

AValiação DO IMPACTO DOS STILTS NO ARRASTO SOBRE O CORPO DE AHMED ATRAVÉS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Turan Dias Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹

Juliana de Oliveira Cordeiro, eng.julianacordeiro@gmail.com¹

Luzia Aparecida Tofaneli, luzia.tofaneli@fieb.org.br¹

Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

¹Centro Universitário SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, 1845 – Piatã, Salvador- BA, CEP: 41.650-010, www.fieb.org.br/senai

Resumo: A aerodinâmica de um veículo é um dos itens mais importantes e complexos relacionados ao seu desempenho. Diversos estudos foram realizados para avaliar o arrasto e os fatores que o influenciam. Dentre eles, destaca-se a publicação de Ahmed et al. (1984) no qual foi realizado um estudo experimental com um modelo simplificado de um carro em túnel de vento onde estudou-se a variação do ângulo traseiro. Este corpo ficou conhecido como corpo de Ahmed e vários autores o utilizaram em seus estudos. No trabalho original, o corpo de Ahmed era fixado por quatro pés cilíndricos, os stilts, porém algumas publicações não consideram os stilts nos experimentos ou nos cálculos do coeficiente de arrasto. O presente trabalho, avaliou o impacto dos stilts no arrasto sobre o corpo de Ahmed por meio de um estudo comparativo através de fluidodinâmica computacional. O software utilizado foi o Ansys CFX 17.1. Foram feitas simulações com e sem os stilts e os valores encontrados para o coeficiente de arrasto foram comparados com os resultados existentes na literatura.

Palavras-chave: Aerodinâmica Veicular, Arrasto, Corpo de Ahmed, Fluidodinâmica Computacional

1. INTRODUÇÃO

A aerodinâmica de um veículo é um dos itens mais importantes e complexos relacionados ao seu desempenho. A complexidade do entendimento da aerodinâmica se dá em grande parte por conta da quantidade de fatores que podem influenciá-la. Diversos estudos foram realizados para avaliar o arrasto e os fatores que o influenciam. Um trabalho de grande destaque é o de Ahmed et al. (1984) que fizeram um estudo experimental com um modelo de um carro simplificado em um túnel de vento de acordo com a Fig. 1. Este corpo ficou conhecido como corpo de Ahmed e teve grande importância para os estudos aerodinâmicos. Eles estudaram a variação do ângulo traseiro e colocaram o corpo fixado em quatro pés cilíndricos, os “stilts”. O arrasto total foi corrigido com a tara do arrasto nos suportes, porém não fica claro como foi feita a medição nos suportes.

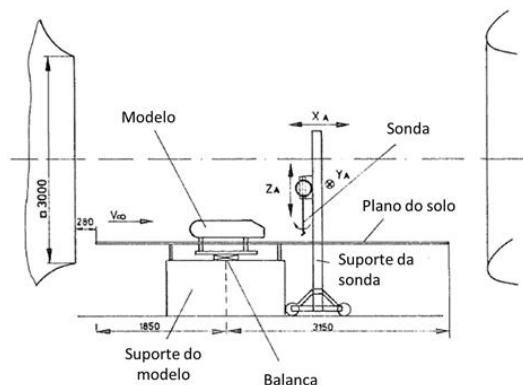


Figura 1. Esquema do experimento do corpo de Ahmed, adaptado de Ahmed et al. (1984).

Ao longo do tempo foram realizados estudos com base no corpo de Ahmed, porém analisando a literatura existente foi observada uma variação na confecção dos experimentos e simulações computacionais principalmente no que se refere ao modo de fixação e inclusão ou não dos cálculos de força de arrasto. Korkischko e Meneghini (2007) usaram um túnel de água para o experimento e também fizeram simulações em CFD. Na simulação computacional, comparam alguns modelos de turbulência. No modelo experimental, o corpo de Ahmed foi fixado por um suporte superior, e apesar dos *stilts* não serem citados em nenhum momento do artigo, eles aparecem na imagem do modelo experimental. Guilmineau (2008) comparou os resultados de simulações com e sem *stilts* para vários modelos de turbulência utilizando os ângulos traseiros de 25° e 35°.

Meile et al. (2012) usaram os suportes semelhantes ao de Ahmed em seus experimentos. A força nos *stilts* foi calculada separadamente, mas com o corpo de Ahmed posicionado através de outro dispositivo. É feita a subtração dessa força do valor total. As simulações em CFD foram realizadas, mas não foi explicada a abordagem ou geometria utilizada para os *stilts*. Corallo et al. (2015) fizeram o modelo computacional. Eles afirmaram que os *stilts* foram omitidos para simplificar o modelo, porém indicaram a possibilidade da presença ou omissão dos *stilts* alterar os resultados do estudo. Bello-Millan et al. (2016) fizeram um experimento para ângulo traseiro de 25° e diversos números de Reynolds. O experimento foi montado apoiado em uma placa cilíndrica ao invés dos *stilts*. A força de arrasto foi calculada subtraindo a força na placa da força no conjunto. Ao final, os resultados obtidos em relação ao coeficiente de arrasto (C_D) foram comparados com trabalhos anteriores através do gráfico exposto na Fig. 2 na qual observa-se uma variação nos resultados apresentados por diversos autores.

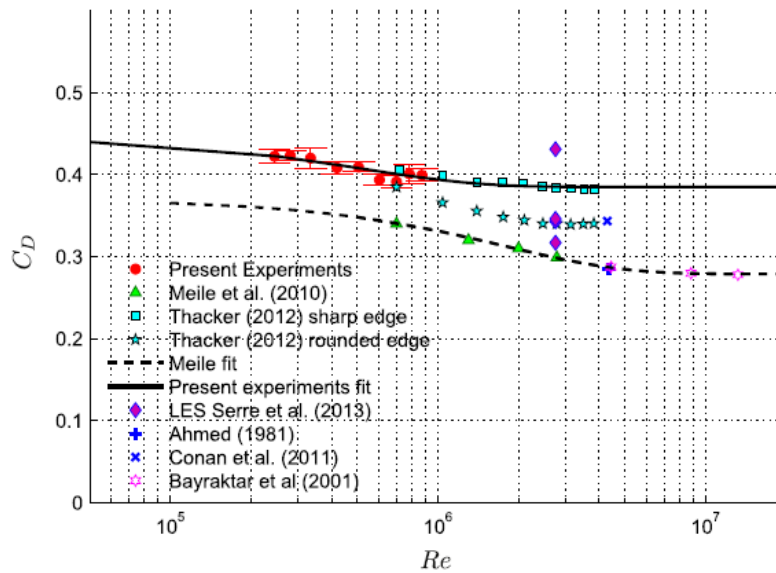


Figura 2. Gráfico do C_D apresentado por Bello-Millan et al. (2016) comparando resultados anteriores com os resultados por eles obtidos para o corpo de Ahmed com ângulo traseiro de 25°.

O objetivo deste trabalho é avaliar o impacto dos *stilts* no arrasto sobre o corpo de Ahmed por meio de um estudo comparativo através de fluidodinâmica computacional. O software utilizado foi o Ansys CFX 17.1. Foram feitas simulações com e sem os *stilts* e também somente dos *stilts*. Os valores do coeficiente de arrasto foram comparados com os resultados existentes na literatura.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelagem Matemática

Para obtenção da solução das equações que regem o escoamento estudado foi adotada uma abordagem numérica. O software ANSYS CFX foi utilizado para, através do Método dos Volumes Finitos, resolver as equações de continuidade e de Navier-Stokes, descritas nas Eqs. (1) - (4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (4)$$

onde ρ é a massa específica, P é pressão, t é tempo; x , y e z são, respectivamente, as três direções cartesianas; u , v e w são, respectivamente, as velocidades nas direções x , y e z ; $\vec{u}$ é o vetor tridimensional de velocidade; μ é a viscosidade do fluido; S_{Mx} , S_{My} e S_{Mz} são os termos fontes de momento nas direções descritas em subscrito.

Uma vez que a computação de escoamentos turbulentos, diretamente através das equações de Navier-Stokes, exige um refinamento de malha não processável em tempo hábil pela maioria dos recursos computacionais atualmente disponíveis foi necessário utilizar uma modelagem para esse propósito. No presente trabalho o modelo de turbulência utilizado foi SST $k-\omega$. A ampla literatura aponta este como modelo mais adequado para situações em que o descolamento da camada limite é de suma relevância para o estudo, em especial para casos aerodinâmicos de veículos terrestres (Korkischko e Meneghini (2007); Ribas, 2008; ANSYS CFX, 2009). Esse modelo exige a resolução de duas equações de transporte a mais: uma relativa à energia cinética turbulenta (k) e outra referente à frequência turbulenta (ω) como mostram as Eqs. (5) e (6).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \vec{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } k) + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega \vec{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \omega) + S_\omega \quad (6)$$

S_k e S_ω são os termos fontes de k e ω respectivamente e podem ter seus equacionamentos encontrados em Ferreira (2011), pág. 52.

2.2. Geometria e Malha

Através do software de Computer Aided Design (CAD), SolidWorks 2012, foram modeladas geometrias tridimensionais com base na geometria especificada por Ahmed et al. (1984) (Fig. 3). No artigo citado, não é especificado o diâmetro dos *stills*, porém Bello-Millan et al. (2016) utilizaram o diâmetro de 30 mm.

Ahmed et al. (1984) variaram o ângulo traseiro, porém para o presente trabalho escolheu-se o ângulo de 25° por ser muito utilizado na literatura, como já mostrado na Fig. 2.

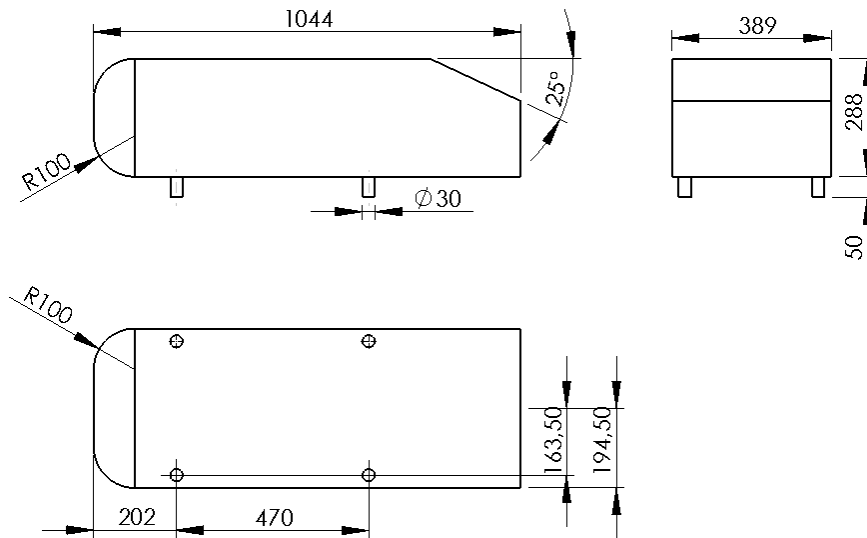


Figura 3. Dimensões da geometria idealizada por Ahmed et al. (1984).

Uma vez que o ar escoar ao redor do veículo é necessária a criação de um domínio computacional que represente esta região. Computacionalmente não é viável representar a enorme dimensão de espaço existente para o ar escoar. As dimensões do domínio foram idealizadas com base nas dimensões de Korkischko e Meneghini (2007) que definiram a seguinte proporção para o domínio: 12L, 4L e 3L (comprimento, largura e altura), sendo L o comprimento do corpo.

As malhas geradas para a aplicação das equações de Navier-Stokes discretizadas foram então concebidas com os domínios nas proporções referidas (Fig 4a). As Figuras 4b e 4c exibem detalhes das malhas geradas nas regiões próximas às superfícies do corpo Ahmed. É possível notar um refinamento para que o modelo computacional capture de forma proveitosa a formação de camadas limite. Cada uma das malhas geradas totalizou aproximadamente 6.000.000 elementos.

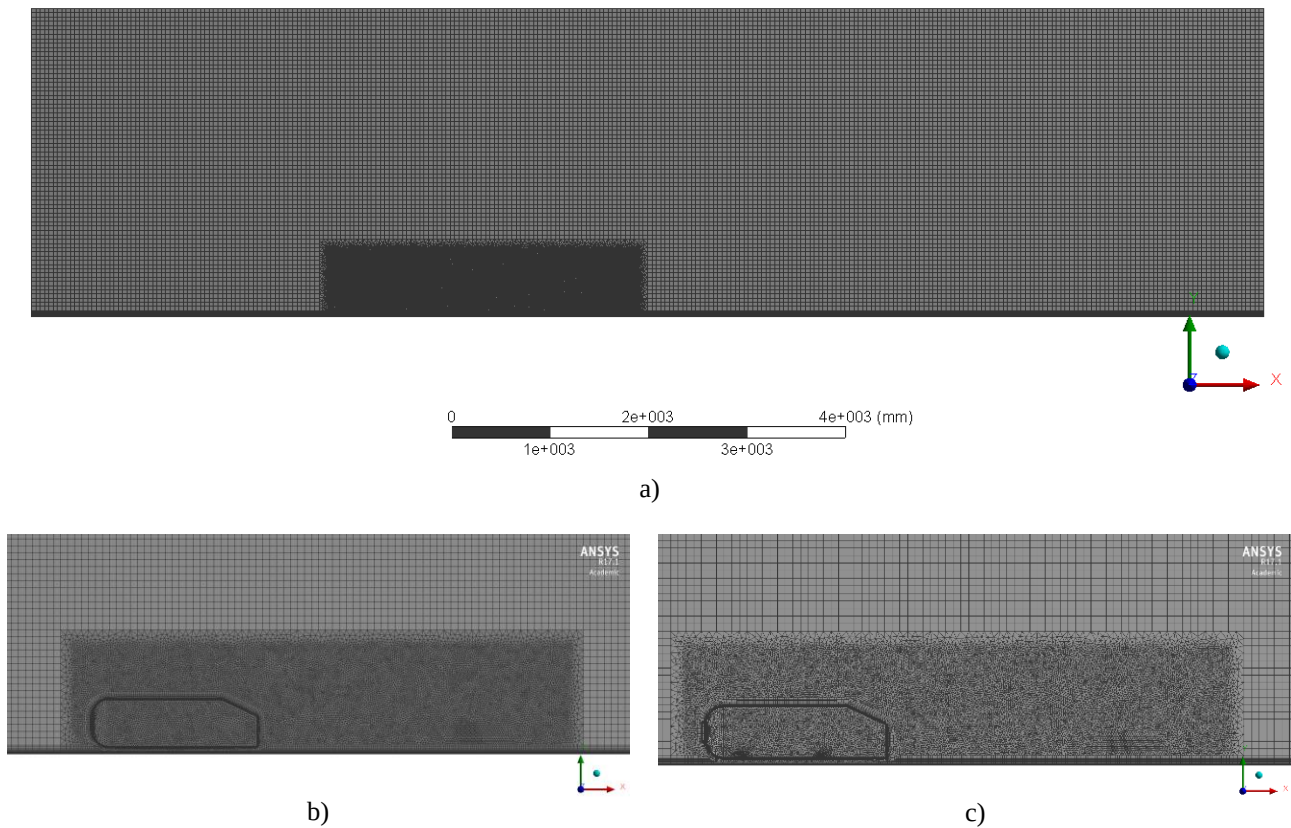


Figura 4. Malhas computacionais: a) Vista frontal do domínio. b) Detalhe da malha sem *stilts*. c) Detalhe da malha com *stilts*.

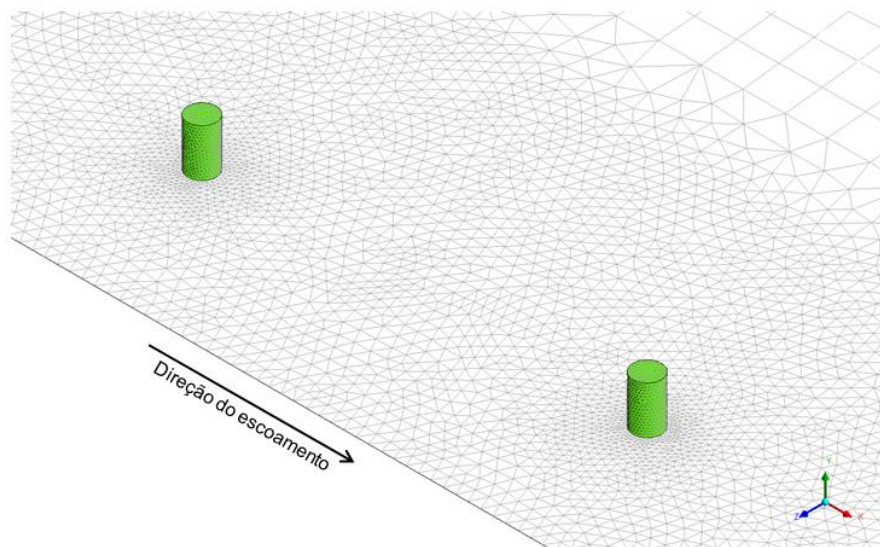


Figura 5. Malha computacional da simulação somente dos *stilts*.

2.3. Condições de Contorno

Procurou-se simular o veículo mantendo-o parado e movimentando o ar a sua volta numa velocidade igual a velocidade de tráfego. Na região denominada Entrada (Fig. 6) utilizou-se a condição de contorno de velocidade constante igual a 29,6 m/s que é equivalente ao Reynolds de 2 milhões. As paredes que determinam o veículo são estacionárias. Desta forma as velocidades relativas entre o veículo e o ar são coerentes com a realidade.

Para refletir a realidade do experimento montado por Ahmed et al. (1984) (Fig. 1), a região inferior do domínio (o que seria o solo num percurso real) foi dividida em três partes. Somente na parte intermediária (indicada em vermelho como Solo 2 na Fig. 6) foi utilizada a condição de não deslizamento. Essa abordagem visa garantir a formação da camada limite tal qual no experimento. As regiões Solo 1 e Solo 3 (Fig. 6) foram consideradas com escorregamento livre.

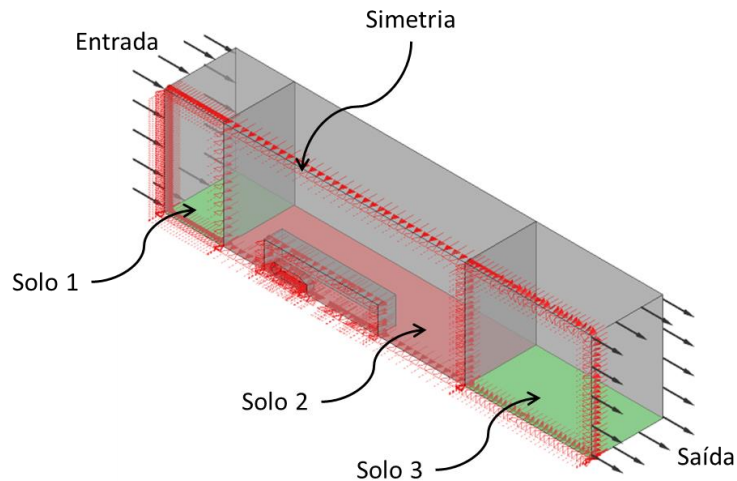


Figura 6. Condições de contorno.

A superfície de Saída (Fig. 6) é modelada como tendo a pressão igual à pressão atmosférica. O comprimento do domínio resolve todos os efeitos da inserção do caminhão, validando esta condição.

Somente metade do corpo é modelado e é definida um plano de simetria como indicado na Fig. 6.

As outras superfícies foram modeladas como paredes sem condição de não deslizamento. Desta forma o tamanho do domínio terá menor impacto sobre as forças resultantes no veículo

Todas estas condições foram definidas para a simulação tridimensional do veículo, replicando ao um caso real no ambiente e sendo modelado como incompressível e isotérmico.

3. Resultado e Discussão

Para validar a qualidade da malha foi feito um estudo de convergência. Adotou-se um tamanho médio do elemento (c) dado pela Eq. (7). O coeficiente de arrasto (C_D) foi calculado com base na Eq. (8). Esses dados, para as malhas simuladas, estão presentes na Tab. 1. Os desvios relativos exibidos são calculados através dos coeficientes de arrasto em comparação à malha anterior (malha 3 com malha 2 e malha 2 com malha 1).

$$c = \left(\frac{\text{Volume}}{\text{Elementos}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$C_D = \frac{F}{0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A} \quad (8)$$

onde F é a força de arrasto, ρ é a massa específica, V é a velocidade e A é a área frontal projetada.

Tabela 1. Resultado do estudo de convergência de malha.

Malhas	Elementos	c (mm)	C_D	Desvio Relativo entre Malhas
1	12.962.599	18,48	0,2597	-
2	6.086.031	23,78	0,2570	1,0%
3	2.900.805	30,45	0,2524	1,8%

As Figuras 7 e 8 mostram os campos de pressão nas superfícies do corpo de Ahmed para as simulações sem e com *stilts*, respectivamente. As vistas isométrica e traseira (a e b) revelam grande semelhança entre os campos de pressão para ambas as geometrias. As pressões na parte inferior do corpo (c), no entanto, são significativamente alteradas devido a presença dos *stilts*.

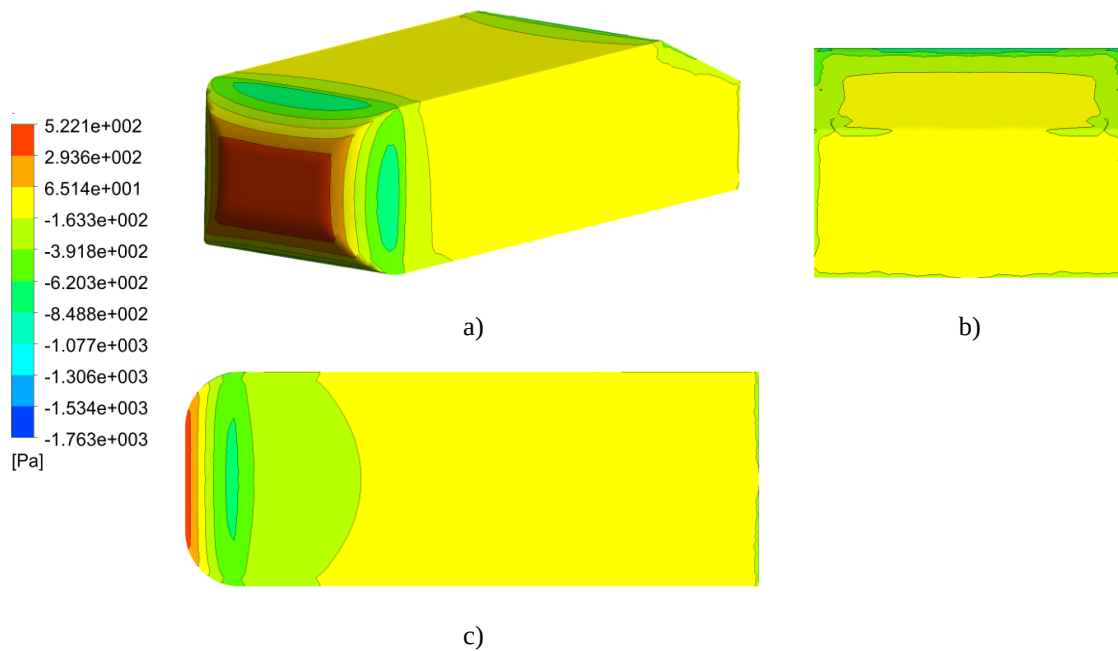


Figura 7. Campo de pressão no corpo de Ahmed da simulação sem os *stilts* nas vistas a) isométrica, b) traseira e c) inferior.

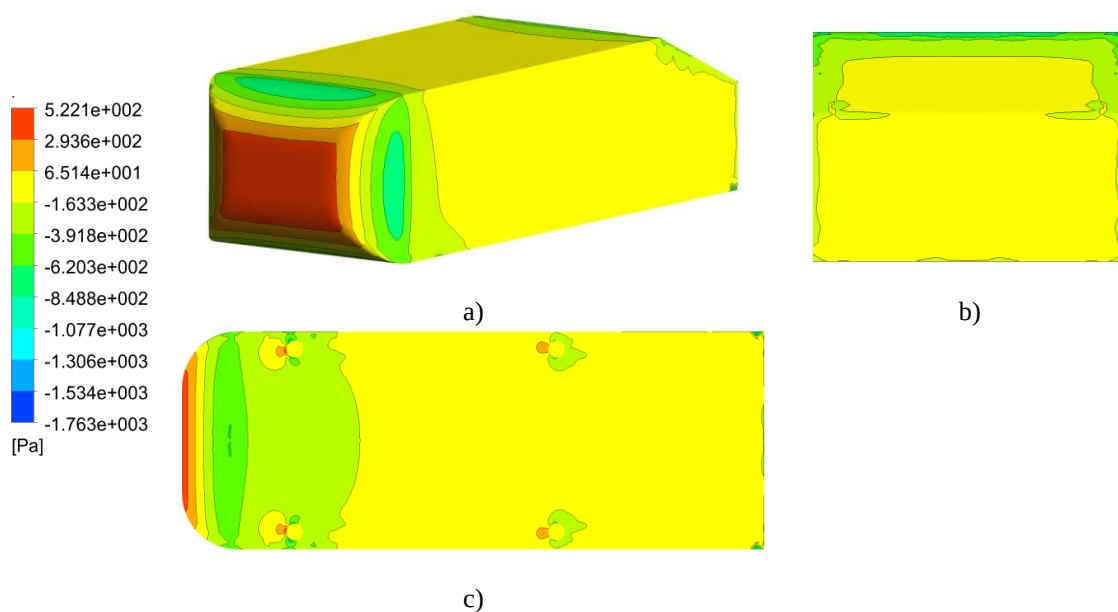


Figura 8. Campo de pressão no corpo de Ahmed da simulação com os *stilts* nas vistas a) isométrica, b) traseira e c) inferior.

A Figura 9 apresenta o campo de pressão na superfície dos *stilts* nas simulações com (a) e sem (b) o corpo de Ahmed. Nota-se que na configuração com o corpo de Ahmed, há maiores regiões de alta pressão na frente dos *stilts* em comparação com a configuração sem o corpo de Ahmed. As forças de arrasto para os casos (a) e (b) expostos na Fig. 9, são respectivamente, 0,73 N e 0,57 N.

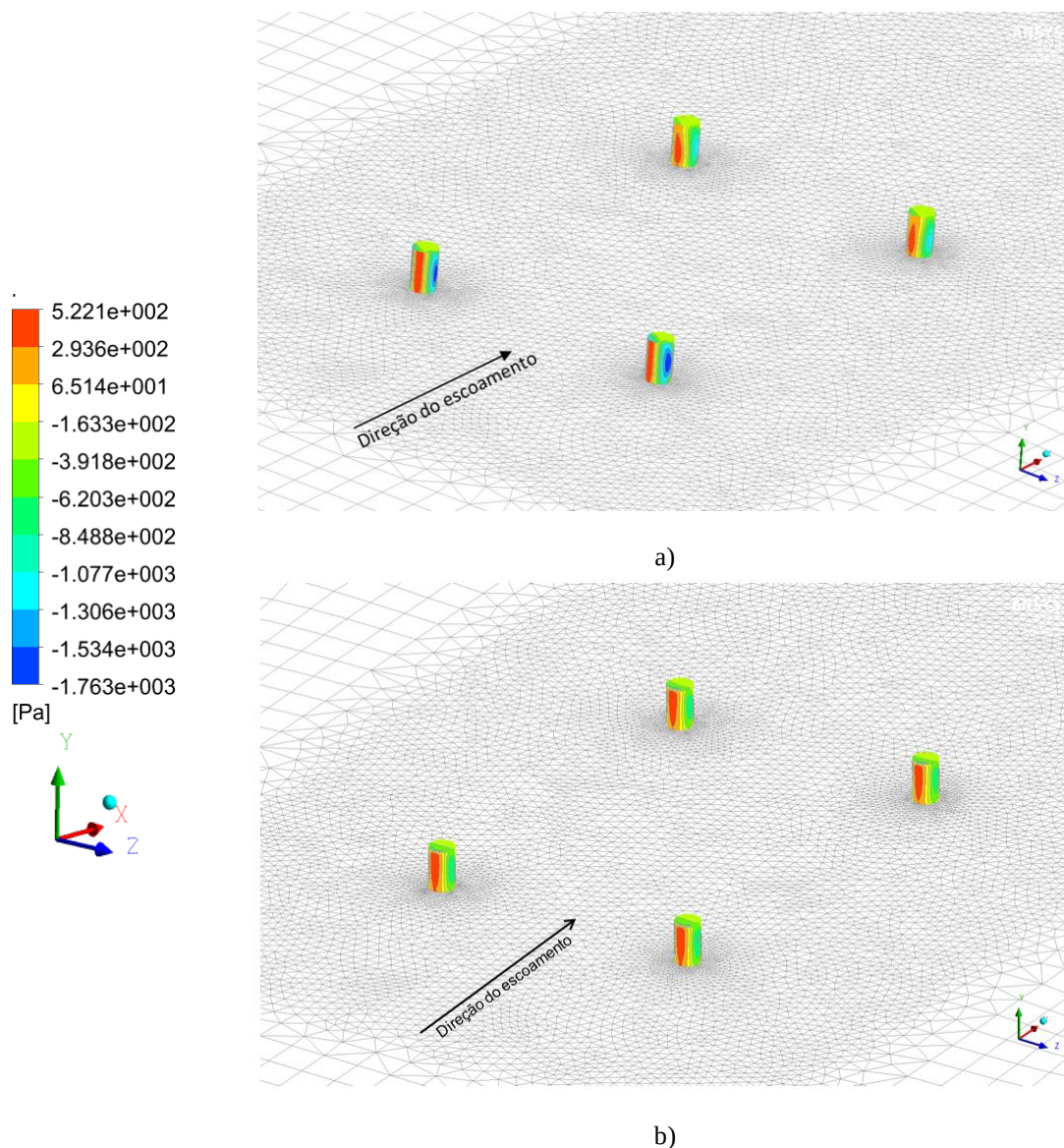


Figura 9. Campo de pressão nos *stilts* nas simulações a) com corpo de Ahmed e *stilts* e b) somente com os *stilts*.

A Tabela 2 mostra a comparação entre os coeficientes de arrasto para as simulações com as diversas possibilidades de cálculo considerando os corpos presentes nas simulações, corpo e área utilizados nos respectivos cálculos. A Figura 9a mostra os corpos, sendo C1, o corpo em verde referente ao sólido de Ahmed e C2 em azul correspondente aos *stilts*. A Figura 9b apresenta as projeções das áreas dos dois corpos no plano frontal da geometria para o cálculo do arrasto, sendo A1 a área em verde e A2 a área em azul.

Com os resultados da simulação somente dos *stilts*, foram corrigidos os valores de força das simulações com a presença de *stilts* replicando a tara da balança de medição [processo utilizado por Ahmed et al. (1984)]. Esses valores corrigidos estão indicados por (*) nas últimas duas linhas da Tab. 2.

Ainda através da Tab. 2, observa-se que os resultados do coeficiente de arrasto variaram significativamente com a mudança da configuração utilizada. Os desvios relativos entre os coeficientes de arrasto entre o presente trabalho e os resultados de Ahmed et al. (1984) variam de 6 a 16,7%.

Tabela 2. Resultados das simulações.

Corpo na Simulação	Local da Força	Área Utilizada	Força (N)	Área (m²)	C _D	Desvio relativo a Ahmed et al. (1984)
C1	C1	A1	7,27	0,056	0,250	16,7%
C1 e C2	C1	A1	7,48	0,056	0,257	14,3%
C1 e C2	C1	A1+A2	7,48	0,058	0,250	16,7%
C1 e C2	C1 e C2	A1	8,21	0,056	0,282	6,0%
C1 e C2	C1 e C2	A1+A2	8,21	0,058	0,275	8,3%
C1 e C2	(C1 e C2)*	A1	7,64	0,056	0,263	12,4%
C1 e C2	(C1 e C2)*	A1+A2	7,64	0,058	0,254	15,4%

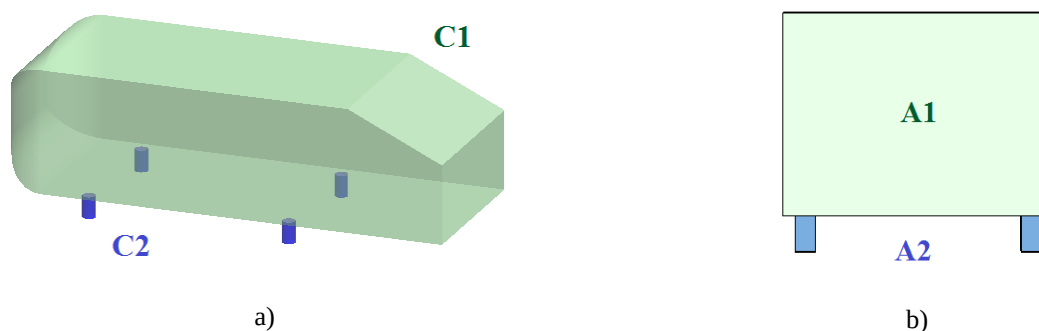


Figura 10. Representação dos (a) corpos simulados e (b) projeções das áreas frontais para cálculo do arrasto.

4. Conclusão

Com o estudo realizado fica evidente que a abordagem dada à presença dos *stilts* tem grande influência no coeficiente de arrasto encontrado para o corpo. O menor desvio relativo ao trabalho pioneiro [Ahmed et al. (1984)], foi alcançado com a avaliação das forças no corpo e nos *stilts* e utilizando somente a área do corpo para o cálculo do coeficiente de arrasto. Neste caso, o desvio encontrado foi de 6%. A depender da configuração adotada, o desvio pode alcançar valores de até 16,7%.

Variações nos resultados como apresentado por Bello-Millan et al. (2016), ainda não esclarecidos pela literatura, podem ser justificados pela forma em que o corpo é apoiado para medição da força de arrasto.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao SENAI CIMATEC pelo suporte financeiro durante a preparação deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, S. R.; Ramm, G.; Faltin, G., 1984. "Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake", SAE Technical Paper.
- ANSYS INC. ANSYS CFX – Solver Theory Guide. [S.l.], 2009.
- Bello-Millán, F. J. et al., 2016. "Experimental study on Ahmed's body drag coefficient for different yaw angles", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 157, pp. 140-144.
- Conan, B.; Anthoine, J.; Planquart, P., 2011. "Experimental aerodynamic study of a car-type bluff body", Experiments in Fluids, Vol. 50, n. 5, pp. 1273-1284.
- Corallo, M.; Sheridan, J.; Thompson, M. C., 2015. "Effect of aspect ratio on the near-wake flow structure of an Ahmed body", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.147, p. 95-103.
- Ferreira, T. A., 2011. Avaliação Numérica e Experimental de um Veículo de Competição de Milhagem, pp.207 Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Guilmineau, E., 2008. "Computational study of flow around a simplified car body", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 96, n. 6, pp. 1207-1217.
- Korkischko, I; Meneghini, J. R., 2007. "Experimental investigation and numerical simulation of the flow around an automotive model: Ahmed Body", In: 19th International Congress of Mechanical Engineering, Proceedings of COBEM2007, Brasília.

- Meile, W. et al., 2011. "Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body", CFD Letters, Vol. 3, n. 1, pp. 32-39.
- Ribas, D. M., 2008. Projeto Aerodinâmico de um Veículo para Competições de Rali Cross Country. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva) – Universidade de São Paulo.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

IMPACT EVALUATION OF STILTS ON AHMED’S BODY DRAG THROUGH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Turan Dias Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹

Juliana de Oliveira Cordeiro, eng.julianacordeiro@gmail.com¹

Luzia Aparecida Tofaneli, luzia.tofaneli@fieb.org.br¹

Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

¹Centro Universitário SENAI CIMATEC, Avenida Orlando Gomes, 1845 – Piatã, Salvador- BA, CEP: 41.650-010, www.fieb.org.br/senai

Abstract. *The aerodynamics of a vehicle is one of the most important and complex items related to its performance. Several studies have been conducted to evaluate the drag and the factors that influence it. Among them, we highlight the publication of Ahmed et al. (1984) in which an experimental study was conducted with a simplified model of a car in a wind tunnel where the variation from the rear angle was studied. This body was known as the body of Ahmed and several authors used it in his studies. In the original work, the body of Ahmed was secured by four cylindrical feet, the stilts, however some publications do not consider the stilts in experiments or in the calculation of drag coefficient. The present study evaluated the impact of the stilts in drag over the body of Ahmed through a comparative study through CFD. The software used was the Ansys CFX 17.1. Simulations were performed with and without the stilts and the values found for the drag coefficient were compared with the results in the literature.*

Keywords: Vehicle Aerodynamics, Drag, Body of Ahmed, Computational Fluid Dynamics