

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

Ivan Korkischko

ivan.korkischko@poli.usp.br

Julio Romano Meneghini

jmeneg@usp.br

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

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 (1).

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, 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. Devido aos altos custos e tempo das técnicas experimentais, 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.

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.

2. Corpo de Ahmed

A geometria de um modelo automobilístico simplificado proposto por Ahmed (2), conhecido como **corpo de Ahmed** (Figura 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 (2).

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 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.

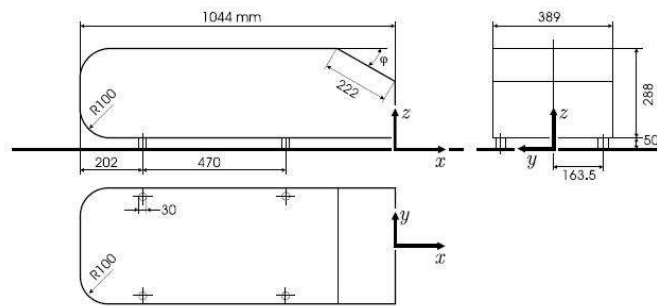


Figura 1. Esquema do corpo de Ahmed. Medidas em mm (3)

3. Fundamentos teóricos

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 maioria 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 cisalhamento e normais ao corpo que está sendo considerado. Para 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: $C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$ e $C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A}$, 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) (4).

4. Técnicas experimentais

4.1 Modelo

O modelo utilizado nos experimentos possui ângulo $\varphi = 30^\circ$, caracterizado por apresentar arrasto máximo (Figura 2). 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.

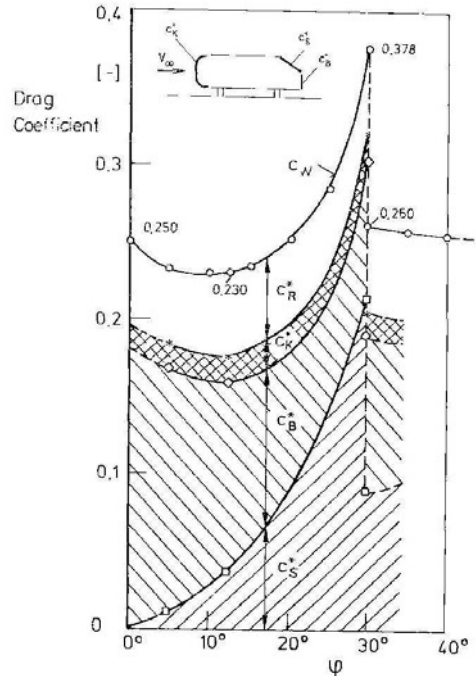


Figura 2. Coeficientes de arrasto característicos do corpo de Ahmed para vários ângulos φ de inclinação traseira medidos por Ahmed (2)

Entre as opções para a construção do modelo, incluindo madeira, optou-se por utilizar poliuretano de baixa densidade em bloco (Figura 3(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 3(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

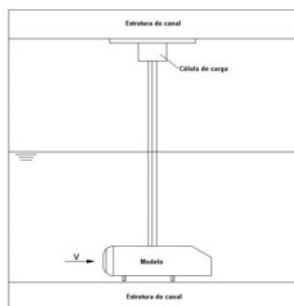
Figura 3. Modelo do corpo de Ahmed

4.2 Canal de água circulante

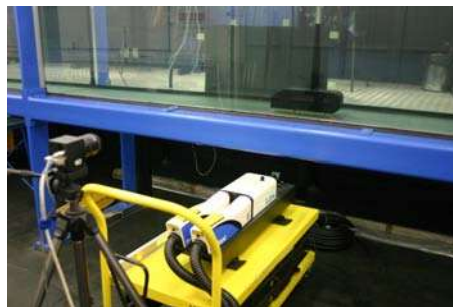
Os experimentos, medição de arrasto e visualização do escoamento, foram realizados no canal de água circulante do NDF (Figura 4). As dimensões úteis do canal de água circulante do NDF: largura: 0,7m, altura: 0,9m e comprimento: 7,5m. A vazão máxima no circuito é 0,40m³/s. Maiores informações a respeito do canal de água circulante do NDF podem ser encontradas na Referência (1). O modelo foi montado no primeiro terço da seção de testes do canal de acordo a Figura 5.



Figura 4. Canal de água circulante do NDF



(a) Desenho esquemático



(b) Foto do modelo e parte da instrumentação

Figura 5. 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, ALFA Instrumentos S-5, utilizada nos ensaios deste trabalho trata-se do tipo externo e uniaxial (medição de força em uma única direção). 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). Foram realizadas cinco séries de medições, com diferentes números de Reynolds cada uma, com números de Reynolds entre $4,19 \cdot 10^4$ e $2,22 \cdot 10^5$.

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. 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.

4.5 Blocação

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.

O efeito de blocação resulta no aumento de velocidades do escoamento ao redor do corpo e em sua esteira. A blocação 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 blocação, S/A , maior do que 1 (um) por cento. A razão de área de blocação é a razão entre S : área da seção transversal do modelo, e A : área da seção transversal da seção de testes.

O modelo do corpo de Ahmed utilizado neste trabalho possui razão de área de blocação, $S/A = 6,9\%$, e, de acordo com a Referência (5), o método recomendado para a correção do efeito de blocação no coeficiente de arrasto (C_D) é o Método de Escoamento Quasi-Afilado (*Quasi-streamlined Flow Method*).

4.6 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 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.

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.

5. Resultados experimentais

5.1 Medição de arrasto

De acordo com Vuolo (6), 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 frequência de aquisição de um evento deve ser, pelo menos, o dobro da maior frequência de interesse para que não ocorra *aliasing* (1). Os sinais foram filtrados analogicamente com banda passa-baixa com frequência de corte de 10 Hz.

Os valores do coeficiente de arrasto, C_D , e do coeficiente de arrasto corrigido do efeito de blocagem, 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: $C_D = 0.515$ e $C_{Df} = 0.383$.

O estudo experimental realizado por Ahmed (2), 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 2, sendo que 85 % do arrasto é devido à pressão e os outros 15 % restantes à viscosidade.

Comparando o resultado obtido por Ahmed (2) 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 (2), 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.

5.2 Visualização do escoamento ao redor do corpo de Ahmed

Os equipamentos de PIV utilizados (Figuras 4 e 5(b)) 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(a) e 6(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. As Figuras 7 e 8 sintetizam os resultados obtidos com PIV e mostram algumas das estruturas de esteira formadas na traseira do corpo de Ahmed.

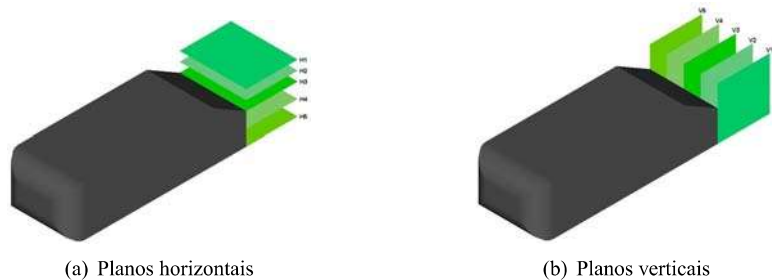


Figura 6. Planos de medição utilizando PIV

Apesar do escoamento de esteira de corpos rombudos ser não uniforme, o escoamento médio exibe macroestruturas que parecem governar o arrasto de pressão criado na traseira. As principais características desse escoamento podem ser vistas na Figura 9.

Da Figura 7 pode-se notar uma estrutura principal: a camada cisalhante, surgindo da aresta lateral da inclinação, gira em um vórtice longitudinal, identificado como o vórtice *C* na Figura 9, de maneira semelhante ao fenômeno observado na ponta de asas de baixa razão de aspecto. E na Figura 8, 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. Na Figura 7 também pode ser verificada a região correspondente aos vórtices *A* e *B*.

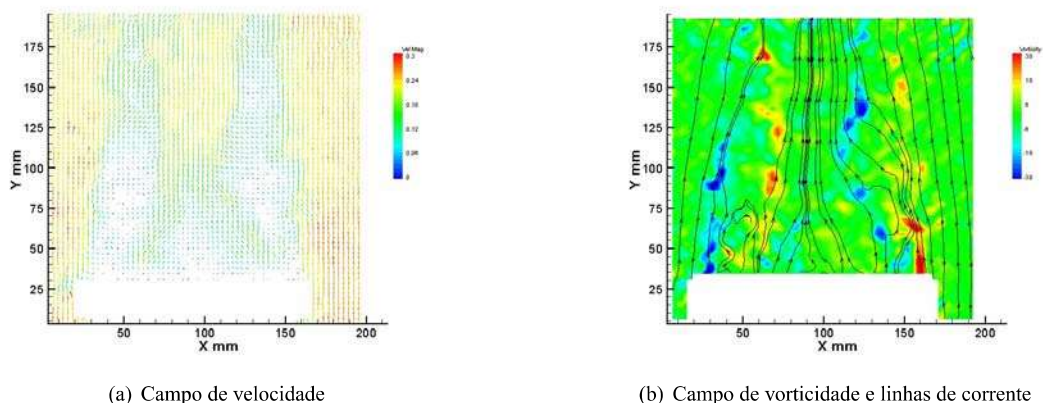


Figura 7. Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano horizontal

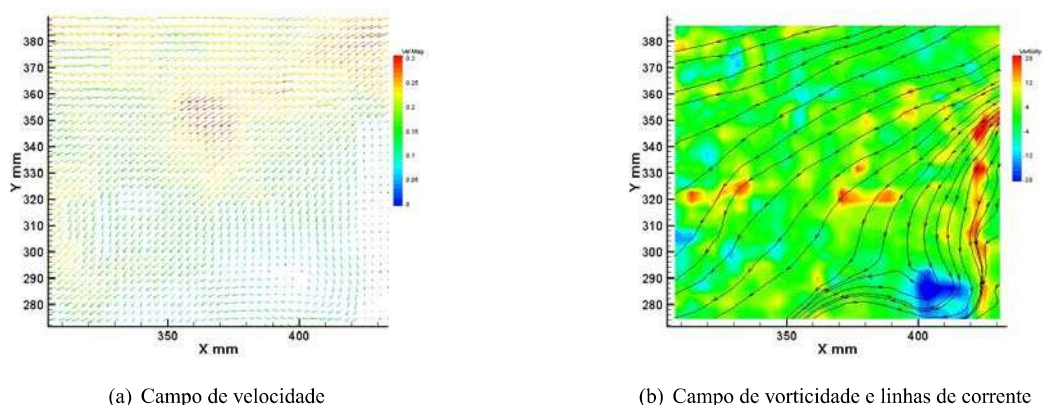


Figura 8. Escoamento em torno do corpo de Ahmed no plano vertical

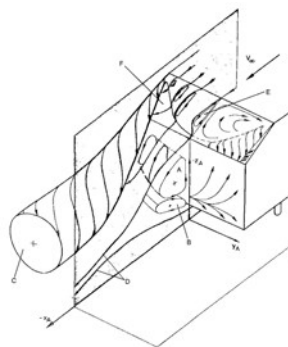


Figura 9. Representação esquemática da condição de arrasto alto ($\varphi = 30^\circ$) (2)

6. 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 (7) e (8). A fase das simulações numéricas envolveu a solução do problema em regime permanente.

6.1 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 11 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.

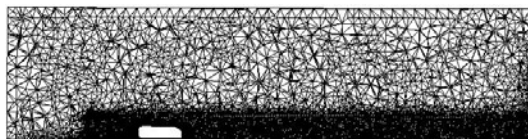
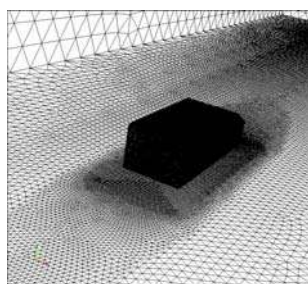
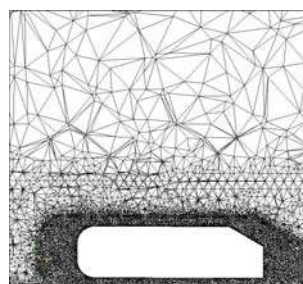


Figura 10. Corte longitudinal na malha do corpo de Ahmed



(a) Detalhe 3D



(b) Detalhe do corte longitudinal

Figura 11. Detalhes da malha do corpo de Ahmed

6.2 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 $V = 30\text{m/s}$ 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 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 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 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 (2) ($C_{D_{AHMED}} = 0.378$) 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, apresentado diferença de 1.71% quando comparado ao valor de Ahmed (2) 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 (2) e 5.38% em relação ao presente trabalho.

Do estudo experimental realizado por Ahmed (2), 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 (2). Os modelos $k - \omega$ SST e Spalart-Allmaras mostraram-se adequados para o tratamento do problema proposto apresentando pequenas diferenças entre si (Tabela 3).

Tabela 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 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 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 12 verifica-se a forma das linhas de corrente do escoamento em torno do corpo de Ahmed. Comparando essas figuras com aquelas apresentadas na seção **Resultados Experimentais** nota-se a boa correlação entre os resultados experimentais de Ahmed (2) 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 (2) na Figura 9 e verificado nas figuras de PIV deste trabalho.

As Figuras 13 a 15 adotam os mesmos planos apresentados nas Figuras 6(a) e 6(b). Através da Figura 13 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 (2). As Figuras 14 e 15 apresentam excelente correspondência com aquelas apresentadas na seção **Resultados Experimentais**, 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.

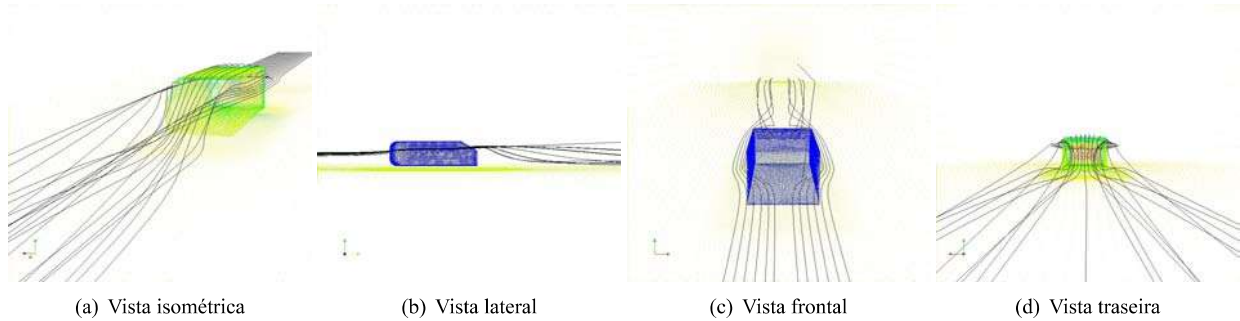


Figura 12. Linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed

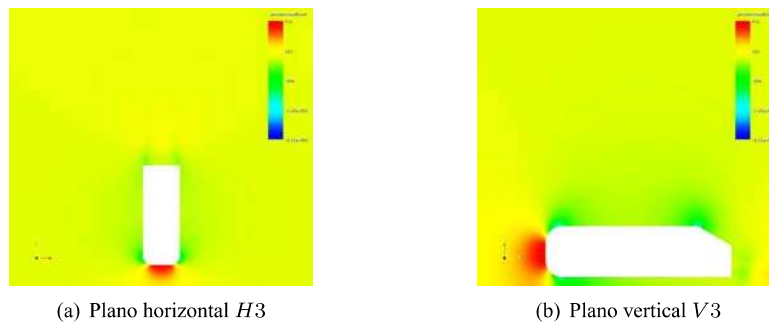


Figura 13. Distribuição do coeficiente de pressão ao redor do corpo de Ahmed

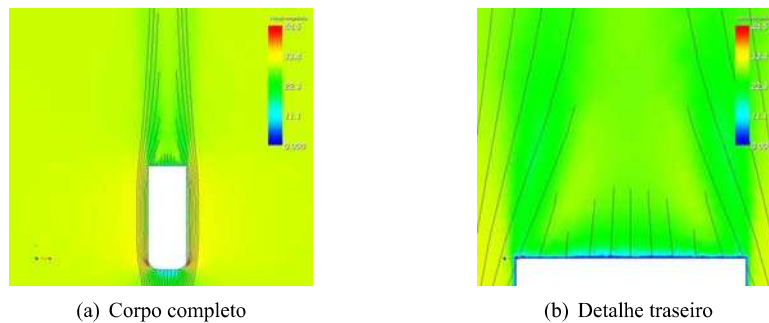


Figura 14. Campo de velocidade e linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed no plano $H3$

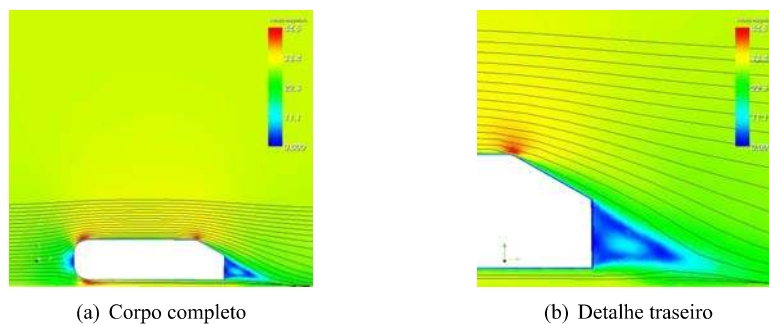


Figura 15. Campo de velocidade e linhas de corrente ao redor do corpo de Ahmed no plano $V3$

7. 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. A utilização de técnicas experimentais, como medição de arrasto e PIV, e de técnicas computacionais (MVF) 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.

8. Referencias

- 1 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.
- 2 AHMED, S. R.; RAMM, G.; FALTIN, G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. **SAE Technical Paper**, n. 840300, 1984.
- 3 HINTERBERGER, C.; GARCÍA-VILLALBA, M.; RODI, W. Large eddy simulation of flow around the ahmed body.
- 4 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.
- 5 ESDU. Blockage corrections for bluff bodies in confined flows. **ESDU**, v. 1, n. 80024, 2005.
- 6 VUOLO, J. H. **Introdução à Teoria de Erros**. 3. ed. São Paulo: IFUSP, 1999.
- 7 FLUENT INC. **Gambit Modelling Guide**. Version 1.3. [S.l.], 2000.
- 8 FLUENT INC. **Fluent Tutorial Guide**. [S.l.], 2005.

Experimental investigation and numerical simulation of the flow around an automotive model: Ahmed body

Ivan Korkischko

ivan.korkischko@poli.usp.br

Julio Romano Meneghini

jmeneg@usp.br

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