



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FORMAÇÃO DE**  
**GELO COM MODELO DE RUGOSIDADE EM**  
**PERFIS AERODINÂMICOS**

Dissertação submetida à  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
para a obtenção do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CARLOS NEWMAR DONATTI**

**Florianópolis, dezembro de 2007**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FORMAÇÃO DE GELO COM MODELO DE RUGOSIDADE EM PERFIS AERODINÂMICOS**

**CARLOS NEWMAR DONATTI**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA**

Especialidade Engenharia Mecânica, sendo aprovada em sua forma final.

---

**Prof. Clovis Raimundo Maliska, Ph. D. – *Orientador***

---

**Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr. Eng. – *Co-Orientador***

---

**Prof. Fernando Cabral, Ph. D. – *Coordenador do Curso***

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. José A. Bellini da Cunha Neto, Dr. – *Presidente***

---

**Prof. Jader Riso Barbosa Junior, Ph.D.**

---

**Prof. Amir Antônio Martins Oliveira Jr., Ph.D.**

**À minha amada mãe e  
à Karime.**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores Clovis Raimundo Maliska e António Fábio Carvalho da Silva pela grandiosa orientação, pelo apoio prestado e pela confiança depositada em mim.

Aos colegas do Sinmec pelo companheirismo e pelo excelente ambiente de convívio, em especial à Elisa N. Formentin, ao Jaime Ambrus e ao Gerson Bridi, que tiveram influência direta no meu trabalho.

Ao pesquisador visitante Axel Dihlmann e à secretária Tatiane pela constante colaboração relacionada às atividades no Sinmec.

A CAPES pelo financiamento deste trabalho mediante uma bolsa de estudos e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica por ter dado condições para a realização do curso de mestrado.

À empresa Embraer S.A., pelo apoio técnico durante o Projeto CFD Embraer, o qual motivou o trabalho de pesquisa da presente dissertação.

Aos amigos que sempre me deram força e apoio.

E, principalmente, à minha mãe, à minha prima e à Karime, que sempre me apoiaram e confiaram em minha capacidade. Muito obrigado também pelo amor e carinho.

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	vii
SIMBOLOGIA .....	viii
RESUMO .....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Revisão Bibliográfica.....	5
1.2 Motivação .....	10
1.3 Objetivo .....	11
1.4 Organização do Trabalho.....	11
2 FENÔMENO FÍSICO .....	12
2.1 Regimes de Formação de Gelo .....	15
2.1.1 Regime Seco.....	15
2.1.2 Regime Úmido .....	15
2.1.3 Regime Misto .....	16
2.2 Regimes de Não Formação de Gelo .....	16
2.2.1 Regime Líquido .....	16
2.2.2 Regime Evaporativo.....	17
2.3 Tipos de Gelo .....	17
2.4 Sistemas de Proteção .....	18
3 MODELO TERMODINÂMICO .....	21
3.1 Balanço de Massa.....	22
3.1.1 Vazão Mássica de Água Incidente.....	23
3.1.2 Vazão Mássica de <i>Runback</i> que Entra .....	24
3.1.3 Massa de Água Líquida Retida .....	24
3.1.4 Vazão Mássica de Água Evaporada .....	24
3.1.5 Vazão Mássica de Água Arrancada .....	26
3.1.6 Massa de Água Líquida .....	27
3.1.7 Vazão Mássica de <i>Runback</i> que Sai .....	27
3.1.8 Massa Congelada.....	27
3.2 Balanço de Energia.....	28
3.2.1 Taxa de Geração de Calor Latente de Solidificação .....	29
3.2.2 Taxa de Transferência de Calor Sensível .....	29
3.2.3 Taxa de Transferência de Calor por Evaporação .....	30
3.2.4 Taxa de Transferência de Calor por Convecção .....	30
3.2.5 Taxa de Transferência de por Dissipação Viscosa Devido ao Atrito do Ar .....	31

3.2.6 Taxa de Transferência de Calor por Conversão de Energia Cinética Devido ao Impacto das Gotículas de Água.....	31
3.2.7 Taxa de Transferência Calor por Condução .....	31
4 MODELO DE RUGOSIDADE .....	33
4.1 Modelo de Filme .....	33
4.1.1 Altura do Filme de Água .....	34
4.1.2 Altura Mínima de Filme.....	34
4.1.3 Rugosidade da Superfície.....	35
4.2 Modelo de Gotas .....	35
4.2.1 Massa de Água Líquida .....	36
4.2.2 Rugosidade da Superfície.....	37
4.3 Modelo de Filetes .....	37
4.3.1 Rugosidade da Superfície.....	38
4.4 Altura de Movimento .....	38
4.4.1 Força Gravitacional .....	39
4.4.2 Força de Rigidez.....	40
4.4.3 Força de Arrasto.....	41
4.4.4 Balanço de Forças.....	43
5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E ALGORITMOS DE SOLUÇÃO .....	47
5.1 Estrutura do Código.....	47
5.1.1 Fluxogramas.....	48
5.2 escoamento Externo.....	50
5.2.1 Método dos Painéis .....	50
5.2.2 CFX .....	50
5.3 Solução do Balanço de Energia e do Balanço de Forças .....	52
5.4 Passo de Tempo.....	52
5.5 Modificação da Geometria .....	53
5.5.1 Verificação da Geometria .....	54
6 RESULTADOS .....	57
6.1 Validação .....	57
6.1.1 Modelo Termodinâmico.....	57
6.1.2 Modelo de Rugosidade.....	59
6.2 Influência da Rugosidade na Formação de Gelo .....	62
6.3 escoamento Externo.....	66
6.3.1 Atualização do escoamento Externo .....	66
6.3.2 Solução do escoamento Externo com o Pacote ANSYS CFX 10.0.....	68
6.3.3 Método dos Painéis Versus CFX.....	72
6.3.4 Comentários .....	73
6.4 Resultados com o Modelo de Rugosidade do Gelo.....	74
6.4.1 Regime Seco.....	74

6.4.2 Regime Misto .....	77
6.4.3 Regime Úmido .....	79
6.4.4 Rugosidade.....	82
6.4.5 Comentários .....	83
7 ESCORE DA FERRAMENTA.....	85
7.1 Introdução .....	85
7.2 Variáveis de Validação .....	85
7.2.1 Espessura do Chifre Superior (S1) .....	85
7.2.2 Ângulo do Chifre Superior (S2) .....	86
7.2.3 Espessura do Chifre Inferior (S3).....	86
7.2.4 Ângulo do Chifre Inferior (S4) .....	86
7.2.5 Área do Gelo (S5).....	87
7.2.6 Espessura Mínima na Região do Bordo de Ataque (S6).....	87
7.2.7 Limite Superior do Gelo (S7) .....	87
7.2.8 Limite Inferior do Gelo (S8) .....	88
7.3 Repetibilidade Experimental das Variáveis .....	89
7.4 Escore .....	93
7.4.1 Escore de Precisão.....	95
7.4.2 Escore Conservativo .....	96
7.5 Resultado do Escore da Ferramenta .....	97
7.5.1 Matriz de Casos.....	97
7.5.2 Escore de Precisão.....	98
7.5.3 Escore Conservativo .....	99
7.5.4 Comparação com Outros Códigos.....	100
7.5.5 Comentários .....	102
8 CONCLUSÃO .....	103
8.1 Conclusões e Comentários.....	103
8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	104
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	105
APÊNDICE A .....	111
APÊNDICE B .....	119
APÊNDICE C .....	121
APÊNDICE D .....	125

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Formação de gelo na borda de ataque de uma aeronave. ....	1
Figura 1.2 – Testes de formação de gelo em voo (a) e túnel de vento (b). ....	2
Figura 1.3 - Componentes de uma aeronave expostos à formação de gelo. ....	2
Figura 1.4 - Formas de gelo experimental (a) e curvas de sustentação numéricas (b).....	3
Figura 1.5 – Previsões meteorológicas de formação de gelo. ....	4
Figura 1.6 – Formação de gotas sobre uma asa. ....	10
Figura 2.1 – Esquema do problema físico. ....	14
Figura 2.2 – Formação de gelo no regime seco. ....	15
Figura 2.3 – Formação de gelo em regime úmido. ....	16
Figura 2.4 – Formas de gelo do tipo escarcha branca. ....	17
Figura 2.5 – Formas de gelo do tipo regelo. ....	18
Figura 2.6 – Esquema de um sistema de ar quente ....	19
Figura 2.7 – Sistema eletro-térmico e as camadas que o formam ....	19
Figura 3.1 – Volumes de Controle e região vizinha ao ponto de estagnação. ....	22
Figura 3.2 - Balanço de massa: (a) Final do primeiro passo de tempo e (b) Início do segundo passo de tempo. ....	23
Figura 3.3 – Balanço de energia. ....	28
Figura 4.1 – Configurações da água sobre a superfície. ....	33
Figura 4.2 – Representação de uma gota parcialmente congelada e da distribuição das gotas sobre um painel. ....	37
Figura 4.3 – Altura e distribuição das gotas sobre a superfície. ....	37
Figura 4.4 – Forças atuantes sobre uma gota. ....	38
Figura 4.5 – Forças atuantes sobre uma gota deformada. ....	39
Figura 4.6 – Decomposição da força devido à tensão superficial. ....	41
Figura 4.7 – Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para uma esfera – Curva (1): teoria de Stokes e Curva (2): teoria de Oseen. ....	42
Figura 4.8 – Configuração do balanço de forças sobre uma gota. ....	44
Figura 4.9 – Configuração do balanço de forças sobre uma gota. ....	44
Figura 4.10 – Configuração do balanço de forças sobre uma gota. ....	45
Figura 5.1 – Estrutura computacional. ....	47
Figura 5.2 – Fluxograma geral do problema de formação de gelo. ....	49
Figura 5.3 – Fluxograma do módulo do método dos painéis. ....	49

Figura 5.4 – Fluxograma do módulo termodinâmico.....	49
Figura 5.5 – Fronteiras do domínio de cálculo do CFX. ....	51
Figura 5.6 – Movimentação da geometria para o acréscimo de gelo. ....	54
Figura 5.7 – Modificação da geometria para grandes ângulos entre painéis adjacentes. ....	55
Figura 5.8 – Modificação da geometria segundo intersecção de painéis.....	56
Figura 5.9 – Modificação da geometria pelo critério de largura de painéis. ....	56
Figura 6.1 – Caso de validação V1, formação de gelo do tipo escarcha branca. ....	58
Figura 6.2 – Caso de validação V2, formação de gelo do tipo regelo.....	59
Figura 6.3 – Distribuição de rugosidade sobre a superfície do gelo. ....	60
Figura 6.4 – Variação da rugosidade do gelo no início da região rugosa com a velocidade da corrente livre.....	61
Figura 6.5 – Variação da rugosidade do gelo no início da região rugosa com o conteúdo de água líquida. ....	61
Figura 6.6 – Variação da rugosidade do gelo no início da região rugosa com a temperatura de corrente livre.....	62
Figura 6.7 – Influência da rugosidade no coeficiente de transferência de calor por convecção. ....	64
Figura 6.8 – Influência da rugosidade na forma final do gelo para o código Aerolcing. ...	65
Figura 6.9 – Influência da rugosidade na forma final do gelo para o código do presente trabalho. ....	65
Figura 6.10 – Perfil de rugosidade do Caso 2 da Tabela 6.1, com rugosidade do perfil limpo igual a 0,5 mm. ....	66
Figura 6.11 – Influência do número de atualizações do escoamento externo no caso V1 da Tabela 6.1. ....	67
Figura 6.12 – Influência do número de atualizações do escoamento externo no caso V2 da Tabela 6.1. ....	68
Figura 6.13 – Curvas de: (a) Coeficiente de transferência de calor por convecção, (b) Tensão cisalhante, (c) Pressão e (d) Eficiência de coleta; em função do refino de malha.....	69
Figura 6.14 – Perfis de gelo do caso V2 em função do refino de malha: (a) sem atualizar o escoamento externo e (b) atualizando o escoamento externo.....	70
Figura 6.15 – Curvas de: (a) Coeficiente de transferência de calor por convecção, (b) Tensão cisalhante, (c) Pressão e (d) Eficiência de coleta; em função do modelo de turbulência, para a malha grossa.....	71
Figura 6.16 – Perfis de gelo do caso V2 em função do modelo de turbulência para a malha grossa, (a) sem atualizar o escoamento externo e (b) atualizando o escoamento externo.....	71
Figura 6.17 – Comparação entre o emprego do método dos painéis e do aplicativo CFX na solução do escoamento externo – Casos de validação: (a) caso V1 e (b) caso V2.....	72

Figura 6.18 – Comparação entre o emprego do método dos painéis e do aplicativo CFX na solução do escoamento externo – Caso C16 do score da ferramenta. ....	73
Figura 6.19 – Formas de gelo do tipo escarcha branca para o Caso 1. ....	75
Figura 6.20 – Formas de gelo do tipo escarcha branca para o Caso 2. ....	75
Figura 6.21 – Coeficiente de transferência de calor por convecção para o Caso 2, formação de gelo do tipo escarcha branca. ....	76
Figura 6.22 – Rugosidade do gelo para os Casos 1 e 2 – Regime seco. ....	76
Figura 6.23 – Vazões mássicas para o Caso 2. ....	77
Figura 6.24 – Formas de gelo do tipo misto para o Caso 3. ....	77
Figura 6.25 – Formas de gelo do tipo misto para o Caso 4. ....	78
Figura 6.26 – Vazões mássicas para o Caso 4. ....	78
Figura 6.27 – Coeficiente de transferência de calor por convecção para o Caso 4, formação de gelo do tipo misto. ....	79
Figura 6.28 – Rugosidade do gelo para os Casos 3 e 4 – Regime misto. ....	79
Figura 6.29 – Formas de gelo do tipo regelo para o Caso 5. ....	80
Figura 6.30 – Formas de gelo do tipo regelo para o Caso 6. ....	80
Figura 6.31 – Coeficiente de transferência de calor por convecção para o Caso 6, formação de gelo do tipo regelo. ....	81
Figura 6.32 – Rugosidade do gelo para os Casos 5 e 6 – Regime úmido. ....	81
Figura 6.33 – Vazões mássicas para o Caso 6. ....	82
Figura 6.34 – Comparação da rugosidade do gelo entre os Casos 2, 4 e 6. ....	83
Figura 7.1 – Espessura do Chifre Superior e Ângulo do Chifre Superior. ....	86
Figura 7.2 – Espessura do Chifre Inferior e Ângulo do Chifre Inferior. ....	86
Figura 7.3 – Área do Gelo e Espessura Mínima na Região do Bordo de Ataque. ....	87
Figura 7.4 – Limite Superior do Gelo e Limite Inferior do Gelo. ....	88
Figura 7.5 – Ângulo da Espessura Máxima do Gelo (a) e Espessura Máxima do Gelo (b). ....	89
Figura 7.6 – Variação na formação de gelo para dois ensaios experimentais com as mesmas condições de escoamento. Fonte: (ADDY, 2000). ....	89
Figura 7.7 - Perfis de gelo experimental e previsto pelo código do presente trabalho para o caso C15. ....	95

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Comparação de diferentes códigos de formação de gelo. ....	9
Tabela 6.1 – Condições de formação de gelo dos casos de validação.....	58
Tabela 6.2 – Condições de escoamento do caso padrão. ....	60
Tabela 6.3 – Refinos de malha.....	69
Tabela 6.4 – Condições de formação de gelo. ....	74
Tabela 7.1 – Condições de formação de gelo do Caso 401 – Perfil NACA 0012. ....	90
Tabela 7.2 – Resultados do Caso 401. ....	90
Tabela 7.3 – Estimativa dos valores de $2\sigma$ dos dados experimentais.....	91
Tabela 7.4 – Definição dos parâmetros de escore. ....	92
Tabela 7.5 – Adimensionalização das variáveis obtidas para o Caso C15. ....	93
Tabela 7.6 – Cálculo do erro do código do presente trabalho para o caso C15. ....	94
Tabela 7.7 – Nota de cada variável do caso C15 e escore do caso. ....	94
Tabela 7.8 – Definição da direção conservativa de cada variável.....	96
Tabela 7.9 – Matriz de casos de formação de gelo.....	97
Tabela 7.10 – Escore de precisão. ....	98
Tabela 7.11 – Escore conservativo. ....	100
Tabela 7.12 – Códigos usados na comparação do escore. ....	101
Tabela 7.13 – Escore de Precisão das ferramentas de formação de gelo.....	101
Tabela 7.14 – Escore Conservativo das ferramentas de formação de gelo.....	102

# SIMBOLOGIA

## Símbolos latinos:

$A_c$	Área de contato	[m <sup>2</sup> ]
$A_f$	Área frontal	[m <sup>2</sup> ]
$A_t$	Área de transferência	[m <sup>2</sup> ]
$c$	Corda do perfil aerodinâmico	[m]
$C_D$	Coefficiente de arrasto	
$C_f$	Coefficiente de atrito superficial	
$c_p$	Calor específico a pressão constante	[J/kg·K]
$D_{AB}$	Difusividade mássica entre os componentes A e B	[m <sup>2</sup> /s]
$e_f$	Altura do filme de água	[m]
$e_{f,\min}$	Espessura mínima de filme	[m]
$e_{gota}$	Altura da gota de água	[m]
$f$	Distância entre gotas	[m]
$f_c$	Fração de congelamento	
$F_D$	Força de arrasto	[N]
$F_{g,s}$	Força gravitacional na direção do escoamento	[N]
$F_{\sigma,s}$	Força de rigidez	[N]
$g$	Aceleração da gravidade (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_{conv}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m <sup>2</sup> ·K]
$h_{dif}$	Coefficiente de transferência de massa por difusão	[m/s]
$h_{ls}$	Calor latente de solidificação	[J/kg]
$h_{lv}$	Calor latente de evaporação	[J/kg]
$k$	Condutividade térmica	[W/m·K]
$Le$	Número de Lewis	
$LWC$	Conteúdo de água líquida	[g/m <sup>3</sup> ]
$m$	Massa	[kg]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]

$MVD$	Diâmetro médio das gotículas de água	[m]
$n$	Direção normal à superfície do perfil	
$\hat{n}$	Vetor unitário normal à direção do escoamento	
$n_{filete}$	Número de filetes	
$n_{gotas}$	Número de gotas	
$P$	Pressão	[Pa]
$Pr$	Número de Prandtl	
$Pr_t$	Número de Prandtl turbulento	
$q$	Taxa de transferência de calor	[W]
$R$	Constante universal dos gases ideais (8314)	[J/kmol·K]
$Re$	Número de Reynolds	
$Re_c$	Número de Reynolds crítico	
$Re_{gota}$	Número de Reynolds baseado no diâmetro da gota	
$Re_x$	Número de Reynolds local baseado na distância $x$	
$Re_\kappa$	Número de Reynolds baseado na rugosidade	
$s$	Coordenada superficial	[m]
$\hat{s}$	Vetor unitário paralelo à direção do escoamento	
$Sc$	Número de Schmidt	
$St_\kappa$	Número de Stanton baseado na rugosidade	
$T$	Temperatura	[K]
$U$	Velocidade	[m/s]
$V$	Volume	[m <sup>3</sup> ]
$We$	Número de Weber	
$We_c$	Número de Weber crítico	

**Símbolos gregos:**

$\alpha$	Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
$\alpha$	Fração volumétrica de água	
$\beta$	Eficiência de coleta	
$\Delta b$	Largura de um painel, na direção normal ao perfil 2D	[m]
$\Delta s$	Comprimento de um painel na direção superficial	[m]
$\Delta t$	Intervalo de tempo	[s]
$\Delta T_c$	Intervalo de temperatura no qual a água congela	[K]

$\Delta\theta_c$	Deformação do ângulo de contato	[°]
$\varepsilon_{gelo}$	Espessura de gelo	[m]
$\phi$	Umidade relativa	
$\varphi$	Inclinação do painel	[°]
$\kappa$	Rugosidade	[m]
$\mu$	Viscosidade	[kg/s·m]
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> /s]
$\theta_c$	Ângulo de contato	[°]
$\theta_t$	Espessura de quantidade de movimento turbulenta	[m]
$\rho$	Densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Tensão superficial	[N/m]
$\sigma$	Desvio padrão	
$\tau$	Tensão cisalhante	[N/m <sup>2</sup> ]

## Índices

<i>água</i>	Referente à água;
<i>água, adm</i>	Referente à massa de água admissível;
<i>apr</i>	Referente à massa de água aprisionada;
<i>ar</i>	Referente ao ar;
<i>arr, água</i>	Referente à massa de água arrancada;
<i>arr, gelo</i>	Referente à massa de gelo arrancada;
<i>c</i>	Referente ao ponto de congelamento;
<i>c</i>	Referente a contato, quando utilizado em ângulos;
<i>cond</i>	Referente à condução;
<i>conv</i>	Referente à convecção;
<i>e</i>	Borda da camada limite fluidodinâmica;
<i>entra</i>	Referente à massa de água que entra em um volume de controle;
<i>evap</i>	Referente à evaporação;
<i>filete</i>	Referente ao filete de água;
<i>filme</i>	Referente ao filme de água;
<i>gelo</i>	Referente ao gelo;
<i>gelo</i>	Referente à água congelada;
<i>gota</i>	Referente à gota de água;

<i>gotículas</i>	Referente às gotículas de água presentes na atmosfera;
<i>inc</i>	Referente à incidência de gotículas de água na superfície;
<i>ke</i>	Energia cinética;
<i>lat</i>	Latente;
<i>máx</i>	Referente a um valor máximo;
<i>mín</i>	Referente a um valor mínimo;
<i>rb,entra</i>	Referente à massa de água de <i>runback</i> que entra em um volume de controle;
<i>rb,sai</i>	Referente à massa de água de <i>runback</i> que sai de um volume de controle;
<i>rec</i>	Recuperação adiabática;
<i>res</i>	Referente à massa de água residual;
<i>v,água</i>	Referente ao vapor de água;
<i>s</i>	Referente à superfície;
<i>sens</i>	Sensível;
$\infty$	Referente à condição do escoamento livre;

## RESUMO

A predição da formação de gelo em perfis aerodinâmicos é importante por dois aspectos técnicos. O primeiro, porque permite que análises de degradação aerodinâmica possam ser realizadas para verificar os limites de segurança nas forças de sustentação de um perfil. O segundo, para auxiliar no projeto de sistemas anti-gelo, concebidos exatamente para evitar que os perfis aerodinâmicos sejam alterados pela presença do gelo. O modelo termodinâmico de formação de gelo mais clássico e usado na maioria dos códigos de previsão da formação de gelo é o proposto por Messinger. Este modelo considera que sobre toda a superfície aerodinâmica há a formação de um filme de água. Entretanto, experimentos têm verificado que isso não é o que acontece. Por meio de experimentos identificou-se que um filme de água está presente apenas em uma pequena região próxima ao ponto (linha) de estagnação, enquanto que nas demais regiões há a presença de um grande número de gotas estacionárias ou mesmo a formação de filetes de água. Esta configuração altera a rugosidade da superfície do gelo, que tem influência importante na formação do gelo. Este trabalho considera o modelo termodinâmico clássico da literatura para a formação de gelo e contribui com a implementação de um modelo de cálculo da rugosidade da superfície do gelo. O conhecimento da rugosidade da superfície do gelo permite uma estimativa mais realística do coeficiente de transferência de calor por convecção com conseqüências importantes nos balanços de massa e de energia, afetando a formação de gelo. São apresentados resultados qualitativos para a formação de gelo em regime seco, misto e úmido, comparados com os resultados disponíveis na literatura para a situação em que a rugosidade é mantida constante. Também é apresentada uma metodologia de avaliação quantitativa do código implementado no presente trabalho, comparado com alguns códigos de formação de gelo conhecidos.

## ABSTRACT

Ice accretion prediction in aerodynamic profiles is important based on two major aspects. Firstly, it allows the prediction of the aerodynamic degradation, essential for establishing safety flying limits. Secondly, it is the main tool for the design of anti-icing systems. The classical ice accretion thermodynamic model, used in the majority of the ice accretion codes, was proposed by Messinger. This physical model assumes that the impinging water forms a thin film of water along the entire surface. However, experimental studies observed that there is a water thin film only near the stagnation point (line) and there is a great number of stationary drops or rivulets on the remaining surface. This changes the roughness of the surface, changing several important parameters of the ice accretion model. In this work, the classical ice accretion model is used, and an analytical model is implemented in order to determine the ice roughness. The knowledge of the ice surface roughness allows more realistic estimation of convection heat transfer coefficient with important effects in energy and mass balance, consequently in the ice growth. Qualitative results are presented for three ice accretion regimes: dry, mix and wet. These results are compared with numerical solution available in the literature, when roughness is assumed constant. It seems that considering the variable roughness of the ice surface considerably changes the ice accretion profiles. A methodology for evaluating ice accretion codes is also presented and applied to the code developed in this work, with the results compared to those of other tool.

# 1 INTRODUÇÃO

A formação de gelo em aeronaves é um problema bem conhecido e de fundamental importância na indústria aeronáutica. Devido ao acúmulo de gelo, como o ilustrado na Figura 1.1, vários acidentes já foram relatados. Para evitar tais incidentes, as aeronaves devem ser projetadas e certificadas para operar sob condições de formação de gelo. Muitos países usam como base a *Federal Aviation Regulations (FAR PART 25)*, da FAA - *Federal Aviation Administration* - (1914). No Brasil, o processo de certificação das aeronaves é definido pelo Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica (RBHA) redigido e controlado pelo Centro Técnico Aeroespacial (CTA).



**Figura 1.1 – Formação de gelo na borda de ataque de uma aeronave.**

**Fonte: (Aviation Weather Center).**

A certificação de uma aeronave inclui custosos testes de vôo e túnel de vento. Alguns desses testes são mostrados na Figura 1.2. Outros fatores que tornam difícil a execução de tais testes são: a raridade de certas condições de crescimento de gelo em condições atmosféricas e o número limitado de condições de vôo nos túneis de vento IRT<sup>1</sup>. Tendo em vista essas dificuldades, torna-se necessária a aplicação de técnicas numéricas na análise desse problema. Diversas ferramentas computacionais foram desenvolvidas para prever a formação de gelo nas aeronaves, entre elas os códigos TRAJICE da DERA (*Defence Evaluation and Research Agency* – Reino Unido), ONERA da ONERA (*Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales* - França), LEWICE da NASA (*National Aeronautics and Space Administration* – Estados Unidos) e AEROICING, que foi criado por meio de uma parceria do Sinmec (Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor, da UFSC) com a Embraer (Empresa

---

<sup>1</sup> *Icing Research Tunnel* - túnel de vento utilizado para reproduzir condições de formação de gelo.

Brasileira de Aeronáutica S.A. – Brasil). Estes códigos, além de preverem a formação de gelo, têm o objetivo de servir como ferramenta para projetar sistemas de proteção que previnam a formação de gelo. Hoje, alguns códigos computacionais são aceitos como ferramenta de certificação, assim a simulação numérica da formação de gelo se torna cada vez mais uma ferramenta imprescindível no projeto e certificação de aeronaves, reduzindo custo e tempo de projeto.



(a)

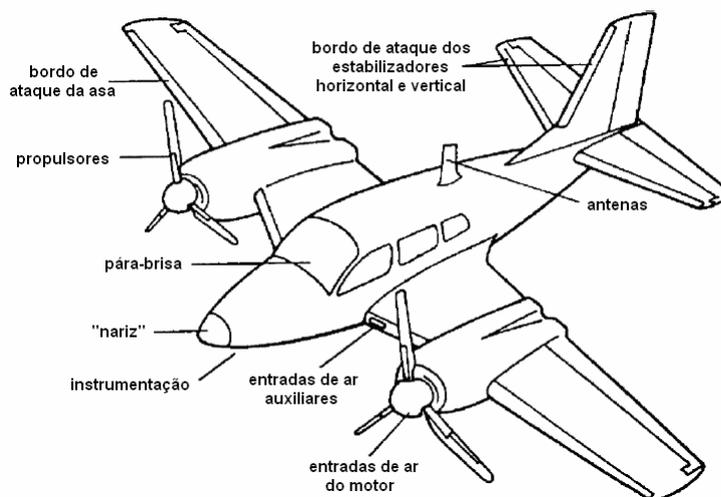


(b)

**Figura 1.2 – Testes de formação de gelo em vôo (a) e túnel de vento (b).**

**Fonte: (NASA Image Exchange).**

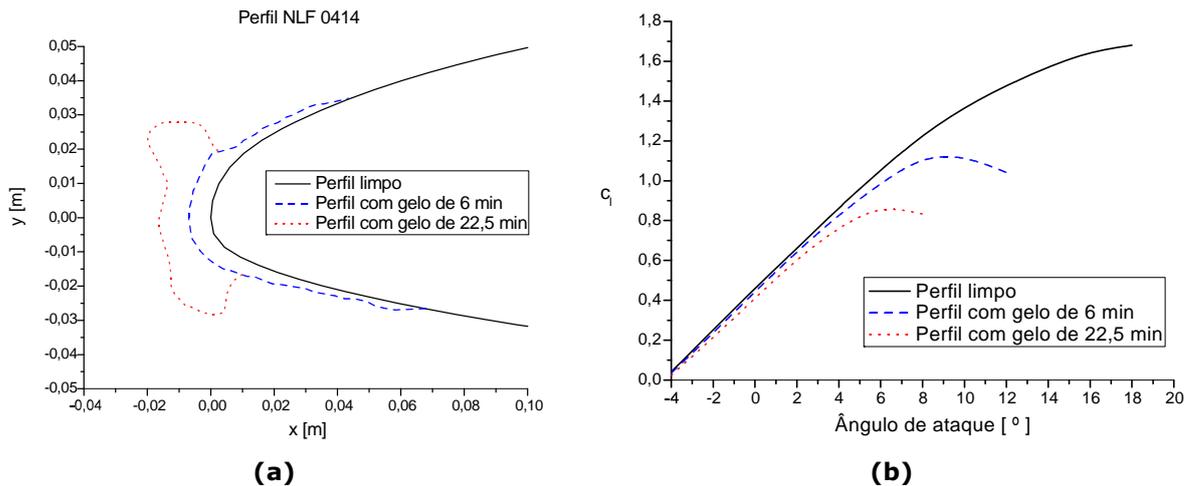
Os componentes de uma aeronave em que a formação de gelo é mais crítica são as asas, as *nacelles* e os estabilizadores. Porém, em qualquer superfície frontal exposta e não protegida (ausência de sistemas de proteção) pode ocorrer o acúmulo de gelo, como por exemplo, antenas, instrumentação, nariz e pára-brisa. A Figura 1.3 apresenta alguns desses componentes presentes numa pequena aeronave.



**Figura 1.3 - Componentes de uma aeronave expostos à formação de gelo – adaptado de (HEINRICH, 1991).**

Tomando a asa de uma aeronave como exemplo, o acúmulo de gelo altera sua geometria e rugosidade, provocando mudanças consideráveis na aerodinâmica e

aumento do peso da aeronave e, conseqüentemente, perda de sustentação e aumento da potência necessária nos motores. A Figura 1.4(a) e a Figura 1.4(b) mostram geometrias e curvas de sustentação de um perfil NLF 0414 limpo e exposto durante 6 e 22,5 minutos a condições de formação de gelo. As formas de gelo foram obtidas experimentalmente e retiradas de (ADDY, 2000) e as curvas de sustentação são resultados numéricos obtidos de um projeto realizado no Sinmec junto à Embraer (MALISKA et al., 2004/2006). Observa-se, nessas figuras, uma perda significativa de sustentação e uma redução do ângulo de estol nos perfis com gelo.



**Figura 1.4 - Formas de gelo experimental (a) e curvas de sustentação numéricas (b).**

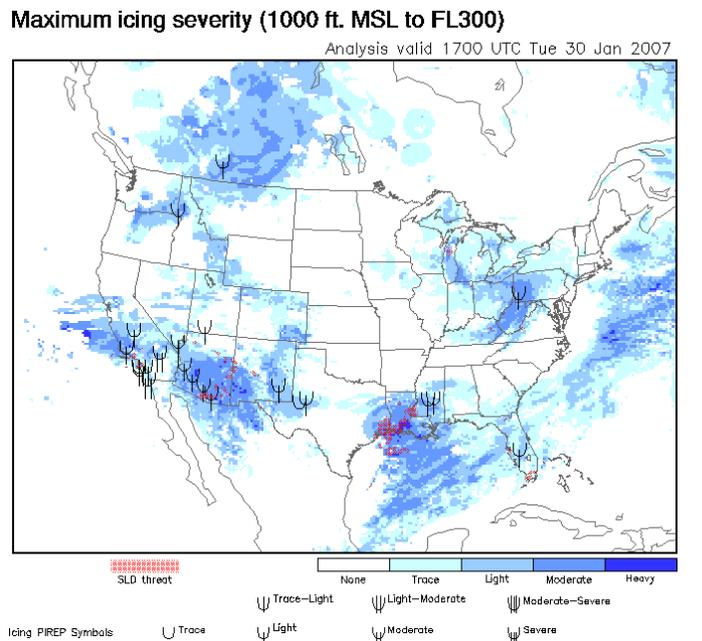
Além da indesejável degradação aerodinâmica são citados abaixo outros problemas causados pela formação de gelo nas superfícies de uma aeronave:

- perda de navegabilidade, originada pelo acúmulo de gelo em flaps, slats, ailerons e estabilizadores;
- aumento do consumo de combustível, conseqüência do aumento de arrasto e do peso;
- diminuição da eficiência do motor, decorrente da perturbação da entrada de ar na turbina devido ao gelo acumulado nas nacelles;
- quebra da antena, causada por fortes vibrações;
- avaria de instrumentos de medição, como o tubo de Pitot.

Existem duas formas de evitar o crescimento de gelo nas aeronaves: (1) utilização de sistemas de degelo ou anti-gelo nas aeronaves; e (2) mudanças no plano de vôo, a fim de evitar as regiões de risco de formação de gelo. Os sistemas de proteção são contemplados no Cap. 2.

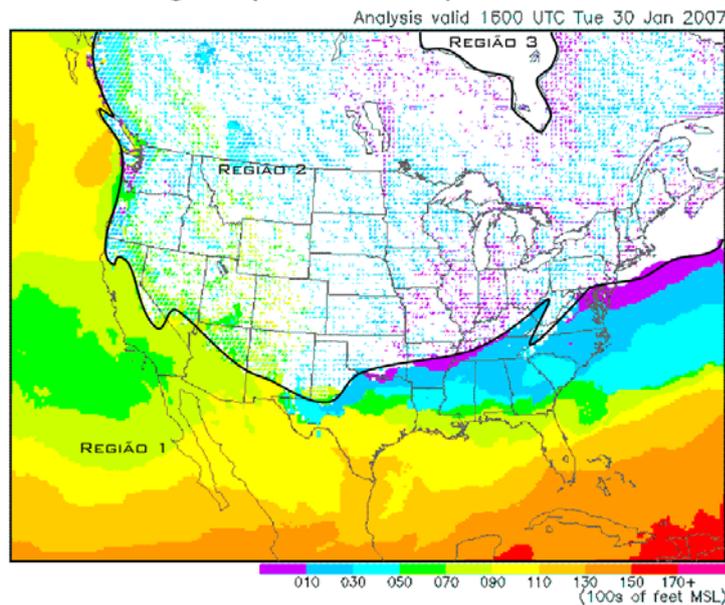
As mudanças de rota podem ser traçadas considerando observações meteorológicas como, por exemplo, as ilustradas na Figura 1.5(a) e na Figura 1.5(b). Nessas figuras são mostradas duas leituras de risco de formação de gelo. É importante salientar que essas figuras não representam previsões meteorológicas, mas sim medições realizadas em tempo real por radar, satélite, pilotos, etc, e atualizadas de hora em hora.

A Figura 1.5(a) mostra a severidade de formação de gelo nos Estados Unidos e parte do Canadá para altitudes de 300 m (~1000 ft) a 10000 m (~30000 ft). Nesta figura as regiões em branco representam as zonas onde não há risco de formação de gelo e as regiões em azul, as zonas de formação de gelo, sendo o azul mais escuro as zonas de maior risco.



(a)

**Lowest freezing level (100s of feet MSL)**



(b)

**Figura 1.5 – Observações meteorológicas de formação de gelo.**

**Fonte: (Aviation Weather Center).**

Na Figura 1.5(b) são relacionadas a altitude e a temperatura de congelamento da água. Nas regiões definidas pelas cores da escala (Região 1), é representada a altitude a partir da qual a temperatura se encontra abaixo do ponto de congelamento da

água. Assim, altitudes inferiores a esta são as desejáveis para vôo. Ainda na Figura 1.5(b), a cor branca (Região 3) representa as regiões onde, a qualquer altitude, a temperatura está abaixo do ponto de congelamento e as regiões hachuradas (Região 2) representam zonas onde a temperatura encontra-se abaixo de zero para uma determinada faixa de altitude a partir da superfície, seguida de uma faixa de altitude com temperaturas maiores que a de congelamento e por fim uma faixa com temperaturas novamente negativas.

## 1.1 Revisão bibliográfica

Em função do evidente interesse comercial dos códigos de formação de gelo em perfis aerodinâmicos, não é numerosa a literatura que apresenta informações em nível tecnológico. Todas as empresas fabricantes de aeronaves possuem seus próprios códigos. O código mais conhecido é o código LEWICE (WRIGHT, 1995a; WRIGHT, 2002; WRIGHT, 2003), desenvolvido no *Lewis Research Center*, na NASA. O LEWICE é o pioneiro na previsão da formação de gelo e se baseia no modelo proposto por Messinger (1953), usado nos principais códigos de formação de gelo. A seguir são discutidos este e outros trabalhos.

Messinger (1953) propôs um modelo termodinâmico para três regimes de temperatura da superfície do perfil: igual, menor e maior que a temperatura de congelamento da água. Para os três regimes foram realizados balanços de massa e de energia em volumes de controle criados sobre a superfície estudada. Os fluxos de calor modelados foram: convectivo, evaporativo, sublimação, latente de fusão, aquecimento cinético devido ao atrito do ar e aquecimento cinético devido à água que impacta contra a superfície. A partir do balanço de energia é definida a fração de congelamento<sup>2</sup> que, aplicada ao balanço de massa, fornece a quantidade de gelo que se forma. Nesse trabalho, Messinger também apresenta uma análise da velocidade necessária para uma superfície coberta de gelo alcançar a temperatura de congelamento da água; da taxa de sublimação de gelo para uma superfície com temperatura abaixo da temperatura de congelamento; e da taxa de derretimento do gelo para uma superfície na temperatura de fusão da água, todas essas análises foram realizadas para um escoamento de ar limpo.

Desde sua primeira versão até as atuais, o código LEWICE sofreu diversas modificações e novos modelos foram incluídos. Na primeira versão (WRIGHT, 1995a),

---

<sup>2</sup> A fração de congelamento é a relação entre a massa de água congelada e a massa de água líquida total em um ponto. Por definição, a fração de congelamento é zero para temperaturas acima da temperatura de congelamento da água e um para temperaturas abaixo da temperatura de congelamento da água. Porém, em problemas de formação de gelo a massa de água pode congelar parcialmente, coexistindo assim, água líquida e gelo. Quando isso ocorre, a temperatura de equilíbrio é próxima à temperatura de congelamento da água e, conseqüentemente, a fração de congelamento assume valores no intervalo entre zero e um.

uma modelagem simplificada do modelo termodinâmico foi aplicada, tratando a superfície do aerofólio como um sólido semi-infinito, e um modelo simples de sistema de proteção foi empregado. Ainda nessa versão foram incluídos um fluxo de calor no filme de água e uma massa arrancada pelo escoamento externo, além de uma modificação do termo de evaporação. Nas últimas versões (WRIGHT, 2002; WRIGHT, 2003) uma equação de condução de calor é resolvida para as camadas metálicas e para o gelo, e balanços de massa e de energia na superfície externa são realizados. A solução do balanço de energia na superfície entra como condição de contorno no problema de condução de calor, sendo assim o problema resolvido de forma acoplada.

Outros dois códigos bidimensionais bastante conhecidos são o CANICE (MORENCY; TESOK; PARASCHIVOIU, 1999) e o TRAJICE2 (GENT, 1990). No TRAJICE2, o modelo termodinâmico empregado também é baseado no modelo de Messinger (1953), porém apresenta algumas modificações nos termos de convecção e evaporação considerando efeitos de compressibilidade. O modelo utilizado no CANICE considera que a condução de calor nas camadas do aerofólio se dá somente na direção do escoamento, e as equações nas camadas do aerofólio e no filme de água são resolvidas de forma conjugada, como no FENSAP-ICE e nas últimas versões do LEWICE.

Modelos tridimensionais baseados no modelo de Messinger (1953) foram propostos por Hedde e Guffond (1995), no código ONERA; e Bourgault et al. (1999) e Bourgault, Beaugendre e Habashi (2000), no FENSAP-ICE. Uma característica em especial é observada no FENSAP-ICE que, diferentemente dos demais códigos, usa uma modelagem Euleriana no cálculo das trajetórias das partículas. No ONERA, a camada limite é calculada usando uma formulação de comprimento de mistura, capturando a influência da rugosidade no coeficiente de transferência de calor por convecção. Neste código, a rugosidade sobre o gelo é obtida por meio de uma correlação empírica.

Em uma primeira etapa da pesquisa sobre o processo de formação de gelo desenvolvida no Sinmec, Silveira (2001) implementou um modelo termodinâmico baseado no modelo do código LEWICE, com algumas simplificações. Nesse trabalho foi criado um código empregando o método dos painéis para resolver o escoamento externo combinado com um método integral para a camada limite. Silveira e Maliska (2001) realizaram uma análise da influência de alguns parâmetros de formação de gelo (velocidade, temperatura, LWC<sup>3</sup>, etc.) na geometria final do gelo. Dando continuidade a esses trabalhos, Silveira (2003) comparou três metodologias para o cálculo das trajetórias das partículas de água. O escoamento externo foi obtido por meio da solução das equações de Navier-Stokes usando o código comercial CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.) e um método para obter a eficiência de coleta nesse código comercial foi proposto. Silveira

---

<sup>3</sup> LWC (*Liquid Water Content*) – representa a quantidade de água líquida no ambiente. Este parâmetro determina a quantidade de massa de água que pode incidir contra a superfície aerodinâmica.

(2006) propôs duas formulações unidimensionais e uma formulação bidimensional para modelar problemas de formação de gelo com sistemas de proteção do tipo ar-quente. Na formulação bidimensional, a condução de calor nas camadas de um aerofólio é resolvida acoplada com o modelo termodinâmico de formação de gelo, como no LEWICE, FENSAP-ICE e CANICE.

Outro trabalho de âmbito nacional abordando a formação de gelo foi realizado por Silva (2002) e Silva, Silveiras e Zerbini (2003). Nesses trabalhos o enfoque está em sistemas de proteção anti-gelo eletro-térmicos, nos quais é proposto um método para simular esses sistemas por meio de uma modelagem unidimensional em direção à superfície, obtendo assim a temperatura na superfície externa do aerofólio.

Todos os trabalhos citados acima possuem duas características em comum: consideram a existência de um filme de água sobre toda a superfície em estudo e usam correlações para calcular a rugosidade equivalente para o gelo, com exceção das últimas versões do código Lewice em que essa correlação é substituída por uma expressão envolvendo a força aerodinâmica e a tensão superficial. Olsen e Walker (1986) demonstraram, por meio de observações experimentais, que as superfícies expostas à formação de gelo apresentam regiões onde a água apresenta comportamentos distintos. Estas regiões são caracterizadas como: uma região lisa próxima ao ponto de estagnação com a formação de um filme de água, uma região rugosa em consequência da presença de um grande número de gotas de água estacionárias e uma região onde a água se quebra em filetes. Observou-se que na maior parte da superfície em estudo tem-se a presença de gotas de água estacionárias e que a região de filme de água diminui com o tempo. Com essas evidências, concluiu-se que o modelo proposto por Messinger (1953) apresenta algumas deficiências para formações de gelo do tipo regelo<sup>4</sup>. Observou-se também que a rugosidade da superfície é um fator de grande influência no coeficiente de transferência de calor por convecção e no acúmulo de água sobre a superfície nas regiões onde se formam os chamados "chifres" nos gelos do tipo regelo. Confirmando as observações feitas no trabalho de Olsen e Walker, Hansman e Turnock (1989) e Hansman et al. (2001) realizaram uma série de experimentos investigando o comportamento da água sobre a superfície e a causa e os efeitos da rugosidade na formação de gelo do tipo regelo. Ainda no trabalho de Hansman e Turnock, foram feitas medições do ângulo de contato e da deformação máxima de uma gota sobre a superfície do gelo em função da temperatura. Também focando a formação de gotas no fenômeno de formação de gelo, Shin (1994) fez um estudo detalhado da dimensão dessas gotas sobre a superfície de um perfil NACA 0012, analisando ainda a influência de alguns parâmetros no tamanho da rugosidade formada pelas gotas.

Alguns trabalhos considerando a quebra do filme de água em filetes na região não protegida por um sistema de proteção foram realizados. Al-Khalil et al. (1991, 1993

---

<sup>4</sup> Regelo é a nomenclatura em português dada ao *glaze ice* (SIMÕES, 2004).

e 1994) apresentaram um modelo para filetes aplicado a aerofólios com sistema de proteção eletro-térmico, usando como critério a energia total mínima do filme de água. Trabalho semelhante foi realizado por Silva e Silvares (2006).

Fortin et al. (2004 e 2005) propuseram um modelo termodinâmico baseado no modelo de Messinger considerando a formação de gotas sobre a superfície afetada. O modelo apresenta pequenas modificações nas equações de balanço de massa e de energia e propõe modelos analíticos para o cálculo da rugosidade sobre a superfície do gelo.

A Tabela 1.1 apresenta uma comparação de alguns códigos de formação de gelo com suas características já comentadas.

Vários trabalhos foram realizados procurando avaliar, validar e comparar códigos de formação de gelo. Primeiramente, as formas de gelo obtidas numericamente foram apenas comparadas qualitativamente com resultados de túnel de vento. Wright (1995b) e Wright e Rutjowski (1999) apresentam diversos resultados do LEWICE comparados a resultados experimentais. Também procurando avaliar qualitativamente resultados de códigos de formação de gelo, Wright, Gent e Guffond (1997) compararam entre si resultados obtidos pelos códigos LEWICE, TRAJICE2D e ONERA.

Em 2001, a OTAN – Organização do Tratado do Atlântico Norte – (NATO, 2001) organizou um trabalho para comparar os resultados obtidos por diversos códigos. Nesse trabalho foi usado um banco de dados de formas de gelo do tipo regelo - tipo de gelo para o qual é mais difícil a obtenção de bons resultados numéricos - com diferentes perfis aerodinâmicos. Comparações com resultados experimentais e entre os códigos foram feitas e os responsáveis pelos códigos discutiram seus resultados.

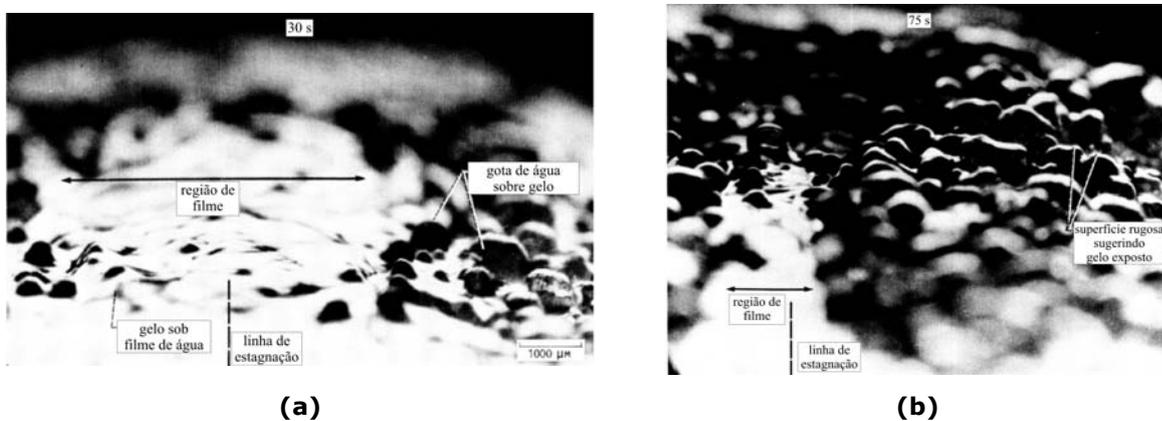
Esforços para determinar métodos de avaliação quantitativa foram feitos pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) e pela AIAA (*American Institute of Aeronautics and Astronautics*). Em um seminário organizado pela SAE em 1999, Potapczuk (1999) apresentou uma lista de parâmetros necessários para uma avaliação quantitativa de resultados numéricos. Riley, McDowall e Flemming (2002) descrevem um método para determinar um escore de uma ferramenta de previsão de gelo. O método usa oito variáveis obtidas da forma do gelo considerando gelos do tipo regelo com dois “chifres”. Esse método é descrito e empregado na avaliação dos resultados do presente trabalho no Capítulo 7.

**Tabela 1.1 – Comparação de diferentes códigos de formação de gelo.**

<b>Código</b>	<b>LEWICE</b>	<b>ONERA</b>	<b>TRAJICE2D</b>	<b>CANICE</b>	<b>FENSAP-ICE</b>	<b>AEROICING</b>	<b>PRESENTE TRABALHO</b>
<b>Dimensão</b>	2D e 3D	2D e 3D	2D	2D	3D	2D	2D
<b>Aerodinâmica</b>	Método dos painéis ou Navier-Stokes	Navier-Stokes	Método dos painéis	Método dos painéis	Navier-Stokes	Método dos painéis ou Navier-Stokes	Método dos painéis ou Navier-Stokes
<b>Trajectoria das partículas</b>	Lagrangeano	Lagrangeano	Lagrangeano	Lagrangeano	Euleriano	Lagrangeano ou Euleriano	Lagrangeano ou Euleriano
<b>Camada limite</b>	Método Integral	Método Integral	Método Integral	Método Integral	Método Integral	Método Integral Navier-Stokes	Método Integral Navier-Stokes
<b>Transferência de Calor Modelo</b>	Spalding	Spalding	Spalding	Spalding	Modelo S-A	Spalding	Spalding
<b>Termodinâmico</b>	Messinger	Messinger	Messinger	Messinger	Messinger	Messinger	Messinger
<b>Rugosidade</b>	Correlação de Ruff	Correlação empírica	Correlação ERA	Correlação de Ruff	Correlação de Ruff	Uniforme	Analítica

## 1.2 Motivação

A maioria dos códigos de formação de gelo existentes usa o modelo termodinâmico proposto por Messinger (1953) para prever a quantidade de gelo que se forma nas superfícies de uma aeronave. Esse modelo considera que há a formação de um filme de água sobre toda a superfície quando a água incidente não congela ao entrar em contato com a aeronave. Entretanto, experimentos têm verificado que isso não é sempre verdade. Um filme de água está presente apenas em uma pequena região próxima ao ponto (linha) de estagnação, enquanto que, nas demais regiões, há a presença de um grande número de gotas estacionárias ou filetes. Essas evidências experimentais são mais bem relatadas por Olsen e Walker (1986), Hansman e Turnock (1989) e Hansman et al. (1991). Tais evidências podem ser observadas na Figura 1.6.



**Figura 1.6 – Formação de gotas sobre uma asa – adaptado de (OLSEN; WALKER, 1986).**

Observa-se, na Figura 1.6, a presença de um pequeno filme de água na região próxima ao bordo de ataque e que, com o decorrer do tempo, essa região diminui. Nas demais regiões têm-se diversas gotas deformadas devido aos efeitos das forças aerodinâmicas e da gravidade. Com tais evidências conclui-se que o modelo de Messinger não representa de forma correta o fenômeno quando a formação de gelo ocorre em regime úmido e líquido, enquanto que, para o regime seco, o modelo representa corretamente o fenômeno. Outra deficiência dos códigos existentes é que, em geral, são utilizadas correlações empíricas para o cálculo da rugosidade sobre o gelo. Visto que a rugosidade apresenta um papel importante no cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção e no acúmulo de água sobre a superfície, é necessário também um modelo que contemple o cálculo da rugosidade, baseando-se nas observações experimentais citadas acima.

O presente trabalho propõe modificações do modelo termodinâmico existente e um modelo de cálculo da rugosidade da superfície do gelo, considerando tais aspectos. O novo modelo combina equações de balanço de massa e de energia, empregadas por Silveira (2001), com modelos analíticos para previsão da configuração da água na superfície e para o cálculo da rugosidade.

O conhecimento da rugosidade da superfície do gelo permite uma estimativa mais realística do coeficiente de transferência de calor por convecção, com conseqüências importantes nos balanços de massa e de energia, e assim uma melhor previsão da formação de gelo do tipo regelo.

### 1.3 Objetivo

A modelagem do problema de formação de gelo pode ser dividida em duas partes: a aerodinâmica externa e o modelo termodinâmico da formação de gelo. A primeira é necessária para determinar algumas das variáveis de entrada para o problema de formação de gelo. Coeficiente de transferência de calor por convecção, tensão cisalhante, velocidade de impacto das gotículas de água, pressão e eficiência de coleta sobre a superfície são os parâmetros necessários na modelagem do fenômeno de crescimento de gelo, os quais são obtidos do escoamento externo. No presente trabalho essa etapa será considerada conhecida e será obtida por meio de *software* comercial de CFD, como o ANSYS CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.), ou por meio do método dos painéis (SILVEIRA, 2001).

A segunda etapa é onde se concentra o presente trabalho. O principal objetivo desta etapa é a implementação de um modelo físico que considere a existência de gotas sobre a superfície da aeronave sujeita à formação de gelo, objetivando a determinação da rugosidade sobre a superfície do gelo.

Além desse objetivo principal, o presente trabalho procura ainda fazer algumas contribuições adicionais ao entendimento da física do problema aplicado a perfis aerodinâmicos. Abaixo são listadas algumas contribuições secundárias do trabalho:

- Breve estudo da influência de alguns parâmetros numéricos e físicos na simulação da formação de gelo, como, por exemplo, refino de malha, modelo de turbulência, etc;
- Aplicação de uma metodologia de validação quantitativa da ferramenta de previsão de formação de gelo;
- Implementação de um aplicativo auto-suficiente para formação de gelo, que, em um mesmo núcleo numérico, resolva todo o ciclo de formação de gelo usando o modelo termodinâmico clássico ou o modelo proposto;
- Estudo da sensibilidade da formação de gelo em relação à rugosidade.

### 1.4 Organização do Trabalho

A presente dissertação está dividida em oito capítulos. No Cap. 2 o fenômeno físico de formação de gelo é descrito e alguns parâmetros do fenômeno são introduzidos. Também são comentados os regimes de formação e não formação, tipos de gelo e meios de evitar a formação de gelo.

Os modelos físicos adotados são apresentados em dois capítulos. Primeiro, no Cap. 3, é descrito o modelo termodinâmico de formação de gelo, onde são detalhados todos os termos dos balanços de energia e de massa. Por fim, no Cap. 4, o modelo para o cálculo da rugosidade sobre o gelo é apresentado.

No Cap. 5 são apresentados como o código implementado está organizado e os principais fluxogramas deste código, além de serem discutidos alguns aspectos importantes da implementação computacional e dos algoritmos de solução.

No Cap. 6, são apresentados a validação dos modelos físicos descritos ao longo do trabalho, uma análise da influência da rugosidade, uma discussão acerca de alguns parâmetros numéricos e físicos na solução do problema de formação de gelo e os resultados propriamente ditos.

Uma metodologia de avaliação quantitativa dos resultados obtidos com o presente trabalho é descrita no Cap. 7. Dentro deste capítulo são descritas as formas de obtenção dos parâmetros da avaliação, como é feita essa avaliação e a aplicação da metodologia no código do presente trabalho.

Para finalizar, o Cap. 8 apresenta uma discussão geral do trabalho, juntamente com sugestões para futuros trabalhos.

## 2 O FENÔMENO FÍSICO

Quando uma aeronave atravessa uma nuvem na qual existem pequenas gotas de água sub-resfriadas, dependendo das condições atmosféricas, gelo pode se formar sobre as superfícies expostas da aeronave, como, por exemplo, no bordo de ataque das asas. Essas gotas de água sub-resfriadas encontram-se em estado líquido mesmo em temperaturas abaixo da temperatura de congelamento, devido ao pequeno diâmetro, à baixa pressão atmosférica e à presença de impurezas. Por estarem em equilíbrio meta-estável, ao entrarem em contato com a superfície da aeronave, elas podem congelar total ou parcialmente. O mesmo processo pode ocorrer sobre a camada de gelo formada, assim a espessura de gelo aumenta continuamente enquanto a aeronave permanecer exposta a tais condições. Esse problema é ilustrado na Figura 2.1. Os parâmetros que influenciam no crescimento de gelo são: a forma, a temperatura e a velocidade da superfície, a temperatura e a pressão ambientes, a concentração de água líquida (LWC) e o tamanho das gotículas (MVD<sup>5</sup>). A análise de como algum desses parâmetros afetam a formação de gelo pode ser conferida no trabalho de Silveira e Maliska (2001).

Para o melhor entendimento do fenômeno de formação de gelo, nas próximas seções serão apresentados os regimes de formação e não formação de gelo, os tipos de gelo que podem se formar e como os sistemas de proteção funcionam na prevenção desse acúmulo de gelo.

---

<sup>5</sup> Uma nuvem apresenta um espectro de gotículas de água, no qual é representado por uma média volumétrica dos diâmetros das gotículas, denominada MVD (*Median Volumetric Diameter*).

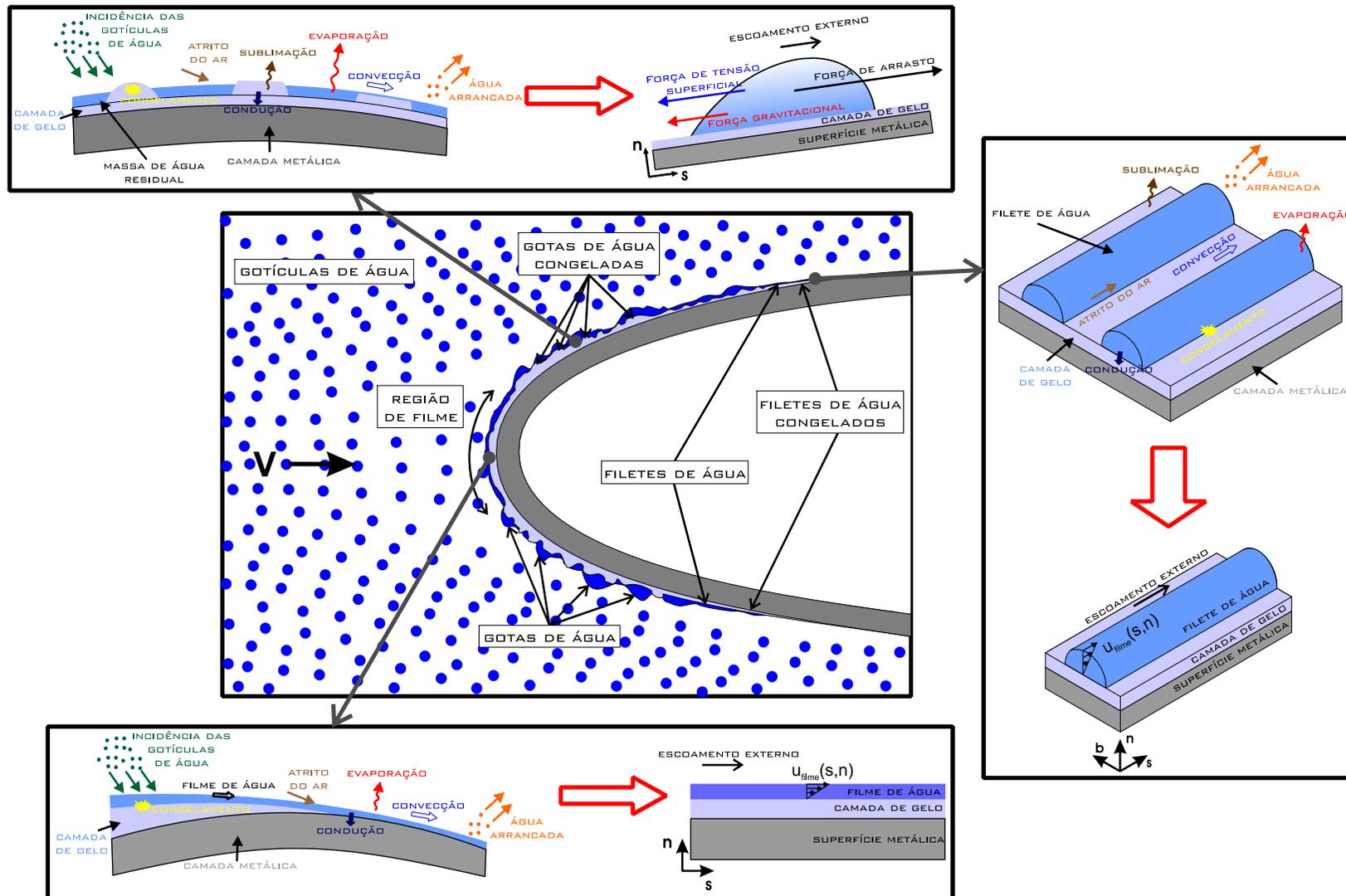


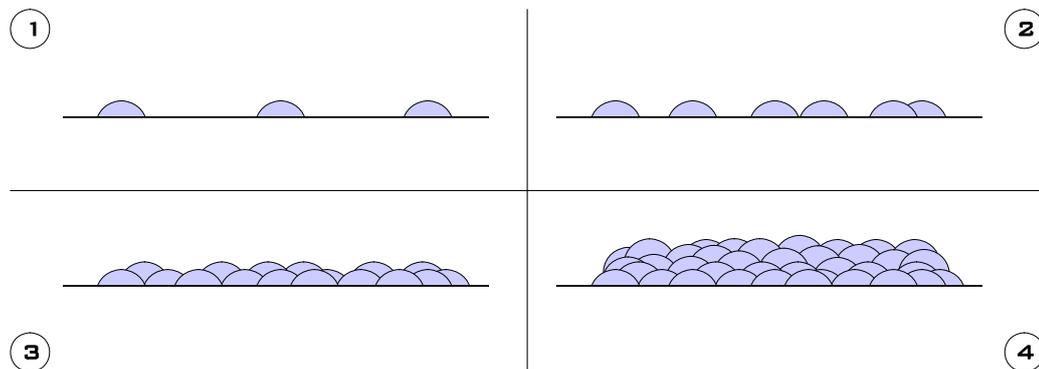
Figura 2.1 – Esquema do problema físico.

## 2.1 Regimes de formação de gelo

O processo de formação de gelo nas superfícies de uma aeronave pode ocorrer em três regimes: seco, úmido e misto. Esses regimes são função basicamente da temperatura da superfície, e, conseqüentemente, da fração de congelamento e estão diretamente ligados ao tipo de gelo que se formará. Dependendo do regime de formação de gelo, o congelamento da água sobre a superfície pode ocorrer de diferentes formas.

### 2.1.1 Regime seco

O regime seco ocorre quando a temperatura da superfície é inferior à temperatura de congelamento da água e a fração de congelamento é igual à unidade. Neste regime, toda água que incide sobre a superfície é congelada. A Figura 2.2 ilustra a formação de gelo para este regime com o decorrer do tempo. Do regime de formação de gelo seco se origina o tipo de gelo escarcha branca<sup>6</sup>.



**Figura 2.2 – Formação de gelo no regime seco.**

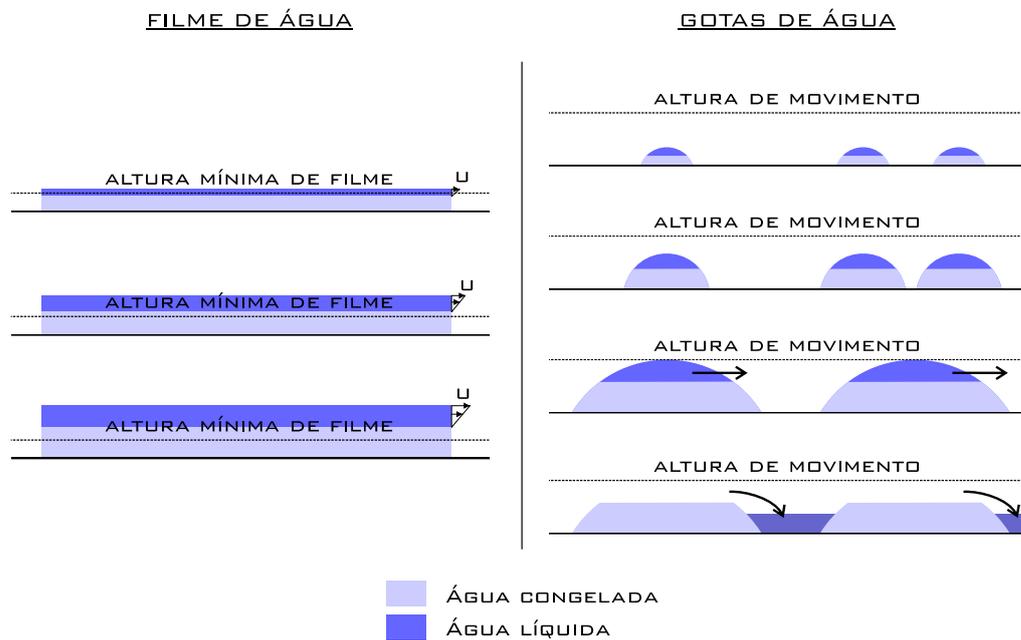
### 2.1.2 Regime úmido

O regime úmido se caracteriza pela superfície apresentar temperatura igual à temperatura de solidificação da água e a fração de congelamento estar no intervalo de zero a um. Geralmente este regime está associado à formação de gelo do tipo regelo e misto.

A Figura 2.3 mostra a formação de gelo no regime úmido quando a água sobre a superfície está na configuração de filme e gotas. Quando há a presença de um filme de água, este congela a partir da superfície. A parte não congelada do filme de água escoava para regiões mais à jusante por efeito da tensão cisalhante provocada pelo escoamento externo. Na configuração de gotas, estas também congelam a partir da superfície, assim tem-se uma parcela da gota no estado líquido e outra parcela no estado sólido, como pode ser observado na Figura 2.3. As gotas aumentam de tamanho com o tempo, pois coalescem com outras gotas, até atingirem uma altura máxima, denominada altura de

<sup>6</sup> Escarcha branca é a nomenclatura em português dada ao *rime ice* (SIMÕES, 2004).

movimento. Quando as gotas atingem essa altura de movimento, a parcela líquida é carregada pelo escoamento, podendo se depositar entre as gotas congeladas, ou ainda escoar para regiões à jusante.



**Figura 2.3 – Formação de gelo em regime úmido.**

A altura mínima de filme e a altura de movimento, mostradas na Figura 2.3, são definidas no Capítulo 4.

### 2.1.3 Regime misto

Por fim, uma combinação entre o regime seco e úmido pode ocorrer. Em algumas regiões do perfil, a água incidente pode congelar ao impacto, enquanto que em outras a água permanece no estado líquido. Deste tipo de regime se originam os gelos do tipo misto.

## 2.2 Regimes de não formação de gelo

Apesar dos regimes líquido e evaporativo não serem regimes de formação de gelo, eles são citados, pois podem ocorrer quando um sistema de proteção está ligado ou a temperatura da superfície é suficientemente alta.

### 2.2.1 Regime líquido

Neste regime a temperatura da superfície é suficientemente alta para que toda a água incidente permaneça no estado líquido, seja devido ao sistema de proteção ou à própria condição atmosférica. Assim, a fração de congelamento é nula. Neste regime tem-se a presença de água líquida sobre toda a superfície, seja em forma de filme, gotas ou filetes.

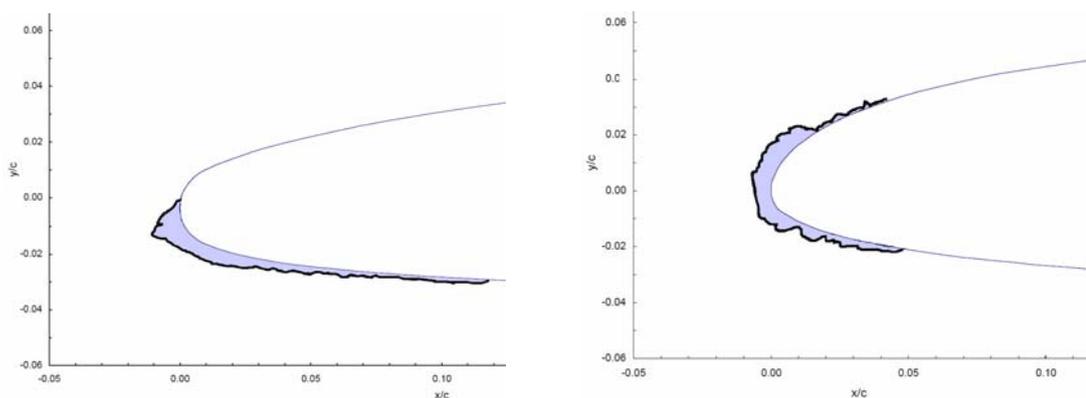
### 2.2.2 Regime evaporativo

O regime evaporativo ocorre quando o sistema de proteção está em funcionamento e fornece energia suficiente para que toda a massa de água incidente se evapore. Assim como no regime líquido, para este regime, a fração de congelamento é nula.

## 2.3 Tipos de gelo

Um fator importante do fenômeno é conhecer a forma e o tipo de gelo que pode se formar, pois o conhecimento do tipo de gelo formado permite a alteração das condições de vôo – velocidade, ângulo de ataque – de forma a compensar a degradação aerodinâmica provocada pelo gelo acumulado. O tipo de gelo que será formado depende diretamente do conteúdo de água líquida (LWC), do diâmetro das partículas, da temperatura da superfície e da velocidade da aeronave; e está ligado ao regime de formação de gelo, comentado anteriormente. Existem três tipos de gelo que podem se formar sobre uma superfície não protegida: escarcha branca, regelo e misto.

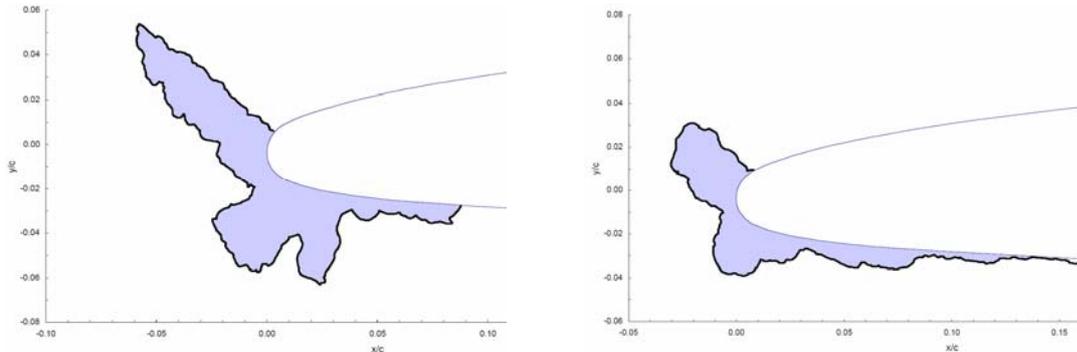
O gelo do tipo escarcha branca, ou mais comumente conhecido como *rime ice*, se caracteriza por apresentar um aspecto branco e opaco. Este tipo de gelo está associado ao fato da superfície estar em uma condição sub-resfriada, devido à baixa temperatura associada à baixa velocidade da aeronave e à pequena concentração de água. Nesse caso, as partículas congelam quando impactam contra a superfície. Outra característica dessa formação de gelo é a apresentação de uma superfície pouco rugosa e de formas simples sem protuberâncias, como pode ser observado na Figura 2.4. Nessa figura são apresentadas formas de gelo do tipo escarcha branca, obtidas experimentalmente em testes de túnel de vento.



**Figura 2.4 – Formas de gelo do tipo escarcha branca. Fonte: (ADDY, 2000).**

O segundo tipo de gelo ocorre em condições onde a superfície exposta apresenta temperaturas mais próximas do ponto de solidificação da água. Dessa forma o congelamento não ocorre logo após o impacto e parte da água permanece em estado líquido na forma de um filme de água ou de um grande número de gotas estacionárias. Essa formação de gelo é denominada regelo ou *glaze ice*. Este tipo de gelo se caracteriza

por apresentar uma superfície bastante rugosa e geometria com grandes protuberâncias, conhecidas como "chifres" de gelo, sendo, portanto, o tipo mais crítico de formação de gelo. Os "chifres" de gelo e a rugosidade afetam de forma considerável o escoamento sobre o aerofólio. Os "chifres" de gelo provocam o surgimento de regiões de recirculação e a rugosidade antecipa a transição do escoamento laminar para turbulento. Exemplos experimentais deste tipo de gelo podem ser vistos na Figura 2.5.



**Figura 2.5 – Formas de gelo do tipo regelo. Fonte: (ADDY, 2000).**

Porém o tipo de gelo mais comum é o misto, onde os dois tipos de gelo, escarcha branca e regelo, ocorrem simultaneamente. Apresentando, geralmente na região próxima ao bordo de ataque, uma formação do tipo escarcha branca e, nas regiões à jusante, uma formação do tipo regelo.

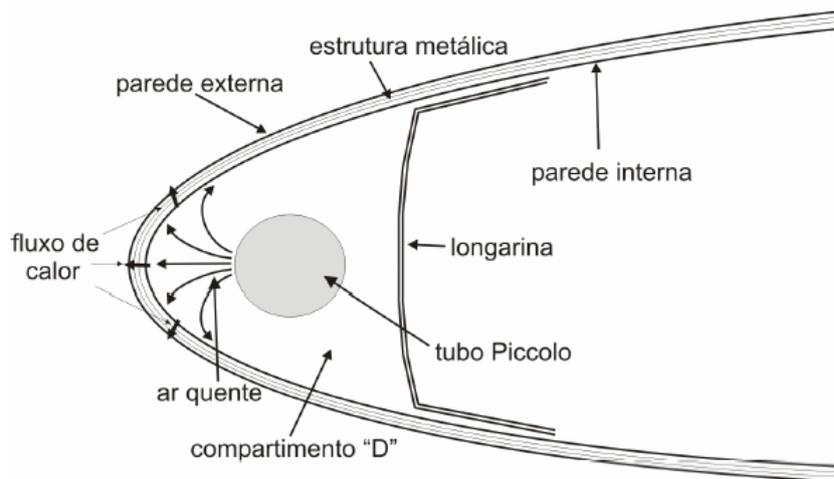
## 2.4 Sistemas de proteção

Como mencionado na Introdução, uma das formas de se evitar a formação de gelo nas aeronaves é o emprego de sistemas de proteção. Os sistemas de proteção contra formação de gelo são classificados em dois grupos:

**Sistemas anti-gelo** – são os que trabalham no sentido de prevenir a formação de gelo sobre a superfície. Estes sistemas operam de forma contínua, garantindo a não formação de gelo, seja aquecendo a superfície ou por meio da aplicação de fluidos especiais;

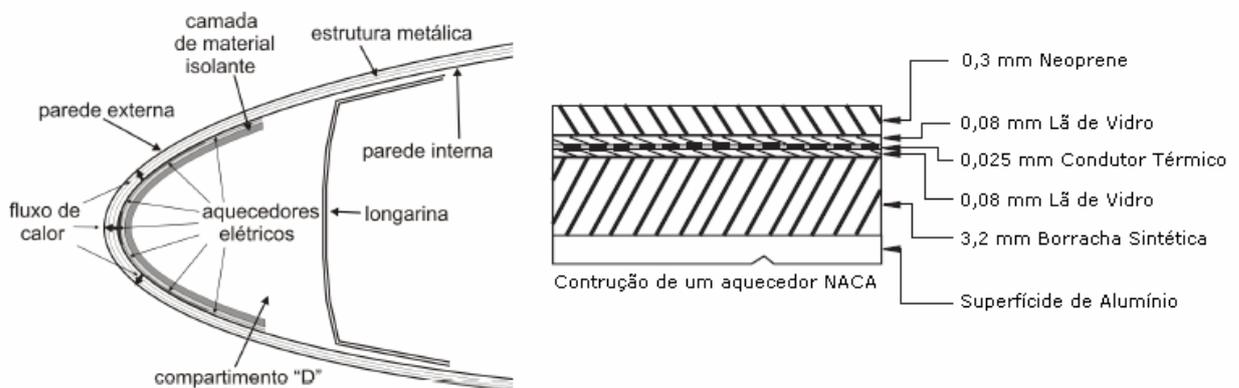
**Sistema de degelo** – atuam na remoção do gelo acumulado sobre a superfície. Como estes sistemas atuam depois da formação de gelo seu funcionamento ocorre de forma cíclica, como é o caso de sistemas pneumáticos.

Entre os sistemas anti-gelo que mais se destacam e que são mais utilizados estão o sistema eletro-térmico e o de ar quente. Os sistemas de ar-quente consistem no reaproveitamento do ar quente gerado nos motores. Esse ar é distribuído através de um tubo, denominado de tubo Picollo, que corre ao longo da envergadura da asa como mostrado na Figura 2.6. O tubo Picollo possui uma grande quantidade de orifícios ao longo de sua extensão de onde ar quente é soprado em direção à superfície interna da asa e, por meio de condução de calor, a superfície externa é aquecida.



**Figura 2.6 – Esquema de um sistema de ar quente – adaptado de (HEINRICH, 1991).**

Nos sistemas eletro-térmicos, a parede metálica do aerofólio, que é composta por várias camadas de diferentes materiais, apresenta condutores elétricos por onde passa uma corrente elétrica. Um esquema desse sistema e as camadas de materiais que o formam são mostrados na Figura 2.7. A passagem de corrente elétrica, que pode ser diferente para cada condutor, aquece os condutores e calor é transferido entre as camadas até chegar à superfície do aerofólio. Um material isolante na parte interna do aerofólio é usado para que o fluxo de calor se direcione às camadas externas, conseqüentemente a temperatura na superfície externa aumenta. No caso de não haver gelo sobre a superfície, se a temperatura for suficientemente alta, as partículas de água que se chocam contra a superfície ou a água sobre ela não congelam. Quando a superfície já está contaminada com gelo, ocorre o descongelamento deste e a camada de gelo se desprende da superfície. Esse dispositivo, por consumir muita energia, é usado principalmente em aviões de pequeno porte e em pequenas superfícies de grandes aeronaves, como por exemplo, pára-brisas e pequenas entradas de ar.



**Figura 2.7 – Sistema eletro-térmico e as camadas que o formam – adaptado de (HEINRICH, 1991).**

Sistemas eletro-térmicos também são utilizados como sistemas de degelo. O funcionamento é semelhante ao descrito acima, com a diferença de que a corrente

elétrica que passa nos condutores térmicos atua de forma cíclica. O sistema é utilizado quando já existe uma camada de gelo, assim, quando a superfície é suficientemente aquecida, o gelo formado derrete e é arrancado pelo escoamento. Além dos sistemas eletro-térmicos também existem sistemas de degelo pneumáticos, onde gelo é removido mecanicamente por meio do insuflamento de ar nas camadas elásticas da superfície, que fazem a superfície se deformar e quebrar a camada de gelo.

A partir desta revisão inicial do fenômeno físico da formação de gelo, a seguir apresentam-se em detalhes os modelos físicos e matemáticos utilizados neste trabalho.

### 3 MODELO TERMODINÂMICO

O crescimento de gelo em superfícies aerodinâmicas é um fenômeno transiente, porém a mudança de estado da água de líquida para sólida ocorre de forma praticamente instantânea e o problema pode ser considerado quase-permanente. Os balanços de energia e de massa são realizados para determinados intervalos de tempo, em que são obtidas a temperatura da superfície, a fração de congelamento, a espessura do gelo formado e sua respectiva rugosidade. Como a geometria e a rugosidade da superfície mudam com o acúmulo de gelo, têm-se também mudanças significativas no escoamento externo e conseqüentemente nos balanços termodinâmicos. O problema é assim resolvido de forma cíclica. Primeiro é resolvido o escoamento externo e posteriormente o balanço termodinâmico. Conhecidas a nova geometria e rugosidade da superfície do gelo, o escoamento externo é atualizado e um novo balanço termodinâmico é resolvido, assim consecutivamente até o tempo total de formação de gelo ser atingido.

O modelo termodinâmico utilizado neste trabalho é bidimensional, porém o crescimento de gelo pode ser aplicado a problemas bi e tridimensionais. Para problemas bidimensionais, o escoamento é simplesmente resolvido para uma geometria 2D acoplado ao módulo termodinâmico. Já para problemas tridimensionais, o escoamento externo é resolvido para a geometria 3D e os dados de entrada do modelo termodinâmico são os cortes 2D feitos ao longo da envergadura (no caso de uma asa) ou ao longo do ângulo (no caso de uma *nacelle*). Com a forma de gelo obtida para cada corte é então feita a reconstrução da geometria do perfil e retorna-se ao cálculo do escoamento externo.

O modelo termodinâmico empregado é fundamentado no modelo proposto por Messinger (1953) e usado por Silveira (2001) e no código LEWICE (WRIGHT, 1995). O modelo básico é alterado para contemplar a existência de gotas sobre a superfície.

No modelo termodinâmico são considerados balanços de massa e de energia sobre a superfície em estudo. Esses balanços são realizados em volumes de controle criados sobre a superfície do perfil, conforme a Figura 3.1. Esses balanços iniciam-se a partir do ponto de estagnação e são realizados em processo de marcha sobre as superfícies superior e inferior, como também ilustrado na Figura 3.1. O cálculo se inicia no ponto de estagnação, pois considera-se que massa de água entra nos volumes de controle adjacentes ao ponto de estagnação apenas devido ao impacto das gotículas.

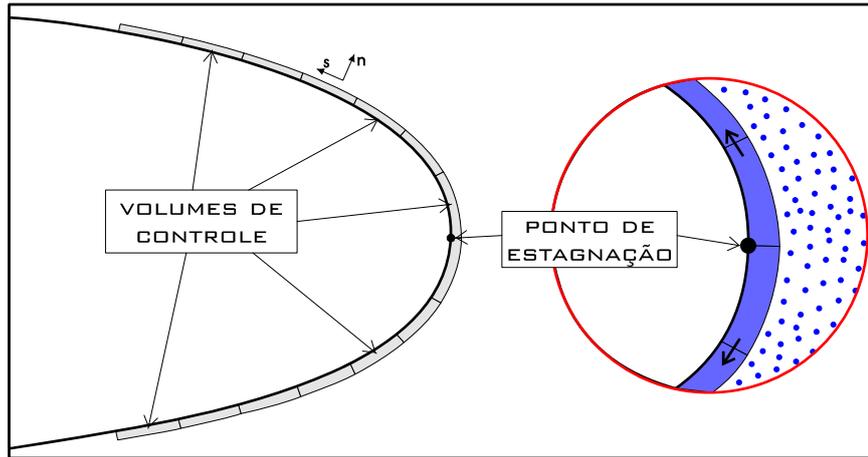


Figura 3.1 – Volumes de controle e região vizinha ao ponto de estagnação.

### 3.1 Balanço de massa

A quantidade de gelo que se forma sobre a superfície é determinada por meio do balanço de massa. O balanço de massa é realizado em um volume de controle genérico durante um intervalo de tempo  $\Delta t$ , conforme ilustrado na Figura 3.2, e dado por

$$(\dot{m}_{inc} + \dot{m}_{rb,entra}) \cdot \Delta t + m_{líq,ret} = (\dot{m}_{evap} + \dot{m}_{rb,sai} + \dot{m}_{arr,água}) \cdot \Delta t + m_{líq} + m_{gelo} \quad (3.1)$$

onde

$\dot{m}_{inc}$  - vazão mássica de água incidente;

$\dot{m}_{rb,entra}$  - vazão mássica de água de *runback* que entra;

$m_{líq,ret}$  - massa de água líquida existente no volume de controle, do tempo anterior, disponível para congelar ou ainda permanecer líquida;

$\dot{m}_{evap}$  - vazão mássica de água evaporada;

$\dot{m}_{rb,sai}$  - vazão mássica de água de *runback* que sai;

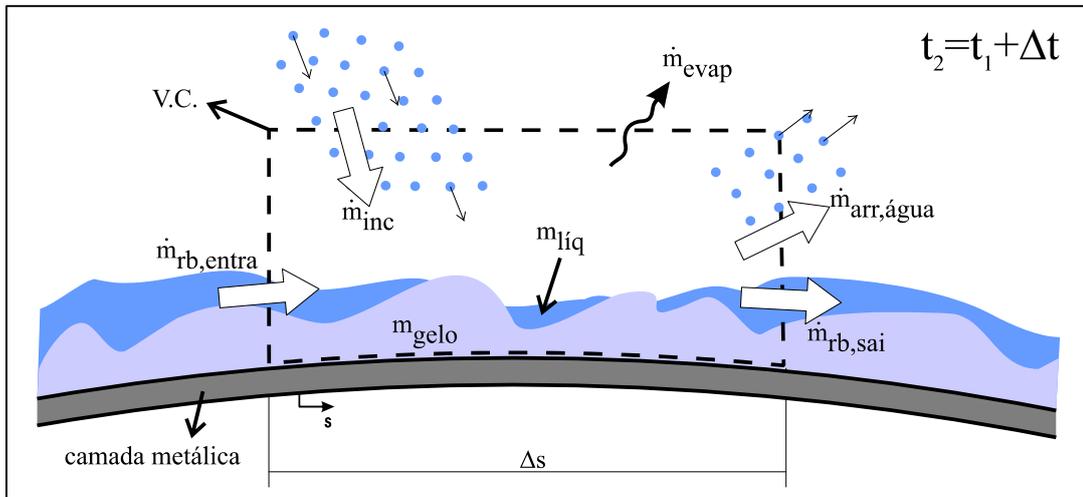
$\dot{m}_{arr,água}$  - vazão mássica de água arrancada;

$m_{líq}$  - massa de água que permanece líquida no volume de controle; e

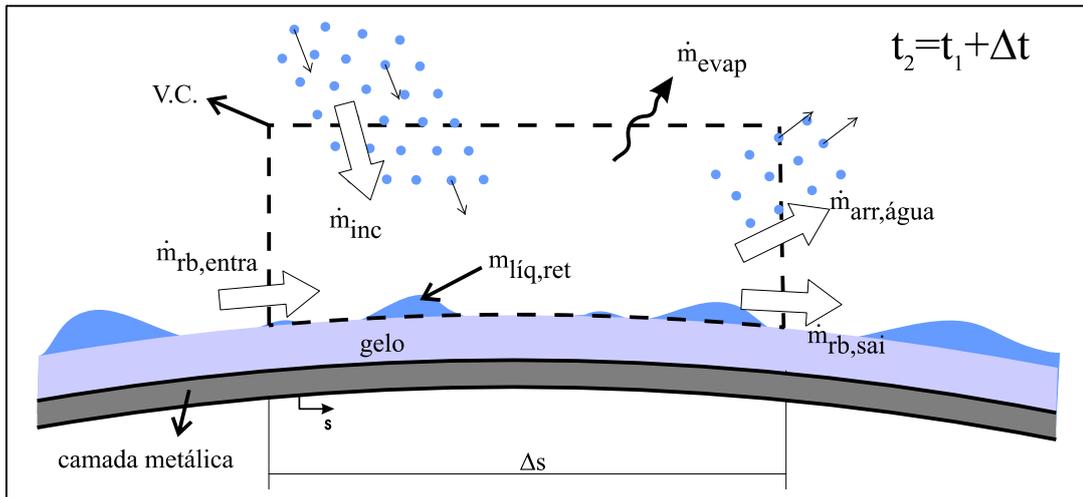
$m_{gelo}$  - massa de água congelada.

A Figura 3.2(a) representa o balanço de massa no final de um determinado passo de tempo. Após a determinação da quantidade de gelo formado, o gelo é retificado e o novo volume de controle é criado a partir da camada de gelo, como ilustrado na Figura 3.2(b). Na Figura 3.2(b) é mostrado o volume de controle para o início do passo de tempo seguinte, onde, além das vazões mássicas, há uma massa de água líquida que permanece no volume de controle. Logicamente, nas duas figuras o nível de tempo ( $t_2$ ) é

o mesmo, elas diferem apenas que no início do próximo passo de tempo o gelo criado não faz mais parte do volume de controle. A massa de água retida, sim.



(a)



(b)

**Figura 3.2 - Balanço de massa: (a) Final do primeiro passo de tempo e (b) Início do segundo passo de tempo.**

Na seqüência são descritos cada um dos termos do balanço de massa.

### 3.1.1 Vazão mássica de água incidente

A vazão mássica de água incidente no volume de controle provém do impacto das gotículas de água presentes no escoamento externo contra a superfície e é expressa por

$$\dot{m}_{inc} = \beta \cdot LWC \cdot U_{\infty} \cdot \Delta b \cdot \Delta s, \quad (3.2)$$

onde

$LWC$  - conteúdo de água líquida;

$U_{\infty}$  - velocidade do escoamento externo;

$\beta$  - eficiência de coleta<sup>7</sup>;

$\Delta s$  - comprimento do painel.

### 3.1.2 Vazão mássica de *runback* que entra

A vazão mássica de água de *runback* que entra no volume de controle é a vazão mássica de água que escoo do volume de controle à montante. Assim, essa vazão mássica de *runback* é igual à vazão mássica de *runback* que sai do volume de controle à montante, dada por

$$\dot{m}_{rb,entra}^{(s)} = \dot{m}_{rb,sai}^{(s-\Delta s)}. \quad (3.3)$$

Para os volumes de controle adjacentes ao ponto de estagnação a vazão mássica de *runback* de entrada é nula.

### 3.1.3 Massa de água líquida retida

A massa de água líquida retida é a massa de água, do tempo anterior, que não congela e permanece no volume de controle na fase líquida. Esta massa de água líquida permanece no volume de controle, pois fica aprisionada entre as gotas de água congelada. Este termo depende da configuração da água sobre a superfície e é igual à massa de água líquida do passo de tempo anterior, dada por

$$m_{liq,ret}^{(t)} = m_{liq}^{(t-\Delta t)}. \quad (3.4)$$

Para  $t = 0$ , a massa de água líquida retida é nula.

### 3.1.4 Vazão mássica de água evaporada

Em conseqüência da existência de um gradiente de concentração de vapor de água entre a superfície do perfil aerodinâmico e da borda da camada limite, massa de água pode deixar o volume de controle por um mecanismo de convecção. A taxa de transferência de massa por difusão é definida pela Lei de Fick, porém esta considera que a difusão de massa ocorre devido apenas ao gradiente de concentração de vapor de água. No fenômeno de formação de gelo, além do gradiente de concentração, existe ainda um gradiente de temperatura e de pressão entre a superfície do perfil aerodinâmico e da borda da camada limite, assim, a Lei de Fick não é suficiente para descrever o fluxo de massa evaporativo. Uma expressão analítica considerando todos esses efeitos é apresentada por Bird (1960) e dada por

---

<sup>7</sup> A eficiência de coleta é a capacidade da superfície capturar as gotículas de água presentes na nuvem. Assim, a eficiência de coleta pode ser definida como a razão entre o fluxo de massa de água na superfície e o fluxo de massa de água na corrente livre:  $\beta = \dot{m}_{sup}'' / \dot{m}_{\infty}''$ .

$$\dot{m}_{evap} = h_{massa} \cdot (C_{v,s} - C_{v,e}) \cdot (\Delta b \cdot \Delta s), \quad (3.5)$$

onde

$h_{massa}$  - coeficiente de transferência de massa por convecção;

$C_{v,s}$  - concentração mássica de vapor de água na superfície; e

$C_{v,e}$  - concentração mássica de vapor de água na borda da camada limite.

O coeficiente de transferência de massa por convecção pode ser relacionado ao coeficiente de transferência de calor por convecção por meio da analogia de Chilton-Colburn (BIRD, 1960), sendo expresso por

$$h_{massa} = \frac{h_{conv}}{\rho_{ar,e} \cdot c_{p,ar} \cdot Le^{2/3}}, \quad (3.6)$$

onde

$\rho_{ar,e}$  - densidade do ar na borda da camada limite;

$c_{p,ar}$  - calor específico do ar a pressão constante na borda da camada limite;

$Le$  - número de Lewis.

O número de Lewis é definido pela razão entre os números de Schmidt e de Prandtl

$$Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{\alpha_{ar,e}}{D_{AB}}, \quad (3.7)$$

onde

$\alpha_{ar,e}$  - difusividade térmica do ar na borda da camada limite; e

$D_{AB}$  - difusividade mássica do vapor de água no ar na borda da camada limite.

As concentrações mássicas de vapor de água são calculadas por meio da equação de estado para gases perfeitos. Assim, a concentração mássica de vapor de água é função apenas da pressão de vapor correspondente à saturação, e da temperatura

$$C_v = \frac{P_v(T)}{R_{v,\acute{a}gua} \cdot T}. \quad (3.8)$$

Substituindo as Equações (3.6) e (3.8) em (3.5), tem-se

$$\dot{m}_{evap} = \frac{h_{conv}}{\rho_{ar,e} \cdot c_{p,ar} \cdot Le^{2/3} \cdot R_{v,\acute{a}gua}} \cdot \left( \frac{P_{v,s}(T_s)}{T_s} - \frac{P_{v,e}(T_e)}{T_e} \right) \cdot (\Delta b \cdot \Delta s), \quad (3.9)$$

onde  $T_s$  e  $T_e$  são as temperaturas da superfície e da borda da camada limite, respectivamente.

A pressão de vapor na borda da camada limite ( $P_{v,e}$ ) pode ser expressa em função da pressão na borda da camada limite ( $P_e$ ), da pressão da corrente livre ( $P_\infty$ ), da pressão de vapor da corrente livre ( $P_{v,\infty}$ ) e da umidade relativa ( $\phi$ ), como

$$\frac{P_{v,e}}{P_e} = \phi \cdot \frac{P_{v,\infty}}{P_\infty}. \quad (3.10)$$

A expressão (3.10) é obtida realizando-se um balanço de massa ao longo das trajetórias das gotículas de água entre a corrente livre e a borda da camada limite, assumindo que não há condensação nem evaporação durante a trajetória (WRIGHT, 1995a).

Substituindo a Eq. (3.10) em (3.9) e substituindo a densidade do ar pela equação de estado para gases perfeitos, a massa perdida por evaporação pode ser escrita como

$$\dot{m}_{evap} = \frac{h_{conv}}{\rho_{ar,e} \cdot c_{p,ar} \cdot Le^{2/3} \cdot R_{\acute{a}gua}} \cdot \left( \frac{P_{v,s}(T_s)}{T_s} - \phi \cdot \frac{P_e}{T_e} \cdot \frac{P_{v,\infty}(T_\infty)}{P_\infty} \right) \cdot (\Delta b \cdot \Delta s). \quad (3.11)$$

### 3.1.5 Vazão mássica de água arrancada

Massa de gelo e de água podem ser arrancadas da superfície em consequência das forças cisalhantes do escoamento de ar atuando sobre a camada de gelo e água. A quantidade de massa de gelo arrancada é desprezível e é considerada, por simplicidade, nula

$$m_{arr,gelo} = 0. \quad (3.12)$$

A massa de água arrancada é obtida empregando-se uma correlação empírica baseada no número de Weber ( $We$ ) da gota, que correlaciona as forças de inércia com as forças de tensão superficial e é dado por

$$We_{gota} = \frac{\rho \cdot \bar{U}_{gota}^2 \cdot e_{gota}}{\sigma}. \quad (3.13)$$

onde  $\bar{U}_{gota}$  é a velocidade média atuando sobre a gota,  $e_{gota}$  é a altura da gota e  $\sigma$  é a tensão superficial entre a gota e o ar.

Considera-se que massa de água é arrancada quando o número de Weber local é maior do que um valor crítico ( $We_c = 500$ ). A correlação e o número de Weber crítico são definidos por Wright (1995a) e foram obtidos por meio de observações qualitativas do processo de formação de gelo. Assim, a fração da massa de água arrancada é calculada por uma expressão linear, dada por

$$fração_{perdida} = \frac{We - We_c}{We}. \quad (3.14)$$

Dessa forma, a vazão mássica de água arrancada é calculada como

$$\dot{m}_{arr,água} = fração_{perdida} \cdot \left( \dot{m}_{inc} + \dot{m}_{rb,entra} + \frac{m_{liq,ret}}{\Delta t} \right). \quad (3.15)$$

### 3.1.6 Massa de água líquida

A massa de água líquida é a quantidade de massa de água que permanece no volume de controle no estado líquido. Essa quantidade de massa depende da configuração da água sobre a superfície.

Para as configurações de filme e filetes toda massa de água que não congela no volume de controle escoava para o volume de controle à jusante, devido ao efeito do escoamento externo. Sendo assim, a massa de água líquida para estas configurações da água é nula.

Quando a água está na forma de gotas, parte da massa de água que entra no volume de controle fica retida entre as gotas de água congelada. A forma como essa massa é calculada está descrita no Cap. 4.

No crescimento de gelo em regime seco, a massa de água líquida também é considerada nula, pois toda água que incide sobre a superfície congela.

### 3.1.7 Vazão mássica de *runback* que sai

A parcela da massa de água que não congela e não fica retida no volume de controle escoava para o volume de controle à jusante e é definida como vazão mássica de *runback* que sai do volume de controle. Essa parcela é dada por

$$\dot{m}_{rb,sai} = (1 - f_c) \cdot \left( \dot{m}_{inc} + \dot{m}_{rb,entra} + \frac{m_{liq,ret}}{\Delta t} \right) - \dot{m}_{arr,água} - \dot{m}_{evap} - \frac{m_{liq}}{\Delta t}, \quad (3.16)$$

onde  $f_c$  é a fração de congelamento, definida mais adiante.

### 3.1.8 Massa congelada

A massa de água que congela no volume de controle é definida pela quantidade de água líquida presente no volume de controle e pela fração de congelamento  $f_c$ , sendo expressa por

$$m_{gelo} = f_c \cdot \left[ \left( \dot{m}_{inc} + \dot{m}_{rb,entra} \right) \cdot \Delta t + m_{liq,ret} \right], \quad (3.17)$$

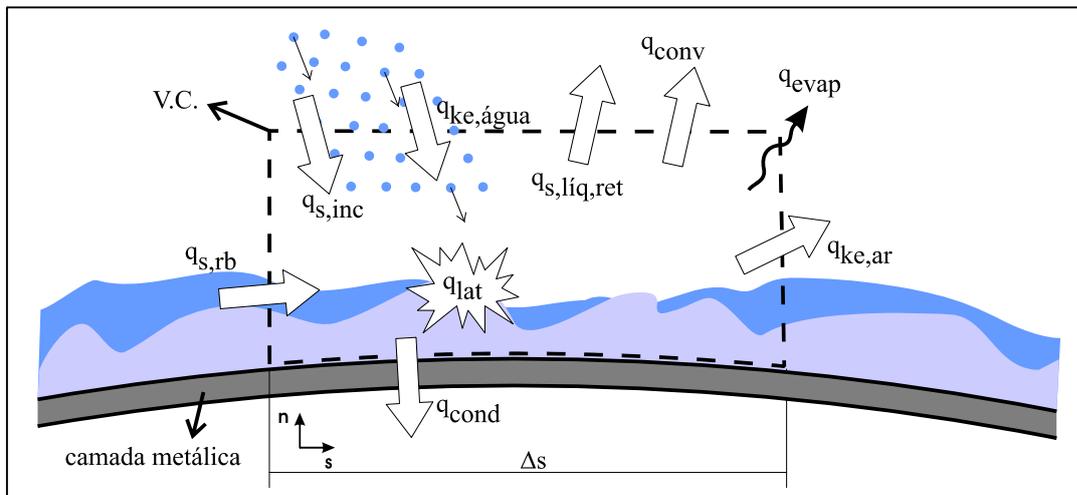
onde  $f_c$  é a fração de congelamento, dada por

$$f_c = \frac{T_c + \Delta T_c - T}{2 \cdot \Delta T_c}, \quad (3.18)$$

onde  $T_c$  é a temperatura de congelamento da água e  $\Delta T_c$  é o intervalo de temperatura em torno da temperatura de congelamento em que ocorre a mudança de fase. Esse intervalo de temperatura é considerado da ordem de  $10^{-5}$  K. A expressão (3.18) é obtida da formulação em função da entalpia para a mudança de fase (SHYY et al., 1996). Sua dedução pode ser conferida no trabalho de Silveira (2006).

### 3.2 Balanço de energia

A Figura 3.3 mostra as taxas de transferência de calor utilizadas no balanço de energia para um volume de controle. As taxas de transferência de calor consideradas no balanço são as taxas devido ao congelamento da água, à mudança de entalpia do gelo e da água, ao impacto das gotículas de água, à evaporação da água presente na superfície, ao atrito do escoamento externo, ao calor perdido para a superfície aerodinâmica e à diferença de temperatura entre a superfície e o escoamento externo. Com o balanço de energia é obtida a temperatura sobre a superfície e pode-se calcular a fração de congelamento, que, aplicada ao balanço de massa, fornece a massa de gelo formada.



**Figura 3.3 – Balanço de energia.**

O balanço de energia é dado por

$$q_{lat} + q_s + q_{evap} + q_{ke,ar} + q_{ke,água} + q_{conv} + q_{cond} = 0, \quad (3.19)$$

onde:

$q_{lat}$  - taxa de geração de calor latente devido ao congelamento da água;

$q_s$  - taxa de transferência de calor sensível devido à mudança de temperatura da água e do gelo. Essa taxa é a soma das taxas de transferência de calor sensível das

vazões mássicas de *runback* ( $q_{s,rb}$ ) e de incidência ( $q_{s,inc}$ ) e da massa de água líquida retida ( $q_{s,liq,ret}$ );

$q_{evap}$  - taxa de transferência de calor por evaporação da água;

$q_{ke,ar}$  - taxa de transferência de calor por dissipação viscosa devido ao atrito do ar;

$q_{ke,água}$  - taxa de transferência de calor por conversão de energia cinética devido ao impacto das gotículas de água;

$q_{conv}$  - taxa de transferência de calor por convecção; e

$q_{cond}$  - taxa de transferência de calor por condução.

Na seqüência, são definidas cada uma dessas taxas.

### 3.2.1 Taxa de geração de calor latente de solidificação

Quando a água presente na superfície congela, calor latente é liberado no processo. A quantidade de energia liberada está relacionada à quantidade de gelo formado e é dada por

$$q_{lat} = h_{ls} \cdot \frac{m_{gelo}}{\Delta t}, \quad (3.20)$$

onde  $h_{ls}$  é o calor latente de mudança de fase da água do estado líquido para sólido.

### 3.2.2 Taxa de transferência de calor sensível

A vazão mássica de água provinda do volume de controle à montante ( $\dot{m}_{rb,entra}$ ), a vazão mássica de água que incide na superfície ( $\dot{m}_{inc}$ ) e a massa de água líquida retida no volume ( $m_{liq,ret}$ ) geralmente apresentam temperaturas diferentes da temperatura da superfície ( $T_s$ ) e, ao mudarem suas temperaturas para a temperatura da superfície, liberam calor sensível. A taxa de transferência de calor sensível liberado pela água incidente, para o caso de não ocorrer congelamento, pode ser escrita como

$$q_{s,inc} = \dot{m}_{inc} \cdot c_{p,água} \cdot (T_{\infty} - T_s), \quad (3.21)$$

para o calor sensível liberado pela vazão mássica de água de *runback*

$$q_{s,rb} = \dot{m}_{rb,entra} \cdot c_{p,água} \cdot (T_{rb} - T_s), \quad (3.22)$$

e para a massa de água líquida retida

$$q_{s,liq,ret} = \frac{m_{liq,ret}}{\Delta t} \cdot c_{p,\acute{a}gua} \cdot (T_{liq,ret} - T_s). \quad (3.23)$$

Caso a água no volume de controle congele, calor sensível será liberado para a massa de água líquida atingir a temperatura de congelamento ( $T_c$ ) e depois, para a massa de gelo atingir a temperatura da superfície ( $T_s$ ). Assim, a taxa de transferência de calor sensível liberado pela vazão mássica de água incidente é

$$q_{s,inc} = \dot{m}_{inc} \cdot c_{p,\acute{a}gua} \cdot (T_{\infty} - T_c) + \dot{m}_{inc} \cdot c_{p,gelo} \cdot (T_c - T_s), \quad (3.24)$$

pela vazão mássica de água de *runback*

$$q_{s,rb} = \dot{m}_{rb,entra} \cdot c_{p,\acute{a}gua} \cdot (T_{rb} - T_c) + \dot{m}_{rb,entra} \cdot c_{p,gelo} \cdot (T_c - T_s), \quad (3.25)$$

e pela massa de água líquida retida

$$q_{s,liq,ret} = \frac{m_{liq,ret}}{\Delta t} \cdot c_{p,\acute{a}gua} \cdot (T_{liq,ret} - T_c) + \frac{m_{liq,ret}}{\Delta t} \cdot c_{p,gelo} \cdot (T_c - T_s). \quad (3.26)$$

Nas equações acima,  $c_{p,\acute{a}gua}$  é o calor específico da água a pressão constante;  $c_{p,gelo}$ , o calor específico do gelo a pressão constante;  $T_{liq,ret}$ , a temperatura da massa de água líquida retida e  $T_{rb,entra}$ , a temperatura da massa de água de *runback* que entra. Estas duas últimas são expressas em função da temperatura da superfície

$$\begin{aligned} T_{liq,ret}^t &= T_s^{t-\Delta t} \\ T_{rb}^s &= T_s^{s-\Delta s} \end{aligned} \quad (3.27)$$

### 3.2.3 Taxa de transferência de calor por evaporação

Calor é perdido em consequência da evaporação de parte da água presente na superfície. A taxa de transferência de calor por evaporação é dada por

$$q_{evap} = -h_{lv} \cdot \dot{m}_{evap}, \quad (3.28)$$

onde  $h_{lv}$  é o calor latente de mudança de fase da água do estado líquido para vapor.

### 3.2.4 Taxa de transferência de calor por convecção

Troca de calor por convecção ocorre quando a temperatura do escoamento externo é diferente da temperatura da superfície. A taxa de transferência de calor por convecção é dada por

$$q_{conv} = h_{conv} \cdot (T_{\infty} - T_s) \cdot (\Delta s \cdot \Delta b), \quad (3.29)$$

onde

$h_{conv}$  - coeficiente de transferência de calor por convecção;

$T_\infty$  - temperatura da corrente livre.

### 3.2.5 Taxa de transferência de calor por dissipação viscosa devido ao atrito do ar

O atrito do ar causado pelas velocidades elevadas do escoamento externo fornece energia ao volume de controle devido à dissipação viscosa do ar. A taxa de transferência de calor cinético do ar pode ser calculada como (SCHLICHTING, 1968)

$$q_{ke,ar} = h_{conv} \cdot (T_{rec} - T_\infty) \cdot (\Delta s \cdot \Delta b). \quad (3.30)$$

onde  $T_{rec}$  é a temperatura de recuperação adiabática (SCHLICHTING, 1968), dada por

$$T_{rec} = T_\infty + r \frac{U_\infty^2}{2c_{p,ar}}. \quad (3.31)$$

onde  $r$  é o fator de recuperação calculado em função do número de Prandtl como:

$r = \sqrt{\text{Pr}}$  para o escoamento laminar e  $r = \sqrt[3]{\text{Pr}}$  para o escoamento turbulento.

### 3.2.6 Taxa de transferência de calor por conversão de energia cinética devido ao impacto das gotículas de água

Ao colidirem contra a aeronave, as gotículas presentes nas nuvens liberam energia térmica devido a sua desaceleração. Considera-se que toda a energia cinética das gotículas é convertida em energia térmica. Assim, o fluxo de calor devido ao impacto das gotículas de água depende apenas da sua velocidade ( $U_{goticulas}$ ) e da vazão mássica de água incidente ( $\dot{m}_{inc}$ ),

$$q_{ke,inc} = \dot{m}_{inc} \cdot \frac{U_{goticulas}^2}{2}. \quad (3.32)$$

### 3.2.7 Taxa de transferência de calor por condução

O modelo termodinâmico de Messinger foi proposto para superfícies não protegidas e na parede foi considerada condição de parede adiabática. Assim, transferência de calor por condução não foi modelada. Os códigos LEWICE (WRIGHT, 1995a) e AeroIcing (SILVEIRA, 2001) empregam o modelo de sólido semi-infinito para modelar superfícies não protegidas, modelo que será utilizado no presente trabalho. Nestes códigos as seguintes hipóteses são adotadas:

- a transferência de calor ao longo da direção tangencial ao perfil é desprezada, tornando o problema unidimensional;
- a transferência de calor por condução pode ser modelada considerando a superfície um sólido semi-infinito pois a espessura de penetração é

pequena comparada com a espessura da camada formada pelo gelo e pelo aerofólio;

- como a escala de tempo de crescimento de gelo é muito maior que a escala em que ocorre o processo de condução, diz-se que a condição de contorno na superfície assume uma frente estacionária. Ou seja, para o passo de tempo que está sendo avaliado, o fluxo é constante; e
- a temperatura inicial da superfície externa é considerada como a temperatura de recuperação adiabática.

Assim o calor perdido por condução é dado por

$$q_{cond} = -\frac{k_{gelo}}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_{gelo} \cdot \Delta t}} \cdot (T_{rec} - T_s) \cdot (\Delta s \cdot \Delta b), \quad (3.33)$$

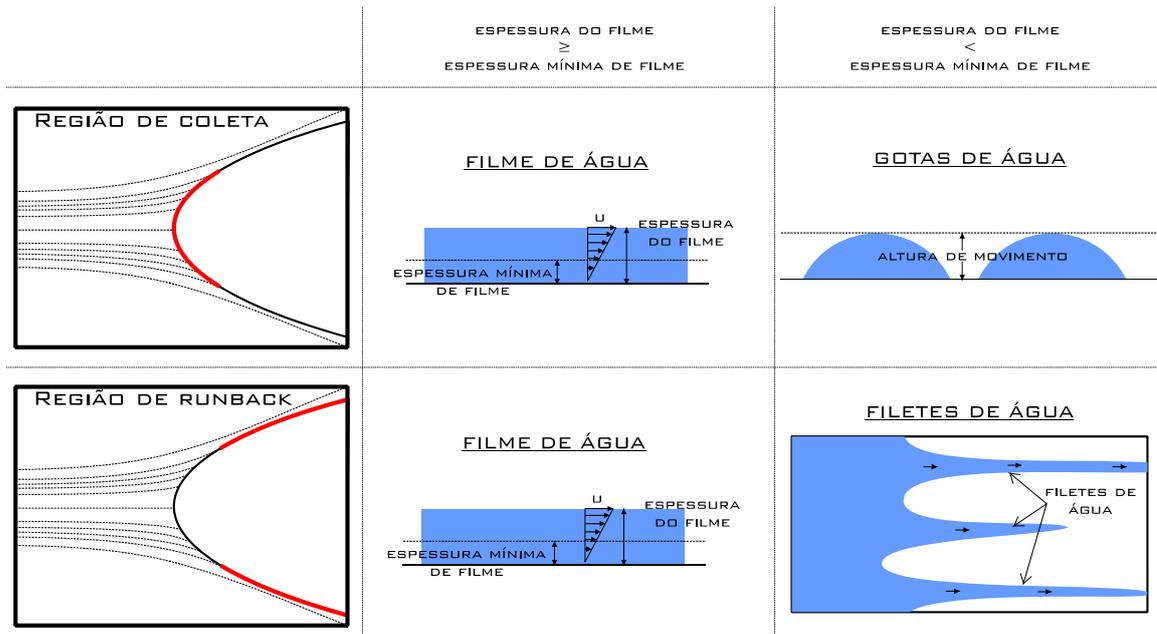
onde  $T_{rec}$  é a temperatura de recuperação adiabática,  $k_{gelo}$  é a condutividade térmica do gelo e  $\alpha_{gelo}$ , a difusividade térmica do gelo.

As propriedades do gelo são utilizadas, pois se considera que uma camada de gelo exista desde o início do processo de crescimento dele.

## 4 MODELO DE RUGOSIDADE

A formação de gelo em regime úmido caracteriza-se por apresentar uma região de superfície suave próxima ao ponto de estagnação, devido à existência de um filme de água; regiões bastante rugosas mais à jusante do ponto de estagnação, onde predomina a existência de gotas estacionárias; e por fim regiões onde a água escoou em forma de filetes.

Para caracterizar as diferentes configurações da água e determinar a rugosidade sobre a superfície são usados modelos analíticos para identificar a configuração da água e, posteriormente, calcular a rugosidade sobre a superfície do gelo. Como já mencionado anteriormente, a água pode estar presente sobre a superfície como filme ou gota na região de incidência de gotículas de água e filme ou filete na região onde não há coleta de água. Na Figura 4.1 são ilustradas as possíveis configurações da água sobre a superfície. A configuração da água é determinada comparando-se dois parâmetros: a altura mínima de filme e a altura do filme de água.



**Figura 4.1 – Configurações da água sobre a superfície.**

Nas próximas seções serão definidos os parâmetros necessários na determinação da configuração da água e da rugosidade do gelo e apresentadas as formas de calculá-los. A configuração da água e a rugosidade são obtidas para cada volume de controle empregado no modelo termodinâmico apresentado no Capítulo 3.

### 4.1 Modelo de filme

Um filme de água pode se formar quando o fenômeno ocorre em regime úmido ou líquido. O filme de água geralmente existe apenas em uma pequena região próxima

ao ponto de estagnação. A água sobre a superfície se apresenta na configuração de filme quando a altura deste filme é maior ou igual à altura mínima de filme.

#### 4.1.1 Altura do filme de água

A altura do filme de água é obtida considerando-se a massa de água que entra no volume de controle mais a massa de água líquida retida. Essa massa de água pode ser expressa em função da velocidade média do filme de água e da espessura do filme, no caso de sua existência, por

$$\left(\dot{m}_{inc} + \dot{m}_{rb,entra}\right) \cdot \Delta t + m_{liq,ret} = \rho_{\acute{a}gua} \cdot \bar{U}_{filme} \cdot e_f \cdot \Delta b \cdot \Delta t. \quad (4.1)$$

Considera-se que o escoamento do filme de água sobre a superfície ocorra devido somente à tensão cisalhante e em regime laminar. Da definição de tensão cisalhante para um fluido Newtoniano, tem-se

$$\tau_{ns} = \mu_{\acute{a}gua} \cdot \frac{dU_{filme}}{dn}. \quad (4.2)$$

Considerando a condição de não deslizamento na parede e integrando a Eq. (4.2) obtém-se um perfil de velocidade linear para o filme de água

$$U_{filme}(n) = \frac{\tau_{ns}}{\mu_{\acute{a}gua}} \cdot n. \quad (4.3)$$

A velocidade média do filme de água é obtida por meio da Eq. (4.3) e dada por

$$\bar{U}_{filme} = 0,5 \cdot \frac{\tau_{ns}}{\mu_{\acute{a}gua}} \cdot e_f, \quad (4.4)$$

onde  $e_f$  é a espessura do filme de água.

Substituindo a Eq. (4.4) na Eq. (4.1), a espessura do filme de água é escrita como

$$e_f = \sqrt{2,0 \cdot \frac{\mu_{\acute{a}gua}}{\rho_{\acute{a}gua} \tau_{ns}} \cdot \frac{\left(\dot{m}_{inc} + \dot{m}_{rb,entra}\right) \cdot \Delta t + m_{liq,ret}}{\Delta b \cdot \Delta t}}. \quad (4.5)$$

#### 4.1.2 Altura mínima de filme

A altura mínima de filme é obtida considerando que as gotas entram em movimento na forma de filetes e que estes se coalescem formando um filme de água. Assim, tem-se que o número de filetes possíveis em um painel é dado por

$$n_{filete} \cdot A_{c,filete} \leq \Delta b \cdot \Delta s, \quad (4.6)$$

onde  $A_{c,filete}$  é a área de contato do filete de água, definido no Apêndice B, e  $n_{filete}$  é o número de filetes presentes na superfície.

O número de filetes é dado pela razão da massa de água líquida presente no volume de controle e da massa do filete, assim tem-se

$$n_{\text{filete}} = \frac{(\dot{m}_{\text{inc}} + \dot{m}_{\text{rb,entra}}) \cdot \Delta t + m_{\text{liq,ret}}}{m_{\text{filete}}} = \frac{(\dot{m}_{\text{inc}} + \dot{m}_{\text{rb,entra}}) \cdot \Delta t + m_{\text{liq,ret}}}{\rho_{\text{água}} \cdot A_{f,\text{filete}} \cdot \bar{U}_{\text{filete}} \cdot \Delta t}. \quad (4.7)$$

Na equação acima,  $A_{f,\text{filete}}$  é a área frontal do filete, descrita no Apêndice B, e  $\bar{U}_{\text{filete}}$  é a velocidade média do filete de água. Essa velocidade média é obtida da mesma forma que a velocidade média do filme de água, e dada pela Eq. (4.4).

Substituindo as expressões da área de contato do filete e do número de filetes na Eq. (4.6) e rearranjando a equação, obtém-se

$$\sqrt{2,0 \cdot \frac{\mu_{\text{água}}}{\rho_{\text{água}} \tau_{ns}} \cdot \frac{(\dot{m}_{\text{inc}} + \dot{m}_{\text{rb,entra}}) \cdot \Delta t + m_{\text{liq,ret}}}{\Delta b \cdot \Delta t}} \leq \sqrt{\frac{\theta_c - \sin \theta_c \cdot \cos \theta_c}{2 \cdot \sin \theta_c}} \cdot e_{\text{filete}}. \quad (4.8)$$

Reconhecendo a espessura de filme na equação acima, termo à esquerda da desigualdade, a Eq. (4.8) se reduz a

$$e_f \leq \sqrt{\frac{\theta_c - \sin \theta_c \cdot \cos \theta_c}{2 \cdot \sin \theta_c}} \cdot e_{\text{filete}}. \quad (4.9)$$

Conforme Seção 4.3, a altura do filete é igual à altura de uma gota, assim a espessura mínima do filme de água é dada pela igualdade na Eq. (4.9),

$$e_{f,\text{min}} = \sqrt{\frac{\theta_c - \sin \theta_c \cdot \cos \theta_c}{2 \cdot \sin \theta_c}} \cdot e_{\text{gota}}. \quad (4.10)$$

### 4.1.3 Rugosidade da superfície

A rugosidade da superfície do gelo quando a água se apresenta na configuração de filme é considerada igual à altura das ondas que se formam sobre o filme de água devido ao escoamento externo (GERHART, 1992 apud FORTIN, 2004), expressa como

$$\kappa = \frac{3}{4} \cdot \frac{\tau_{ns}}{\mu_{\text{água}}} \sqrt{\frac{e_f^3}{g}}. \quad (4.11)$$

## 4.2 Modelo de gotas

As gotas se formam na região onde há a incidência de gotículas de água e quando a espessura de filme é inferior à espessura mínima. Considera-se que as gotas formadas sobre a superfície apresentam a forma de uma seção de esfera.

Conforme explicado na Seção 2.1.2, quando existem gotas sobre a superfície estas podem congelar parcialmente e a parcela não congelada da gota pode permanecer

aprisionada entre as gotas congeladas. A forma de calcular essa massa de água líquida retida e a rugosidade do gelo para a configuração de gotas são mostradas nesta seção.

#### 4.2.1 Massa de água líquida

Como mencionado no balanço de massa, parte da água que entra no volume de controle e não congela pode permanecer no volume de controle na fase líquida. Esta massa de água líquida permanece no volume de controle presa entre os espaços vazios da parcela congelada da gota, assim a massa de água líquida depende da quantidade de espaço disponível entre essas gotas congeladas.

Considerando que as gotas de água estão distribuídas uniformemente sobre a superfície, conforme ilustrado na Figura 4.2, a massa de água líquida admissível ( $m_{liq,adm}$ ) para preencher os espaços vazios entre as gotas congeladas pode ser calculada pela seguinte expressão

$$m_{liq,adm} = \rho_{\acute{a}gua} \cdot \left( e_{gota} \cdot \Delta b \cdot \Delta s - e_{\acute{a}gua} \cdot \Delta b \cdot \Delta s - \frac{m_{gelo}}{\rho_{gelo}} \right), \quad (4.12)$$

onde  $e_{gota}$  é a altura da gota e  $e_{\acute{a}gua}$  é a altura da parte líquida da gota, ilustrada na Figura 4.2, dada por

$$e_{\acute{a}gua} = e_{gota} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{gota}}{\rho_{\acute{a}gua}} \cdot (1 - f_c) \cdot \frac{(2 + \cos \theta_c)}{3}}, \quad (4.13)$$

onde  $\rho_{gota}$  é a densidade da gota, expressa por

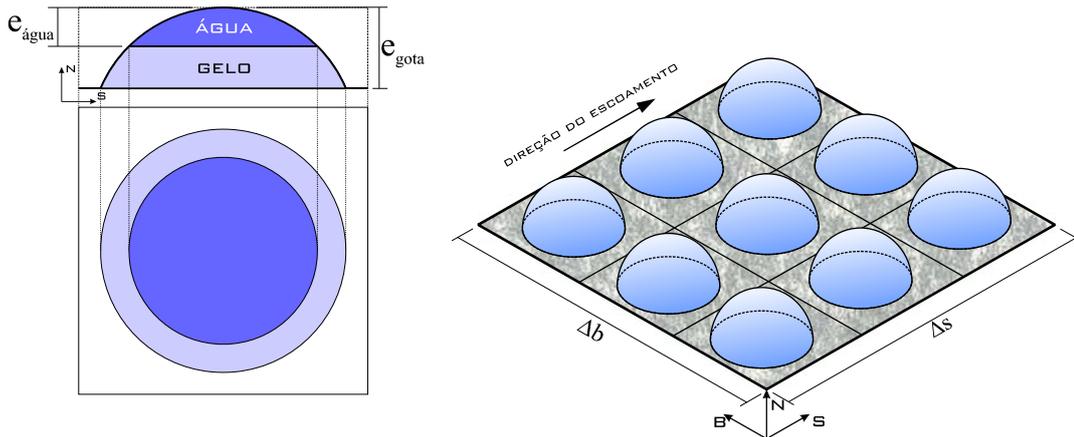
$$\rho_{gota} = \rho_{gelo} \cdot f_c + \rho_{\acute{a}gua} \cdot (1 - f_c). \quad (4.14)$$

Quando a massa de água líquida disponível no volume de controle não é suficiente para preencher os espaços vazios, essa massa é a própria massa de água líquida. Porém, quando essa massa de água líquida disponível excede a quantidade de água admissível, a massa de água líquida é igual à massa de água líquida admissível. Assim, a massa de água líquida pode ser escrita da seguinte forma

$$m_{liq} = \begin{cases} m_{liq,adm} & se \ m_{liq,disp} > m_{liq,adm} \\ m_{liq,disp} & se \ m_{liq,disp} \leq m_{liq,adm} \end{cases}, \quad (4.15)$$

onde a massa de água líquida disponível no volume de controle é dada por

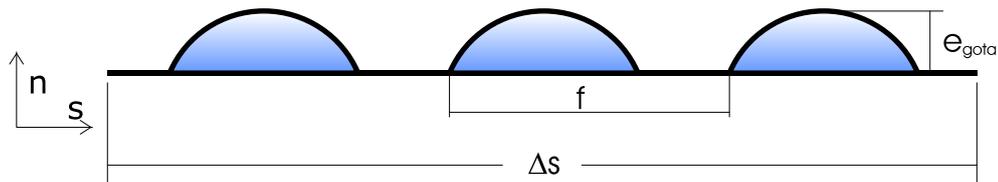
$$m_{liq,disp} = (1 - f_c) \cdot \left[ (\dot{m}_{inc} + \dot{m}_{rb,entra}) \cdot \Delta t + m_{liq,ret} \right] - (\dot{m}_{evap} + \dot{m}_{arr,\acute{a}gua}) \cdot \Delta t. \quad (4.16)$$



**Figura 4.2 – Representação de uma gota parcialmente congelada e da distribuição das gotas sobre um painel.**

### 4.2.2 Rugosidade da superfície

A rugosidade da superfície de gelo para a água na configuração de gotas depende da altura das gotas e da quantidade de gotas sobre a superfície, conforme ilustrado na Figura 4.3.



**Figura 4.3 – Altura e distribuição das gotas sobre a superfície.**

A rugosidade para essa configuração pode então ser expressa por (BET, 1999)

$$\kappa = \frac{f^2}{8 \cdot e_{gota}} \rightarrow f < 2,83 \cdot e_{gota}, \tag{4.17}$$

$$\kappa = e_{gota} \rightarrow f > 2,83 \cdot e_{gota}$$

onde  $f$  é a distância entre as gotas, dada por

$$f = \frac{\Delta s}{n_{gotas}} [m]. \tag{4.18}$$

## 4.3 Modelo de filetes

Filetes de água podem se formar na região da superfície onde não há incidência de gotículas e como não há massa de água incidindo sobre esta região, os filetes se formam em consequência da quebra das gotas ou do filme de água. Filetes existem quando a altura do filme de água é inferior à altura mínima de filme. A altura desses

filetes é considerada igual à altura de movimento da gota que existiria caso houvesse incidência de água na superfície, assim

$$e_{\text{filete}} = e_{\text{gota}} \cdot \quad (4.19)$$

#### 4.3.1 Rugosidade da superfície

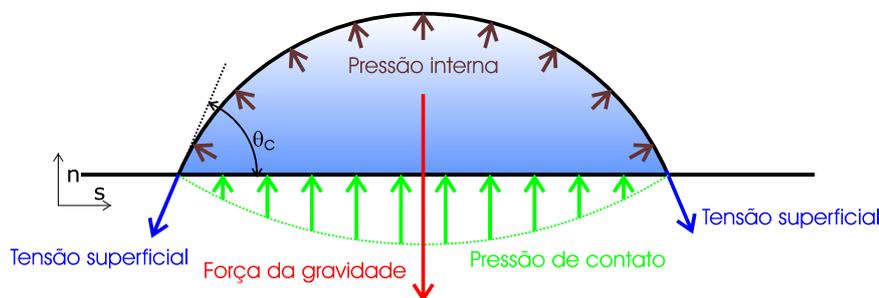
A rugosidade da superfície do gelo quando este é formado pelo congelamento de filetes é considerada igual à altura do próprio filete,

$$k = e_{\text{filete}} \cdot \quad (4.20)$$

### 4.4 Altura de movimento

O parâmetro fundamental para determinar a configuração da água sobre a superfície é a altura de movimento, que é a altura máxima que uma gota pode atingir antes de entrar em movimento devido ao escoamento externo e/ou devido à gravidade. A partir da altura de movimento obtém-se a altura mínima de filme.

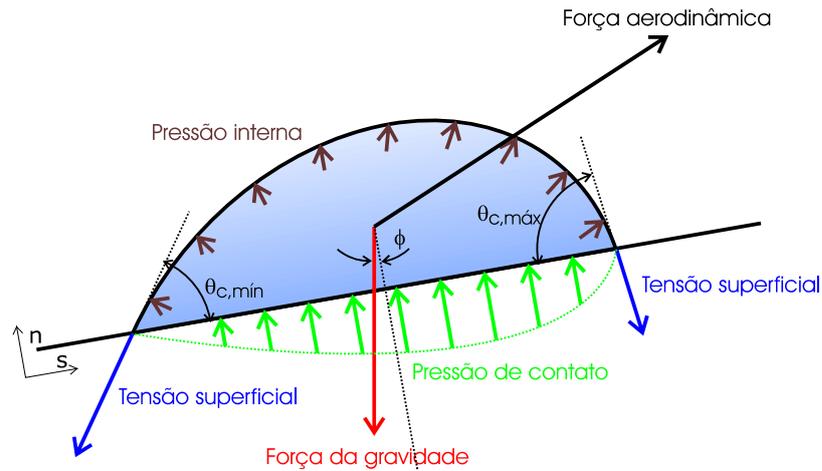
A altura de movimento é obtida por meio de um balanço de forças realizado sobre uma gota. A Figura 4.4 mostra uma gota em equilíbrio para uma superfície plana e sem um escoamento atuando sobre ela.



**Figura 4.4 – Forças atuantes sobre uma gota.**

As forças que atuam sobre a gota são: a força gravitacional, que é equilibrada pela força de reação da parede, devido à pressão de contato; e a força devido à pressão interna, equilibrada pela tensão superficial.

Quando a superfície é inclinada, a gota se deforma pela ação gravitacional, que passa a ter duas componentes, uma na direção normal e outra paralela à parede e, conseqüentemente, o estado de equilíbrio da gota é alterado. Caso um escoamento passe a existir sobre a gota, esta se deforma e o estado de equilíbrio da gota é resultante de uma nova configuração de forças. Nos problemas aerodinâmicos geralmente há a combinação dessas duas situações e a gota se deforma como mostrado na Figura 4.5, onde efeitos gravitacionais e aerodinâmicos deformam a gota. Esses efeitos podem atuar combinando-se ou contrapondo-se.



**Figura 4.5 – Forças atuantes sobre uma gota deformada.**

Essa deformação faz com que o ângulo de contato da gota varie com o perímetro da base da gota. Dois ângulos de contato da gota são identificados e definidos como  $\theta_{c,máx}$  e  $\theta_{c,min}$ , denominados de ângulo de contato máximo e ângulo de contato mínimo, respectivamente. A diferença entre esses ângulos é denominada deformação do ângulo de contato

$$\Delta\theta_c = \theta_{c,máx} - \theta_{c,min} \quad (4.21)$$

A gota de água ilustrada na Figura 4.5 pode se deformar até romper e entrar em movimento. Pouco antes da gota entrar em movimento ela atinge uma deformação máxima do ângulo de contato ( $\Delta\theta_{c,máx}$ ). Quando a gota está em sua deformação máxima, esta alcança sua altura máxima, denominada altura de movimento.

As forças que atuam sobre a gota podem ser decompostas nas direções normal à superfície ( $\hat{n}$ ) e paralela ao escoamento ( $\hat{s}$ ). A ação das componentes das forças na direção  $\hat{n}$  atuam no sentido de arrancar a gota da superfície, enquanto que as componentes na direção  $\hat{s}$  atuam no sentido de movimentar a gota ao longo da superfície. Os efeitos das forças na direção normal são considerados no cálculo da massa de água arrancada, descrita na Seção 3.1.5. Além disso, o interesse no balanço de forças é conhecer a altura de movimento da gota, assim apenas o balanço de forças na direção  $\hat{s}$  é requerido.

No balanço de forças na direção do escoamento são consideradas apenas as forças relacionadas à tensão superficial, gravidade e escoamento externo. Na sequência são descritas cada uma dessas forças.

#### 4.4.1 Força gravitacional

A força gravitacional na direção do escoamento é dada por

$$F_{g,s} = \rho_{\text{água}} \cdot V_{\text{gota}} \cdot g \cdot |\sin \varphi|, \quad (4.22)$$

onde

$\varphi$  - inclinação da superfície;

$g$  - aceleração da gravidade; e

$V_{\text{gota}}$  - volume da gota.

O volume da gota é expresso em função apenas do ângulo de contato e da altura da gota

$$V_{\text{gota}} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{(2 + \cos \theta_c)}{(1 - \cos \theta_c)} \cdot e_{\text{gota}}^3, \quad (4.23)$$

onde  $\theta_c$  é o ângulo de contato médio da gota.

Substituindo a expressão do volume da gota na Eq. (4.22), tem-se a expressão da força gravitacional da gota dada por

$$F_{g,s}(e_{\text{gota}}) = \frac{\pi}{3} \cdot \rho_{\text{água}} \cdot g \cdot \frac{(2 + \cos \theta_c)}{(1 - \cos \theta_c)} \cdot |\sin \varphi| \cdot e_{\text{gota}}^3. \quad (4.24)$$

#### 4.4.2 Força de rigidez

A força de rigidez atua impedindo que a gota se movimente, seja devido à gravidade, ao escoamento externo ou à combinação dos dois. Essa força é a componente na direção do escoamento da força de tensão superficial, sendo função apenas da tensão superficial da água ( $\sigma_{\text{água}}$ ), do tamanho e da forma da gota.

A força de tensão superficial é definida como

$$F_{\sigma} = \int_0^{2\pi} \sigma_{\text{água}} \cdot r \cdot d\phi, \quad (4.25)$$

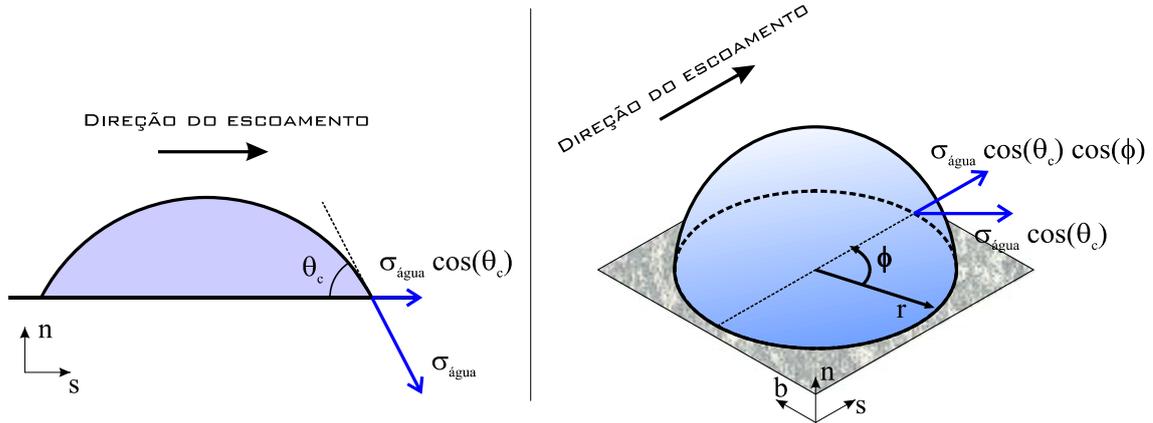
onde  $\phi$  é a coordenada angular do perímetro de contato da gota com a superfície e  $r$  é o raio da base da gota, conforme pode ser observado na Figura 4.6.

Decompondo essa força na direção do escoamento, obtém-se uma expressão para a força de rigidez, dada por

$$F_{\sigma,s} = \int_0^{2\pi} \sigma_{\text{água}} \cdot \cos \theta \cdot \cos \phi \cdot \left( \frac{\sin \theta_c}{1 - \cos \theta_c} \cdot e_{\text{gota}} \right) \cdot d\phi. \quad (4.26)$$

Como o ângulo de contato da gota pode variar ao longo de seu perímetro, conforme a Figura 4.5, por simplicidade, considera-se que o ângulo de contato da gota varie conforme uma função co-seno, dada por

$$\theta = \theta_c - \frac{1}{2} \cdot \Delta \theta_c \cdot \cos \phi. \quad (4.27)$$



**Figura 4.6 – Decomposição da força devido à tensão superficial.**

Substituindo a expressão da variação do ângulo de contato na Eq. (4.26) e integrando ao longo do perímetro da área de contato da gota, a força de rigidez pode ser expressa por

$$F_{\sigma,s}(e_{gota}) = \frac{\pi}{2} \cdot \sigma_{\text{água}} \cdot (1 - \cos \theta_c) \cdot e_{gota} \cdot \Delta \theta_c. \quad (4.28)$$

#### 4.4.3 Força de arrasto

A força exercida sobre a gota devido ao escoamento externo na direção tangencial à superfície é denominada força de arrasto. Essa força é expressa por

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot C_D \cdot A_{f,gota} \cdot \overline{U}_{gota}^2, \quad (4.29)$$

onde

$\rho_{ar}$  - densidade do ar;

$C_D$  - coeficiente de arrasto;

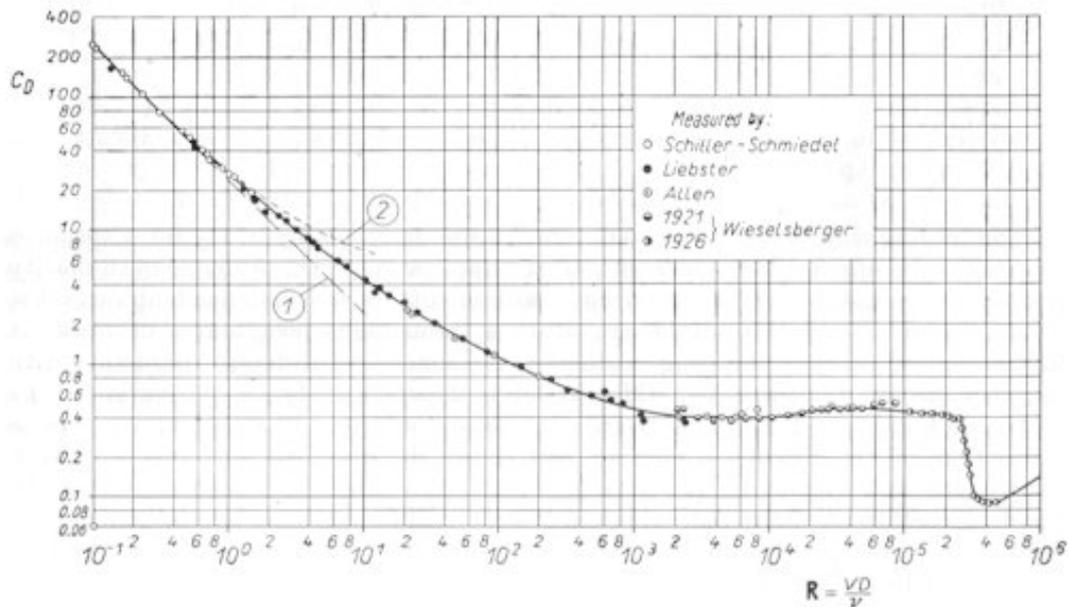
$A_{f,gota}$  - área frontal da gota; e

$\overline{U}_{gota}$  - velocidade média do escoamento sobre a gota.

O coeficiente de arrasto depende da geometria do objeto e pode ser expresso apenas em função do número de Reynolds. Neste trabalho o coeficiente de arrasto de uma gota sobre a superfície será considerado igual ao de uma esfera, mesmo sabendo que a gota sobre o perfil apresenta a forma de uma seção de esfera e que a parede do perfil tem influência no escoamento sobre a gota. Essa escolha foi feita, pois não se encontrou nenhum trabalho na literatura que trata do escoamento sobre uma calota ou sobre uma gota em contato com uma superfície. Assim, optou-se por usar uma relação empregada em outros trabalhos de formação de gelo (LOUCHEZ et al., 1998; FORTIN et al., 2004). Poderia ter sido feita uma análise numérica do escoamento em uma gota sobre uma superfície, o que, entretanto, fugiria do escopo da presente dissertação. A

escolha pelo coeficiente de arrasto de uma esfera não se deu apenas pelos motivos citados. Algumas outras correlações para o coeficiente de arrasto foram testadas e o coeficiente de arrasto da esfera foi o que apresentou melhores resultados para os testes realizados.

O coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para uma esfera é mostrado na Figura 4.7.



**Figura 4.7 – Coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds para uma esfera – Curva (1): teoria de Stokes e Curva (2): teoria de Oseen – Fonte: (Schlichting, 1968).**

Neste trabalho, o coeficiente de arrasto é calculado com as expressões propostas por Chow (1980), dadas por

$$\begin{aligned}
 C_D &= \frac{24}{Re} \rightarrow Re \leq 1 \\
 C_D &= \frac{24}{Re^{0,646}} \rightarrow 1 < Re \leq 400 \\
 C_D &= 0,5 \rightarrow 400 < Re \leq 3 \times 10^5 \\
 C_D &= 0,000366 Re^{0,4275} \rightarrow 3 \times 10^5 < Re \leq 2 \times 10^6 \\
 C_D &= 0,18 \rightarrow Re > 2 \times 10^6
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

O número de Reynolds para uma gota, equivalente ao da esfera, é calculado em função do diâmetro da gota ( $d_{gota}$ ) e da velocidade média sobre a gota ( $\bar{U}_{gota}$ ), sendo expresso por

$$Re_{gota} = \frac{\rho_{ar} \cdot \bar{U}_{gota} \cdot d_{gota}}{\mu_{ar}} \tag{4.31}$$

O diâmetro da gota, deduzido no Apêndice B, é dado por

$$d_{gota} = \frac{2 \cdot e_{gota}}{(1 - \cos \theta_c)}. \quad (4.32)$$

A velocidade média sobre a gota depende do regime de escoamento, laminar ou turbulento. Essa velocidade é obtida da definição da tensão de cisalhamento e condição de não deslizamento na parede. Para regime laminar tem-se

$$\tau_{ns} = \mu_{ar} \cdot \frac{dU}{dn}, \quad (4.33)$$

onde  $n$  é a distância normal à superfície do perfil.

Dessa expressão obtém-se a velocidade média sobre a gota para regime laminar, dada por

$$\bar{U}_{gota} = 0,5 \cdot \frac{\tau_{ns}}{\mu_{ar}} \cdot e_{gota}. \quad (4.34)$$

Para o regime turbulento, o perfil de velocidade sobre a gota é obtido da hipótese de comprimento de mistura e, segundo Bejan (1995), esse perfil é descrito por

$$U_{gota} = \sqrt{\frac{\tau_{ns}}{\rho_{ar}}} \cdot \left[ 2,5 \cdot \ln \left( \sqrt{\frac{\tau_{ns}}{\rho_{ar}}} \cdot \frac{n}{v_{ar}} \right) + 5,5 \right]. \quad (4.35)$$

A velocidade média sobre a gota é obtida a partir da equação acima, e expressa por

$$\bar{U}_{gota} = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\tau_{ns}}{\rho_{ar}}} \cdot \left[ \ln \left( \sqrt{\frac{\tau_{ns}}{\rho_{ar}}} \cdot \frac{e_{gota}}{v_{ar}} \right) + 1,2 \right]. \quad (4.36)$$

Como a velocidade média sobre a gota e o seu diâmetro são funções da altura da gota, tem-se que o número de Reynolds também é função dessa altura e, conseqüentemente, o coeficiente de arrasto é função da altura da gota. Tem-se assim

$$C_D = f(e_{gota}). \quad (4.37)$$

Com essas hipóteses, a força de arrasto pode ser então reescrita como

$$F_D(e_{gota}) = \frac{1}{2} \cdot \rho_{ar} \cdot C_D(e_{gota}) \cdot \bar{U}_{gota}^2(e_{gota}) \cdot \frac{\theta_c - \sin \theta_c \cdot \cos \theta_c}{1 - \cos \theta_c} \cdot e_{gota}^2. \quad (4.38)$$

A força de arrasto é a parte não linear do balanço de forças.

#### 4.4.4 Balanço de forças

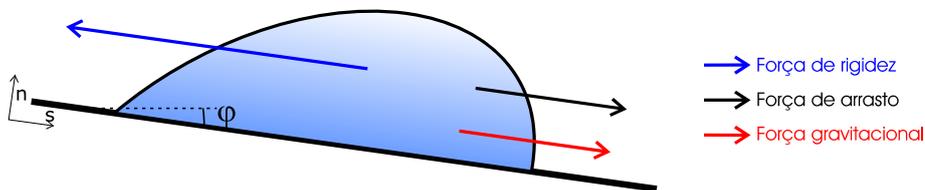
O balanço de forças é realizado a fim de se obter a altura de movimento. Assim, o balanço é aplicado considerando o tamanho máximo da gota no qual sua tensão superficial impede que ela entre em movimento. Esse balanço de forças é dado por

$$\sum F_s = 0. \quad (4.39)$$

Dependendo da inclinação da superfície e da intensidade das forças gravitacional e de arrasto, a Eq. (4.39) pode apresentar três formas distintas, que são descritas na seqüência.

Quando a superfície possui inclinação negativa, conforme a Figura 4.8, as forças gravitacional e de arrasto atuam na mesma direção e a força de rigidez se opõe a elas, impedindo que a gota entre em movimento. Para esta configuração o balanço de forças é dado por

$$F_D + F_{g,s} - F_{\sigma,s} = 0. \quad (4.40)$$

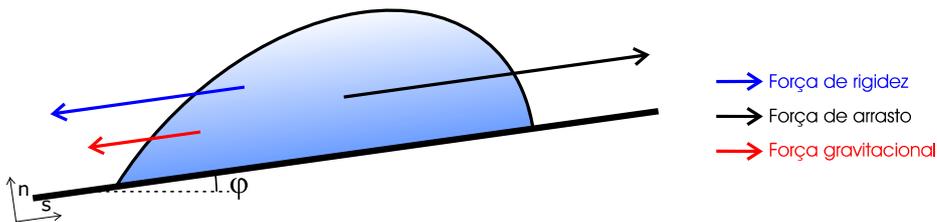


**Figura 4.8 – Configuração do balanço de forças sobre uma gota.**

Caso a superfície possua inclinação positiva, a força gravitacional e a força de arrasto atuam em sentidos opostos e a força de rigidez assume o sentido da força de menor intensidade, a fim de manter o equilíbrio de forças sobre a gota.

Quando a força de arrasto é maior que a força gravitacional, conforme a Figura 4.9, o balanço de forças é expresso por

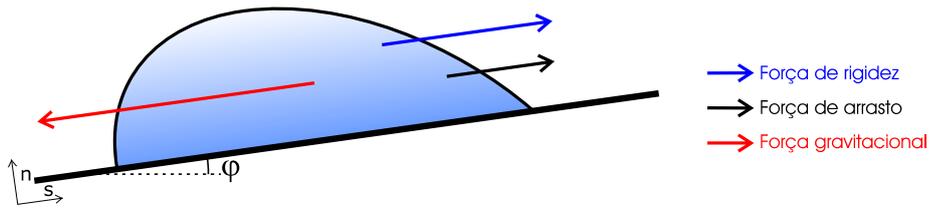
$$F_D - F_{g,s} - F_{\sigma,s} = 0. \quad (4.41)$$



**Figura 4.9 – Configuração do balanço de forças sobre uma gota.**

Para o caso em que a força gravitacional assume intensidade maior que a de arrasto, como ilustrado na Figura 4.10, o balanço é escrito como

$$F_D - F_{g,s} + F_{\sigma,s} = 0. \quad (4.42)$$



**Figura 4.10 – Configuração do balanço de forças sobre uma gota.**

As três formas do balanço de forças apresentadas acima podem ser resumidas em

$$\begin{cases} \text{se } \varphi \geq 0 \rightarrow F_{\sigma,s} - F_D - F_{g,s} = 0 \\ \text{se } \varphi < 0 \rightarrow F_{\sigma,s} + \alpha \cdot (F_D - F_{g,s}) = 0' \end{cases} \quad (4.43)$$

onde  $\varphi$  é a inclinação da superfície e  $\alpha$  um fator que determina qual força, entre a gravitacional e a de arrasto, possui maior magnitude, e é definido como

$$\alpha = \frac{F_{g,s} - F_D}{|F_{g,s} - F_D|}. \quad (4.44)$$



# 5 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E ALGORITMOS DE SOLUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a estrutura do código computacional implementado para resolver a formação de gelo sobre perfis aerodinâmicos e, também, serão detalhados os ciclos iterativos do código. Além da organização do código, são apresentados neste capítulo a forma de obtenção do escoamento externo, apesar de não haver uma implementação computacional, e como são resolvidas as equações do balanço de energia e de forças e o processo de cálculo da nova geometria.

## 5.1 Estrutura do código

O código computacional implementado usando os modelos apresentados nos capítulos anteriores foi escrito em linguagem C++ orientada a objeto. O código foi organizado de forma que novos modelos e características possam ser facilmente adicionados. O código foi dividido em pequenos módulos, cada um responsável por uma função do problema completo de formação de gelo. A Figura 5.1 apresenta a sua estrutura.

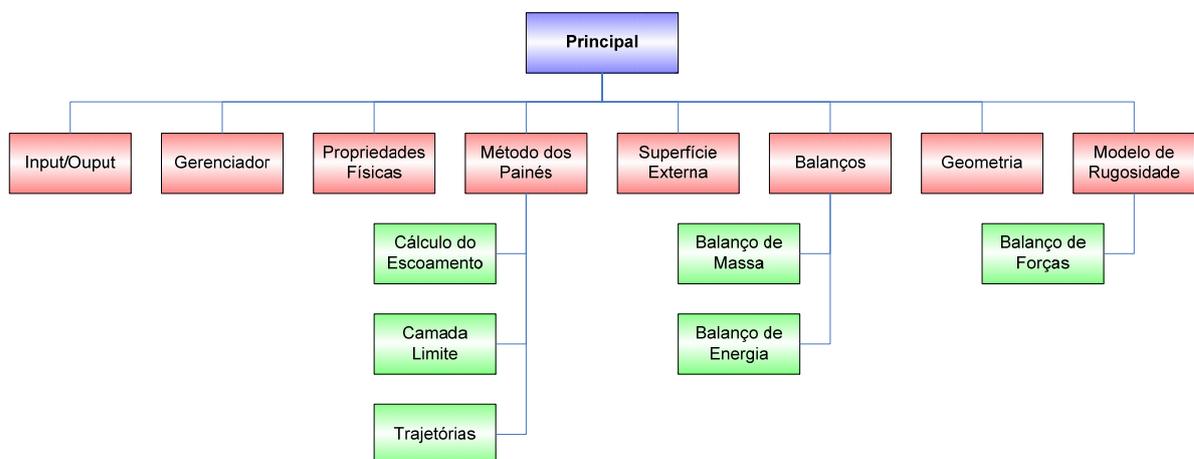


Figura 5.1 – Estrutura computacional.

O programa possui oito módulos principais que são:

**Input/Output** – responsável pelas funções de leitura e escrita dos arquivos de entrada e saída, respectivamente;

**Gerenciador** – gerencia todo o processo de cálculo do problema termodinâmico de formação de gelo e do cálculo do escoamento externo quando este é feito pelo método dos painéis;

**Superfície Externa** – armazena as coordenadas do perfil em análise e todas as informações do escoamento externo sobre este perfil – pressão, temperatura, coeficiente de transferência de calor por convecção, eficiência de coleta, componentes da velocidade

de impacto das gotículas de água, componentes da tensão cisalhante na parede. Neste módulo também são calculadas as coordenadas superficiais ( $\mathbf{s}$ ) do perfil e o ponto de estagnação;

**Propriedades Físicas** – módulo em que foram implementadas as funções para calcular as propriedades físicas do ar, água e gelo. Neste módulo também há funções para o cálculo da entalpia de vaporização e da entalpia de fusão, além de funções para o cálculo do número de Lewis, pressão de vapor, pressão e temperatura total do ar;

**Método dos Painéis** – responsável pela solução do escoamento externo sobre a geometria por meio do método dos painéis. Este módulo é dividido em três sub-módulos: **Cálculo do Escoamento**, de onde são obtidos os campos de velocidade e de pressão sobre o perfil; **Camada Limite**, resolve a camada limite pelo método integral; e **Trajетórias**, responsável pelo cálculo das trajetórias das partículas de água e obtenção da eficiência de coleta da superfície;

**Balancos** – responsável pelo modelo termodinâmico de crescimento do gelo. Neste módulo são calculadas as vazões mássicas do balanço de massa e as taxas de transferência de calor do balanço de energia, que são realizados pelos sub-módulos **Balanço de Massa** e **Balanço de Energia**, respectivamente. Deste módulo obtém-se a temperatura da superfície e a quantidade de gelo formada.

**Modelo de Rugosidade** – armazena as funções responsáveis pela determinação da rugosidade e configuração da água sobre a superfície. O sub-módulo **Balanço de Forças** possui as funções que calculam as forças atuantes sobre uma gota e é responsável pelo cálculo da altura de movimento de uma gota.

**Geometria** – responsável pela modificação do perfil quando ocorre a formação de gelo. Neste módulo também são feitas verificações do tamanho dos painéis, de intersecções entre painéis e do ângulo formado por dois painéis adjacentes, conforme detalhado na Seção 5.5.

### 5.1.1 Fluxogramas

A Figura 5.2, a Figura 5.3 e a Figura 5.4 mostram os fluxogramas do código implementado de formação de gelo. No primeiro fluxograma são ilustrados os passos principais da solução da formação de gelo sobre uma superfície aerodinâmica e nos fluxogramas da Figura 5.3 e da Figura 5.4 são detalhadas as etapas da solução do escoamento externo, quando resolvido pelo método dos painéis, e da formação de gelo, respectivamente.

O balanço de forças realizado para calcular a altura de movimento, conforme descrito no Cap. 4 é realizado dentro do balanço de massa, logo após o cálculo da massa de água incidente e a determinação da vazão mássica de água de *runback* que entra e da massa de água líquida retida.

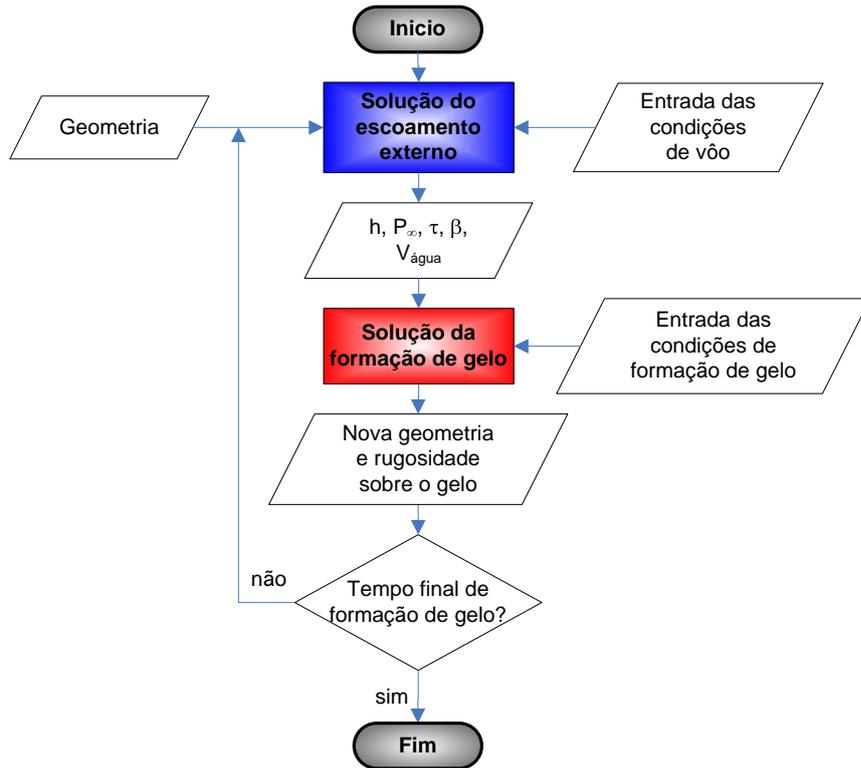


Figura 5.2 – Fluxograma geral do problema de formação de gelo.

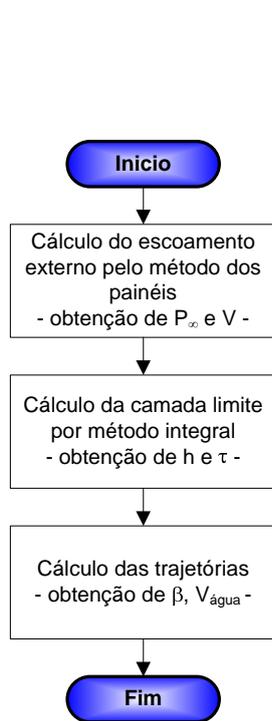


Figura 5.3 – Fluxograma do módulo do método dos painéis.

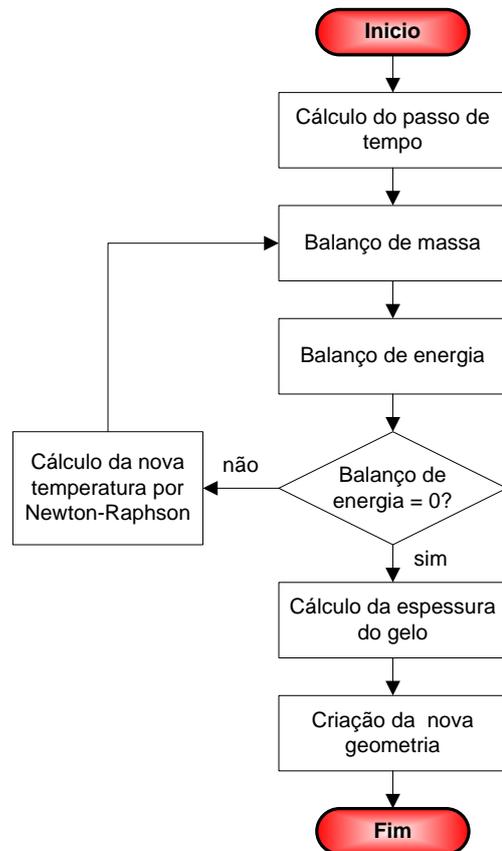


Figura 5.4 – Fluxograma do módulo termodinâmico.

## 5.2 escoamento externo

O escoamento externo pode ser obtido por meio de diversos métodos. Neste trabalho a solução do escoamento se dará de duas formas: métodos dos painéis e por meio de um aplicativo comercial, no caso o CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.).

### 5.2.1 Método dos painéis

O código do método dos painéis que será utilizado foi desenvolvido no Sinmec e utiliza a formulação descrita por Silveira (2001). Este código foi acoplado ao do presente trabalho conforme descrito na seção anterior. Neste caso, o escoamento é resolvido pelo método dos painéis e acoplado a um método integral, para a solução da camada limite, e a um método de cálculo das trajetórias das partículas de água. Com o método dos painéis obtém-se a distribuição de pressão e velocidade sobre o perfil aerodinâmico, com o método integral é conhecida a tensão cisalhante e o coeficiente de transferência de calor por convecção e, por último, a eficiência de coleta e a velocidade de impacto das gotículas de água são calculadas por meio do cálculo das trajetórias.

### 5.2.2 CFX

O CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.) é um aplicativo comercial de CFD (Mecânica dos Fluidos Computacional) muito conhecido e aplicado na indústria. Este aplicativo utiliza o método dos Volumes Finitos baseado em Elementos (EbFVM) para resolver as equações de transporte (MALISKA, 2004; ANSYS INC., 2005).

No CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.) não há uma forma direta de se calcular a eficiência de coleta para uma dada geometria, porém por meio de uma condição de contorno especial para escoamentos bifásicos é possível calculá-lo. Esta condição de contorno, denominada *degassing condition*, atua como parede impermeável para a fase contínua, no caso o ar, e condição de saída para a fase dispersa, neste caso para as gotículas de água. Porém, esta condição de contorno não considera os efeitos viscosos na parede para a fase contínua, não sendo assim possível calcular a tensão cisalhante quando resolve-se o escoamento bifásico. Em consequência disso, é necessário também resolver um escoamento viscoso apenas para o ar, a fim de se obter a tensão cisalhante.

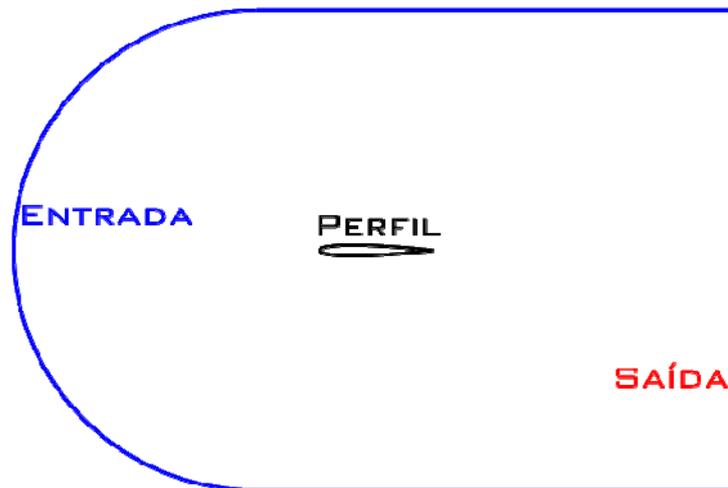
Dessa forma, a solução do escoamento externo por meio do CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.) é obtida em duas etapas. Uma etapa consiste em resolver as equações de Navier-Stokes para um escoamento viscoso, cuja solução fornece a distribuição de pressão, tensão cisalhante e coeficiente de transferência de calor por convecção sobre o perfil aerodinâmico. Em uma segunda etapa é resolvido um escoamento bifásico ar-água, de onde são conhecidas, então, a eficiência de coleta e a velocidade de impacto das gotículas de água. Como já mencionado, no CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.) não existe uma forma direta de calcular a eficiência de coleta, assim, Silveira (2003) propôs uma forma de calcular a eficiência de coleta por meio de simulações no CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.), dada por

$$\beta = -\frac{\alpha \vec{U} \cdot \hat{n}}{\alpha_{\infty} U_{\infty}}, \quad (5.1)$$

onde  $\alpha$  é a fração volumétrica de água na superfície,  $\vec{U}$  é o vetor velocidade da água que impacta contra a superfície,  $\hat{n}$  é o vetor unitário normal a superfície,  $U_{\infty}$  é a velocidade de corrente livre e  $\alpha_{\infty}$  é a fração volumétrica de água no infinito, sendo esta última calculada por

$$\alpha_{\infty} = \frac{LWC}{\rho_{\text{água}}}. \quad (5.2)$$

A Figura 5.5 ilustra as fronteiras do domínio de cálculo empregado na solução com o pacote CFX. Na seqüência são descritas as condições de contorno utilizadas para cada etapa da simulação do escoamento externo nestas fronteiras.



**Figura 5.5 – Fronteiras do domínio de cálculo do CFX.**

**Entrada.** Na simulação do escoamento de ar na condição de entrada são prescritas a velocidade e a temperatura da corrente livre. Para a simulação do escoamento bifásico, além da velocidade e da temperatura de cada fase, também são prescritas a fração volumétrica de cada fase. A fração volumétrica da água em corrente livre é determinada pela razão entre o conteúdo de água líquida ( $LWC$ ) e a densidade da água.

**Saída.** Para ambas as simulações, na fronteira de saída prescreve-se uma pressão estática média.

**Perfil.** Nesta fronteira duas condições de contorno distintas são aplicadas a cada uma das simulações. Para o escoamento de ar, simplesmente aplica-se uma condição de parede não deslizante. No caso do escoamento bifásico, a condição de contorno denominada *degassing condition*, explicada acima, é aplicada.

**Simetria.** O CFX resolve apenas problemas tridimensionais, assim, como o interesse do trabalho são perfis bidimensionais, uma malha bidimensional extrudada com

apenas um elemento na direção normal ao perfil 2D é usada. Dessa forma, nos planos normais ao perfil são definidas condições de simetria, ou seja, derivada na direção normal nula para cada variável resolvida.

Como mencionado acima, a solução do escoamento externo por meio do CFX requer uma discretização do domínio a ser resolvido, e isto é feito utilizando-se o pacote comercial ANSYS ICEM para geração da malha (discretização do domínio).

### 5.3 Solução do balanço de energia e do balanço de forças

O balanço de energia, expresso pela Eq. (3.19), pode ser expresso como função da temperatura da superfície e reescrito como

$$f(T_s) = 0. \quad (5.3)$$

Da mesma forma, o balanço de forças, dado pela Eq. (4.43), pode ser escrito como uma função da altura de movimento da gota por

$$f(e_{gota}) = 0. \quad (5.4)$$

Ambas são equações não lineares em relação a suas respectivas variáveis. Desta forma são necessários métodos iterativos para calcular estas variáveis. O método escolhido no presente trabalho foi o método de Newton-Raphson. Neste método é feita uma estimativa inicial da variável e esta estimativa é corrigida por meio da função da variável e sua derivada primeira.

Assim, considerando as Eqs. (5.3) e (5.4) para uma variável  $x$  qualquer, a correção desta variável é dada por

$$x = x^0 - \frac{f(x^0)}{\frac{d}{dx^0}(f(x^0))}. \quad (5.5)$$

A derivada da função é calculada numericamente pela expressão

$$\frac{d}{dx^0}(f(x^0)) = \frac{f(x^0 - \Delta x) - f(x^0)}{\Delta x}, \quad (5.6)$$

onde o  $\Delta x = 10^{-8}$ .

### 5.4 Passo de tempo

Como mencionado no Cap. 3, os balanços de energia e de massa são realizados dentro de um determinado passo de tempo, no qual uma espessura de gelo se forma. Para evitar que essa espessura de gelo cresça muito dentro de um determinado passo de tempo, um critério de controle do passo de tempo é adotado. Este critério consiste em permitir que a espessura de gelo não cresça mais do que 1% do tamanho da corda do

perfil. Assim, considera-se o ponto onde a vazão mássica de incidência é máxima, dada pela Eq. (3.2)

$$\dot{m}_{inc,máx} = \beta_{máx} \cdot LWC \cdot U_{\infty} \cdot \Delta b \cdot A. \quad (5.7)$$

Assume-se, então, que toda a massa de água incidente congele sobre a superfície

$$\begin{aligned} \dot{m}_{inc,máx} \cdot \Delta t_{máx} &= m_{gelo} \\ \beta_{máx} \cdot LWC \cdot U_{\infty} \cdot A \cdot \Delta t_{máx} &= \rho_{gelo} \cdot \varepsilon_{gelo} \cdot A \\ \Delta t_{máx} &= \frac{0,01c \cdot \rho_{gelo}}{\beta_{máx} \cdot LWC \cdot U_{\infty}}. \end{aligned} \quad (5.8)$$

No Lewice (WRIGHT, 1995a), a Eq. (5.8) apresenta uma correção levando em conta o ângulo de ataque, sendo a expressão para calcular o passo de tempo dada por

$$\Delta t = \frac{0,01 \cdot c \cdot \rho_{gelo}}{U \cdot LWC \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{20}\right) \cdot \beta_{máx}}. \quad (5.9)$$

Nota-se que, para um ângulo de ataque zero, a Eq. (5.9) é a própria Eq. (5.8). Para ângulos de ataque maiores do que zero essa correção é maior que a unidade e, conseqüentemente, o passo de tempo passa a ser menor. Assim, Wright (1995a) considera que o ângulo de ataque é um agravante no passo de tempo. Porém, não foi encontrada nenhuma explicação na literatura de como essa correção é obtida.

Esse passo de tempo automático também controla a taxa de transferência de calor perdida por condução, no balanço de energia, que pode ter valores muito elevados para pequenos passos de tempo ou muito baixos para grandes passos de tempo.

Como o código do método dos painéis está acoplado ao código de formação de gelo, conforme descrito na Seção 5.1, a atualização do escoamento externo é realizada conforme o passo de tempo dado pela Eq. (5.9). No Cap. 6 a influência da atualização do escoamento externo é estudada.

## 5.5 Modificação da geometria

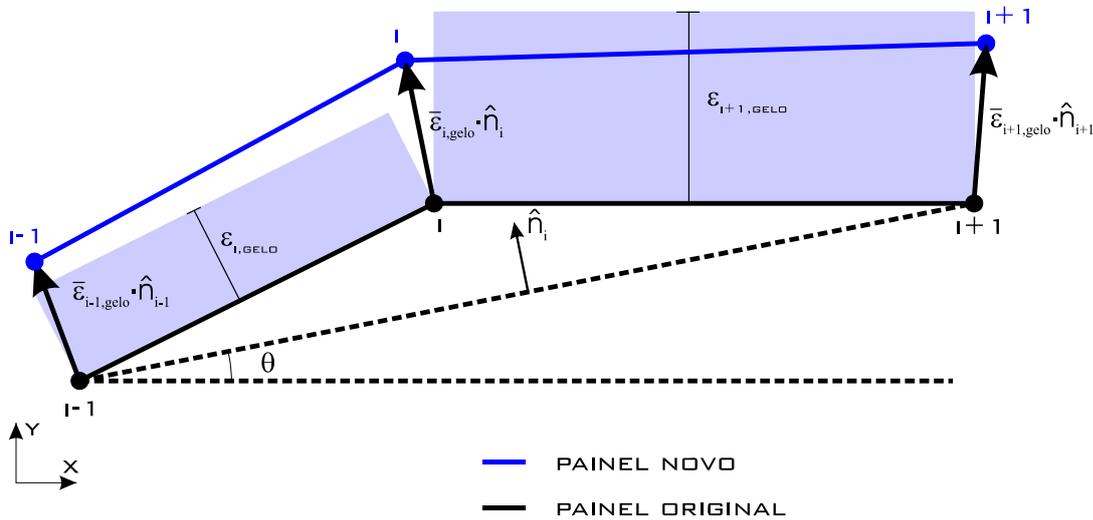
A modificação da geometria para obter a forma do gelo é realizada movendo-se os nós da geometria conforme a massa de gelo calculada no balanço de massas. Para isso, considera-se que o crescimento de gelo ocorre sempre na direção normal à superfície. Assim, o cálculo da nova posição do nó é dado por

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \bar{\varepsilon}_{gelo} \cdot \hat{n}, \quad (5.10)$$

onde  $\vec{r}$  é a nova posição do nó,  $\vec{r}_0$  é a posição original do nó,  $\bar{\varepsilon}_{gelo}$  é a espessura média de gelo formado entre dois painéis adjacentes e  $\hat{n}$  é o vetor unitário normal à superfície. Estes parâmetros são mostrados na Figura 5.6.

O vetor normal à superfície é calculado pela expressão

$$\hat{n} = \begin{bmatrix} -\text{sen } \theta \\ \text{cos } \theta \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$



**Figura 5.6 – Movimentação da geometria para o acréscimo de gelo.**

A espessura de gelo formado é obtida por

$$\varepsilon_{\text{gelo}} = \frac{m_{\text{gelo}}}{\rho_{\text{gelo}} \cdot \Delta s \cdot \Delta b}. \quad (5.12)$$

Como a espessura de gelo é obtida para cada volume de controle e o interesse é no deslocamento do nó, a espessura de gelo aplicada na Eq. (5.10) é a média das espessuras dos volumes de controle adjacentes ao dado nó, o mesmo é feito para o vetor unitário normal presente nesta equação, conforme ilustrado na Figura 5.6.

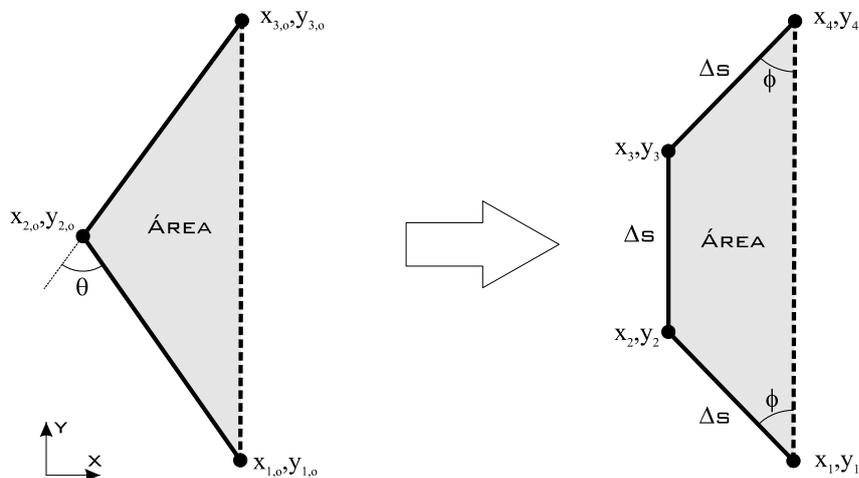
### 5.5.1 Verificação da geometria

A nova geometria muitas vezes pode apresentar comportamento não desejado, como, por exemplo, elevado ângulo entre painéis adjacentes, intersecção entre dois ou mais painéis e largura muito grande ou pequena dos painéis. A correção dessas falhas geradas pelo método de criação da nova geometria é necessária por não reproduzir corretamente a forma real de gelo e, quando utilizada na atualização do escoamento externo, por provocar erros nos cálculos do escoamento como, por exemplo, no coeficiente de transferência de calor por convecção. Para evitar essas falhas na geometria, após a sua modificação, a geometria passa por uma série de verificações dos defeitos já citados.

### Ângulo entre painéis adjacentes

Quando o ângulo entre dois painéis adjacentes, mostrado na Figura 5.7, é maior que um critério especificado ( $\theta = 90^\circ$ ), um novo painel é criado de acordo com as seguintes regras:

- A área do triângulo formado pelos nós dos dois painéis existentes ( $(x_{1,o}, y_{1,o})$ ,  $(x_{2,o}, y_{2,o})$  e  $(x_{3,o}, y_{3,o})$ ) é igual à área do quadrilátero formado pelos nós dos três novos painéis ( $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  e  $(x_4, y_4)$ );
- os tamanhos dos três novos painéis são iguais;
- os ângulos internos do trapézio ( $\phi$ ) são iguais;
- os nós  $(x_{1,o}, y_{1,o})$  e  $(x_{3,o}, y_{3,o})$  são mantidos, se transformando nos nós  $(x_1, y_1)$  e  $(x_4, y_4)$  conforme Figura 5.7.



**Figura 5.7 – Modificação da geometria para grandes ângulos entre painéis adjacentes.**

### Intersecção entre painéis

Quando existem regiões de curvatura côncava na geometria do gelo os novos painéis gerados podem se intersectar, conforme mostrado na Figura 5.8. Ao verificar uma intersecção entre painéis, essa intersecção passa a ser um nó e os nós localizados fora da nova geometria são removidos.

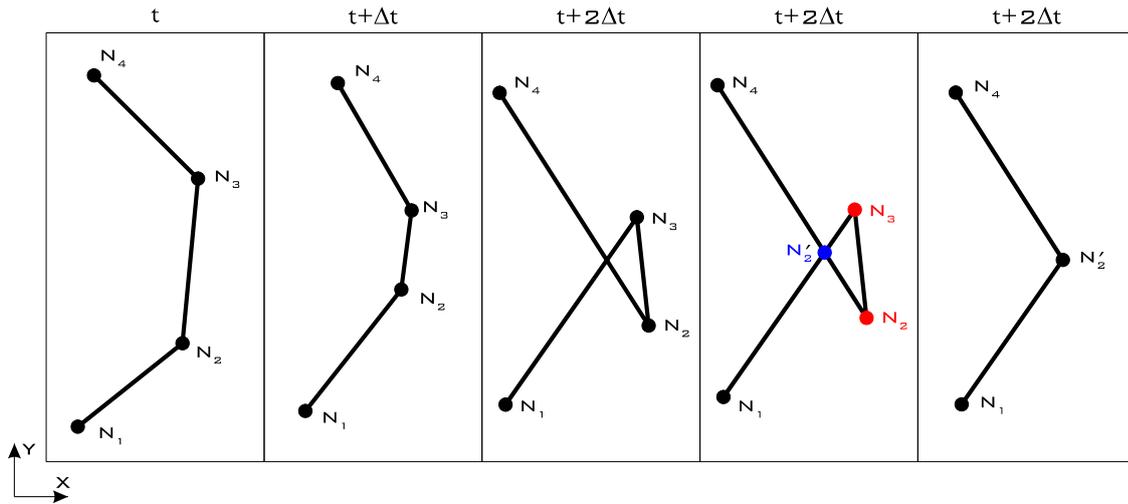


Figura 5.8 – Modificação da geometria segundo intersecção de painéis.

### Largura dos painéis

Caso um painel possua largura maior que um critério pré-estabelecido ( $\Delta s > \Delta s_{\text{máx}} = 0,05 \cdot c$ ), um nó no centro deste painel é criado. Assim um novo painel é criado na geometria, conforme esquematizado na Figura 5.9.

Já para painéis com largura menor que o critério ( $\Delta s < \Delta s_{\text{mín}} = 0,05 \cdot \Delta s_{\text{máx}}$ ), o dado painel é conectado com o painel vizinho de menor largura, como mostrado na Figura 5.9.

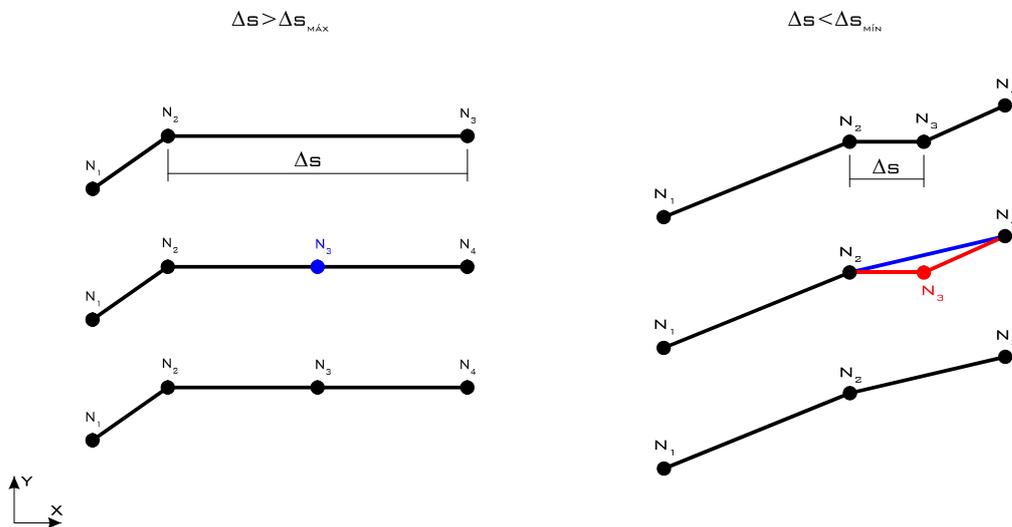


Figura 5.9 – Modificação da geometria pelo critério de largura de painéis.

## 6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a formulação proposta neste trabalho. Todos os casos simulados representam situações reais de vôo e são comparados com resultados experimentais obtidos em túnel de vento e com resultados numéricos alcançados com outros códigos de formação de gelo.

O presente capítulo está dividido em quatro seções, descritas a seguir:

1. Validação do modelo termodinâmico e do modelo de rugosidade descritos (Seção 6.1);
2. Análise da influência da rugosidade no crescimento de gelo (Seção 6.2);
3. Análise da influência de alguns parâmetros numéricos e físicos do escoamento externo na formação de gelo (Seção 6.3);
4. Apresentação e discussão dos resultados obtidos com o modelo de rugosidade (Seção 6.4).

### 6.1 Validação

A validação do modelo implementado no presente trabalho será feita em duas etapas. Primeiro será apresentada a validação do modelo termodinâmico de formação de gelo por meio da validação das formas de gelo. Por último, o modelo de rugosidade proposto será validado comparando-se valores de rugosidade obtidos no presente trabalho com resultados experimentais.

A validação do método dos painéis e do CFX<sup>®</sup> (Ansys Inc.) não fazem parte do escopo deste trabalho, mas podem ser conferidas nos trabalhos realizados por Silveira (2001 e 2006).

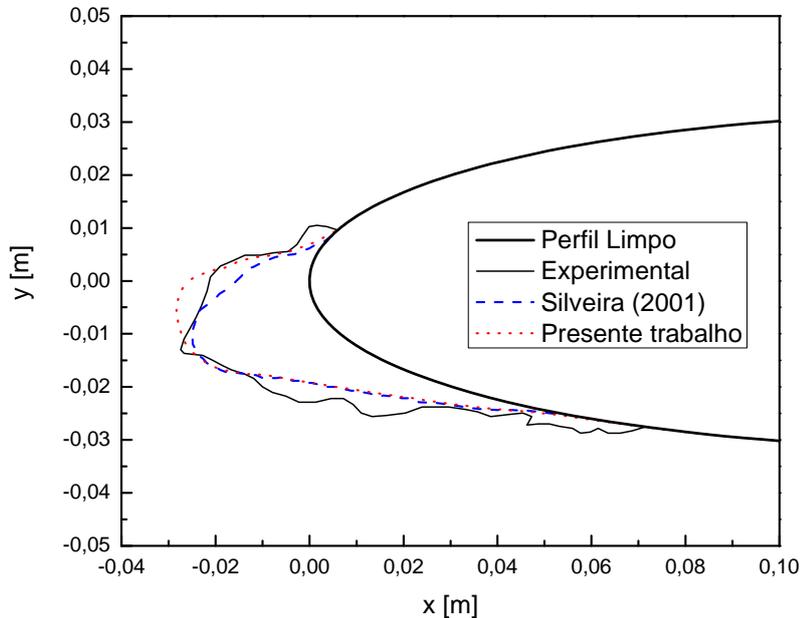
#### 6.1.1 Modelo termodinâmico

A validação do modelo termodinâmico implementado no presente trabalho é feita por meio de dois casos usados por Silveira (2001) e retirados de (WRIGHT; GENT; GUFFOND, 1997). A Tabela 6.1 mostra os parâmetros de formação de gelo desses dois casos, denominados V1 e V2. Esses dois casos foram escolhidos por representarem os dois tipos extremos de formação de gelo, o caso V1 caracteriza a formação de gelo do tipo escarcha branca e o caso V2, do tipo regelo.

Os resultados obtidos no presente trabalho são comparados com os resultados experimentais, obtidos por meio de túnel de vento, e com resultados numéricos obtidos por Silveira (2001). Para ambos os casos o escoamento externo foi resolvido por meio do método dos painéis. A Figura 6.1 mostra o resultado para o caso V1 e a Figura 6.2, para o caso V2.

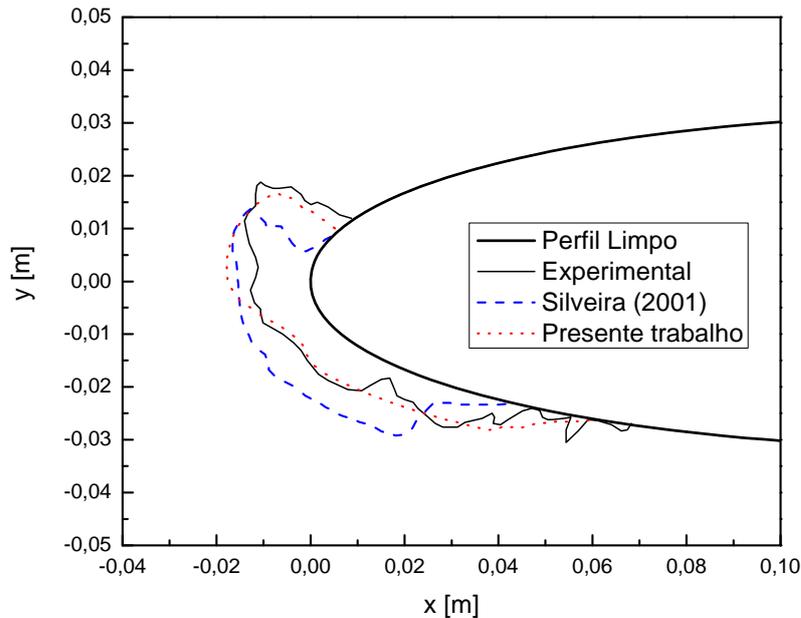
**Tabela 6.1 – Condições de formação de gelo dos casos de validação.**

Perfil	V1	V2
	NACA 0012	NACA 0012
<b>Corda [m]</b>	0,5334	0,5334
<b>Ângulo de ataque [°]</b>	4	4
<b><math>V_{\infty}</math> [m/s]</b>	58,1	58,1
<b><math>P_{\infty}</math> [kPa]</b>	95,61	95,61
<b><math>T_{\infty}</math> [K]</b>	245,2	266,3
<b>MVD [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	20	20
<b>LWC [<math>\text{g}/\text{m}^3</math>]</b>	1,3	1,3
<b>Tempo [s]</b>	480	480

**Figura 6.1 – Caso de validação V1, formação de gelo do tipo escarcha branca.**

Observa-se na Figura 6.1 e na Figura 6.2, que o código implementado no presente trabalho apresenta resultados com a mesma tendência do experimental e com o obtido por Silveira (2001). Conclui-se assim, que o modelo termodinâmico foi corretamente implementado.

Nota-se ainda, que o resultado da formação de gelo do tipo regelo – Figura 6.2 – apresenta uma maior concordância com o perfil experimental. O resultado obtido neste trabalho conseguiu reproduzir melhor o “chifre” de gelo e a forma do gelo na parte inferior do perfil.



**Figura 6.2 – Caso de validação V2, formação de gelo do tipo regelo.**

### 6.1.2 Modelo de rugosidade

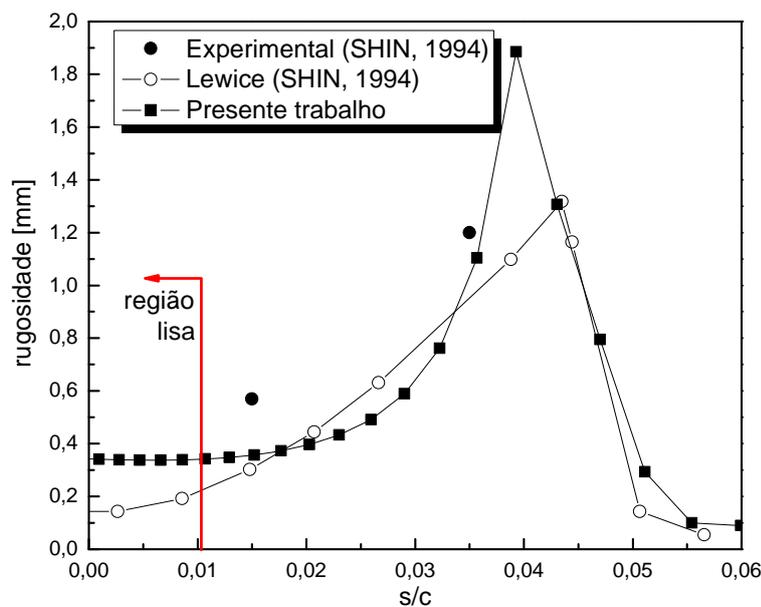
Como já citado, observa-se experimentalmente que, nas formações de gelo do tipo regelo, há a existência de regiões de formação de gelo com comportamentos distintos. Verifica-se a presença de uma pequena região lisa (pouco rugosa) próxima ao bordo de ataque, onde se caracteriza a formação de um filme de água; uma região bastante rugosa, onde prevalece a formação de gotas estacionárias; e uma região de *runback*, na qual a água se quebra em filetes. Para verificar se o modelo proposto no Cap. 4 reproduz de forma correta essas configurações de rugosidade, a rugosidade obtida por meio de simulações com o código do presente trabalho são comparadas com dados experimentais.

Um caso padrão, empregado por Shin (1994), é utilizado para a validação do modelo de rugosidade. A Tabela 6.2 apresenta as condições de escoamento desse caso. Infelizmente nenhum perfil de rugosidade ao longo de toda região de formação de gelo foi medido experimentalmente nesse trabalho, e a altura da rugosidade foi medida apenas em algumas posições específicas do perfil. Ainda nesse trabalho, Shin procurou analisar a dependência da rugosidade em relação a alguns parâmetros, medindo a variação da altura da rugosidade com a velocidade, com a temperatura, com o conteúdo de água líquida ( $LWC$ ) e com o tempo. Além das medições experimentais, Shin comparou seus resultados aos obtidos pelo código Lewice, no qual uma correlação empírica é usada para obter a rugosidade do gelo.

**Tabela 6.2 – Condições de escoamento do caso padrão.**

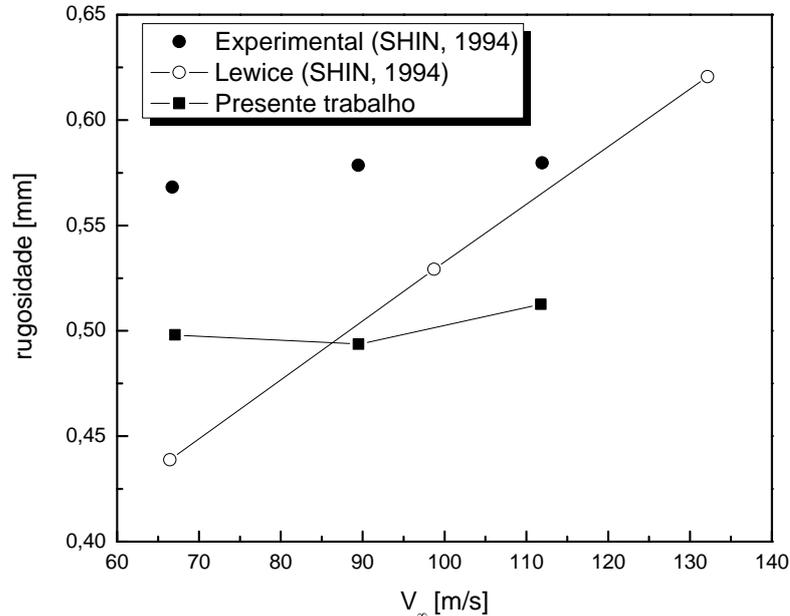
Caso padrão	
<b>Perfil</b>	NACA 0012
<b>Corda [m]</b>	0,5334
<b>Ângulo de ataque [°]</b>	0
<b><math>V_{\infty}</math> [m/s]</b>	67,1
<b><math>T_{\infty}</math> [K]</b>	270,95
<b>MVD [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	20
<b>LWC [<math>\text{g}/\text{m}^3</math>]</b>	0,5
<b>Tempo [s]</b>	120

O primeiro resultado apresentado é a distribuição de rugosidade sobre a superfície do gelo no final de 2 minutos. A Figura 6.3 compara os perfis de rugosidade obtidos no presente trabalho com os obtidos com o código Lewice. Apesar dos dados experimentais para a rugosidade terem sido adquiridos em apenas duas posições do perfil, como pode ser observado na Figura 6.3, já se pode ter uma idéia de como se comporta a rugosidade sobre a superfície. O perfil de rugosidade obtido no presente trabalho apresenta comportamento semelhante ao dado pela correlação empírica utilizada no Lewice, representando bem a região lisa próxima ao ponto de estagnação ( $s/c = 0$ ) e uma região rugosa à jusante e também aproxima-se bem em um dos pontos experimentais e aproxima-se levemente melhor do que a correlação do Lewice no outro ponto experimental.

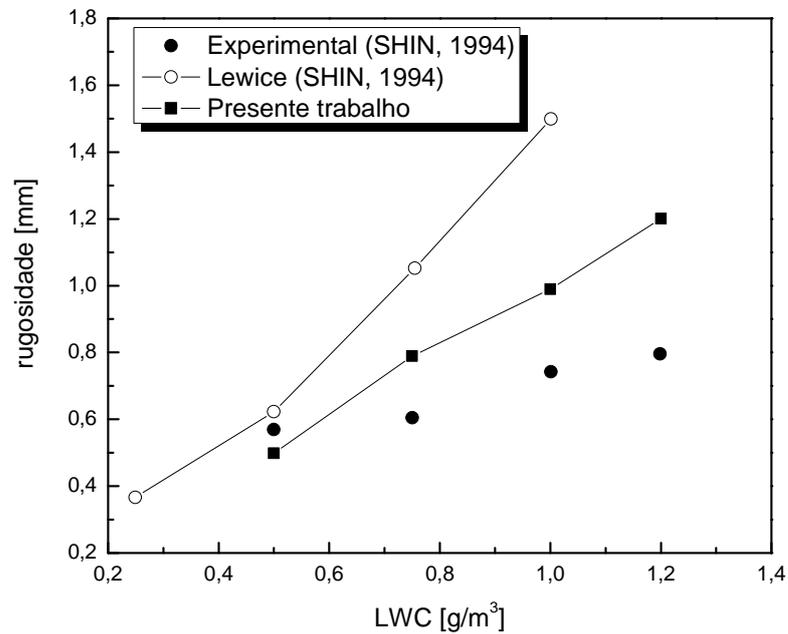
**Figura 6.3 – Distribuição de rugosidade sobre a superfície do gelo.**

Na Figura 6.4, na Figura 6.5 e na Figura 6.6 são verificadas a variação da rugosidade, medida na zona de transição entre a região lisa e rugosa, com a velocidade,

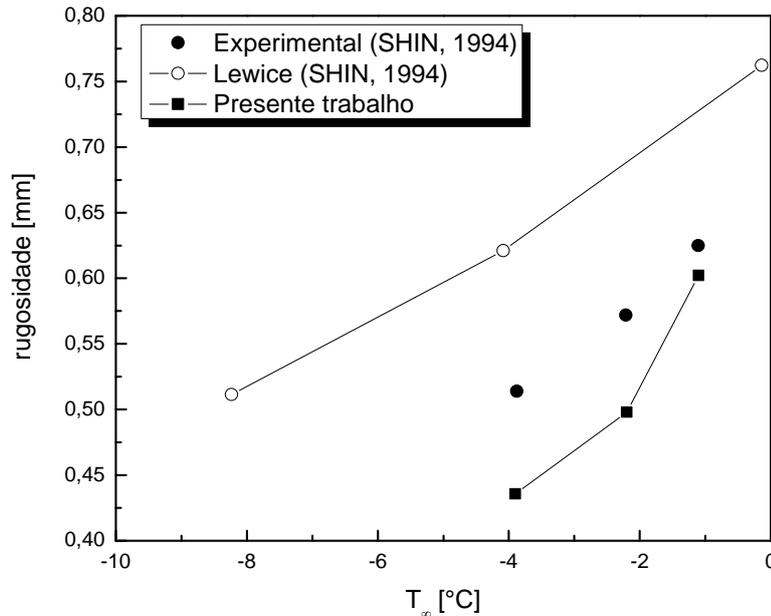
com a temperatura e com o  $LWC$ . Observa-se nessas figuras que o comportamento e a ordem de grandeza da rugosidade obtidas no presente trabalho estão sempre melhores do que os dados do Lewice quando comparados com os resultados experimentais.



**Figura 6.4 – Variação da rugosidade do gelo no início da região rugosa com a velocidade da corrente livre.**



**Figura 6.5 – Variação da rugosidade do gelo no início da região rugosa com o conteúdo de água líquida.**



**Figura 6.6 – Variação da rugosidade do gelo no início da região rugosa com a temperatura de corrente livre.**

## 6.2 Influência da rugosidade na formação de gelo

O coeficiente de transferência de calor por convecção é um termo de grande importância nos balanços termodinâmicos de formação de gelo e um parâmetro chave para obtenção de melhores resultados nos casos em regime úmido e misto. A rugosidade tem grande influência nesse coeficiente e, como consequência, nos resultados do perfil de gelo formado. Dada essa importância, nesta seção será analisada a sensibilidade do problema de formação de gelo em relação à rugosidade.

A rugosidade afeta a formação de gelo em dois aspectos relacionados ao escoamento externo: na localização do ponto de transição do escoamento laminar para turbulento e no cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, sendo este último dependente do primeiro.

O ponto de transição do regime laminar para o turbulento depende diretamente da rugosidade da superfície, sendo obtido por meio do número de Reynolds local baseado na rugosidade, dado por (SCHLICHTING, 1968)

$$\text{Re}_\kappa = \frac{V_\kappa \cdot \kappa}{\nu}, \quad (6.1)$$

onde  $V_\kappa$  é a velocidade na altura da rugosidade e  $\kappa$  é a altura da rugosidade. O critério usado para determinar a transição é um número de Reynolds crítico igual a 600 (WRIGHT, 1995a).

Como comentado acima, o coeficiente de transferência de calor por convecção é influenciado pela transição, pois ele é calculado de formas diferentes para o escoamento laminar e para o escoamento turbulento. Quando o escoamento ocorre em regime

laminar ( $Re_{\kappa} < 600$ ), o coeficiente de transferência de calor por convecção não depende da rugosidade e é obtido por meio da expressão proposta por Smith e Spalding (SCHLICHTING, 1968), dada por

$$h_{c,l} = \frac{0,296 \cdot k_f}{c \cdot \sqrt{Re}} \sqrt{\frac{U^{2,87}}{\int_0^x U^{1,87} dx}}, \quad (6.2)$$

onde  $k_f$  é a condutividade térmica,  $c$  é o tamanho da corda do perfil e  $U$  a velocidade na borda da camada limite.

Já no regime turbulento ( $Re_{\kappa} > 600$ ), o coeficiente de transferência de calor por convecção depende diretamente da rugosidade local, sendo calculado pela analogia de Spalding (WHITE, 1991)

$$h_{c,t} = \frac{k_f}{c} \cdot \frac{0,5 \cdot C_f \cdot Re_x \cdot Pr}{Pr_t + 0,5 \cdot C_f / St_{\kappa}}, \quad (6.3)$$

onde  $Re_x$  é o número de Reynolds local,  $St_{\kappa}$  é o número de Stanton baseado na rugosidade,  $Pr$  é o número de Prandtl,  $Pr_t$  é o número de Prandtl turbulento e  $C_f$  é o coeficiente de atrito superficial.

Na Eq. (6.3), o coeficiente de atrito superficial e o número de Stanton baseado na rugosidade são os termos dependes da rugosidade, e são expressos por

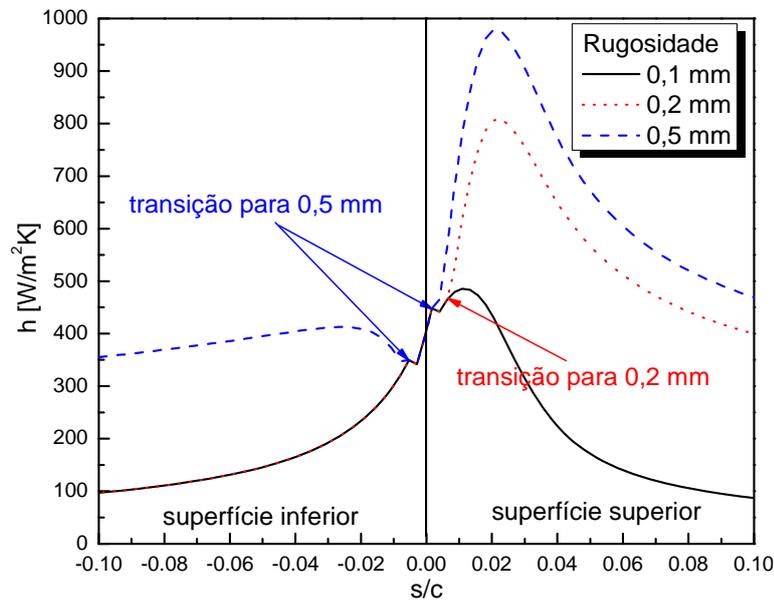
$$0,5 \cdot C_f = \left[ \frac{0,41}{\log \left( 864 \cdot \frac{\theta_t}{\kappa} + 2,586 \right)} \right]^2 \text{ e} \quad (6.4)$$

$$St_{\kappa} = 1,92 \cdot Re_{\kappa}^{-0,45} \cdot Pr^{-0,8}. \quad (6.5)$$

As expressões acima mostram a influência direta da rugosidade no coeficiente de transferência de calor por convecção. Essa influência é ilustrada na Figura 6.7, onde são mostradas as curvas do coeficiente de transferência de calor por convecção obtidas para um escoamento sobre um perfil limpo e condições descritas na Tabela 6.1 – caso V2, considerando diferentes rugosidades para o perfil limpo.

Um primeiro aspecto observado na Figura 6.7 é que o aumento da rugosidade sobre a superfície faz com que a transição do escoamento laminar para turbulento seja antecipada. Assim, uma porção maior do perfil estará sujeita a um escoamento turbulento, alterando, conseqüentemente, o coeficiente de transferência de calor por convecção. Nota-se que, para a rugosidade de 0,1 mm, o ponto de transição para a parte superior (s positivo) e inferior (s negativo) do perfil está localizado fora da região mostrada, o que também ocorre para a região inferior do perfil de rugosidade 0,2 mm.

Enquanto que para o perfil com 0,5 mm de rugosidade, os pontos de transição em ambas as superfícies estão mais próximos do ponto de estagnação. Outro comportamento observado na Figura 6.7 é em relação ao coeficiente de transferência de calor por convecção, que na região de escoamento laminar, apresenta valores iguais para as três rugosidades, pois esse coeficiente não depende da rugosidade, conforme observado na Eq. (6.2). À medida que se aumenta a rugosidade, o ponto de transição aproxima-se do ponto de estagnação e uma maior porção do perfil encontra-se sob um escoamento turbulento, no qual a rugosidade influencia diretamente no coeficiente de transferência de calor por convecção, conforme Eq. (6.3). Assim, o coeficiente de transferência de calor por convecção apresenta valores mais elevados nessa região.



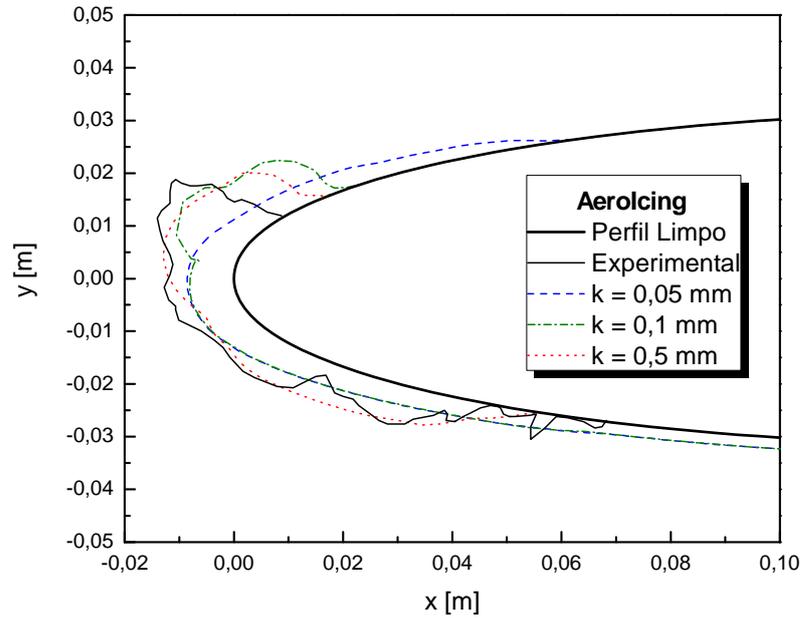
**Figura 6.7 – Influência da rugosidade no coeficiente de transferência de calor por convecção.**

A influência da rugosidade na formação de gelo pode ser verificada nas Figura 6.8 e Figura 6.9, onde são mostrados os perfis de gelo obtidos considerando rugosidades de 0,05 mm, 0,1 mm e 0,5 mm.

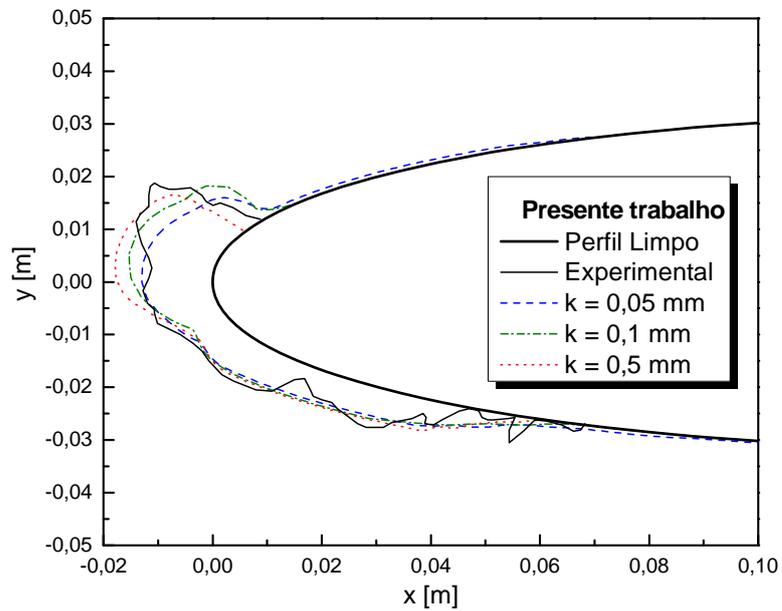
A Figura 6.8 apresenta os resultados obtidos com o código AeroIcing. Nessa figura observa-se a sensibilidade da formação de gelo com a rugosidade. Para os três valores de rugosidade usados foram obtidas três formas de gelo bem diferentes.

Na Figura 6.9 são mostradas as formas de gelo obtidas com o código implementado no presente trabalho. Os mesmos valores de rugosidade empregados no AeroIcing são usados. É importante repetir que no AeroIcing a rugosidade é considerada a mesma para o perfil limpo e para o gelo, enquanto que no código do presente trabalho a rugosidade é atribuída apenas ao perfil limpo e a rugosidade do gelo é calculada para cada posição e passo de tempo. A rugosidade sobre a superfície de gelo obtida para esse caso é mostrada na Figura 6.10. Percebe-se, assim, que as formas de gelo obtidas diferem pouco, sendo essa pequena diferença atribuída ao primeiro passo na solução do

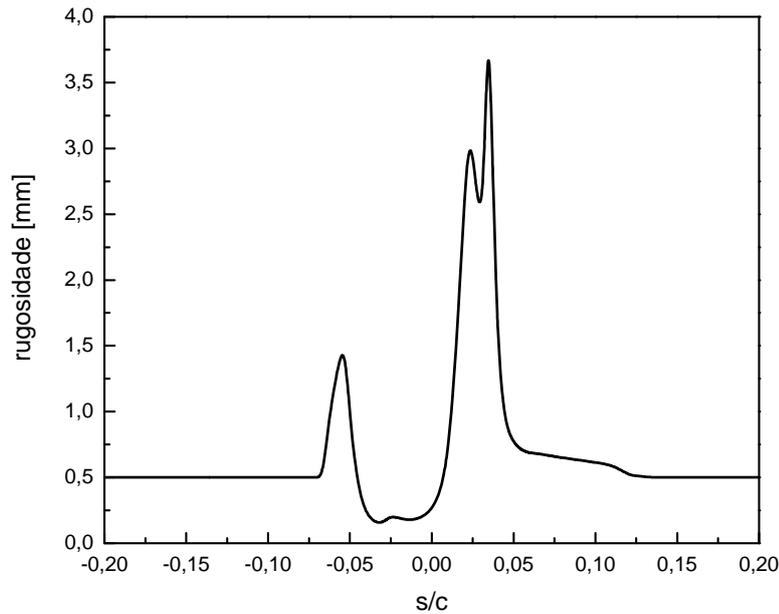
problema de formação de gelo, que considera o coeficiente de transferência de calor calculado para o perfil limpo.



**Figura 6.8 – Influência da rugosidade na forma final do gelo para o código AeroIcing.**



**Figura 6.9 – Influência da rugosidade na forma final do gelo para o código do presente trabalho.**



**Figura 6.10 – Perfil de rugosidade do Caso 2 da Tabela 6.1, com rugosidade do perfil limpo igual a 0,5 mm.**

## 6.3 Escoamento externo

A solução do escoamento externo tem grande influência na formação de gelo. De nada adianta ter um modelo que represente bem o fenômeno termodinâmico de formação de gelo se o escoamento externo não for resolvido de forma correta. A solução do escoamento externo pelo método dos painéis apresenta, em geral, bons resultados, porém algumas formas de gelo às vezes provocam fenômenos não capturados por este método, como, por exemplo, uma recirculação atrás de um “chifre” de gelo, que pode ocorrer nos gelos do tipo regelo. Dessa forma, é necessário resolver o escoamento externo usando as equações de Navier-Stokes 3D. Logicamente, foge do escopo da presente dissertação o desenvolvimento de um código desta natureza, e o emprego de um *software* comercial aparece como uma boa alternativa na solução do escoamento externo. Com seu uso, vários aspectos numéricos e físicos que influenciam na solução desse escoamento podem ser facilmente estudados. Assim, nesta seção serão discutidos alguns aspectos do escoamento externo que podem influenciar na formação de gelo e quando sua aplicação é necessária. Nesta seção é ainda analisada a influência do número de atualizações do escoamento externo no processo de acoplamento do escoamento externo com o modelo termodinâmico.

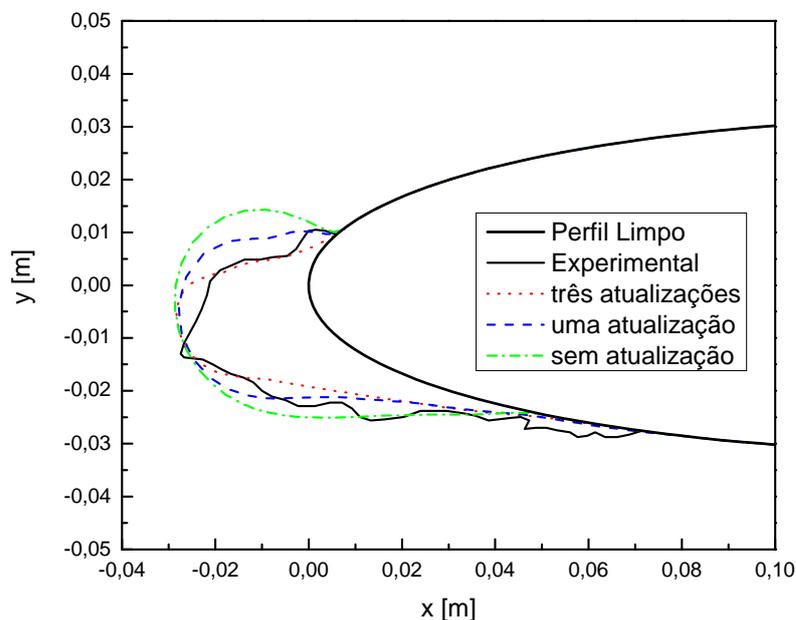
### 6.3.1 Atualização do escoamento externo

O crescimento de gelo provoca mudanças na geometria do perfil aerodinâmico e, conseqüentemente, mudanças no escoamento ao redor deste. Os campos de pressão e velocidades, o coeficiente de transferência de calor por convecção e a eficiência de coleta podem apresentar diferenças significativas, com conseqüentes alterações nos balanços

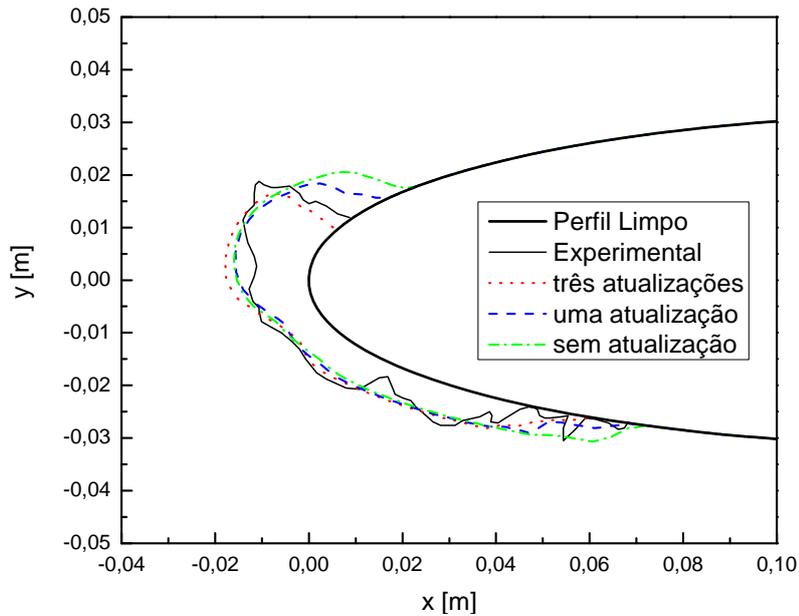
termodinâmicos. Novamente os casos da Tabela 6.1 são usados para exemplificar a dependência do modelo termodinâmico de formação de gelo quanto à atualização do escoamento externo.

A Figura 6.11 e a Figura 6.12 mostram como a atualização do escoamento externo afeta a forma final do gelo. Em ambos os casos, o escoamento externo foi resolvido por meio do método dos painéis. Percebe-se que nos dois casos a atualização do escoamento externo tem influência na quantidade de gelo formado. Nos resultados obtidos com três atualizações, nas figuras abaixo, o escoamento externo foi atualizado conforme o passo de tempo dado na Eq. (5.9).

Observa-se, na Figura 6.11 e na Figura 6.12, que o resultado obtido tende a melhorar com a atualização do escoamento externo, o que é lógico, pois a mudança da geometria altera o escoamento externo. Além dos principais parâmetros necessários para se aplicar o modelo termodinâmico de formação de gelo (velocidade, pressão, eficiência de coleta, etc.), tem-se também a modificação da rugosidade sobre o gelo. Por exemplo, no caso sem atualização do escoamento externo, a formação de gelo é resolvida com os mesmos campos do escoamento sobre o perfil limpo e com a mesma rugosidade atribuída a esse perfil; enquanto que no caso com três atualizações, a rugosidade sobre o gelo é considerada no crescimento do gelo.



**Figura 6.11 – Influência do número de atualizações do escoamento externo no caso V1 da Tabela 6.1.**



**Figura 6.12 – Influência do número de atualizações do escoamento externo no caso V2 da Tabela 6.1.**

### 6.3.2 Solução do escoamento externo com o pacote ANSYS CFX 10.0

O aplicativo CFX foi utilizado no problema de formação de gelo por Silveira e Maliska (2003) e Silveira (2006). Neste último, o CFX foi usado para resolver o escoamento ao redor de uma asa inteira e sendo acoplado ao código de formação de gelo por meio de cortes bidimensionais. Porém, nenhuma análise sobre refino de malha e modelo de turbulência foi realizada. A fim de verificar a influência desses parâmetros na formação de gelo, alguns testes foram realizados com os casos da validação, listados na Tabela 6.1. Também serão confrontados resultados obtidos com o escoamento externo resolvido por meio do CFX® (Ansys Inc.) e pelo método dos painéis.

#### **Refino de malha**

Primeiramente será analisada a influência do refino de malha nas variáveis necessárias no modelo de formação de gelo. Três refinamentos de malha foram utilizados nas simulações. Nesta análise será considerado o modelo de turbulência SST, pois é o mais indicado para problemas aerodinâmicos (ANSYS, 2005). A Tabela 6.3 descreve o refino de malha para cada malha usada. Esses refinamentos de malha foram escolhidos segundo recomendações feitas no manual do CFX (ANSYS, 2005). O refino da malha grossa se encontra dentro do intervalo aconselhado para uso de função de parede na solução do escoamento próximo à parede e o refino da malha fina, para a solução do escoamento próximo à parede por meio da formulação de baixo número de Reynolds turbulento. A malha média foi escolhida para representar uma região fora destes limites recomendados.

Tabela 6.3 – Refinos de malha.

Malha	Distância do 1º nó	$y^+$	Número de nós
Grossa	$2,5 \times 10^{-4}$	$20 < y^+ < 100$	60 mil
Média	$3,5 \times 10^{-5}$	$2 < y^+ < 20$	82 mil
Fina	$8,0 \times 10^{-6}$	$< 2$	100 mil

A Figura 6.13 mostra as curvas do coeficiente de transferência de calor por convecção, da tensão cisalhante, da pressão e da eficiência de coleta para cada refino de malha.

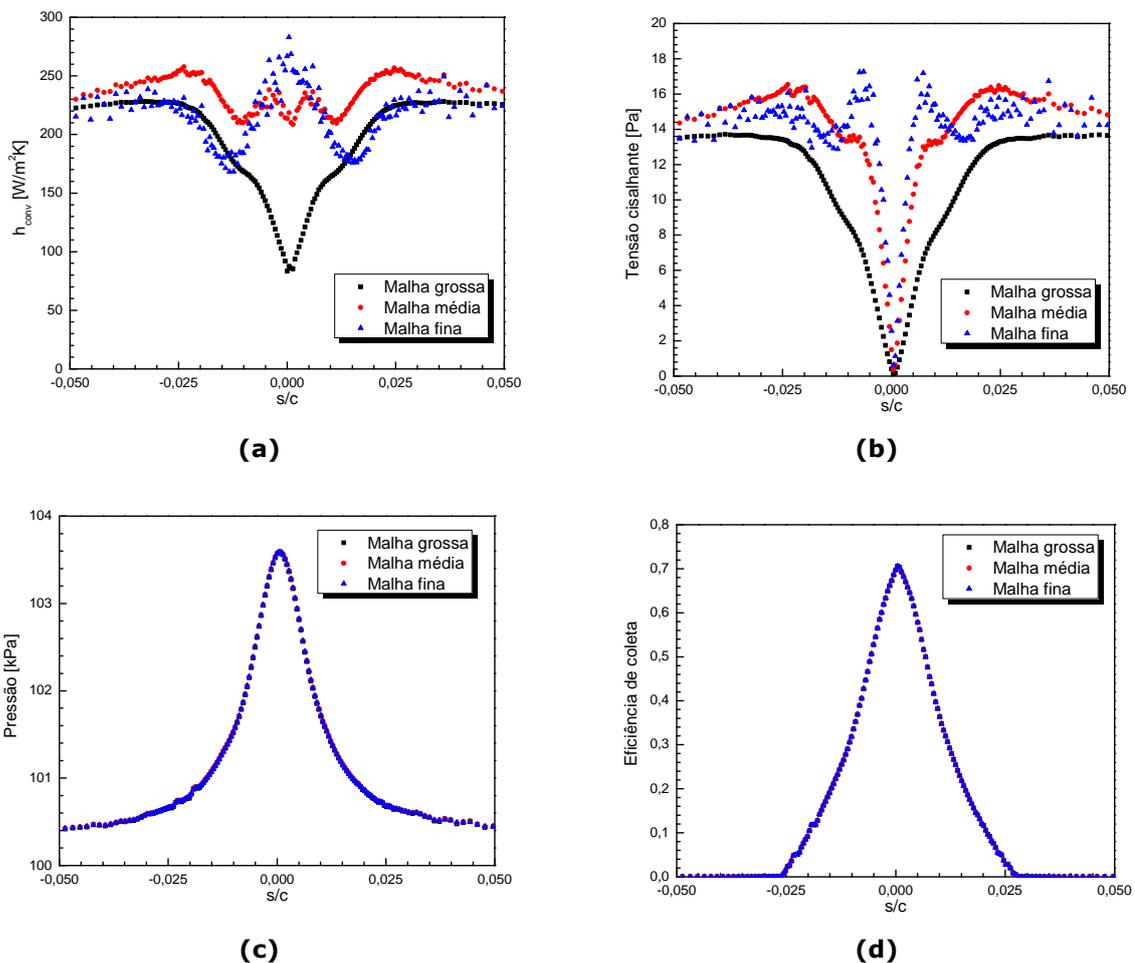
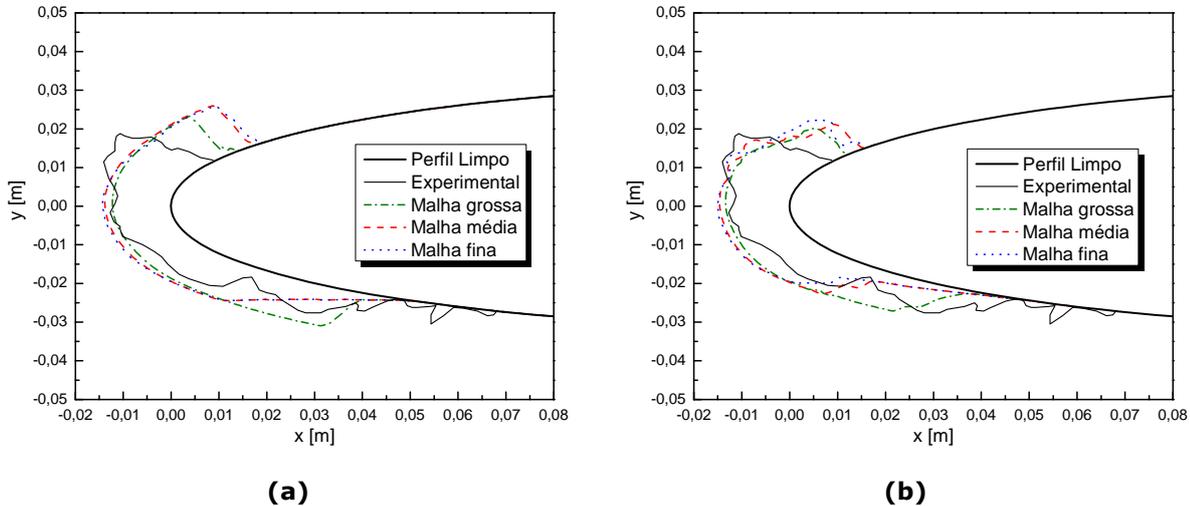


Figura 6.13 – Curvas de: (a) Coeficiente de transferência de calor por convecção, (b) Tensão cisalhante, (c) Pressão e (d) Eficiência de coleta; em função do refino de malha.

Observa-se na Figura 6.13a e na Figura 6.13b que as curvas do coeficiente de transferência de calor por convecção e da tensão cisalhante apresentam diferenças conforme o refino de malha, principalmente na região do bordo de ataque. Enquanto que as curvas de pressão (Figura 6.13c) e de eficiência de coleta (Figura 6.13d) são iguais para os três refinamentos de malha. Apesar das diferenças apresentadas no coeficiente de transferência de calor por convecção e na tensão cisalhante, a forma final do perfil de gelo, difere pouco para os três refinamentos de malha, como pode ser observado na Figura

6.14a e na Figura 6.14b. Nessas figuras são ilustrados os perfis de gelo obtidos para o caso V2 da Tabela 6.1 sem atualização do escoamento externo (Figura 6.14a) e com atualizações do escoamento (Figura 6.14b). Assim, o uso da malha grossa na solução do escoamento externo por meio do CFX já produz bons resultados.



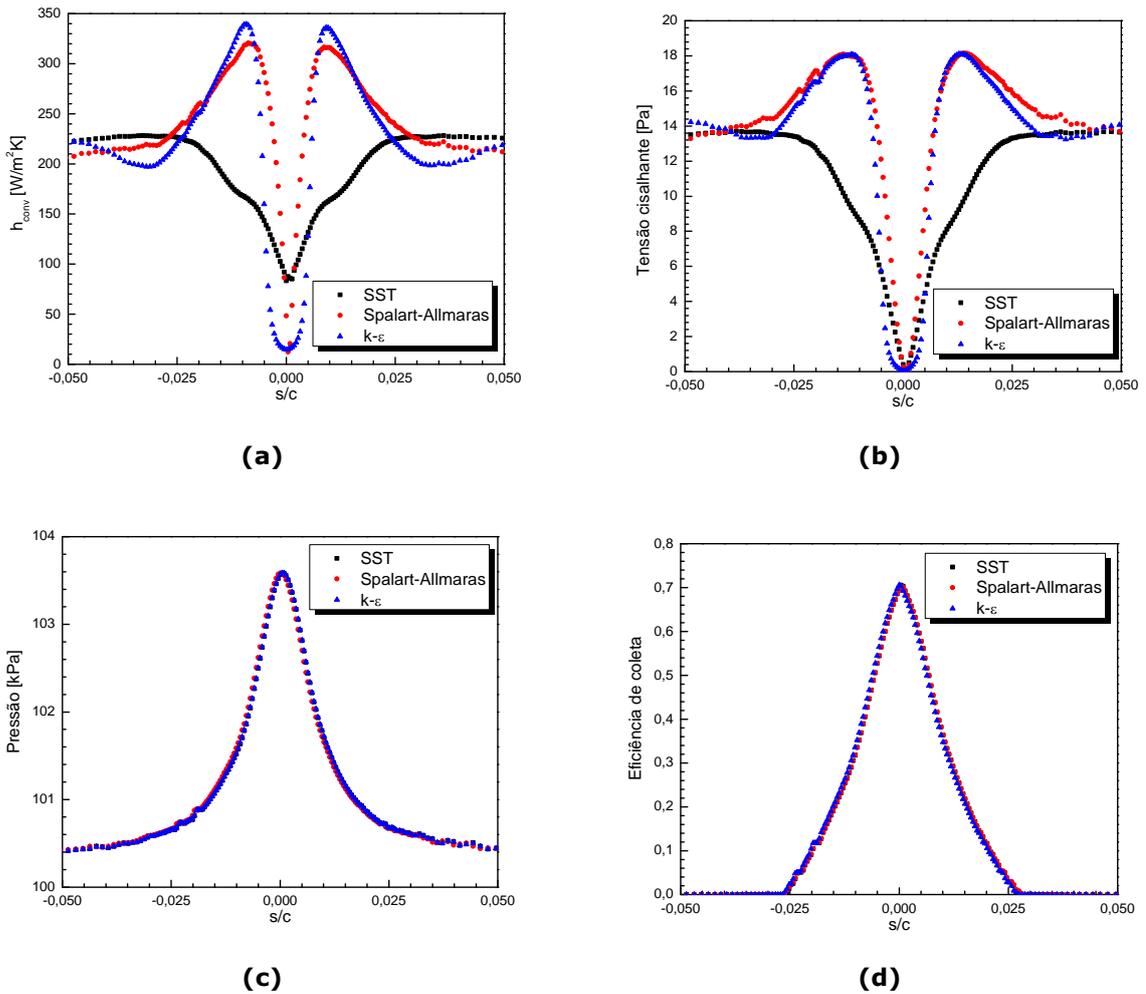
**Figura 6.14 – Perfis de gelo do caso V2 em função do refino de malha: (a) sem atualizar o escoamento externo e (b) atualizando o escoamento externo.**

### Modelos de turbulência

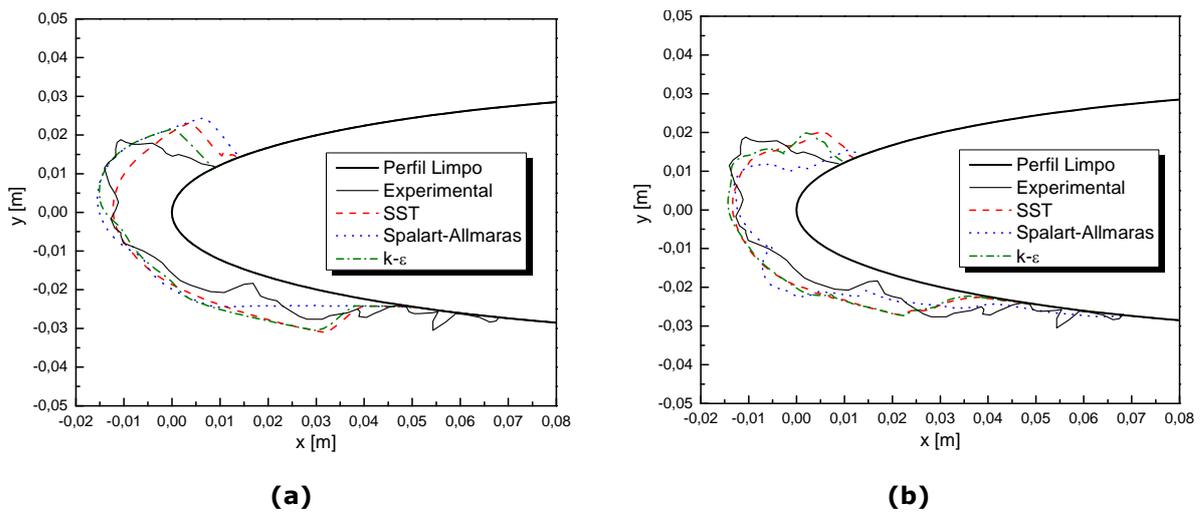
As análises com os modelos de turbulência também foram realizadas usando o caso de validação V2. Foram utilizados os mesmo refinamentos de malha da seção anterior com três modelos de turbulência: Spalart-Allmaras (modelo a uma equação),  $k-\epsilon$  e SST (modelos a duas equações).

Observou-se novamente que a pressão e a eficiência de coleta ao longo do perfil também são iguais quando os diferentes modelos de turbulência foram utilizados (Figura 6.15c e Figura 6.15d). Enquanto que a tensão cisalhante e o coeficiente de transferência de calor variam com o modelo de turbulência aplicado, conforme ilustrado na Figura 6.15a e na Figura 6.15b. Isso ocorre, pois ambas as variáveis dependem da velocidade de fricção ( $u^*$ ), a qual depende do modelo de turbulência usado.

Apesar das diferenças no coeficiente de transferência de calor por convecção e na tensão cisalhante, os perfis de gelo obtidos com os modelos de turbulência  $k-\epsilon$  e SST não apresentaram grande diferença, conforme observado na Figura 6.16a e na Figura 6.16b. Nota-se ainda nessas figuras, que quando o escoamento é atualizado, o resultado para o modelo Spalart-Allmaras difere dos demais. Isso ocorre, pois este modelo de turbulência é calibrado para perfis limpos, assim, na existência de protuberâncias (como é o caso dos "chifres" de gelo), acredita-se que o escoamento não é mais bem resolvido.



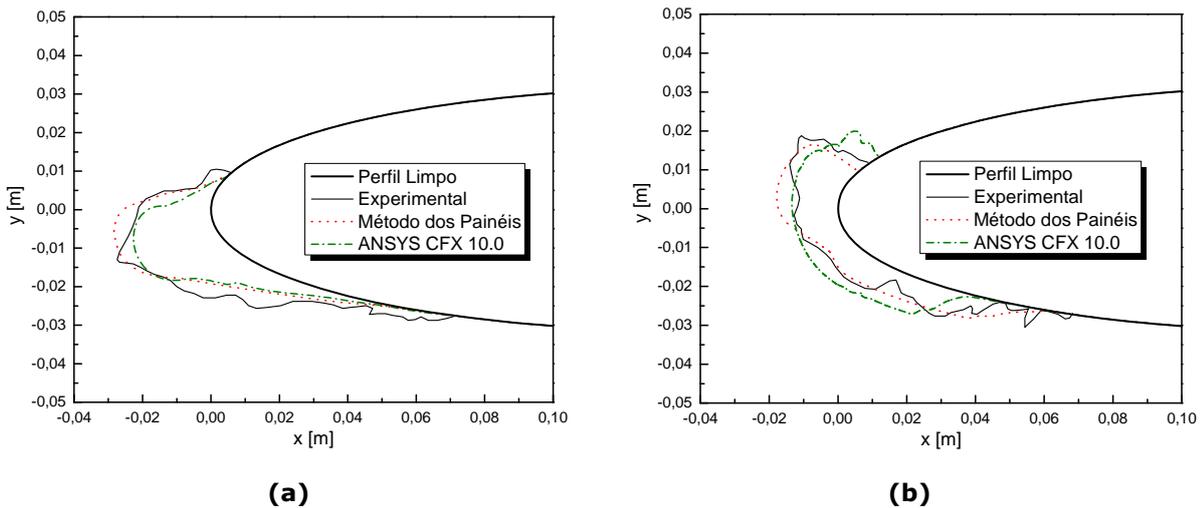
**Figura 6.15 – Curvas de: (a) Coeficiente de transferência de calor por convecção, (b) Tensão cisalhante, (c) Pressão e (d) Eficiência de coleta; em função do modelo de turbulência, para a malha grossa.**



**Figura 6.16 – Perfis de gelo do caso V2 em função do modelo de turbulência para a malha grossa, (a) sem atualizar o escoamento externo e (b) atualizando o escoamento externo.**

### 6.3.3 Método dos painéis versus CFX

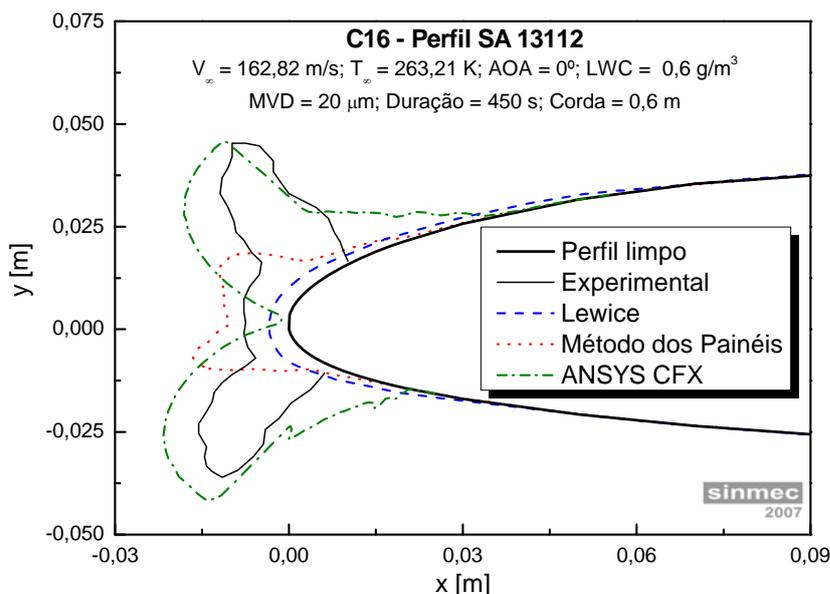
Nesta seção são comparados resultados obtidos resolvendo-se o escoamento externo por meio do método dos painéis e por meio do CFX. Primeiro são comparadas as formas de gelo dos casos de validação, cujas condições de escoamento estão descritas na Tabela 6.1. As simulações no CFX foram realizadas utilizando o refino de malha grossa e o modelo de turbulência SST, conforme análises feitas na seção anterior. A Figura 6.17(a) e a Figura 6.17(b) apresentam os perfis de gelo obtidos para esses casos.



**Figura 6.17 – Comparação entre o emprego do método dos painéis e do aplicativo CFX na solução do escoamento externo – Casos de validação: (a) caso V1 e (b) caso V2.**

Os resultados obtidos com o CFX são bons quando comparados aos experimentais e próximos daqueles obtidos com o método dos painéis. Levando em conta o custo computacional e o trabalho de gerar uma malha cada vez que o escoamento externo é atualizado, as simulações com o CFX não são muito práticas para este tipo de problema, assim o método dos painéis demonstra ser uma forte ferramenta no problema de formação de gelo.

Uma série de testes foi realizada para comparar as soluções obtidas com o CFX e o método dos painéis, verificando assim quando há a necessidade de se empregar o CFX na solução do escoamento externo. Foram escolhidos os casos do escore da ferramenta (Cap. 7) com piores resultados. Dentre esses casos um deles se destaca: o caso com número de Mach elevado apresentou um resultado muito melhor com o CFX, conforme pode ser observado na Figura 6.18. Uma explicação é que, nesse caso, há efeitos de compressibilidade no escoamento, visto que o número de Mach para este escoamento é 0,5, efeito não captado no método dos painéis.



**Figura 6.18 – Comparação entre o emprego do método dos painéis e do aplicativo CFX na solução do escoamento externo – Caso C16 do escore da ferramenta.**

### 6.3.4 Comentários

Nesta seção foi demonstrada a importância de se realizar atualizações do escoamento externo durante o processo de formação de gelo. Também foram realizadas uma breve análise do refino de malha e do modelo de turbulência usados para resolver o escoamento externo por meio do pacote comercial CFX e uma comparação entre resultados do CFX e do método dos painéis.

Observou-se que, apesar das diferenças apresentadas por algumas variáveis em função do refino de malha e do modelo de turbulência, os resultados com os modelos de turbulência  $k-\epsilon$  e SST apresentaram formas de gelo semelhantes para os três refinamentos de malha. Assim, o uso de uma malha mais grossa para qualquer um desses dois modelos de turbulência já reproduz resultados satisfatórios para o problema de formação de gelo.

Apesar da expectativa de se ter melhores resultados com o CFX para formas de gelo com grandes protuberâncias, o método dos painéis apresentou resultados tão bons quanto os do CFX. No entanto, o pacote CFX não pode ser descartado como opção de se resolver o escoamento externo, pois quando a formação de gelo ocorre em um escoamento com elevado número de Mach, há a necessidade de se usar um código que considere os efeitos de compressibilidade. Assim, o uso do CFX se torna essencial na solução do escoamento externo. Outra aplicação em que o uso do CFX é indispensável é quando se deseja resolver a formação de gelo para a asa de um avião, tendo assim um problema tridimensional. Este problema é então resolvido com o código do presente trabalho por meio de cortes ao longo da envergadura e uma posterior reconstrução da geometria da asa, agora com gelo.

## 6.4 Resultados com o modelo de rugosidade do gelo

Nesta seção o modelo de rugosidade descrito no presente trabalho é avaliado por meio de seis casos testes utilizando o perfil NACA 0012. Destes seis casos, dois deles ocorrem em regime seco (gelo do tipo escarcha branca), outros dois em regime misto (gelo do tipo misto) e os dois últimos em regime úmido (gelo do tipo regelo). As condições de escoamento destes casos são mostradas na Tabela 6.4.

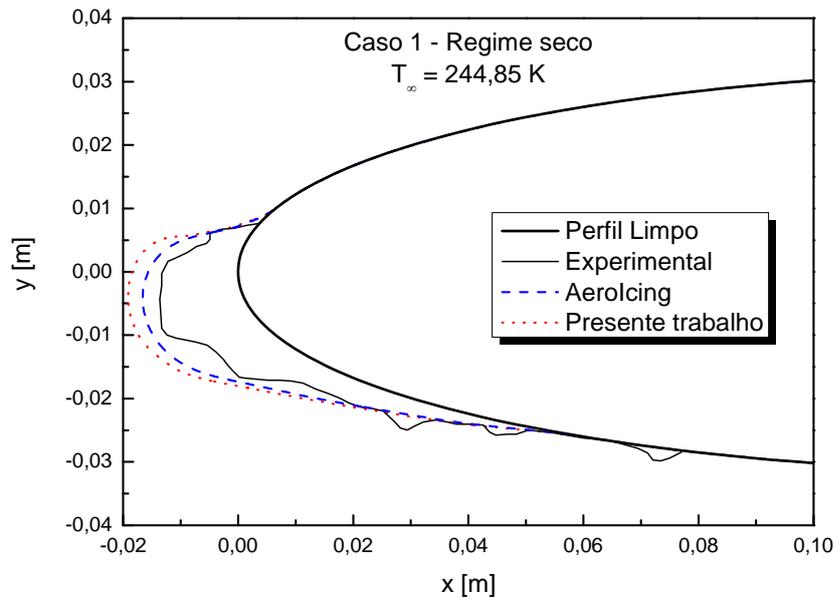
**Tabela 6.4 – Condições de formação de gelo.**

<b>Perfil</b>	<b>NACA 0012</b>
<b>Corda [m]</b>	0,5334
<b>Ângulo de ataque [°]</b>	4
<b><math>V_{\infty}</math> [m/s]</b>	67,05
<b><math>P_{\infty}</math> [kPa]</b>	101,3
<b><math>T_{\infty}</math> [K]</b>	244,85 – Regime seco (Caso 1)
	253,75 – Regime seco (Caso 2)
	259,85 – Regime misto (Caso 3)
	263,15 – Regime misto (Caso 4)
	265,35 – Regime úmido (Caso 5)
	267,05 – Regime úmido (Caso 6)
<b>MVD [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	20
<b>LWC [<math>\text{g}/\text{m}^3</math>]</b>	1,0
<b>Tempo [s]</b>	360

As formas de gelo obtidas com a formulação proposta serão comparadas com resultados experimentais, obtidos por Shin e Bond (1992), e com resultados alcançados pelo código AeroIcing, baseado no trabalho de Silveira (2001), que considera uma rugosidade uniforme tanto para a superfície limpa quanto para a superfície do gelo. Também serão analisados as curvas do coeficiente de transferência de calor por convecção, o perfil de rugosidade obtido sobre a superfície do gelo e os fluxos de massa sobre a superfície. Em todos os casos, a rugosidade do perfil limpo foi considerada a mesma para ambos os códigos, sendo esta igual a 0,1 mm, e o escoamento externo foi resolvido por meio do método dos painéis.

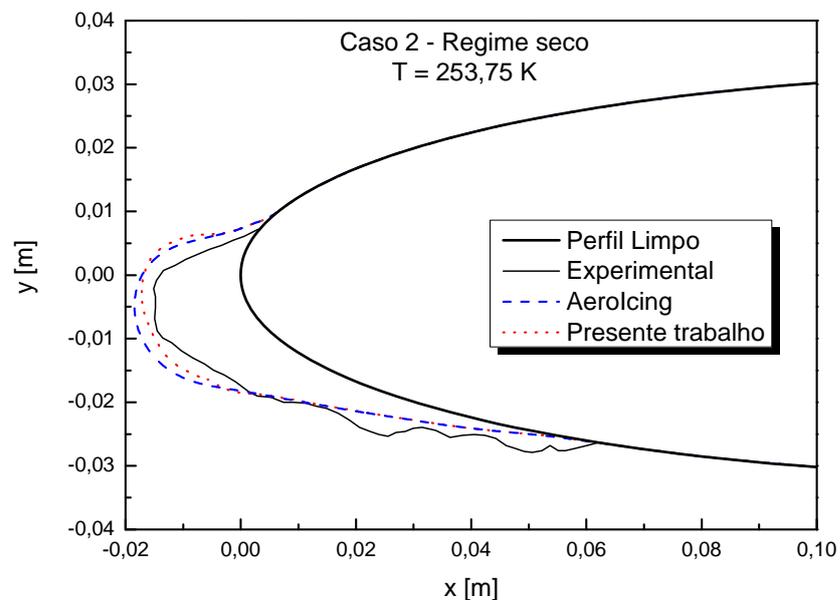
### 6.4.1 Regime seco

A Figura 6.19 e a Figura 6.20 apresentam as formas de gelo para os casos de formação de gelo do tipo escarcha branca. Este tipo de gelo é o mais simples e, geralmente, mais bem reproduzido pelos códigos de formação de gelo, pois toda a água que incide contra a superfície congela ao impacto e o modelo proposto por Messinger (1953) representa bem o fenômeno para este tipo de formação de gelo.

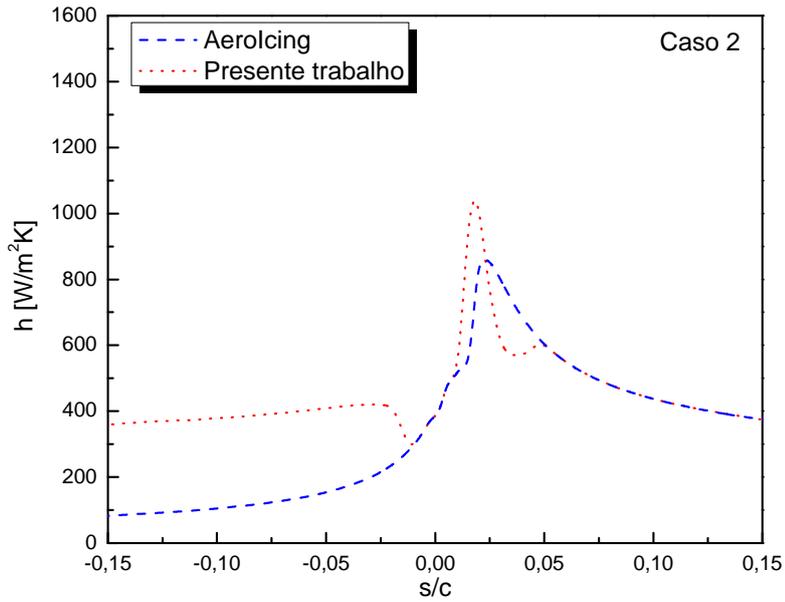


**Figura 6.19 – Formas de gelo do tipo escarcha branca para o Caso 1.**

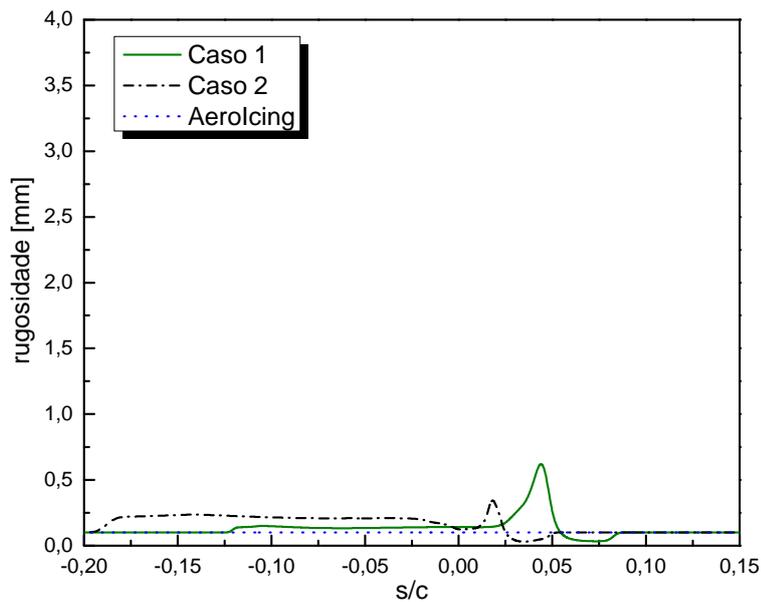
Observa-se nessas figuras, que as formas de gelo obtidas com ambos os códigos são semelhantes entre si e concordantes com a experimental. Os resultados para regime seco apresentam de forma geral resultados parecidos, pois mesmo com o coeficiente de transferência de calor por convecção apresentando diferenças em consequência da rugosidade do gelo (Figura 6.22), conforme ilustrado na Figura 6.21, os demais mecanismos de transferência de calor são suficientes para retirar todo calor latente de mudança de fase, congelando assim toda a água líquida incidente, como pode ser conferido na Figura 6.23.



**Figura 6.20 – Formas de gelo do tipo escarcha branca para o Caso 2.**

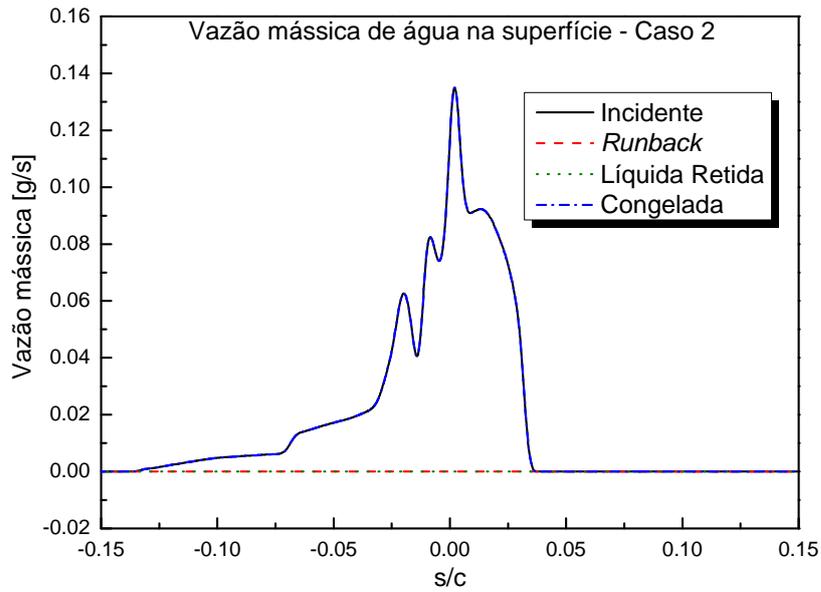


**Figura 6.21 – Coeficiente de transferência de calor por convecção para o Caso 2, formação de gelo do tipo escarcha branca.**



**Figura 6.22 – Rugosidade do gelo para os Casos 1 e 2 – Regime seco.**

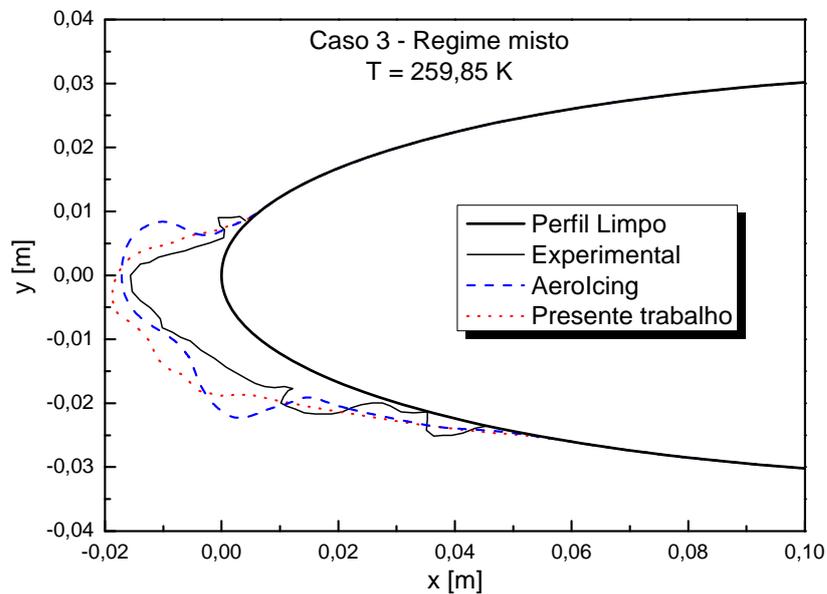
Na Figura 6.23 as curvas de vazão mássica incidente e congelada se sobrepõem, pois toda a água que impacta contra a superfície é congelada. Logo, as vazões mássicas de água líquida retida e de *runback* são nulas.



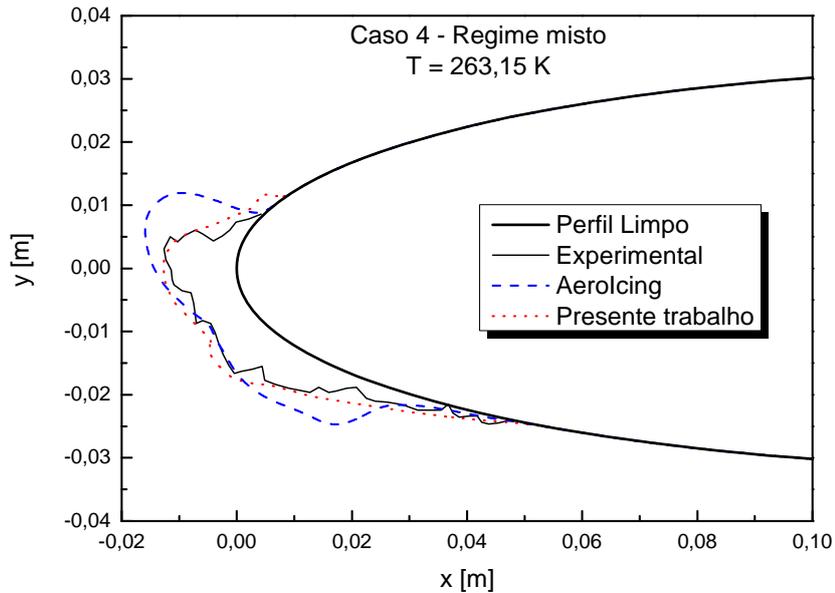
**Figura 6.23 – Vazões mássicas para o Caso 2.**

#### 6.4.2 Regime misto

Para o gelo do tipo misto, os perfis de gelo obtidos com o código do presente trabalho, conforme observado na Figura 6.24 e na Figura 6.25, são sensivelmente melhores que os obtidos pelo AeroIcing em ambos os casos.

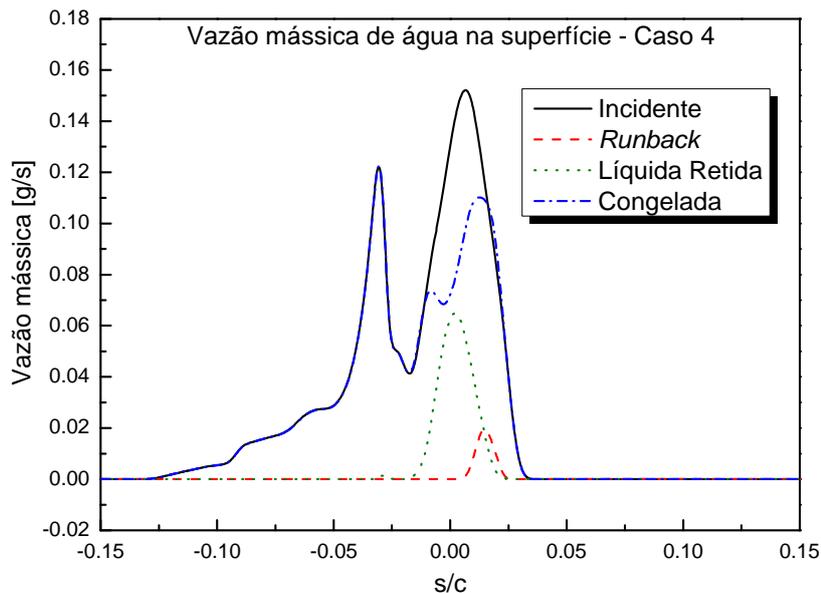


**Figura 6.24 – Formas de gelo do tipo misto para o Caso 3.**

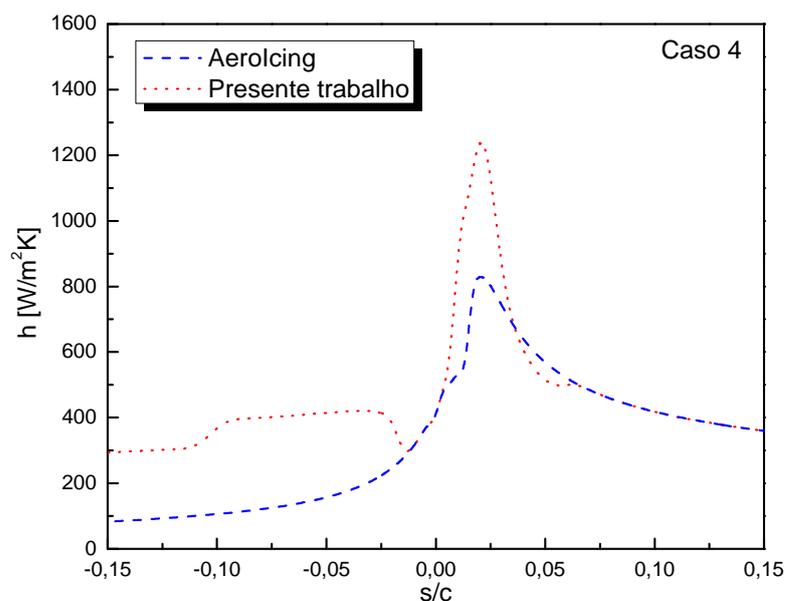


**Figura 6.25 – Formas de gelo do tipo misto para o Caso 4.**

Este regime de formação de gelo se caracteriza por apresentar zonas de formação de gelo em regime seco e outras em regime úmido. Isto pode ser observado na Figura 6.26, onde, na parte inferior do perfil (s/c negativo), toda a massa de água incidente congela. Para a parte superior do perfil (s/c positivo), parte da massa de água incidente permanece líquida (massa de água líquida retida) e uma pequena parcela escoava para regiões mais à jusante (massa de *runback*), congelando posteriormente devido aos elevados valores do coeficiente de transferência de calor por convecção nessa região (Figura 6.27). Esta região do perfil de gelo é exatamente onde o perfil é mais bem representado, conforme observado na Figura 6.24 e na Figura 6.25.

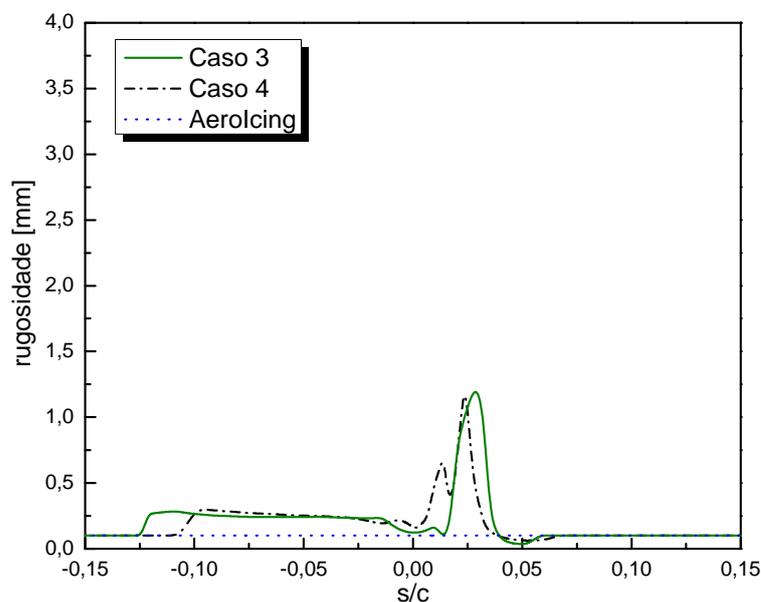


**Figura 6.26 – Vazões mássicas para o Caso 4.**



**Figura 6.27 – Coeficiente de transferência de calor por convecção para o Caso 4, formação de gelo do tipo misto.**

A Figura 6.28 ilustra a distribuição de rugosidade sobre o perfil de gelo para os casos 3 e 4. As regiões de pico coincidem com a região bem reproduzida dos perfis de gelo.

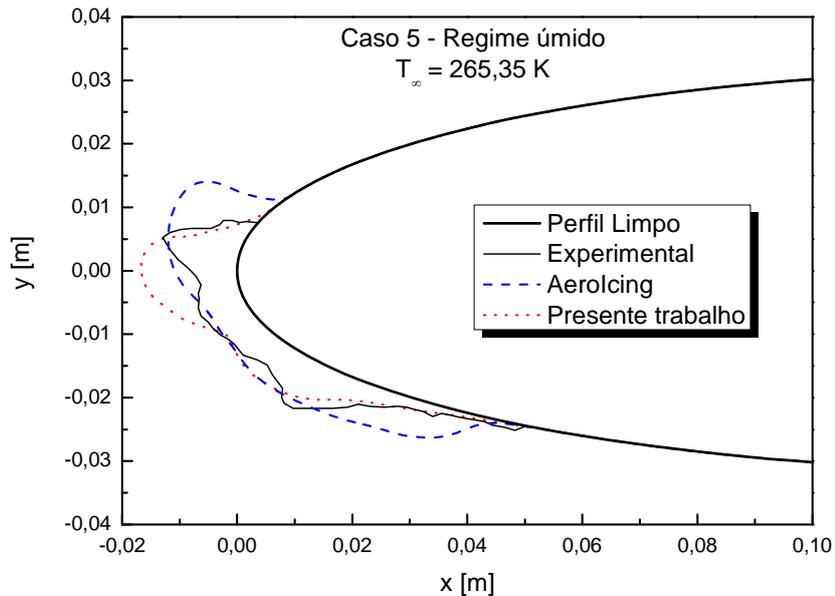


**Figura 6.28 – Rugosidade do gelo para os Casos 3 e 4 – Regime misto.**

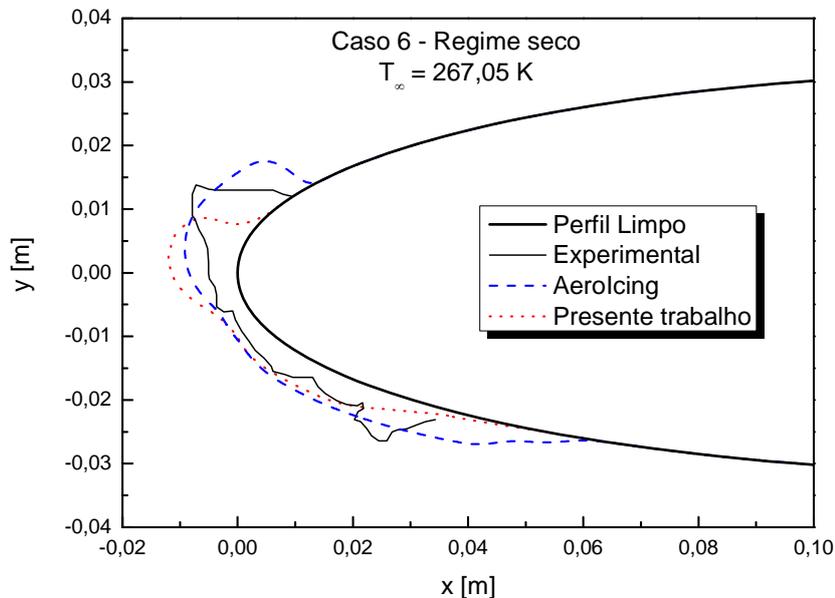
### 6.4.3 Regime úmido

Finalmente, são mostrados os resultados para o regime úmido – gelo do tipo regelo. A Figura 6.29 e a Figura 6.30 ilustram os resultados para os casos 5 e 6. Para o caso 5, o presente trabalho representa melhor a região inferior do gelo e uma melhor posição do “chifre” de gelo. No caso 6, a região inferior do gelo novamente é bem representada, porém a posição do “chifre” não concorda com a posição do experimento.

A principal dificuldade deste tipo de formação de gelo é devida à presença dos “chifres” de gelo. Como mostrado na Figura 6.30, no caso 6, apesar do AeroIcing ter obtido um resultado melhor para a posição do gelo de máxima espessura, este não caracteriza bem a existência de um “chifre” de gelo. Já no resultado do presente trabalho, a forma do perfil apresenta as características de um “chifre”, apesar de não estar na posição correta. No caso 5 ambos os códigos reproduzem um “chifre” de gelo, porém, agora, no código do presente trabalho, a posição deste coincide com a experimental.



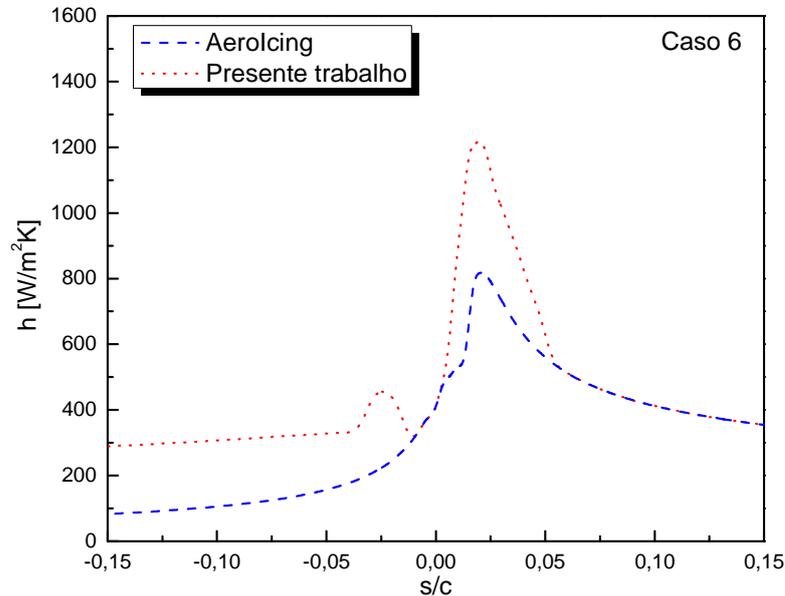
**Figura 6.29 – Formas de gelo do tipo regelo para o Caso 5.**



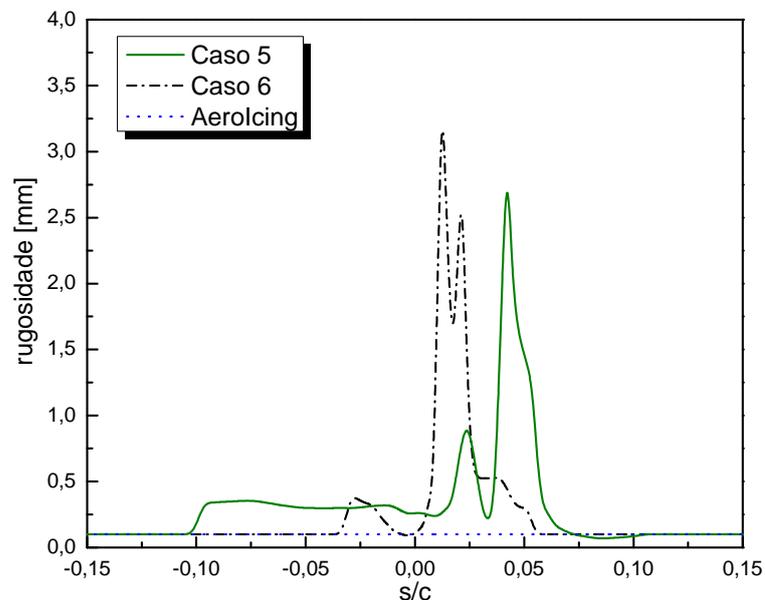
**Figura 6.30 – Formas de gelo do tipo regelo para o Caso 6.**

Observa-se na Figura 6.32 que a formação dos “chifres” na Figura 6.29 e na Figura 6.30 coincidem com as posições onde a rugosidade da superfície é mais elevada. Esses valores mais elevados da rugosidade provocam uma mudança no coeficiente de

transferência de calor por convecção – Figura 6.31 – quando comparados com o AeroIcing, que considera a rugosidade uniforme ao longo de toda a superfície. Assim, as taxas de transferência de calor dependentes deste coeficiente tomam maior importância no balanço de energia.



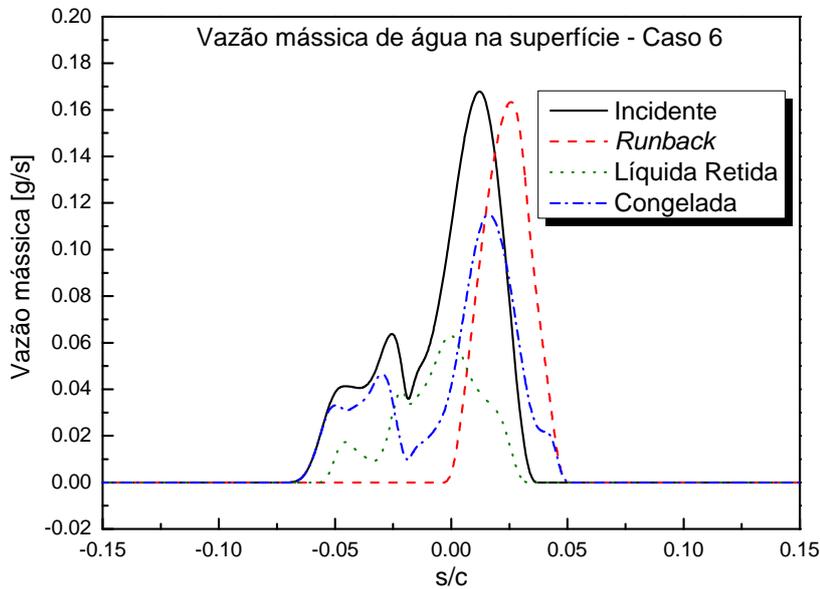
**Figura 6.31 – Coeficiente de transferência de calor por convecção para o Caso 6, formação de gelo do tipo regelo.**



**Figura 6.32 – Rugosidade do gelo para os Casos 5 e 6 – Regime úmido.**

Outro fator importante na formação de gelo do presente trabalho é a existência de um novo termo no balanço de massas. A Figura 6.33 ilustra as vazões mássicas na superfície para o Caso 6. Nota-se que há a presença de uma massa de água considerável que não congela, principalmente na região inferior do perfil de gelo, explicando assim a

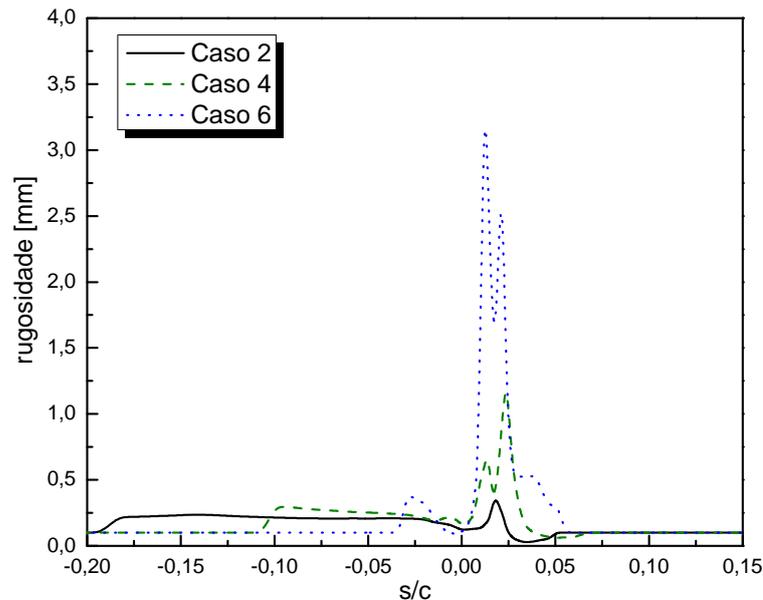
boa concordância do perfil de gelo nessa região para o perfil obtido no presente trabalho. Nota-se ainda na Figura 6.33, que existe um fluxo massa de água de *runback* que não congela nas regiões próximas ao bordo de ataque, escoando assim para uma região à jusante e congelando onde o coeficiente de transferência de calor por convecção é mais elevado, contribuindo para a formação do “chifre” de gelo.



**Figura 6.33 – Vazões mássicas para o Caso 6.**

#### 6.4.4 Rugosidade

A Figura 6.34 apresenta a rugosidade do gelo para os casos 2, 4 e 6. A rugosidade para o gelo do tipo escarcha branca (Caso 2) é a menor de todos os casos. Este resultado concorda com esse tipo de formação de gelo, que tem como característica um gelo de superfície lisa. Para o gelo do tipo regelo (Caso 6), a rugosidade apresentou valores mais elevados, reproduzindo a característica de superfície rugosa para este tipo de formação, principalmente nas regiões onde se forma os “chifres” de gelo. Já para o gelo do tipo misto (Caso 4), a rugosidade possui valores intermediários, entre os outros dois casos.



**Figura 6.34 – Comparação da rugosidade do gelo entre os Casos 2, 4 e 6.**

#### 6.4.5 Comentários

Nos resultados apresentados, observou-se a importância de conhecer a rugosidade sobre a superfície do gelo, pois esse parâmetro influencia o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção, que, por sua vez, altera os balanços de massa e de energia e, conseqüentemente, a forma final do gelo.

Para o caso de formação de gelo do tipo escarcha branca, a rugosidade não influencia na forma do gelo, e, em ambos os códigos considerados, os resultados obtidos se aproximam bem dos resultados experimentais. Para o gelo do tipo misto, a inclusão do modelo de rugosidade foi essencial, pois permitiu prever a formação de gelo com grande concordância com o resultado experimental e sensivelmente melhor que o código AeroIcing. Para a formação de gelo em regime úmido, a inclusão do modelo de rugosidade permitiu uma melhor captura da forma de "chifre", mas em uma posição não de acordo com os resultados experimentais, entretanto prevendo muito bem a espessura e forma de gelo para grande extensão da superfície.

Essa falta de exatidão na predição da posição do chifre de gelo pode ser devida à forma como os nós do perfil limpo são movidos para representar a forma de gelo. No presente trabalho, como apresentado na Seção 5.5, esse acréscimo é dado na direção normal à superfície, enquanto que outros códigos apresentam diferentes métodos para modificar a geometria do perfil. No código Lewice, por exemplo, há três métodos para se realizar o acréscimo de gelo: normal à superfície, normal à direção do escoamento e normal à direção das trajetórias das partículas de água, sendo escolha do usuário como dado de entrada do problema. Outros trabalhos usam o método da bisetriz para fazer a adição de gelo. Assim, a aplicação de um destes métodos pode reproduzir melhor a posição do gelo para alguns casos em particular.



## **7 ESCORE DA FERRAMENTA**

### **7.1 Introdução**

Uma das tarefas mais difíceis na predição de formação de gelo é avaliar a qualidade dos códigos computacionais. Como esses códigos são utilizados na certificação de aeronaves, as respectivas agências de controle de diversos países criam metodologias para avaliar as ferramentas. Uma destas ferramentas foi projetada pela FAA (*Federal Aviation Administration*), dos Estados Unidos da América, e avalia quantitativamente o desempenho de códigos de formação de gelo. O método é descrito por Riley, McDowall e Flemming (2002), e é objeto deste capítulo.

Este método compara valores preditos de oito variáveis com valores experimentais para formas de gelo do tipo regelo com dois "chifres". O método também pode ser aplicado a formas de gelo com um "chifre", sem "chifres" e para gelos do tipo escarcha branca, modificando a forma de aplicação das oito variáveis.

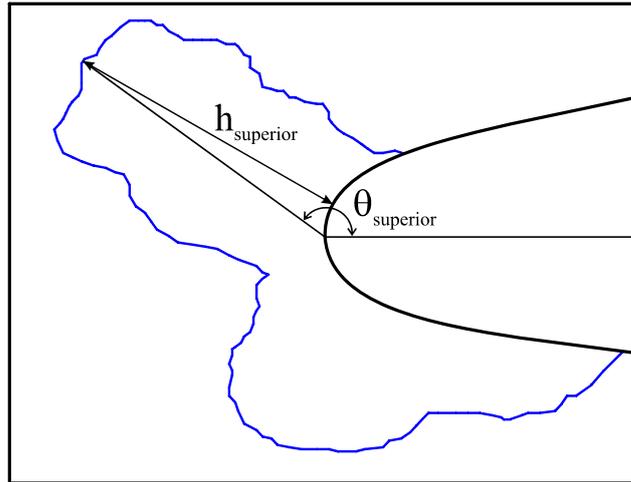
Por meio dessa metodologia, a partir de um dado conjunto de casos, um código de formação de gelo pode ser avaliado em seu desempenho global ou no desempenho de uma determinada variável. O método pode ser ainda utilizado para comparar o desempenho entre códigos existentes. O escore da ferramenta serve como uma boa forma de avaliação, comparando os resultados de um código com outros ou apenas verificando o desempenho isolado de um código em particular. Esta ferramenta de avaliação será utilizada como uma das formas de avaliar o desempenho do código proposto no presente trabalho.

### **7.2 Variáveis de validação**

As oito variáveis de validação, que serão descritas mais adiante, foram primeiro apresentadas por Wright e Rutjowski (1999) na validação do código LEWICE 2.0 e são empregadas pela FAA na metodologia do escore. Estas variáveis são listadas abaixo.

#### **7.2.1 Espessura do Chifre Superior (S1)**

A Espessura do Chifre Superior é definida como o comprimento do segmento de reta que liga o pico do chifre superior ao ponto mais próximo do aerofólio. A Figura 7.1 mostra graficamente a definição da variável S1.



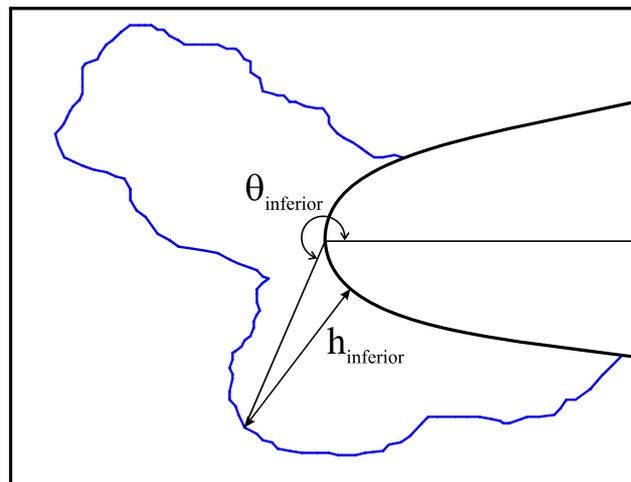
**Figura 7.1 – Espessura do Chifre Superior e Ângulo do Chifre Superior.**

### 7.2.2 Ângulo do chifre superior (S2)

O Ângulo do Chifre Superior é o ângulo formado entre o segmento de reta que liga o pico do chifre superior ao bordo de ataque e a linha horizontal (perfil com ângulo de ataque zero) que passa pelo bordo de ataque, como representado na Figura 7.1.

### 7.2.3 Espessura do Chifre Inferior (S3)

A Espessura do Chifre Inferior é definida da mesma forma que a variável S1, sendo agora o comprimento do segmento de reta que liga o pico do chifre inferior ao ponto mais próximo do aerofólio, como pode ser observado na Figura 7.2.



**Figura 7.2 – Espessura do Chifre Inferior e Ângulo do Chifre Inferior.**

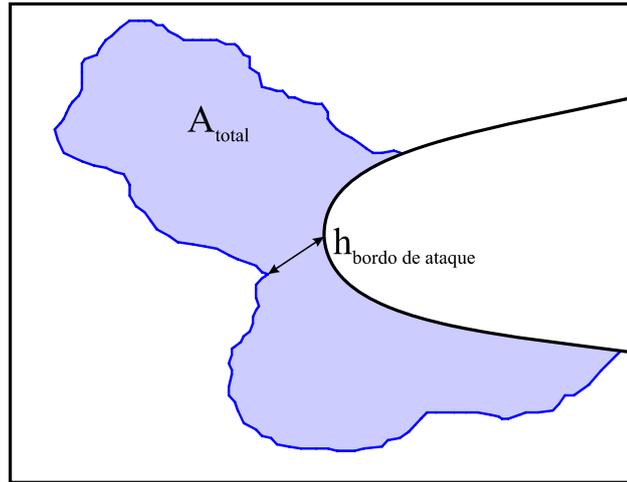
### 7.2.4 Ângulo do chifre inferior (S4)

O Ângulo do Chifre Inferior é definido como o ângulo formado entre o segmento de reta que liga o pico do chifre inferior ao bordo de ataque e a linha horizontal que passa pelo bordo de ataque. A variável S4 é mostrada na Figura 7.2.

### 7.2.5 Área do Gelo (S5)

A Área do Gelo, ilustrada na Figura 7.3, é definida como a integral de  $y$  em relação a  $x$  para a curva formada pelo contorno de gelo (varrendo todo o perfil) subtraída da mesma integral para o aerofólio limpo, dada por

$$A = \left( \int y dx \right)_{\text{gelo}} - \left( \int y dx \right)_{\text{limpo}} . \quad (7.1)$$



**Figura 7.3 – Área do Gelo e Espessura Mínima na Região do Bordo de Ataque.**

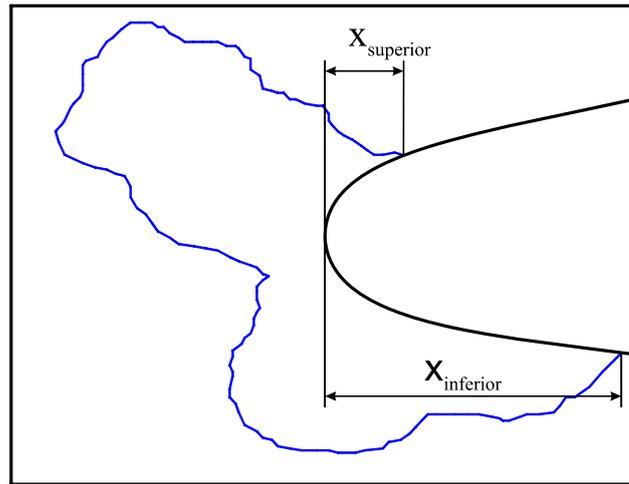
A Área do Gelo pode ser calculada sem dificuldades para qualquer formato de gelo, assim a variável S5 é definida para qualquer tipo de formação de gelo.

### 7.2.6 Espessura Mínima na Região do Bordo de Ataque (S6)

A Espessura Mínima na Região do Bordo de Ataque é a espessura mínima de gelo na região entre os "chifres" superior e inferior. Essa variável somente é aplicada na existência de dois "chifres" de gelo. A representação desse parâmetro é mostrada na Figura 7.3.

### 7.2.7 Limite Superior do Gelo (S7)

O Limite Superior do Gelo é a distância do bordo de ataque ao ponto na parte superior do aerofólio onde termina o gelo. Quando existirem formas não contínuas de gelo, a variável S7 é computada até o último acréscimo de gelo. Essa variável é medida com a coordenada  $x$ , sendo a origem ( $x=0$ ) no bordo de ataque. A variável S7 é representada na Figura 7.4.



**Figura 7.4 – Limite Superior do Gelo e Limite Inferior do Gelo.**

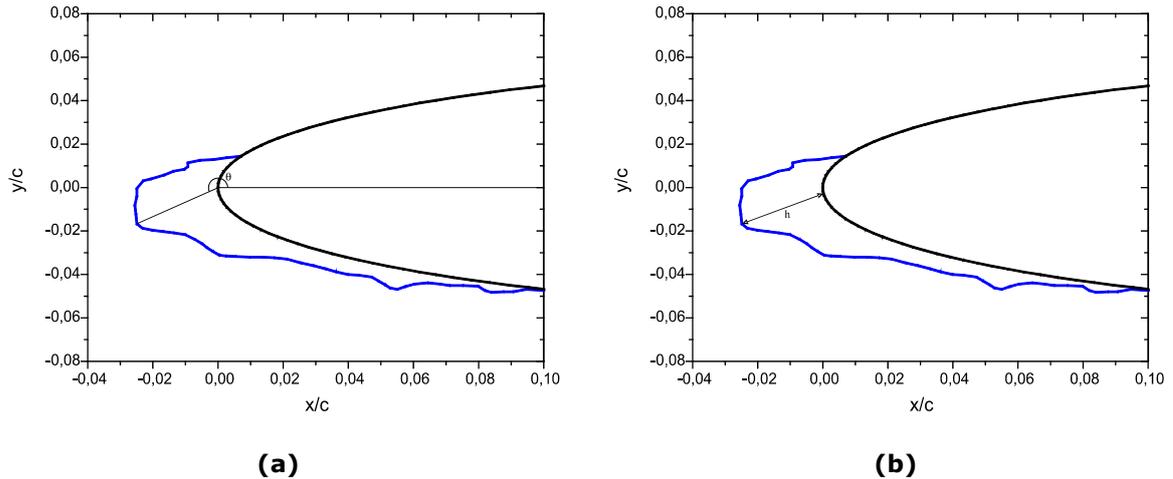
### 7.2.8 Limite Inferior do Gelo (S8)

O Limite Inferior do Gelo é medido da mesma forma que a variável S7, sendo agora avaliado para a parte inferior do aerofólio. A representação da variável S8 é ilustrada na Figura 7.4.

As oito variáveis apresentadas são bem caracterizadas para formações de gelo do tipo regelo com dois “chifres” de gelo. Assim, as oito variáveis são aplicadas somente na avaliação desse tipo de gelo. Porém, o método pode ser facilmente modificado para avaliar qualquer tipo de formação de gelo.

As variáveis S5 (Área do Gelo), S7 (Limite Superior do Gelo) e S8 (Limite Inferior do Gelo) podem ser obtidas para qualquer tipo de formação de gelo. Assim, quando houver uma formação de gelo do tipo regelo onde apenas um “chifre” pode ser caracterizado, a avaliação se reduz a cinco variáveis: S1, S2, S5, S7 e S8. Já para formações de gelo do tipo regelo, onde nenhum “chifre” de gelo é caracterizado, o método se resume a três variáveis: S5, S7 e S8.

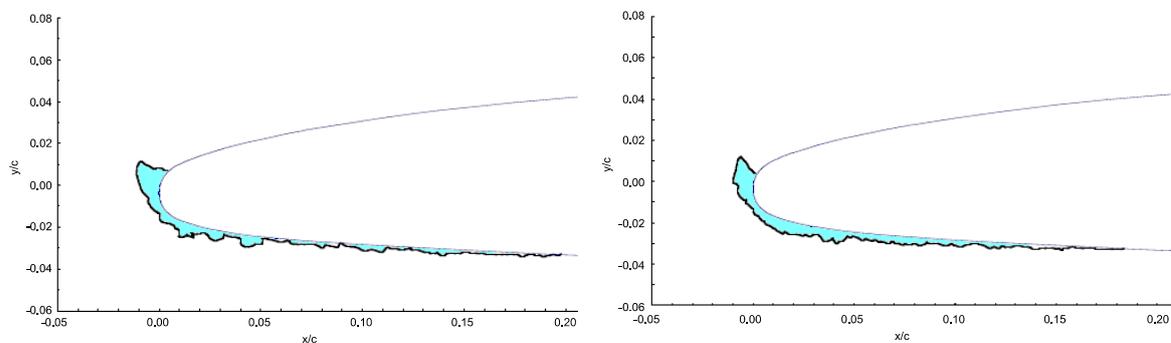
Para gelo do tipo escarcha branca, uma terceira modificação do método de escore é feita. As variáveis S1 e S2 são substituídas por variáveis S1\* e S2\* e as variáveis S3, S4 e S6 são descartadas, restando, assim, apenas cinco variáveis para avaliação, como é feita para formas de gelo do tipo regelo com apenas um “chifre”. As variáveis S1\* e S2\* representam a Espessura Máxima do Gelo e o Ângulo da Espessura Máxima do Gelo, respectivamente. Essas novas variáveis são representadas na Figura 7.5.



**Figura 7.5 – Ângulo da Espessura Máxima do Gelo (a) e Espessura Máxima do Gelo (b).**

### 7.3 Repetibilidade experimental das variáveis

A avaliação do desempenho do código de formação de gelo é feita por meio da comparação das variáveis previstas pelo código com as previstas experimentalmente. Porém, sabe-se que quando um mesmo experimento é realizado “n” vezes, obtém-se geralmente resultados diferentes para cada ensaio. Na formação de gelo isso não é diferente, como pode ser observado na Figura 7.6, que ilustra duas formas de gelo obtidas experimentalmente no mesmo túnel de vento e com aproximadamente as mesmas condições de escoamento.



**Figura 7.6 – Variação na formação de gelo para dois ensaios experimentais com as mesmas condições de escoamento. Fonte: (ADDY, 2000).**

Em consequência da não repetibilidade experimental, tem-se uma variação experimental dos parâmetros do escore. Assim, o método de escore se fundamenta nessa variação. Considerando que uma das variáveis de escore, obtida numericamente, encontra-se dentro do desvio experimental, esse resultado numérico é considerado bom. Esta avaliação é explicada com mais detalhes mais adiante.

Um caso, denominado Caso 401, retirado do trabalho de Wright e Rutjkowski (1999) é usado para exemplificar a metodologia empregada. A Tabela 7.1 mostra as condições de formação de gelo para o Caso 401. Para este caso foram realizados quatro

grupos de ensaios em diferentes datas - Jan. 1998, Abril 1997, Jul. 1996 e Agosto 1991 - totalizando 11 ensaios. Os resultados obtidos desses ensaios são mostrados na Tabela 7.2.

**Tabela 7.1 – Condições de formação de gelo do Caso 401 – Perfil NACA 0012.**

Caso	Corda [m]	Velocidade [m/s]	$T_{\infty}$ [K]	AOA [°]	LWC [g/m <sup>3</sup> ]	MVD [μm]	Tempo [min]
401	0,5334	102,89	270,93	4	0,55	20	7

Além do valor de cada variável para cada ensaio, a Tabela 7.2 também apresenta a média aritmética e o desvio padrão de cada uma das variáveis. Além disso, o valor para  $2\sigma$  é apresentado para todas as variáveis sendo que, para as variáveis S1, S3, S5 e S6, o valor é normalizado pela média e, para S7 e S8, normalizado pela corda.

**Tabela 7.2 – Resultados do Caso 401.**

Data	S1 [mm]	S2 (°)	S3 [mm]	S4 (°)	S5 [mm <sup>2</sup> ]	S6 [mm]	S7 [mm]	S8 [mm]
Jan. 1998	18,54	153	11,48	301	21,72	5,28	3,35	91,54
Jan. 1998	18,47	150	9,88	264	16,74	4,27	3,51	90,47
Jan. 1998	9,47	116	12,27	306	18,47	3,89	3,05	51,94
Jan. 1998	18,47	150	9,88	223	16,74	4,27	3,51	90,47
Abril 1997	16,92	133	12,60	296	29,01	4,47	17,73	119,00
Abril 1997	17,63	135	11,66	309	35,20	4,85	16,54	112,60
Abril 1997	17,55	138	12,73	307	28,83	5,31	15,75	120,70
Jul. 1996	20,29	154	12,95	277	19,96	4,67	9,45	63,12
Jul. 1996	17,58	156	11,28	285	18,49	5,11	10,74	98,98
Ago. 1991	14,71	168	9,25	289	14,73	3,56	4,75	68,40
Ago. 1991	15,82	162	8,92	298	14,71	4,24	5,56	89,61
Média	16,87	146,7	11,18	286,8	21,34	4,55	8,53	90,63
Desvio padrão ( $\sigma$ )	2,87	14,9	1,45	25,3	6,76	0,56	5,82	22,38
$\sigma$ /média	0,169		0,131		0,316	0,124		
$\sigma$ /corda							0,011	0,042
$2\sigma$	33,9	30	26,1	51	63,3	24,9	2,2	8,4
	% da média	graus	% da média	graus	% da média	% da média	% da corda	% da corda

Observa-se, na Tabela 7.2, uma grande diferença entre os resultados de algumas variáveis, como, por exemplo, da variável S5, que apresenta um desvio padrão de 31,6% em relação à média.

Para se ter um método de escore bastante confiável é necessário assim uma estimativa da repetibilidade (ou variação) experimental. Para isso seria necessário um estudo exaustivo de casos experimentais, repetindo-se diversas vezes um conjunto de variadas condições de formação de gelo. Pouco se encontra na literatura aberta a respeito da repetibilidade experimental. O método aqui aplicado utilizará um conjunto de dados disponível na validação do código LEWICE (1999). As condições de formação de gelo às quais os perfis aerodinâmicos ficaram expostos são listadas, junto com as formas de gelo experimental, no Apêndice C.

Para o método de escore são necessários os resultados da repetibilidade dos experimentos. Assim, na Tabela 7.3 são mostrados os valores de  $2\sigma$  (duas vezes o desvio padrão normalizado) de cada variável para os casos listados no Apêndice C. Essa tabela apresenta um total de treze casos, sendo sete deles de gelos do tipo regelo (com dois “chifres” de gelo) e seis do tipo escarcha branca.

A Tabela 7.3, apresenta ainda uma média ponderada do desvio padrão de cada variável. Essa média é obtida considerando o desvio padrão de cada caso e o número de ensaios realizados. A Tabela 7.3 também é usada para obtenção dos parâmetros de comparação das variáveis de validação (valor de  $2\sigma$ ), por meio de uma média ponderada pelo número de ensaios de cada caso. O desvio padrão de cada caso foi obtido da mesma forma que foi obtido para o Caso 401.

**Tabela 7.3 – Estimativa dos valores de  $2\sigma$  dos dados experimentais.**

		<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>
Número do caso	Número de ensaios	[%]	[°]	[%]	[°]	[%]	[%]	[%]	[%]
401	11	34	30	26	51	63	25	2,2	8,4
402	8	24	21	44	28	42	49	2,8	9,7
415	5	12	10	39	13	89	16	1,7	15,9
427	4	10	22	13	9	32	57	1,6	6,6
403	9	25	15	32	9	50	20	2,0	7,4
421	11	37	31	38	32	45	98	1,8	7,6
423	10	17	19	50	44	78	38	0,9	11,4
404	7					43		2,7	10,9
405	6					37		3,3	9,4
425	7					28		10,9	20,0
1-20-run2	4					12		7,4	9,4
DC-2	2					28		10,9	20,0
DC-3	3					20		7,4	6,8
	Média ponderada	25,3	22	35,9	30	46,8	45,0	3,9	10,9

As médias ponderadas de cada variável, listadas acima, são os parâmetros utilizados na avaliação do escore da ferramenta. A avaliação de uma determinada variável é realizada calculando-se, primeiro, o erro entre os resultados numérico e experimental dessa variável. Verifica-se então em qual faixa do desvio padrão, segundo a Tabela 7.4, esse erro se encontra e uma nota (0, 1 ou 2) é dada para a variável em questão. Sendo zero a melhor nota e dois, a pior.

**Tabela 7.4 – Definição dos parâmetros de escore.**

Intervalo do erro	Escore	Número da Variável							
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Menor que $2\sigma$	<b>0</b>	25,0	22	36,0	30	47,0	45,0	4,0	11,0
Entre $2\sigma$ e $3\sigma$	<b>1</b>	37,5	33	54,0	45	70,5	67,5	6,0	16,5
Maior que $3\sigma$	<b>2</b>								
Peso		4	4	2	2	2	2	3	1

De acordo com a Tabela 7.2, nos 11 ensaios realizados para o caso 401 foi obtido um valor médio de 16,87 milímetros para S1 com um desvio padrão de 2,87 milímetros. O desvio padrão corresponde, portanto, a aproximadamente 17% do valor médio de S1. Obviamente, dois desvios padrão ( $2\sigma$ ), correspondem a 34% (33,9% para ser mais preciso) do valor médio. Esse valor, 34%, foi transposto para a Tabela 7.3. Da mesma forma que consta na Tabela 7.3 esse valor para o Caso 401, constam na tabela mais seis valores de  $2\sigma$ , para os outros seis casos onde há a formação de gelo do tipo regelo e a variável S1 pôde ser medida. A média (ponderada pelo número de ensaios) desses sete valores de  $2\sigma$  para S1 foi calculada resultando em 25,3% como pode ser visto na própria Tabela 7.3.

Na Tabela 7.4, na intersecção da coluna "S1" com a linha "Menor que  $2\sigma$ ", aparece o valor 25. Isso significa que o valor de duas vezes o desvio padrão experimental para S1 é igual a 25% (arredondando) do valor médio de S1. Conseqüentemente,  $3\sigma$  corresponde a 37,5%. Da mesma forma esses desvios são calculados para cada uma das variáveis, conforme pode ser conferido na Tabela 7.4.

Um valor numérico obtido dentro do intervalo  $2\sigma$  é tido como um bom resultado e a ele é atribuído o escore zero. Caso o resultado numérico esteja dentro do intervalo  $[2\sigma, 3\sigma]$  a nota é um e caso esteja fora do intervalo de  $3\sigma$  a nota é dois, conforme indicado na segunda coluna da Tabela 7.4. Assim, uma nota pequena significa que o código reproduz bem o resultado experimental.

A Tabela 7.4 apresenta ainda pesos para cada uma das oito variáveis (última linha da tabela). Esses pesos são usados quando o escore de cada variável é combinado para obtenção do escore final de um caso em particular, que é calculado por meio da expressão

$$\text{Nota do caso} = \frac{\sum_{i=1}^8 (P_i \cdot N_i)}{\sum_{i=1}^8 (N_i)}, \quad (7.2)$$

onde  $P_i$  é o peso e  $N_i$  a nota da variável  $i$ .

Os pesos dados às variáveis representam a maior importância de algumas variáveis em relação às outras na avaliação do código. Por exemplo, as variáveis S1 e S2 possuem, para neste caso, os maiores pesos. Esses maiores pesos das variáveis S1 e S2 são atribuídos, pois considera-se que essas variáveis possuem grande influência no desempenho aerodinâmico do perfil. Esses pesos podem ser alterados conforme a necessidade da aplicação, obtendo-se assim um escore diferente.

Na próxima seção, a forma de calcular o escore da ferramenta é explicada passo a passo.

## 7.4 Escore

Comumente um código computacional é validado comparando-se resultados numéricos com resultados experimentais. Espera-se que o código seja capaz de reproduzir ao menos algumas das características da forma de gelo experimental. Assim o método de escore apresentado neste trabalho também serve para verificar quais características são mais bem reproduzidas por um determinado código. A seguir é descrito o método de avaliação das variáveis seguido de um exemplo. O exemplo será um caso usado no cálculo do escore do código do presente trabalho, denominado caso C15.

Inicialmente todas as variáveis são adimensionalizadas em relação à corda, com exceção das variáveis S2 e S4, Ângulo do Chifre Superior e Ângulo do Chifre Inferior, respectivamente. A Tabela 7.5 exemplifica essa adimensionalização, onde a corda é igual a 0,5334 metros.

**Tabela 7.5 – Adimensionalização das variáveis obtidas para o Caso C15.**

	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>
	[m]	[ ° ]	[m]	[ ° ]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m]	[m]
Variável Dimensional	0,027	217	0,03	272	0,002	0,020	0,001	0,145
Parâmetro de adimensionalização	corda		corda		corda <sup>2</sup>	corda	corda	corda
Variável Adimensionalizada	0,045	217	0,043	272	0,004	0,034	0,001	0,242

Após a adimensionalização, calcula-se o erro do resultado numérico em relação ao experimental. Para as variáveis S1, S3, S5 e S6, esse erro é calculado por meio de

$$\text{Erro} = 100\% * (\text{Valor Numérico} - \text{Valor Experimental}) / \text{Valor Experimental}, \quad (7.3)$$

enquanto que, para as variáveis S2 e S4, por

$$\text{Erro} = \text{Valor Numérico} - \text{Valor Experimental}, \quad (7.4)$$

e para as variáveis S7 e S8, por

$$\text{Erro} = 100\% * (\text{Valor Numérico} - \text{Valor Experimental}) / \text{Corda}. \quad (7.5)$$

A Tabela 7.6 mostra os valores adimensionalizados das oito variáveis para o caso C15, obtidos experimentalmente e com o código do presente trabalho, além do erro calculado com as Eqs. (7.3), (7.4) e (7.5).

**Tabela 7.6 – Cálculo do erro do código do presente trabalho para o caso C15.**

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Experimental	6,62e-2	176	7,02e-2	251	4,60e-3	4,73e-2	3,76e-3	3,11e-2
Presente trabalho	4,46e-2	217	4,26e-2	272	4,26e-3	3,38e-2	8,93e-4	2,42e-1
Erro	-33%	41	-39%	21	-7%	-29%	0%	21%

Na Tabela 7.6, o valor 6,62e-02, obtido experimentalmente para a variável S1 e adimensionalizado pelo valor da corda do aerofólio, é um valor obtido de apenas um ensaio experimental. Como se tem apenas um ensaio experimental, o valor dessa variável, obtido neste único ensaio, é usado como referência. Se diversos ensaios forem realizados, como o é para o exemplo o Caso 401 (Tabela 7.2), o valor de referência será a média dessa variável.

Os erros calculados na Tabela 7.6 são então comparados com os desvios dos resultados experimentais, conforme descrito na seção anterior e mostrados na Tabela 7.4.

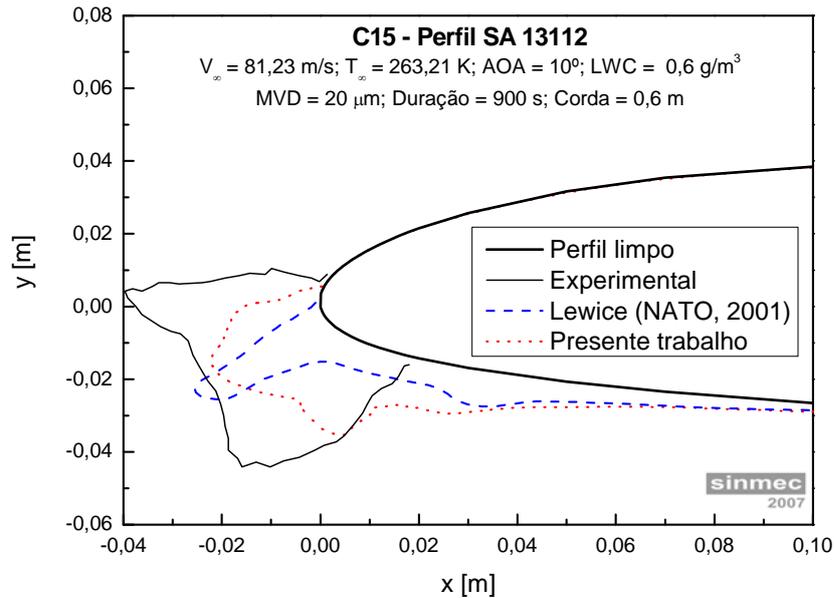
Na Tabela 7.7 é mostrada a nota que cada variável, obtida pelo código do presente trabalho, recebeu na simulação do caso C15. Nota-se que as variáveis S4, S5, S6 e S7 estão dentro do intervalo de  $\pm 2\sigma$ , sendo assim bem reproduzidas pelo código computacional. A forma de gelo obtida pode ser observada na Figura 7.7.

**Tabela 7.7 – Nota de cada variável do caso C15 e escore do caso.**

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Escore do caso
Presente trabalho	1	2	1	0	0	0	0	2	0,80

Por fim, com a nota de cada variável é possível calcular o escore final do caso com a Eq. (7.2).

Existem dois tipos de escores de uma ferramenta de formação de gelo, são eles: o Escore de Precisão e o Escore Conservativo. Estes escores serão descritos a seguir.



**Figura 7.7 - Perfis de gelo experimental e previsto pelo código do presente trabalho para o caso C15.**

#### 7.4.1 Escore de Precisão

O Escore de Precisão avalia o quanto um código reproduz com precisão as variáveis. No escore de precisão cada variável recebe nota zero, um ou dois, conforme a Tabela 7.4.

Como o código computacional nem sempre reproduz características observadas experimentalmente, alguns cuidados no cálculo do escore devem ser tomados. Se o código não predisser um "chifre" superior observado experimentalmente, uma nota dois deve ser atribuída às variáveis S1 e S2. Da mesma forma, se o código falhar em reproduzir um "chifre" inferior observado experimentalmente, as variáveis S3 e S4 recebem nota dois. E no caso de falha na predição de ambos os "chifres", a nota dois também é atribuída à variável S6. Caso um "chifre" seja previsto no código, mas não experimentalmente, nota dois também é atribuída para as variáveis referentes.

Além do Escore de Precisão, que envolve todas as variáveis e casos, dois outros escores mais restritos podem ser calculados: o Escore da Variável e o Escore do Caso.

O Escore do Caso é calculado conforme descrito acima, mas envolvendo resultados de um único caso. Esse escore nos permite examinar se um código é mais preciso na reprodução de formas de gelo em certas condições de escoamento do que em outras.

Já o Escore da Variável é a média do escore dessa variável em todos os casos e permite avaliar quão bem uma variável é reproduzida pelo código para um dado conjunto de casos.

### 7.4.2 Escore Conservativo

O Escore Conservativo avalia o quão conservativo é o código, não o penalizando caso o erro seja para o lado conservativo (no sentido da segurança do projeto). A Tabela 7.8 indica a direção em que a variável é considerada conservativa no escore do código. É importante salientar que o resultado do escore conservativo nunca é pior do que o escore de precisão.

**Tabela 7.8 – Definição da direção conservativa de cada variável.**

Identificação da variável	Nome da variável	Erro é conservativo caso o código reproduza um(a):
S1	Espessura do chifre Superior	Espessura maior de gelo no chifre
S2	Ângulo do Chifre Superior	Ângulo menor
S3	Espessura do Chifre Inferior	Espessura maior de gelo no chifre
S4	Ângulo do Chifre Inferior	Ângulo maior
S5	Área de Gelo	Área maior
S6	Espessura Mínima na Região do Bordo de Ataque	Espessura menor
S7	Limite de Gelo Superior	Limite maior
S8	Limite de Gelo Inferior	Limite maior

No Escore Conservativo valores de zero, um e dois são atribuídos para cada variável conforme a Tabela 7.4. Porém, nota zero é dada a uma variável caso o valor reproduzido pelo código esteja na direção conservativa, conforme a Tabela 7.8. Como no caso do Escore de Precisão, no Escore Conservativo um Escore de Caso e um Escore de Variável podem ser calculados, podendo-se assim observar quais tipos de gelo ou quais variáveis são mais bem reproduzidos quando o Escore Conservativo é usado.

Como no Escore de Precisão, se o código falhar na predição de um “chifre” superior observado experimentalmente, uma nota dois deve ser atribuída às variáveis S1 e S2. No caso de falha na reprodução de um “chifre” inferior, as variáveis S3 e S4 recebem nota dois e no caso de falha na predição de ambos os “chifres”, a variável S6 também recebe nota dois.

Já para o caso de um “chifre” superior ser previsto no código, mas não experimentalmente, as variáveis S1 e S2 receberão nota zero. Nota zero também é atribuída às variáveis S3 e S4, quando um “chifre” inferior é previsto pelo código e não

experimentalmente. No caso de dois “chifres” serem previstos pelo código e nenhum experimentalmente, a variável S6 também recebe zero.

## 7.5 Resultado do escore da ferramenta

Antes de apresentar os resultados do escore da ferramenta de formação de gelo obtidos no presente trabalho é importante salientar que o escore não é único, pois este depende de vários fatores. Além do critério de comparação de cada variável e o peso atribuído a cada variável, a solução do escoamento externo e o número de atualizações do escoamento externo também influenciam no cálculo do escore, conforme já mostrado nas seções anteriores. Devido a esses fatores é importante padronizar a maneira de obtenção da forma de gelo dos casos considerados, a fim de se obter um escore coerente. Neste trabalho, para a aplicação da metodologia de escore, optou-se por usar o método dos painéis para a simulação do escoamento externo com atualizações do escoamento conforme comentado na Seção 6.3.1.

### 7.5.1 Matriz de casos

Para o cálculo do escore do código empregado no presente trabalho foi utilizada uma matriz de casos retirada de um relatório técnico da OTAN (NATO, 2001). Essa matriz de casos foi utilizada na avaliação da capacidade de alguns códigos computacionais de formação de gelo realizada neste mesmo relatório. A Tabela 7.9 apresenta as condições de escoamento de cada caso da avaliação. Os casos presentes nessa tabela foram selecionados focando a formação de gelo do tipo regelo e misto, os quais são mais difíceis de prever do que os do tipo escarcha branca.

**Tabela 7.9 – Matriz de casos de formação de gelo.**

<b>Caso</b>	<b>Perfil</b>	<b>Corda [m]</b>	<b><math>V_{\infty}</math> [m/s]</b>	<b><math>T_{\infty}</math> [K]</b>	<b>AOA [°]</b>	<b>LWC [g/m<sup>3</sup>]</b>	<b>MVD [μm]</b>	<b>Tempo [min]</b>
<b>C4</b>	NACA 0012	0,44958	77,11	270,48	0	0,32	18	5
<b>C5</b>	NACA 0012	0,44958	77,11	270,71	0	0,39	100	5
<b>C6</b>	GLC-305m	0,9144	69,81	257,43	0	1,16	50	4,31
<b>C7</b>	GLC-305m	0,9144	69,81	257,43	0	1,16	59	8,62
<b>C8</b>	NLF 0414	0,9144	92,45	257,59	0	0,33	20	5,4
<b>C9</b>	NLF 0414	0,9144	92,45	257,59	0	0,33	20	20,4
<b>C10</b>	NLF 0414	0,9144	66,98	262,76	4	0,44	20	22
<b>C13</b>	NACA 0012	0,5334	66,93	264,43	0	0,65	40	11,2
<b>C14</b>	NACA 0012	0,267	56,95	267,59	0	1,04	27,7	4,13
<b>C15</b>	SA 13112	0,6	81,23	263,21	10	0,60	20	15
<b>C16</b>	SA 13112	0,6	162,82	263,21	0	0,60	20	7,5
<b>C17</b>	NACA 0012	0,9144	66,93	265,98	3	1,00	24,8	20
<b>C18</b>	NACA 0012	0,9144	66,93	265,98	3	1,00	38,8	20

As formas de gelo previstas no presente trabalho são mostradas no Apêndice D, onde são comparadas com o gelo obtido experimentalmente e com o obtido pelo código Lewice. As seções seguintes apresentam o escore de precisão e o escore conservativo obtidos com o código deste trabalho, usando a metodologia descrita neste capítulo. Além de uma avaliação isolada, os escores do presente código também são comparados com os de outros códigos computacionais.

### 7.5.2 Escore de Precisão

A Tabela 7.10 apresenta o Escore de Precisão obtido com o código implementado no presente trabalho para cada caso descrito na seção anterior.

**Tabela 7.10 – Escore de precisão.**

<b>Caso</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>Escore do caso</b>
<b>C4</b>	2	2	2	2	1	0	0	0	1,30
<b>C5</b>	N/A <sup>8</sup>	N/A	N/A	N/A	N/A	0	2	1	1,17
<b>C6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
<b>C7</b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0,15
<b>C8</b>	0	0	N/A	N/A	0	N/A	0	0	0,00
<b>C9</b>	0	0	N/A	N/A	0	N/A	2	0	0,43
<b>C10</b>	0	2	N/A	N/A	0	N/A	0	2	0,71
<b>C13</b>	2	0	1	0	0	0	0	0	0,50
<b>C14</b>	0	2	0	0	0	0	1	0	0,55
<b>C15</b>	1	2	1	0	0	0	0	2	0,80
<b>C16</b>	2	1	1	2	1	0	0	0	1,00
<b>C17</b>	0	0	1	0	0	0	0	0	0,10
<b>C18</b>	0	2	0	0	0	2	0	0	0,60
<b>Escore da variável</b>	0,58	0,92	0,67	0,44	0,17	0,20	0,46	0,38	<b>0,56</b>

Na tabela acima o escore do caso foi calculado através da Eq. (7.2), atribuindo pesos a cada variável conforme a Tabela 7.4. O escore de cada variável foi obtido através de uma média aritmética e o escore da ferramenta foi obtido fazendo uma média aritmética das notas dos casos, escore que também pode ser obtido por meio da Eq. (7.2).

<sup>8</sup> Na Tabela 7.10, “N/A” representa que uma variável não foi observada experimentalmente nem pelo código em análise para um determinado caso. Assim, essa variável não entra no cálculo do escore.

Observa-se que os casos C4, C5 e C16 foram os casos que apresentaram pior desempenho no escore da ferramenta de formação de gelo do presente trabalho. Nos casos C4 e C5 o escoamento ocorre a temperaturas mais elevadas (270,48 K e 270,71 K, respectivamente) e a temperatura da superfície calculada pelo código é maior do que a real. Assim, uma menor quantidade de água congela no bordo de ataque, que escoar e congela em regiões mais à jusante, conforme pode ser observado nas figuras do Apêndice D. Já no caso C16, o escoamento ocorre a um número de Mach mais alto (0,50) quando comparado com os demais casos (por exemplo, o caso C8, onde se tem  $M=0,29$ ). Dessa forma, neste caso, efeitos de compressibilidade provocam mudanças no escoamento, o que não é previsto pelo método dos painéis. Uma alternativa para casos com número de Mach alto é o uso do aplicativo CFX na solução do escoamento externo, conforme comentado na Seção 6.3.3.

Quanto às variáveis que entram no procedimento de avaliação, nota-se a necessidade de uma melhor predição do Ângulo do Chifre Superior (variável S2), que apresentou o escore mais alto dentre as variáveis, ao contrário da Área do Gelo (S5), que foi a variável mais bem reproduzida. As variáveis S1 (Espessura do Chifre Superior) e S3 (Espessura do Chifre Inferior) também não são muito bem reproduzidas, apresentando escore maior que 0,50.

### 7.5.3 Escore conservativo

O Escore Conservativo é mostrado na Tabela 7.11. Nessa tabela as células sombreadas da última linha representam as variáveis que apresentaram melhoria no escore e as da última coluna os casos que apresentaram escore melhor do que o de precisão.

No Escore Conservativo observa-se uma melhora do escore em apenas 3 dos 13 casos e em 2 das 8 variáveis. O escore da ferramenta melhorou 20% comparado com o Escore de Precisão, indicando que o código, de certa forma, aponta para o lado conservativo, a favor da segurança.

**Tabela 7.11 – Escore conservativo.**

<b>Caso</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>Escore do caso</b>
<b>C4</b>	2	2	2	2	1	0	0	0	1,30
<b>C5</b>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	0	0	0,00
<b>C6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
<b>C7</b>	0	0	0	0	0	0	1	0	0,15
<b>C8</b>	0	0	N/A	N/A	0	N/A	0	0	0,00
<b>C9</b>	0	0	N/A	N/A	0	N/A	2	0	0,43
<b>C10</b>	0	2	N/A	N/A	0	N/A	0	2	0,71
<b>C13</b>	2	0	1	0	0	0	0	0	0,50
<b>C14</b>	0	2	0	0	0	0	0	0	0,40
<b>C15</b>	1	2	1	0	0	0	0	0	0,70
<b>C16</b>	2	1	1	2	1	0	0	0	1,00
<b>C17</b>	0	0	1	0	0	0	0	0	0,10
<b>C18</b>	0	2	0	0	0	2	0	0	0,60
<b>Escore da variável</b>	0,58	0,92	0,67	0,44	0,17	0,20	0,23	0,15	0,45

#### 7.5.4 Comparação com outros códigos

Na seção anterior o código do presente trabalho foi avaliado isoladamente e obteve um escore satisfatório (0,56), uma vez que o escore varia entre 0 e 2 e quanto mais próximo de zero, logicamente, melhor é.

De uma avaliação isolada de um código pode-se apenas concluir quais variáveis e quais condições de escoamento são mais bem reproduzidas em relação às outras. Assim, por meio da comparação do escore com outros códigos pode-se concluir qual código é melhor de forma global ou qual código se comporta melhor para determinados casos e variáveis.

Para a comparação do escore das ferramentas de formação de gelo foram utilizados alguns dos códigos que participaram da avaliação da capacidade dos códigos de formação de gelo realizada pela OTAN (NATO, 2001). A Tabela 7.12 apresenta os códigos usados nessa comparação de escore.

A Tabela 7.13 apresenta o Escore de Precisão dos códigos apresentados na Tabela 7.12 e do presente trabalho. As células sombreadas nessa tabela destacam quais códigos obtiveram o melhor Escore de Precisão em cada variável e na última coluna a célula pintada indica qual código obteve o melhor escore global. O Escore de Precisão do código do presente trabalho é destacado em negrito nesta mesma tabela.

**Tabela 7.12 – Códigos usados na comparação do escore.**

<b>Participante</b>	<b>Afiliação</b>	<b>Código usado</b>
D. Guffond <sup>9</sup>	ONERA	ONERA 2000
D. Duprat <sup>10</sup>	Airbus	ONERA 2000
R. Gent <sup>9</sup>	DERA	TRAJICE 2
W. Wright <sup>9</sup>	NASA	LEWICE 2.0
I. Paraschivoiu <sup>9</sup>	École Polytechnique de Mtl.	CANICE 3.0-beta

Quando comparado com os demais códigos, o do presente trabalho apresenta um escore global muito bom, sendo o código com o segundo melhor escore, atrás apenas do TRAJICE.

Em relação ao escore das variáveis o código do presente trabalho foi o código que melhor reproduziu as variáveis S5 (Área do Gelo), S6 (Espessura Mínima na Região do Bordo de Ataque) e S7 (Limite Superior do Gelo).

**Tabela 7.13 – Escore de Precisão das ferramentas de formação de gelo.**

<b>Código</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>Escore do código</b>
<b>ONERA (Guffond)</b>	0,58	0,92	0,67	0,67	0,38	0,78	0,85	0,38	0,70
<b>ONERA (Duprat)</b>	0,83	0,92	0,67	0,67	0,23	0,67	0,69	0,46	0,70
<b>TRAJICE</b>	0,50	0,67	0,56	0,22	0,17	0,22	0,58	0,25	0,45
<b>LEWICE</b>	0,46	0,77	0,80	0,80	0,54	0,60	0,69	0,23	0,64
<b>CANICE</b>	0,75	0,83	0,89	0,89	0,50	0,67	0,92	0,42	0,77
<b>Presente trabalho</b>	0,58	0,92	0,67	0,44	0,17	0,20	0,46	0,38	<b>0,56</b>

Na Tabela 7.14 é mostrado o Escore Conservativo dos códigos de formação de gelo apresentados na Tabela 7.12. Como anteriormente, as células pintadas nessa tabela destacam quais códigos obtiveram o melhor Escore Conservativo em cada variável e na última coluna qual código obteve o melhor escore global. O Escore Conservativo do código do presente trabalho também é destacado em negrito nessa tabela.

Novamente o código TRAJICE apresentou o melhor escore dentre os códigos avaliados. O código do presente trabalho apresenta agora o terceiro melhor escore e, comparando com os demais códigos, foi o código que apresentou a menor melhora ao

<sup>9</sup> Desenvolvedor

<sup>10</sup> Usuário

passar do Escore de Precisão ao Escore Conservativo, deixando inclusive, de ter os melhores escores das variáveis S5, S6 e S7.

**Tabela 7.14 – Escore Conservativo das ferramentas de formação de gelo.**

<b>Código</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>Escore do código</b>
<b>ONERA (Guffond)</b>	0,42	0,83	0,67	0,44	0,31	0,56	0,46	0,08	0,52
<b>ONERA (Duprat)</b>	0,58	0,92	0,67	0,44	0,23	0,56	0,00	0,00	0,49
<b>TRAJICE</b>	0,33	0,50	0,44	0,00	0,08	0,00	0,33	0,17	0,28
<b>LEWICE</b>	0,46	0,54	0,80	0,20	0,54	0,20	0,38	0,08	0,44
<b>CANICE</b>	0,75	0,83	0,67	0,22	0,25	0,00	0,42	0,08	0,50
<b>Presente trabalho</b>	0,58	0,92	0,67	0,44	0,17	0,20	0,23	0,15	<b>0,49</b>

### 7.5.5 Comentários

A aplicação do método de escore demonstrou que o código implementado no presente trabalho apresenta resultados bastante satisfatórios. Quando comparado com os códigos existentes, os resultados são ainda melhores, pois comparando com códigos com mais de 10 anos de desenvolvimento, o código do presente trabalho apresentou um escore de precisão ao nível destes.

Fica evidente que o código pode ser melhorado, principalmente quando se leva em conta a predição das posições e espessuras dos “chifres” de gelo. Esta falta de precisão na predição dos “chifres” já foi comentada na Seção 6.4.5 e entra como uma sugestão para trabalhos futuros dada no capítulo final.

# 8 CONCLUSÃO

## 8.1 Conclusões e comentários

O presente trabalho dá continuidade a uma linha de pesquisa na área de simulação numérica de formação de gelo em perfis aerodinâmicos existente no Sinmec desde 2000. Várias contribuições foram dadas nos diversos trabalhos realizados, e esta dissertação também avança o conhecimento e colabora com este assunto bastante atual na literatura mundial e recente no Brasil. Trata-se também de contribuir com um importante problema tecnológico da indústria aeronáutica.

A principal contribuição do presente trabalho foi propor um modelo para calcular a rugosidade sobre a superfície do gelo, visto a importância do conhecimento da rugosidade nas formações de gelo em regime misto e úmido. Além desse modelo de rugosidade, pequenas alterações nos balanços de massa e de energia, considerando a possível formação de gotas sobre a superfície, foram realizadas. Os resultados empregando os modelos propostos comprovaram a sensibilidade do problema de formação de gelo quanto ao coeficiente de transferência de calor por convecção, que é um parâmetro chave na melhoria dos resultados para formação de gelo em regime misto e úmido. Esses resultados se apresentaram, de forma geral, iguais ou melhores do que os resultados do AeroIcing, o qual não considera os aspectos da formação de gotas sobre a superfície e a rugosidade do gelo, demonstrando a importância de se conhecer a rugosidade.

Os bons resultados obtidos com a formulação proposta se refletiram durante a aplicação de um método de avaliação quantitativa do código desenvolvido, denominado Score da Ferramenta. Tal metodologia foi aplicada a um conjunto de casos onde a formação de gelo ocorre em regimes misto e úmido, situações onde o bom desempenho dos códigos é mais difícil. Verificou-se o desempenho do código isoladamente e ainda seu resultado foi comparado com os de alguns códigos já existentes. Desta avaliação pôde-se concluir que os modelos propostos conseguiram reproduzir bem a física do problema, além de terem sido corretamente implementados.

Quanto ao uso do pacote comercial ANSYS CFX, foram feitas algumas indicações em relação ao refino de malha e ao modelo de turbulência. Apesar do aplicativo CFX apresentar bons resultados no problema da predição da formação de gelo, muitas vezes seu uso não é prático, pois o tempo total (tempo de geração de malha + tempo de processamento) é maior quando comparado com o método dos painéis. Porém, em alguns casos, o uso do CFX se torna indispensável, como em casos de escoamentos a alto número de Mach e também em problemas tridimensionais.

## 8.2 Sugestões para trabalhos futuros

Ao longo da compilação dos resultados algumas dúvidas e idéias surgiram. Um exemplo é em relação à posição do chifre de gelo, apresentado na Seção 6.4.3, que requer uma melhor predição. Porém, devido ao prazo de encerramento deste trabalho, essas idéias não foram implementadas e servem como sugestões para futuros trabalhos. Além dessas idéias, outras são sugeridas e listadas abaixo:

1. Estudo de diferentes metodologias para fazer o acréscimo de gelo no perfil aerodinâmico, conforme comentado na Seção 6.4.5;
2. Extensão do modelo termodinâmico para três dimensões, e conseqüentemente, do modelo de rugosidade;
3. Usar o modelo de rugosidade para problemas com sistema anti-gelo em operação. As rotinas com os modelos do sistema anti-gelo do tipo ar quente propostas por Silveira (2006), foram implementadas, mas não testadas;
4. Para tornar o uso do CFX prático, uma solução seria a implementação do modelo termodinâmico como uma sub-rotina deste aplicativo;
5. Estudo detalhado do escoamento em uma gota sobre uma superfície para verificação do coeficiente de arrasto usado no presente trabalho ou obtenção de uma nova correlação;
6. Uma recomendação ambiciosa seria o desenvolvimento de um código para resolver o escoamento externo por meio das equações de Navier-Stokes 3D, utilizando também o Método de Volumes Finitos baseado em Elementos (EbFVM), provido de um método de solução de trajetórias para calcular a eficiência de coleta e, ainda, dotado de um algoritmo de movimentação de malha. Englobando, assim, todas as ferramentas necessárias para resolver o problema da formação de gelo.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDY Jr., Harold E. **Ice Accretion and Icing Effects for Modern Airfoils**. NASA/TP 2000 – 210031, April de 2000.

**AEROICING – Código computacional para predição de formação de gelo em perfis aerodinâmicos**. Sinmec (Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil.

AL-KHALIL, Kamel M. **Numerical Simulation of an Aircraft Anti-Icing System Incorporating a Rivulet Model for the Runback Water**. PhD Dissertation, University of Toledo, Toledo, Ohio, January de 1991.

AL-KHALIL, Kamel M.; KEITH, Theo G.; DE WITT, Kenneth J. **New concept in runback water modeling for anti-iced aircraft surfaces**. J. Aircraft, Vol. 30, No. 1, 1993, pp. 41-49.

AL-KHALIL, Kamel M.; KEITH, Theo G.; DE WITT, Kenneth J. **Development of an improved model for runback water on aircraft surfaces**. J. Aircraft, Vol. 31, No. 2, 1994, pp. 271-278.

Ansys Inc. **CFX 10 User´s Manual**. 2005.

Aviation Weather Center. **ADDS (Aviation Digital Data Service) - Icing**. Disponível em: <<http://adds.aviationweather.gov/icing/>>. Acesso em: 15 de julho de 2006.

BEAUGENDRE, Héloïse; MORENCY, François; HABASHI, Wagdi G. **Ice3D, Fensap-Ice's 3D In-Flight Ice Accretion Module**. AIAA Paper 2002-0385, 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2002.

BEJAN, Adrian. **Convection heat transfer**. 2nd ed. New York: J. Wiley, 1995. 623p.

BET, Luciano. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. Tese de Doutorado, 350 f. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 1999.

BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E.; LIGHTFOOT, Edwin N. **Transport Phenomena**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1960.

BOURGAULT, Yves; HABASHI, Wagdi G.; DOMPIERRE, Julien; BARUZZI, Guido S. **A Finite Element Method Study of Eulerian Droplets Impingement Models**. International Journal for Numerical Methods in Fluids, v. 29, pp. 429-449, 1999.

BOURGAULT, Yves; BOUTANIOS, Ziad; HABASHI, Wagdi G. **Three-Dimensional Eulerian Approach to Droplet Impingement Simulation Using Fensap-Ice, Part 1: Model, Algorithm, and Validation**. Journal of Aircraft, v. 37, n.1, 2000.

CHOW, Chuen-Yen. **An Introduction to Computational Fluid Mechanics**. New York, Wiley, 1980.

EL-GENK, Mohamed S.; SABER, Hamed H. **Minimum thickness of a flowing down liquid film on a vertical surface**. Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 44, 2001, pp. 2809-2825.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). **Federal Aviation Regulations.** Parts 25, 27, 29. Airworthiness Standards: Transportation Category Airplanes, Normal Category Rotorcraft, and Transport Category Rotorcraft, Appendix C. Washington, DC: Dep. Transp. Fed. Aviat. Admin. 1914.

FORTIN, Guy; LAFORTE, Jean-Louis; ILINCA, Adrian. **Heat and mass transfer during ice accretion on aircraft wings with an improved roughness model.** International Journal of Thermal Sciences, setembro de 2005.

FORTIN, Guy; ILINCA, Adrian; LAFORTE, Jean-Louis; BRANDI, Vincenzo. **A New roughness computation method and geometric accretion model for airfoil icing.** J. Aircraft, vol. 41, no. 1, pg. 119–127, 2004.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 504 p.

GENT, R. W. **TRAJICE2 – A Combined Water Droplet Trajectory and Ice Accretion Prediction Program for Aerofoils.** Farnborough, RAE (Royal Aerospace Establishment) Technical Report, TR 90054, 1990.

GENT, R. W.; DART, N. P.; CANSDALE, J. T. **Aircraft Icing.** Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, v.358, pp. 2873-2911, 2000.

GROCE, G.; BEAUGENDRE, Héloïse; HABASHI, Wadgi G. **CHT3D: Fensap-Ice Conjugate Heat Transfer Computations with Droplet Impingement and Runback Effects.** AIAA Paper 2002-0386, 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2002.

HANSMAN Jr., R. John; TURNOCK, Stephen R. **Investigation of surface water behavior during glaze ice accretion.** Journal of Aircraft, 0021-8669, vol.26, no.2, pg. 140-147, 1989.

HANSMAN Jr., R. John ; YAMAGUCHI, Keiko; BERKOWITZ, Brian; POTAPCZUK, Mark. **Modeling of surface roughness effects on glaze ice accretion.** Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 0887-8722, vol.5, no.1, pg. 54-60, 1991.

HEDDE, T.; GUFFOND, Didier. **ONERA Three-Dimensional Icing Model.** AIAA Journal, v. 33, n. 6, pp. 1038-1045, 1995.

HEINRICH, A.; ROSS, Richard; ZUMWALT, Glen; PROVORSE, John; PADMANABHAN, Viswa. **Aircraft Icing Handbook.** Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation (FAA Technical Center Report, DOT/FAA/CT-88/8-2), Atlantic City, USA, 1991.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 4 ed., LTC, Rio de Janeiro, RJ, 1998.

LIDE, David R. **CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data: 1995-1996.** 76th ed. Boca Raton: CRC Press, c1995. 1v. (várias paginações) ISBN 0849304768 : (enc.).

LOUCHEZ, P., FORTIN, Guy; MINGIONE, G.; BRANDI, Vincenzo. **Beads and rivulets modeling in ice accretion on a wing.** 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, January 12–15, Reno, Nevada, AIAA-98-0489, 1998.

MALISKA, Clovis R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** 2ª ed., Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2004.

MALISKA, Clovis R.; SILVEIRA, Rafael A.; MENDES, Rafael; ESTIVAM, Diego. **Relatórios Técnicos – Projeto Código de CFD EMBRAER, Fase I, Pacote A13 – Balanço de massa e energia para formação de gelo.** *Deliverables* 01 a 12, Florianópolis, SC, 2002/2003.

MALISKA, Clovis R.; SILVA, A. Fábio C.; BRIDI, Gerson; DONATTI, Carlos. N.; SILVEIRA, Rafael A.; CONTESSI, Bruno; KLEINE, Eduardo. **Relatórios Técnicos – Projeto Código de CFD EMBRAER, Fase II, Pacote A9 – Módulo gelo.** *Deliverables* 01 a 06, Florianópolis, SC, 2004/2006.

MALISKA, Clovis R.; SILVA, A. Fábio C.; SILVEIRA, Rafael A.; DONATTI, Carlos N.; BRIDI, Gerson. **Ice Accretion Prediction on Aerodynamic Bodies.** IACC – International Aerospace CFD Conference, Paris, 18-19 de Junho de 2007.

MESSINGER, Bernard L. **Equilibrium Temperature of an Unheated Icing Surface as a Function of Air Speed.** *Journal of the Aeronautical Sciences*, pp. 29-42, January 1953.

MIKIELEWICZ, J.; MOSZYNSKI, J. R. **Minimum thickness of a liquid film flowing vertically down a solid surface.** *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, 1976, pp. 771-776.

MORENCY, François; TEZOK, Fatih; PARASCHIVOIU, Ion. **Anti-Icing Simulation Using CANICE.** *Journal of Aircraft*, v. 36, n. 6, 1999.

NATIONAL TRANSPORTATION SAFETY BOARD. **Aviation Accident Report: In-flight icing encounter and uncontrolled collision with terrain, Comair Flight 3272, Embraer EMB-120T, N265CA.** Monroe, Michigan. NTSB Accident No. DCA97MA017. Janeiro 1997.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. **NASA Image Exchange.** Disponível em: <<http://nix.nasa.gov/>>. Acesso em: 29 de janeiro de 2007.

NATO – North Atlantic Treaty Organization. **Ice Accretion Simulation Evaluation Test.** RTO Technical Report 38, 2001.

OLSEN, W.; WALKER, E. **Experimental Evidence for Modifying the Current Physical Model for Ice Accretion on Aircraft Surfaces.** NASA CR 87184, 47 pp., 1986.

POTAPCZUK, Mark G. **Ice Shape Comparison Criteria.** Apresentado no SAE Ice Shape Comparison Workshop, Seattle, 1999.

REID, Robert C.; PRAUSNITZ, John M.; BOLING, Bruce E. **The Properties of Gases & Liquids.** New York: Mc Graw Hill Inc., ed. 4, 1987.

RILEY, James T.; MCDOWALL, Rosemarie; FLEMMING, Robert J. **A Quantitative Method for Assessing Agreement Between Experimental and Calculated Ice Shapes.** AIAA Paper 2002-0384, 40th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2002.

SCHLICHTING, Hermann. **Boundary-layer theory.** 6<sup>o</sup> ed., New York: McGraw-Hill; Karlsruhe: G. Braun, c1968. 747p.

SHIN, Jaiwon. **Characteristics of surface roughness associated with leading edge ice accretion.** AIAA Paper 1994-799, 32<sup>nd</sup>, AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, 1994.

SHIN Jaiwon; BOND Thomas H. **Results of an Icing Test on a NACA 0012 Airfoil in the NASA Lewis Icing Research Tunnel.** American Institute of Aeronautics

and Astronautics, 30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, AIAA-92-0647, pp. 19, 1992.

SHYY, Wei; UDAYKUMAR, H. S.; RAO, Madhukar M.; SMITH, Richard W. **Computational Fluid Dynamics with Moving Boundaries**. Taylor & Francis, EUA, 1996;

SILVA, Guilherme A. L. **Modelagem e Simulação da Operação de Sistema Anti-gelo Eletrotérmico de um Aerofólio**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2002.

SILVA, Guilherme A. L.; SILVARES, Otávio M.; ZERBINI, Euryale J. G. J. **Airfoil Anti-ice System Modeling and Simulation**. AIAA Paper 2003-0734, 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, 2003.

SILVA, Guilherme A. L.; SILVARES, Otávio M.; ZERBINI, Euryale J. G. J. **Water Film Breakdown and Rivulets Formation Effects on Thermal Anti-ice Operation Simulation**. AIAA Paper 2006-3785, 9<sup>th</sup> AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, San Francisco, California, 2006.

SILVEIRA, Rafael A. **Simulação Numérica da Formação de Gelo na Borda de Ataque de Perfis Aerodinâmicos**. Dissertação de Mestrado, 155 f. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2001.

SILVEIRA, Rafael A. **Previsão Tridimensional da Formação de Gelo em Perfis Aerodinâmicos**. Tese de Doutorado, 129 f. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2006.

SILVEIRA, Rafael A.; MALISKA, Clovis R. **Influência das Condições Ambientais na Formação de Gelo na Borda de Ataque de um Aerofólio**. Anais do XVI COBEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia – MG, 2001.

SILVEIRA, Rafael A.; ESTIVAM, Diego; MENDES, Rafael; MALISKA, Clovis R. **Evaluation of Collection Efficiency Methods for Icing Analysis**. Anais do XVII COBEM – International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo – SP, 2003.

SILVEIRA Neto, Aristeu. **Turbulência nos Fluidos Aplicada**. Apostila do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC - UFU. Uberlândia-MG, Brasil, 2001.

SIMÕES, Jefferson C. **Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos**. Pesquisa Antártica Brasileira, 2004. Disponível em: <<ftp://ftp.cnpq.br/pub/doc/proantar/pab-12.pdf>>.

SPALDING, D. B. **Convective Mass Transfer, an Introduction**. McGraw-Hill, New York, 1963.

TSAO, J. C.; ROTHMAYER, A. P. **A Mechanism for Ice Roughness Formation on an Airfoil Leading Edge, Contributing to Glaze Ice Accretion**. AIAA Paper 98-0485, 36rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno. NV, January 1998.

WHITE, Frank M. **Viscous Fluid Flow**. New York: Mc Graw Hill, Inc., ed 2, 1991.

WRIGHT, William B. **Users Manual for the Improved NASA Lewis Ice Accretion Code Lewice 1.6**. NASA CR – 198355, May 1995a.

WRIGHT, William B. **Capabilities of LEWICE 1.6 and Comparison with Experimental Data**. Presented at the SAE/AHS International Icing Symposium, Sept. 1995b.

---

WRIGHT, William B. **Users Manual for the NASA Glenn Ice Accretion Code LEWICE, version 2.2.** NASA CR 2002 / 211793, August 2002.

WRIGHT, William B. **User's Manual for the NASA Glenn Ice Accretion Code Lewice Version 3.0.** Available on Lewice 3.0 release CD, 2003.

WRIGHT, William B.; RUTJOWSKI, Adam. **Validation Results for LEWICE 2.0.** NASA CR 1999 / 208690, January, 1999.

WRIGHT, William B.; GENT, R. W.; GUFFOND, Didier. **DRA/NASA/ONERA Collaboration on Icing Research Part II – Prediction of Airfoil Ice Accretion.** NASA CR - 202349, May 1997.

# APÊNDICE A

## PROPRIEDADES FÍSICAS E TERMODINÂMICAS

Neste apêndice são apresentadas as formas de calcular as propriedades físicas e termodinâmicas necessárias no modelo proposto.

### A.1 Ar

#### A.1.1 Viscosidade dinâmica

A viscosidade dinâmica do ar é calculada em função apenas da temperatura por meio da relação de Sutherland (REID, 1987), escrita como

$$\frac{\mu_{ar}}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T_0 + S}{T + S}\right), \quad (\text{A.1})$$

onde

$$\mu_0 = 1,716 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s};$$

$$T_0 = 273,15 \text{ K};$$

$$S = 110,56 \text{ K}.$$

#### A.1.2 Condutividade térmica

Da mesma forma feita para a viscosidade dinâmica do ar, a condutividade térmica do ar também é calculada por uma relação de Sutherland (REID, 1987), dada por

$$\frac{k_{ar}}{k_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{T_0 + S}{T + S}\right), \quad (\text{A.2})$$

onde

$$k_0 = 0,0241 \text{ W/m} \cdot \text{K};$$

$$T_0 = 273,15 \text{ K};$$

$$S = 194,44 \text{ K}.$$

#### A.1.3 Densidade

A densidade do ar é calculada pela equação de estado dos gases ideais, expressa por

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right], \quad (\text{A.3})$$

onde  $R$  é a constante universal dos gases ideais para o ar, igual a  $287,98 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \text{ K})$ .

#### A.1.4 Calor específico a pressão constante

Uma vez que a variação do calor específico do ar a pressão constante com a temperatura pode ser desprezada, assume-se que este parâmetro é constante e igual a  $1000 \text{ J/kgK}$ .

## A.2 Água

#### A.2.1 Viscosidade dinâmica

A viscosidade dinâmica da água pode ser expressa em função da temperatura pela seguinte expressão (REID, 1987)

$$\mu_{\text{água}} = 1 \cdot 10^{-7} \cdot \exp\left(A + \frac{B}{T} + C \cdot T + D \cdot T^2\right) \left[\text{Pa} \cdot \text{s}\right], \quad (\text{A.4})$$

onde

$$A = -2,241 \cdot 10 ;$$

$$B = 4,209 \cdot 10^3 \text{ K};$$

$$C = 4,527 \cdot 10^{-2} \text{ 1/K};$$

$$D = -3,376 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}^2.$$

#### A.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica da água é calculada por um polinômio de segundo grau (REID, 1987), dado por

$$k_{\text{água}} = A + B \cdot T + C \cdot T^2 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right], \quad (\text{A.5})$$

onde

$$A = -3,838 \cdot 10^{-1} \text{ W/(m K)};$$

$$B = 5,254 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m K}^2\text{)};$$

$$C = -6,369 \cdot 10^{-6} \text{ W/(m K}^3\text{)}.$$

### A.2.3 Densidade

Assumindo que a água é incompressível, sua densidade é considerada constante e igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

### A.2.4 Calor específico a pressão constante

Como para o ar, o calor específico da água a pressão constante também apresenta pequenas variações com a temperatura, assumindo-se, assim, um valor constante e igual a  $4217 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ .

### A.2.5 Tensão superficial

Para o cálculo da tensão superficial da água, um polinômio de quinto grau foi ajustado aos dados obtidos por Reid (1987), este polinômio é escrito como

$$\sigma_{\text{água}} = A \cdot T^5 + B \cdot T^4 + C \cdot T^3 + D \cdot T^2 + E \cdot T + F \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}} \right]. \quad (\text{A.6})$$

onde os coeficientes do polinômio são:

$$A = 1,777 \times 10^{-13} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{K}^5);$$

$$B = -3,353 \times 10^{-10} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{K}^4);$$

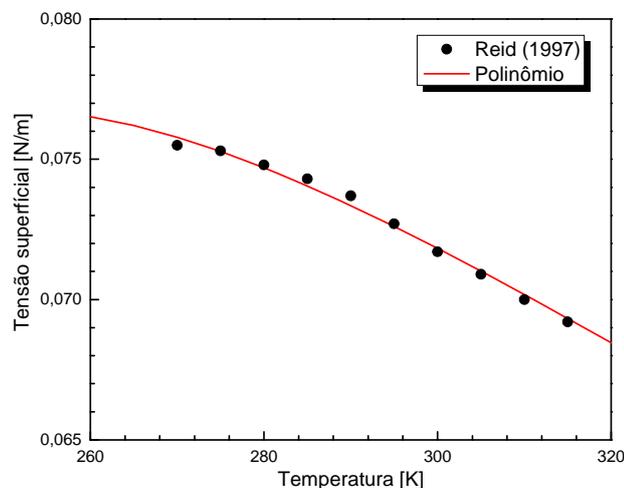
$$C = 2,511 \times 10^{-7} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{K}^3);$$

$$D = -9,349 \times 10^{-5} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{K}^2);$$

$$E = 1,715 \times 10^{-2} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{K});$$

$$F = -1,156 \text{ N}/\text{m}.$$

A Figura A.1 mostra os valores obtidos de (REID, 1987) e a curva obtida por meio da Eq. (A.6).



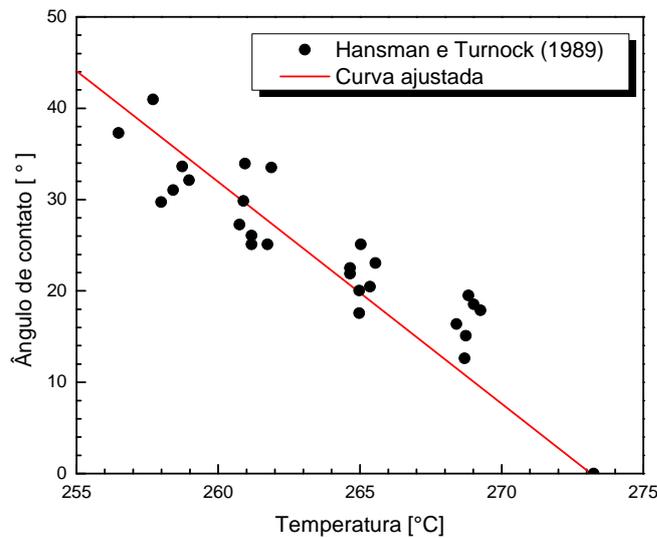
**Figura A.1 – Polinômio ajustado para a tensão superficial.**

### A.2.6 Ângulo de contato

Hansman e Turnock (1989), por meio de experimentos, realizaram medições do ângulo de contato entre a água e o gelo em função da temperatura. Usando os resultados experimentais obtidos nesse trabalho, uma curva foi ajustada para o cálculo do ângulo de contato, dada por

$$\theta_c = -2,4291 \cdot T + 664,3588 \quad [^\circ]. \quad (\text{A.7})$$

A Figura A.2 mostra os pontos experimentais juntamente com a curva ajustada para o ângulo de contato entre a água e o gelo.



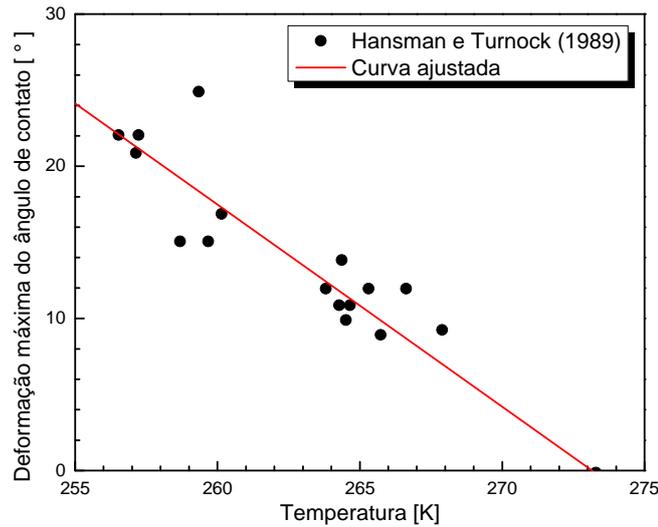
**Figura A.2 – Curva ajustada para o ângulo de contato.**

### A.2.7 Deformação máxima do ângulo de contato

Da mesma forma que o ângulo de contato, a deformação máxima do ângulo de contato entre água e gelo também é calculada por uma curva ajustada a partir de dados experimentais (HANSMAN; TURNOCK, 1989). A expressão para calcular a deformação máxima do ângulo de contato é dada por

$$\Delta\theta_c = -1,3292 \cdot T + 363,0819 \quad [^\circ]. \quad (\text{A.8})$$

A Figura A.3 compara os valores experimentais com a curva ajustada.



**Figura A.3 – Curva ajustada para a deformação máxima do ângulo de contato.**

### A.2.8 Calor latente de vaporização

O calor latente de vaporização da água é calculado por meio de uma expressão apresentada por Bejan (1997) e dada por

$$\frac{h_{lv}}{h_{lv,c}} = A \cdot (1 - T_r)^{1/3} + B \cdot (1 - T_r)^{0,79} + C \cdot (1 - T_r)^{1,208} + D \cdot (1 - T_r) + E \cdot (1 - T_r)^2 + F \cdot (1 - T_r)^6, \quad (\text{A.9})$$

onde  $h_{lv,c} = 2501 \text{ J/kg}$ ,  $T_r$  é a temperatura reduzida da água e os coeficientes do polinômio são:

$$A = 0,722;$$

$$B = 5,334;$$

$$C = 8,974;$$

$$D = -11,931;$$

$$E = -3,312;$$

$$F = 1,633.$$

### A.2.9 Calor latente de solidificação

O calor latente de solidificação da água também é calculado apenas em função da temperatura (REID, 1987), como

$$h_{ls} = 2,09 \cdot T - 237,80 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]. \quad (\text{A.10})$$

## A.3 Gelo

### A.3.1 Calor específico a pressão constante

Baseado em dados obtidos por Reid (1987), considera-se que o calor específico do gelo a pressão constante varia linearmente com a temperatura, sendo calculado por

$$c_{p,\text{gelo}} = 7,9268 \cdot T - 47,79 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]. \quad (\text{A.11})$$

### A.3.2 Condutividade térmica

Da mesma forma que para o calor específico a pressão constante, a variação da condutividade térmica do gelo também é considerada linear em relação à temperatura, sendo dada por

$$k_{\text{gelo}} = -0,0075 \cdot T - 0,1686 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]. \quad (\text{A.12})$$

### A.3.3 Densidade

O cálculo da densidade do gelo é uma questão ainda bastante discutida. Devido aos diferentes regimes de formação de gelo, a densidade do gelo varia significativamente. Observou-se que, em formações de gelo do tipo escarcha branca, uma grande quantidade de ar fica aprisionado entre as gotículas de água congelada e a densidade do gelo nesse tipo de formação é menor do que nos outros tipos de gelo. Enquanto que, para tipos de gelo regelo, tem-se um gelo mais compactado, assim mais denso. Para considerar essas variações, vários estudos foram realizados e algumas correlações empíricas foram propostas.

Uma correlação empírica, proposta por Jones (1988), foi obtida por meio de experimentos realizados em um cilindro. Essa correlação é expressa em função do diâmetro do cilindro, do diâmetro da gotícula, da velocidade de corrente livre, do conteúdo de água líquida e da temperatura da superfície, sendo expressa como

$$\rho_{\text{gelo}} = 1000 \cdot e^{0,15 \cdot \left( 1 + \frac{6043}{S^{2,65}} \right)} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right], \quad (\text{A.13})$$

onde

$$S = \frac{MVD^{0,82} \cdot U_{\infty}^{0,59} \cdot LWC^{0,21}}{d_{\text{cilindro}} \cdot (273,15 - T_s)^{0,23}}. \quad (\text{A.14})$$

Em um perfil o termo  $d_{\text{cilindro}}$  é substituído pelo diâmetro do círculo inscrito no bordo de ataque do perfil.

Laforte (1992) realizou experimentos semelhantes com um cilindro e propôs uma correlação independente do diâmetro do cilindro, sendo essa correlação empírica dada por

$$\rho_{\text{gelo}} = 917 \cdot \left[ \frac{MVD \cdot U_{\infty}}{MVD \cdot U_{\infty} + 2,6 \cdot (T_f - T_s)} \right]^2 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]. \quad (\text{A.15})$$

Essa correlação é válida para  $T_s < T_f$ .

O código Lewice usa uma terceira correlação empírica, baseada apenas na fração de congelamento, sendo a densidade do gelo calculada por

$$\rho_{\text{gelo}} = 820 \cdot f_c + 917 \cdot (1 - f_c) \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]. \quad (\text{A.16})$$

Essa é a expressão usada no presente trabalho para calcular a densidade do gelo.

## A.4 Coeficiente de difusividade mássica

O coeficiente de difusão de massa entre dois meios pode ser expresso em função da temperatura e pressão (WHITE, 1991), como

$$D_{AB} = \frac{0,001858 \cdot T^{3/2} \cdot \left( \frac{M_A + M_B}{M_A \cdot M_B} \right)^{1/2}}{P \cdot \sigma_{AB}^2 \cdot \Omega_D}, \quad (\text{A.17})$$

onde

$M$  - peso molecular da espécie [g/mol];

$P$  - pressão local [atm];

$\sigma_{AB}$  - diâmetro efetivo de colisão entre as espécies A e B [Å].

Os demais termos da Eq. (A.17) são expressos por:

$$\sigma_{AB} = 0,5 \cdot (\sigma_A + \sigma_B), \quad (\text{A.18})$$

$$\Omega_D = T_*^{-0,145} + (T_* + 0,5)^{-2}, \quad (\text{A.19})$$

$$T_* = \frac{T}{T_{\varepsilon AB}}, \quad (\text{A.20})$$

$$T_{\varepsilon AB} = (T_{\varepsilon A} T_{\varepsilon B})^{1/2}; \quad (\text{A.21})$$

onde para o ar tem-se

$$\sigma_A = 3,711 \text{ \AA}, \quad (\text{A.22})$$

$$T_{\varepsilon A} = 78,6 \text{ K} , \quad (\text{A.23})$$

$$M_A = 29 \text{ g / mol} ; \quad (\text{A.24})$$

e para a água

$$\sigma_B = 2,641 \text{ \AA} , \quad (\text{A.25})$$

$$T_{\varepsilon B} = 809,1 \text{ K} , \quad (\text{A.26})$$

$$M_B = 18 \text{ g / mol} . \quad (\text{A.27})$$

# APÊNDICE B

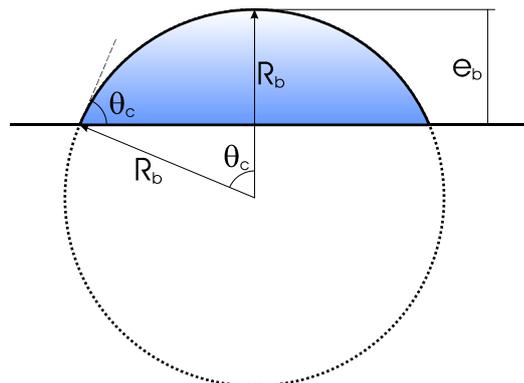
## PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DA CONFIGURAÇÃO DA ÁGUA SOBRE A SUPERFÍCIE

Neste apêndice são deduzidos alguns parâmetros geométricos necessários para os cálculos do balanço termodinâmico e do balanço de força.

### B.1 Gota

Considera-se que a gota formada sobre a superfície possui a forma de uma seção de esfera, conforme ilustrado na Figura B.1. Assim, definindo o ângulo de contato ( $\theta_c$ ) e o raio da gota ( $R_{\text{gota}}$ ), conforme está representado nesta mesma figura. A altura da gota ( $e_{\text{gota}}$ ) é dada por

$$e_{\text{gota}} = R_{\text{gota}} \cdot (1 - \cos \theta_c). \quad (\text{B.1})$$



**Figura B.1 – Esquema de uma gota sobre uma superfície de gelo com sua altura, raio e ângulo de contato.**

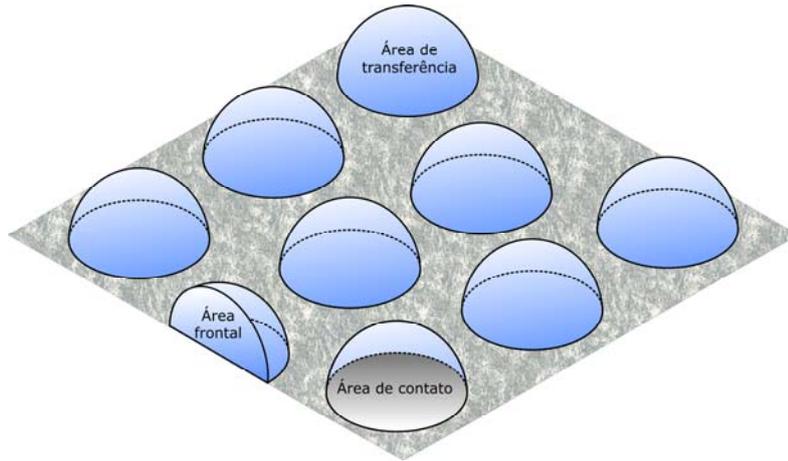
E, conseqüentemente, o diâmetro da gota é expresso por

$$d_{\text{gota}} = \frac{2 \cdot e_{\text{gota}}}{(1 - \cos \theta_c)}. \quad (\text{B.2})$$

O volume da gota é dado pelo volume de uma seção de esfera, assim

$$V_{\text{gota}} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{2 + \cos \theta_c}{1 - \cos \theta_c} \cdot e_{\text{gota}}^3. \quad (\text{B.3})$$

Algumas áreas da gota são necessárias no cálculo de alguns parâmetros. Por exemplo, a área frontal da gota, definida como a área normal ao escoamento, entra no cálculo da força de arrasto. As áreas em questão são ilustradas na Figura B.2.



**Figura B.2 – Representação das áreas de uma gota necessárias na formulação de formação de gelo.**

A área frontal da gota é dada por

$$A_{f,gota} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{\theta_c - \cos \theta_c \cdot \sin \theta_c}{(1 - \cos \theta_c)^2} \cdot e_{gota}^2 \quad (B.4)$$

A área de transferência da gota é calculada por

$$A_{t,gota} = 2\pi \cdot \frac{1}{1 - \cos \theta_c} \cdot e_{gota}^2 \quad (B.5)$$

A área de contato da gota é

$$A_{c,gota} = \pi \cdot \frac{1 + \cos \theta_c}{1 - \cos \theta_c} \cdot e_{gota}^2 \quad (B.6)$$

## B.2 Filetes

Como na gota, para os filetes também são definidas as mesmas áreas. Onde para a área de transferência tem-se

$$A_{t,filete} = 2 \cdot \frac{\theta_c}{(1 - \cos \theta_c)^2} \cdot \Delta s_{filete} \cdot e_{filete} \quad (B.7)$$

para a área de contato

$$A_{c,filete} = 2 \cdot \frac{\sin \theta_c}{(1 - \cos \theta_c)^2} \cdot \Delta s_{filete} \cdot e_{filete} \quad (B.8)$$

e para a área frontal

$$A_{f,filete} = \frac{\theta_c - \sin \theta_c \cdot \cos \theta_c}{1 - \cos \theta_c} \cdot e_{filete}^2 \quad (B.9)$$

## APÊNDICE C

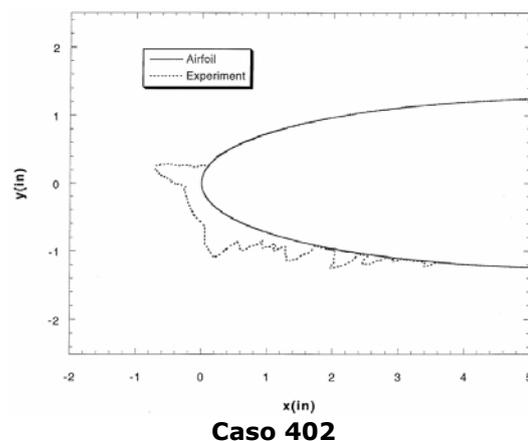
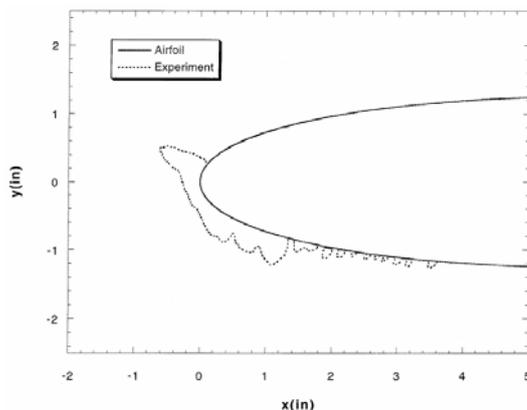
### CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO E FORMAS DE GELO DOS CASOS DA TABELA 6.3 DO ESCORE

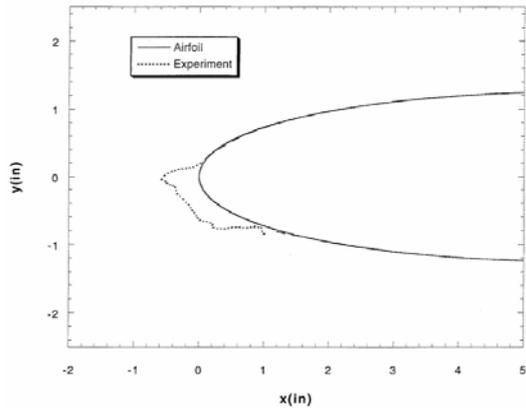
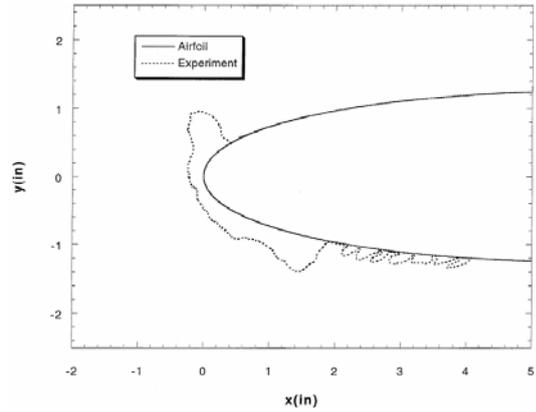
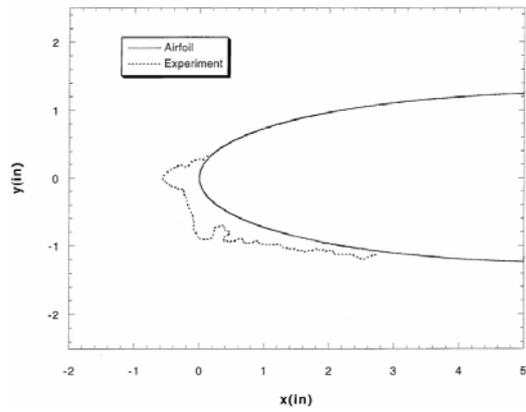
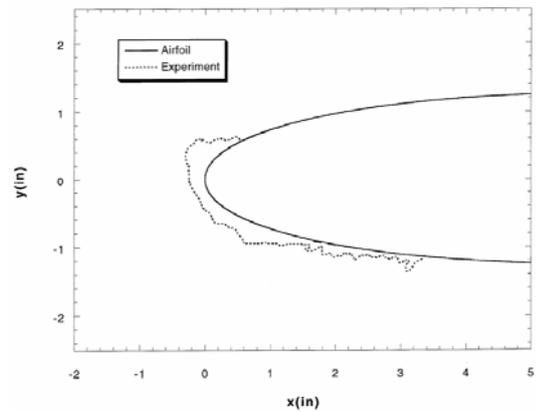
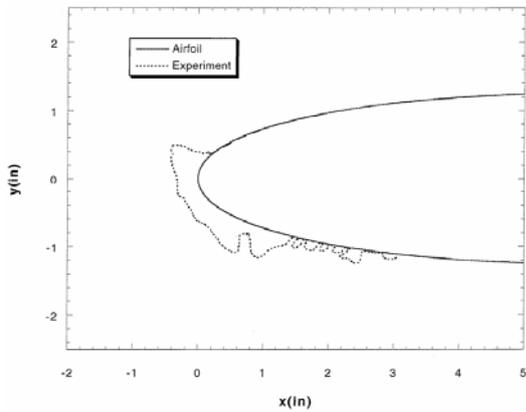
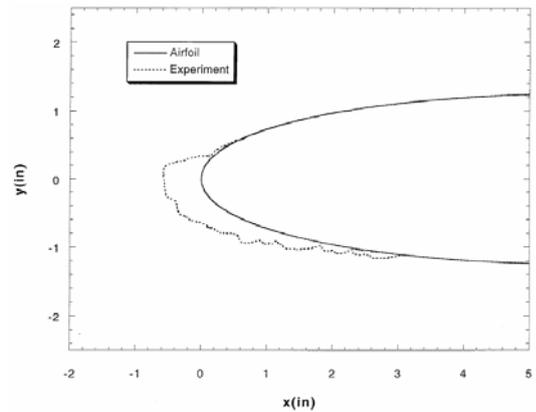
A Tabela C.1 apresenta as condições de escoamento dos casos usados para a montagem dos critérios do escore da ferramenta. Destes casos, os sete primeiros (401, 402, 415, 427, 403, 421 e 423) representam casos de formação de gelo do tipo regelo, enquanto que os demais casos (404, 405, 425, 1-20-run2, DC-2 e DC-3), casos do tipo escarcha branca.

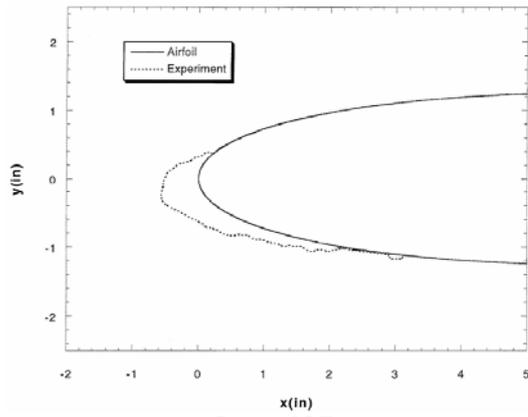
**Tabela C.1 – Condições de escoamento dos casos utilizados na montagem dos critérios do escore da ferramenta.**

Caso	Perfil	Corda [m]	$V_{\infty}$ [m/s]	$T_{\infty}$ [K]	AOA [°]	LWC [g/m <sup>3</sup> ]	MVD [µm]	Tempo [min]
401	NACA0012	0,5334	102,8	265,37	4	0,55	20	7
402	NACA0012	0,5334	102,8	263,71	4	0,55	20	7
415	NACA0012	0,5334	102,8	262,04	4	0,60	15	6,4
427	NACA0012	0,5334	67,1	265,07	4	1,30	30	6
403	NACA0012	0,5334	102,8	262,04	4	0,55	20	7
421	NACA0012	0,5334	67,1	268,40	4	1,00	20	6
423	NACA0012	0,5334	67,1	265,07	4	1,00	20	6
404	NACA0012	0,5334	102,8	256,49	4	0,55	20	7
405	NACA0012	0,5334	102,8	250,37	4	0,55	20	7
425	NACA0012	0,5334	67,1	244,51	4	1,00	20	6
1-20-run2	NACA23014m	1,7450	88,2	267,85	5	0,80	20	5
DC-2	NACA4415m	1,9812	87,2	266,85	0	0,82	160	7
DC-3	NACA4415m	1,9812	87,2	266,85	0	0,53	99	10,7

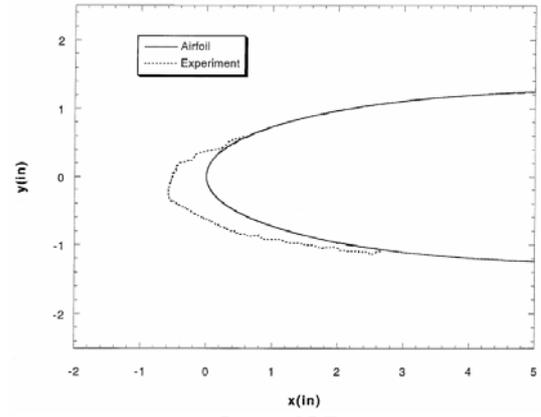
Na seqüência os perfis de gelo experimental para cada caso da tabela acima são ilustrados.



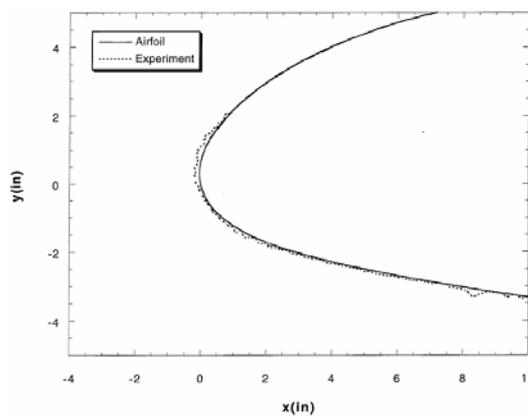
**Caso 415****Caso 427****Caso 403****Caso 421****Caso 423****Caso 404**



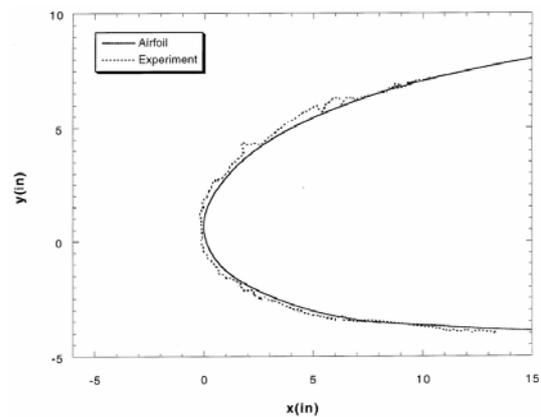
**Caso 405**



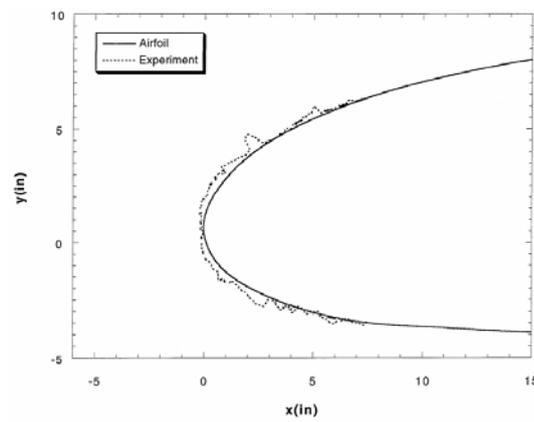
**Caso 425**



**Caso 1-20-r2**



**Caso DC-2**



**Caso DC-3**



# APÊNDICE D

## RESULTADOS DO ESCORE DA FERRAMENTA

Neste apêndice são agrupados os perfis de gelo obtidos com o código do presente trabalho para os casos usados no escore da ferramenta. Os resultados do presente trabalho são comparados com os resultados experimentais e, também, com os obtidos com o código Lewice (NATO, 2001).

