



Simulação Computacional do Efeito do Jato de Propulsão sob o Escoamento de um Foguete

Ian Costa Alves, Aristeu da Silveira Neto

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo apresentar resultados de simulações computacionais do escoamento sobre um foguete estacionário, onde analisa-se o coeficiente de arrasto e como este varia com a presença de um jato de propulsão. Vale ressaltar que o estudo foi feito considerando uma única velocidade de escoamento, na qual o escoamento ainda pode ser considerado incompressível. Para um foguete modelo, é crucial conhecer a intensidade do arrasto para cálculos aerodinâmicos e previsão da trajetória, o que torna fundamental o aprofundamento na análise da interferência que a propulsão causa no escoamento do corpo. Para as simulações computacionais será utilizado o código MFSim desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) da FEMEC-UFU, o qual resolve as equações de Navier-Stokes na forma tridimensional transiente utilizando malha bloco-estruturada com adaptatividade local de malha.

PALAVRAS-CHAVE: CFD, Foguete, Aerodinâmica, Escoamento, Mecânica dos Fluidos

Computational Simulation of the Flow Over a Rocket Model

ABSTRACT: The following work has the goal to present the results of computational simulations of the flow over a stationary rocket, analyzing the drag coefficient and how it changes with the presence of a propulsion jet. It's also worth pointing out that the study was made for a single fluid velocity, in which the flow can still be considered incompressible. For a rocket model, it's crucial to know the intensity of the drag for aerodynamics calculations and trajectory prediction, which makes it fundamental to deepen the analysis the interference that the propulsion causes in the flow of the body. Thus, for the computational simulations the MFSim code will be used, developed at the Laboratory of Fluid Mechanics (MFLab) of the FEMEC-UFU, which solves the Navier-Stokes equations in its tridimensional transient form, using of a block-structured mesh with local mesh adaptability.

KEYWORD: CFD, Rocket, Aerodynamics, Flow, Fluid Mechanics

INTRODUÇÃO

A mecânica dos fluidos é uma área do conhecimento com muitas aplicações em problemas reais de engenharia. Dentre essas aplicações está o estudo aerodinâmico de veículos aeroespaciais, visto que a interação destes com o ar é direta e crítica, podendo determinar se estes veículos podem ou não entrar em operação.

No caso de um foguete modelo, a intensidade da força de arrasto e as geometrias de cada componente possuem relação direta com a estabilidade do mesmo, sendo necessário a otimização e aprofundamento no estudo destas estruturas para uma previsão mais precisa da trajetória do veículo.

No presente trabalho propõe-se: apresentar um estudo computacional e material de efeitos tridimensionais sobre o escoamento monofásico incompressível ao redor de um foguete estacionário e modelar um modelo computacional compatível com o código MFSim que permita simular o jato propulsivo deste tipo de veículo, permitindo assim uma posterior comparação dos resultados do escoamento sobre o foguete com e sem o jato.

MATERIAIS E MÉTODOS

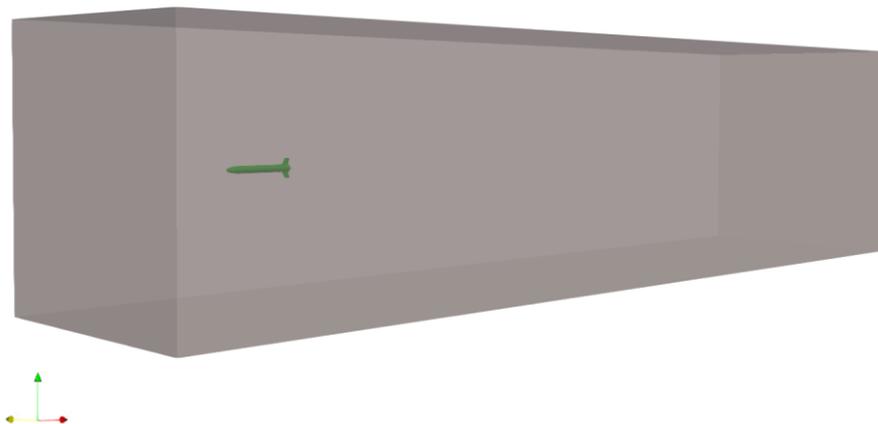
Domínio

Para a determinação dos limites da malha do domínio em uma simulação de CFD, deve-se estimar até onde é possível considerar os efeitos de esteira visando otimizar o custo computacional considerando o tamanho do domínio. Em simulações de alto nível o domínio tem comprimento de aproximadamente 100 vezes o comprimento característico do corpo ensaiado, isto é impossível dado o poder computacional disponível para a realização da pesquisa. Todavia para a comparação, devido à um poder computacional reduzido, as configurações do domínio foram definidas pelo autor como consta na Tabela 1, podendo ser observado na Fig. 1

Tabela 1 – Configurações do domínio

Eixo	Limite Inferior [m]	Limite Superior [m]	Nº de células inicial
x	-1.206	8.442	32
y	-1.206	1.206	8
z	-1.206	1.206	8

Figura 1 – Domínio da simulação computacional



Além disso, foi utilizado também o refinamento adaptativo de razão 2, com 8 níveis físicos.

Malhagem da geometria

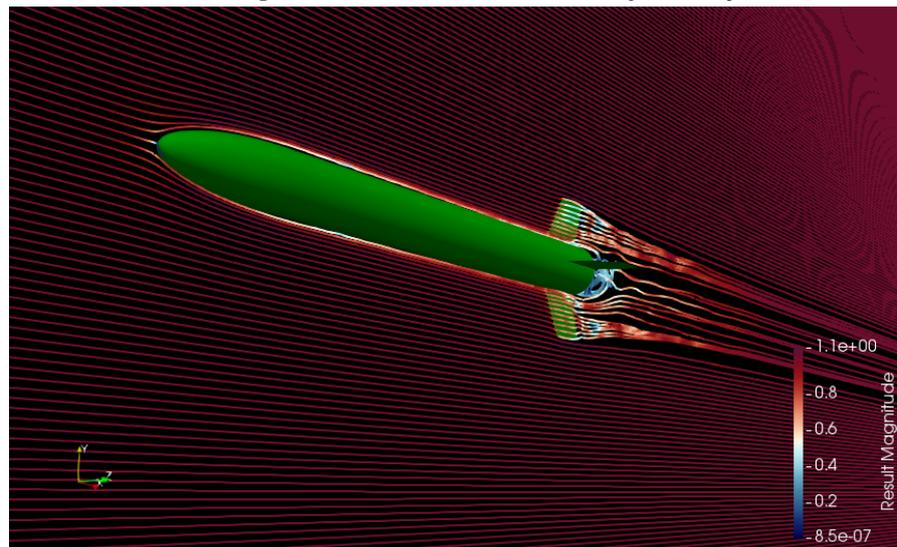
A geometria do foguete foi determinada pela Equipe de Propulsão e Tecnologia Aeroespacial (EPTA) da UFU, otimizada para atingir o apogeu de 500 m. O desenho da geometria foi feito com auxílio do software SolidWorks e a malhagem da superfície foi feita com o software Gmsh de acordo com os parâmetros do domínio.

Imposição de massa

A incorporação da rotina de imposição de massa ao software foi feita em etapas e rotinas de algoritmos computacionais em linguagem FORTRAN90. Primeiramente, foi feito um algoritmo para a leitura de um arquivo .stl (onde estaria a geometria do corpo em que imposição de massa seria aplicada), salvando os centros de cada elemento da malha triangular. Feito isso, é necessária uma outra rotina para o mapeamento do domínio e marcação do endereço na memória de cada uma das células nas quais ocorrerá o aumento de massa em cada instante de tempo. Tendo cada uma dessas células marcadas, deve ser modificado o arquivo que resolve as equações de Navier-Stokes, de modo a acrescentar um termo fonte na equação da continuidade em cada uma das células previamente marcadas. Com isso já está implementada a imposição de massa, restando apenas a adaptação para incorporação da malha adaptativa e do processamento paralelo. A malha adaptativa foi incorporada de modo que, a cada remalhagem, era novamente chamada a rotina do mapeamento dos pontos de injeção de massa, já que na nova malha o endereço de cada célula marcada é modificado.

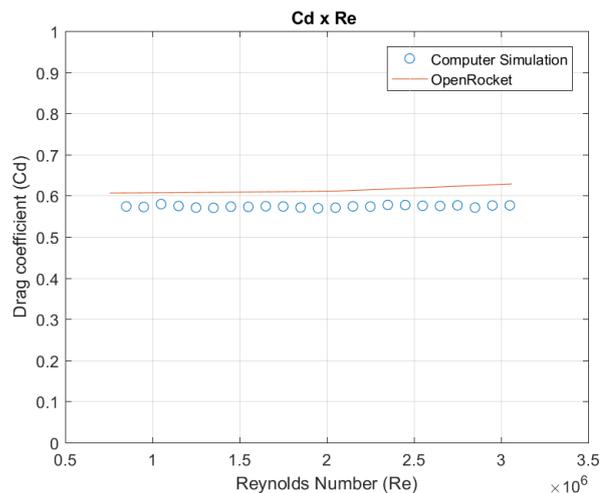
RESULTADOS PARCIAIS

Figura 2 – Linhas de corrente da simulação sem o jato



Para as simulações sem o jato, foi obtido o gráfico do coeficiente de arrasto (C_D) em função do número de Reynolds (Re), a Fig. 3 mostra a comparação dos dados obtidos com dados do programa OpenRocket, que é amplamente utilizado como base para projetos de foguete-modelismo. Já a Fig. 2 mostra as linhas de corrente do escoamento sobre a geometria do foguete.

Figura 3 – Gráfico C_D vs. Re das simulações sem o jato



Até o presente momento foi realizada uma comparação qualitativa entre os escoamentos com e sem jato, visto que ainda não possuímos dados suficientes para a realização de uma análise mais detalhada e quantitativa do problema. Assim faz-se a comparação do perfil da projeção da velocidade do fluido no eixo x, como mostrado na Fig. 4 e Fig. 5.

Figura 4 – Plano de velocidade da simulação sem o jato

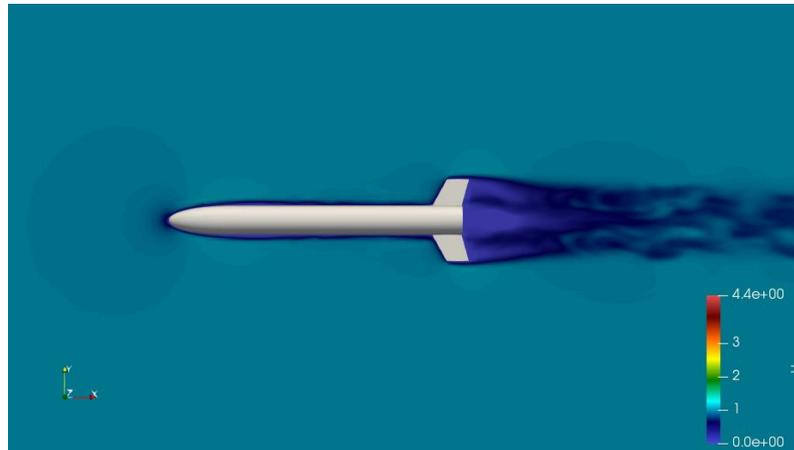
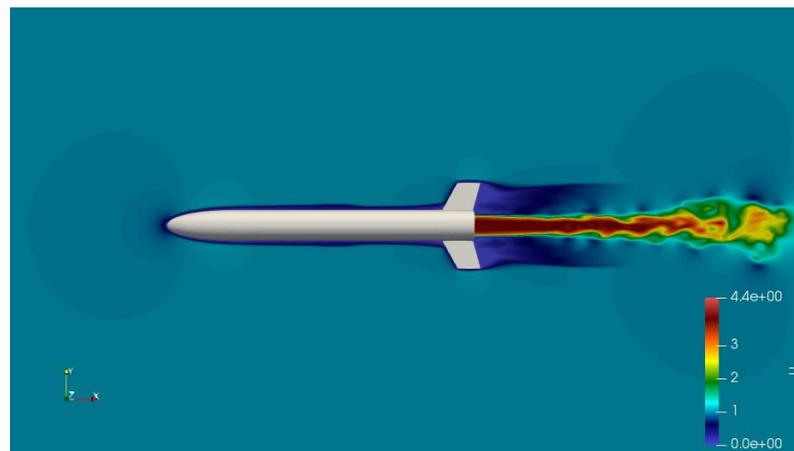


Figura 5 – Plano de velocidade da simulação com o jato



CONCLUSÃO

Os resultados já obtidos evidenciam que o código MFSim é robusto o suficiente para simular escoamentos a moderados números de Reynolds. Ademais, a criação de uma sub-rotina para a simulação do jato agregou imensuravelmente a seus autores e permitirá a simulação de outros problemas que ocorra a alteração de massa de fluido durante a operação, como aspiradores, por exemplo. Além de permitir o futuro estudo do efeito solo sobre a decolagem de um foguete com o jato de propulsão.

REFERÊNCIAS

Silva, A. R., Silveira Neto, A., Valim, G. B., 2017. " Numerical and computational simulation of the flow around a stationary sphere at moderate Reynolds numbers". In *Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering - CILAMCE2017*. Florianópolis, Brazil.

White, Frank M., 2007, *Mecânica dos Fluidos*, The McGraw-Hill Companies, New York, 6th edition.