



ANÁLISE NUMÉRICA DA APLICAÇÃO DO CONTROLE ATIVO DE ARRASTO EM UM MODELO AUTOMOBILÍSTICO SIMPLES

VALDSON HENRIQUE PRADO GONÇALVES, RUDOLF HUEBNER

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Departamento de Engenharia Mecânica

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 – Belo Horizonte – MG (Brasil)

(Recibido 26 de febrero de 2019, para publicación 3 de enero de 2020)

Resumo – O controle de escoamento é uma das estratégias mais utilizadas em pesquisas atuais em aerodinâmica veicular, principalmente em relação a redução do arrasto aerodinâmico de modelos automobilísticos simples. A análise numérica da aplicação do controle ativo de escoamento no corpo de Ahmed com ângulo traseiro de 90° foi realizada com o objetivo de redução do coeficiente de arrasto do modelo. Inicialmente, foram realizadas simulações em regime transitório do corpo de Ahmed sem o controle ativo, para $U_0 = 20 \text{ m/s}$ e $Re = 9.2 \times 10^6$, baseado na altura do corpo, com a utilização do modelo de turbulência $k-\omega$ SST, para validação da malha a partir de dados experimentais de C_D e C_p encontrados na literatura. Injeção e sucção de ar com velocidades constantes foram aplicadas na região traseira do corpo de Ahmed em dois casos, com velocidades de injeção iguais a $1,5U_0$ e $2,0U_0$. Os resultados mostraram redução de 3,5%, para $U_{inj} = 1,5U_0$, e 4,1%, para $U_{inj} = 2,0U_0$ no coeficiente de arrasto do modelo. Foram feitas análises das características da esteira para os três casos investigados e foram observadas modificações nos campos de velocidade e pressão. Além disso, a eficiência em relação ao balanço de potência líquida foi avaliada nos dois casos do controle ativo.

Palavras-chave – Controle ativo de arrasto, simulação computacional, corpo de Ahmed.

1. INTRODUÇÃO

A aerodinâmica veicular tornou-se nos dias atuais grande foco de interesse na busca de estratégias que visam diminuir o consumo de combustíveis fosseis e a redução de emissões de gases poluentes, como o dióxido de carbono, através da redução do arrasto aerodinâmico do veículo, impulsionado pelo preço do petróleo e pelas normas regulamentadoras relacionadas à emissão de gases [1]. Fabricantes de automóveis estimam que uma redução em até 30 % contribui em uma redução de 10g/km de CO₂ [2]. O controle ativo e o controle passivo são duas estratégias muito utilizadas para controle do escoamento e redução do coeficiente de arrasto do veículo. O controle ativo consiste na utilização de energia adicional para que haja o controle, e o controle passivo não há necessidade de energia adicional. O controle ativo vem ganhando atenção devido ao grande potencial de melhoria na eficiência aerodinâmica sem provocar grandes alterações em relação ao design dos automóveis [3].

O controle ativo pode ser feito através da utilização de jatos sintéticos uniformes ou pulsantes [4], por injeção de ar constante [5] ou por injeção e sucção de ar alternadas [6], aplicados na parte traseira do veículo para empurrar ou quebrar vórtices. Testes em túnel de vento [7] e análises em CFD [8] mostram que esse tipo de controle é eficaz na redução do coeficiente de arrasto.

Nesse estudo, foi realizada a análise da aplicação do controle ativo por meio de simulações computacionais. O arrasto aerodinâmico foi reduzido através da utilização de injeção e sucção de ar com velocidade constante, implementados na parte traseira de um modelo automobilístico simples, o corpo de Ahmed [9], que controlam o escoamento formado na esteira atrás do modelo. Para isso, simulações com o corpo de Ahmed com inclinação traseira de 90° sem o controle ativo foram efetuadas para a validação da malha, comparando os resultados relacionados a coeficiente de arrasto com obtidos em trabalhos experimentais obtidos na literatura. Dois casos de controle ativo foram investigados e os coeficientes de arrasto calculados

foram comparados com o caso sem o controle, além das alterações nas características da esteira em cada caso. O controle ativo foi analisado em relação a eficiência de operação do sistema.

2. SIMULAÇÃO NÚMÉRICA

A simulação numérica para a validação da malha utilizada na aplicação do controle ativo foi baseada na configuração experimental no trabalho de Grandemange *et al.* [10]. O modelo automobilístico testado nos experimentos foi o corpo de Ahmed [10] com inclinação traseira de 90°, com escala de 1:4 do modelo original, conforme a Fig. 1. O modelo tem a altura $H = 0.072$ m, o comprimento de $L/H = 3.625$, a largura de $W/H = 1.351$, a distância entre o corpo e o solo de $h/H = 0.174$, e o raio de arredondamento da parte frontal de $R/H = 0.347$.

O domínio computacional definido para as simulações pode ser observado na Fig. 2. As dimensões foram normalizadas a partir da altura H do corpo de Ahmed. Essas dimensões foram definidas de forma que o escoamento não tenha influência das paredes laterais, e que a esteira formada na parte traseira possa dissipar-se. Não foi definida simetria no presente domínio, uma vez que a proximidade do corpo com o solo faz com que o escoamento perca sua simetria. Para melhor análise da camada-limite e da esteira, foi definido um volume próximo ao corpo onde os elementos da malha são menores em relação aos outros elementos que discretizam o domínio em geral, mostrado na Fig. 3.

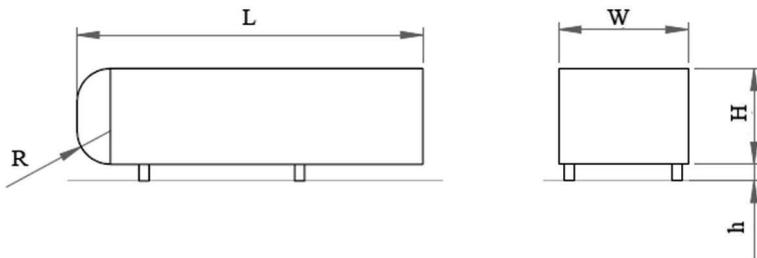


Fig. 1. Corpo de Ahmed usado nas simulações.



Fig. 2. Domínio computacional definido para as simulações.

As análises foram realizadas para o número de Reynolds $Re_H = 9.2 \times 10^4$, baseado na altura do corpo, com velocidade de corrente livre $U_0 = 20$ m/s. Para calcular o escoamento ao redor do modelo automobilístico, foi escolhido o modelo de turbulência $k-\omega$ SST. Na entrada foi imposta uma condição de velocidade constante igual a U_0 e intensidade de turbulência de 0,3%, semelhante aos valores obtidos no experimento do corpo. Na saída, foi usada uma condição de pressão, em que a pressão manométrica é igual a zero. O corpo e o solo foram tratados como paredes sólidas com a condição de não-deslizamento. As laterais e a parte de cima do domínio foram tratadas como paredes não-deslizantes.

A malha gerada é composta por elementos tetraédricos na maior parte do domínio. Próximo ao corpo, a malha foi refinada, com dimensão máxima de aresta $l/H = 0,375$. Nas paredes onde a condição de não-deslizamento foi imposta, 10 camadas de elementos prismáticos foram geradas para a análise do escoamento na camada-limite, resultando em $y^+ < 100$. No total, a malha é formada por 1×10^7 elementos, e pode ser vista na Fig. 4.

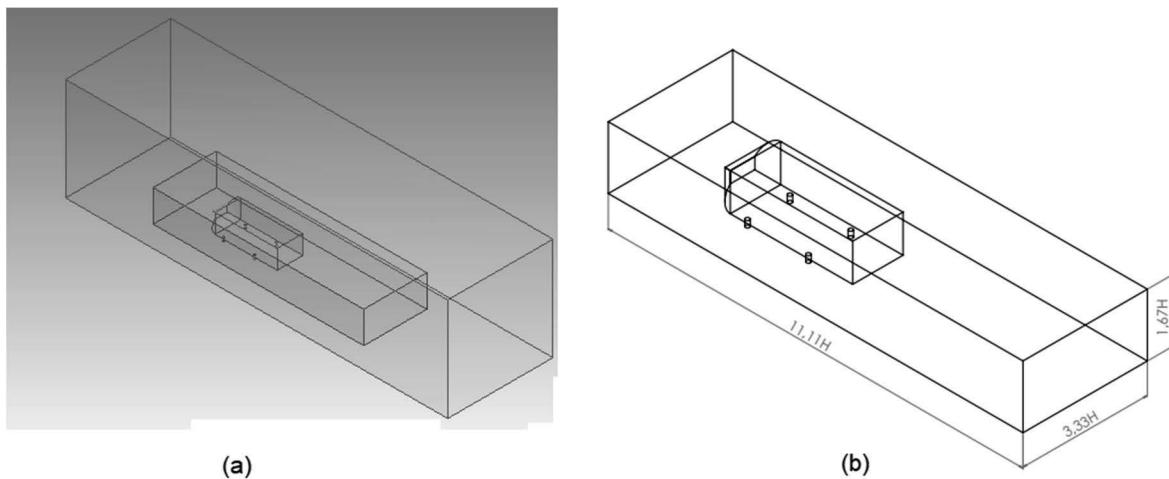


Fig. 3. Localização do volume dentro do domínio computacional (a), Dimensões do volume para refinamento da malha (b).

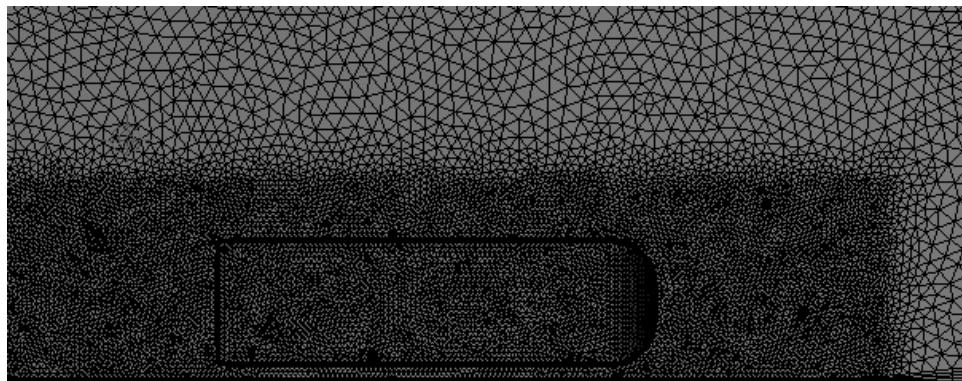


Fig. 4. Malha gerada para as simulações.

Tabela 1. Valores de coeficientes de arrasto experimental e calculado na simulação.

	CD	Variação do CD (%)
Experimental	0.274	-
Calculado	0.343	25.2

As simulações foram realizadas em regime transitório, com formulação de segunda ordem implícita, e tempo total de simulação de 5×10^{-1} s e passo de tempo de 1×10^{-3} s. O algoritmo de acoplamento pressão-velocidade usado foi o SIMPLE, com aproximação de segunda ordem para pressão e quantidade de movimento.

2.1. Validação da malha

O coeficiente de arrasto calculados na simulação do corpo de Ahmed sem o controle foram comparados com o valor obtido nos experimentos de Grandemange *et al.* [10], como pode ser visto na tabela 1. A variação de C_D entre os valores foi aceitável, visto que essa variação é geralmente encontrada em análises numéricas com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST [11].

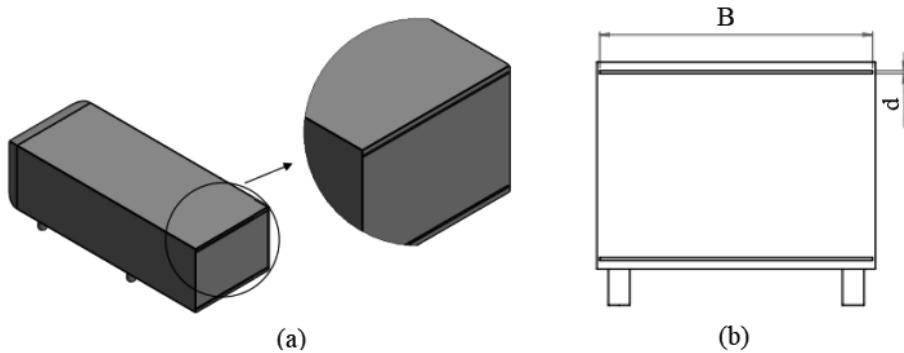


Fig. 5. Esquema do dispositivo de controle ativo: vista em detalhe do slot (a) e dimensões do slot (b).

Esses resultados validam a malha e os modelos físicos usados na simulação do corpo de Ahmed com a aplicação do controle ativo e estabelece fortes evidências em relação à validade dos resultados provenientes das simulações.

3. CONTROLE ATIVO

O controle ativo foi aplicado na parte traseira do corpo de Ahmed com ângulo de inclinação de 90°, local onde ocorre a separação do escoamento, predominantemente bidimensional nesse caso [12]. Dois slots foram posicionados na superfície traseira, um na parte superior e outro na parte inferior, e através deles ar é injetado e sugado à velocidade constante. O esquema do dispositivo de controle e suas dimensões são observadas na Fig. 5. O slot tem o comprimento $B/H=1.323$ e espessura $d/H=0.014$.

Para caracterizar a injeção de ar utiliza-se dois fatores, a razão de injeção (*blowing ratio*), B , e o coeficiente de momentum, C_μ , definidos por

$$B = \frac{U_{inj}}{U_0} \quad (1)$$

$$C_\mu = \frac{A_{slot}}{A} \left(\frac{U_{inj}}{U_0} \right)^2 \cos \theta \quad (2)$$

Onde A_{slot} é a área de seção do slot, A é a área de referência do modelo e θ é o ângulo o qual o fluxo de ar é direcionado na injeção e na sucção. O controle ativo foi analisado para $B = 1.5$ e $C_\mu = 0.021$, e $B = 2.0$ e $C_\mu = 0.037$. O direcionamento do fluxo de ar é mostrado na Fig. 6. O ângulo selecionado foi $\theta = 45^\circ$, valor resulta em uma redução de arrasto maior que o direcionamento na horizontal [11]

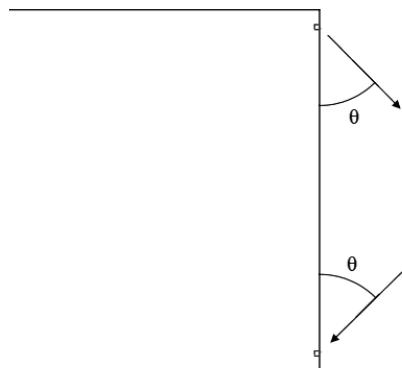


Fig. 6. Direcionamento do fluxo de ar no controle ativo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Redução de arrasto

Os valores de coeficiente de arrasto obtidos na simulação dos dois casos de controle ativo foram comparados com o valor de C_D referente a simulação do corpo de Ahmed sem controle, como pode ser visto na tabela 2.

Os valores computados revelam que nos dois casos de controle ativo houve uma redução do coeficiente de arrasto do modelo, com destaque para o segundo caso, $C_\mu = 0.037$, no qual a redução de arrasto foi de aproximadamente 4%, semelhante a resultados anteriores obtidos no controle ativo utilizando injeção de ar constante [13]. Observa-se também que para $C_\mu = 0.021$, a redução do coeficiente de arrasto foi de 3.5 %, resultado semelhante ao primeiro caso, o que leva a conclusão inicial de que o aumento de U_{inj} em 10 m/s provoca uma pequena redução no C_D do modelo e para maior efeito do controle ativo a variação de C_μ deve ser maior.

As linhas de corrente de velocidade para os três casos podem ser observadas na Fig. 7. Para $C_\mu = 0.021$, nota-se o aumento do vórtice inferior ao mesmo tempo que o vórtice superior sofreu uma redução em comparação ao caso de referência. Isso deve-se à ação de injeção de ar constante, que aumenta a quantidade de

Tabela 2. Comparação dos valores de C_D entre os casos de referência e controle ativo.

Caso	C_D	Variação do C_D (%)
Referência	0.343	-
$C_\mu = 0.021$	0.331	-3,5
$C_\mu = 0.037$	0.329	-4,1

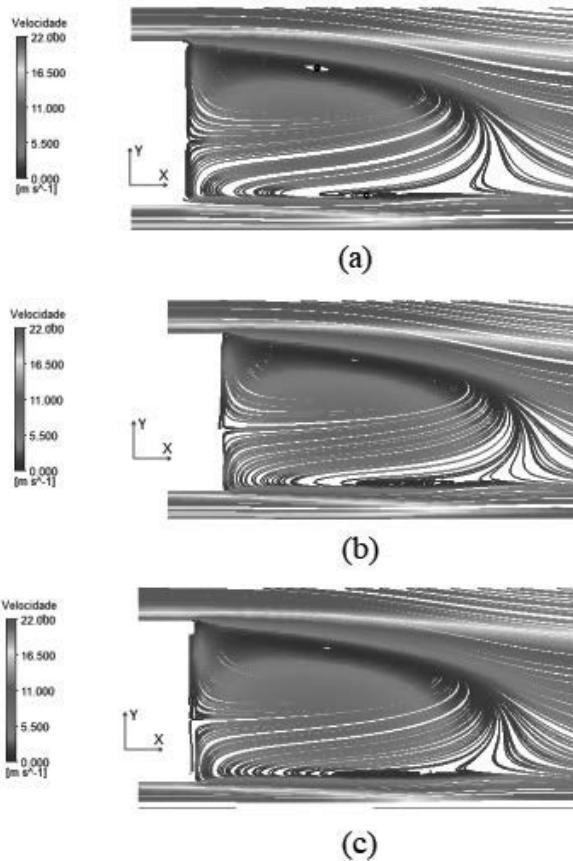


Fig. 7. Linhas de corrente de velocidade no plano $z = 0$: caso de referência (a), $C_\mu = 0.021$ (b), $C_\mu = 0.037$ (c).

movimento na parte traseira e direciona o escoamento para baixo, o que torna o vórtice inferior mais largo que o observado no caso de referência. Esse aumento é controlado pela sucção, reduzindo a quantidade de movimento e a energia dissipada pelo vórtice.

Para $C_\mu = 0.037$, o vórtice superior sofreu uma pequena redução em comparação ao que é visto em $C_\mu = 0.021$, assim como o vórtice inferior, o que representa maior variação no coeficiente de arrasto. O aumento no coeficiente de momentum produz maior quantidade movimento no escoamento principal e limita a sua interação com o escoamento transversal e com o escoamento que se desloca da parte de baixo do modelo, provocando a redução do coeficiente de arrasto.

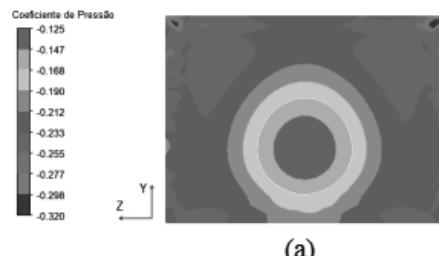
4.2. Coeficiente de pressão

O coeficiente de pressão na superfície traseira foi avaliado para os três casos, conforme pode ser visto na tabela 3. A variação positiva do coeficiente de pressão na parte traseira do modelo explica a redução do coeficiente de arrasto, uma vez que o aumento da pressão na região traseira diminui o arrasto de pressão nessa área. Para $C_\mu = 0.037$, o aumento foi próximo de 4%, e confirma os resultados da tabela 2.

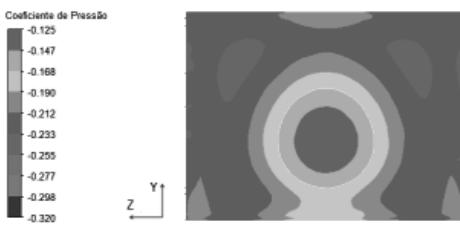
A distribuição do coeficiente de pressão na superfície traseira do modelo é vista na Fig. 8. Percebe-se que a aplicação do controle ativo aumenta o C_p , pois os contornos azuis vistos em (a) tornam-se verde em (b) e

Tabela 3. Comparação dos valores de C_p entre os casos de referência e controle ativo.

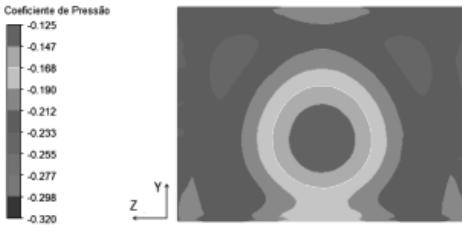
Caso	C_p	Variação do C_p (%)
Referência	-0.215	
$C_\mu = 0.021$	-0.209	+2,8
$C_\mu = 0.037$	-0.207	+3,7



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Distribuição do coeficiente de pressão na superfície traseira: caso de referência (a), $C_\mu = 0.021$ (b), $C_\mu = 0.037$ (c)

(c). A injeção e a sucção proporcionaram a diminuição das zonas de baixa pressão pelo aumento da pressão na parte superior e inferior da superfície traseira, o que provocou a redução no arrasto do modelo.

4.3. Eficiência

Os resultados mostraram que o controle ativo conseguiu obter bons valores de redução de coeficiente de arrasto do modelo. Isso é considerável desde que haja um ganho equivalente na redução da potência utilizada pelo veículo, uma vez que o controle ativo necessita de energia adicional para seu funcionamento. Assim, foi feita uma estimativa em relação a eficiência da abordagem escolhida.

A potência requerida para superar o arrasto aerodinâmico em um escoamento natural é dada por

$$P_D = F_D U_0 = \frac{1}{2} \rho A C_D U_0^3 \quad (3)$$

A potência requerida para o funcionamento do controle ativo pode ser calculada pela a equação (4).

$$P_{slot} = \dot{m}_{slot} v_{slot}^2 = \rho A_{slot} v_{slot}^3 \cos \theta \quad (4)$$

O balanço de potência líquida para o sistema resulta em [14]

$$\frac{\Delta P_{liq}}{P_D} = \frac{\Delta C_D}{C_{D,ref}} + \frac{P_{slot}}{P_D} \quad (5)$$

Na Tabela 4 são mostrados valores de coeficiente de mo momentum, potência requerida relativa para o controle ativo e o balanço de potência líquida relativa para os dois casos que houve redução de arrasto. Observa-se que a potência requerida para o funcionamento do controle varia de 18% a 43% da potência exigida para superar o arrasto aerodinâmico do corpo sem o controle. Como as dimensões do slot e o ângulo de direcionamento do fluxo são iguais em ambos os casos, a potência relativa P_{slot}/P_D varia com a velocidade de injeção/sucção de ar, e quanto menor esse valor, menor será a energia requerida para a ativação desse sistema.

Tabela 4. Potência requerida relativa para o controle ativo relativa e balanço de potência líquida relativa

C_μ	P_{slot}/P_D (%)	$\Delta P_{liq}/P_D$ (%)
$C_\mu = 0.021$	18.5	+15.0
$C_\mu = 0.037$	43.7	+39.6

A última coluna da tabela 4 mostra os valores para o balanço de potência, ou seja, o somatório de potência requerida para o controle e a redução de potência devido ao arrasto aerodinâmico reduzido. Nos dois casos, o balanço de potência é positivo, o que significa a necessidade de potência adicional em relação à que foi pouparada na redução de arrasto. Isso revela que o controle ativo aplicado em ambos os casos é efetivo, pois houve redução de coeficiente de arrasto, no entanto não é eficiente, visto que se gasta mais energia para o funcionamento do sistema. Uma das formas de melhorar a eficiência do controle ativo é diminuir a velocidade de injeção de ar ou alterar a geometria do slot. Outros meios envolvem utilizar atuadores com injeção pulsante de jatos sintéticos ou aplicação conjunta de controles ativos e passivos, em que o fluxo de massa é reduzido, ocasionando menor potência adicional ao uso do dispositivo de redução de arrasto

5. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi analisado a aplicação do controle ativo de arrasto em um modelo automobilístico simples, o corpo de Ahmed. As análises foram realizadas por meio de simulações computacionais em CFD, e observou os efeitos desse controle em relação ao coeficiente de arrasto do modelo. O controle ativo, que consistiu de injeção, na parte superior traseira, e sucção, parte inferior traseira, de ar constantes, foi aplicado para dois casos e os resultados apontaram redução de arrasto em ambos os casos, com relevância para o caso $C_\mu = 0,037$, com variação de -4,1% em relação ao coeficiente de arrasto de referência.

A comparação dos escoamentos apontou redução no tamanho dos vórtices gerados com a aplicação do controle ativo, em especial para $C_\mu = 0,037$, que apresenta vórtices pouco menores em relação a $C_\mu = 0,021$. A redução de arrasto nos dois casos de controle foi explicada pelo aumento do C_p , que variou de +3% a +4% tanto na parte traseira como na esteira, onde as regiões de baixa pressão foram reduzidas.

Quanto à eficiência, os dois casos de controle ativo estudados no trabalho evidenciaram não ser muito eficientes, com aumento da potência líquida em 39% para $C_\mu = 0,037$, demonstrando que o controle que aqui foi aplicado é eficaz, mas não apresenta eficiência significativa.

REFERÊNCIAS

- [1] Cho et al., “Comparative investigation on the aerodynamic effects of combined use of underbody drag reduction devices applied to real sedan”, *International Journal of Automotive Technology*, **18**(6), 959-971 (2017)
- [2] Eulalie et al., “Numerical study of flow control strategies for a simplified square back ground vehicle”, *Fluid Dynamics Research*, **49**(3), 035502 (2017)
- [3] Park et al., “Experimental study on synthetic jet array for aerodynamic drag reduction of a simplified car”, *J Mech Sci Technol*, **27**(12), 3721-3731 (2013)
- [4] Gilliéron, P., Kourta, A., “Aerodynamic drag control by pulsed jets on simplified car geometry”, *Experiments in Fluids*, **54**(2) (2013)
- [5] Rouméas et al., “Analysis and control of the near-wake flow over a square-back geometry”, *Computers & Fluids*, **38**(1), 60-70 (2009)
- [6] Krajnović, S., Fernandes, J., “Numerical simulation of the flow around a simplified vehicle model with active flow control”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, **32**(1), 192-200 (2011)
- [7] Littlewood, R. P., Passmore, M. A., “Aerodynamic drag reduction of a simplified squareback vehicle using steady blowing”, *Experiments in Fluids*, **53**(2), 519-529 (2012)
- [8] Bruneau et al., “Active and Passive Flow Control around Simplified Ground Vehicles”, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, **5**, p. 5 (n.d.)
- [9] Ahmed et al., *Some Salient Features of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake*, (1984)
- [10] Grandemange et al., “Turbulent wake past a three-dimensional blunt body. Part 1. Global modes and bi-stability”, *Journal of Fluid Mechanics*, **722**, 51-84 (2013)
- [11] Guilmineau, E., “Computational study of flow around a simplified car body”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **96**(6–7), 1207-1217 (2008)
- [12] Gilliéron, P., Chometon, F., “Modelling of stationary three-dimensional separated air flows around an Ahmed reference model”, *ESAIM: Proceedings*, **7**, 173-182 (1999)
- [13] McNally et al., “Drag reduction on a flat-back ground vehicle with active flow control”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **145**, 292-303 (2015)
- [14] Wassen et al., “Simulation of Active Drag Reduction for a Square-Back Vehicle”, In *Active Flow Control II*, R. King, Ed., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, **108**, 241-255 (2010)

NUMERICAL ANALYSIS OF ACTIVE DRAG CONTROL APPLICATION ON A SIMPLIFIED CAR MODEL

Abstract – Flow control is one of the most used strategies in current vehicle aerodynamics research, especially in relation to the aerodynamic drag reduction of simple automobile models. Numerical analysis of active flow control application on squareback Ahmed body was performed to aim model drag coefficient reduction. At first, unsteady simulations of the Ahmed body without active control were done, with $U_0 = 20\text{m/s}$ and $\text{Re} = 9.2 \times 10^4$, based on body height, using SST k- ω turbulence model, for mesh validation with C_D and C_p experimental data found in the literature. Steady blowing and suction were applied at body rear in two cases, with blowing velocities equal to $1,5U_0$ and $2,0U_0$, resulting in a model drag coefficient reduction of 3,5% for $U_{\text{inj}} = 1,5 U_0$ and 4,1% for $U_{\text{inj}} = 2,0 U_0$. The wake characteristics were analyzed for the three cases investigated and modifications in velocity and pressure fields were observed. In addition, the efficiency related with the net power balance was evaluated in both cases of the active control.

Keywords – Active drag control, CFD, Ahmed body.

