



ESTUDO AERODINÂMICO DE UM CARRO DE FÓRMULA SAE

Lucas Barbosa, Ítalo Ávila, João Marcelo Vedovoto.

RESUMO: O presente trabalho, consiste no estudo numérico computacional do escoamento incompressível sobre modelos tridimensionais de carros que obedecem ao regulamento da formula SAE. Foram elaborados modelos com e sem asas, com o fim de estudar das diferentes configurações nas forças e coeficientes de arrasto e sustentação. Desenvolvido através da parceria MFLab/FEMEC-UFU, IME-USP e Petrobrás, o código MFSim utiliza o método dos elementos finitos para resolver uma malha euleriana e com uma geometria imersa de malha lagrangeana. A malha é adaptativa em função da fronteira imersa e turbulência, para a resolução de sistemas lineares utiliza-se o método Multigrid-Multiníveis, além de utilizar o modelo de turbulência Smagorinsky Dinâmico. A validação e verificação será feita pela literatura e por outros softwares.

PALAVRAS-CHAVE: Aerodinâmica, formula SAE, aerodinâmica veicular, método da fronteira imersa.

AERODYNAMIC STUDY OF A FORMULA SAE CAR

ABSTRACT: The present work consists of the computational numerical study of the incompressible flow on three-dimensional models of cars that obey the regulation of the SAE formula. Models with and without wings were elaborated in order to study the different configurations in the drag and lift forces and coefficients. Developed through the partnership MFLab / FEMEC-UFU, IME-USP and Petrobras, the MFSim code uses the finite element method to solve an Eulerian mesh with an immersed lagrangean mesh geometry. The mesh is adaptive due to the immersed boundary and turbulence. In order to solve linear systems, the Multigrid-Multilevel method is used, in addition to using the dynamic Smagorinsky turbulence model. The validation will be made with the comparison with other software's and literature.

KEYWORD: Aerodynamic, formula SAE, vehicular aerodynamics, immersed boundary method.

INTRODUÇÃO

A aerodinâmica veicular estuda a interação do ar com o veículo, e tem como principal finalidade otimizar o escoamento em torno do mesmo, alterando as forças presentes, principalmente de arrasto e sustentação, além do momento de arfagem, conforme mostrado na figura 1.

Figura 1 – Velocidade em curvas



Adaptado de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-31-Os-estudos-na-aerodinamica-veicular-a-determinacao-de-forcas-e-momentos-b_fig1_45942260

A força de arrasto é o principal fator a ser analisado em carros de passeio, por ser contrária ao movimento é necessária maior potência para mover o automóvel, necessitando de motores mais maiores e mais caros, além de elevar o consumo de combustível. Já em carros de competição, a força de sustentação e momento de arfagem também são importantes fatores. A força de sustentação é responsável por alterar a adesão do pneu contra o solo, dessa forma a sustentação negativa (*downforce*), é benéfica para o desempenho do

carro em curvas e frenagens, devido ao aumento por força de atrito do pneu contra o solo. O momento de arfagem influencia na distribuição das forças causadas pelo escoamento nos eixos dianteiro e traseiro do veículo, o ideal é que tendo como base o centro de massa do veículo o momento de arfagem seja nulo ou ligeiramente negativo, no sentido da figura 1, garantindo o balanço aerodinâmico do automóvel.

MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO

As simulações foram realizadas no código MFSim, confeccionado predominantemente na linguagem Fortran90, mas com algumas partes em C, possui malha adaptativa tridimensional e método de resolução de sistemas lineares pela solução numérica Multigrid-multinível. O código está em constante evolução através da parceria MFLab/FEMEC-UFU, IME-USP e Petrobrás e já possui bibliotecas que possibilitam a modelagem de escoamentos incompressíveis, como: jatos, escoamento em tubos, cavidades e aerodinâmica aplicada em foguetes e automóveis. Através do método de desratização Cubista, é possível utilizar o método dos volumes finitos, a fim de resolver as equações da continuidade e de Navier-Stokes, equações 1 e 2;

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\rho \partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \right] \right\} + \frac{\bar{F}_i}{\rho} \quad (2)$$

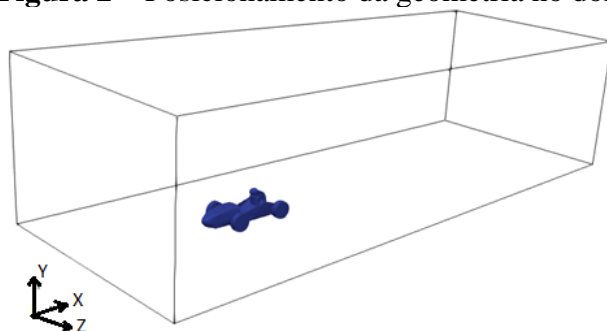
O código MFSim retorna os valores das forças aplicada à superfície nos eixos X, Y e Z na forma de tabelas, onde cada coluna refere a força instantânea em cada fronteira, o resultado obtido e a média dos valores em regime estaticamente permanente. A área de referência frontal ao escoamento (A) é a projeção na vista frontal, os valores dos coeficientes de arrasto (Cd) e sustentação (Cl) foram calculados pelas equações 3 e 4:

$$Cd = \frac{Fx}{0,5 * \rho * A * U^2} \quad (3)$$

$$Cl = \frac{Fy}{0,5 * \rho * A * U^2} \quad (4)$$

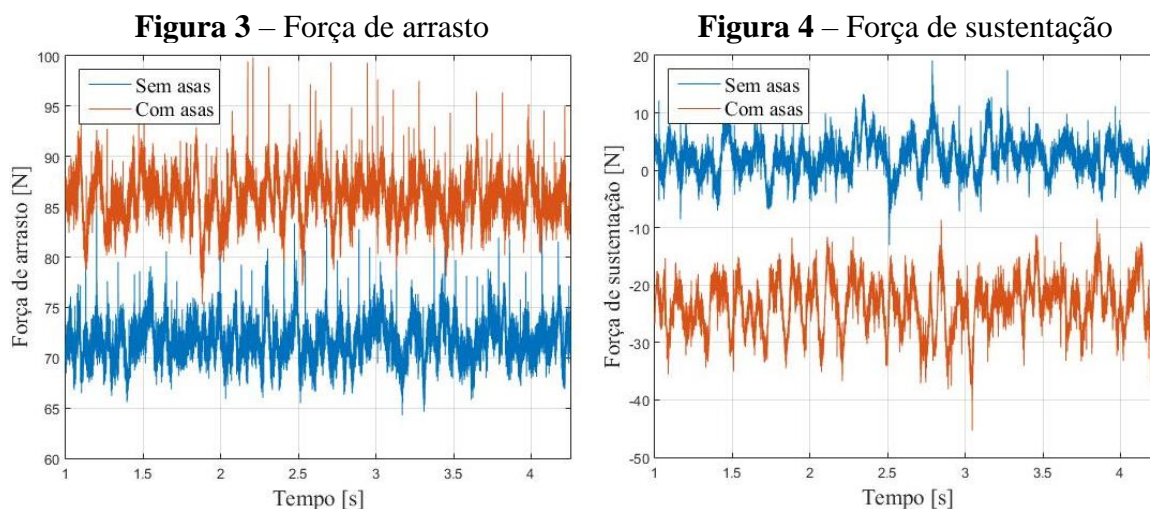
Os casos estudados foram configurados com escoamento do ar com velocidade de 15m/s, sendo as paredes de entrada e inferior com velocidade no eixo x (frontal a geometria imersa), com a velocidade do escoamento, as paredes laterais e a superior como simetria e a saída com Neumann. As geometrias imersas estão localizadas a 2,5 m das paredes de entrada, como mostrado na figura 2, as rodas possuem velocidade angular de 72 rad/s, a fim da banda de rodagem possuir a velocidade tangencial do escoamento, o mesmo foi feito no carro com asas. Foi configurado 5 níveis de refinamento, com os maiores da 320mm enquanto os mais refinados de 20mm, o domínio possui 20,48 x 5,12 x 7,68 m de comprimento nas direções x, y, z, respectivamente.

Figura 2 – Posicionamento da geometria no domínio



RESULTADOS PARCIAIS

Com os valores das forças de arrasto e sustentação fornecidos pelo MFSim, foi possível construir as figuras 3 e 4, onde a curva azul representa os dados obtidos pelo carro sem asas e a laranja pelo modelo com asas. Os eixos das abcissas são representados pelo tempo de simulação em segundos, e nos eixos das ordenadas pelo pelas forças de arrasto e sustentação, respectivamente, em newtons.



Com os dados das forças é possível encontrar o valor dos coeficientes de arrasto e sustentação pelas equações 3 e 4, onde os valores da densidade do ar (ρ) é $1,2 \text{ kg/m}^3$ e a velocidade do escoamento (U), é de 15 m/s . Contradizendo a teoria que um carro com asas apresenta maior coeficiente de arrasto que um modelo sem o acessório, foi constatado $0,7543$ e $0,7937$ os valores deste coeficiente, respectivamente, isto é explicado pela maior área frontal do modelo alado, $0,8422$ contra $0,6820 \text{ m}^2$. Os valores dos coeficientes de sustentação seguiram a expectativa, uma vez que o modelo sem asas tende a gerar sustentação e as asas buscam inverter esse efeito.

Tabela 1 – Dados Obtidos

	Carro sem asa	Carro com asas
Área de referência [m^2] (A)	0,6820	0,8422
Força de arrasto [N] (F_x)	71,4201	85,8589
Força de Sustentação [N] (F_y)	2,3415	-23,4652
Coefficiente de arrasto (C_d)	0,7793	0,7552
Coefficiente de sustentação (C_l)	0,0254	-0,2064

As figuras 5 e 6 mostram a turbulência através da compressão do fluido por meio do critério Q , onde a magnitude da velocidade do escoamento é mostrada na escala de cores. Devido o carro possuir carroceria e cofre do motor abertos, ocorre a presença de grandes regiões turbilhonares na traseira de ambos os modelos. Ao analisar cada simulação é possível perceber que no carro alado a deformação do fluido é maior que a do carro sem asas, uma vez que é possível visualizar contornos na frente em locais onde não existiam, além de na traseira a esteira possui maior comprimento e espessura. Devido ao regulamento, que restringe a altura máxima da asa traseira de 1200 mm acima do solo, a peça fica localizada na região afetada pelo descolamento do capacete e encosto do banco, o que diminui sua eficiência, uma vez que o regime de entrada do ar deixa de ser laminar, o que diminui a força descendente gerada pelo acessório.

Figura 5 – IsoQ 1000 no carro sem asas

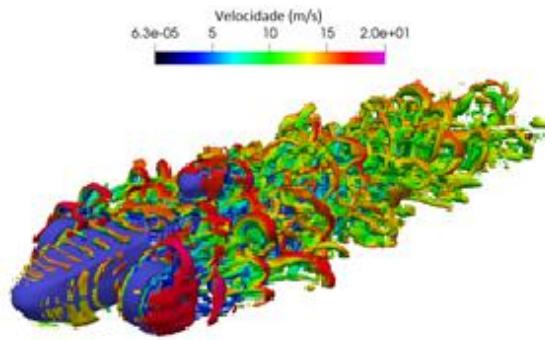
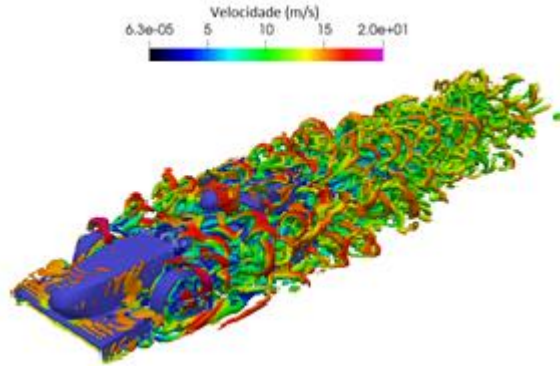


Figura 6 – IsoQ 1000 no carro com asas



As figuras 7 e 8 mostram as linhas de trajetória do escoamento, as quais se iniciam na entrada do domínio, para melhor visualização é mostrado somente a metade direita do escoamento, a fim de mostrar o comportamento do fluido no plano de simetria. É possível perceber a que a principal diferença ocorre atrás da cabeça do piloto uma vez que a asa traseira gera o movimento ascendente da massa de ar, perceptível através do ângulo das linhas de corrente, e também contribui para diminuir a velocidade do ar na traseira, devido à maior área azul. Nestas figuras a asa dianteira não promove diferença considerável devido estar situado na parte lateral da carroceria.

Figura 7 – Linhas de trajetória no carro sem asas

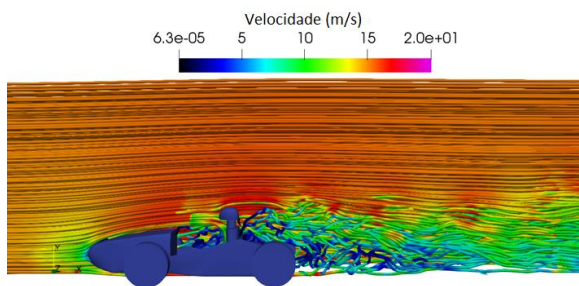
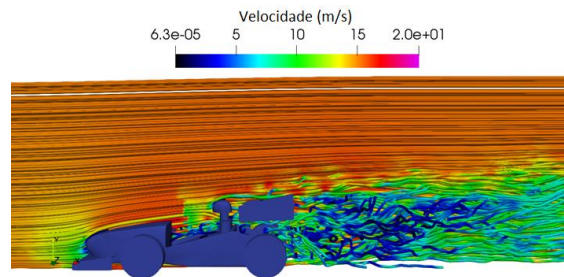


Figura 8 – Linhas de trajetória no carro com asas



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de resultados apenas preliminares, com a simulação feita ainda em uma malha grosseira, o código MFSim foi capaz de resolver os casos analisados. A aplicação de asas em um carro de competição resultou em maior força descendente apesar de aumentar o arrasto, o que condiz com a teoria.

REFERÊNCIAS

FORTUNA, A.O. “Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos”: Conceitos básicos e aplicações. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. 426 p.

POPE, S. B. “Turbulent Flows”. Cambridge University Press, 2000. 749 p.

SILVEIRA NETO, A. “Turbulência nos Fluidos Aplicada”. Apostila utilizada na disciplina de turbulência nos fluidos na Universidade Federal de Uberlândia, 2015. 150p.

VERSTEEG, H. K. MALALASEKERA, W. “An Introduction to Computation Fluid Dynamics”: The finite volume method. 2ed Harlow: Pearson Prentice Hall, 2007. 503 p.