

**MODELAMENTO SIMPLIFICADO DA FORMAÇÃO DE GELO EM UM
PERFIL AERODINÂMICO****Mateus Frois Santa Catarina**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Centro Técnico Aeroespacial
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo
12228-901
mateus@aer.ita.br

Olympio Achilles de Faria Mello

Instituto de Aeronáutica e Espaço
Centro Técnico Aeroespacial
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo
12228-904
oamello@directnet.com.br

Nide Geraldo do Couto Ramos Fico Júnior

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
Centro Técnico Aeroespacial
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo
12228-901
nide@aer.ita.br

Resumo. *Este trabalho analisa o problema da formação de gelo em perfis aerodinâmicos através de uma abordagem computacional. Em determinadas condições meteorológicas surgem nuvens contendo gotículas de água super-resfriada, ou seja, água líquida com temperaturas abaixo do ponto de solidificação. Um avião ao passar por entre essas nuvens fica sujeito à colisão dessas gotículas com suas partes frontais, bordo de ataque da asa, empenagens e entrada de ar dos motores. Ao colidirem, essas gotículas ou parte delas congelam e acumulam-se, modificando o formato externo dessas superfícies. Essa modificação causa uma degradação da eficiência aerodinâmica dessas partes. Para simular o crescimento do gelo foi feito um programa que calcula o escoamento, determina as trajetórias e respectivos pontos de impacto das gotículas assim como o acréscimo do gelo no perfil. O escoamento é determinado usando uma solução potencial obtida através do método dos painéis, sendo que não foram feitas correções de camada limite. Para a determinação do acréscimo de gelo foi considerado somente balanço de massa.*

Palavras chave: *formação de gelo em aeronaves, efeitos climáticos em aeronaves, segurança de voo.*

1. Introdução

A formação de gelo sobre superfícies de aeronaves tem sido uma preocupação crescente para projetistas aerodinâmicos (Sankar et al., 1993). Em determinadas condições meteorológicas surgem nuvens contendo gotículas de água super-resfriada (Bragg et al., 1993), ou seja, água líquida com temperaturas abaixo do ponto de solidificação. Um avião ao passar por entre essas nuvens fica sujeito a colisão dessas gotículas com suas partes frontais, bordo de ataque da asa, empenagens e entrada de ar dos motores. Ao colidirem, essas gotículas ou parte delas congelam e acumulam-se, modificando o formato externo dessas superfícies.

Essa modificação causa uma degradação da eficiência aerodinâmica dessas partes que pode levar a um acidente catastrófico. Portanto, o conhecimento de todo este processo se faz necessário para o aumento da segurança na aviação.

As condições mais propícias à formação de gelo ocorrem em latitudes altas, sendo especialmente um problema para a atividade aérea no hemisfério norte. Recentes acidentes aeronáuticos com aeronaves de transporte regional, em especial o acidente com a aeronave francesa ATR-42, em outubro de 1994, fizeram com que as empresas fabricantes de aeronaves que atuam neste mercado tivessem que se dedicar a novas análises do problema de formação de gelo e desempenho de aeronaves nestas condições.

Métodos computacionais para a previsão da formação de gelo se fazem portanto necessários. Existem basicamente três formas de fazer tal previsão:

- 1- Ensaios em voo;

- 2- Ensaios em túnel de gelo;
- 3- Métodos numéricos.

A primeira realiza medidas em vôo nas próprias nuvens contendo gotículas de água super-resfriadas. É um método caro pois tais nuvens (aquelas requeridas pela certificação) são difíceis de ser encontradas, consumindo portanto um grande esforço para poucos resultados. O ensaio em túnel de gelo é uma alternativa cara que deve ser usada somente se necessário for. Os métodos numéricos consistem na forma mais rápida e barata de fazer tais previsões, daí a necessidade do desenvolvimento de métodos numéricos precisos.

Nos últimos anos surgiram inúmeros métodos para a simulação da formação de gelo sendo o LEWICE o mais conhecido. Desenvolvido com o suporte de um dos centros de pesquisa da NASA (Lewis Research Center) este programa, cuja primeira versão (LEWICE 0.1) foi feita em 1983, sofreu diversas adaptações ao longo do tempo sendo que a última versão foi lançada em 1999 (LEWICE 2.0). O programa apresenta três blocos básicos: Cálculo do escoamento, cálculo das trajetórias das gotículas e cálculo do acréscimo de gelo.

O presente trabalho pretende desenvolver um programa computacional capaz de simular a formação de gelo em perfis aerodinâmicos através de um modelamento simplificado do problema.

2. Física do Problema

A formulação física do problema é bem conhecida:

Através das diversas medidas realizadas em nuvens com potencial para a formação de gelo sabe-se quais são as condições atmosféricas possíveis em tais ambientes. Ou seja, as distribuições dos diâmetros (d_g) das gotículas de água super-resfriada, o conteúdo de água líquida (LWC), a temperatura local que é igual à temperatura das gotículas (pois as mesmas estão em equilíbrio térmico), a densidade e a viscosidade do ar e a velocidade das gotas;

Considerando um perfil aerodinâmico imerso em um ambiente com potencial para formação de gelo e se deslocando com velocidade V , sabemos a princípio (antes que qualquer gelo seja formado) calcular o campo do escoamento nos seus arredores. Existem hoje métodos numéricos capazes de fazer esses cálculos com precisão.

Considerando uma partícula de água super-resfriada à montante em uma posição onde o escoamento não foi perturbado, as forças a que esta partícula será sujeita são o peso e o arrasto provocado pela velocidade do escoamento em relação à gota. Estas forças podem ser obtidas em cada posição assumida pela gota, ou seja, é possível calcular a trajetória das mesmas com grande precisão.

Após o cálculo das trajetórias das gotículas, é possível encontrar o ponto em que as mesmas vão colidir com o perfil, a velocidade de impacto, o ângulo de impacto, etc. Através de modelos que levam em conta balanços de massa, energia e influência do escoamento local, é possível simular o crescimento do gelo ao longo do perfil. Ao contrário do cálculo do escoamento e das trajetórias que podem ser realizados com precisão, estes modelos para o cálculo do acúmulo de gelo não permitem tal precisão devido à complexidade do problema. Uma gotícula de água super-resfriada colide com a parede, parte da gota pode congelar, parte da gota pode escorrer pela superfície e congelar mais adiante ou pode mesmo vir a ser arrancada pela força do escoamento. O crescimento dos cristais de gelo pode ter uma direção preferencial. Como será a troca de calor entre as partes e ainda qual deve ser a influência da tensão superficial da água no problema? Temos na superfície do perfil um conjunto de problemas complexos, inter-relacionados e ocorrendo em alta velocidade. Não existe um método exato para resolver tal problema, a maneira de se “resolver” é formulando modelos empíricos para o crescimento do gelo em função dos parâmetros conhecidos. Esses modelos devem ser calibrados através da comparação dos resultados da simulação com dados experimentais.

Dependendo da temperatura local, diâmetro das gotículas, conteúdo de água líquida e velocidade do escoamento, basicamente dois tipos de gelo podem formar:

- “Rime ice”- gelo de crescimento seco, ou seja, as gotículas de água que colidem com o perfil congelam quase que instantaneamente. Não existe água escorrendo pela superfície. Este tipo de gelo ocorre para temperaturas locais baixas (que permitem um rápido congelamento), pequenos diâmetros de gotículas (o que aumenta a velocidade de troca de calor pois a área de troca é maior em relação ao conteúdo energético, proporcional ao volume), baixos conteúdos de água líquida e baixa velocidade do escoamento (o que proporcionam um maior tempo para que as trocas de calor ocorram). Um exemplo das condições que levam a esse tipo de gelo é, $T = -10\text{ }^\circ\text{C}$, $LWC = 0,3\text{ g/m}^3$, $V = 60\text{ m/s}$. Este tipo de gelo apresenta um formato contínuo.
- “Glaze ice”- gelo de crescimento molhado, ou seja, parte das gotículas congelam ao colidirem com o perfil e parte escorre pela superfície, evapora ou é arrancada pelo escoamento. Ocorrem para temperaturas próximas do ponto de solidificação da água, grandes diâmetros de gotículas, grandes conteúdos de água líquida e grandes velocidades do escoamento. Apresentam um formato com pontas (“chifres”).

3. Metodologia do Presente Trabalho

O presente trabalho pretende desenvolver um programa computacional capaz de simular a formação de gelo em perfis aerodinâmicos. O modelamento utilizado será simples:

1. Método dos painéis de ordem 1 para o cálculo do escoamento (escoamento potencial), sendo que não serão feitas correções de camada limite;
2. Consideração de um único diâmetro (d) para as gotículas, ou seja, não será considerada uma distribuição de diâmetros;
3. Não será realizado balanço de energia para o cálculo do acréscimo de gelo, será feito apenas balanço de massa considerando que a gota adere à superfície do perfil em seu ponto de impacto.

Esta metodologia é ilustrada na Figura 1. Como pode ser visto, devido à simplicidade do modelo adotado, o mesmo somente poderá ser usado para a simulação da formação de gelo seco (“rime ice”).

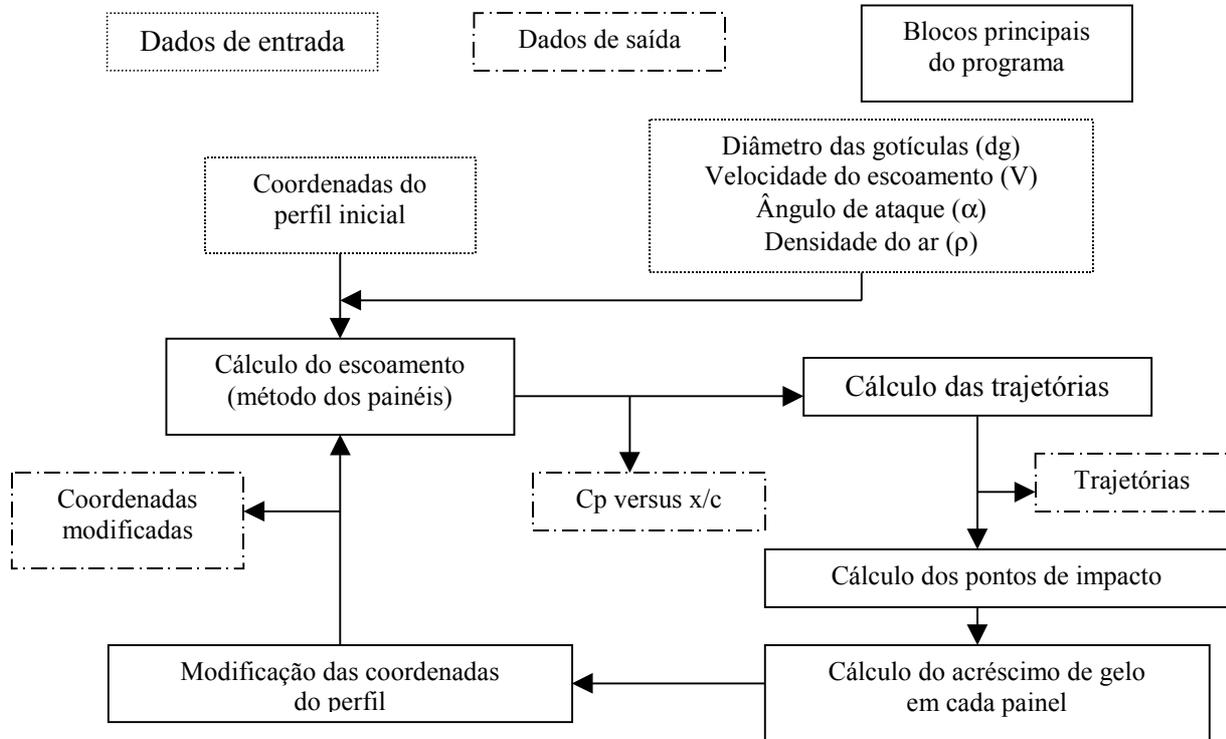


Figura 1. Metodologia utilizada.

3.1. Cálculo do campo de escoamento

Para o regime subsônico de baixa velocidade considerado, foi adotada a aproximação de escoamento incompressível e não viscoso. Para o cálculo do escoamento foi utilizada portanto uma solução potencial governada pela equação de Laplace e resolvida através do método dos painéis. O método considera escoamentos elementares (fontes e vorticidades) distribuídos em cada painel. A intensidade é considerada constante ao longo de cada painel (método dos painéis de ordem 1).

3.2. Cálculo das trajetórias das gotículas

Obtidos os valores das fontes e vorticidades elementares de cada painel, pode-se calcular a velocidade do escoamento em qualquer ponto. Desta forma é possível determinar a trajetória das gotículas. Para tanto são feitas as seguintes considerações (Fig. 2):

1. Considera-se que as gotas estão inicialmente paradas em relação ao escoamento não perturbado;
2. Todas as gotas apresentam o mesmo diâmetro;
3. Considera-se que o escoamento não é influenciado pela presença das gotas;
4. Considera-se que a gota apresenta formato esférico, mantendo este formato assim como suas dimensões ao longo da trajetória;
5. As forças às quais a gota esta sujeita são devidas ao peso e ao arrasto provocado pela velocidade do escoamento em relação à gota (Vr).

A metodologia de cálculo da trajetória é ilustrada na Fig. 3.

Para a determinação da velocidade final e deslocamento da gota em cada interação é necessário um incremento de tempo arbitrário. Adotou-se $\Delta t = c / (100V)$. Com esse valor obtém-se aproximadamente 100 pontos a cada corda de comprimento da trajetória.

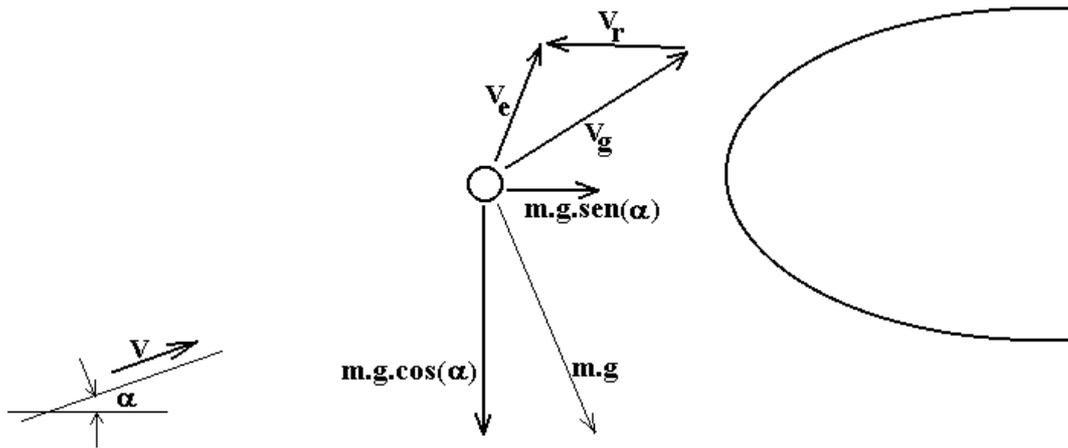


Figura 2: Exemplo de situação da gota em determinado ponto de sua trajetória

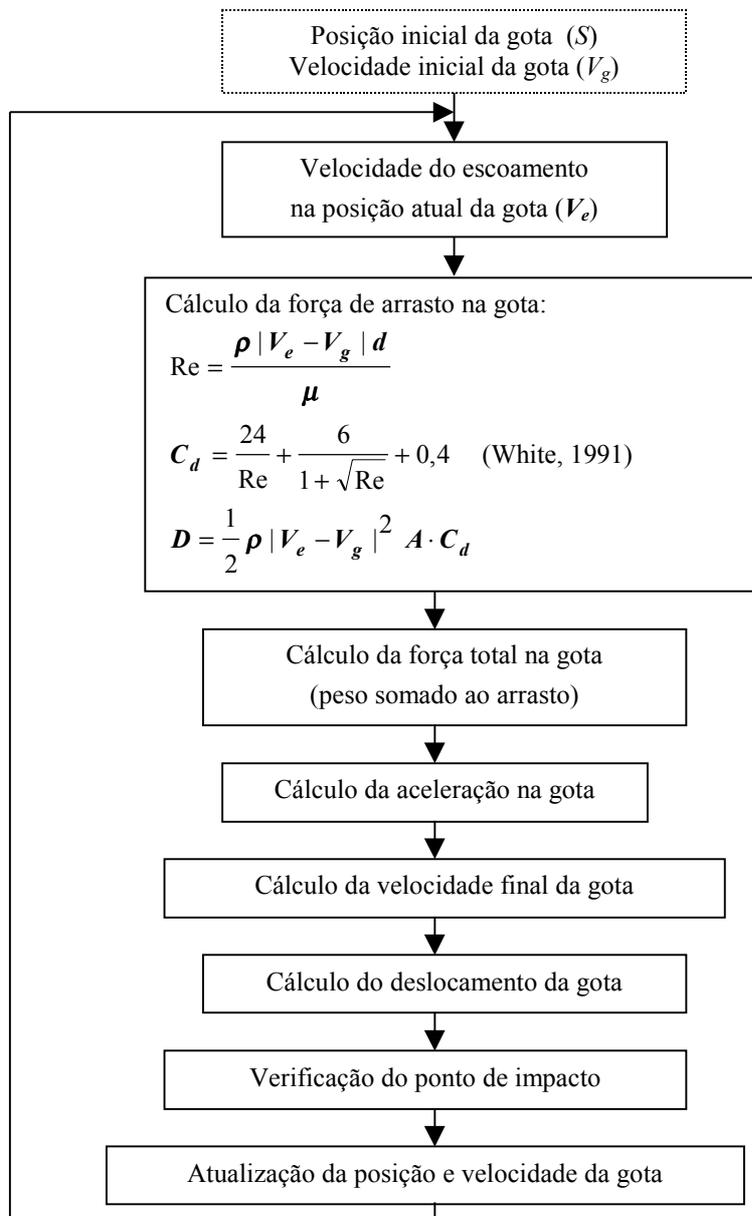


Figura 3: Metodologia de cálculo da trajetória

A cada novo ponto da trajetória obtido era feita a verificação do ponto de impacto, assunto que será tratado a seguir.

3.3. Cálculo dos pontos de impacto

Para a determinação do ponto de impacto adotou-se um método ilustrado pela figura 4. Quando a gotícula ultrapassa a linha denominada “início da verificação” de acordo com a figura 4, a cada nova posição da partícula é verificada a distância entre a gotícula e cada ponto do perfil. Quando pelo menos um ponto do perfil ficar dentro de um chamado “raio de decisão” em torno da gotícula é feito a determinação do ponto de impacto. Neste trabalho, utilizou-se um “raio de decisão” de 0,5% da corda. Considera-se a “reta tangente ao perfil” como a reta que contém o painel mais próximo e como a “reta de tendência da gota” a reta obtida do prolongamento da trajetória. A intersecção dessas duas retas é considerado o ponto de impacto. Verifica-se qual o painel é o mais próximo do ponto de impacto e considera-se que a gotícula colidiu neste painel.

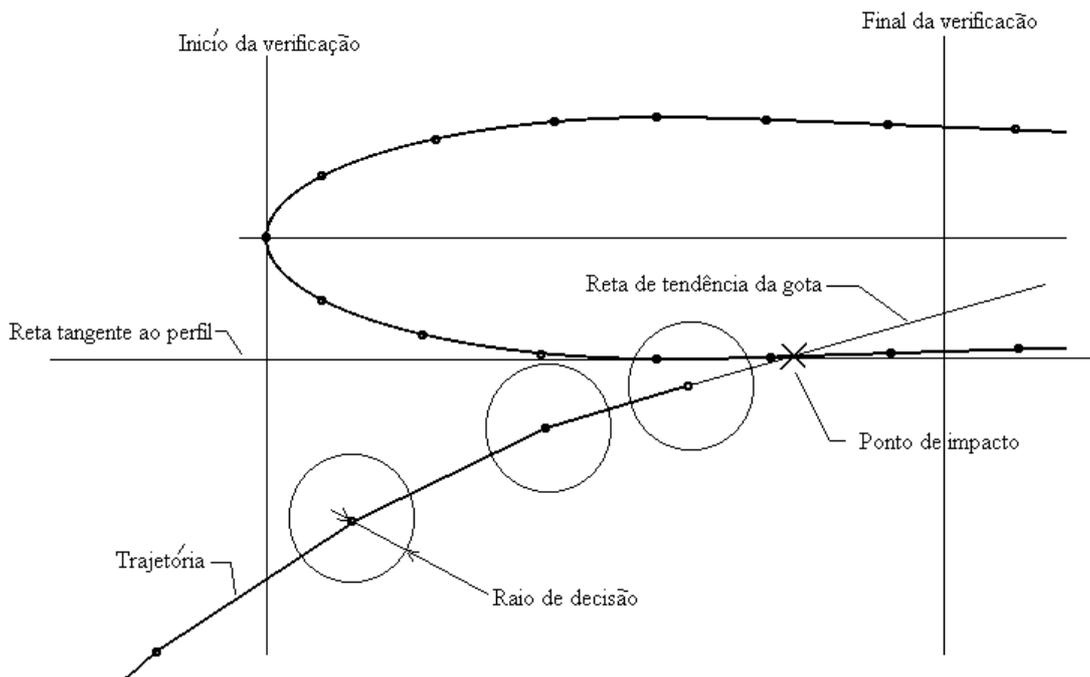


Figura 4: Ilustração do método usado para encontrar o ponto de impacto

3.4. Cálculo do Acréscimo de Gelo em cada Painel

O cálculo do acréscimo de gelo em cada painel foi feito baseado no número de gotículas que colidem nos mesmos. Para que este método apresente bons resultados é necessário que o número de gotículas seja consideravelmente maior que o número de painéis. Como a trajetória de cada gotícula deve ser determinada e tal determinação consome um tempo de processamento considerável, não é interessante usar um número muito grande de gotículas. A solução encontrada para resolver esse impasse foi adotar painéis maiores (e conseqüentemente em menor número) para o cálculo do acréscimo. Considerou-se que cada cinco painéis que formam o perfil equivalem a um painel usado para o cálculo do acréscimo.

As gotas são “soltas” (vide Fig. 5) em intervalos de distância (ds) e, baseado no número de gotas que colidem no painel i , ($n_g(i)$) de comprimento $S_p(i)$ assim como no tempo de exposição do perfil às gotas (t_e) é possível, fazendo um balanço de massa, calcular o acréscimo de gelo no painel i , $h(i)$:

$$h(i) = \frac{LWC \cdot V \cdot ds \cdot t_e \cdot n_g(i)}{\rho_i \cdot S_p(i)} \quad (1)$$

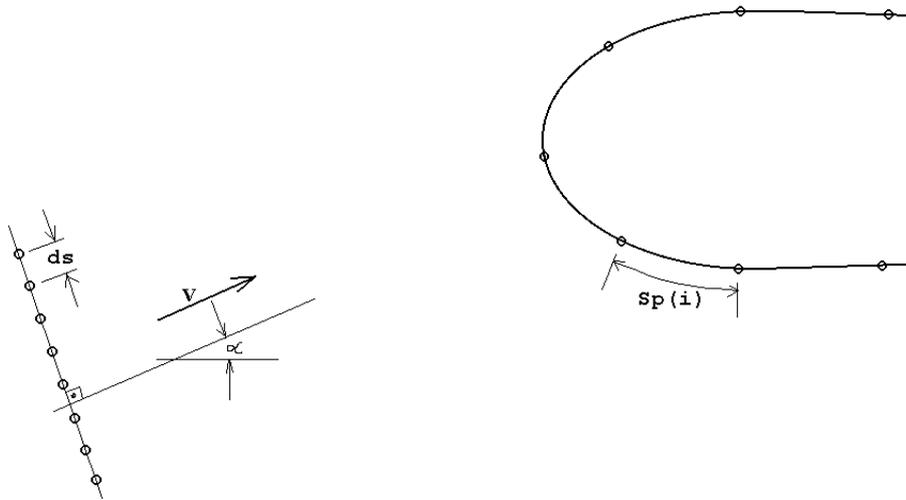


Figura 5: Ilustração das posições de soltura das gotas

3.5. Modificação das Coordenadas do Perfil

Calculados os acréscimos de gelo em cada painel, deve-se fazer a modificação dos pontos do perfil para que os mesmos assumam as posições correspondentes à nova geometria. Essa nova geometria é usada para fazer o novo cálculo do escoamento, dando seqüência ao processo iterativo que simula o processo físico real.

Cada deslocamento dos pontos do perfil é determinado através de uma interpolação linear das alturas de cada painel conforme ilustra a figura 6. Estes deslocamentos (valores numéricos) são feitos na direção da bissetriz dos painéis vizinhos ao ponto em questão, conforme ilustra a figura 7.

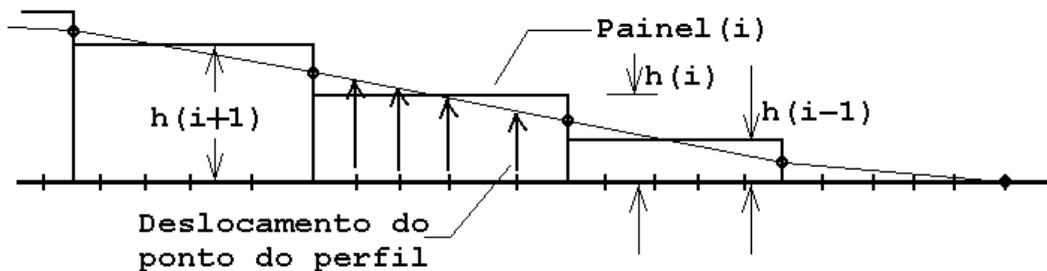


Figura 6: Ilustração do modo como foi determinado o deslocamento de cada ponto do perfil

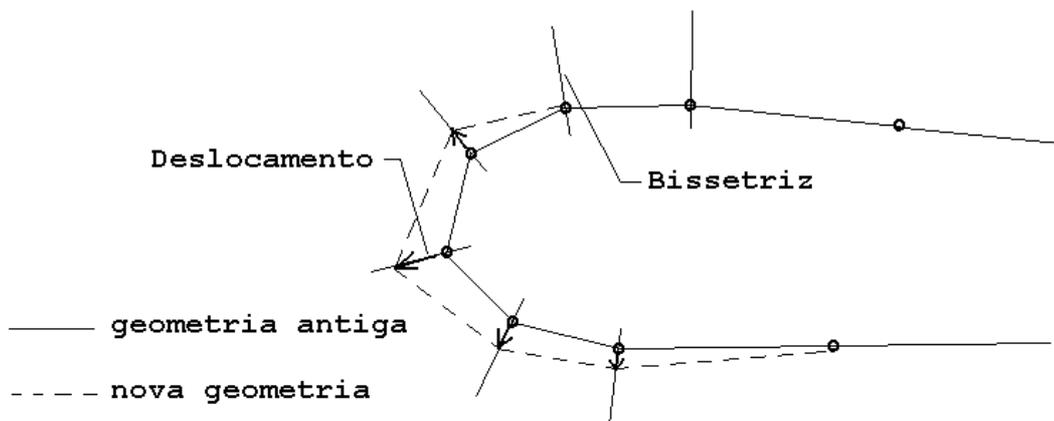


Figura 7: Modo como são feitos os deslocamentos dos pontos do perfil

4. Resultados e Discussões

O método descrito acima foi aplicado a um perfil NACA 0012. Inicialmente, foi conduzida uma análise paramétrica em função do ângulo de ataque, velocidade do escoamento, conteúdo de água líquida e diâmetro das gotículas, obtendo-se resultados coerentes. A variação na formação do gelo em relação ao diâmetro das gotículas é mostrada nas figuras 8 a 10. Pode-se observar que conforme se aumenta o diâmetro das gotículas estas tendem a desviar menos, apresentar trajetórias mais retilíneas. Com isso acontecem duas conseqüências principais: a quantidade de gotas que colidem aumenta conforme se aumenta o diâmetro e o espalhamento é maior para diâmetros maiores.

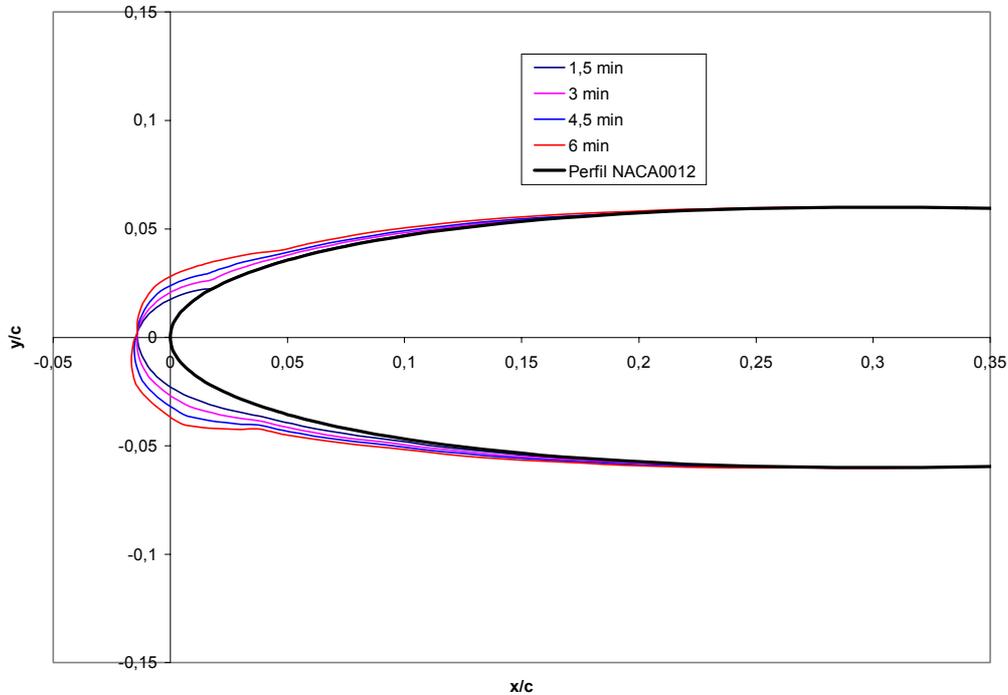


Figura 8: Acréscimo de gelo computado para $V = 90$ m/s; $d = 20\mu\text{m}$; e $\alpha = 5^\circ$; $c = 1$ m; $LWC = 1\text{g/m}^3$

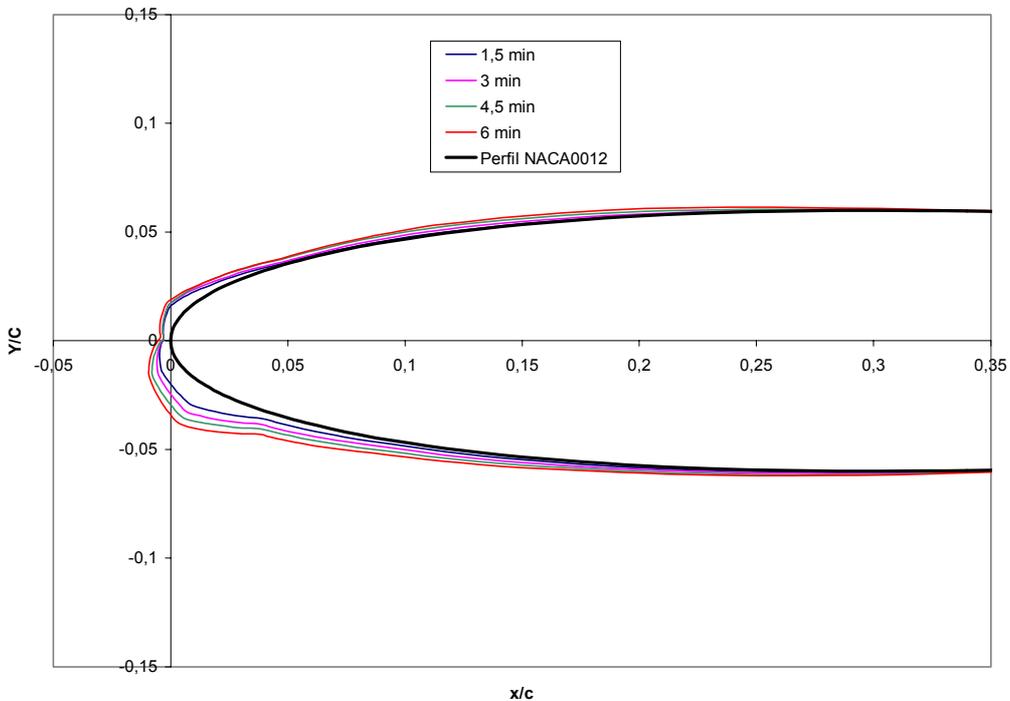


Figura 9: Acréscimo de gelo computado para $V = 90$ m/s; $d = 50\mu\text{m}$; e $\alpha = 5^\circ$; $c = 1$ m; $LWC = 1\text{g/m}^3$

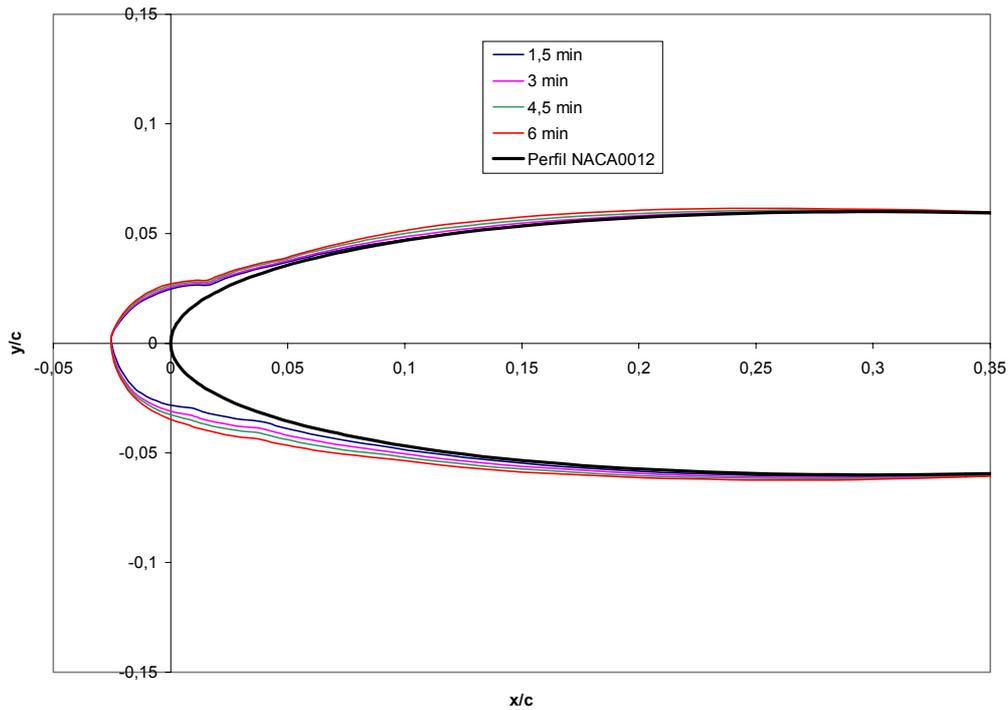


Figura 10: Acréscimo de gelo computado para $V = 90$ m/s; $d = 90$ μm ; e $\alpha = 5^\circ$; $c = 1\text{m}$; $LWC = 1$ g/m^3

Uma comparação com resultados experimentais (Mingione & Brandi, 1998) é mostrada na Fig. 11. Pode-se observar que o método adotado no presente trabalho prevê um acréscimo de gelo maior que o obtido experimentalmente. Isto pode ser atribuído a não ter sido considerado o balanço de energia, o que resulta em que, no presente trabalho, todas as gotículas que atingem a superfície congelam. Deve ser observado também que o método apresenta bastante sensibilidade a determinados parâmetros assumidos, como o "raio de decisão" dentro do qual se considera que a gotícula impactará a superfície.

Uma comparação com resultados experimentais e computacionais – estes utilizando o programa LEWICE 2.0 (Wright & Rutkowski, 1999) é apresentada na figura 12. Novamente, o presente método prevê um acréscimo de gelo maior que o resultado experimental, por sinal bastante próximo ao resultado do LEWICE 2.0. Além disso, o presente método não reproduz bem a formação de uma "ponta" de gelo no bordo de ataque.

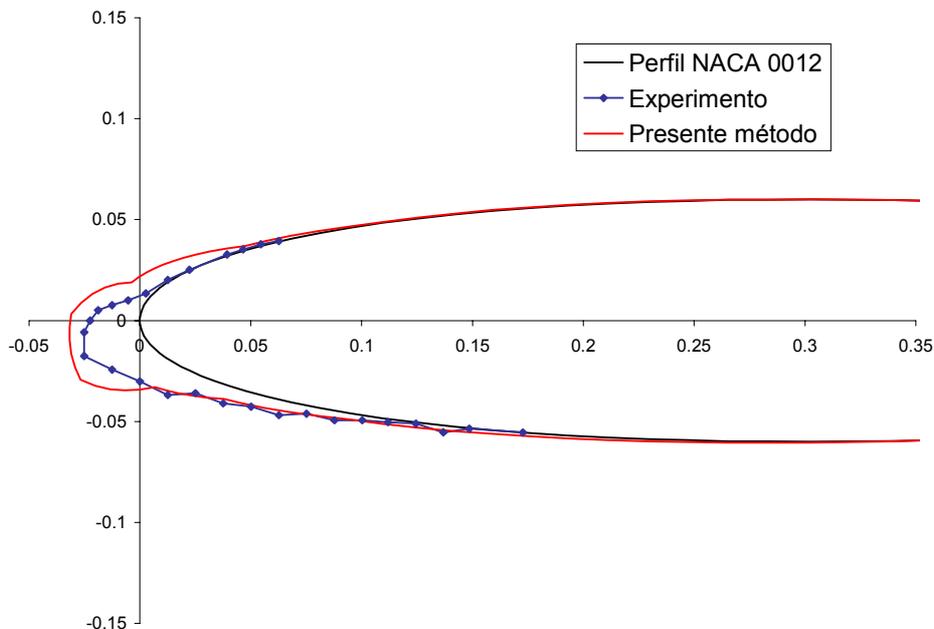


Figura 11: Comparação dos resultados com dados experimentais (Mingione & Brandi, 1998). $T = -28,4$ $^\circ\text{C}$; corda = $0,5334$ m; $V = 67,05$ m/s; $d = 20$ μm , $\alpha = 4^\circ$; $LWC = 1$ g/m^3 e tempo de exposição do perfil igual a 6 min.

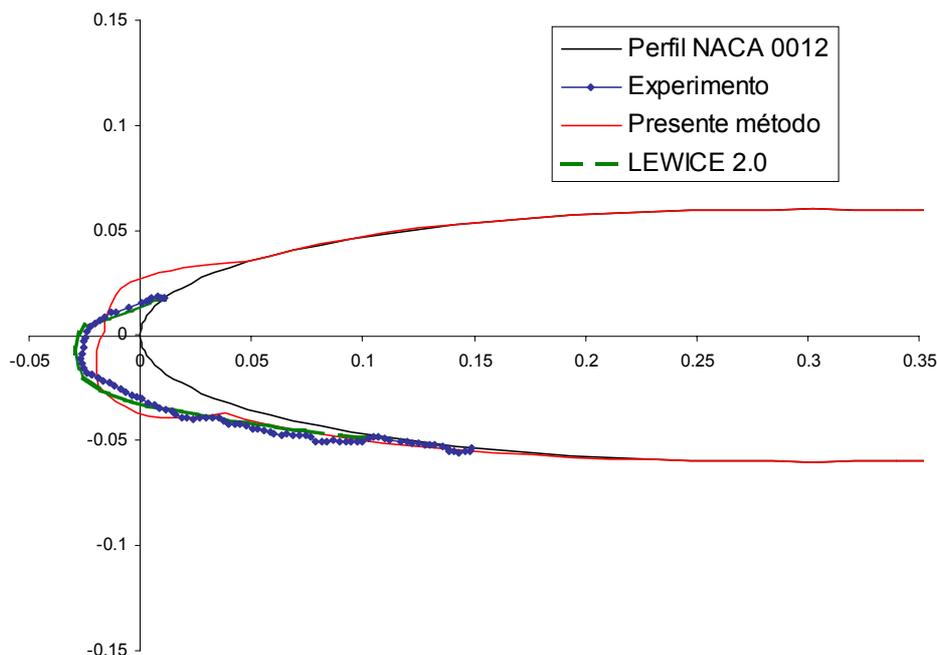


Figura 12: Comparação dos resultados com dados experimentais e computacionais (Wright & Rutkowski, 1999). $T = 250,37$ K; corda = 0,5334 m; $V = 102,8$ m/s; $d = 20$ μm , $\alpha = 4^\circ$; $LWC = 0,55$ g/m³ e tempo de exposição do perfil igual a 7 min.

5. Conclusões

Foi desenvolvido um programa para a simulação do acréscimo de gelo em perfis aerodinâmicos. O programa permitiu fazer um estudo paramétrico qualitativo da influência de alguns parâmetros determinantes no processo de formação de gelo que são a velocidade do escoamento, o ângulo de ataque, o conteúdo de água líquida e o diâmetro das gotas. Efeitos de temperatura não puderam ser estudados devido à simplicidade do modelamento utilizado.

Durante o desenvolvimento do programa foram encontrados problemas numéricos sendo que o maior foi a implementação do processo de crescimento de gelo. Foram tentadas algumas alternativas sendo que a mostrada neste trabalho foi a que apresentou os melhores resultados.

Foram feitas apenas duas comparações dos resultados do programa e dados experimentais. Na segunda comparação, foi também considerado um resultado computacional obtido com o programa LEWICE 2.0. Pôde-se observar que o método adotado no presente trabalho prevê um acréscimo de gelo maior que o obtido experimentalmente. Isto pode ser atribuído à não inclusão do balanço de energia no modelamento. Outro fator observado foi a sensibilidade do método a determinados parâmetros assumidos, como o “raio de decisão” dentro do qual se considera que a gotícula impactará a superfície. Sugere-se que para futuros trabalhos seja feito um estudo da sensibilidade aos parâmetros assumidos, de forma a verificar se o método pode ter seus parâmetros ajustados para aplicações genéricas. Um fator fundamental que deverá ser considerado no prosseguimento deste trabalho é o efeito do congelamento parcial das gotículas, possivelmente levando em conta o balanço de energia, que foi desconsiderado neste trabalho.

6. Agradecimentos

O segundo autor foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo n.º 350.270/00-7.

7. Referências

- Abbott, I. H.; von Doenhoff, A. E., 1949, “Theory of Wing Sections,” McGraw-Hill Book Company, New York.
 Anderson, J. D., Jr., 1991, “Fundamentals of Aerodynamics,” McGraw-Hill, Inc., 2. ed..
 Bragg, M. B., Kerho, M. F., Khodadoust, A., 1993, “LDV Flowfield Measurements on a Straight and Swept Wing with a Simulated Ice Accretion,” AIAA Paper 93-0300, AIAA 31st Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada.
 Mingione, G., Brandi, V., 1998, “Ice Accretion Prediction on Multielement Airfoils,” Journal of Aircraft, Vol.35, No.2.

- Sankar, L. N., Kwon, O. J., Bangalore, A., Phaengsook, N., Mello, O. A. F., 1993, "Effects of Icing on the Performance of Lifting Surfaces," 1st Bombardier International Workshop – Aircraft Icing/Boundary-Layer Stability and Transition, Montréal, Québec, Canada.
- Silveira, R. A., 2001, "Simulação Numérica da Formação de Gelo na Borda de Ataque de Perfis Aerodinâmicos," Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.
- White, F. M., 1991, "Viscous Fluid Flow," New York: Mc Graw Hill, Inc., 2. ed.
- Wright, W. B., & Rutkowski, A., 1999, "Validation Results for LEWICE 2.0", NASA CR-1999-208690, NASA Lewis Research Center.

A SIMPLIFIED MODEL FOR ICE ACCRETION OVER AN AIRFOIL

Mateus Frois Santa Catarina

Aeronautics Technological Institute
Aerospace Technical Center
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo, Brazil
12228-901
mateus@aer.ita.br

Olympio Achilles de Faria Mello

Institute of Aeronautics and Space
Aerospace Technical Center
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo, Brazil
12228-904
oamello@directnet.com.br

Nide Geraldo do Couto Ramos Fico Júnior

Aeronautics Technological Institute
Aerospace Technical Center
Praça Mal. Eduardo Gomes, nº 50
São José dos Campos, São Paulo, Brazil
12228-901
nide@aer.ita.br

Abstract. *This work analyzes ice accretion over airfoils using a computational approach. Under certain meteorological conditions, clouds contain super-cooled water droplets, that is, liquid water at temperatures below freezing. An airplane flying through such clouds is subjected to the collision between these droplets and its frontal surfaces, such as wing leading edge, empennages and engine air intakes. When such collisions occur, those droplets - or a portion of them - freeze and accumulate, which changes the shapes of the airplane surfaces. This change causes a degradation in aerodynamic performance. In order to simulate the ice growth, a computer program has been developed which computes the flow field, determines the droplets' trajectories, their points of impact and the ice accretion over the airfoil. The flow field is determined using a panel method potential solution, without boundary layer corrections. In the determination of the ice accretion, only mass balance has been considered.*

Keywords: *ice accretion over aircraft, weather effects on aircraft, flight safety.*