

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA**

IVAN KORKISCHKO

**Investigação experimental e simulação numérica do escoamento
ao redor de um modelo automobilístico: corpo de Ahmed**

São Paulo

2006

IVAN KORKISCHKO

**Investigação experimental e simulação numérica do escoamento
ao redor de um modelo automobilístico: corpo de Ahmed**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Engenheiro Me-
cânico

Área de Concentração: Energia e Fluidos

Orientador: Julio Romano Meneghini

São Paulo

2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Korkischko, Ivan

Investigação experimental e simulação numérica do escoamento ao redor de um modelo automobilístico: corpo de Ahmed / Ivan Korkischko. – São Paulo, 2006.

p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Mecânica dos fluidos computacional 2. Dinâmica dos fluidos (Experimentos) 3. Engenharia automobilística I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

À Monica Rizzolli e à mi-
nha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que tornaram possível a realização desse trabalho.

“Para aquilo que a gente não alcança através da vivência, a gente também não tem ouvidos.”

Friedrich Wilhelm Nietzsche

RESUMO

Ao longo das últimas décadas, o conhecimento detalhado das características do escoamento ao redor de veículos de superfície (carros, caminhões, trens, motos, bicicletas, etc) é considerado primordial para o projeto adequado desses veículos, permitindo a melhoria da eficiência energética e das características dinâmicas dos mesmos. Para tanto, resultados experimentais e de simulações numéricas são de grande importância. O presente projeto abrange tanto a parte experimental como a computacional de um projeto aerodinâmico de um veículo, utilizando um modelo automobilístico simplificado, o corpo de Ahmed, que possui grande quantidade de referências na literatura. A parte experimental envolveu a medição do coeficiente de arrasto do modelo e a visualização do escoamento ao redor do mesmo através de Velocimetria por Imagem de Partículas/Laser (PIV/LASER). Os efeitos de blocagem foram investigados e estimados com base na medição de arrasto. A visualização do escoamento ao redor do corpo de Ahmed foi concentrada na traseira do modelo e na estrutura de esteira, pois essa região é a maior responsável pelo arrasto no modelo. Já a parte computacional consistiu na simulação numérica do escoamento ao redor do corpo de Ahmed empregando técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). O Método dos Volumes Finitos foi utilizado. Durante essas atividades foram validados modelos de turbulência utilizados em problemas de Dinâmica dos Fluidos Computacional. Os resultados experimentais de medição de arrasto corrigidos do efeito de blocagem foram bastante coerentes com aqueles encontrados em Ahmed e outras referências ($C_D = 0.38$). As estruturas de esteira visualizadas através da técnica de PIV também apresentaram boa concordância com outros estudos experimentais. Quanto aos resultados numéricos, foram testados três modelos de turbulência, $k - \omega$ Standard, $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras. Os dois últimos modelos produziram simulações cujos resultados apresentaram excelente concordância com os resultados encontrados em Ahmed. O modelo $k - \omega$ Standard apresentou resultados não satisfatórios.

Palavras-chave: *corpo de Ahmed, Mecânica dos Fluidos Experimental, Velocimetria por Imagem de Partículas, Dinâmica dos Fluidos Computacional, Método dos Volumes Finitos*

ABSTRACT

In the last decades, the detailed knowledge of the flow characteristics around ground vehicles, such as cars, trucks, trains, motorcycles and bicycles, is considered of great importance to the adequate project of those vehicles, allowing improvements of energetic efficiency and dynamic characteristics. To achieve these objectives, experimental results and numerical simulations are of great importance. The present project covers the experimental and the numerical parts of an aerodynamic project of a ground vehicle, using a simplified automotive model, the Ahmed body, that has great coverage in the literature. The experimental part involved drag measurement and flow visualization using PIV/LASER (Particle Image Velocimetry). The blockage effects were investigated and estimated on the basis of drag measurements. The flow visualization around the model was concentrated in the rear end of the model and the wake structure, which is the major responsible of the model's drag. The computational part consists of numerical simulations of the flow around the Ahmed body employing CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques. The Finite Volume Method was used. Different turbulence models used in CFD problems were validated during these activities. The experimental results of drag measurements corrected of the blockage effects have great agreement with the results found in Ahmed and other references ($C_D = 0.38$). The wake structures visualized with PIV also presented good agreement with other experimental studies. In the numerical simulation results, three turbulence models were tested, $k - \omega$ Standard, $k - \omega$ SST and Spalart-Allmaras. The last two models have had excellent agreement with Ahmed's results. The $k - \omega$ Standard model has shown poor results.

Keywords: *Ahmed body, Experimental Fluid Mechanics, Particle Image Velocimetry, Computational Fluid Dynamics, Finite Volume Method*

SUMÁRIO

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução.....	1
2 Corpo de Ahmed.....	4
3 Escoamento ao redor de corpos imersos	5
3.1 Características gerais dos escoamentos externos	6
3.2 Arrasto e sustentação	6
3.2.1 Arrasto	8
3.2.2 Sustentação	10
4 Técnicas experimentais.....	12
4.1 Modelo	12
4.2 Canal de água circulante	13
4.3 Medição de arrasto	14
4.4 Medição de velocidade	17
4.5 Blocagem.....	18
5 Velocimetria por Imagem de Partículas - PIV	20

5.1	Classificação	21
5.2	Captura de imagens.....	23
5.2.1	Laser	23
5.2.2	Partículas.....	24
5.2.3	Gravação da imagem	25
5.3	Processamento das imagens	25
5.3.1	Correlação estatística.....	25
5.3.2	Identificação do pico	27
5.3.3	Validação dos vetores.....	27
5.3.4	Pós-processamento	28
5.4	Fontes de erros	28
6	Resultados experimentais	30
6.1	Medição de arrasto	30
6.2	Visualização do escoamento ao redor do corpo de Ahmed	31
7	Método dos Volumes Finitos.....	40
7.1	Funções de interpolação para MVF	42
7.2	Upwind de 1 ^a ordem	43
7.3	Equação da conservação de massa.....	44
7.4	Equação da Conservação de Quantidade de Movimento	44
8	Modelagem de turbulência.....	45
8.1	Modelo $k - \omega$ Standard	46

8.1.1	Modelando a difusividade efetiva	46
8.1.2	Modelando a produção de energia cinética turbulenta	47
8.1.2.1	Produção de k	47
8.1.2.2	Produção de ω	48
8.1.3	Modelando a dissipação de turbulência	49
8.1.3.1	Dissipação de k	49
8.1.3.2	Dissipação de ω	49
8.1.4	Correção de compressibilidade	50
8.1.5	Constantes do modelo	51
8.2	Modelo $k - \omega$ SST (<i>Shear-Stress Transport</i>)	51
8.2.1	Equações de transporte para o modelo $k - \omega$ SST	51
8.2.2	Modelando a difusividade efetiva	52
8.2.3	Modelando a produção de turbulência	54
8.2.3.1	Produção de k	54
8.2.3.2	Produção de ω	54
8.2.4	Modelando a dissipação de turbulência	55
8.2.4.1	Dissipação de k	55
8.2.4.2	Dissipação de ω	55
8.2.5	Modificação de difusão cruzada	55
8.2.6	Constantes do modelo	56
8.3	Modelo Spalart-Allmaras	56
8.3.1	Equação de transporte para o modelo Spalart-Allmaras	56

8.3.2	Modelando a viscosidade turbulenta	57
8.3.3	Modelando a produção de turbulência	57
8.3.4	Modelando a destruição de turbulência	58
8.3.5	Constantes do modelo	59
9	Geração de malhas não-estruturadas	60
9.1	Noções gerais relativas a malhas	61
9.1.1	Propriedades geométricas	62
9.1.2	Propriedades de natureza física	62
9.2	Descrição geral	64
9.2.1	Informação geométrica	65
9.2.2	Informações necessárias ao processamento	65
9.3	Metodologia geral para criação de malhas	66
9.3.1	Métodos de Frente Progressiva (<i>Advancing Front Methods</i>)	67
9.3.1.1	Métodos de Frente Progressiva em duas dimensões	68
10	Simulações numéricas	74
10.1	Geração de Malha	74
10.2	Simulações Numéricas em Regime Permanente	76
11	Conclusões gerais	82
	Referências	83

LISTA DE FIGURAS

Figura - 2.1 Esquema do corpo de Ahmed. Medidas em mm (1)	4
Figura - 3.1 Forças de pressão e cisalhamento num elemento de área infinitesimal localizado na superfície de um corpo imerso (2)	7
Figura - 4.1 Coeficientes de arrasto característicos do corpo de Ahmed para vários ângulos φ de inclinação traseira medidos por Ahmed (3)	12
Figura - 4.2 Modelo do corpo de Ahmed	13
Figura - 4.3 Canal de água circulante do NDF	14
Figura - 4.4 Montagem do modelo no canal de água circulante do NDF	14
Figura - 4.5 Extensômetros resistivos (4)	15
Figura - 4.6 Esquema do circuito de ponte de Wheatstone (4)	16
Figura - 4.7 Célula de carga ALFA S-5 (5)	17
Figura - 5.1 Esquema de um sistema PIV	21
Figura - 5.2 Espalhamento de luz de uma partícula	23
Figura - 5.3 Exemplo de resultado de correlação cruzada entre duas imagens	26
Figura - 5.4 Erro de paralaxe (faixa verde é uma seção do plano iluminado)	29
Figura - 6.1 Instrumentação de PIV do NDF	32
Figura - 6.2 Planos de medição utilizando PIV	32

Figura - 6.3 Representação esquemática da condição de arrasto alto ($\varphi = 30^\circ$) (3)	34
Figura - 6.4 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H1	35
Figura - 6.5 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H2	35
Figura - 6.6 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H3	36
Figura - 6.7 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H4	36
Figura - 6.8 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H5	37
Figura - 6.9 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V1	37
Figura - 6.10 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V2	38
Figura - 6.11 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V3	38
Figura - 6.12 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V4	39
Figura - 6.13 Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V5	39
Figura - 7.1 Esquema dos volumes de controle para discretização	42
Figura - 7.2 Volume de controle unidimensional	43
Figura - 9.1 Elementos triangulares com diferentes configurações de nós	66
Figura - 9.2 Esquema geral do método de frente progressiva	68
Figura - 9.3 Padrão 1	69
Figura - 9.4 Padrão 2	69
Figura - 9.5 Padrão 3	69
Figura - 9.6 Estados da frente progressiva	71
Figura - 9.7 Malha final	71

Figura - 9.8 Malha antes e depois de ser polida	72
Figura - 9.9 Frente progredindo por inflação	73
Figura - 9.10 Frente progredindo pelo avanço de uma linha	73
Figura - 10.1 Malha do corpo de Ahmed	75
Figura - 10.2 Detalhes da malha do corpo de Ahmed	75
Figura - 10.3 Linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed	79
Figura - 10.4 Distribuição do coeficiente de pressão ao redor do corpo de Ahmed ..	80
Figura - 10.5 Campo de velocidade e linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed no plano $H3$	80
Figura - 10.6 Campo de velocidade e linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed no plano $V3$	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 10.1 Desempenho computacional para simulações em regime permanente ..	77
Tabela 10.2 Resultados das simulações em regime permanente	77
Tabela 10.3 Decomposição do arrasto em parcelas devido à pressão e à viscosidade (%)	78

1 INTRODUÇÃO

Mesmo sendo um problema elementar da mecânica dos fluidos, o escoamento ao redor de corpos rombudos, que são corpos onde o escoamento é dominado por grandes regiões de escoamento separado, apresenta desafios devido à sua grande aplicação na engenharia. Diversas estruturas se apresentam na forma de corpos rombudos imersos em escoamentos fluidos, por exemplo: pilares de pontes da engenharia civil; tirantes e longarinas de asas da engenharia aeronáutica; cabos de transmissão da engenharia de infra-estrutura elétrica; elementos externos de automóveis da engenharia automotiva; linhas de ancoragem da engenharia naval; plataformas e tubulações da engenharia *offshore*; dentre muitas outras comumente encontradas no cotidiano (6).

Buscando o entendimento da interação da dinâmica entre o fluido e a estrutura inúmeros trabalhos são propostos, incluindo este trabalho, que objetiva o estudo de um modelo automobilístico. Tal modelo, o corpo de Ahmed, e que será melhor apresentado no “Capítulo 2 - Corpo de Ahmed”, é de extrema importância para a indústria automobilística, pois serve de padrão de calibração de túneis de vento e de modelo (*benchmark*) para validação de modelos de turbulência utilizados em CFD.

Nos problemas de fluido-dinâmica, as pesquisas experimentais são fundamentais para a compreensão dos fenômenos existentes no escoamento ao redor de corpos rombudos e esbeltos (perfis de asa e outras estruturas aeronáuticas) e também são fontes de paradigmas de validação para as abordagens teórica e numérica de estudo desses problemas. Entretanto, as indústrias cada vez mais se valem dos métodos computacionais com o objetivo de diminuir a necessidade de experimentos. Como exemplo, os custos do canal

de água circulante do NDF foram de aproximadamente R\$ 250 mil (mais R\$ 50 mil para instrumentação) e do sistema PIV foi de US\$ 110 mil. O Túnel de Vento de Ensino e Pesquisa do ITA teve um custo de R\$ 400 mil. Além do custo das instalações, os modelos também possuem custo significativo, podendo chegar, em alguns casos, como nas indústrias aeroespacial e automobilística, a centenas de milhares de dólares, dependendo também do grau de sofisticação necessário. O aluguel de túneis de vento e canais de água é prática corrente, no entanto, dependendo do tempo, da configuração e das variações do ensaio, seu custo pode facilmente chegar a alguns milhões de dólares. Desse modo, a tendência das diversas indústrias é investir massivamente em soluções computacionais, testando inúmeras soluções e configurações, e apenas utilizar experimentos para a decisão final de um projeto ou testes da solução escolhida ou para a validação de modelos numéricos. Em certos casos, as simulações computacionais podem ser impraticáveis ou extremamente demoradas, sendo os experimentos mais adequados para a obtenção de resultados. Para se ter uma base de comparação entre os custos experimentais e computacionais, são apresentados alguns valores de equipamentos computacionais: uma estação de trabalho custa aproximadamente R\$ 25 mil e um cluster (64PIV) R\$ 300 mil. A licença universitária (1ano) do Fluent é de US\$ 4.800,00.

Na tentativa de reproduzir a metodologia de projeto atualmente empregada em diversas indústrias de grande importância, como a aeroespacial, automobilística, do petróleo, naval, civil, dentre outras, este trabalho utiliza as abordagens experimental e numérica, sabendo que uma não substitui a outra, mas que são complementares e geram projetos cada vez mais elaborados. Com base no que foi exposto, este trabalho tem como objetivos:

- Compreender o mecanismo de arrasto em corpos rombudos e obter experimentalmente o coeficiente de arrasto para o corpo de Ahmed.
- Obter, utilizando a técnica de PIV, a estrutura de esteira presente no corpo de Ahmed para a configuração escolhida e ensaiada.

- Utilizar os resultados experimentais para validação das simulações numéricas.
- Verificar as diferenças entre os modelos de turbulência mais utilizados para escoamentos externos.

No “Capítulo 2 - Corpo de Ahmed”, são descritos o corpo de Ahmed e as características do escoamento ao redor do mesmo.

O “Capítulo 3 - Escoamento ao redor de corpos imersos” apresenta as principais características de escoamento externo ao redor de corpos rombudos.

No “Capítulo 4 - Técnicas experimentais” são apresentados o modelo do corpo de Ahmed utilizados nos ensaios, sua escala e seus materiais. Também são mostrados brevemente o canal de água circulante do NDF e os instrumentos utilizados para a medição de arrasto e velocidade. A correção para o efeito de blocagem em canais é descrita.

O “Capítulo 5 - Velocimetria por Imagem de Partículas - PIV” descreve a técnica de PIV.

No capítulo seguinte (“Capítulo 6 - Resultados experimentais”) são apresentados os resultados experimentais de medição de arrasto e visualização do escoamento ao redor do corpo de Ahmed.

Nos Capítulos 7 (“Método dos Volumes Finitos”), 8 (“Modelagem de turbulência”) e 9 (“Geração de malhas não-estruturadas”) são apresentados os fundamentos teóricos para as simulações numéricas realizadas.

O “Capítulo 10 - Simulações numéricas” contém uma descrição da malha utilizada para as simulações numéricas e dos recursos computacionais usados. Também são apresentados os resultados das simulações em regime permanente e comparações entre os modelos de turbulência utilizados e entre os resultados numéricos e os resultados experimentais do presente trabalho e de Ahmed (3).

As conclusões gerais deste trabalho estão no “Capítulo 11 - Conclusões gerais”.

2 CORPO DE AHMED

A geometria de um modelo automobilístico simplificado proposto por Ahmed (3), conhecido como **corpo de Ahmed** (Figura 2.1), gera as características essenciais do campo de escoamento ao redor de um veículo real, com exceção dos efeitos devidos a rotação das rodas, escoamento no compartimento do motor e passageiros, asperezas na parte inferior do veículo e protusões de superfície como, por exemplo, espelhos retrovisores. O modelo escolhido gera: um escoamento tridimensional intenso na frente, um escoamento relativamente uniforme no meio, e uma grande estrutura de esteira na traseira (3).

A escolha de um modelo do corpo de Ahmed também permite a validação de modelos numéricos de turbulência. A variação do ângulo φ de inclinação da traseira do corpo de Ahmed (Figura 2.1) permite a obtenção de várias estruturas de esteira de vórtices na traseira do modelo, fato responsável pela maior parte do arrasto no modelo e também em veículos de superfície, como carros, ônibus e caminhões.

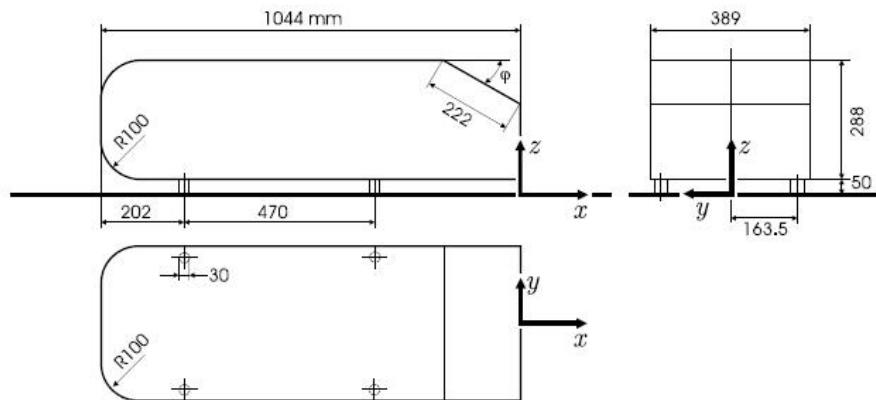


Figura 2.1: Esquema do corpo de Ahmed. Medidas em mm (1)

3 ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS IMERSOS

O escoamento ao redor de corpos imersos, também conhecido como escoamento externo, envolve a análise de vários aspectos. O estudo do escoamento ao redor de corpos imersos em ar é conhecido como aerodinâmica e, em água, hidrodinâmica.

No projeto de aviões e de veículos de superfície, tais como carros, caminhões, trens, motos e bicicletas, as forças de arrasto e sustentação são importantes parâmetros, possibilitando obter menor consumo de combustível e melhorar as características de mobilidade desses veículos. Esforços similares são feitos para otimizar o projeto de navios (envolvidos por dois fluidos, água e ar) e de submersíveis (totalmente envolvidos em água).

Semelhantemente às outras áreas da mecânica dos fluidos, existem duas abordagens, teórica e experimental, para a obtenção das forças provenientes do escoamento do fluido ao redor do corpo imerso. As técnicas teóricas, analíticas e numéricas, podem fornecer muitas informações sobre este fenômeno. Entretanto, a quantidade de informações obtidas através de técnicas puramente teóricas é limitada devido à complexidade das equações que descrevem os escoamentos e da geometria dos objetos. Os atuais avanços na área da mecânica dos fluidos computacional resultam na previsão de forças e padrões de escoamentos com maiores confiabilidade e disponibilidade.

Muitas informações sobre escoamentos externos foram e são obtidas através de experimentos realizados, na maioria das vezes, com modelos de objetos reais. Para tanto, são utilizados túneis de vento, canais de água e tanques de prova (7).

3.1 Características gerais dos escoamentos externos

As forças atuantes nos corpos imersos num fluido que apresenta movimento são resultantes da interação entre o fluido e o corpo. Pode-se ter o fluido ao longe do corpo estacionário e o corpo se movendo através do fluido com velocidade U , bem como o corpo estacionário e o fluido escoando com velocidade U . Para efeitos de estudo, em ambos os casos pode-se fixar o sistema de coordenadas no corpo e considerar o fluido escoando ao redor do corpo estacionário com velocidade ao longe U . Efeitos transitórios e não uniformidades no escoamento muitas vezes não são importantes na análise dos escoamentos externos.

Um modo de classificar os escoamentos externos é baseado no formato do corpo imerso devido à dependência das características do escoamento com o formato do corpo. Usualmente, corpos esbeltos (perfis de asa) provocam menores efeitos no escoamento comparados com aqueles provocados por corpos rombudos (cilindros e carros)(7).

3.2 Arrasto e sustentação

O movimento de um corpo através de um fluido resulta em uma interação entre o corpo e o fluido, descrita por forças que atuam na interface fluido-corpo. Tais forças podem ser escritas em função da tensão de cisalhamento na parede, τ_p , provocada por efeitos viscosos, e da tensão normal devida à pressão, p . Apesar de sempre ser interessante o conhecimento das distribuições de pressão e de tensão de cisalhamento, essas informações são de difícil obtenção e na maiorias dos problemas de mecânica dos fluidos, apenas os efeitos globais são necessários para sua resolução.

A componente da força resultante que atua na direção do escoamento é denominada arrasto, D , (*drag*), e a que atua na direção normal ao escoamento é denominada sustentação, L , (*lift*). Em alguns corpos tridimensionais também é detectada uma força perpendicular ao plano onde D e L estão contidas.

O arrasto e a sustentação podem ser obtidos pela integração das tensões de cisa-

lhamento e normais ao corpo que está sendo considerado (Figura 3.1). As componentes x e y da força que atua num pequeno elemento de área dA são:

$$dF_x = (pdA) \cos \theta + (\tau_p dA) \sin \theta \quad (3.1)$$

e

$$dF_y = -(pdA) \sin \theta + (\tau_p dA) \cos \theta \quad (3.2)$$

Deste modo, os módulos das forças D e L que atuam no objeto são:

$$D = \int dF_x = \int p \cos \theta dA + \int \tau_p \sin \theta dA \quad (3.3)$$

e

$$L = \int dF_y = - \int p \sin \theta dA + \int \tau_p \cos \theta dA \quad (3.4)$$

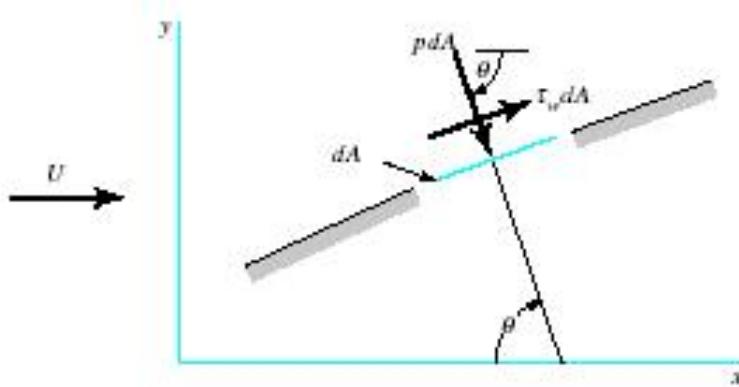


Figura 3.1: Forças de pressão e cisalhamento num elemento de área infinitesimal localizado na superfície de um corpo imerso (2)

Para calcular as integrais das Equações 3.3 e 3.4, e determinar o arrasto e a sustentação atuantes sobre o corpo, é necessário conhecer o formato do corpo, bem como as distribuições de τ_p e p ao longo da superfície do corpo. Entretanto, a obtenção destas

distribuições, tanto teórica como experimentalmente, é muito difícil. Na tentativa de superar as dificuldades de obter estas distribuições, são definidos coeficientes adimensionais de arrasto e sustentação que consideram os efeitos globais das tensões de cisalhamento e normais e podem ser obtidos através de análise simplificada, técnicas numéricas e experimentos bem conduzidos. Os coeficientes de arrasto, C_D , e de sustentação, C_L , são definidos por:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (3.5)$$

e

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (3.6)$$

onde: D - arrasto (N), L - sustentação (N), ρ - massa específica do fluido (kg/m^3), U - velocidade do escoamento (m/s) e A - área característica do objeto (m^2) (7).

3.2.1 Arrasto

O arrasto pode ser determinado através da Equação 3.3, desde que conhecidas a distribuição de pressão, p , e a tensão de cisalhamento na parede do objeto, τ_p . Apenas em raros casos estas distribuições podem ser determinadas analiticamente, por exemplo, a camada limite sobre uma placa plana paralela ao escoamento ao longe. Atualmente, a mecânica dos fluidos computacional tem fornecido resultados encorajadores para o arrasto em corpos com formas mais complexas. Entretanto, a maior parte das informações relacionadas ao arrasto em objetos é resultado de numerosos experimentos realizados em túneis de vento, canais de água, tanques de prova e outros dispositivos. Normalmente, os experimentos fornecem o coeficiente de arrasto, C_D , que é definido pela Equação 3.5. O coeficiente de arrasto é função de outros parâmetros adimensionais como os números de Reynolds (Re), Mach (Ma), Froude (Fr) e da rugosidade relativa da superfície, ε/l . Assim,

$$C_D = (\text{forma, Re, Ma, Fr, } \varepsilon/l) \quad (3.7)$$

Arrasto devido ao atrito

O arrasto devido ao atrito, D_f , é a parte do arrasto provocado pela tensão de cisalhamento, τ_p , sobre o objeto. Através da Equação 3.3 verifica-se que o arrasto por atrito não depende apenas da distribuição de τ_p , mas também do formato do objeto. Como a viscosidade dinâmica dos fluidos usuais é pequena, a contribuição da força de cisalhamento para o arrasto total sobre um corpo é geralmente muito pequena, sendo muitas vezes desprezível. Tal fato pode ser interpretado através do número de Reynolds, que é alto para boa parte dos escoamentos usuais. No entanto, para corpos rombudos ou para baixos números de Reynolds, a maior parte do arrasto pode ser devida ao atrito.

Arrasto devido à pressão

O arrasto devido à pressão, D_p , é a parte do arrasto provocada diretamente pela distribuição de pressão sobre o objeto. Normalmente, essa contribuição ao arrasto total é denominada arrasto de forma devido a sua forte dependência com o formato do objeto. O arrasto devido à pressão é função da magnitude da pressão e da orientação do elemento de superfície onde este atua. A força de pressão pode ser obtida através da Equação 3.3 se a distribuição de pressão na superfície do corpo for conhecida.

Arrasto de corpos compostos

O arrasto num corpo complexo pode ser estimado a partir da decomposição do corpo em várias partes. Como exemplo, o arrasto aerodinâmico em automóveis pode ser estimado pelo procedimento dos corpos compostos. O coeficiente de arrasto nos automóveis pode ser avaliado com

$$C_D = 0,16 + 0,0095 \sum_{i=A}^H N_i \quad (3.8)$$

Onde os valores de N_i podem ser encontrados na Tabela 9.5 de Munson (7). São fornecidos valores para oito componentes: frente, pára-brisa, teto, traseira, parte frontal, parte superior do pára-brisa, parte traseira do teto e do automóvel e capô. Esses componentes são ilustrados na Figura 9.29 de Munson (7).

3.2.2 Sustentação

A sustentação, L , é uma força normal ao escoamento ao longe. Alguns objetos, como fólios, são projetados para produzirem sustentação. Outros são projetados para reduzir a geração de sustentação. Como exemplo, a sustentação em carros tende a reduzir a força de contato entre os pneus e o solo, causando redução de tração e capacidade de fazer curvas. Em tais casos, é desejável reduzir a sustentação.

Conhecidas as distribuições de pressão e de tensão de cisalhamento em torno do corpo, a sustentação pode ser determinada através da Equação 3.4. Normalmente, a sustentação é dada em função do coeficiente de sustentação, C_L (Equação 3.6). Assim como o coeficiente de arrasto, o coeficiente de sustentação pode ser escrito em função de outros parâmetros adimensionais como os números de Reynolds (Re), Mach (Ma), Froude (Fr) e da rugosidade relativa da superfície, ε/l .

$$C_L = (\text{forma, Re, Ma, Fr, } \varepsilon/l) \quad (3.9)$$

O número de Froude, Fr, somente é importante se houver uma superfície livre presente, como em asas submarinas (hidrofólios) utilizadas para suportar navios rápidos de superfície. Geralmente a rugosidade superficial, ε , não é importante para a sustentação. O número de Mach, Ma, é importante para escoamentos subsônicos de alta velocidade

($\text{Ma} > 0.8$) e supersônicos ($\text{Ma} > 1.0$), o efeito do número de Reynolds, Re , normalmente não é muito importante. O parâmetro mais importante para o coeficiente de sustentação é a forma do objeto.

Os dispositivos geradores de sustentação mais comuns (i.e. aerofólios, pás, aerofólios de carros, etc) operam numa faixa larga de números de Reynolds no qual o escoamento apresenta uma natureza de camada limite (os efeitos viscosos ficam confinados nas camadas limites e na esteira). Nesses casos, a tensão de cisalhamento, τ_p , contribui pouco para a sustentação. A maior parte da sustentação é devida a distribuição de pressão na superfície. Por outro lado, se o escoamento em torno do corpo apresenta número de Reynolds baixo ($\text{Re} < 1$), os efeitos viscosos são importantes e a contribuição da tensão de cisalhamento para a sustentação pode ser tão importante quanto a de pressão (7).

4 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

4.1 Modelo

O modelo utilizado nos experimentos possui ângulo de inclinação traseira $\varphi = 30^\circ$, caracterizado por apresentar arrasto máximo (Figura 4.1). As dimensões do modelo representam uma escala de 36% do corpo de Ahmed original. Tais dimensões resultam na largura do modelo ser equivalente a $1/5$ da largura do canal de água circulante do NDF.

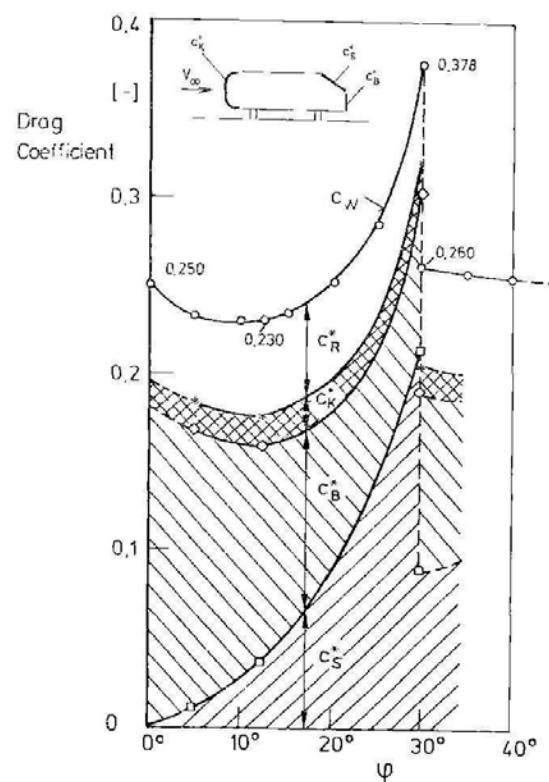
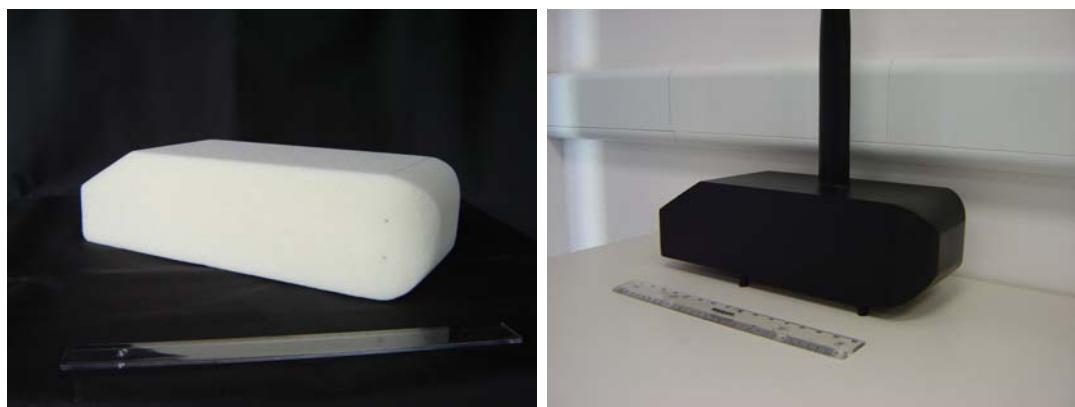


Figura 4.1: Coeficientes de arrasto característicos do corpo de Ahmed para vários ângulos φ de inclinação traseira medidos por Ahmed (3)

Entre as opções para a construção do modelo, incluindo madeira, optou-se por utilizar poliuretano de baixa densidade em bloco (Figura 4.2(a)), revestido com massa plástica automobilística e pintado com tinta spray automobilística. Essa opção resulta numa maior facilidade para modelar o material e num acabamento satisfatório. A Figura 4.2(b) mostra o modelo do corpo de Ahmed finalizado. O custo estimado do modelo foi de R\$ 100,00 (cem reais).



(a) Modelo $r = 36\%$ em poliuretano de baixa densidade em bloco (b) Modelo $r = 36\%$ finalizado

Figura 4.2: Modelo do corpo de Ahmed

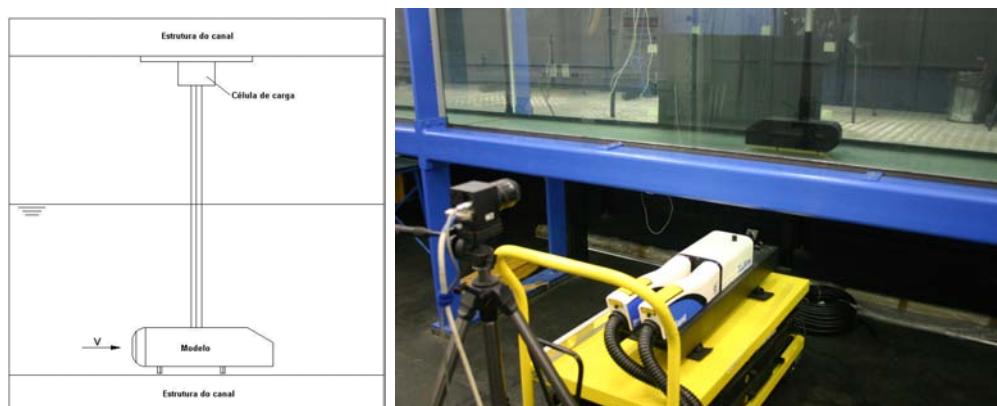
4.2 Canal de água circulante

Os experimentos, medição de arrasto e visualização do escoamento, foram realizados no canal de água circulante do NDF (Figura 4.3). As dimensões úteis do canal de água circulante do NDF: largura: $0.7m$, altura: $0.9m$ e comprimento: $7.5m$. A vazão máxima no circuito é $0.40m^3/s$. Maiores informações a respeito do canal de água circulante do NDF podem ser encontradas em Ássi (6).



Figura 4.3: Canal de água circulante do NDF

O modelo foi montado no primeiro terço da seção de testes do canal de acordo a Figura 4.4.



(a) Desenho esquemático (b) Foto do modelo e parte da instrumentação

Figura 4.4: Montagem do modelo no canal de água circulante do NDF

4.3 Medição de arrasto

A medição das forças e momentos atuantes em diferentes modelos imersos em um escoamento de água consiste em uma das mais importantes tecnologias de medição de um canal de água circulante. Um dos instrumentos utilizados para tanto é a célula de carga (*load cell*). As células de carga podem ser internas, montadas dentro do modelo, ou externas,

localizada fora da seção de testes. A célula de carga utilizada nos ensaios deste trabalho trata-se do tipo externo e uniaxial (medição de força em uma única direção).

Antes da utilização de células de carga baseadas em extensômetros (*strain gages*), Figura 4.5, tornar-se o padrão para pesagem industrial, balanças mecânicas de alavancas eram amplamente utilizadas, incluindo concepções hidráulicas e pneumáticas (8).

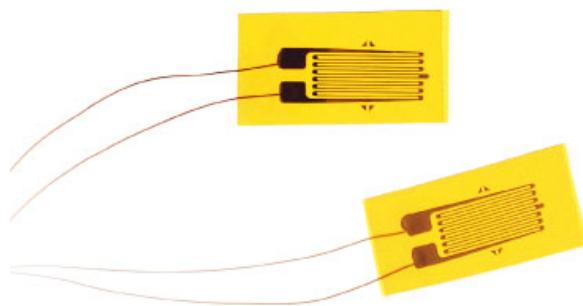


Figura 4.5: Extensômetros resistivos (4)

Em 1843, o físico inglês Sir Charles Wheatstone inventou um circuito em ponte que podia medir resistências elétricas. O circuito da ponte de Wheatstone (Figura 4.6) é ideal para a medição de mudanças de resistência que ocorrem em extensômetros. Apesar do primeiro extensômetro resistivo colável ter sido desenvolvido nos anos 1940, apenas após a consolidação da eletrônica moderna a extensometria tornou-se viável técnica e economicamente. Desde então, os extensômetros proliferaram como componentes de balanças mecânicas e células de carga isoladas. Hoje, exceto por certos laboratórios onde balanças mecânicas de precisão ainda são usadas, células de carga com extensômetros dominam a indústria de pesagem (8). Células de carga com extensômetros convertem a carga atuante nelas em sinais elétricos. Os extensômetros são colados numa viga ou membro estrutural (transdutor) que deforma quando uma força é aplicada. Na maioria dos casos, quatro extensômetros são utilizados para a obtenção de máxima sensibilidade e compensação térmica. Usualmente dois extensômetros estão em tração e dois em compressão. Quando uma força é aplicada, o extensômetro muda sua resistência proporcionalmente ao carregamento.

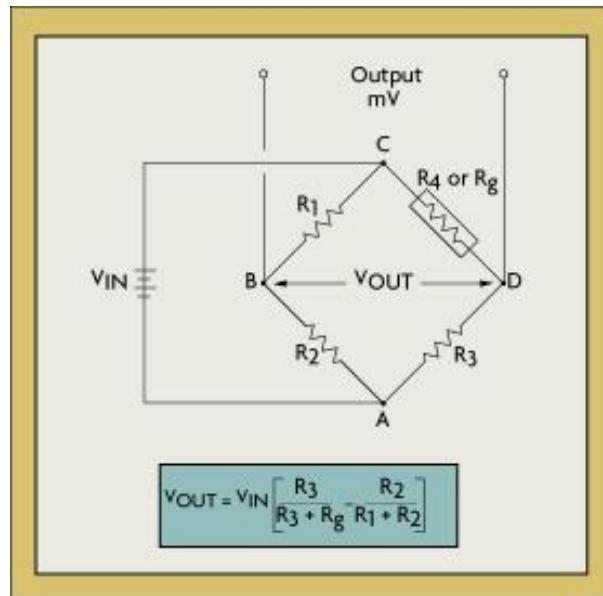


Figura 4.6: Esquema do circuito de ponte de Wheatstone (4)

Uma célula de carga desenvolvida conforme o conceito de medição de deformações resultantes de carregamentos (forças - tração e compressão, momentos) em um corpo rígido (transdutor) possui as seguintes vantagens:

- Praticamente livre de manutenção.
- Baixa probabilidade de falhas.
- Respostas rápidas.
- Requer menos espaço para ser instalada.
- Alta freqüência natural.
- Ausência quase completa de histerese devido à fluênciia.
- Sensibilidade.
- Repetitividade.
- Exatidão.

Quanto à calibração de uma célula de carga uniaxial, o objetivo principal do procedimento de calibração é determinar os coeficientes da reta que relaciona a variação de tensão elétrica da célula de carga com sua correspondente força aplicada.

Devido à necessidade de resultados confiáveis e precisos para a realização dos experimentos, utilizou-se a célula de carga ALFA Instrumentos S-5 (Figura 4.7). Também foi utilizado um sistema de aquisição de dados da National Instruments (módulos NI SCXI 1000, 1531, 1302 e 1314 e o software LabVIEW 7.1).

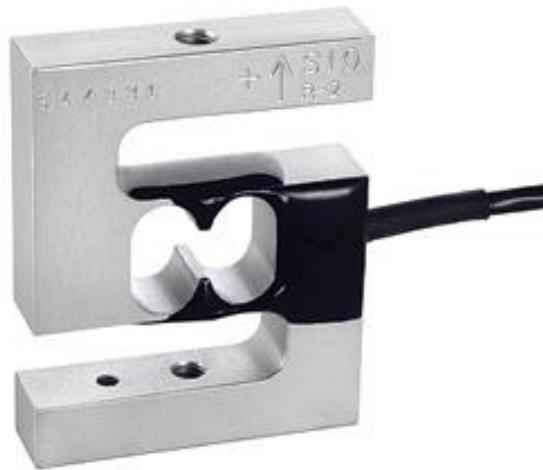


Figura 4.7: Célula de carga ALFA S-5 (5)

4.4 Medição de velocidade

A velocidade média do escoamento de água no canal de água circulante do NDF utilizada nos ensaios apresentados neste trabalho foi medida através de um medidor eletromagnético de vazão modular de corrente contínua SIEMENS SITRANS F M MAGFLO MAG5000/MAG3100 W. Com a medição da vazão obtém-se a velocidade média do escoamento de água no canal através da seguinte equação:

$$V = \frac{Q}{S} \quad (4.1)$$

onde: V - velocidade média do escoamento de água no canal (m/s), Q - vazão mé-

dia do escoamento de água no canal (m^3/s) e S - área da seção transversal do escoamento de água no canal (m^2).

Num medidor eletromagnético de vazão modular de corrente contínua as bobinas do sensor geram um campo magnético consistente. O líquido (água) que flui através do sensor induz uma tensão proporcional à velocidade da vazão. Entretanto, existem técnicas mais precisas de medição de velocidade, tal como Anemometria de Filme Quente (CTA - *Constant Temperature Anemometry*).

4.5 Blocagem

A maioria dos testes realizados em túneis de vento e canais de água almejam prever forças, pressões, momentos e outros parâmetros que a estrutura em tamanho real irá experimentar quando exposta a uma situação não confinada. Os limites de um túnel de vento ou canal de água, por exemplo, paredes e superfície livre, impõem restrições ao escoamento ao redor do modelo, sendo que os valores medidos dos parâmetros do escoamento diferem daqueles para a condição não confinada e necessitam de correção para a obtenção dos valores não confinados.

Corpos rombudos podem ser considerados aqueles para os quais o escoamento é dominado por grandes regiões de escoamento separado, como placas planas ou prismas retangulares normais ao escoamento, cilindros circulares ou elípticos em certos regimes e aerofólios com ângulos de ataque elevados (condição de *stall*).

O efeito de blocagem resulta no aumento de velocidades do escoamento ao redor do corpo e em sua esteira. A blocagem afeta as forças ao longo do escoamento (arrasto) e normais ao escoamento (sustentação e lateral) e é importante para todos os corpos com razão de área de blocagem, A/S , maior do que 1 (um) porcento. A razão de área de blocagem é a razão entre A : área da seção transversal do modelo, e S : área da seção transversal da seção de testes.

Efeitos de blocagem podem ser desprezados apenas se o modelo é muito pequeno em relação ao túnel de vento ou canal de água (menos de 1 porcento da área da seção transversal). Em estudos de engenharia aerodinâmica e hidrodinâmica, essa exigência está em conflito direto com a necessidade de testar modelos grandes para alcançar números de Reynolds adequados, permitir a representação de pequenos detalhes e gerar forças grandes o suficiente para permitir suas medições corretas. Conseqüentemente, razões de área de blocagem, A/S , de 5 porcento são comuns e até 10 a 15 porcento são utilizadas, necessitando de correções significativas para os resultados medidos (9).

O modelo do corpo de Ahmed utilizado neste trabalho possui razão de área de blocagem, $A/S = 6,9\%$, e, de acordo com a Referência (9), o método recomendado para a correção do efeito de blocagem no coeficiente de arrasto (C_D) é o Método de Escoamento Quasi-Afilado (*Quasi-streamlined Flow Method*). O coeficiente de arrasto corrigido, C_{Df} , isto é, para a condição não confinada, é calculado através da Equação 4.2.

$$\frac{C_{Df}}{C_D} = 1 - \lambda_1 \lambda_3 \lambda_4 \left(1 + 0,51 \frac{\sqrt{A}}{c} \right) \frac{cA}{S^{1,5}} - 0,5 C_D \frac{A}{S} \quad (4.2)$$

onde:

$$\lambda_1 = 0,72 \left(\frac{b_d}{H_d} + \frac{H_d}{b_d} \right) \quad (4.3)$$

$$\lambda_3 = \lambda_3 \left(\frac{c_1}{c} \right) + \frac{(c - c_1)}{c} \quad (4.4)$$

$$\lambda_4 = 1 + 0,75 \cot^2 \left[\pi \left(\frac{b_d/2 - e}{b_d} \right) \right] \quad (4.5)$$

5 VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS - PIV

O princípio básico envolvido na técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas, e particularmente, de alta densidade de partículas (PIV - *Particle Image Velocimetry*) envolve a definição fundamental da velocidade (Referências (10) e (11)), e estima a velocidade euleriana local a partir de um deslocamento em um intervalo de tempo.

A técnica se baseia na observação de partículas que acompanham o movimento do fluido, por exemplo, fumaça ou material particulado. Em medições quantitativas, as partículas são iluminadas com uma fonte de luz estruturada (laser) para que suas imagens sejam capturadas e posteriormente analisadas. A captura das imagens em instantes diferentes define o intervalo de tempo e o deslocamento das partículas é obtido do processamento das imagens capturadas.

Essa técnica apresenta as seguintes vantagens:

- Consiste em uma técnica não intrusiva.
- Podem ser obtidos campos de velocidade instantâneos em uma dada seção do escoamento.

Já as principais desvantagens da técnica são:

- Medição bidimensional do escoamento.
- Depende de partículas no escoamento e se elas o acompanham.
- Freqüência de aquisição de dados ao longo do tempo.

O sistema PIV envolve uma fonte de luz (laser), uma câmera, um sistema computacional dedicado e as partículas que estão no escoamento. O escoamento é iluminado na área de interesse por um plano de laser pulsante. A imagem é capturada pela câmera, que pode ter filme comum ou uma matriz CCD (*charged-coupled device*), e está posicionada ortogonalmente ao plano iluminado. As imagens são transmitidas ao computador, onde são processadas a fim de se obter um campo vetorial. Um esquema do sistema PIV é apresentado na Figura 5.1.

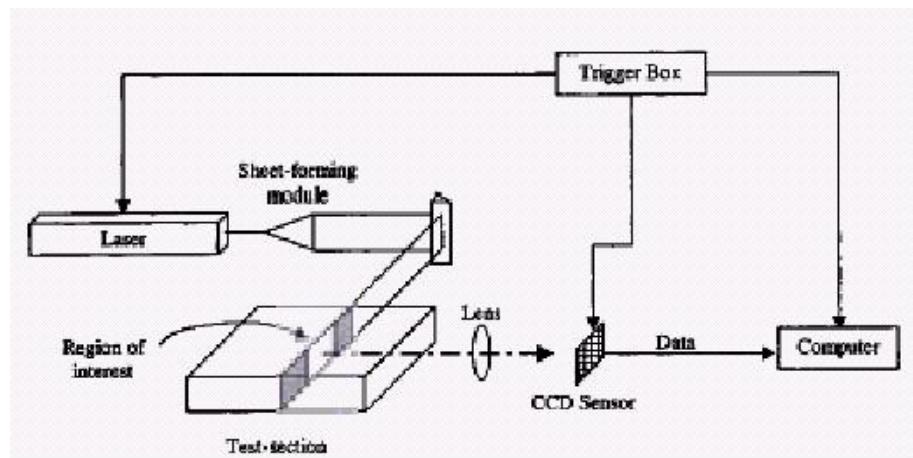


Figura 5.1: Esquema de um sistema PIV

A calibração que essa técnica exige deve ser feita de tal modo que relate o deslocamento da imagem com o deslocamento real; o *zoom* da câmera exige tal relação. O processamento da imagem para obtenção do deslocamento das partículas também é calibrado através de deslocamentos conhecidos de um corpo sólido, sendo utilizados deslocamentos translacionais e rotacionais (12).

5.1 Classificação

Os métodos de velocimetria por imagem consistem naqueles que medem o campo de velocidades, seja bidimensional ou tridimensional, através de imagens obtidas do escoamento. Cada método apresenta características particulares quanto ao sistema de captura de imagem, à quantidade de componentes de velocidade medidas, ao tipo de imagem obtida e

ao processamento realizado.

Uma das técnicas mais usadas para medições quantitativas é classificada como velocimetria com luz pulsante (PLV) (13), sendo que a técnica que será usada neste trabalho se encaixa sob esta classificação. Métodos de velocimetria por imagem são bem conhecidos da literatura (10) e são classificados de acordo com a concentração de partículas por unidade de volume: LSV (*Laser Speckle Velocimetry*), PTV (*Particle Tracking Velocimetry*) e PIV de alta densidade (*Particle Image Velocimetry*).

Na técnica LSV, a concentração de partículas é muita alta de tal modo que as imagens capturadas das partículas se sobrepõem no plano de imagem. Padrões de interferência são criados pela diferença de fase entre as imagens; o padrão de interferência local é a superposição de imagens de um grupo local de partículas. O deslocamento do padrão permite a medição da imagem.

Em PTV, a concentração de partículas é baixa suficiente para que seja improvável a superposição de imagens. Os pontos no plano de imagem são dispostos esparsamente possibilitando que múltiplas exposições (múltiplos pulsos de luz) ou exposições contínuas de partículas individuais marquem trajetórias pequenas em relação ao espaçamento entre partículas. Nesta técnica é possível a medição da velocidade através do deslocamento de cada partícula.

A PIV de alta densidade tem concentração de partículas entre as duas técnicas supracitadas. Não é possível identificar cada partícula para medir seu deslocamento como em PTV e as imagens não se sobrepõem como em LSV. A medição da velocidade é feita por grupos de partículas. A técnica PIV que será empregada usa luz pulsante, partículas inertes e imagens comuns (não com franjas de interferência). A técnica é bidimensional.

5.2 Captura de imagens

Os aspectos importantes na captura de imagem são a fonte luminosa, as partículas, a gravação e a sincronização entre iluminação e a gravação e a transmissão de dados. A sincronização é realizada por um equipamento eletrônico responsável pela coordenação do pulso do laser com a captura da imagem e pelo acionamento da transmissão de dados de maneira a realizar uma medição bem sucedida.

5.2.1 Laser

Um laser de potência elevada é necessário pois a captura da imagem pela câmera é feita ortogonalmente à fonte do laser, que é uma direção de menor intensidade de luz espalhada pela partícula. Um diagrama de intensidade de espalhamento de luz de uma partícula é apresentado na Figura 5.2.

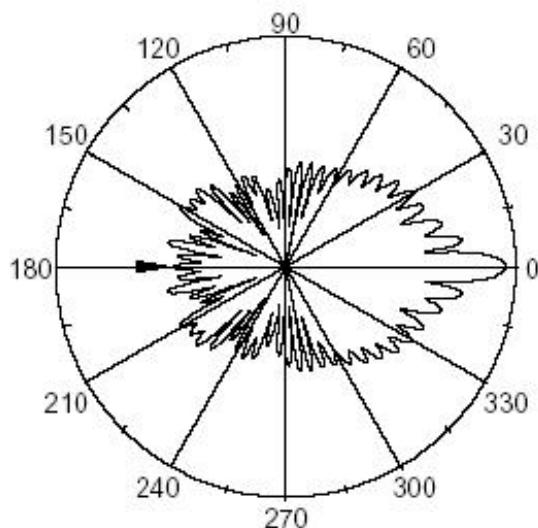


Figura 5.2: Espalhamento de luz de uma partícula

Fontes de luz contínuas ou pulsadas podem ser usadas. As fontes contínuas devem ser utilizadas com obturadores de forma que formem pulsos, o que resulta em desperdício de energia. Preferem-se, então, fontes pulsadas, como lasers, que são bem adequados para a formação de um plano de luz e produzem pulsos de curta duração (da ordem

de nanosegundos). Para liberar o pulso de laser, a energia é armazenada em bancos de capacitores.

Os tipos de lasers mais usados em PIV são os de vapor de metal, de rubi e do tipo Nd:YAG (Neodímio: Ítrio-Alumínio-Granada). Normalmente utilizam-se duas fontes de laser de forma que se faça um intervalo Δt entre pulsos da ordem de microsegundos com devida sincronização. A freqüência de disparos de cada fonte é da ordem de dezenas por segundo, limitando a aquisição de dados ao longo do tempo.

O intervalo Δt entre os pulsos do laser é o parâmetro ajustável mais importante no sistema PIV (14), pois determina a máxima e mínima velocidades que podem ser medidas. A duração do pulso δt determina quanto a imagem é congelada. A razão $\delta t/\Delta t$ pequena é desejável pois resulta numa melhor definição da imagem e um melhor aproveitamento da energia da fonte de luz.

O feixe de luz deve ser manipulado para formar o plano iluminado no escoamento. Usa-se uma lente cilíndrica combinada com uma esférica. A lente cilíndrica faz o feixe se abrir em uma direção e a esférica faz o feixe se focar na direção perpendicular ao plano aberto.

5.2.2 Partículas

Alguns cuidados com as partículas devem ser tomados. O primeiro de todos é a partícula espalhar luz suficiente para ser detectável pela câmera. Partículas com propriedades de espalhamentos ruins exigem uma fonte de laser mais potente ou uma câmera mais sensível, aumentando o custo do equipamento. Outra exigência não menos importante, mas de fato essencial: as partículas devem seguir o escoamento sem escorregamento excessivo para que possam representar razoavelmente a velocidade do escoamento local.

A escolha da partícula apropriada envolve as duas exigências anteriormente citadas: devem ser grandes para espalhar luz suficiente, mas não podem ser grandes demais provocando escorregamento demasiado. Em escoamentos de baixas velocidades, deve-se

levar em conta o empuxo que a partícula sofre, resultando em escolhas de partículas com densidades próximas ao do fluido. Na Referência (15), a escolha de partículas é discutida.

5.2.3 Gravação da imagem

A imagem pode ser registrada em filmes fotográficos ou em matrizes digitais CCD (*coupled-charged device*). Filmes fotográficos têm uma resolução superior à do CCD, permitindo uma resolução espacial superior. Matrizes CCD apresentam resolução até 2048 x 2048 pixels, enquanto um filme fotográfico de 100mm x 125mm pode ter uma resolução de 30000 x 37500 pixels.

A principal vantagem de matrizes CCD é sua fácil integração com o computador, facilitando o processamento da imagem. Matrizes CCD não precisam de processamento fotográfico (revelação), digitalização de imagens, filmes e papéis especiais, o que torna seu custo mais baixo e seu uso conveniente. A resolução de matrizes CCD atuais satisfaz os requisitos da maioria dos experimentos.

5.3 Processamento das imagens

O processamento das imagens digitais obtidas é feito em computador. As etapas de processamento consistem em correlação estatística, identificação do pico de correlação, validação dos vetores e pós-processamento do campo vetorial. O pós-processamento do campo permite a obtenção de grandezas derivadas espacialmente, característica interessante de técnicas de instrumentação que medem campos.

5.3.1 Correlação estatística

A medição da velocidade envolve a determinação do deslocamento de um grupo de partículas através de sua imagem em dois instantes de tempo distintos. Como a velocidade calculada é a média em um intervalo de tempo Δt entre as imagens, um intervalo pequeno resulta numa melhor aproximação.

A seguir, será descrito o procedimento de correlação estatística para dois quadros com imagens distintas (16). A operação de correlação cruzada é:

$$C(r, s) = \sum_i \sum_j I_1(i, j)I_2(i - r, j - s) \quad (5.1)$$

onde $C(r, s)$ é a correlação no pixel (r, s) , $I(i, j)$ é a intensidade luminosa do pixel de coordenada (i, j) e os índices 1 e 2 indicam a imagem referente.

Sendo uma operação de somatória dupla, o cálculo torna-se demorado. Desse modo, utiliza-se a transformada rápida de Fourier (FFT) da intensidade e calcula-se a correlação no domínio da freqüência, tornando o cálculo da correlação mais eficiente. A Figura 5.3 apresenta um exemplo de resultado de correlação cruzada.

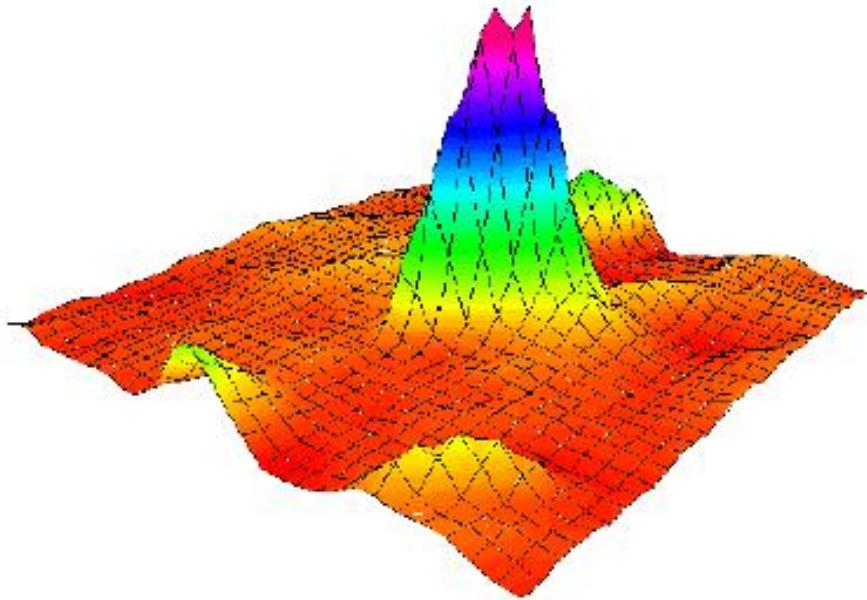


Figura 5.3: Exemplo de resultado de correlação cruzada entre duas imagens

Fica clara a vantagem deste procedimento quando aparece apenas um pico de correlação fornecendo a direção, sentido e magnitude do deslocamento; portanto não há ambigüidade direcional. Outra vantagem é conseguir medir deslocamentos menores que um diâmetro da imagem da partícula. Quando se usa apenas um quadro para as duas ima-

gens, as imagens estariam sobrepostas impossibilitando a medição de seu deslocamento. Uma outra vantagem apresentada pela correlação cruzada é uma melhor razão entre sinal e ruído (SNR).

Nota-se que o deslocamento medido é uma média dos deslocamentos das partículas na área de interrogação. Deve-se garantir um número de partículas suficiente dentro da área de interrogação (16), bem como a inexistência de gradientes de velocidade na área de interrogação para se ter uma boa medida por PIV. Um número suficiente de partículas na área de interrogação é uma das condições para se produzir uma boa razão entre sinal e ruído.

5.3.2 Identificação do pico

O resultado da correlação estatística é uma função de correlação definida num plano. Para a determinação do deslocamento, um procedimento de identificação do pico é necessário. O modo mais simples é identificar o pixel que tem maior valor de correlação. Como em geral o pico não se encontra em um pixel isolado devido ao ruído da imagem e ao tamanho das partículas, que ocupam mais do que um pixel, usam-se métodos de interpolação ou aproximação para a região de alta correlação.

Um método usado é o do centróide, que o ponto de máximo é obtido fazendo uma média das coordenadas da região ponderada pelo valor da correlação de cada pixel. Outro método aplica interpolação da região de máximo com curvas. As curvas mais usadas são perfis parabólicos e gaussianos.

5.3.3 Validação dos vetores

A validação de vetores é necessária porque, mesmo quando há boas condições de medição, obtêm-se vetores espúrios. Em boas condições isso ocorre devido a uma baixa SNR e o pico de correlação se confunde com picos de ruídos. Vetores espúrios são aqueles que têm direção, sentido e/ou magnitude bem diferentes dos demais a sua volta. O procedi-

mento de eliminação segue um critério de tolerância estabelecido pelo usuário, onde os vetores espúrios são desprezados. Estes vetores podem ser substituídos por outros vetores calculados através de interpolações da vizinhança de onde foram excluídos.

5.3.4 Pós-processamento

O pós-processamento do campo vetorial medido consiste no cálculo de grandezas derivadas e integrais através de métodos numéricos conhecidos. Cálculo de vorticidade, divergência e linhas de corrente são exemplos. Métodos numéricos para cálculos de derivadas como método de diferenças finitas podem ser facilmente aplicados ao campo medido; métodos de integração como regras de quadratura também são utilizados. A Referência (12) aborda a acurácia de medições de vorticidade com PIV, usando método de diferenças finitas, como esquemas de diferença centrada e extração de Richardson.

5.4 Fontes de erros

As fontes de erros podem ser (11):

- Erro aleatório devido ao ruído.
- Erro de aproximação devido ao procedimento de identificação do pico de correlação.
- Erro devido a gradientes de velocidade.
- Erro de escorregamento de partículas.
- Erro de aceleração.

O erro de gradiente ocorre devido à rotação e/ou à deformação do volume de fluido em uma área de interrogação e aparece principalmente em escoamentos turbulentos cujas pequenas escalas são menores que a área de interrogação. O erro de escorregamento pode ser reduzido com uma boa escolha de partículas conforme escrito anteriormente.

Outro erro introduzido ao sistema surge do alinhamento da câmera com o plano iluminado, um erro de paralaxe.

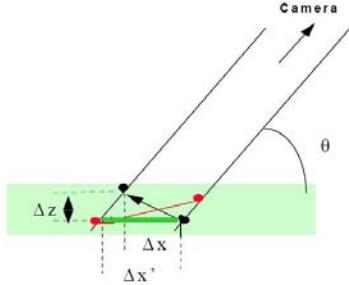


Figura 5.4: Erro de paralaxe (faixa verde é uma seção do plano iluminado)

O erro de aceleração ocorre porque se aproxima a velocidade euleriana através da velocidade lagrangiana das partículas. Esse erro é eminentemente quando partículas percorrem trajetórias curvas dentro da área de interrogação. Um intervalo de tempo Δt entre imagens pequeno diminui este erro.

Segundo (16), para uma boa confiabilidade na correlação estatística, recomenda-se que em cada área de interrogação se encontrem ao menos 7 imagens de partículas. Quanto ao método de identificação do pico, o ajuste por curva gaussiana apresenta melhor resultado dentre os métodos estudados (12). Em relação ao tamanho da partícula, recomenda-se que a imagem da partícula ocupe aproximadamente 2 pixels do quadro para câmeras CCD (11).

O parâmetro ajustável mais importante é o intervalo de tempo. A recomendação para escolha do Δt ótimo é dada pela relação (14):

$$\Delta t_{opt} = \sqrt{\frac{2\sigma_{\Delta x}}{Ma}} = \sqrt{\frac{2cd_\tau}{Ma}} \quad (5.2)$$

onde M é a ampliação da imagem, $\sigma_{\Delta x} = cd_\tau$ é a incerteza no deslocamento, d_τ é o tamanho da imagem da partícula e a é a aceleração do fluido. Como a aceleração não é conhecida, é necessário um procedimento iterativo.

6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

6.1 Medição de arrasto

De acordo com Vuolo (17), os erros estatísticos são minimizados com a repetição das medições um grande número de vezes. Dessa maneira, foram realizadas cinco séries de medições, com diferentes números de Reynolds cada uma, com números de Reynolds entre 4.19×10^4 e 2.22×10^5 . Cada série de medições consistiu num tempo de aquisição de 200 s, com taxa de aquisição de dados de 100 Hz , totalizando 20 mil instantes de tempo. A taxa de aquisição de dados utilizada, 100 Hz , obedece com folga o teorema de Shannon-Nyquist, onde a freqüência de aquisição de um evento deve ser, pelo menos, o dobro da maior freqüência de interesse para que não ocorra *aliasing* (6). Os sinais foram filtrados analogicamente com banda passa-baixa com freqüência de corte de 10 Hz .

Os valores do coeficiente de arrasto, C_D , e do coeficiente de arrasto corrigido do efeito de blocagem (Equação 4.2), C_{Df} , apresentados a seguir, foram corrigidos do arrasto provocado pelo suporte superior do modelo descontando do arrasto total medido a parcela referente ao arrasto do suporte, ensaiado isoladamente para a obtenção de seu coeficiente de arrasto. Os valores obtidos para a configuração do corpo de Ahmed com ângulo de inclinação traseira $\varphi = 30^\circ$ foram:

$$C_D = 0.515 \quad (6.1)$$

$$C_{Df} = 0.383 \quad (6.2)$$

No estudo experimental realizado por Ahmed (3), a configuração do corpo de Ahmed estudada neste projeto, com ângulo $\varphi = 30^\circ$, representa o caso de maior arrasto, $C_D = 0.378$, conforme a Figura 4.1, sendo que 85 % do arrasto é devido à pressão e os outros 15 % restantes à viscosidade.

Comparando o resultado obtido por Ahmed (3) com o resultado experimental deste trabalho para o coeficiente de arrasto, C_D , verifica-se que o último é 36 % maior. Já quando o resultado do coeficiente de arrasto corrigido do efeito de blocagem, C_{Df} , é comparado ao resultado obtido por Ahmed (3), tem-se que o resultado experimental é 1 % maior. Essa menor diferença para C_{Df} é um indicativo da validade da correção do efeito de blocagem para o coeficiente de arrasto.

6.2 Visualização do escoamento ao redor do corpo de Ahmed

Os equipamentos de PIV utilizados (Figura 6.1) para a medição do campo de velocidades ao redor do corpo de Ahmed foram fornecidos pela empresa TSI e as partículas são poliamida 12 - $11\mu m$ (Degussa).

Nesses experimentos, foi usado número de Reynolds 9.78×10^4 , tendo como referência a velocidade do escoamento ao longe e o comprimento do modelo.

Tendo em vista que a maior parte do arrasto de um modelo do tipo utilizado neste trabalho é gerada pelo descolamento do escoamento na parte traseira do modelo e pela formação de uma estrutura de esteira de vórtices, concentrou-se os experimentos nessa região, que resultaram na medição do campo de velocidades em cinco planos horizontais e cinco planos verticais, todos longitudinais à direção do escoamento, conforme pode ser visto nas Figuras 6.2(a) e 6.2(b).

Para cada plano foram capturados dez pares de imagens à taxa de 4 Hz . O intervalo entre os pulsos do laser foi $\Delta t = 1ms$. O tamanho da janela de interrogação utilizado foi de 64×64 pixels.

Os vetores de velocidade 2D obtidos do processamento de PIV foram convertidos em vorticidade e linhas de corrente do escoamento.



Figura 6.1: Instrumentação de PIV do NDF

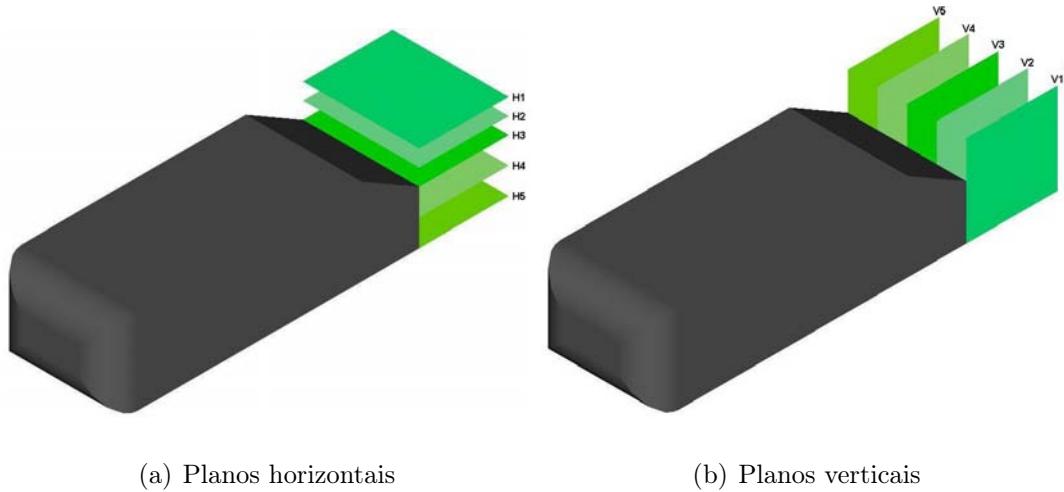


Figura 6.2: Planos de medição utilizando PIV

Apesar do escoamento de esteira de corpos rombudos ser não uniforme, o escoa-

mento médio exibe macroestruturas que parecem governar o arrasto de pressão criado na traseira. As principais características desse escoamento podem ser vistas na Figura 6.3.

A camada cisalhante, surgindo da aresta lateral da inclinação, gira em um vórtice longitudinal, identificado como o vórtice C na Figura 6.3, de maneira semelhante ao fenômeno observado na ponta de asas de baixa razão de aspecto. O vórtice C pode ser observado claramente nas Figuras 6.5 a 6.8, correspondentes aos planos horizontais. Nas arestas superior e inferior da parte vertical da traseira, a camada cisalhante gira como indicado em duas regiões A e B de escoamento recirculante, situadas uma sobre a outra. Essas regiões podem ser visualizadas nas figuras correspondentes ao planos verticais, principalmente nas Figuras 6.10 a 6.12, onde essas regiões aparecem como regiões de velocidade adversa ou como região de vorticidade intensa (cores vermelha e azul). Nas figuras referentes aos planos horizontais (Figuras 6.4 a 6.8) também pode ser verificada a região correspondente aos vórtices A e B . Essa região encontra-se logo atrás do modelo. Consequentemente os escoamentos recirculantes A e B podem ser pensados como dois vórtices “ferradura” situados um sobre o outro em uma bolha de separação indicada por D na Figura 6.3. Nas Figuras 6.10(b), 6.11(b) e 6.12(b) pode-se observar a região D . Na superfície inclinada estão presentes uma região semi-elíptica fechada de escoamento circulante E , ladeada por duas regiões triangulares de escoamento colado F . As únicas figuras disponíveis dessas regiões, E e F , são as Figuras 6.5(a) e 6.5(b). Entretanto, por terem magnitude inferior ao do vórtice C , apenas o efeito desse último é observado. Para observar as regiões dos vórtices E e F seria necessário utilizar planos verticais que cobrissem a superfície inclinada, o que não foi possível devido ao posicionamento do equipamento de PIV e do modelo de acordo com as instalações disponíveis.

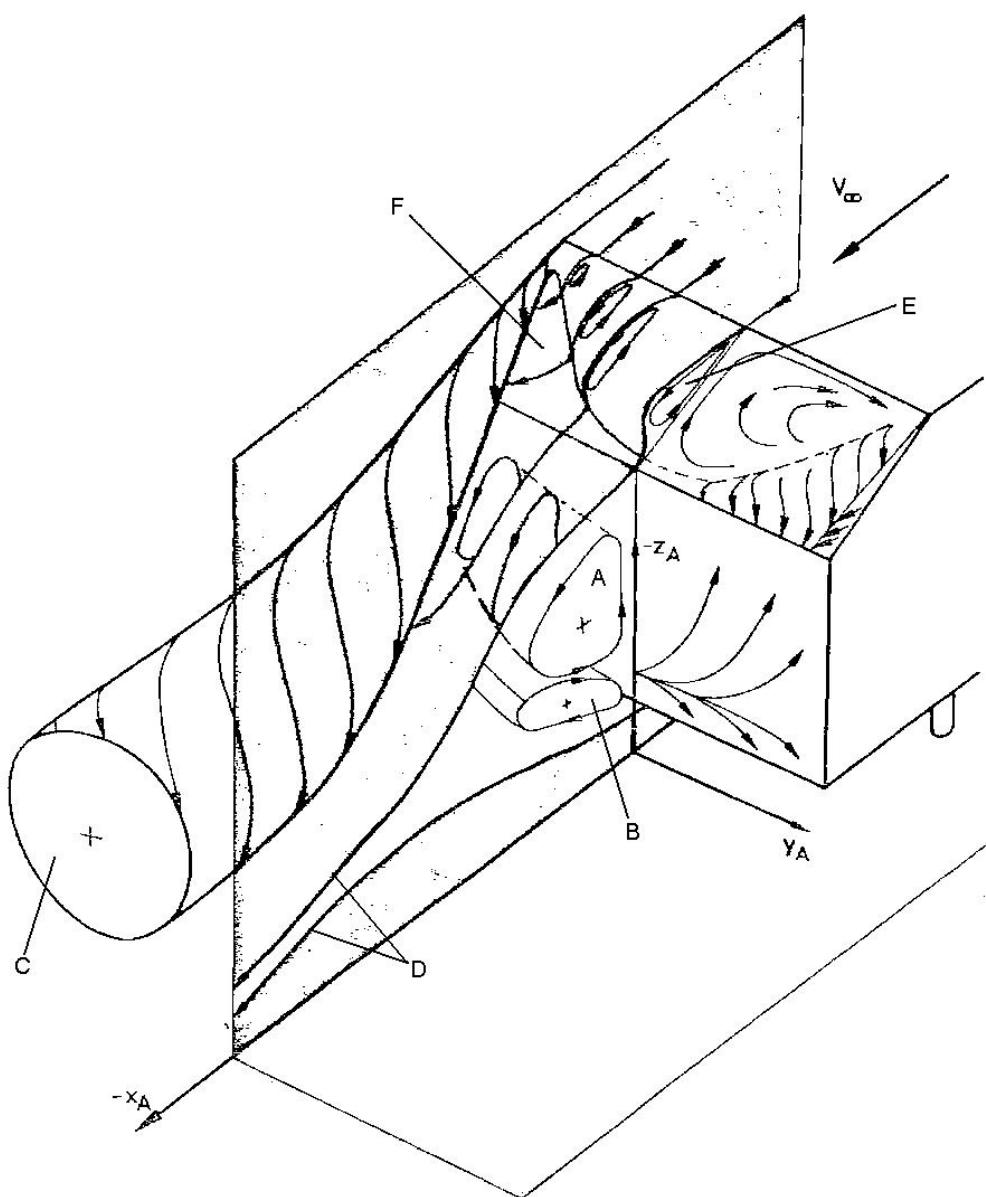


Figura 6.3: Representação esquemática da condição de arrasto alto ($\varphi = 30^\circ$) (3)

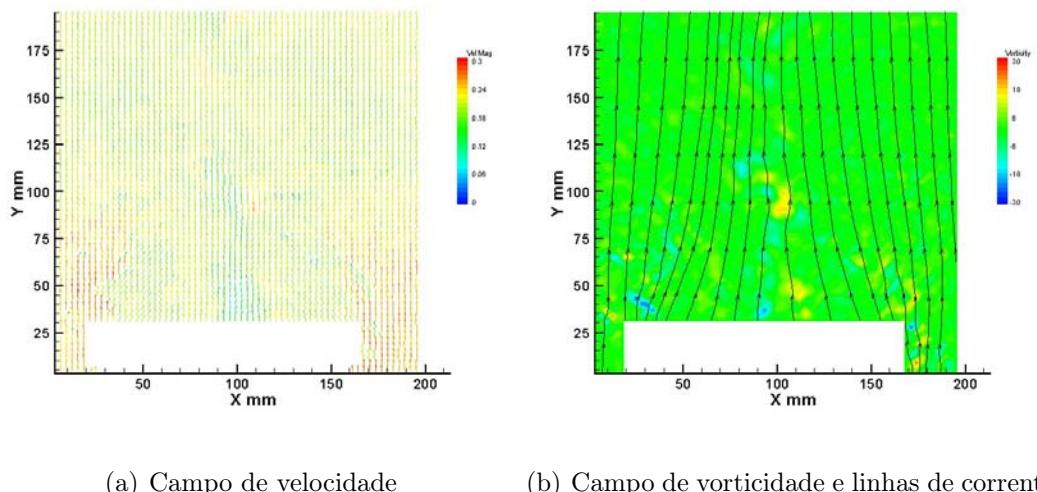


Figura 6.4: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H1

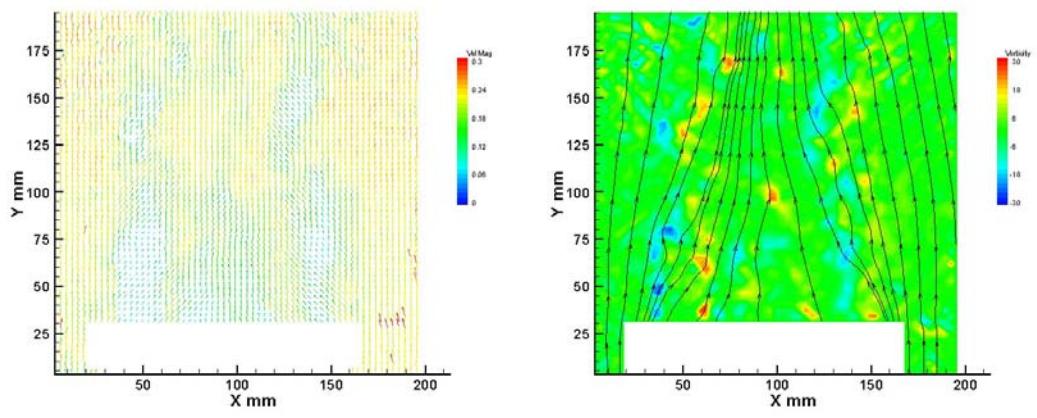


Figura 6.5: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H2

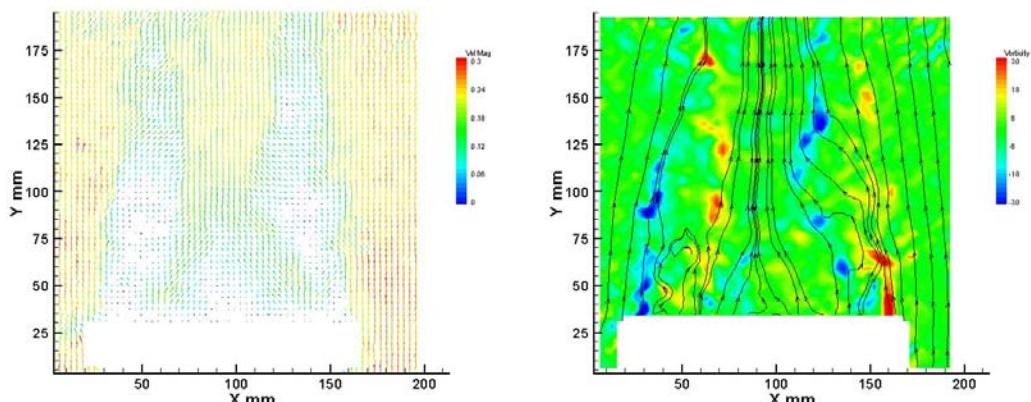


Figura 6.6: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H3

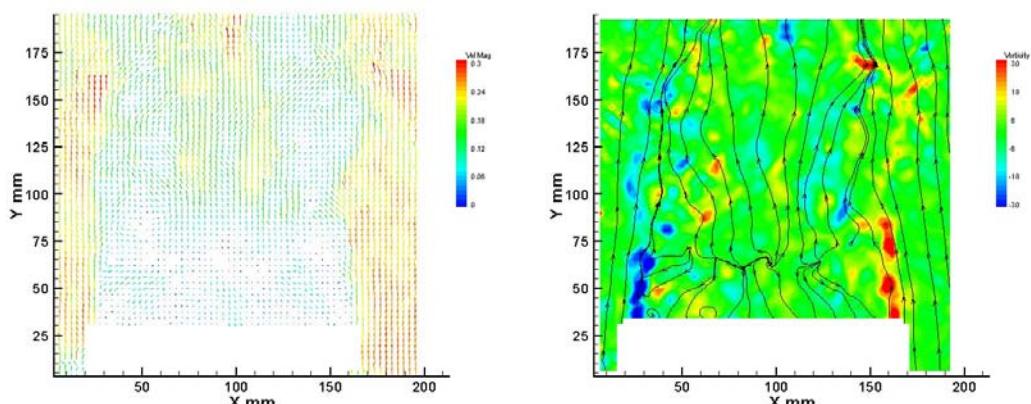
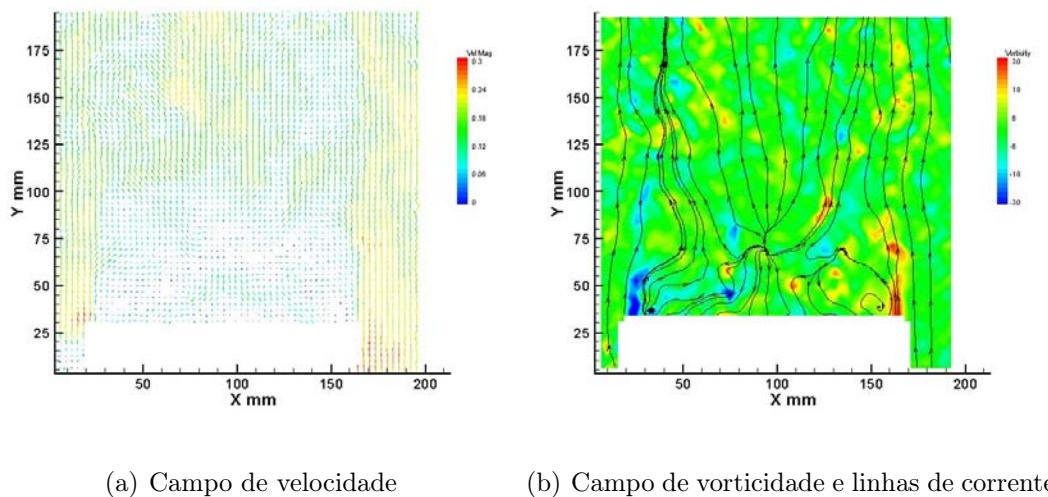


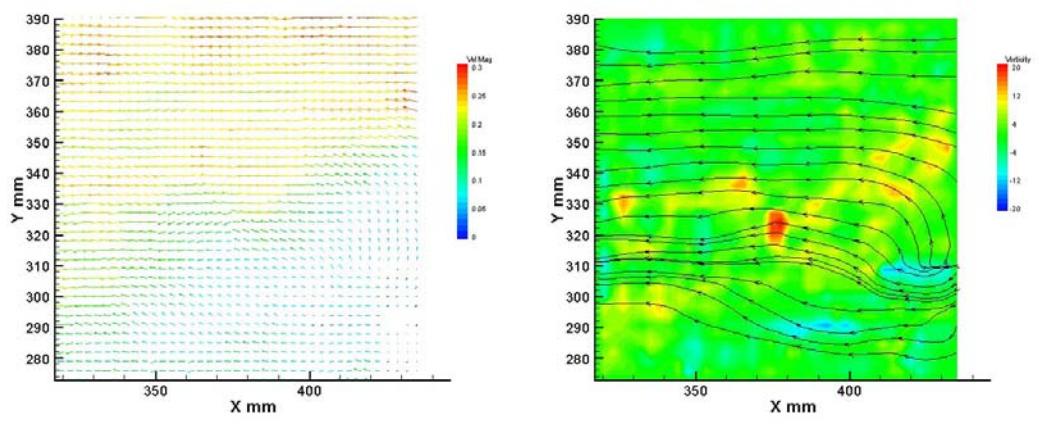
Figura 6.7: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H4



(a) Campo de velocidade

(b) Campo de vorticidade e linhas de corrente

Figura 6.8: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano H5



(a) Campo de velocidade

(b) Campo de vorticidade e linhas de corrente

Figura 6.9: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V1

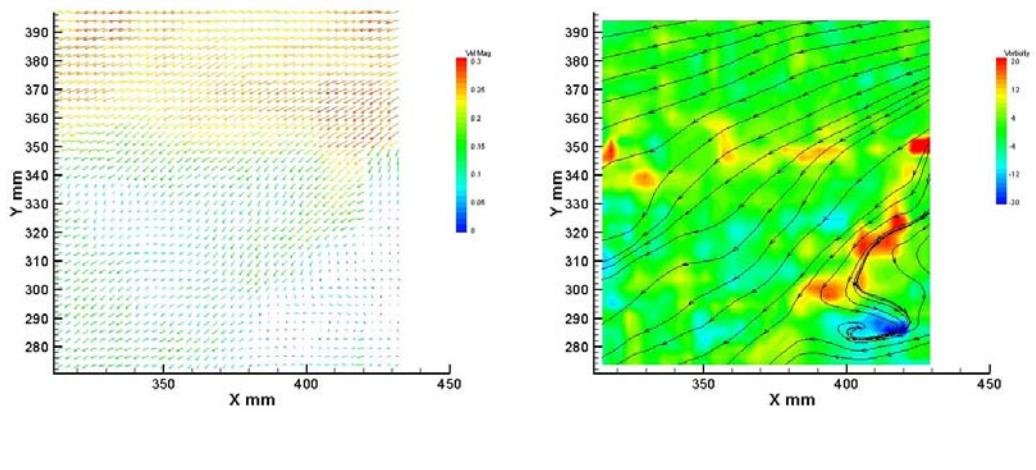


Figura 6.10: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V2

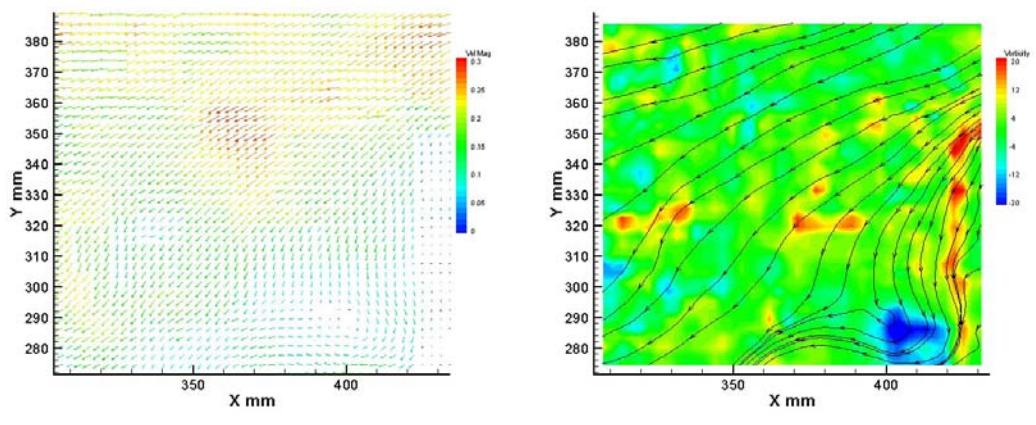


Figura 6.11: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V3

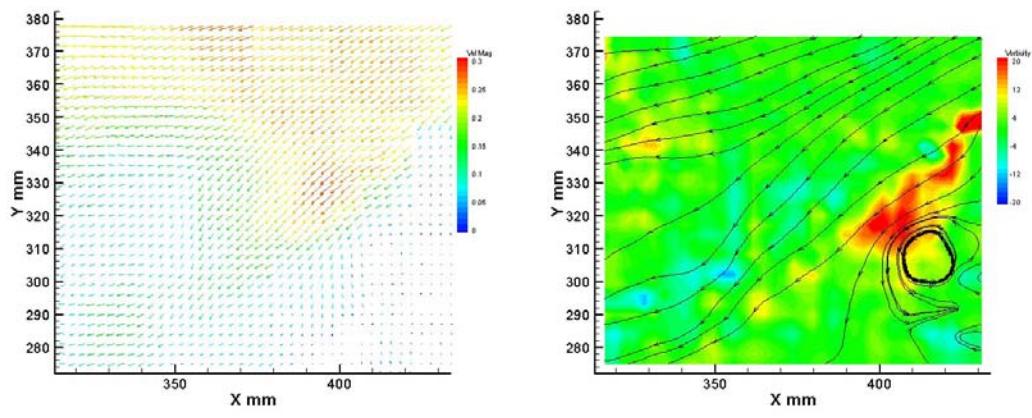


Figura 6.12: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V4

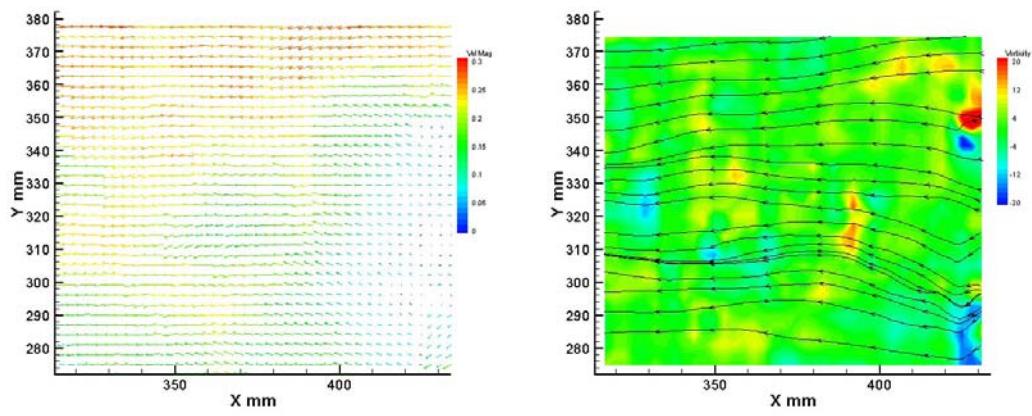


Figura 6.13: Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano V5

7 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Para estudar um dado fenômeno de escoamento, é necessário resolver as equações que regem o comportamento de fluidos reais. Como se tratam de equações não-lineares utiliza-se a simulação numérica aplicando as condições de contorno adequadas para a geometria estudada. Nas próximas páginas descreve-se toda a fundamentação teórica que o método utiliza. Para o volume de controle em estudo, a equação para as quais procuram-se as soluções numéricas são as equações de Navier-Stokes. Para escoamentos turbulentos, modelos de turbulência são utilizados nessa modelagem.

O Método dos Volumes Finitos (MVF) foi desenvolvido para a análise de problemas complexos de Mecânica dos Fluidos. As equações são obtidas através da realização de balanços da propriedade em questão (seja ela massa, quantidade de movimento, entalpia, etc) nos volumes elementares, ou volumes finitos, ou então, integrando sobre um volume elementar, no espaço e no tempo (Referência (18)).

O fato das equações aproximadas representarem a conservação ao nível de volumes elementares vem do fato que a solução da equação diferencial (por exemplo, Equação de Navier-Stokes) representa a conservação da propriedade em nível de ponto (infinitesimal).

Para obter a solução é utilizada uma técnica de volume de controle que consiste na:

- Divisão do domínio contínuo em volumes de controles discretos usando a malha computacional.
- Integração das equações nos volumes de controle individuais para construir equa-

ções algébricas para as variáveis discretas dependentes, tais como: velocidades e temperatura.

- Linearização das equações discretas e solução do sistema de equações lineares resultante para produzir valores atualizados das variáveis independentes.

A integração das equações diferenciais será mostrada para um conjunto de equações unidimensionais, sendo que estas podem ser facilmente estendidas para os casos bidimensional ou tridimensional. Sejam as equações diferenciais unidimensionais para continuidade, quantidade de movimento e quantidade escalar ϕ :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = 0 \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + F \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S_\phi \quad (7.3)$$

Essas equações podem ser integradas em relação ao volume de controle empregando o Teorema da Divergência:

$$\int_{V,y} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) dV = \int_A (\rho u) dA \quad (7.4)$$

A integração das Equações 7.1, 7.2 e 7.3 resulta:

$$\frac{M_p - M_p^0}{\Delta t} + \dot{M}_e - \dot{M}_w = 0 \quad (7.5)$$

$$\dot{M}_e u_e - \dot{M}_w u_w = -(p_e - p_w) A + \left[\frac{\mu_e}{\Delta x_e} (\mu_E - \mu_P) - \frac{\mu_w e}{\Delta x_w} (\mu_P - \mu_W) \right] A + S_\phi \quad (7.6)$$

$$M_e \phi_e - M_w \phi_w = \left(\Gamma_e \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x_e} - \Gamma_w \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x_w} \right) A + S_\phi \Delta V \quad (7.7)$$

As Equações 7.5, 7.6 e 7.7 obtidas são equações algébricas que podem ser resolvidas, dado que as variáveis indeterminadas (u , p e ϕ) são interpoladas de uma maneira que relaciona seus valores nas faces do volume de controle aos valores no centro do volume de controle. O procedimento de discretização se baseia no esquema ilustrado na figura abaixo.

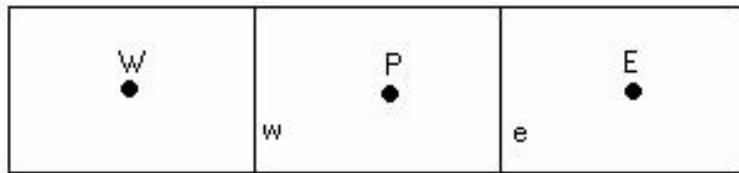


Figura 7.1: Esquema dos volumes de controle para discretização

A solução das equações expressa acima requerem: o cálculo da pressão nas faces do volume de controle (p_e , p_w), que se determine o fluxo nas faces (M_e , M_w), e a interpolação para relacionar os valores nas faces com os valores das incógnitas (u e ϕ) com os valores nos centros dos volumes de controle. Os fluxos nas faces são obtidos de tal forma que as velocidades nas faces obedecem a um balanço médio do momento. Já as pressões nas faces são obtidas de tal forma que as velocidades armazenadas no centro da célula obedecem ao balanço de massa.

7.1 Funções de interpolação para MVF

Ao discretizar uma equação de transporte que possua termos convectivos não nulos aparecerá, na equação discretizada, valores de ϕ nas faces dos volumes de controle. Esses valores

precisam ser interpolados entre os valores centrais dos volumes. Tomando como exemplo um volume de controle unidimensional (direção x) e a seguinte equação de transporte:

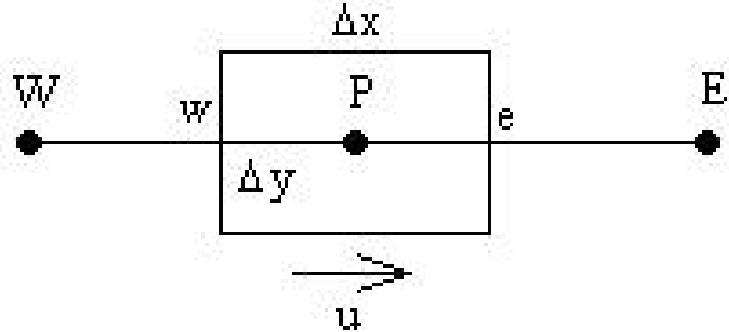


Figura 7.2: Volume de controle unidimensional

$$\frac{d}{dx} (\rho u \phi) = \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) \quad (7.8)$$

Integrando a Equação 7.8 no volume de controle resulta em:

$$M_e \phi_e - M_w \phi_w = D_e (\phi_E - \phi_P) + D_w (\phi_W - \phi_P) \quad (7.9)$$

onde: Fluxos convectivos (vazão mássica): $M_e = \rho_e u_e \Delta y$ e $M_w = \rho_w u_w \Delta y$ e Termos difusivos (viscosidade): $D_e = \Gamma_e \Delta y / \Delta x$ e $D_w = \Gamma_w \Delta y / \Delta x$.

7.2 Upwind de 1^a ordem

A interpolação das variáveis nas faces é feita da seguinte forma:

$$\phi_e = \phi_P, \text{ se } M_e > 0; \phi_e = \phi_E, \text{ se } M_e < 0.$$

$$\phi_w = \phi_W, \text{ se } M_w > 0; \phi_w = \phi_P, \text{ se } M_w < 0.$$

A ordem de precisão deste método é de Δx (1^a ordem).

7.3 Equação da conservação de massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (7.10)$$

É conhecida como equação da continuidade. Sua validade é muito abrangente, desde escoamentos incompressíveis a compressíveis. O termo S_m representa uma fonte que retira ou adiciona massa, ρ é a massa específica do fluido e u_i representa o campo de velocidades do escoamento.

7.4 Equação da Conservação de Quantidade de Movimento

A equação da conservação da quantidade de movimento, na direção x_i , é representada da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (7.11)$$

onde: p - pressão estática, τ_{ij} - tensor das tensões, g_i - aceleração da gravidade na direção i , F_i - forças externas na direção i .

O tensor das tensões é dado por:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (7.12)$$

onde δ_{ij} representa a dilatação volumétrica.

8 MODELAGEM DE TURBULÊNCIA

Escoamentos turbulentos são caracterizados por campos de velocidades flutuantes. Essas flutuações misturam quantidades transportadas, como quantidade de movimento, energia e concentrações químicas, e causam flutuações das mesmas. Como essas flutuações podem ser de pequena escala e alta freqüência, elas são computacionalmente muito caras para serem resolvidas diretamente em cálculos práticos de engenharia. Desse modo, as equações instantâneas exatas são manipuladas para remover as pequenas escalas, resultando num conjunto de equações que são computacionalmente menos caras para resolver. Entretanto, as equações modificadas possuem incógnitas adicionais e modelos de turbulência são necessários para determinar essas incógnitas em termos das quantidades conhecidas.

Um fato dificultador para a simulação de escoamentos turbulentos é a inexistência de um modelo de turbulência universalmente aceito como sendo superior para todas as classes de problemas. A escolha do modelo de turbulência dependerá de considerações físicas do escoamento, práticas estabelecidas para um classe específica de problemas, nível de precisão desejada, recursos computacionais disponíveis e quantidade de tempo disponível para as simulações.

Com base nesses fatores de escolha do modelo de turbulência foram utilizados neste trabalho os seguintes modelos, que serão melhor descritos adiante: $k - \omega$ Standard, $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras (Referência (19)).

8.1 Modelo $k - \omega$ Standard

O modelo $k - \omega$ Standard no Fluent é baseado no modelo $k - \omega$ de Wilcox, que incorpora modificações para baixos números de Reynolds, compressibilidade, e *shear flow spreading*.

Consiste num modelo para modelagem de turbulência. Sua formulação é apresentada à seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (8.1)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (8.2)$$

Nessas equações, G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes médios de velocidade. G_ω representa a geração de ω . Γ_k e Γ_ω representam a difusividade efetiva de k e ω , respectivamente. Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω devido à turbulência. Todos esses termos são calculados como descrito abaixo. S_k e S_ω são os termos fonte que, neste caso, são definidos pelo usuário do *solver*.

8.1.1 Modelando a difusividade efetiva

A difusividade efetiva para o modelo $k - \omega$ é dada por:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (8.3)$$

e

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (8.4)$$

onde, σ_k e σ_ω são os números de Prandtl turbulentos para k e ω , respectivamente.

A viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada combinando-se k e ω como segue:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (8.5)$$

O coeficiente α^* amortece a viscosidade turbulenta causando uma correção para baixos números de Reynolds.

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right) \quad (8.6)$$

onde, $Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}$, $R_k = 6$, $\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3}$ e $\beta_i = 0.072$.

Nota-se que, para altos números de Reynolds do modelo $k - \omega$, $\alpha^* = \alpha_0^* = 1$.

8.1.2 Modelando a produção de energia cinética turbulenta

8.1.2.1 Produção de k

O termo G_k representa a geração de energia cinética turbulenta. Da equação exata do transporte de k , esse termo poder ser obtido por:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (8.7)$$

onde, u'_i e u'_j se referem às flutuações a que estão submetidos os gradientes médios de velocidades.

Avaliando G_k com relação à hipótese de Boussinesq, que relaciona as tensões de Reynolds com os gradientes médios de velocidades:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (8.8)$$

Em que S é o módulo do tensor *rate-of-strain* e é dado por:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (8.9)$$

onde:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (8.10)$$

8.1.2.2 Produção de ω

A produção de ω é dada por:

$$G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k \quad (8.11)$$

Por sua vez, G_k é dado pela Equação 8.8. O coeficiente α é dado por:

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + Re_t/R_\omega}{1 + Re_t/R_\omega} \right) \quad (8.12)$$

onde $R_\omega = 2.95$; α é dado pela Equação 8.12 e $Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}$. Nota-se que, para altos números de Reynolds do modelo $k - \omega$, $\alpha^* = \alpha_0^* = 1$.

8.1.3 Modelando a dissipação de turbulência

8.1.3.1 Dissipação de k

A dissipação de k é dada por:

$$Y_k = \rho \beta^* f_{\beta^*} k \omega \quad (8.13)$$

onde:

$$f_{\beta^*} = \begin{cases} 1 & \chi_k \leq 0 \\ \frac{1+680\chi_k^2}{1+400\chi_k^2} & \chi_k > 0 \end{cases} \quad (8.14)$$

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_t)] \quad (8.15)$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left[\frac{4/15 + (Re_t/R_\beta)^4}{1 + (Re_t/R_\beta)^4} \right] \quad (8.16)$$

$$\chi_k \equiv \frac{1}{\omega^3} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (8.17)$$

$$\zeta^* = 1.5; R_\beta = 8; \beta_\infty^* = 0.09.$$

8.1.3.2 Dissipação de ω

A dissipação de ω é dada por:

$$Y_\omega = \rho \beta f_\beta \omega^2 \quad (8.18)$$

onde:

$$f_\beta = \frac{1 + 70\chi_\omega}{1 + 80\chi_\omega} \quad (8.19)$$

$$\chi_\omega = \left[\frac{\Omega_{ij}\Omega_{jk}S_{ki}}{(\beta_\infty^*\omega)^3} \right] \quad (8.20)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8.21)$$

Sendo que S_{ij} é dado pela Equação 8.10.

$$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_t) \right] \quad (8.22)$$

onde β_i^* é dado pela Equação 8.16 e $F(M_t)$ é dado a seguir.

8.1.4 Correção de compressibilidade

A função de compressibilidade, $F(M_t)$, é dada por:

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t \leq M_{t0} \end{cases} \quad (8.23)$$

onde: $M_t^2 \equiv \frac{2k}{\alpha^2}$; $M_{t0} = 0.25$; $\alpha = \sqrt{\gamma RT}$.

Pode-se notar que, para altos números de Reynolds do modelo $k - \omega$, $\beta_i^* = \beta_\infty^*$.

Para casos incompressíveis $\beta^* = \beta_i^*$.

8.1.5 Constantes do modelo

$$\alpha_{\infty}^* = 1; \alpha_{\infty} = 0.52; \alpha_0 = \frac{1}{9}; \beta_{\infty}^* = 0.09; \beta_i = 0.072; R_{\beta} = 8; R_k = 6; R_{\omega} = 2.95; \zeta^* = 1.5; M_{t0} = 0.25; \sigma_k = 2.0; \sigma_{\omega} = 2.0.$$

8.2 Modelo $k - \omega$ SST (*Shear-Stress Transport*)

O modelo $k - \omega$ SST foi desenvolvido por Menter para juntar efetivamente a formulação robusta e acurada do modelo $k - \omega$ na região perto da parede com a independência da corrente livre do modelo $k - \varepsilon$ no campo distante. Para conseguir esse resultado, o modelo $k - \varepsilon$ é convertido para a formulação $k - \omega$. O modelo $k - \omega$ SST recebe esse nome porque a definição da viscosidade turbulenta é modificada para levar em conta o transporte da tensão de cisalhamento turbulento principal. É essa característica que dá ao modelo $k - \omega$ SST a vantagem em termos de desempenho sobre os modelos $k - \omega$ Standard e $k - \varepsilon$ Standard. Outras modificações incluem um termo adicional de difusão cruzada na equação de ω e uma função de mistura para assegurar que as equações do modelo se comportam apropriadamente nas regiões próxima a parede e campo distante.

8.2.1 Equações de transporte para o modelo $k - \omega$ SST

O modelo $k - \omega$ SST tem uma forma similar ao modelo $k - \omega$ Standard:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (8.24)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega} S_{\omega} \quad (8.25)$$

Nessas equações, \tilde{G}_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido

aos gradientes médios de velocidade. G_ω representa a geração de ω . Γ_k e Γ_ω representam a difusividade efetiva de k e ω , respectivamente. Y_k e Y_ω representam a dissipação de k e ω devido à turbulência. Todos esses termos são calculados como descrito abaixo. D_ω representa o termo de difusão cruzada. S_k e S_ω são os termos fonte que, neste caso, são definidos pelo usuário do *solver*.

8.2.2 Modelando a difusividade efetiva

A difusividade efetiva para o modelo $k - \omega$ SST é dada por:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (8.26)$$

e

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (8.27)$$

onde, σ_k e σ_ω são os números de Prandtl turbulentos para k e ω , respectivamente.

A viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada como segue:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right]} \quad (8.28)$$

onde S é taxa de magnitude de tensão e

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1 - F_1)/\sigma_{k,2}} \quad (8.29)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1 - F_1)/\sigma_{\omega,2}} \quad (8.30)$$

O coeficiente α^* (Equação 8.6) amortece a viscosidade turbulenta causando uma correção para baixos números de Reynolds.

As funções de mistura, F_1 e F_2 , são dadas por

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (8.31)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right] \quad (8.32)$$

$$D_\omega^+ = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right] \quad (8.33)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (8.34)$$

$$\Phi_2 = \max \left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right] \quad (8.35)$$

onde y é a distância para a próxima superfície e D_ω^+ é a porção positiva do termo de difusão cruzada.

8.2.3 Modelando a produção de turbulência

8.2.3.1 Produção de k

O termo \tilde{G}_k representa a geração de energia cinética turbulenta, e é definido como:

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega) \quad (8.36)$$

onde G_k é definido da mesma maneira do modelo $k - \omega$ Standard.

8.2.3.2 Produção de ω

O termo G_ω representa a produção de ω e é dada por

$$G_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t} G_k \quad (8.37)$$

Note que essa formulação difere daquela do modelo $k - \omega$ Standard. A diferença entre os dois modelos também existe no modo como α_∞ é avaliado. No modelo $k - \omega$ Standard, α_∞ é definido como uma constante (0.52). Para o modelo $k - \omega$ SST, α_∞ é dado por

$$\alpha_\infty = F_1\alpha_{\infty,1} + (1 - F_1)\alpha_{\infty,2} \quad (8.38)$$

onde:

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1}\sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (8.39)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2}\sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (8.40)$$

e $\kappa = 0.41$.

8.2.4 Modelando a dissipação de turbulência

8.2.4.1 Dissipação de k

A dissipação de k é dada, de maneira similar ao modelo $k - \omega$ Standard, por:

$$Y_k = \rho\beta^*k\omega \quad (8.41)$$

8.2.4.2 Dissipação de ω

A dissipação de ω é dada, de maneira similar ao modelo $k - \omega$ Standard, por:

$$Y_{\omega} = \rho\beta\omega^2 \quad (8.42)$$

Ao invés de possuir um valor constante, β_i é dado por:

$$\beta_i = F_1\beta_{i,1} + (1 - F_1)\beta_{i,2} \quad (8.43)$$

e F_1 é obtido da Equação 8.31.

8.2.5 Modificação de difusão cruzada

O modelo $k - \omega$ SST é baseado nos modelos $k - \omega$ Standard e $k - \varepsilon$ Standard. Para juntar os dois modelos, o modelo $k - \varepsilon$ Standard foi transformado em equações baseadas em k

e ω , que levam à introdução do termo de difusão cruzada. (D_ω na Equação 8.25). D_ω é definido como

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (8.44)$$

8.2.6 Constantes do modelo

$$\sigma_{k,1} = 1.176; \sigma_{\omega,1} = 2.0; \sigma_{k,2} = 1.0; \sigma_{\omega,2} = 1.168; a_1 = 0.31; \beta_{i,1} = 0.075; \beta_{i,2} = 0.0828.$$

Todas as constantes adicionais do modelo (α_∞^* , α_∞ , α_0 , β_∞^* , R_β , R_k , R_ω , ζ^* e M_{t0}) possuem os mesmos valores do modelo $k - \omega$ Standard.

8.3 Modelo Spalart-Allmaras

Nos modelos de turbulência que empregam a aproximação de Boussinesq, a questão central é como a viscosidade turbulenta é computada. O modelo proposto por Spalart e Allmaras resolve a equação de transporte para a quantidade que é uma forma modificada da viscosidade cinemática turbulenta.

8.3.1 Equação de transporte para o modelo Spalart-Allmaras

A variável transportada no modelo Spalart-Allmaras, $\tilde{\nu}$, é idêntica à viscosidade cinemática turbulenta exceto na região próxima à parede (região afetada pela viscosidade). A equação de transporte para $\tilde{\nu}$ é

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_{\tilde{\nu}} \quad (8.45)$$

onde G_ν é a produção da viscosidade turbulenta e Y_ν é a destruição da viscosidade

turbulenta que ocorre na região próxima à parede devida à interferência da parede e ao amortecimento viscoso. $\sigma_{\tilde{\nu}}$ e C_{b2} são constantes e ν é a viscosidade cinemática molecular. $S_{\tilde{\nu}}$ é um termo fonte definido pelo usuário.

8.3.2 Modelando a viscosidade turbulenta

A viscosidade turbulenta, μ_t , é calculada através de

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{\nu 1} \quad (8.46)$$

onde a função de amortecimento viscoso, $f_{\nu 1}$, é dada por

$$f_{\nu 1} = \frac{\chi^3}{\chi_3 + C_{\nu 1}^3} \quad (8.47)$$

e

$$\chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (8.48)$$

8.3.3 Modelando a produção de turbulência

O termo de produção, G_{ν} , é modelado como

$$G_{\nu} = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{\nu} \quad (8.49)$$

onde

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 d^2} f_{\nu 2} \quad (8.50)$$

e

$$f_{\nu 2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{\nu 1}} \quad (8.51)$$

C_{b1} e κ são constantes, d é a distância da parede e S é uma medida escalar do tensor de deformações. Tanto no FLUENT, como no modelo proposto originalmente por Spalart e Allmaras, S é baseado na magnitude da vorticidade:

$$S \equiv \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (8.52)$$

onde Ω_{ij} é tensor rotacional médio e é definido por

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8.53)$$

8.3.4 Modelando a destruição de turbulência

O termo de destruição de turbulência é modelado como

$$Y_\nu = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 \quad (8.54)$$

onde:

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6} \quad (8.55)$$

$$g = r + C_{w2} (r^6 - r) \quad (8.56)$$

$$r \equiv \frac{\tilde{\nu}}{S\kappa^2 d^2} \quad (8.57)$$

C_{w1} , C_{w2} e C_{w3} são constantes e \tilde{S} é dado pela Equação 8.50.

8.3.5 Constantes do modelo

As constantes do modelo C_{b1} , C_{b2} , $\sigma_{\tilde{\nu}}$, $C_{\nu1}$, C_{w1} , C_{w2} , C_{w3} e κ possuem os seguintes valores *default*:

$$C_{b1} = 0.1355, C_{b2} = 0.622, \sigma_{\tilde{\nu}} = \frac{2}{3}, C_{\nu1} = 7.1, C_{w1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1+C_{b2})}{\sigma_{\tilde{\nu}}}, C_{w2} = 0.3,$$

$C_{w3} = 2.0$ e $\kappa = 0.4187$

9 GERAÇÃO DE MALHAS NÃO-ESTRUTURADAS

Existem vários métodos numéricos utilizados para a resolução de problemas em CFD. Entre eles estão o método das diferenças finitas, método de elementos finitos, método espectral e método dos volumes finitos. Este último é utilizado nas simulações deste trabalho e foi descrito detalhadamente no Capítulo 7. Todos estes métodos têm caráter euleriano, isto é, a análise é focada num espaço fixo em relação ao sistema de coordenadas adotado, e não na partícula. Desse modo, é necessário que se discretize o domínio do problema a fim de aplicarmos o método de resolução. É nisso que consiste a geração de malhas, da discretização do domínio em vários elementos de forma geral pré-determinada, com a finalidade de estabelecer a posição dos pontos (nós) para os quais serão calculadas as soluções pretendidas. A geração de malhas, a determinação das condições de contorno e condições iniciais e o ajuste dos parâmetros de solução constituem o que se costuma chamar de pré-processamento do problema.

A fase de geração de malhas é muito importante na medida em que a geração de uma malha válida num domínio com uma geometria complexa não é uma operação trivial e pode ter um custo bastante grande em termos de tempo de processamento. Além do mais, a criação de uma malha coerente com as características físicas do problema considerado é crucial, porque a qualidade da solução computada está fortemente relacionada com a qualidade da malha (Referência (20)).

9.1 Noções gerais relativas a malhas

Uma malha de um domínio, Ω , é definida por um conjunto, T_h , que consiste de um número finito de segmentos em uma dimensão, segmentos, triângulos e quadriláteros em duas dimensões e os elementos anteriores mais tetraedros, pentaedros e hexaedros em três dimensões. Os elementos, K , de tal malha devem satisfazer a um certo número de propriedades que serão introduzidas a seguir. A primeira diz respeito à conformidade, de acordo com a definição:

Definição: T_h é uma malha conforme de Ω se as seguintes condições são satisfeitas:

1. $\overline{\Omega} = \bigcup_{K \in T_h} K$.
2. Todos os elementos de T_h têm interior de área (no caso bidimensional) ou volume (no caso tridimensional) não nulos.
3. A intersecção de dois elementos quaisquer de T_h se enquadra em um, e apenas um, dos seguintes casos:
 - Conjunto vazio.
 - Um ponto comum aos dois elementos.
 - Uma aresta comum aos dois elementos.
 - Uma face comum aos dois elementos.

Se T_h é uma malha conforme, então dizemos que ela representa Ω de maneira conforme quanto a aspectos geométricos. Na prática, T_h é um particionamento de Ω , tão preciso quanto possível. Quando Ω não é um domínio poligonal (ou poliedral), T_h será apenas uma discretização aproximada do domínio.

Os elementos constituintes de uma malha devem geralmente satisfazer algumas propriedades específicas:

9.1.1 Propriedades geométricas

- A variação dimensional entre dois elementos adjacentes tem que ser progressiva e descontinuidades de elementos para elementos não podem ser muito abruptas.
- A densidade de elementos em regiões de gradientes elevados de alguma grandeza envolvida no problema deve ser alta.
- Quando os elementos são do tipo triangular, deve-se evitar a presença de ângulos obtusos nos elementos.
- Os elementos devem se adequar às características anisotrópicas do problema.

9.1.2 Propriedades de natureza física

Essas propriedades estão fortemente ligadas aos aspectos físicos do problema em consideração. A configuração geral e individual dos elementos deve ser definida de acordo com o comportamento do problema.

Existem numerosos algoritmos para a construção de malhas bidimensionais e tridimensionais. A escolha do método está fortemente ligada à geometria do domínio considerado. As malhas geradas podem ser agrupadas em duas classes principais: *malhas estruturadas* e *malhas não-estruturadas*. Uma malha é chamada de estruturada se sua conectividade é do tipo de diferenças finitas. Uma malha é chamada de não-estruturada se sua conectividade é de qualquer outro tipo. Por *conectividade* de uma malha entende-se a definição da conexão entre seus vértices, em outras palavras, a conexão entre os nós globais de uma malha e os nós locais de cada elemento da malha.

Elucidando melhor os conceitos: para uma malha estruturada, a conectividade entre os nós é do tipo (i, j, k) , isto é, assumindo que índices de um certo nó sejam (i, j, k) , seu vizinho esquerdo terá os índices $((i-1), j, k)$ e seu vizinho direito terá os índices $((i+1), j, k)$. Este tipo de malha é mais apropriado para geometrias simples e simétricas, tais como configurações quadrilaterais e hexaedrais. Para geometrias mais complexas, é

necessário um tratamento especial para que este tipo de estruturação seja concebido. O presente trabalho lida com simulações que utilizam malhas não estruturadas, que por sua vez apresentam menos restrições geométricas, mas tem um custo computacional maior.

Pode-se ainda dividir os diferentes algoritmos de geração de malha em sete classes:

Métodos manuais ou semi-automáticos: adequados para geometrias relativamente simples. Estão nessa classe os métodos enumerativos, nos quais os pontos, arestas, faces e elementos que compõe a malha são dados explicitamente; e métodos apropriados para situações geométricas particulares, como formas cilíndricas e hexaedrais, os quais usam propriedades específicas da geometria explicitamente e a conectividade é conhecida *a priori*.

Métodos que utilizam mapeamento: constroem a malha a partir do mapeamento, através de uma transformação conforme de um domínio, de uma malha de geometria simples.

Métodos baseados na solução de um sistema de equações diferenciais a derivadas parciais: essa abordagem se assemelha à segunda, mas aqui a função de mapeamento não é dada a princípio, mas é computada a partir da resolução de equações diferenciais a derivadas parciais, de forma a satisfazer certas propriedades de interesse, tais como densidade de elementos e ortogonalidade.

Métodos baseados na deformação e modificação local de uma malha: este método aplica-se principalmente a malhas de fácil obtenção, do tipo *quadtree*, em casos bidimensionais, ou *octree*, para casos tridimensionais. Nestes casos o domínio está encerrado num quadrilátero ou num paralelepípedo que é dividido em subconjuntos na forma de caixas. Esses subconjuntos são construídos pela decomposição baseada em uma árvore quaternária (para dimensão 2) ou árvore octal (dimensão 3). A rede resultante é então utilizada para criar a malha desejada.

Métodos que derivam a malha final, elemento por elemento, dos dados do contorno: basicamente existem duas abordagens: métodos de frente progressiva (*advancing*

front methods) e algoritmos baseados na construção de Voronoï-Delaunay. Estes métodos criam nós internos e elementos, começando da fronteira do domínio. Esta fronteira pode ser dada de maneira global (por exemplo, definidos de forma analítica) ou de maneira discreta (como uma lista de arestas de faces triangulares). Esta classe de métodos é de particular interesse neste trabalho, pois é a que o software de geração de malhas utilizado (Gambit 2.1.2) emprega.

Métodos que utilizam a composição de malhas de subconjuntos baseados na modificação geométrica ou topológica dessas malhas: neste caso, as malhas dos subconjuntos podem ser obtidas por qualquer um dos métodos anteriores. O problema é então dividido em um conjunto de “sub-problemas” de menor complexidade, que são então resolvidos por uma ou mais classes das anteriormente citadas e o resultado final é então obtido por transformações e a adição dos resultados parciais.

Assim sendo, percebe-se que as principais diferenças entre os algoritmos de geração de malhas estão na generalidade do método, principalmente com relação à geometria, e a variedade, quantidade e forma dos dados que tem que ser fornecida ao algoritmo. O estabelecimento da noção de malha de tal forma que esta seja conveniente em termos da computação futura precede a escolha do método geral de concepção da malha. Escolhido o método, existem diferentes maneiras pelas quais ele pode ser implementado.

9.2 Descrição geral

Uma malha tem que ser descrita de acordo com a sua aplicação. No caso de simulações de escoamentos externos, que é o que ocorre neste trabalho, são necessárias as definições de objetos sólidos e da zona fluida que os circunda. Nesta definição deverão estar contidas todas as informações necessárias considerando os vários passos na computação. Estas informações incluem geometria, condições de contorno. Elas podem ser agrupadas em três tipos:

9.2.1 Informação geométrica

Aqui se incluem a descrição da malha, ou seja, como seus elementos cobrem o domínio, e uma espécie de histórico que contenha toda a informação previamente utilizada na construção dos elementos. Também tem que estar descrito o tipo de elemento (segmento, triângulo, quadrilátero, tetraedro, pentaedro, hexaedro ou outro).

A maneira prática da descrição da malha se constitui na listagem dos vértices dos elementos, a conectividade, as coordenadas dos vértices e a topologia, que é a descrição das arestas e faces de um elemento pelos seus vértices.

9.2.2 Informações necessárias ao processamento

Encontram-se aqui agrupados os dados para computação das matrizes, solução dos sistemas e visualização dos resultados. Estas informações variam de acordo com o algoritmo numérico utilizado para a resolução do problema. Exemplos são o número e a lista dos nós dos elementos.

É preciso frisar que os nós e os vértices de um elemento podem coincidir ou não. Podem existir nós intermediários localizados nas arestas, faces ou interior do elemento. Convenciona-se então uma ordem de numeração, de modo a simplificar a representação dos elementos. A seguir são dados quatro exemplos de elementos triangulares, com os respectivos nós numerados e indicados:

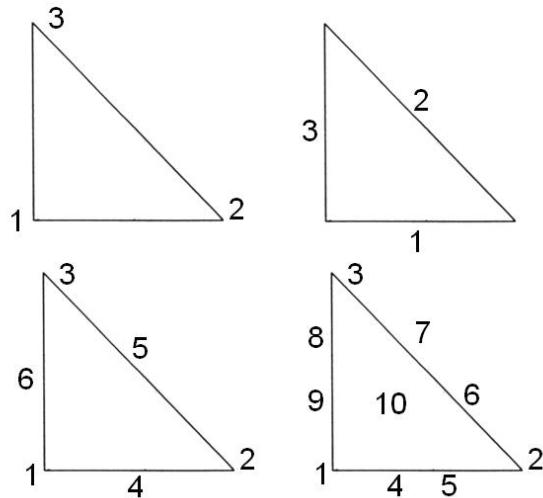


Figura 9.1: Elementos triangulares com diferentes configurações de nós

Nesta classificação estão as condições iniciais e de contorno e caracterização física dos elementos (material e propriedades, por exemplo).

9.3 Metodologia geral para criação de malhas

A concepção de uma malha pode ser decomposta em três passos:

- Análise do problema.
- Definição formal do processo de geração da malha.
- A construção da malha propriamente dita.

O primeiro passo consiste na análise da geometria do domínio e do problema físico a ser resolvido. Essa análise deve ser feita segundo uma metodologia *top-down*, ou seja, na decomposição de um problema complexo numa série de problemas mais simples.

A construção formal da malha, que constitui o segundo passo, leva em conta os resultados da análise efetuada no primeiro passo e é baseada numa construção *bottom-up*, que é a definição de objetos simples tornando a solução do problema completo possível através da soma das soluções dos objetos.

Por último, a construção da malha propriamente dita é feita através do uso de um algoritmo apropriado de geração de malhas e consiste de duas fases: a definição do conjunto de dados relevantes e a geração real da malha.

9.3.1 Métodos de Frente Progressiva (*Advancing Front Methods*)

Aqui será feita uma introdução geral ao método empregado pelo *software* utilizado para gerar as malhas das simulações deste trabalho (Gambit 2.1.2). Esta classe de geradores de malhas foi desenvolvida entre as décadas de 70 e 80 e foi a primeira solução automática para a geração de malhas para domínios de geometrias arbitrárias. Basicamente, os algoritmos constroem a malha do domínio a partir da fronteira do mesmo. Os elementos utilizados são triângulos no caso bidimensional e tetraedros no caso tridimensional. Os dados demandados são as fronteiras do domínio ou, mais precisamente, sua discretização poligonal (para dimensão 2) descritos por uma lista de segmentos, ou sua discretização poliedral (para dimensão 3) descritos por uma lista de faces triangulares.

O processo é iterativo: uma *frente*, inicializada por um conjunto de itens da fronteira dada, é analisada a fim de estabelecer uma *zona de partida*, a partir da qual um ou mais elementos internos são criados; a frente é então atualizada e o processo de criação de elementos é repetido se a frente não for um conjunto vazio. O algoritmo pode ser sumariado da seguinte forma:

- Inicialização da frente;
- Análise da frente:
 - Determinação da zona de partida;
 - Análise da região:
 - o Criação dos pontos internos e dos elementos internos;
 - o Atualização da frente.
- Se a frente não for um conjunto vazio, ir para “Análise da frente”.

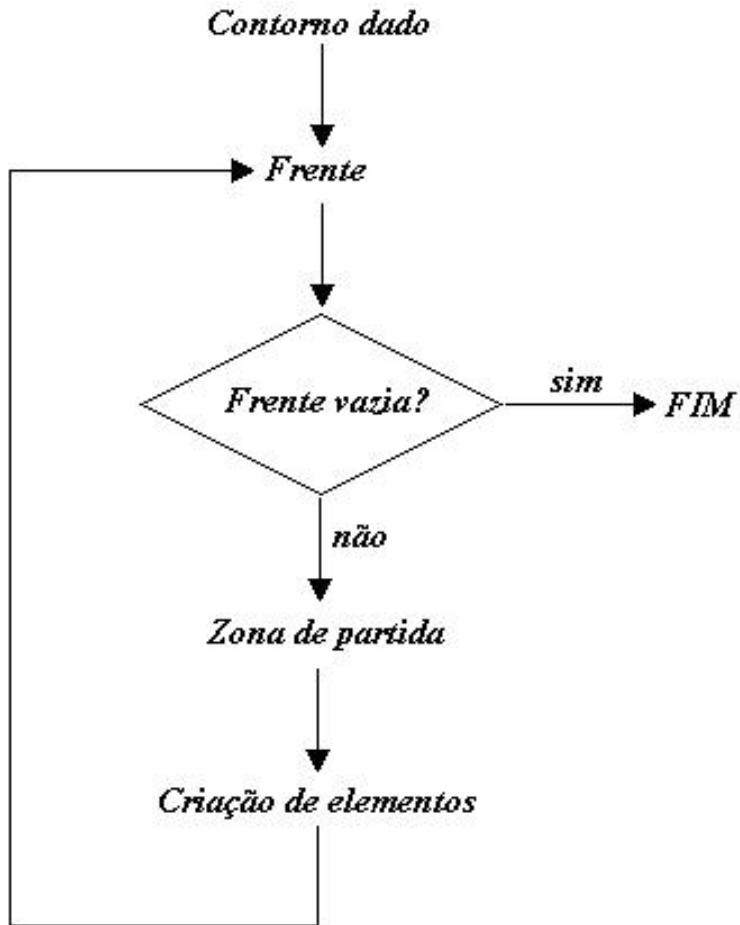


Figura 9.2: Esquema geral do método de frente progressiva

9.3.1.1 Métodos de Frente Progressiva em duas dimensões

Como já foi exposto, este tipo de algoritmo constrói a malha do domínio Ω com triângulos que partem do seu contorno. Na prática, uma aproximação poligonal do contorno é usada em termos de uma lista dos seus elementos constitutivos. O interior do domínio, ou seja, a zona a ser discretizada, está bem definida por causa da orientação do contorno servindo como dado de entrada. A frente inicial F é definida como o conjunto de segmentos da fronteira C descrevendo o domínio Ω .

Dada F , pode-se detalhar a maneira pela qual os triângulos são criados. Enquanto o processo de criação dos triângulos internos progride, a fronteira C e a frente F são atualizadas. Considerando F o atual estado da frente, então sua análise é baseada no exame das propriedades geométricas dos seus elementos constituintes. Chamando de α o

ângulo formado por dois segmentos consecutivos da frente F , então são as três situações:

$\alpha < \frac{\pi}{2}$, os dois segmentos com ângulo a são mantidos e tornam-se dois lados do triângulo criado (Figura 9.3);

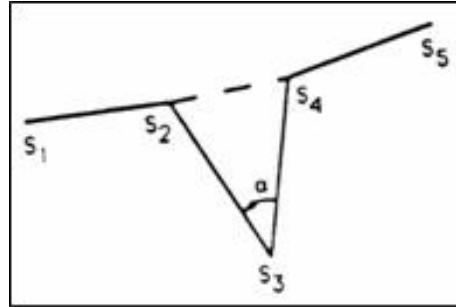


Figura 9.3: Padrão 1

$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{2\pi}{3}$, dos dois segmentos com ângulo a , um ponto interno e dois triângulos são gerados (Figura 9.4);

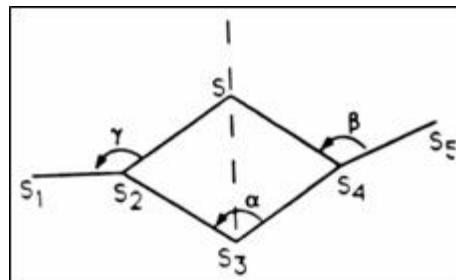


Figura 9.4: Padrão 2

$\frac{2\pi}{3} < \alpha$, um segmento é mantido, um triângulo é criado com este segmento sendo um dos lados e um ponto interno (Figura 9.5).

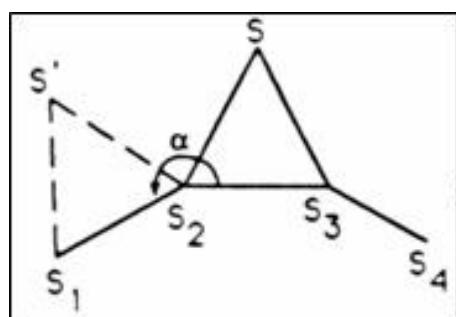


Figura 9.5: Padrão 3

As posições dos pontos internos criados são definidas de forma que sejam ótimas, significando que os elementos que têm esses pontos como vértices sejam os mais regulares possíveis. No caso do padrão 2, o vértice é gerado na linha bissetriz do ângulo a uma distância computada a partir dos respectivos comprimentos das arestas da zona de partida: a localização deste ponto interno S é calculada pela fórmula:

$$d_{SS_3} = \frac{1}{6} (2d_{S_2S_3} + 2d_{S_3S_4} + 2d_{S_1S_2} + 2d_{S_4S_5}) \quad (9.1)$$

No caso do padrão 3, um triângulo o mais próximo de um equilátero possível é formado usando o segmento mais curto da zona de partida.

Na criação de cada ponto, é necessário verificar se o ponto está dentro do domínio ainda não coberto pelos elementos já construídos. Isto quer dizer cada ponto criado tem que estar dentro do domínio considerado e fora de qualquer elemento existente. Essa verificação, crucial para este tipo de método, baseia-se no conhecimento exato da vizinhança da zona que está sendo criada. No caso bidimensional, um ponto será interno se a intersecção de todos as arestas que dele partem com qualquer aresta da frente é um conjunto vazio. No caso de domínios com um ou mais *loops* internos (“buracos”), é necessário considerar ainda a condição de que nenhum triângulo formado com o ponto em questão contenha um ponto, em qualquer segmento, do contorno de qualquer *loop* interno presente.

Uma nova frente F é formada pela supressão dos segmentos que pertençam aos triângulos criados e à antiga frente, e pela adição dos novos segmentos dos triângulos criados, que não sejam comuns a dois elementos. O estado atualizado de F é então processado da mesma forma. A Figura 9.6 mostra vários estados da frente em evolução correspondendo ao domínio mostrado na Figura 9.7. Uma vez que F seja um conjunto vazio, a malha final está constituída.

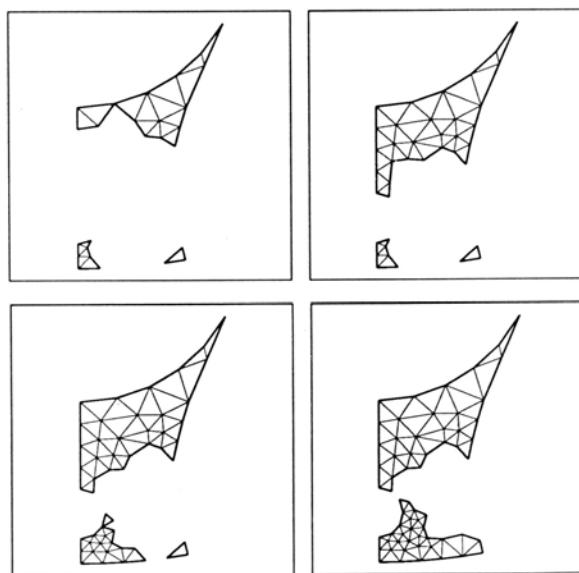


Figura 9.6: Estados da frente progressiva

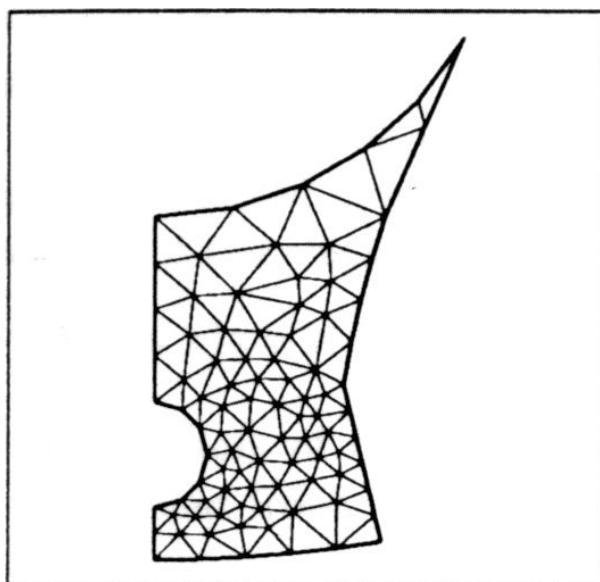


Figura 9.7: Malha final

No caso de domínios fortemente não convexos, o método pode não convergir.

Além disso, uma variação muito aguda na distribuição dos pontos na fronteira pode produzir um resultado negativo similar. Para sanar este problema, consideram-se apenas subconjuntos primários adequados, ou um método diferente tem que ser usado. De fato, este resultado negativo é uma consequência da dificuldade em provar a validade do método

teoricamente, mas uma implementação mais astuta pode superar este problema.

A triangulação obtida está claramente relacionada ao número e localização relativa dos pontos que discretizam a fronteira. Assim, especificando os pontos da fronteira adequadamente, é possível obter uma densidade variável de elementos em certas regiões da malha.

A malha final pode ser polida a fim de obter triângulos de melhor qualidade. Este processo corrige a posição dos pontos criados usando informações locais globalmente. O resultado é mostrado na Figura 9.8.

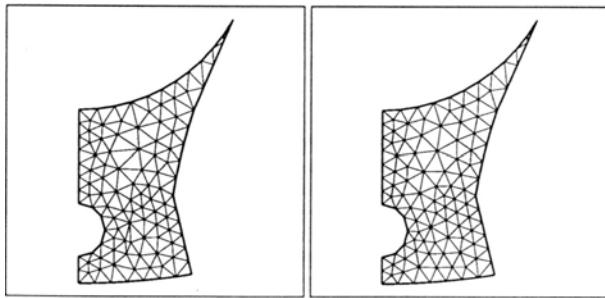


Figura 9.8: Malha antes e depois de ser polida

Existem numerosas variações do método de frente progressiva. Em particular, a zona de partida pode ser escolhida como:

- Uma parte do contorno tal que seus elementos constitutivos satisfaçam certas condições.
- A fronteira inteira constitui a frente, e seus elementos constitutivos participam da criação de elementos numa ordem pré-definida.

A primeira abordagem se aplica especialmente a zonas particulares, por exemplo, aquelas que contém ângulos pequenos. A segunda abordagem produz uma inflação da frente inicial (Figura 9.9) ou a propagação de uma linha inicial (Figura 9.10).

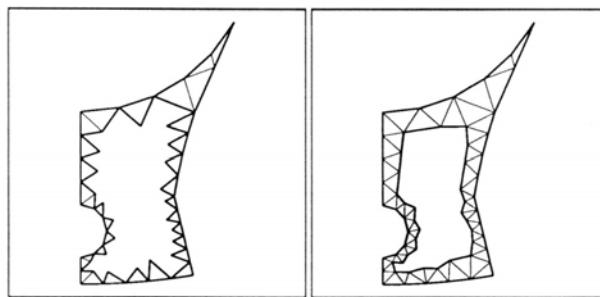


Figura 9.9: Frente progredindo por inflação

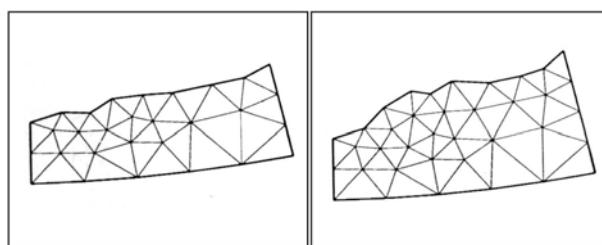


Figura 9.10: Frente progredindo pelo avanço de uma linha

Este método pode também ser aplicado para a criação de quadriláteros. Baseado no mesmo princípio, o algoritmo intenta em criar quadriláteros com a forma a mais regular possível. Este processo utiliza triângulos em locais impossíveis de serem cobertos por um quadrilátero ou uma combinação deles.

10 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

As simulações numéricas foram realizadas com a técnica da Dinâmica dos Fluidos Computacional (em inglês, CFD - *Computational Fluid Dynamics*) baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF). Para a geração de malha foi utilizado o *software* GAMBIT 2.1.2 e as simulações numéricas foram realizadas no *software* FLUENT 6.2.16. Foram utilizadas as referências (21) e (22). A fase das simulações numéricas envolveu a solução do problema em regime permanente.

Algumas propostas de complementação das simulações numéricas seriam:

- Estudo de sensibilidade de discretização da malha.
- Simulações em regime transitório.

10.1 Geração de Malha

A malha gerada no *software* GAMBIT representa um domínio de $12L \times 4L \times 3L$ (*comprimento* \times *largura* \times *altura*), baseado no comprimento L do modelo. O modelo está suspenso 50mm do chão. A malha não estruturada é composta de 1562877 elementos tetraédricos. A Figura 10.2 mostra a malha gerada.

As condições de contorno especificadas foram as seguintes: velocidade uniforme na entrada, pressão uniforme na saída, simetria nas laterais e no topo, parede no modelo e parede móvel no chão.

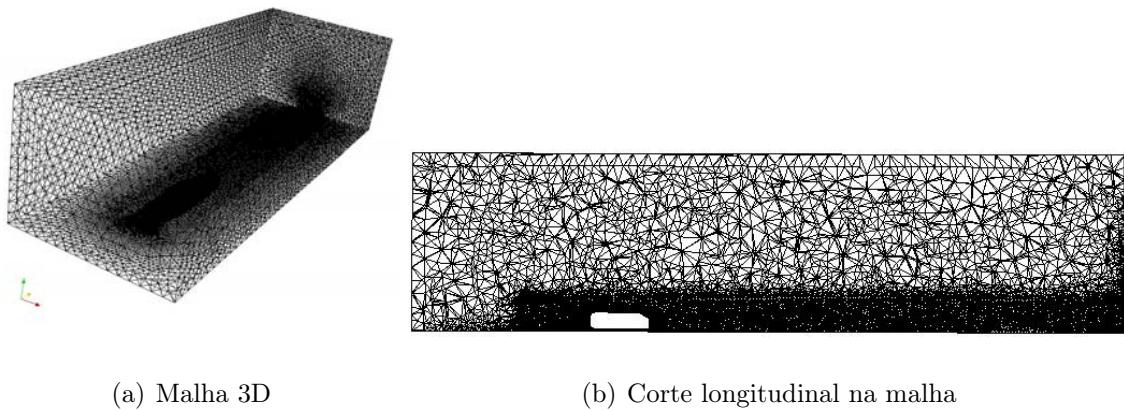


Figura 10.1: Malha do corpo de Ahmed

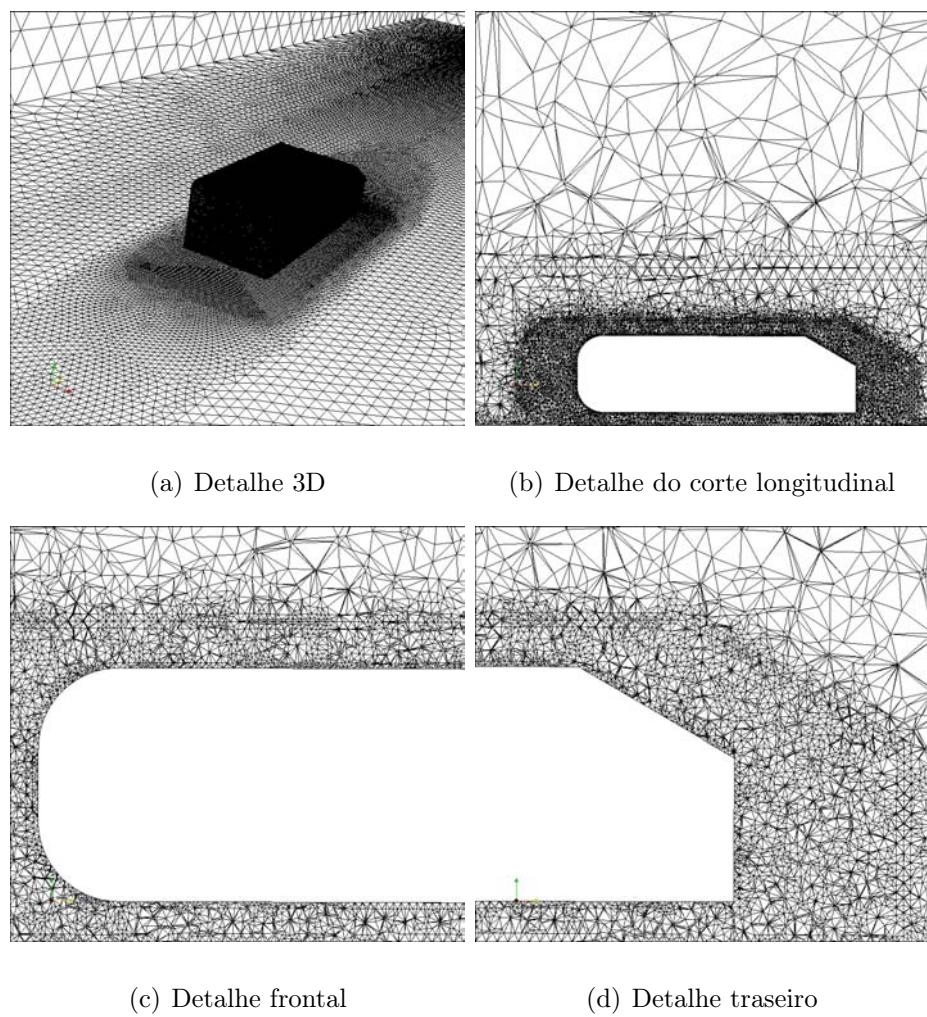


Figura 10.2: Detalhes da malha do corpo de Ahmed

10.2 Simulações Numéricas em Regime Permanente

As simulações numéricas em regime permanente foram realizadas em uma estação Compaq Alpha Server DS20E (2 CPUs Alpha EV67 667 MHz, 4 GB RAM) e sistema operacional Tru64 Unix V5.1.

Velocidade de entrada $V = 30m/s$ e pressão manométrica nula na saída foram as condições de contorno utilizadas. O fluido utilizado foi ar e o número de Reynolds baseado no comprimento L do modelo é $\text{Re} = 2.14 \times 10^6$.

Foram utilizados três modelos de turbulência diferentes com o objetivo de validá-los e verificar suas diferenças. Os modelos, apresentados com detalhes no Capítulo 8, são: $k - \omega$ Standard, $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras. Os parâmetros de solução *default* do FLUENT foram usados. Para os modelos de turbulência $k - \omega$ Standard e $k - \omega$ SST o Método de Especificação de Turbulência (*Turbulence Specification Method*) foi *Intensity and Viscosity Ratio* com *Turbulence Intensity (%)* = 0.1 e *Turbulence Viscosity Ratio* = 1. Para o modelo Spalart-Allmaras foi usado *Turbulence Viscosity Ratio* = 1. Os mesmos valores de resíduos foram usados para os três modelos.

A Tabela 10.1 mostra o desempenho computacional dos três modelos de turbulência para as simulações em regime permanente. Nota-se que o número de iterações e o tempo total de CPU para o modelo $k - \omega$ Standard é bem menor quando comparado com os outros dois modelos. É interessante verificar que apesar de terem um número de iterações significativamente diferente, os modelos $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras possuem praticamente o mesmo tempo total de CPU.

A Tabela 10.2 contém os resultados das simulações em regime permanente na forma do coeficiente de arrasto (C_D) devido à pressão, à viscosidade e total para os três modelos de turbulência propostos. Através desses resultados pode-se verificar a inadequação do modelo $k - \omega$ Standard para o problema simulado, que consiste no escoamento externo com uma parede próxima. O valor do C_D Total foi cerca de quatro vezes superior

aos valores experimentais encontrados em Ahmed (3) ($C_{D_{AHMED}} = 0.378$) e no presente trabalho ($C_{D_{TF}} = 0.383$). Os modelos $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras resultaram em valores de C_D muito próximos dos valores experimentais disponíveis, sendo os valores do modelo $k - \omega$ SST mais próximos dos valores experimentais, apresentando diferença de 1.71% quando comparado ao valor de Ahmed (3) e 0.38% em relação ao valor experimental do presente trabalho. A diferença do valor resultante do modelo Spalart-Allmaras é 6.78% em relação a Ahmed (3) e 5.38% em relação ao presente trabalho.

Do estudo experimental realizado por Ahmed (3), a configuração do corpo de Ahmed estudada neste projeto, com ângulo $\varphi = 30^\circ$, representa o caso de maior arrasto, sendo que 85% do arrasto é devido à pressão e os outros 15% restantes, à viscosidade. No caso da simulação com o modelo $k - \omega$ SST obteve-se 86.6% de arrasto devido à pressão e 13.4% de arrasto devido à viscosidade. Já para a simulação com o modelo Spalart-Allmaras os resultados obtidos foram 84.1% de arrasto devido à pressão e 15.9% de arrasto devido à viscosidade. Verifica-se que os resultados da simulação com o modelo Spalart-Allmaras se aproximaram mais do resultado experimental de Ahmed (3). Os modelos $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras mostraram-se adequados para o tratamento do problema proposto apresentando pequenas diferenças entre si (Tabela 10.3).

Tabela 10.1: Desempenho computacional para simulações em regime permanente

	$k - \omega$ Standard	$k - \omega$ SST	Spalart-Allmaras
Iterações	104	297	451
Tempo total de CPU (s)	6365.25	20459.32	21509.70

Tabela 10.2: Resultados das simulações em regime permanente

	$k - \omega$ Standard	$k - \omega$ SST	Spalart-Allmaras
C_D Pressão	1.533	0.333	0.340
C_D Viscosidade	0.085	0.051	0.064
C_D Total	1.618	0.384	0.404

Tabela 10.3: Decomposição do arrasto em parcelas devido à pressão e à viscosidade (%)

	Ahmed	$k - \omega$ Standard	$k - \omega$ SST	Spalart-Allmaras
Pressão	85.0	94.7	86.6	84.1
Viscosidade	15.0	5.3	13.4	15.9

A seguir apresenta-se os principais resultados obtidos da simulação numérica em regime permanente na forma de figuras. Devido à pequena diferença dos resultados obtidos através dos modelos de turbulência $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras optou-se por apresentar apenas os resultados correspondentes ao modelo $k - \omega$ SST. Na Figura 10.3 verifica-se a forma das linhas de corrente do escoamento em torno do corpo de Ahmed. Comparando essas figuras com aquelas apresentadas no Capítulo 6 (Figuras 6.3 a 6.13) nota-se a boa correlação entre os resultados experimentais de Ahmed (3) e deste trabalho com os resultados das simulações numéricas. É importante notar o surgimento de um vórtice longitudinal através do enrolamento da camada cisalhante da aresta lateral da inclinação, assim como proposto por Ahmed (3) na Figura 6.3 e verificado nas figuras de PIV deste trabalho.

As Figuras 10.4 a 10.6 adotam os mesmos planos apresentados nas Figuras 6.2(a) e 6.2(b). Através da Figura 10.4 é verificado a existência de uma região de alta pressão, correspondente ao ponto de estagnação frontal, e uma região de baixa pressão ao longo do corpo e em sua traseira. A presença de um gradiente de pressão elevado caracteriza o corpo de Ahmed como um corpo rombudo nas condições consideradas e resulta que a maior parte do arrasto é devido à pressão, conforme os resultados obtidos através da simulação numérica utilizando os modelos de turbulência $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras e os resultados experimentais de Ahmed (3). As Figuras 10.5 e 10.6 apresentam excelente correspondência com aquelas apresentadas no Capítulo 6, onde verifica-se a presença de uma bolha de recirculação na traseira do corpo e a deflexão das linhas de corrente devido à presença do mesmo no escoamento.

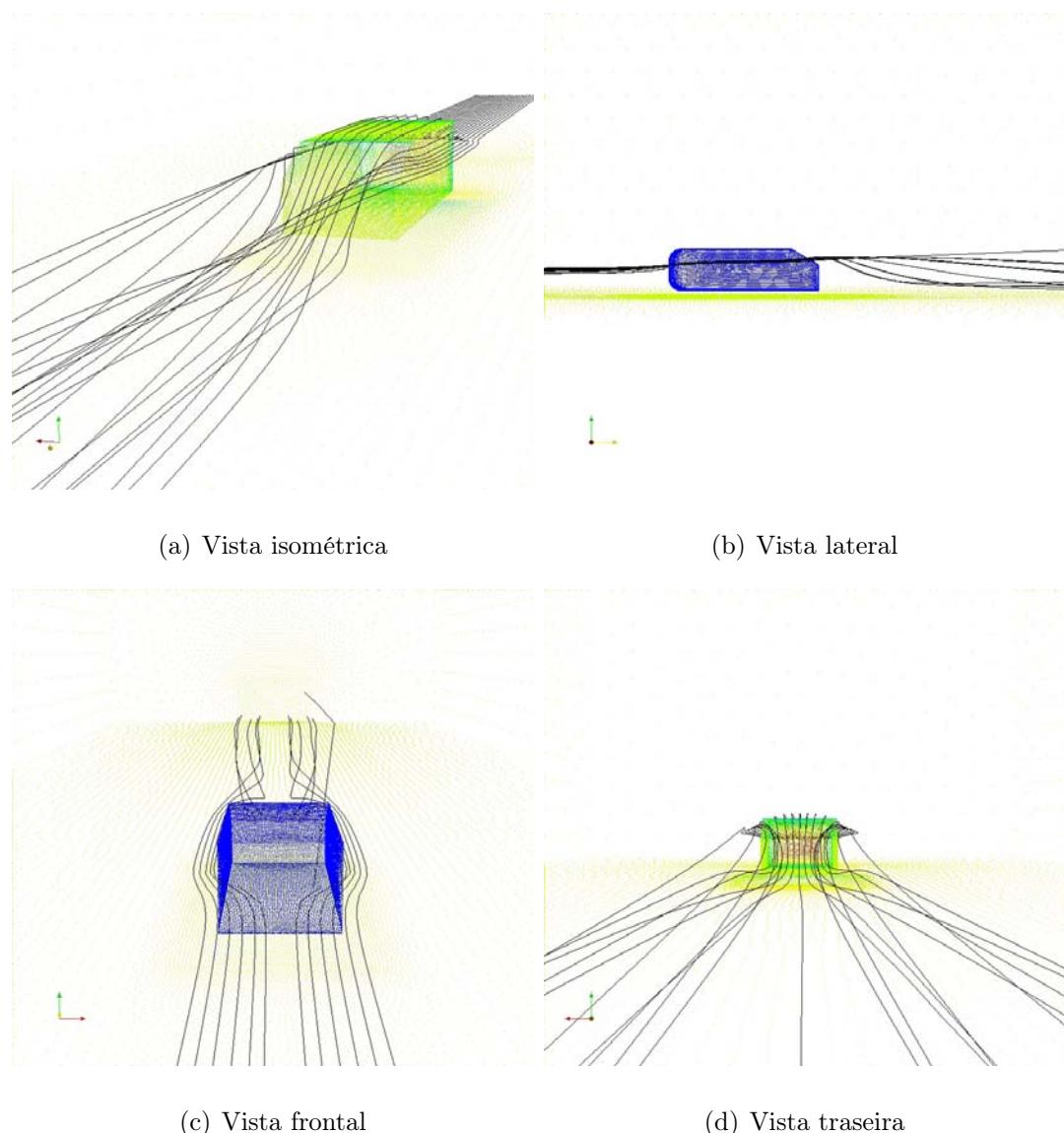


Figura 10.3: Linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed

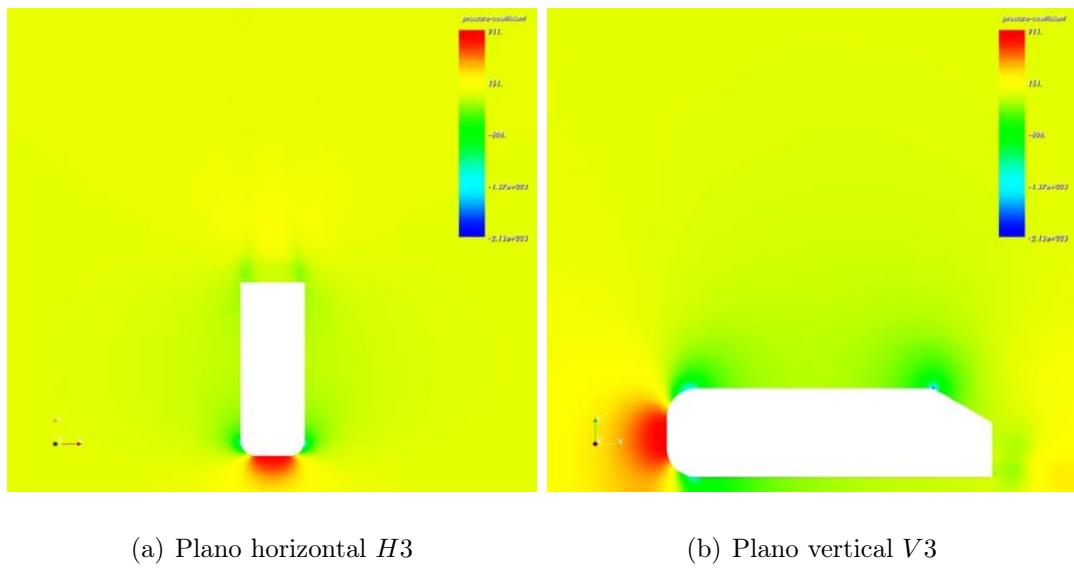


Figura 10.4: Distribuição do coeficiente de pressão ao redor do corpo de Ahmed

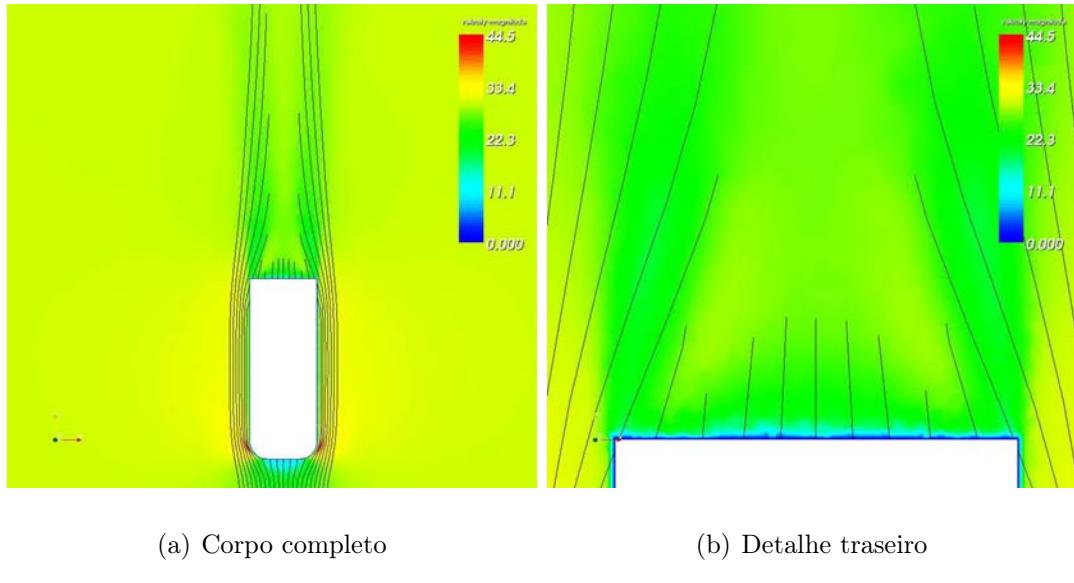


Figura 10.5: Campo de velocidade e linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed no plano $H3$

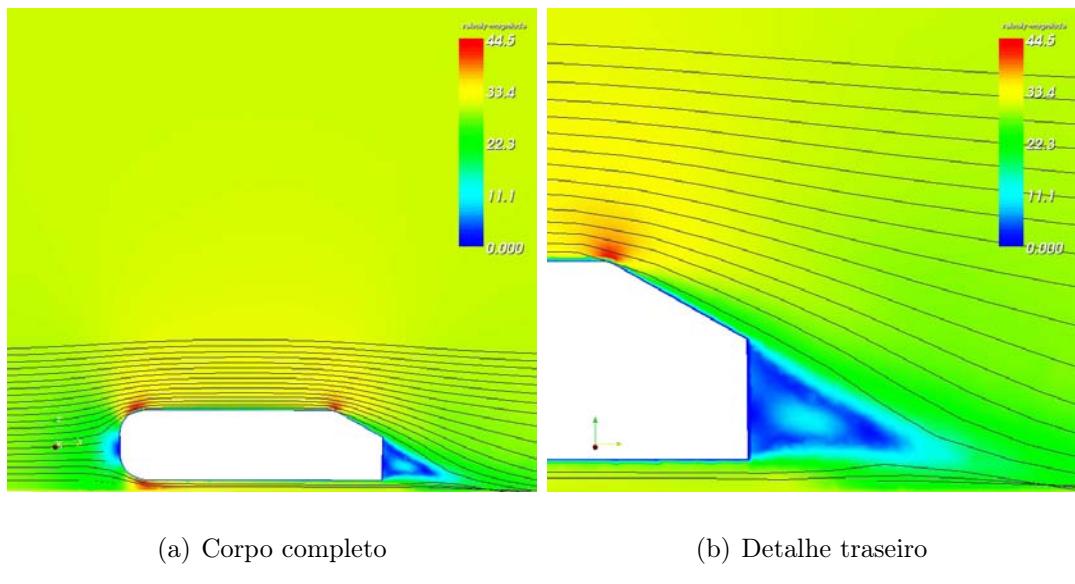


Figura 10.6: Campo de velocidade e linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed no plano V3

11 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho proporcionou uma excelente compreensão das características do escoamento ao redor de corpos rombudos, e no caso específico, o corpo de Ahmed, de grande relevância para a indústria automobilística. Também foi obtida boa familiarização com técnicas experimentais importantes, como medição de forças (arrasto) com células de carga, medição de velocidade e Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Também foi possível verificar as limitações dessas técnicas experimentais, que podem ser de ordem de configuração do ensaio, ou das características geométricas do canal e do espaço disponível para a instrumentação, ou provenientes de fenômenos físicos, como blocagem e refração. Através da técnica de PIV, a estrutura de esteira do modelo foi obtida e pôde ser comparada com resultados existentes na literatura, como em Ahmed (3), Lienhart (23) e Okada (24).

A utilização de técnicas experimentais e de técnicas computacionais (CFD - Método dos Volumes Finitos) permitiu a comparação entre duas abordagens distintas de resolução de problemas de mecânica dos fluidos. Outra constatação importante foi a verificação da adequação de certos modelos de turbulência para famílias de problemas. Os modelos $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras mostraram-se adequados para a simulação do problema do escoamento ao redor do corpo de Ahmed, apresentando resultados coerentes com os dados experimentais disponíveis. Por sua vez, o modelo $k - \omega$ Standard mostrou-se inadequado. Sendo assim, ficou evidente a importância dos estudos experimentais para a validação das simulações numéricas e de que as abordagens experimental e numérica devem coexistir sempre que possível, como pode ser notado através da observação das grandes indústrias e institutos de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 HINTERBERGER, C.; GARCÍA-VILLALBA, M.; RODI, W. Large eddy simulation of flow around the ahmed body.
- 2 MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Fourth edition. New York - USA: John Wiley and Sons, 2002.
- 3 AHMED, S. R.; RAMM, G.; FALTIN, G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. *SAE Technical Paper*, n. 840300, 1984.
- 4 OMEGA. The strain gage. Disponível em: <<http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html>>, Acesso em: 17 de mar. de 2006.
- 5 ALFA. Célula de carga modelo sv. Disponível em: <<http://www.alfainstrumentos.com.br>>, Acesso em: 17 de mar. de 2006.
- 6 ÁSSI, G. R. da S. *Estudo Experimental do Efeito de Interferência no Escoamento ao Redor de Cilindros Alinhados*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- 7 MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*. Tradução da 2ª edição americana. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1997.
- 8 OMEGA. Load cell designs. Disponível em: <<http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/load.html>>, Acesso em: 17 de mar. de 2006.
- 9 ESDU. Blockage corrections for bluff bodies in confined flows. *ESDU*, v. 1, n. 80024, 2005.
- 10 ADRIAN, R. J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 23, p. 261–304, 1991.
- 11 PRASAD, A. K. et al. Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation. *Experiments in Fluids*, v. 13, p. 105–116, 1992.
- 12 LOURENÇO, L.; KROTHAPALLI, A. On the accuracy of velocity and vorticity measurements with piv. *Experiments in Fluids*, v. 18, p. 421–428, 1995.
- 13 ADRIAN, R. J.; YAO, C. S. Development of pulsed laser velocimetry (plv) for measurements of turbulent flow. *Symposium on Turbulence*, p. 170–186, 1984.
- 14 BOILLOT, A.; PRASAD, A. K. Optmization procedure for pulse separation in cross-correlation piv. *Experiments in Fluids*, v. 21, p. 87–93, 1996.
- 15 MELLING, A. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, v. 8, p. 1406–1416, 1997.

- 16 KEANE, R. D.; ADRIAN, R. J. Theory of cross-correlation analysis of piv images. *Applied Scientific Research*, v. 49, p. 191–215, 1992.
- 17 VUOLO, J. H. *Introdução à Teoria de Erros*. 3. ed. São Paulo: IFUSP, 1999.
- 18 VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics - The finite volume method*. [S.l.]: Longman Scientific & Technical, 1995.
- 19 FLUENT INC. *Fluent Tutorial Guide*. [S.l.], 2005.
- 20 FLUENT INC. *Gambit User's Guide*. Version 1.3. [S.l.], 2000.
- 21 FLUENT INC. *Gambit Modelling Guide*. Version 1.3. [S.l.], 2000.
- 22 FLUENT INC. *Fluent Tutorial Guide*. [S.l.], 2005.
- 23 LIENHART, H.; STOOTS, C.; BECKER, S. Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (ahmed model). *Lehrstuhl für Stromungsmechanik (LSTM)*, 2003.
- 24 OKADA, M.; SHERIDAN, J.; THOMPSON, M. Effect of width-to-height ratio on wake structures of simplified vehicle geometry. *Department of Mechanical Engineering, Monash University*, 2004.