

**Luiz Eduardo Bittencourt
Sampaio**

**Simulação de Grandes Escalas
da Bolha de Separação em
Placas Finas a Pequeno
Ângulo de Incidência**

TESE DE DOUTORADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

**Programa de Pós-graduação em
Engenharia Mecânica**

Rio de Janeiro
Setembro de 2006



Luiz Eduardo Bittencourt Sampaio

**Simulação de Grandes Escalas da Bolha de
Separação em Placas Finas a Pequeno
Ângulo de Incidência**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro
Setembro de 2006



Luiz Eduardo Bittencourt Sampaio

**Simulação de Grandes Escalas da Bolha de
Separação em Placas Finas a Pequeno
Ângulo de Incidência**

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

Angela Ourivio Nieckele

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Aristeu da Silveira Neto

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Jorge Hugo Silvestrini

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul -
PUCRS

José Diniz Mesquita Abrunhosa

Instituto Militar de Engenharia - IME

Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro -
PUC/Rio

Luis Fernando Figueira da Silva

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro -
PUC/Rio

Marcos Sebastiao de Paula Gomes

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro -
PUC/Rio

José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico –
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 15 de Setembro de 2006

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

Luiz Eduardo Bittencourt Sampaio

Graduou-se em Engenharia Elétrica na *Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro* - PUC (Rio de Janeiro, Brasil) em 1995. Concluiu o Mestrado na PUC (Rio de Janeiro, Brasil) em 2000 na área de Eletromagnetismo Aplicado estudando o espalhamento de ondas eletromagnéticas por corpos metálicos

Ficha Catalográfica

Sampaio, Luiz Eduardo Bittencourt

Simulação de Grandes Escalas da Bolha de Separação em Placas Finas a Pequeno Ângulo de Incidência/ Luiz Eduardo Bittencourt Sampaio ; orientador: Angela Ourivio Nieckele. — Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

206 f.; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Simulações de Grandes Escalas. 3. Placas finas I. Nieckele, Angela. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

A minha família que, ao longo desta caminhada, esteve todo o tempo a meu lado, incentivando-me e encorajando-me nos momentos mais difíceis.

A minha avó Edith pelo constante suporte, e pelas primeiras e providenciais aulas de inglês.

A meu avô Oswaldo, por ter propiciado uma infância inesquecível, e por ter me contagiado com o vírus da aerodinâmica, que só se manifestou tardiamente.

A minha avó Cecília pelo constante carinho, paciência, dedicação, e pelas tentativas frustradas de organizar meu escritório.

A meu avô Fernando, que me transmitiu grande interesse pela ciência, especialmente a Física e a Astronomia.

A meus pais, pelos trinta e quatro anos de ensinamentos, e por terem me incentivado com hobbies e brincadeiras que despertassem o interesse científico.

A meu irmão Claudio, pelo apoio desde o início do Doutorado, que nos trouxe Denise – agora afilhados, que contagiam com sua alegria de viver.

A meus tios, tias, e primos, e em especial a meu tio Paulo Henrique, que sempre me incentivou a seguir o programa de Doutorado e a carreira Acadêmica.

A meus sogros, cunhadas e cunhados por todo o apoio, churrascos, buracos, e momentos descontraídos.

A meus queridos e impacientes sobrinhos, que sempre me perguntavam quando isso tudo iria acabar.

A minha querida madrinha, por ter corajosamente se voluntariado, me escolhendo como afilhado, junto a qual não existe ambiente triste, nem mesmo num hospital.

A meu tio Osvaldo, pelas conversas animadas e pelas primeiras explicações das leis de Newton, numa viagem de 6 horas entre São José dos Campos e São Pedro da Aldeia.

A Colin, amigo inesquecível.

A minha prima-irmã Paulinha, pela alegria constante, e sem a qual teriam faltados os capítulos 7 e 8.

A minha orientadora-mãe, Angela, pelos constantes ensinamentos, suporte e orientação.

A meus orientadores de Mestrado, Luiz Costa, e Iniciação Científica, Bergmann, pelos ensinamentos passados.

A todos os professores que um dia me ensinaram alguma coisa.

A toda a equipe do Departamento de Engenharia Mecânica, pela paciência durante todos esses anos.

A meu amigo Júlio, pela indispensável ajuda na especificação, montagem e instalação do Cluster.

Aos amigos do café das 4, pelas conversas agradáveis, normalmente interrompidas por comentários inoportunos do tipo "agora eu tenho que voltar ao trabalho para escrever a tese".

Ao grande amigo e professor Luis Gusmão, pelos relevantes comentários a respeito da utilização prática deste trabalho, e pelas oportunidades de "testes de campo".

À equipe da Universidade de Stanford, nos nomes de Margot Gerritsen, Steve Collie, e Gianluca Iaccarino, pela oportunidade única concedida, pelo apoio e orientação, e pela disponibilização de recursos computacionais.

Ao Prof. Neyval, da UFES, por ter gentilmente cedido recursos computacionais para a realização de simulações numéricas.

Aos novos amigos que fizemos durante o Doutorado Sanduiche no exterior, pelo imenso carinho e apoio nos processos de adaptação e também de "desadaptação".

Ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro.

A todos aqueles com os quais convivi, ainda que de forma breve ou superficial, os quais, desconhecendo a influência de uma pequena alteração da condição inicial na evolução do escoamento, subestimam suas contribuições para o presente trabalho.

E em especial, a minha esposa, Lili, pela serenidade, compreensão, carinho e suporte nas horas mais difíceis, e por ter me proporcionado esses 7 anos inesquecíveis.

Dedico esta tese à minha esposa Lili, e à memória de meu tio Paulo Henrique.

Resumo

Sampaio, Luiz Eduardo Bittencourt; Nieckele, Angela. **Simulação de Grandes Escalas da Bolha de Separação em Placas Finas a Pequeno Ângulo de Incidência**. Rio de Janeiro, 2006. 206p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Escoamentos aerodinâmicos externos sobre membranas e aerofólios finos representam um enorme desafio para simulações numéricas, tendo em vista os diversos e complexos regimes de escoamento presentes, que incluem separação da camada limite, transição da camada de mistura para regime turbulento, recolamento, relaminarização da camada limite, e formação de bolhas de recirculação primárias e secundárias. Uma maior compreensão sobre estas estruturas é obtida através da simulação numérica de grandes escalas (LES) do escoamento sobre placas planas e finas, com ângulos de incidência entre um e três graus e número de Reynolds superior a 10^5 . A necessidade do emprego de malhas não uniformes, geralmente imposta por escoamentos externos, provoca instabilidades numéricas em esquemas não dissipativos, sendo duas possíveis soluções apresentadas nesse trabalho. A primeira delas é baseada num modelo sub-malha tradicional, onde a estabilidade numérica é alcançada através de um esquema numérico misto, no qual o esquema de diferenças centrais é empregado em regiões com intensas atividades turbulentas, enquanto que um esquema dissipativo é empregado nas regiões onde a malha sofre grandes variações espaciais e a atividade turbulenta é desprezível. Uma segunda solução baseia-se num termo de forçamento idealizado para atenuar apenas as menores escalas. Quando comparadas a estudos prévios utilizando médias de Reynolds (RANS), ambas as alternativas se mostraram adequadas, disponibilizando resultados bem mais precisos para perfis de velocidade, flutuações turbulentas e pressões médias. Em particular, o comprimento da bolha de recirculação foi previsto com menos de 5% de discrepância em relação a dados experimentais, contrastando com valores maiores que 20%, obtidos com o modelo RANS $\kappa - \omega$.

Palavras-chave

LES, Bolha de Separação, Placas Finas, Pequeno Ângulo de Incidência, Turbulência.

Abstract

Sampaio, Luiz Eduardo Bittencourt; Nieckele, Angela. **Large Eddy Simulations of the Thin Plate Separation Bubble at Shallow Incidence**. Rio de Janeiro, 2006. 206p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Aerodynamic flows around thin airfoils and membranes are very challenging to simulate accurately because of complex flow structures, including geometry-induced separation of the boundary layer, shear layer transition to turbulent behavior, reattachment, relaminarization of the boundary layer, and formation of primary and secondary recirculation bubbles. A physical insight on these structures can be obtained through the numerical Large Eddy Simulation (LES) of the flow around a simpler geometry, the thin flat plate, at shallow incidences of one and three degrees and Reynolds number above 10^5 , which is the focus of this investigation. In order to avoid the numerical instabilities associated with the mesh spreading generally required by such external flow, two solutions have been developed and tested. The first one consists of the traditional sub-grid model used along with a mixed numerical scheme, in which a stable but dissipative part is active only in turbulence-free zones where mesh is highly non-regular, while an unstable but non-dissipative scheme is employed in turbulence-critical zones, where the mesh is as regular as possible. The second solution, developed and validated in the current investigation, is based on a damping force, aimed to eliminate the smaller scales while preserving as much as possible all other structures. Compared to previous investigations using Reynolds Average (RANS) equations, both solutions provided more accurate and detailed information about the flow, including velocity, pressure and turbulent fluctuations mean profiles, allowing a deeper physical understanding. In particular, the main bubble reattachment length was predicted within 5% of the experimental data, while $\kappa - \omega$ RANS results were found to disagree in more than 20%.

Keywords

LES, Thin Plate, Separation Bubble, Shallow Incidence, Turbulence

Nomenclatura

<i>AOA</i>	Ângulo de Ataque
<i>BD</i>	Esquema de discretização temporal por diferenças retrógradas
<i>CD</i>	Esquema de discretização espacial por diferenças centradas
<i>DES</i>	Simulação de turbilhões destacados
<i>DNS</i>	Simulação Numérica Direta
<i>FGR</i>	Razão filtro-malha
<i>HIT</i>	Turbulência Homogênea e Isotrópica
<i>MVF</i>	Método dos Volumes Finitos
<i>MEF</i>	Método dos Elementos Finitos
<i>MDF</i>	Método das Diferenças Finitas
<i>f – LES</i>	Modelo de forçamento sub-malha proposto
<i>GPA</i>	Gradiente de Pressão Adverso
<i>LES</i>	Simulações de Grandes Escalas
<i>LDV</i>	Velocimetria a Laser com efeito Doppler
<i>MILES</i>	LES com Integração Monotônica
<i>N – S</i>	Equações de Navier-Stokes
<i>PISO</i>	Método de solução do acoplamento velocidade-pressão
<i>QUICK</i>	Esquema de discretização espacial de segunda ordem
<i>RANS</i>	Abordagem numérica da Turbulência, baseada em média de Reynolds
<i>SGS</i>	Escala sub-malha
<i>SGSM</i>	Modelo para escalas sub-malha
<i>URANS</i>	RANS transiente
<i>UW</i>	Esquema de discretização espacial <i>Upwind</i>

Lista de Smbolos

$\overline{(\quad)}$	Média geral
$\langle \rangle$	Média temporal
$\widehat{(\quad)}$	Filtragem teste, ou de segundo nível
\sim	Variáveis Calculadas das equações de camada limite fina
A	Centróide do volume de controle principal, dono de uma face
\mathbf{Af}	Vetor normal à face, de magnitude igual à área da mesma
B	Centróide do volume de controle secundário, vizinho de uma face
c	Corda, ou comprimento, da placa plana
c_P	Coefficiente de pressão
C_d	Constante avaliada dinamicamente por Germano
C_k	Constante do modelo sub-malha de uma equação
Co	Número de Courant
C_s	Constante de Smagorinsky
$[C]$	Matriz Convecção
d_S	Comprimento da bolha secundária
$[D]$	Matriz Difusão
E	Energia
\mathbf{f}	Forçamento sub-malha proposto
\mathbf{f}_b	Força de corpo
$\mathbf{f}_b(\mathbf{k}, t)$	Força de corpo que atua em grandes escalas em HIT
$[F]$	Matriz Fonte
$[I]$	Matriz identidade
\mathbf{I}	Tensor identidade
k	Número de onda
\mathbf{k}	Vetor número de onda
k_{SGS}	Energia cinética sub-malha
k_{INF}	Limite inferior para o número de onda
k_{SUP}	Limite superior para o número de onda
\hat{l}	Escala de comprimento
L	Envergadura da placa, ou tamanho do domínio periódico
L_{ij}	Tensor sub-filtro calculado a partir de campos resolvidos
\dot{m}_f	Fluxo de massa cruzando a face f

N, N_V	Número de Volumes de Controle
N_i	Número de faces do i-ésimo Volume de Controle
N_A	Número de faces do i-ésimo Volume de Controle das quais este é o dono
N_B	Número de faces do i-ésimo Volume de Controle das quais este é vizinho
p	Pressão modificada
p_T	Pressão termodinâmica
P_R	Pressão no ponto de Recolamento
P_S	Pressão no ponto de Separação
\bar{P}_m	Pressão no primeiro ponto nodal da malha
$\mathbf{P}(\mathbf{k})$	Operador projetor que retorna um campo solenoidal
Q	Segundo invariante do gradiente da velocidade
r	Razão entre larguras de filtro no modelo dinâmico
R_{ij}	Média temporal das flutuações de segunda ordem
Re	Número de Reynolds
Re_∞	Número de Reynolds baseado em U_∞
Re_s	Número de Reynolds baseado em δ_s^*
$S(f)$	Espectro temporal de energia
\bar{S}_{ij}	Parte simétrica do gradiente da velocidade resolvida
S_c	Termo fonte constante
S_p	Coefficiente angular do termo fonte
t	Instante de tempo
\hat{t}	Escala de tempo
T	Temperatura
T_{ij}	Tensor sub-malha de segundo nível de filtragem
T_L	Escala de decorrelação temporal do processo de Uhlenbeck–Ornstein
\hat{u}	Escala de velocidade
\bar{u}	componente da velocidade resolvida na direção x
u_τ	velocidade de fricção
\mathbf{u}	Vetor velocidade
u'_i	Flutuações da componente i da velocidade em torno da média temporal
U_∞	Magnitude da velocidade na corrente livre
U_s	Magnitude da Velocidade externa, próxima ao ponto de separação
V_{ci}	Volume de Controle de índice i

\bar{w}	componente de velocidade resolvida na direção z
$\mathbf{w}(\mathbf{k}, t)$	Processo de difusão estocástico de Uhlenbeck–Ornstein
\mathbf{x}	Posição em coordenadas cartesianas
x_R	Distância de recolamento
y^+	Distância adimensional para a parede
Y_m	Distância do primeiro ponto nodal da malha à parede
α_f	Parâmetro do modelo de forçamento proposto
β_f	Parâmetro do modelo de forçamento proposto
Γ	Coefficiente de difusão de ϕ
δ_s^*	Deslocamento da camada limite no ponto de separação
Δ	Largura da malha, ou parâmetro de filtragem espacial
$\bar{\Delta}$	Escala de comprimento utilizada na modelagem sub-malha
$\Delta\mathbf{k}$	Resolução do vetor número de onda
Δf	Resolução de frequência
Δt	Passo de tempo
Δx	Espaçamento de malha na direção x
Δy	Espaçamento de malha na direção y
Δz	Espaçamento de malha na direção z
ε	Taxa de dissipação
ϵ_{com}	Erro de comutatividade
ϵ_{Π}	Erro de comutação do produto ou tensor sub-malha
ϵ_{∇}	Diferença entre duas maneiras de se calcular gradiente
η	Comprimento característico de Kolmogorov
Θ	Parâmetro da filtragem temporal
$\Theta(\mathbf{k})$	Filtro de frequências
κ	Constante de von Karman
λ	Comprimento de onda
μ	Viscosidade laminar dinâmica
ν	Viscosidade laminar cinemática
ν_t	Viscosidade cinemática turbulenta
ν_{SGS}	Viscosidade cinemática sub-malha
ν_{eff}	Viscosidade efetiva, soma das viscosidade cinemática laminar e sub-malha
ρ	Densidade do Fluido
ρ_{u_x}	Coefficiente de correlação de u_x

σ	Coefficiente de Recuperação de Pressão; Desvio padrão
σ_{u_x}	Desvio padrão de u_x
τ	Tensor de Reynolds
τ_{SGS}	Tensor das escalas sub-malha
τ_w	Tensão cisalhante na parede
$\tau_{w,ij}$	Componente i,j da tensão cisalhante na parede
ϕ	Campo escalar genérico
$\overline{\Omega}_{ij}$	Parte anti-simétrica do gradiente de velocidade resolvido

Subescritos

A	Valores armazenados ou interpolados para o centróide A
B	Valores armazenados ou interpolados para o centróide B
Exp	Valores obtidos experimentalmente
f	Valores armazenados nas faces ou interpolados para as mesmas
m	Primeiro ponto nodal da malha
R	Ponto de Recolamento
S	Ponto de Separação
w	parede

Superescritos

$n + 1$	Próximo instante de tempo, para o qual se busca a solução
n	Instante de tempo mais atual
$n - 1$	Instante de tempo passado

Conteúdo

1	Introdução	16
1.1	Objetivos e Definição do Escopo do Trabalho	24
1.2	Organização do Trabalho	26
2	Revisão da Literatura	28
2.1	Física do Problema	28
2.1.1	Aerofólios Convencionais e as Bolhas Curtas Laminares	29
2.1.2	Aerofólios Finos e as Bolhas Longas	35
2.2	Modelos de Turbulência	41
2.2.1	Processo de Filtragem e Discretização	42
2.2.2	Versatilidade da Malha	44
2.2.3	Modelagem Sub-malha	44
2.2.4	Modelagem de Regiões Próximas às Paredes	48
3	Modelagem da Turbulência	52
3.1	Processo Geral de Filtragem das Equações de Transporte	53
3.2	Processo de Discretização	55
3.3	Equações de Navier-Stokes Médias – RANS	56
3.4	Simulação de Grandes Escalas – LES	58
3.5	Erro de Comutatividade	62
3.6	Tensor Sub-Malha	64
3.6.1	Modelo Sub-malha de Smagorinsky	67
3.6.2	Modelo Sub-malha de Smagorinski Dinâmico	69
3.6.3	Modelo Sub-malha de Uma Equação	73
4	Método Numérico	75
4.1	Discretização do Domínio Computacional	76
4.2	Discretização da Equação Geral de Transporte	77
4.2.1	Discretização Espacial	78
4.2.2	Discretização Temporal	82
4.3	Discretização das Equações de Navier-Stokes	84
5	Modelagem Proposta	88
5.1	Modelo de Forçamento Sub-malha	89
5.2	Variantes do Modelo de Forçamento Sub-malha	95

6 Validação	99
6.1 Transporte de um Escalar Passivo	99
6.1.1 Transporte Unidimensional de Escalar Passivo	100
6.1.2 Transporte Bidimensional de Escalar Passivo	117
6.2 Turbulência Isotrópica e Homogênea	121
6.3 Conclusões do Capítulo	131
7 Resultados	135
7.1 Modelo Sub-malha Tradicional – 1 Grau de Ângulo de Ataque	136
7.2 Modelo Proposto – 1 Grau de Ângulo de Ataque	162
7.3 Modelo Proposto – 3 Graus de Ângulo de Ataque	175
8 Comentários Finais	190
Referências Bibliográficas	197