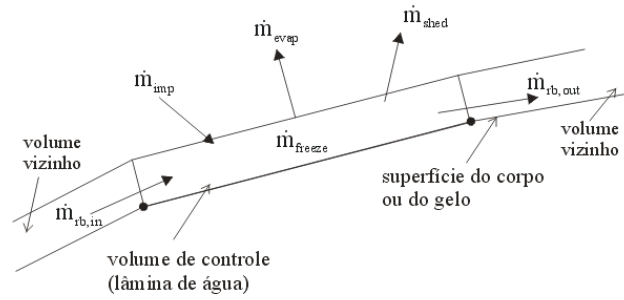


Figura 4. Balanço de massa

O fluxo de massa por **evaporação**, \dot{m}_{evap} , já foi definido no fluxo de calor por evaporação, e é dado pela Eq. (19). O fluxo de água do **impacto das partículas** pode também ser calculada independentemente, utilizando uma expressão dada em Sherif and Pasumarthi (1995), como

$$\dot{m}_{imp} = \beta V_{\infty} LWC \quad (32)$$

O fluxo de água que é **arrancado da superfície** devido à ação da força aerodinâmica, é calculado com base no número de Weber (Wright, 1995). Se este número, definido como

$$W_e = \rho U^2 L / \sigma \quad (33)$$

for maior que o valor crítico (500 é utilizado), a taxa de massa que é perdida neste processo é dada por

$$\dot{m}_{shed} = ((W_e - W_{e,c}) / W_e) (\dot{m}_{imp} + \dot{m}_{rb,in}) \quad (34)$$

Finalmente, a taxa de **congelamento** de água em cada painel pode ser escrita como

$$\dot{m}_{freeze} = N_f (\dot{m}_{imp} + \dot{m}_{rb,in} - \dot{m}_{shed} - \dot{m}_{evap}) \quad (35)$$

O total de água que não congela é considerado escoar para o próximo painel. Este fluxo será dado então por

$$\dot{m}_{rb,out} = (1 - N_f) (\dot{m}_{imp} + \dot{m}_{rb,in} - \dot{m}_{shed} - \dot{m}_{evap}) \quad (36)$$

Após calcular a taxa de congelamento em cada painel, a espessura de gelo, h , pode ser calculada especificando um passo de tempo e utilizando a seguinte expressão

$$h = \dot{m}_{freeze} \Delta t / \rho_{ice} \quad (37)$$

3. Resultados e Comentários

Esta seção descreve os resultados obtidos com o modelo para cada condição ambiente considerada. A validação completa do método pode ser encontrada em Silveira (2001-a) e Silveira (2001-b).

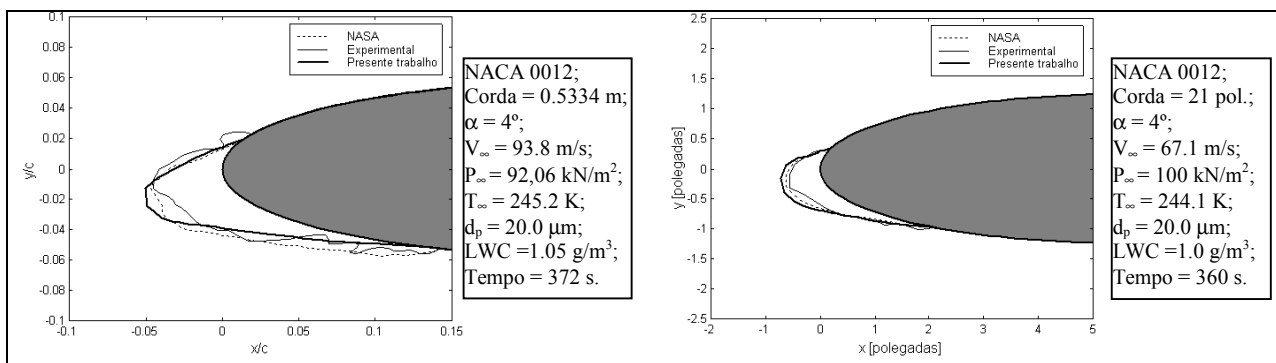


Figura 5. Validação do modelo

Nesta referência, são encontrados os resultados para o escoamento sobre um cilindro, placa plana e elipse, eficiência de coleta para o cilindro e perfis de gelo para aerofólios clássicos do tipo NACA. Estes resultados foram comparados com soluções analíticas e dados experimentais disponíveis na literatura. Apenas duas destas comparações serão apresentadas, mostrando parte da validação realizada. Na fig. (5), dois perfis de gelo para duas situações são mostrados juntamente com resultados experimentais e de resultados obtidos pelo programa “Lewice”, encontrados em Wright (1995) e Wright (1999), respectivamente. A seguir a influência dos parâmetros meteorológicos é apresentada.

3.1. Velocidade

A velocidade da corrente livre é o primeiro fator a ser analisado. Os quatro valores considerados são: 60 m/s, 80 m/s, 100 m/s e 120 m/s. Os demais parâmetros são: aerofólio NACA 0015, corda = 1m, $\alpha = 2^\circ$, $T_\infty = 255$ K, $P_\infty = 98$ kN/m², $LWC = 0.8$ g/m³, $d_p = 30\mu\text{m}$ e tempo de exposição = 8 minutos. Os resultados são mostrados na Fig. (6).

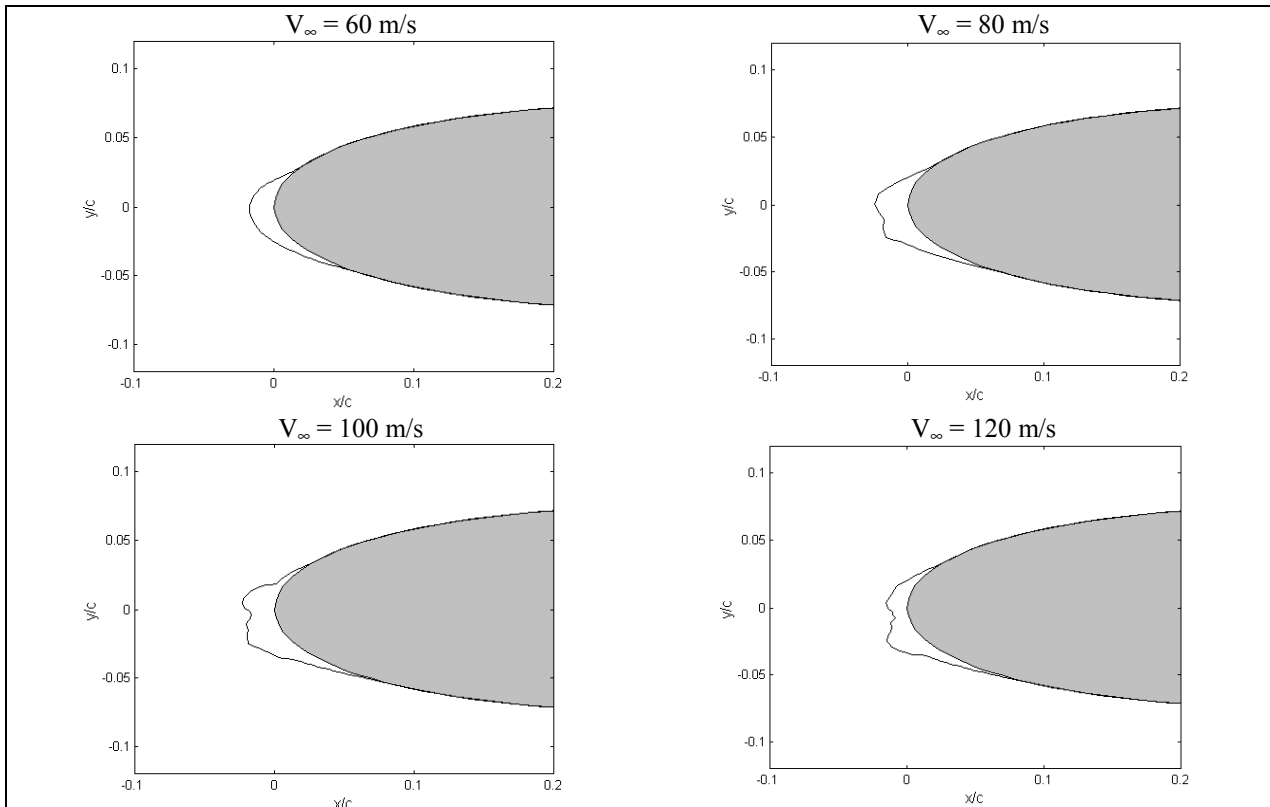


Figura 6. Influência da velocidade

A Fig. (6) mostra que, para as velocidades mais baixas (60 m/s), o perfil é do tipo liso, caracterizando uma formação do tipo “geada”, como definido em Wright (1995). Este tipo de gelo é opaco como neve, e ocorre quando as partículas congelam imediatamente ao impacto. Este perfil não afeta significativamente a sustentação. Entretanto, se a velocidade aumenta (80 m/s e 100 m/s), a espessura de gelo aumenta e começam a aparecer os “chifres de gelo”. Este tipo de formação é conhecido como “gelo cristalizado” e é bastante perigoso, pois a sua forma irregular afeta diretamente a sustentação. Para velocidades mais altas (120 m/s), a espessura de gelo começa a diminuir, pois aumenta o aquecimento da superfície devido ao atrito do ar e à energia do impacto das partículas. A quantidade de água que é arrancada da superfície também é maior, devido ao aumento da força aerodinâmica.

3.2. Temperatura

Os quatro valores utilizados são: 245 K, 255 K, 265 K e 270. Os demais parâmetros são os seguintes: aerofólio NACA 2412, corda = 1m, $\alpha = 5^\circ$, $V_\infty = 75$ m/s, $P_\infty = 95$ kN/m², $LWC = 0.8$ g/m³, $d_p = 30\mu\text{m}$ e tempo = 8 minutos. Para a temperatura ambiente, a Fig. (7) mostra que sua influência está mais diretamente ligada ao total de água que congela na superfície, embora a forma do perfil também seja afetada. Para temperaturas mais baixas (245 K e 255 K), a formação é predominante de gelo liso e enquanto a temperatura aumenta o total de água que congela diminui e os perfis são mais irregulares. Para temperaturas próximas à de congelamento (273.15 K), praticamente não ocorre formação de gelo, como mostrado no caso em que $T_\infty = 270$ K.

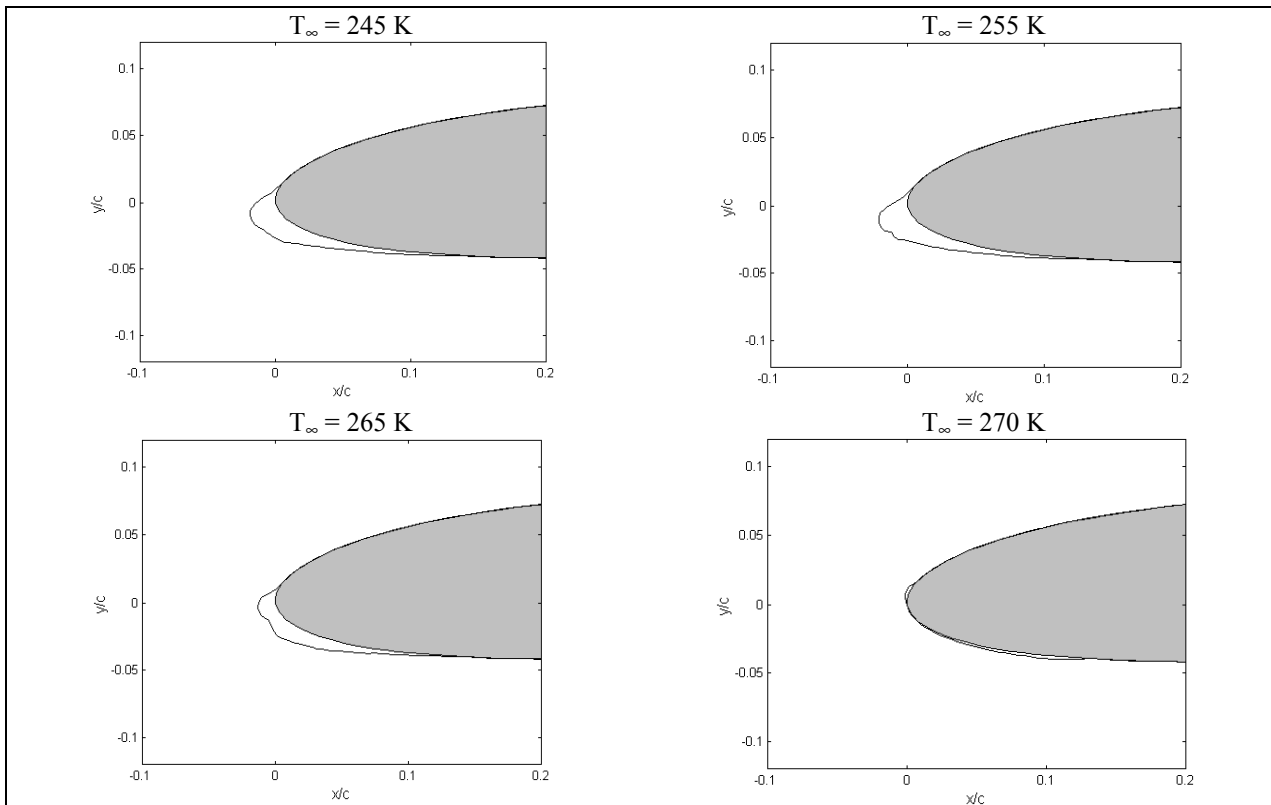


Figura 7. Influência da temperatura

3.3. LWC (Conteúdo de água líquida)

O conteúdo de água líquida, que é uma medida da quantidade de água líquida em um volume de ar úmido, é analisado nesta seção. Os quatro valores que foram simulados são: 0.3 g/m^3 , 0.7 g/m^3 , 1.0 g/m^3 e 1.5 g/m^3 .

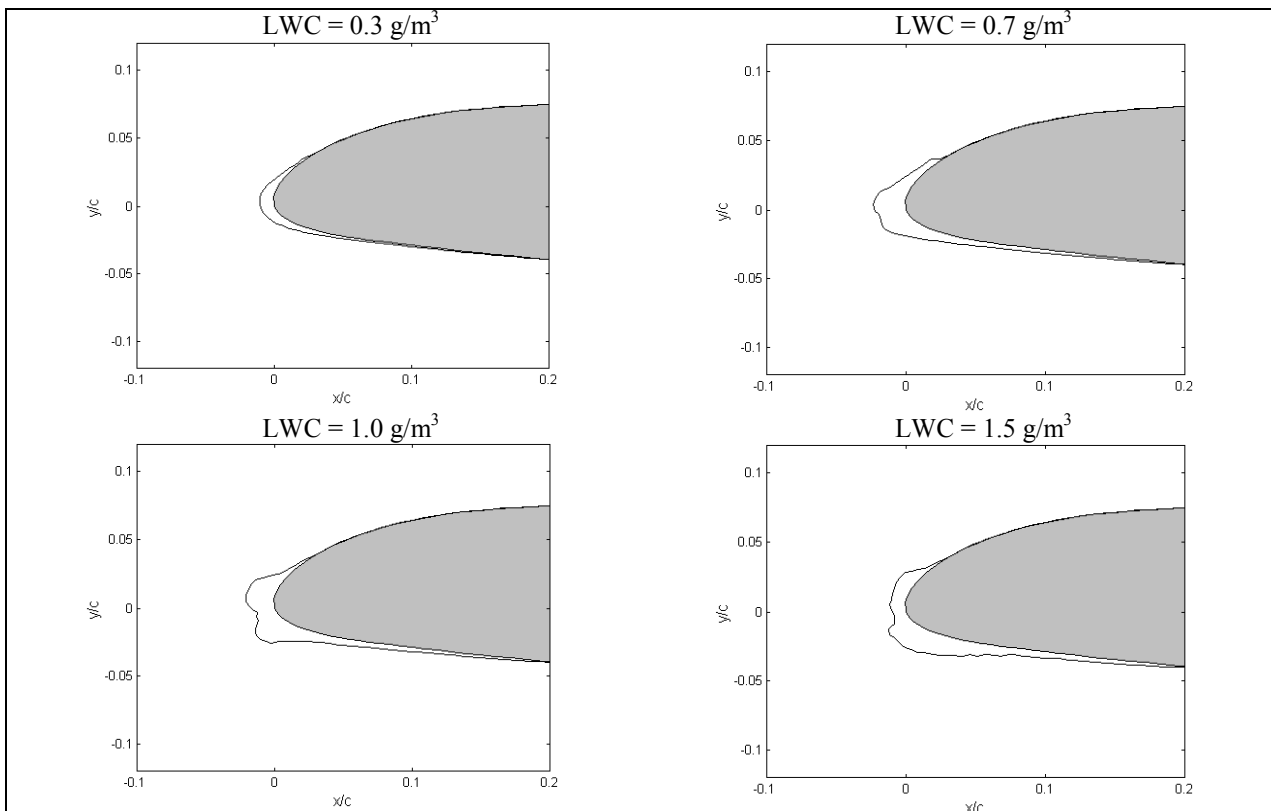


Figura 8. Influência do conteúdo de água líquida

As demais condições são as seguintes: aerofólio NACA 23012, corda = 1m, $\alpha = 3^\circ$, $V_\infty = 80$ m/s, $T_\infty = 260$ K, $P_\infty = 100$ kN/m², $d_p = 40$ μ m e tempo = 8 minutos.

O LWC é um parâmetro muito importante no processo de formação de gelo. A Fig. (8) mostra que este fator afeta tanto na quantidade de água que congela quanto na forma dos perfis. Para um LWC de 0.3 g/m³ (pequeno), a formação é de gelo liso e com pequena espessura. Quando seu valor aumenta, a espessura de gelo é maior e a forma do perfil se altera. Para 1.0 g/m³, os “chifres de gelo” aparecem e para um LWC de 1.5 g/m³ (bastante grande), a espessura de gelo diminui na parte frontal do aerofólio pelo fato de a água escoar em direção aos limites da região de impacto, principalmente para o limite inferior, já que existe um ângulo de ataque. De fato, o total de água que colide com o corpo depende diretamente do valor do LWC, como mostra a Eq. (32).

3.4. Diâmetro das partículas

O diâmetro das partículas afeta diretamente na localização dos limites da região de impacto e no total de água que congela na superfície. Por isso, sua influência é muito importante, já que uma maior ou menor região do aerofólio será afetada pela formação de gelo. Os quatro casos considerados são os seguintes: 20 μ m, 30 μ m, 40 μ m e 50 μ m. Os outros parâmetros são dados por: aerofólio NACA 0012, corda = 1m, $\alpha = 3^\circ$, $V_\infty = 80$ m/s, $T_\infty = 250$ K, $P_\infty = 100$ kN/m², LWC = 0.6 g/m³ e tempo de exposição = 7 minutos.

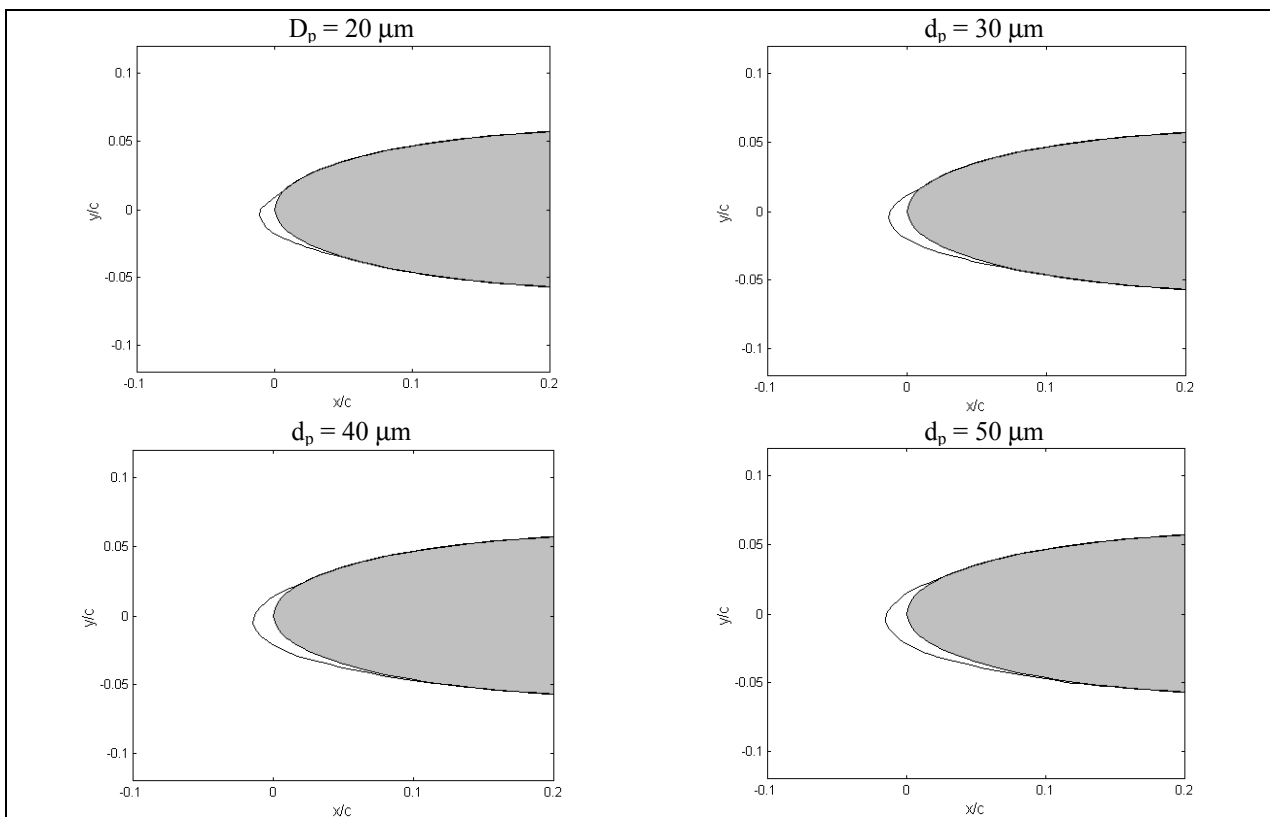


Figura 9. Influência do diâmetro das partículas

Como pode ser visto na Fig. (9), o diâmetro das partículas não afeta a forma do perfil de gelo. Para os quatro casos analisados, o perfil é de gelo liso, devido à influência das outras condições. Entretanto, o aumento do diâmetro faz com que a região de impacto aumente e a quantidade de gelo formado também fique maior. Isto se explica pelo fato que, quanto maior o diâmetro da partícula, menor será o desvio na sua trajetória e mais longe do ponto de estagnação será a posição dos limites da região de impacto, como no caso para 50 μ m. Além disso, o aumento da quantidade de gelo formado deve-se ao aumento da eficiência de coleta local e ao conseqüente aumento no total de água que colide com o corpo.

4. Conclusões

Os resultados da influência das condições ambientes coincidem com os relatos encontrados na literatura (Wright, 1995). Entretanto, não foi encontrado nenhum resultado gráfico que pudesse mostrar os efeitos destes parâmetros sobre os perfis de gelo. Por isso, este trabalho procurou confirmar, através das figuras, todas as explicações encontradas na bibliografia. Outros parâmetros, como passo de tempo, precisão numérica e refino da superfície poderiam também ser analisados.

O modelo aqui utilizado possui algumas simplificações em relação ao modelo usado no programa “Lewice” (Wright, 1995). No presente trabalho, o diâmetro das partículas é constante, simulação de vários corpos não é realizada e a distribuição das rugosidades também é constante. Apesar destas simplificações, os resultados são muito bons. A implementação de distribuições de partículas de vários tamanhos, vários corpos, outras funções para a previsão das rugosidades e a solução do escoamento pelas equações de Navier-Stokes estão em andamento e são parte de um projeto para construir um simulador de formação de gelo capaz de ser utilizado pela indústria aeronáutica.

As pesquisas realizadas sobre a formação de gelo em geral não são disponíveis de forma totalmente aberta. Nenhum modelo é disponível com detalhes suficientes e os códigos do programas existentes não são fornecidos. Na França e na Inglaterra, também existe muitos trabalhos nesta área, mas com pouca divulgação. Por isso a importância dos desenvolvimentos mostrados neste trabalho.

5. Lista de referências

Hess, J. L. and Smith, A. M. O., 1967, “Calculation of potential flow about arbitrary bodies”. Progress in Aeronautical Sciences, vol. 8, pp. 1-138.

Mason, W. H., 2000, “Applied Computational Aerodynamic Text/Notes”, Aces URL <http://www.aoe.vt.edu/facult/Mason_f>

Schlichting, H., 1979, “Boundary Layer Theory”, Ed. McGraw-Hill Inc., New York, USA, 816 p.

Sherif, S. A. and Pasumarthi, N., 1995, “Local heat transfer and ice accretion in high speed subsonic flow over an airfoil”, AIAA Paper 2104.

Silveira, R. A., 2001(a), “Simulação Numérica da Formação de Gelo na Borda de Ataque de Perfis Aerodinâmicos”, M.Sc Dissertation, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil, In Portuguese.

Silveira, R. A., 2001(b), “Numerical Simulation of Ice Accretion on the Leading Edge of Aerodynamic Profiles”, Proceedings of the II International Conference of Heat and Mass Transfer, Rio de Janeiro, Brazil.

White, F. M., 1991, “Viscous Fluid Flow”, Ed. McGraw-Hill Inc., New York, USA, 2 ed.

Wright, W. B., 1995, “Users manual for the improved NASA Lewis ice accretion code Lewice version 1.6”, NASA CR - 198355.

Wright, W. B., 1999, “Users manual for the NASA Glenn ice accretion code Lewice version 2.0”, NASA CR - 209409.

Wright, W. B., Gent, R. W. and Guffond, D., 1997, “DRA/NASA/ONERA collaboration on icing research part II – Prediction of airfoil ice accretion”, NASA CR – 202349.

Wright, W. B., Rutkowsky, A., “Validation Results for Lewice 2.0”, NASA CR – 208690, December 1999;

INFLUENCES OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON ICE ACCRETION ON THE LEADING EDGE OF AIRFOILS

Rafael A. da Silveira

Mechanical Engineering Department – UFSC, PO Box 476, 88040-000 Florianópolis SC, Brazil.
silveira@sinmec.ufsc.br

Clovis R. Maliska

Mechanical Engineering Department – UFSC, PO Box 476, 88040-000 Florianópolis SC, Brazil.
maliska@sinmec.ufsc.br

Abstract. *The objective of this work is to show the influence of the meteorological and atmospheric parameters in the ice accretion profiles. The physical model to predict the ice accretion is based on the Lewice (NASA) model. The procedure consist in five basic steps: geometry generation, flow solution, calculation of the droplets trajectories impinging on the body, heat and mass balances on the surface, to predict the freezing rates and the modification of the geometry by adding the calculated ice thickness. Since the flow is modeled as potential, a boundary layer calculation must be carried out to compute the heat transfer coefficient on the surface. The environmental parameters that affect the ice profiles are velocity, pressure, temperature, liquid water content and water droplets diameter. For each parameter, four cases were simulated.*

Keywords: ice accretion, aerodynamics, environment conditions.