



**André Luiz Tenório Rezende**

**Análise Numérica da Bolha de Separação do escoamento  
Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientadora: Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro  
Setembro 2009



**André Luiz Tenório Rezende**

**Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento  
Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profa. Angela Ourivio Nieckele**

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Diniz Mesquita Abrunhosa**

Instituto Militar de Engenharia

**Prof. Marcelo José Colaço**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**Prof. Marcelo José Santos de Lemos**

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

**Prof. Luiz Eduardo Bittencourt Sampaio**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de setembro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**André Luiz Tenório Rezende**

Graduou-se em Engenharia Mecânica e de Armamento no Instituto Militar de Engenharia - IME, em 1996. Concluiu o Mestrado no IME em 2001, na área de Mecânica dos Sólidos estudando dinâmica de multicorpos rígidos aplicado à armamentos.

Ficha Catalográfica

Rezende, André Luiz Tenório

Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada / André Luiz Tenório Rezende ; orientador: Angela Ourivio Nieckele. – 2009.

263 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Bolha de separação. 3. Turbulência. 4. RANS. 5. LES. 6. Placa Plana Fina Inclinada. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

## **Agradecimentos**

A Deus Pai, que é sinônimo de amor, união, paz, fé, sabedoria, saúde e perseverança.

A minha esposa Luciana, que é um exemplo de amor, mãe, dedicação e inteligência. Obrigado por tanta felicidade, cumplicidade e carinho em todos estes anos. Obrigado por tudo!

Ao meu filho Rafael, que espera há três anos para jogar bola comigo, mas ainda com coração puro sempre diz: "Papai, eu te amo!".

Aos meus pais Valmir e Denise, que se dedicaram incondicionalmente a minha formação intelectual e moral. Não há palavras que possam resumir a influência deles na minha vida, eles são os verdadeiros vitoriosos.

A minha sogra Dona Cida, avó maravilhosa que teve papel fundamental desde o nascimento do xodó Rafael, fornecendo tranquilidade aos meus estudos e me tratando sempre como um verdadeiro filho.

Aos meus irmãos Maurício e Flávia, por todos os momentos felizes em família.

Aos meus avós, que sempre acreditaram nos meus estudos.

A minha orientadora Angela, pela amizade, suporte, ensinamento e fundamental orientação. Expresso minha admiração e orgulho por ter sido orientado por ela.

Ao Exército Brasileiro, "Braço Forte, Mão Amiga", que me acolheu como Oficial do Quadro de Engenheiros Militares e sempre acreditou no meu trabalho.

Ao meu atual chefe no IME, Tenente-Coronel Hamaoka, pela confiança e constante apoio, além de ser um verdadeiro amigo. A este militar dedico toda a minha lealdade.

Ao meu antigo chefe no CTEEx, Coronel Correia Lima, pelos ensinamentos do verdadeiro profissional militar, servindo como inspiração de conduta do Oficial Engenheiro Militar. Além disso, o Coronel Correia Lima é um grande amigo.

Ao meu compadre Capitão Vasconcellos, pelos 18 anos de amizade fraterna e que me presenteou com o meu lindo afilhado Luiz Henrique. Amizade boa é amizade de compadre!

Aos Oficiais do CTEEx, os amigos fraternos Majores Eifler e Luis, com quem tive a honra de trabalhar em diversas campanhas de testes de armamentos, tornando o Grupo de Armamento e Munições o mais consistente possível.

Aos Oficiais professores do IME, os grandes amigos Majores Vieira Carneiro, Ricardo e Audrin e os Capitães Egydio Carvalho, Ricardo, Aldélio, Quinderé e Marcos José que me apoiaram sempre e em todos os momentos na minha jornada final no doutorado.

A todos os professores da Engenharia Mecânica do IME, que me receberam muito bem. Especialmente agradeço aos professores Francesco, Guedes e Colaço, além do Coronel Diniz que motivou a minha vinda para o IME.

Ao meu amigo e presidente, Coronel Júlio, pela manutenção da união, amizade e brincadeiras entre os membros da confraria da Engenharia Mecânica do IME. Pelo diário café da manhã com os Oficiais e professores e pelos almoços das quartas-feiras. Obrigado pelo acolhimento, preocupação e apoio.

Ao casal de amigos Cláudia e Luís André, que sempre estiveram ao meu lado, da Lú e do Rafa.

Ao meu melhor amigo na PUC, o tricolor Fernando. Começamos juntos, estamos terminando juntos, mas a amizade sempre continuará.

Ao amigo LuizEBS, pelos ensinamentos e ajuda em todas as fases da minha tese.

A todos aqueles que de alguma forma ajudaram na conclusão da minha tese.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Dedico esta tese à minha amada esposa Luciana e ao precioso fruto deste amor  
o meu filho Rafael.

## Resumo

Rezende, André Luiz Tenório; Nieckele, Ângela Ourivio. **Análise Numérica da Bolha de Separação do escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada.** Rio de Janeiro, 2009. 263p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A estabilização de mísseis e projéteis é normalmente realizada através de aletas, que podem ser representadas por placas planas finas. O escoamento sobre placas finas é de difícil previsão por apresentar diversos fenômenos, tais como transição da camada cisalhante para regime turbulento, recolamento, relaminarização e geração de bolhas primárias e secundárias. A proposta deste trabalho é analisar o escoamento turbulento ao longo de uma placa plana com pequeno ângulo de incidência, e ao mesmo tempo investigar o desempenho de diferentes modelos para a previsão da turbulência, empregando duas metodologias. A primeira é baseada nas Equações de Média de Reynolds (RANS), a qual requer um menor esforço computacional, por considerar um domínio bi-dimensional e regime permanente. Neste caso, três níveis de modelagens foram selecionados, os quais envolvem a solução de uma, duas e cinco equações diferenciais parciais, correspondendo aos modelos de Spalart-Allmaras (SA),  $k-\omega$  *Shear Stress Tensor* (SST) e *Reynolds Stress Model* (RSM), respectivamente. No segundo enfoque, investigou-se o desempenho do modelo Smagorinsky Dinâmico, que é proveniente da metodologia da Simulação de Grandes Escalas (LES), a qual é tri-dimensional e transiente. Os resultados foram obtidos para número de Reynolds igual a  $2,13 \times 10^5$  e para três ângulos de incidência (um, três e cinco graus). A modelagem da turbulência foi validada através de comparação como dados numéricos e experimentais existentes na literatura. Os resultados obtidos mostraram que apesar do modelo RSM conseguir uma melhor previsão dos níveis de turbulência, o mesmo não é adequado para prever camadas cisalhantes livres. Já o modelo SA é muito difusivo, e não consegue prever adequadamente as tensões normais turbulentas, enquanto que o modelo SST foi capaz de prever razoavelmente bem a bolha de separação. Porém, apesar do custo bem superior, as previsões dos fenômenos provenientes da bolha de recirculação principal obtidas com a metodologia LES foram sensivelmente superiores e forneceram maior riqueza de informações que as apresentadas pelas soluções RANS.

## Palavras-chave

Bolha de Separação, Turbulência, RANS, LES, Placa Plana Fina Inclinada.

## Abstract

Rezende, André Luiz Tenório; Nieckele, Ângela Ourivio (Advisor). **Numerical Investigation of the Turbulent Flow Separation Bubble Over Inclined Thin Flat Plate**. Rio de Janeiro, 2009. 263p. DSc. Thesis - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Missiles and projectiles stabilization is usually accomplished through fins, which can be represented by thin flat plates. The flow field over thin plates is difficult to predict due to the existence of laminar-to-turbulent transition, boundary layer separation, leading edge bubble and reattachment. The purpose of this study is to analyze the flow over a thin flat plate, and at the same time, to investigate the performance of different models to predict turbulence, by employing two methodologies. The first one is based on the Reynolds Average Navier-Stokes Equations (RANS), which requires less computational effort, since it can be applied to a two-dimensional steady flow. In this case, three levels of modeling were employed, through the solution of one, two and five differential equations, corresponding to the Spalart-Allmaras (SA),  $\kappa-\omega$  *Shear Stress Tensor* (SST) and *Reynolds Stress Model* (RSM) models, respectively. The second approach corresponds to the Large Eddy Simulation (LES) methodology, and the performance of the Dynamic Smagorinsky model was investigated. Results were obtained for Reynolds number equal to  $2.13 \times 10^5$  and for three incidence angles (one, three and five degrees). The results were validated by comparing with available numerical and experimental data. It was shown that, in spite of predicting better turbulence levels, the RSM is not adequate to predict free shear layers. The SA model is too diffusive and it fails to predict the normal stresses, while the SST is capable of predicting the separation bubble with reasonable accuracy. However, in spite of the larger cost, the long separation bubble predictions obtained with the LES methodology were substantial superior and more complete than RANS solutions.

## Keywords

Separation Bubble, Turbulence, LES, RANS, Inclined Thin Flat Plate



## Nomenclatura

<i>DES</i>	Modelo Híbrido LES/RANS
<i>DNS</i>	Simulação Numérica Direta
<i>MVF</i>	Método dos Volumes Finitos
<i>LES</i>	Simulação de Grandes Escalas
<i>f-LES</i>	Modelo de forçamento sub-malha
<i>LDV</i>	Velocimetria a Laser com efeito Doppler
<i>SIMPLE</i>	Algoritmo de solução do acoplamento velocidade-pressão
<i>PISO</i>	Algoritmo de solução do acoplamento velocidade-pressão
<i>QUICK</i>	Esquema de discretização espacial de segunda ordem
<i>RANS</i>	Abordagem da turbulência, baseada em média de Reynolds
<i>URANS</i>	RANS transiente
<i>SGS</i>	Escala sub-malha
<i>UPWIND</i>	Esquema de discretização espacial de primeira ordem

## Lista de Símbolos

$=$	Operador filtro espacial
$\langle \ \rangle$	Filtro de teste do modelo Smagorinsky Dinâmico
$\  \ \ $	Operador média temporal
$a$	Coefficientes que relacionam o ponto P a seus vizinhos no Método de Volumes Finitos
$c$	Corda ou comprimento da placa plana
$C_P$	Coefficiente de pressão
$C_f$	Coefficiente de atrito
$C_{ij}$	Tensor dos termos cruzados do modelo LES
$C_s$	Constante de Smagorinsky
$c(\vec{x}, t)$	Coefficiente modelo Smagorinsky Dinâmico
$\bar{\Delta}$	Dimensão do filtro característico
$\delta_{ij}$	Tensor Delta de Kronecker
$f_{v1}$	Função de amortecimento viscoso do modelo Spalart-Allmaras
$\phi$	Variável que representa uma determinada propriedade
$\bar{\phi}$	Média espacial da variável do valor de $\ \phi\ $
$E$	Energia
$\varepsilon$	Taxa de dissipação
$g_i$	Aceleração da gravidade na direção $i$
$\bar{G}(\vec{x} - \vec{x}')$	Função filtro por volume
$G_v$	Produção da viscosidade turbulenta do modelo Spalart-Allmaras
$G(\vec{x}, \vec{x}', \bar{\Delta})$	Resposta impulsional do filtro

$i$	Coordenadas cartesianas $i = 1, 2$ ou $3$ (x, y, ou z)
$k$	Número de onda
$\kappa$	Energia cinética turbulenta
$\kappa_{sm}$	Energia cinética turbulenta sub-malha
$\kappa_{teste}$	Energia cinética resolvida associada às escalas entre o filtro teste e o filtro sub-malha
$k_v$	Constante de Von Karman
$K_0$	Constante de Kolmogorov
$L_c$	Comprimento característico
$L_{ij}$	Tensor de Leonard do modelo LES
$L_s$	Comprimento de mistura associado às escalas sub-malha
$\Omega_{ij}$	Tensor taxa de rotação média
$\eta$	Comprimento característico de Kolmogorov
$p$	Pressão
$\rho$	Densidade do fluido
$Q$	Segundo invariante do gradiente de velocidade
$Re$	Número de Reynolds
$Re_s$	Número de Reynolds baseado em $\delta_s^*$
$\delta_s^*$	Deslocamento da camada limite no ponto de separação
$R_{ij}$	Tensor de Reynolds sub-malha
<b>S</b>	Termo de fonte
$S(f)$	Espectro temporal de energia
$\bar{S}(x, t)$	Tensor taxa de deformação do campo de velocidades resolvido
$\sigma_{ij}$	Tensor viscoso
$\tau_{ij}$	tensor sub-filtro

$t$	Variável de tempo
$\Gamma$	Coeficiente de difusão
$u_i$	Componente da velocidade na direção $i$ (x, y, ou z)
$u_\tau$	Velocidade de atrito
$\bar{u}_i$	Componentes da velocidade média na direção $i$ . Modelos RANS
$u'_i$	Flutuação da velocidade na direção $i$
$\overline{\overline{u}_i}$	Componentes da velocidade filtrada na direção $i$ . Modelos LES
$u''_i$	Parcela da velocidade na escala sub-malha . Modelos LES
$U_\infty$	Magnitude da velocidade na corrente livre
$V_c$	Velocidade característica
$\nabla$	Volume de discretização do modelo de Smagorinsky
$\mu$	Viscosidade absoluta ou viscosidade dinâmica
$\mu_t$	Viscosidade absoluta turbulenta
$\mu_{ef}$	Viscosidade efetiva
$\tilde{\nu}$	Variável auxiliar do modelo Spalart-Allmaras
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\nu_t$	Viscosidade turbulenta
$\nu_{SM}$	Viscosidade turbulenta sub-malha
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas: x, a direção longitudinal à placa; y, a direção vertical à placa; z, a direção da envergadura da placa
$X_R$	Comprimento de recolamento da bolha primária
$X_S$	Comprimento de recolamento da bolha secundária
$y^+$	Distância adimensional para parede
$Y_\nu$	Destruição da viscosidade turbulenta do modelo Spalart-Allmaras

# Sumário

1	Introdução	26
1.1.	Objetivo e Escopo do Trabalho	31
1.2.	Organização do Trabalho	33
2	Revisão Bibliográfica	34
2.1.	Bolha de Separação Laminar (Bolha Curta)	34
2.2.	Bolha de Separação Longa	40
2.3.	Importância e Principais Abordagens Numéricas da Turbulência	44
2.3.1.	Aspectos Gerais dos Modelos de Turbulência	47
2.3.2.	Aplicação dos Modelos de Turbulência à Placa Plana em Estudo	49
3	Modelagem da Turbulência	51
3.1.	Equações de Governo	53
3.2.	Equações de Médias de Reynolds – RANS	54
3.2.1.	Hipótese de Boussinesq	56
3.2.2.	Equações de Transporte do Tensor de Reynolds - RSM	66
3.3.	Simulação de Grandes Escalas – LES	77
3.3.1.	Modelagem Sub-Malha no LES	80
4	Método Numérico	87
4.1.	Considerações sobre o Método de Volumes Finitos	88
4.2.	Discretização e Solução da Equação Geral de Transporte	89
4.2.1.	Discretização Espacial	91
4.2.2.	Discretização Temporal	97
4.3.	Discretização das Equações de Navier-Stokes	98
4.3.1.	Acoplamento Pressão-Velocidade	100
4.4.	Método para Solução do Sistema Algébrico	102
4.4.1.	Critério de Convergência	103
4.5.	Características do Algoritmo Utilizado na Solução do escoamento	103
5	Ângulo de Incidência de $\alpha = 1^\circ$	106
5.1.	Dados Experimentais	107

5.2. Domínio Computacional e Condições de Contorno	109
5.2.1. Condições de Contorno	110
5.3. Modelos RANS	111
5.3.1. Campo de Velocidade	112
5.3.2. Estatísticas de Segunda Ordem	122
5.3.3 Coeficiente de Atrito e de Pressão	132
5.4. Simulação de Grandes Escalas (LES)	135
5.4.1. Campo de Velocidade	143
5.4.2. Estatísticas de Segunda Ordem	147
5.4.3. Distribuição de Pressão	157
5.4.4. Características do Escoamento Turbulento	158
6 Ângulo de Incidência de $\alpha = 3^\circ$	168
6.1. Campo de Velocidade	174
6.2. Estatísticas de Segunda Ordem	181
6.3. Coeficiente de Pressão	187
6.4 Estruturas Coerentes	189
7 Ângulo de Incidência de $\alpha = 5^\circ$	193
7.1. Campo de Velocidade	196
7.2. Estatísticas de Segunda Ordem	206
7.3. Coeficiente de Pressão	216
7.4. Estruturas Coerentes	218
8 Comentários Finais	222
8.1. Conclusão	223
8.2. Recomendações	228
Referências Bibliográficas	230
APÊNDICE A Modelos Sub-Malha	243
A.1. Modelo Sub-Malha de uma Equação	243
A.2. Modelo de Forçamento Sub-Malha (f-LES)	244

APÊNDICE B - Domínio Computacional e Malha	247
B.1. Simulações RANS	247
B.2. Simulações LES	255
B.2.1. Simulação LES para o Ângulo de Ataque $\alpha = 3^0$	257
APÊNDICE C Influência da Intensidade de Turbulência na Entrada	262

## Lista de figuras

Figura 1.1 – Aletas fixas para estabilização de projéteis.	26
Figura 2.1 – Separação da camada limite e fenômeno da estolagem.	35
Figura 2.2 – Bolha curta laminar (Horton, 1969).	36
Figura 2.3 – Bolha curta laminar (Crompton, 2001).	36
Figura 2.4 – Esquema do escoamento sobre uma placa plana fina inclinada.	41
Figura 2.5 – Estrutura interna da bolha (Collie, 2005).	42
Figura 2.6 – Esquema do escoamento sobre uma placa plana fina inclinada.	43
Figura 2.7 – Visualização da turbulência por Leonardo da Vinci.	45
Figura 3.1 – Grau de modelagem e custo computacional dos modelos de turbulência.	53
Figura 3.2 – Espectro de energia.	84
Figura 4.1 – Exemplo de Volume de controle para mostrar a discretização da equação de transporte de um escalar.	90
Figura 4.2 – Volume de Controle Unidimensional.	94
Figura 4.3 – Diagrama de Variáveis Normalizadas (Choi et al., 1995).	94
Figura 4.4 – Diagrama de Variáveis Normalizadas (Choi et al., 1995).	95
Figura 4.5 – Seqüência de malhas para o método <i>Multigrid</i> .	102
Figura 4.6 – Algoritmo utilizado na solução do escoamento incompressível proposto.	105
Figura 5.1 – Dimensões da placa utilizada por Crompton.	108
Figura 5.2 – Estações de medição sobre a placa e posição de recolamento para $\alpha = 1^{\circ}$ .	109
Figura 5.3 – Detalhes do domínio computacional utilizado neste trabalho.	109



Figura 5.4 – Contornos de velocidade média $u/U_\infty$ para $\alpha = 1^0$ . Modelos RANS.	113
Figura 5.5 – Evolução dos perfis de velocidade $u/U_\infty$ . Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	115
Figura 5.6 – Perfis de velocidade $u/U_\infty$ para as estações antes do recolamento. Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	116
Figura 5.7 – Detalhe do perfil de velocidade $u/U_\infty$ para a estação 1 ( $x/c = 0,031$ ). Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	117
Figura 5.8 – Perfis de $u/U_\infty$ para as estações localizadas após o recolamento. Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	118
Figura 5.9 – Perfil de velocidade para $u^+$ em $x/c = 0,875$ . Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	119
Figura 5.10 – Linhas de corrente para os modelos RANS. $\alpha = 1^0$	121
Figura 5.11 – Perfis de $\overline{u'u'}/U_\infty^2$ : estações localizadas antes do recolamento. Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	122
Figura 5.12 – Perfis de $\overline{u'u'}/U_\infty^2$ : estações localizadas após o recolamento. Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	124
Figura 5.13 – Perfis de $\overline{v'v'}/U_\infty$ : estações localizadas antes do recolamento. Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	125
Figura 5.14 – Tensão normal $\overline{v'v'}/U_\infty$ : estações localizadas após o recolamento. Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	126
Figura 5.15 – Perfis de $\overline{u'v'}/U_\infty$ : estações localizadas antes do recolamento. Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	127
Figura 5.16 – Perfis de $\overline{u'v'}/U_\infty$ : estações localizadas após o recolamento. Modelos RANS. $\alpha = 1^0$	128
Figura 5.17 – Contornos das tensões de Reynolds - modelo Spalart-Allmaras ( $\alpha = 1^0$ ).	129
Figura 5.18 – Contornos das tensões de Reynolds - modelo SST ( $\alpha = 1^0$ ).	130

Figura 5.19 – Contornos das tensões de Reynolds - modelo RSM ( $\alpha = 1^0$ ).	131
Figura 5.20 – Coeficiente de atrito superficial para $\alpha = 1^0$ . Modelos RANS.	132
Figura 5.21 – Coeficiente de pressão para $\alpha = 1^0$ .	133
Figura 5.22 – Posicionamento das sondas sobre a placa. $\alpha = 1^0$ .	136
Figura 5.23 - Evolução da velocidade no tempo na direção $x$ - sondas P1, P2 e P3. $\alpha = 1^0$	137
Figura 5.24 - Evolução da velocidade no tempo na direção $y$ - sondas P1, P2 e P3. $\alpha = 1^0$	137
Figura 5.25 - Evolução da velocidade no tempo na direção $z$ - sondas P1, P2 e P3. $\alpha = 1^0$	138
Figura 5.26 - Evolução da velocidade no tempo na direção $x$ - sondas P4, P5 e P6. $\alpha = 1^0$	138
Figura 5.27 – Evolução da velocidade no tempo na direção $x$ - sondas P7, P8 e P9.	139
Figura 5.28 – Evolução da velocidade no tempo na direção $x$ - sondas P10, P11 e P12.	140
Figura 5.29 – Evolução da velocidade no tempo na direção $x$ - sondas P13, P14 e P15.	141
Figura 5.30 – Perfis de velocidade $u/U_\infty$ : estações localizadas antes do recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 1^0$	144
Figura 5.31 – Detalhe dos perfis de velocidade $u/U_\infty$ para $x/c = 0,031$ e $x/c = 0,125$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 1^0$	144
Figura 5.32 - Perfis de velocidade $u/U_\infty$ : estações localizadas após o recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 1^0$	146
Figura 5.33 – Linhas de corrente para o modelo LES Dinâmico. $\alpha = 1^0$	147
Figura 5.34 – Perfis de $u' u' / U_\infty^2$ : estações localizadas após o recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 1^0$	149

Figura 5.35 – Perfis de $u'u'/U_\infty^2$ : estações localizadas após o recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 1^0$	150
Figura 5.36 – Contornos do $u_{rms}/U_\infty$ (%). A linha branca representa $u/U_\infty = 0$ . Ângulo de ataque $\alpha = 1^0$	151
Figura 5.37 – Perfis de $v'v'/U_\infty^2$ : primeiras quatro estações. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 1^0$	153
Figura 5.38 – Contornos de $v'v'/U_\infty^2$ : LES Dinâmico, $\alpha = 1^0$ . (a) Placa inteira (b) Região da bolha de separação	153
Figura 5.39 – Perfis de $u'v'/U_\infty^2$ : primeiras quatro estações. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 1^0$	154
Figura 5.40 – Contornos de $u'v'/U_\infty^2$ . LES Dinâmico, $\alpha = 1^0$ . (a) Placa inteira (b) Região da bolha de separação	154
Figura 5.41 – Perfis de $w'w'/U_\infty^2$ : primeiras quatro estações (LES Dinâmico). $\alpha = 1^0$ .	155
Figura 5.42 – Contornos de $w'w'/U_\infty^2$ - LES Dinâmico, $\alpha = 1^0$ . (a) Placa inteira (b) Região da bolha de separação	156
Figura 5.43 – Contornos de $w'w'/U_\infty^2$ - RSM, $\alpha = 1^0$ . (a) Placa inteira (b) Região da bolha de separação	156
Figura 5.44 – Coeficiente de pressão nas simulações LES para $\alpha = 1^0$ .	157
Figura 5.45 – Contornos do coeficiente de pressão nas simulações LES e SST ( $\alpha = 1^0$ ).	158
Figura 5.46 – Espectros temporais e histogramas para os três componentes da velocidade na sonda P1.	160
Figura 5.47 – Espectro temporal e histograma para o componente x da velocidade na sonda P4.	161
Figura 5.48 – Espectro temporal e histograma para o componente x da velocidade na sonda P7.	162
Figura 5.49 – Espectro temporal e histograma para o componente x da velocidade na sonda P10.	162

Figura 5.50 – Espectro temporal e histograma para o componente x da velocidade na sonda P13.	162
Figura 5.51 – Contornos da razão entre as viscosidades sub-malha e molecular (toda a placa e região da bolha). LES Dinâmico, $\alpha = 1^0$ . (a) Placa inteira (b) Região da bolha de separação	164
Figura 5.52 – Estruturas coerentes sob diferentes critérios.	166
Figura 5.53 – Estruturas vorticiais coerentes através do critério Q .	167
Figura 6.1 - Detalhes do domínio computacional para o caso LES Dinâmico em $\alpha = 3^0$ .	169
Figura 6.2 – Posição das sondas sobre a placa. $\alpha = 3^0$ .	169
Figura 6.3 – Evolução da velocidade no tempo - sonda P1. $\alpha = 3^0$	170
Figura 6.4 – Evolução da velocidade x no tempo. $\alpha = 3^0$ .	171
Figura 6.5 – Contornos de velocidade $u/U_\infty$ para $\alpha = 3^0$ . Modelos RANS e LES.	175
Figura 6.6 – Evolução dos perfis de velocidade $u/U_\infty$ . Modelos RANS e LES. $\alpha = 3^0$	176
Figura 6.7 – Perfis de velocidade $u/U_\infty$ : estações localizadas antes do recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^0$	177
Figura 6.8 – Detalhe dos perfis de velocidade $u/U_\infty$ para $x/c = 0,031$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^0$ .	178
Figura 6.9 – Linhas de corrente. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^0$ .	179
Figura 6.10 – Perfis de velocidade $v/U_\infty$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^0$ .	180
Figura 6.11 – Perfis de $u'u'/U_\infty^2$ : estações localizadas antes do recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^0$ .	182
Figura 6.12 – Perfis de $v'v'/U_\infty^2$ : estações localizadas antes do recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^0$ .	182

Figura 6.13 – Perfis de energia cinética turbulenta: estações no interior da bolha. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^{\circ}$ .	184
Figura 6.14 – Perfis de $u'v'/U_{\infty}^2$ : estações localizadas antes do recolamento. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^{\circ}$ .	184
Figura 6.15 – Contornos das grandezas de segunda ordem – SST. $\alpha = 3^{\circ}$ .	185
Figura 6.16 – Contornos das grandezas de segunda ordem – Spalart Allmaras. $\alpha = 3^{\circ}$ .	186
Figura 6.17 – Contornos das grandezas de segunda ordem – LES Dinâmico. $\alpha = 3^{\circ}$ .	187
Figura 6.18 – Coeficiente de pressão - $C_p$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 3^{\circ}$	188
Figura 6.19 – Estruturas coerentes analisadas através do critério $Q$ . $\alpha = 3^{\circ}$	190
Figura 6.20 – Estruturas coerentes através do critério $Q$ ( $Qc/U_{\infty} = 160$ ) coloridas pela intensidade da magnitude da vorticidade ( $ \omega c/U_{\infty}$ ). $\alpha = 3^{\circ}$	191
Figura 6.21 – Estruturas coerentes sob o critério da região de alto módulo da vorticidade. Valor normalizado: $ \omega c/U_{\infty} = 160$ . $\alpha = 3^{\circ}$	191
Figura 6.22 – Estruturas coerentes sob o critério da região de baixa pressão total. Valor normalizado: $P/(\rho U_{\infty}^2) = -0,38$ . $\alpha = 3^{\circ}$	192
Figura 7.1 – Localização do ponto de recolamento para $\alpha = 5^{\circ}$ .	196
Figura 7.2 – Contornos Contornos de velocidade $u/U_{\infty}$ para $\alpha = 5^{\circ}$ . Modelos RANS e LES.	197
Figura 7.3 – Evolução dos perfis de velocidade $u/U_{\infty}$ para $\alpha = 5^{\circ}$ .	199
Figura 7.4 – Detalhe dos perfis de velocidade $u/U_{\infty}$ para $x/c = 0,031$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 5^{\circ}$ .	200

Figura 7.5 – Perfis de velocidade $u/U_\infty$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 5^\circ$	201
Figura 7.6 – Linhas de corrente – Modelo LES Dinâmico com detalhe da segunda bolha de recirculação ( $\alpha = 5^\circ$ ).	202
Figura 7.7 – Linhas de corrente – Modelo SST com detalhe da segunda bolha de recirculação ( $\alpha = 5^\circ$ ).	203
Figura 7.8 – Linhas de corrente – Modelo Spalart-Allmaras ( $\alpha = 5^\circ$ ).	204
Figura 7.9 – Perfis de velocidade $v/U_\infty$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 5^\circ$ .	205
Figura 7.10 – Contornos do módulo da velocidade instantânea normalizado por $U_\infty$ . $\alpha = 5^\circ$ .	206
Figura 7.11 – Perfis de $u'u'/U_\infty^2$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 5^\circ$ .	208
Figura 7.12 – Perfis de energia cinética turbulenta. Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 5^\circ$ .	209
Figura 7.13 – Perfis de $v'v'/U_\infty^2$ : Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 5^\circ$ .	212
Figura 7.14 – Perfis de $u'v'/U_\infty^2$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 5^\circ$ .	213
Figura 7.15 – Contornos das estatísticas de segunda ordem – Spalart Allmaras. $\alpha = 5^\circ$ .	214
Figura 7.16 – Contornos das estatísticas de segunda ordem – SST. $\alpha = 5^\circ$	215
Figura 7.17 – Contornos das estatísticas de segunda ordem – LES Dinâmico. $\alpha = 5^\circ$ .	215
Figura 7.18 – Coeficiente de pressão - $C_p$ . Comparação entre LES e RANS. $\alpha = 5^\circ$ .	216
Figura 7.19 – Coeficiente de pressão - $C_p$ . Comparação entre ângulos de incidência. LES Dinâmico.	218

Figura 7.20 – Estruturas coerentes analisadas através do critério $Q$ . $\alpha = 5^{\circ}$ .	219
Figura 7.21 – Estruturas coerentes através do critério $Q$ ( $Qc/U_{\infty} = 160$ ) coloridas pela intensidade da magnitude da vorticidade ( $ \omega c/U_{\infty}$ ). $\alpha = 5^{\circ}$ .	220
Figura 7.22 – Região de alto módulo da vorticidade. Valor normalizado: $ \omega c/U_{\infty} = 160$ . $\alpha = 5^{\circ}$ .	220
Figura B.1 - Detalhes do domínio computacional de Sampaio (2006).	247
Figura B.2 – Detalhes do domínio computacional utilizado neste trabalho.	248
Figura B.3 – Domínio computacional dividido em blocos e suas dimensões.	249
Figura B.4 – Detalhes da malha 150K utilizada na discretização da placa	251
Figura B.5 – Comparação entre as malhas através de $\bar{u}$ (Modelo SST - $\alpha = 1^{\circ}$ ).	252
Figura B.6 – Comparação entre as malhas através de $\overline{u'u'}$ (Modelo SST - $\alpha = 1^{\circ}$ ).	253
Figura B.7 – Comparação entre as malhas através de $C_p$ (Modelo SST - $\alpha = 1^{\circ}$ ).	253
Figura B.8 - Valores de $y^+$ para os modelos RANS. $\alpha = 1^{\circ}$ .	254
Figura B.9 - Valores de $y^+$ para os modelos RANS ( $\alpha = 3^{\circ}$ ).	255
Figura B.10 - Valores de $y^+$ para os modelos RANS ( $\alpha = 5^{\circ}$ ).	255
Figura B.11 – Valores instantâneos de $y^+ \cong 1$ .	256
Figura B.12 – Valores instantâneos de $y^+$ sobre a placa ( $\alpha = 5^{\circ}$ ).	257
Figura B.13 - Detalhes do domínio computacional para o caso LES Dinâmico em $\alpha = 3^{\circ}$ .	258

Figura B.14 - Detalhes da malha utilizada na discretização da placa plana ( $\alpha = 3^0$ ). (a) Plano x-y. Domínio completo, para $\alpha = 3^0$ (b) Malha na região da placa, para $\alpha = 3^0$ (c) Malha na região da ponta de faca da placa, para $\alpha = 3^0$	259
Figura B.15 – Valores instantâneos de $y^+$ sobre a placa ( $\alpha = 3^0$ ).	260
Figura B.16 – Comparação entre as malhas 2,4M e 2,9M ( $\alpha = 3^0$ ).	261
Figura C.1– Avaliação da condição de contorno da intensidade turbulenta na entrada .	262



## Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Constantes Empíricas do Modelo Spalart Allmaras	62
Tabela 3.2 – Coeficientes do modelo SST	65
Tabela 3.3 - Coeficientes do modelo RSM para equação de $\epsilon$	70
Tabela 3.4 - Coeficientes para tratamento do modelo RSM próximo à parede	77
Tabela 4.1 – Algoritmo utilizado na solução do escoamento incompressível proposto.	104
Tabela 5.1 – Posição das estações de medição dos perfis de velocidade.	108
Tabela 5.2 – Comprimentos de recolamento normalizados ( $X_R$ ) e os respectivos erros.	111
Tabela 5.3 – Coordenadas normalizadas das sondas sobre a placa ( $\alpha = 1^\circ$ ).	136
Tabela 5.4 – Coordenadas normalizadas das sondas na esteira da placa ( $\alpha = 1^\circ$ ).	136
Tabela 5.5 – Comprimentos de recolamento $X_R$ e $X_S$ para os modelos LES.	142
Tabela 6.1 – Coordenadas normalizadas das sondas sobre a placa ( $\alpha = 3^\circ$ ).	170
Tabela 6.2 – Comprimentos de recolamento normalizados $X_R$ para $\alpha = 3^\circ$ .	173
Tabela 7.1 – Comprimentos de recolamento normalizados $X_R$ e $X_S$ para $\alpha = 5^\circ$ .	194
Tabela B.1 – Subdivisões da malha 330K para os blocos da Figura B.3 .	250
Tabela B.2 – Subdivisões da malha 150K para os blocos da Figura B.3.	250
Tabela B.3 – Subdivisões da malha com a placa inclinada para os blocos da Figura B.2 .	260