

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO AO REDOR DO CORPO DE AHMED

Experimental analysis of the flow around the ahmed body

Dolir Jose Climaco Varela¹; Alexandre Vagtinski de Paula²

¹ Engenheiro Mecânico formado pela Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI – Câmpus de Erechim, atualmente cursa mestrado acadêmico na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Brasil. E-mail: dolir.varela@ufrgs.br.

² Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Brasil, atualmente é professor do Curso de Engenharia Mecânica e Engenharia de Energia da UFRGS. E-mail: depaula@ufrgs.br.

Data do recebimento: 12/02/2016 - Data do aceite: 29/04/2016

RESUMO: O presente trabalho apresenta um estudo experimental de um projeto aerodinâmico veicular, utilizando um modelo automobilístico simplificado, conhecido como corpo de Ahmed, que possui vasta referência literária. Esta análise experimental envolveu a mensuração da pressão sobre a superfície do modelo, ensaios de visualização de escoamento, determinação da força de arrasto aerodinâmico e efeito da razão de bloqueio do escoamento sobre o modelo. Os ensaios foram realizados em um canal aerodinâmico de circuito aberto no Laboratório de Fenômenos de Transporte da URI, Erechim. Os resultados experimentais da medição da variação de pressão e de força de arrasto são bastante semelhantes aos encontrados na literatura. O comportamento da variação do coeficiente de arrasto (C_d) com o número de Reynolds (Re) está relacionado com o que ocorre em cilindros e esferas lisas, onde, para o regime subcrítico, há uma estabilização da força de arrasto. Na avaliação da curva de pressão, nota-se que na região superior do modelo ocorre uma queda brusca destes valores, em que o plano está inclinado em 30° devido à desaceleração do escoamento. Os ensaios de visualização apresentaram bons resultados, nos quais se observam regiões de descolamento e recirculação do escoamento sobre as superfícies do modelo.

Palavras-chave: Análise experimental. Corpo de Ahmed. Mecânica dos fluidos. Coeficiente de pressão.

ABSTRACT: This work presents an experimental study of the design of an aerodynamic vehicle, using a simplified model automobile, known as Ahmed's

body, which has extensive reference in the literature. This experimental analysis involved measuring the pressure on the surface of the model, flow visualization tests, determining the aerodynamic drag force and effect of the flow blocking ratio over the model. The tests were performed in the aerodynamic open circuit channel in the Transport Phenomena Laboratory at URI, Erechim campus. The experimental results of the measurement of the variation of pressure and drag force are quite similar to those found in the literature. The behavior of the change in drag coefficient (C_d) with Reynolds number (Re) is related to what occurs in smooth spheres and cylinders, where for the subcritical system, there is a stabilization of the drag force. In the evaluation of pressure curves, it is observed a sharp decline of these values in the upper region of the model, where the plane is inclined by 30° due to deceleration of the flow. Flow visualization results present good results, where regions of detachment and recirculation of the flow on the surfaces of the model are observed.

Keywords: Experimental analysis, body of Ahmed, fluid mechanics, pressure coefficient.

Introdução

Um dos pontos chave para alcançar uma melhor eficiência nos veículos é a aerodinâmica veicular, mais especificamente em um de seus principais fundamentos: o arrasto aerodinâmico. Este pode ser definido como uma força resistiva imposta pelo ar ambiente a um objeto que por ele se desloca. Outro fator que deve ser avaliado é a forma do escoamento ao redor do corpo. Mesmo sendo um problema elementar da mecânica dos fluidos, o escoamento ao redor de corpos rombudos apresenta desafios devido à sua grande aplicação na engenharia.

Nos problemas de fluidodinâmica, 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 teóricas e numéricas de estudo desses problemas (NICOLAZZI e ROSA, 2001). A

tendência na indústria é investir maciçamente em soluções computacionais, testando inúmeras hipóteses e configurações, utilizando experimentos apenas para a decisão final de um projeto ou testes da solução escolhida, ou ainda para a validação de modelos numéricos (CARREGARI, 2006).

Pawlowski (1930) publicou resultados da influência dos cantos arredondados no coeficiente de arrasto de corpos retangulares. Moller (1951) analisou o escoamento ao redor de dois modelos da primeira van da Volkswagen, através de ensaios com dois modelos, um com os cantos arredondados, e outro, com os cantos vivos, sendo os valores do coeficiente de arrasto obtidos, respectivamente, 0,42 e 0,76. Estes valores são justificados devido ao escoamento permanecer colado na superfície lateral do modelo com os cantos arredondados, gerando uma menor esteira. Para o modelo não arredondado, o escoamento permanecer totalmente descolado.

Buscando o entendimento da interação da dinâmica entre o fluido e a estrutura, vários

trabalhos na área da aerodinâmica veicular foram propostos. Em destaque, está o apresentado por Ahmed (1984), que analisou o escoamento ao redor de um veículo conceito. Usando dados de forças de sustentação e arrasto, Ahmed foi capaz de mostrar o efeito do ângulo de inclinação traseira nas características aerodinâmicas do escoamento. Em particular, um pico de arrasto significativo foi identificado com um ângulo de inclinação de 30° . O ângulo associado a este pico de arrasto é agora chamado de “ângulo de inclinação traseira crítico”. Ahmed também mostrou a contribuição do arrasto nas diferentes regiões do modelo. O uso de corpos simples para a investigação das características do escoamento é de fundamental importância, sendo que os dados publicados ainda servem de referência primária para estudos realizados até hoje.

Korkischko (2007) realizou uma investigação experimental e também simulações numéricas do escoamento ao redor de um modelo automobilístico, o corpo de Ahmed. 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). Já a parte computacional consistiu na simulação numérica do escoamento ao redor do corpo de Ahmed, empregando técnicas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Os resultados experimentais de medição de arrasto 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.

Ataídes (2009) implementou os efeitos da não linearidade do tensor de Reynolds em modelos de turbulência baseados na hipótese de Boussinesq para o caso do escoamento ao redor do corpo de Ahmed. Foram obtidos o coeficiente de pressão na superfície, os perfis transversais de velocidade média e a energia cinética turbulenta, com boa correlação dos resultados experimentais em relação aos obtidos experimentalmente na literatura. Além disso, foi feita a caracterização do escoamento secundário através das componentes de velocidade na direção transversal e o coeficiente de arrasto para o corpo rombudo, com diferenças percentuais, variando entre 2,1% e 8,1% para os modelos de turbulência simulados, quando comparados com resultados experimentais apresentados na literatura.

Sousa et al. (2010) simularam, numericamente, o escoamento sobre um veículo rodoviário, utilizando um modelo físico idealizado, o corpo de Ahmed, empregando a técnica de CFD e utilizando o método de volumes finitos para solução das equações diferenciais governantes, empregando o pacote comercial ANSYS-CFX. Apresentaram os resultados para: o arrasto de pressão e de atrito, campos de pressão e de velocidade, vetores de velocidade, linhas de corrente de velocidade e vorticidade, avaliações do comportamento da camada limite e seu descolamento e recirculações. Comparações com soluções experimentais também foram apresentadas. Os valores para os coeficientes de arrasto obtidos ficaram próximo dos valores obtidos em ensaios realizados em túneis de vento.

Kourta et al. (2012) realizaram experimentos em túnel de vento utilizando o corpo de Ahmed, com o objetivo de analisar pressões estáticas, realizar visualização por PIV na parede, bem como a aplicação de técnicas

de anemometria de fio quente. Seus desempenhos aerodinâmicos foram caracterizados. Com ângulo de inclinação traseira de 25° , encontram reduções de arrasto na ordem de 8,5% para Reynolds de $1,2 \times 10^6$, e de 6,5% para Reynolds de $1,9 \times 10^6$.

Liu (2012) analisou, numericamente, o escoamento de ar sobre o corpo Ahmed por meio de modelos transitórios de turbulência RANS. Os resultados de vários modelos de turbulência RANS foram comparados. Verificou-se que o modelo $k-\omega$ de Durbin é mais preciso do que os outros modelos de turbulência para os casos delimitados na parede, com descolamento da camada limite e recolamento. A função da parede de modelo $k-\omega$ foi introduzida para evitar divergências quando uma malha muito fina é empregada para geometrias complexas. Os resultados numéricos concordam bem com os resultados experiências disponíveis na literatura.

Buscando reproduzir a metodologia de projeto atualmente empregada em diversas indústrias de grande importância, como a aeroespacial, a automobilística, a do petróleo, a naval e a civil, dentre outras, este trabalho utiliza uma abordagem experimental, abrindo precedente para uma avaliação numérica. Vale ressaltar que tais técnicas são complementares e geram projetos e resultados cada vez mais elaborados.

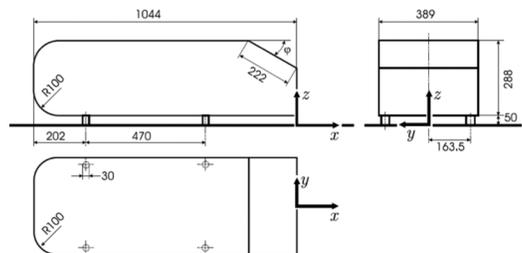
O presente trabalho objetiva o estudo de um modelo automobilístico, baseado no corpo de Ahmed. Este modelo apresenta relativa importância para a indústria automobilística, pois serve de padrão de calibração de túneis de vento e *benchmark* para validação de modelos de turbulência, utilizados em dinâmica dos fluidos computacional. Esta análise experimental envolve a medição da pressão sobre a superfície do modelo, ensaios de visualização de escoamento, determinação da força de arrasto aerodinâmico e efeito da razão de bloqueio do escoamento causado

pelos paredes do canal aerodinâmico sobre o modelo.

Modelo Físico: O Corpo de Ahmed

A geometria de um modelo automobilístico simplificado, proposta por Ahmed (1984), conhecido como corpo de Ahmed (Fig. 1), reproduz as características essenciais do campo de escoamento ao redor de um veículo real, com exceção dos efeitos devidos à 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 ao longo da extensão do corpo e uma grande estrutura de esteira na traseira.

Figura 1 - Esquema do corpo de Ahmed [mm] (AHMED, 1984).



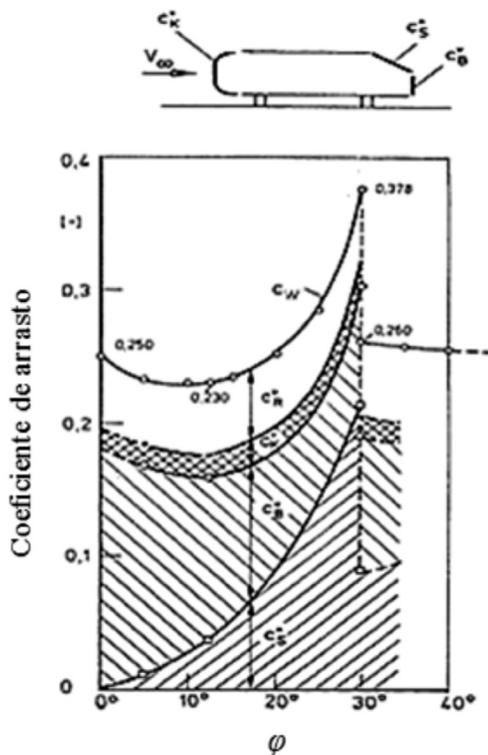
A escolha do modelo do corpo de Ahmed também permite a validação de modelos numéricos de turbulência. A variação do ângulo de inclinação da traseira (ϕ) do corpo de Ahmed permite a obtenção de várias estruturas de esteira de vórtices nesta região do escoamento sobre modelo, fato responsável pela maior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

Metodologia

Nesta seção, é apresentada uma descrição dos materiais utilizados e os procedimentos experimentais adotados nas seguintes etapas deste trabalho: o projeto dos modelos ensaiados, o canal aerodinâmico, a balança aerodinâmica, os métodos utilizados para reproduzir o escoamento sobre modelos, os ensaios de visualização de escoamento e as incertezas experimentais.

Com o objetivo de avaliar a razão de bloqueio dos modelos em relação à seção de testes do canal aerodinâmico, dois casos com escalas diferentes foram construídos. Os dois casos utilizados nos experimentos possuem ângulo de inclinação traseira (ϕ) de 30° , caracterizado por apresentar arrasto máximo (Fig. 2).

Figura 2 – Coeficiente de arrasto característicos do corpo de Ahmed (Adaptado de Ahmed, 1984).



Caso 1: O primeiro modelo confeccionado representa uma escala reduzida aproximada de 1:4 das dimensões propostas por Ahmed (1984). Sua área frontal representa um total de 8% da área da seção do canal aerodinâmico. Esta porcentagem representa a razão de bloqueio deste modelo em relação ao canal.

Caso 2: O segundo modelo confeccionado apresenta uma escala de 1:2 em relação ao proposto por Ahmed (1984). Sua área frontal representa 30% da área da seção do canal aerodinâmico.

O projeto original proposto pode ser visualizado na Fig. 1. Entre as possibilidades para a construção do modelo, optou-se pela utilização de madeira de balsa, revestida com massa plástica automobilística e pintada com tinta spray automobilística de cor preta para melhor visualização do escoamento sobre sua superfície. Essa opção resulta em uma maior facilidade para modelar o material e em um acabamento satisfatório. A Fig. 3 mostra o modelo para o caso 1 do corpo de Ahmed finalizado.

Figura 3 - Primeiro modelo construído em escala 1:4 do corpo de Ahmed

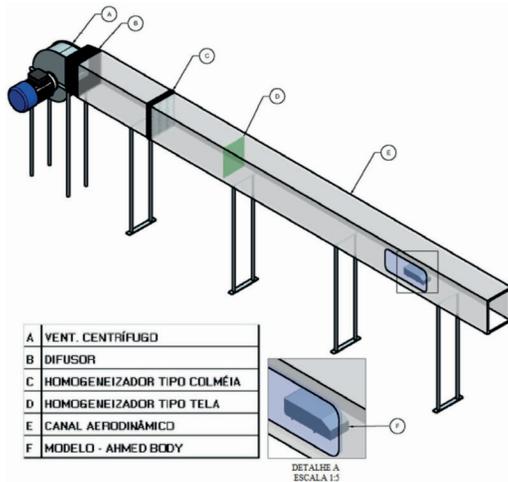


Canal Aerodinâmico

O canal aerodinâmico de circuito aberto do Laboratório de Fenômenos de Transporte da URI Câmpus de Erechim foi utilizado nos

experimentos. A seção de testes do canal apresenta dimensões de 281 ± 1 mm de largura por 351 ± 1 mm de altura, com uma área de $0,1 \pm 0,5$ m². Uma visão geral do canal aerodinâmico é apresentada na Fig. 4. O canal aerodinâmico tem comprimento total de $5,5 \pm 0,01$ m, sendo o ar atmosférico impulsionado por um ventilador centrífugo com motor de 3,7 kW de potência, posteriormente, passando por dispositivos homogeneizadores do escoamento do tipo colmeia e tela até atingir a seção de testes. A velocidade do escoamento de ar no interior do canal pode ser controlada por intermédio de um inversor de frequência, que varia a rotação do motor elétrico do ventilador centrífugo. Assim, a velocidade do escoamento de ar com o canal livre pode variar de 0 até 25 m/s. Os experimentos foram realizados em um ambiente não climatizado.

Figura 4 – Ilustração esquemática do canal aerodinâmico.



Balança Aerodinâmica

Foi construída uma balança do tipo *sting*, instrumentada com extensômetros (*strain gauges*) acoplados a uma lâmina de aço rápido de 13 mm de largura por 0,6 mm de espessura, para que se possam medir as deformações originadas das forças aerodinâmicas, decorrentes do escoamento de ar incidente no modelo.

O funcionamento dos transdutores elétricos (extensômetros) está relacionado à deformação desta lâmina metálica, transformando-a em sinal elétrico. O circuito utilizado para detectar e converter esta deformação em sinal elétrico, para tensão, foi constituído de uma Ponte de Wheatstone e um amplificador de sinal. O sistema consiste em uma haste fixada no centro inferior do modelo. Na extremidade da haste, foi soldado um pino para realizar o contato em um ponto da lâmina. O sistema foi alimentado por uma fonte com tensão de 12 V. Para a obtenção dos dados, foi utilizado um multímetro digital. Para melhor confiabilidade de resultados, foi instalado um potenciômetro para zerar a indicação do multímetro.

Antes do início das avaliações, foi necessária a calibração da balança, que consiste na adição de massas padronizadas na mesma posição, onde a haste do modelo atinge a lâmina. Após alguns segundos, ocorre a estabilização do sinal elétrico. A medição dos valores da tensão é realizada por intermédio de um voltímetro digital, em função das massas posicionadas. Obteve-se uma curva do tipo Massa x Tensão (Volts) e, assim, os coeficientes angular e linear e o desvio padrão. O erro implícito está relacionado ao multímetro digital que, para 200 V é de 0,5%, e para os extensômetros, com uma deformação da haste de 30°, é de 1%.

Distribuição de Pressão nas Superfícies do Modelo

Para as medidas de pressão, foram realizados orifícios de $3,2 \pm 0,1$ mm, os quais foram distribuídos ao longo da superfície do modelo. Os orifícios foram posicionados com uma distância de dois milímetros entre si na face superior e traseira dos modelos, e de um milímetro entre si na parte frontal dos modelos. Aos orifícios, foram instaladas tomadas de pressão, constituídas de tubos

de plástico de um milímetro de diâmetro interno, posicionados perpendicularmente à superfície, sendo conectadas a um micromanômetro digital. Para o primeiro modelo, foram utilizadas 28 tomadas de pressão, e para o segundo modelo, foram utilizadas 55. Tais tomadas podem ser observadas na Fig. 3.

Medição da Pressão

Cada mangueira fixada nos orifícios de tomada de pressão foi conectada na entrada do micromanômetro digital para medição da pressão naquela região da superfície do modelo. Uma das extremidades do micromanômetro permaneceu exposta à atmosfera. Para a realização da leitura da pressão, foi necessário coletar as condições de pressão atmosférica e temperatura ambiente de cada experimento para, posteriormente, avaliar junto às informações lidas no manômetro digital. As informações sobre a temperatura dos experimentos foram obtidas com um termômetro de bulbo seco dentro do canal e por um anemômetro de fio quente. A pressão atmosférica foi determinada através de um barômetro de mercúrio. Assim, com as medidas apresentadas pelo manômetro, foi possível mensurar a pressão em cada um dos pontos do modelo.

O valor da incerteza para os resultados da medida da distribuição de pressão está relacionado à precisão dos instrumentos utilizados para as medições. No caso deste trabalho, o manômetro digital tem precisão de 0,5% para as condições de avaliação, o anemômetro de fio quente tem precisão de 0,5°C, e para o barômetro de Torricelli é de 3 mmHg.

Visualização de escoamento

O objetivo dessa técnica é o de analisar visualmente o comportamento do escoamento sobre a superfície do modelo. Neste

trabalho, foram aplicadas duas técnicas de visualização descritas por Pope (1999) para determinação do ponto de estagnação frontal, decorrente da grande área de bloqueio do modelo e a formação dos vórtices, devido ao descolamento da camada limite nas superfícies laterais, no teto e na traseira do modelo. Na primeira técnica de visualização, foram utilizados pequenos tufo de fios de lã (ou *tufts*, em inglês) adesivados a todas as superfícies do modelo. Na segunda técnica de visualização, foi empregada a injeção de fumaça diretamente no escoamento principal do canal aerodinâmico. Uma câmera digital foi utilizada para o registro das sequências de imagens e determinação dos pontos de interesse nas superfícies do modelo.

Para esse experimento, foi necessária a construção de um pente de injeção de fumaça, que foi confeccionado com tubos de cobre. Para a produção da fumaça, foi utilizada uma máquina de fumaça elétrica profissional. A base para a fumaça produzida é glicerina líquida, água e álcool etílico. Foi observado que o escoamento de fumaça produzido não apresenta grandes perturbações ao sair do pente de injeção de fumaça, indicando que a relação da massa específica desta com a do ar ambiente não interfere na análise, embora seu valor quantitativo não tenha sido determinado.

Resultados

Os experimentos foram realizados em laboratório com temperatura ambiente de 21°C e pressão atmosférica de 100658,1 Pa, o que resulta em uma massa específica do ar ambiente (ρ) de 1,209 kg/m³.

Resultados do Arrasto Aerodinâmico

A variação do coeficiente de arrasto com o número de Reynolds foi medida através da

balança aerodinâmica com os extensômetros. Sete números de Reynolds foram utilizados nesses ensaios. Cada ensaio foi repetido três vezes, e uma média aritmética destes valores foi determinada. A incerteza estimada para a força de arrasto é de 2,55 N, considerando a menor variação de tensão lida pelo multímetro com relação a uma variação infinitesimal de massa. Para a pressão, a incerteza estimada é de 0,005 Pa, de acordo com o manual do micromanômetro digital.

A componente da força resultante que atua na direção do escoamento é denominada arrasto, D (em inglês, *drag*), e a que atua na direção normal ao escoamento é denominada sustentação, L (*lift*). O arrasto pode ser obtido pela integração das tensões de cisalhamento e normais ao corpo que está sendo considerado. Na tentativa de superar as dificuldades de obter essas distribuições, são definidos coeficientes adimensionais de arrasto e sustentação, que consideram os efeitos globais das tensões de cisalhamento e normais e que podem ser obtidos através de análise simplificada, de técnicas numéricas e de experimentos bem conduzidos. O coeficiente de arrasto, C_d , é definido por:

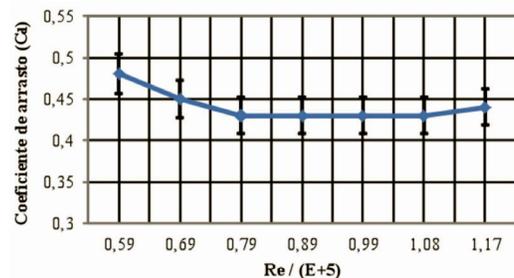
$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A}$$

em que D é o arrasto, ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3), U é a velocidade do escoamento (m/s) e A é a área característica do objeto (m^2), conforme Munson (1997).

A Fig. 5 apresenta o comportamento da variação do coeficiente de arrasto (C_d) com o número de Reynolds (Re) para o caso 1 de escala 1:4 em relação ao proposto por Ahmed. Observa-se que o C_d diminui gradativamente na faixa de número de Reynolds de $5,9 \times 10^4$ a $7,9 \times 10^4$, estabilizando em torno de 0,43 na faixa de $5,9 \times 10^4$ a $1,08 \times 10^5$. Para um número de Reynolds maior, o C_d volta a subir. Este

comportamento pode estar relacionado com o que ocorre em cilindros e esferas lisas, onde, para o regime subcrítico, há uma estabilização da força de arrasto. Isso está de acordo com a literatura (FOX, 2012), que comenta que uma esteira turbulenta de baixa pressão ocupa toda parte de trás do modelo e a maior parte do arrasto é causada pela assimetria de pressão entre as partes frontal e posterior do modelo. Vale ressaltar que o experimento realizado utilizou uma guia linear na base para sustentar o modelo, apresentando atrito elevado à baixa velocidade, o que impossibilitou avaliações para números de Reynolds abaixo de $5,9 \times 10^4$. Em futuros experimentos, sugere-se que seja utilizada uma base magnética para diminuir o atrito do rolamento com a base do canal aerodinâmico, visando possibilitar a estimativa do C_d para Reynolds menores. A literatura (FOX, 2012) apresenta resultados para C_d em função do Reynolds para uma esfera lisa, de onde se observa um comportamento semelhante ao obtido no primeiro modelo. Porém, em virtude da baixa potência do motor do ventilador disponível, não é possível obter velocidades maiores para uma comparação direta. Contudo, o último ponto obtido no gráfico da Fig. 5 dá indícios do aumento do C_d , o que é coerente com a teoria.

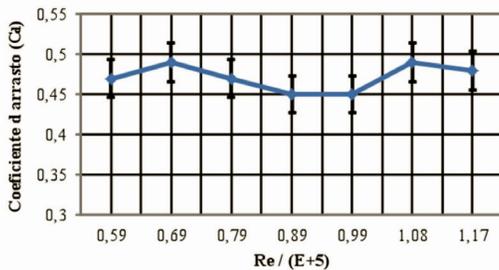
Figura 5 - Variação do coeficiente de arrasto com o número de Reynolds no caso 1.



A Fig. 6 ilustra os resultados de C_d em função de Reynolds para o caso 2 de escala 1:2 em relação ao proposto por Ahmed. É

observado que há uma maior variação do C_d para a faixa que vai de $5,9 \times 10^4$ a $8,9 \times 10^4$, e que dá indícios da influência da parede superior (efeito Venturi) nos resultados obtidos. Há também a região de estabilização do C_d entre $8,9 \times 10^4$ e $9,9 \times 10^4$. Após este último valor, o arrasto volta a subir. Em relação ao seu comportamento, os resultados encontrados assemelham-se com aqueles apresentados para o primeiro modelo.

Figura 6 - Variação do coeficiente de arrasto com o número de Reynolds no caso 2.



Distribuição de Pressão

Os ensaios para determinação da distribuição de pressão nas superfícies do modelo são importantes para a análise do escoamento de ar para identificar regiões de recirculação sobre o modelo que não possam ser vistas nas visualizações de escoamento. Os experimentos foram realizados para quatro diferentes velocidades médias do escoamento. A Fig. 7 apresenta a curva de pressão ao longo da superfície do caso 1. Percebe-se o elevado gradiente de pressão que existe sobre o corpo, onde os valores máximos acontecem na parte frontal (entre os pontos 5 e 9), na região em que a velocidade é baixa. A pressão máxima encontra-se na face frontal do modelo, consequentemente, a menor velocidade de escoamento. Contudo, valores negativos nas escalas de pressão representam pressões abaixo da atmosférica referenciada. Nota-se que, na região superior, ocorre uma queda brusca da pressão (pontos 19 a 26), onde o plano está inclinado em 30° , devido à desaceleração do

fluido. As menores pressões acontecem nos cantos onde existem grandes acelerações do fluido (pontos 9 a 14). Observa-se que para o menor Reynolds $5,9 \times 10^4$ a variação da pressão, ao longo do modelo, foi menor que a apresentada para Reynolds maiores. Nos pontos de medição no intervalo de 20 a 26, há uma variação no valor de pressão para Reynolds de $9,86 \times 10^4$ e $1,17 \times 10^5$. Isso se deve à assimetria de pressão na parte traseira do modelo, que causa uma variação grande na leitura com o micromanômetro, impossibilitando a obtenção exata do valor da pressão.

Figura 7 - Curva de pressão ao longo da superfície no modelo do Caso 1.

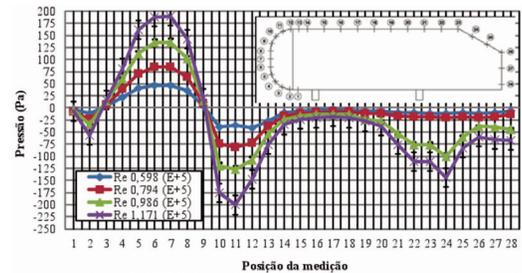
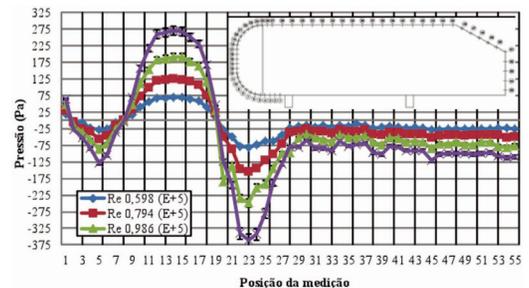


Figura 8 - Curva de pressão ao longo da superfície no modelo do caso 2.

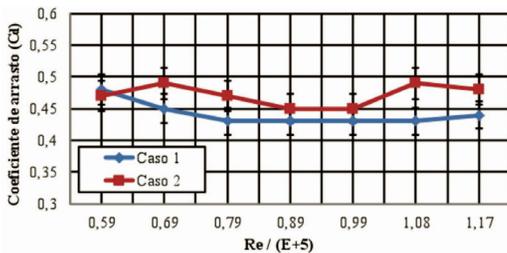


No caso 2, encontramos características semelhantes às encontradas no caso 1. Na região superior, ocorre uma queda brusca de pressão; as menores pressões acontecem nos cantos onde existem grandes acelerações do fluido. A pressão máxima encontra-se na face frontal do modelo, consequentemente, a menor velocidade de escoamento. A Fig. 8 apresenta a distribuição superficial de pressão para este escoamento.

Avaliação da Razão de Bloqueio

Para avaliar a influência da razão entre a área frontal do modelo e a seção do canal aerodinâmico, conhecida como razão de bloqueio, foram avaliados dois casos. O caso 1 apresenta um fator de bloqueio de 8%, e o caso 2 apresenta um fator de bloqueio de 30%. A Fig. 9 avalia as duas curvas de arrasto encontradas na análise dos modelos. É possível visualizar que o arrasto apresentado pelo modelo do caso 2, com maior razão de bloqueio, é superior. Isso acontece devido a uma maior área frontal do caso 2, ponto este que apresenta a maior influência de pressão.

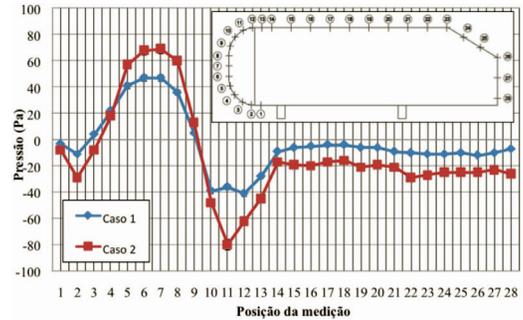
Figura 9 - Comparação do coeficiente de arrasto nos dois casos.



A Fig. 10 apresenta as duas curvas de pressão encontradas nas superfícies dos modelos em avaliações com Reynolds $5,9 \times 10^4$. Para realizar essa análise, foi necessário reduzir o número de pontos no caso 2, de 55 para 27 pontos, posicionados na mesma posição do caso 1. É possível observar picos maiores de pressão no caso 2. A maior pressão na parte frontal ocorre devido a esta área ser maior. A menor pressão na parte superior ocorre devido à existência de menos área disponível entre o modelo e o canal, forçando o ar a escoar com maior velocidade. Observa-se que os resultados para o corpo de Ahmed com 30% de bloqueio apresentam maior variação de pressão na parte frontal (ponto 4 a 9) do que o corpo com 8% de bloqueio, devido à maior região de estagnação. Na parte supe-

rior do modelo do caso 2 (ponto 10 a 44), há uma diminuição de pressão, seguido de uma região com pressão praticamente constante (ponto 14 a 28). De acordo com Carregari (2006), isso acontece devido ao recolamento do escoamento do ar. Na parte traseira dos modelos, os coeficientes de pressão ficam constantes devido à região de baixa pressão, propiciada pela presença de vórtices.

Figura 10 - Comparação da curva de pressão nos dois modelos analisados

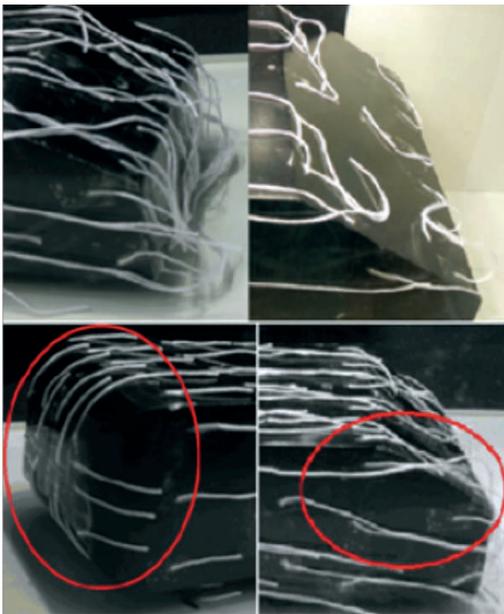


Visualização de Escoamento

O objetivo dos ensaios de visualização é mostrar o comportamento do escoamento sobre a superfície do modelo. A técnica de visualização com tufo de lã tem a finalidade de visualizar o escoamento sobre as superfícies do modelo e observar as regiões de recirculação, decorrente da posição desordenada dos tufo. O aumento na incidência do escoamento no modelo mostra crescimento das regiões de recirculação, ocasionando um aumento significativo nos coeficientes aerodinâmicos (POPE, 1999). Na Fig. 11, pode-se observar o aumento da região de recirculação e a formação de um vórtice na quina superior do modelo devido à movimentação desordenada dos tufo. Pode-se observar a presença de uma região de estagnação na parte frontal do modelo pelo posicionamento dos tufo que estão direcionados para as laterais, para baixo e para cima. É visível a total separação do escoamento de ar na parte traseira do modelo,

diante da atividade desordenada dos tufos colocados nas extremidades desta região do modelo. Pode-se fazer uma comparação com a literatura (KORKISCHKO, 2006), em que é possível observar 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 de uma simulação numérica realizada por ele.

Figura 11 - Visualização de escoamento com a técnica de tufos de fios de lã



Na visualização por injeção de fumaça, um fator importante a ser considerado foi a velocidade da fumaça ainda ter sido inferior à velocidade do escoamento no interior do canal aerodinâmico. Essa diferença dá origem à turbulência ao longo da trajetória da fumaça, o que pode ser exemplificado pelo formato triangular das linhas de corrente. É possível visualizar as regiões de recirculação,

ocasionando um aumento significativo nos coeficientes aerodinâmicos. A Fig. 12 mostra o aumento da região de recirculação, a presença de uma região de estagnação na parte frontal do modelo, forçando a fumaça para as laterais e parte superior do modelo. Foi visualizada a total separação do escoamento de ar na parte traseira do modelo.

Figura 12 - Visualização do escoamento com injeção de fumaça diretamente na corrente principal



Conclusões

Este trabalho apresenta um estudo das características do escoamento ao redor de corpos rombudos para o caso específico do corpo de Ahmed, que é de grande relevância para a indústria automobilística. Os resultados experimentais da medição da variação de pressão e de força de arrasto são semelhantes aos encontrados em Ahmed (1984) e em outras referências, como Korkischko (2007) e Carregari (2006). O comportamento da variação do coeficiente de arrasto (C_d) com o número de Reynolds (Re) está relacionado com o que ocorre em cilindros e esferas lisas, onde, para o regime subcrítico, há uma estabilização da força de arrasto. Na avaliação da distribuição de pressão, nota-se que, na região superior, ocorre uma queda brusca do coeficiente de pressão, onde o plano está inclinado em 30° devido à desaceleração do fluido. Os ensaios com as técnicas de visualização de escoamento apresentaram uma análise qualitativa do comportamento aerodinâmico do escoamento sobre as superfícies dos modelos, onde foi possível observar as regiões de recirculação

decorrente da posição desordenada dos tufos de fios de lã e do comportamento da fumaça injetada próximo às superfícies, apresentando resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- AHMED, S. R.; RAMM, G.; FALTIN, G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. **SAE Technical Paper**, n. 840300. 1984.
- ATAÍDES, R. S. C. **Implementação dos efeitos da não linearidade do tensor de Reynolds em modelos de turbulência baseados na hipótese de Boussinesq**, Dissertação de Mestrado em Ciências mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2009.
- CARREGARI, A. L. **Estudo do escoamento de ar sobre a carroceria de um ônibus usando programa de CFD e comparação com dados experimentais**, USP: São Carlos, Brasil. 2006.
- FOX, ROBERT W. **Introdução à mecânica dos fluidos**, McDonald, LTC, Rio de Janeiro, Brasil. 2012.
- KORKISCHKO, I., MENEGHINI, J.R. **Experimental Investigation and Numerical Simulation of the Flow Around na Automotive Model: Ahmed body**, 19th International Congress of Mechanical Engineering, Proceedings of COBEM2007, Brasília, Brasil. 2007.d
- KOURTA, A.; LECLERC, C. **Characterization of synthelic jet actuation with application to Ahmed body wake**, Journal Sensors and Actuators A: Physical, ELSEVIER, France. 2012.
- LIU, Y.; MOSER, A., 2012. “**Numerical modeling of airflow over the Ahmed body**”, Air and Climate Group, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- MOLLER, F. **Vierteljahrskarten des Niederschlags fur die Ganze Erde**, Petermann’s Geographische Mitteilungen, vol. 95, n. 1, Justus Perthes, Gotha, East Germany, pp. 1-7. 1951.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**, Tradução da 2ª edição americana. Editora Edgard Blücher, São Paulo, Brasil. 1997.
- NICOLAZZI, L. C; ROSA, E. **Introdução à modelagem de veículos automotores**, GRANTE-UFSC, Florianópolis, Brasil. 2001
- PAWLOWSKI, F. W. Wind Resistance of Automobiles, **SAE J.**, v. 27, n. 5, 1930.
- POPE, A.; BARLOW, J. B.; ERA, W. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. 3ed., John Wiley & Sons, INC. 1999.
- SOUSA, S. I.; SILVA, C. V.; BALESTRA, G. C., 2010. Análise numérica do escoamento sobre um veículo rodoviário idealizado, corpo de Ahmed. **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Campina Grande, Paraíba, Brasil.