

ANÁLISE BALÍSTICA E AERODINÂMICA DE UM FOGUETE DE 70 mm UTILIZANDO CFD

ANDRÉ LUIZ TENÓRIO REZENDE¹, ELTON REGIS NASCIMENTO DA SILVA², LUCAS ECCARD BRAGA MORAES³ e VICTOR SANTORO SANTIAGO⁴

¹Dr. em Engenharia Mecânica, Prof. Adjunto, IME, Rio de Janeiro-RJ, arezende@ime.eb.br;

²Graduado em Engenharia Mecânica, IME, Rio de Janeiro-RJ, nascimento2016@ime.eb.br;

³Graduado em Engenharia Mecânica, IME, Rio de Janeiro-RJ, IME, Rio de Janeiro-RJ, lucas.moraes@ime.eb.br;

⁴Dr. em Engenharia Mecânica, Prof. Adjunto, IME, Rio de Janeiro-RJ, santoro@ime.eb.br.

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
6 a 9 de outubro de 2025

RESUMO: O presente estudo tem como objetivo principal a obtenção de dados aerodinâmicos de um foguete de 70 mm, utilizando a técnica de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Para isso, desenvolveu-se uma base teórica fundamentada nas equações de governo do escoamento compressível, abordando também os princípios do método dos volumes finitos e os procedimentos de geração de malha no domínio computacional. A modelagem do foguete foi realizada em ambiente de CFD, considerando diferentes ângulos de ataque e números de Mach, a fim de avaliar o comportamento aerodinâmico em distintas condições operacionais. Os resultados numéricos obtidos foram posteriormente comparados com os dados fornecidos pelo software balístico PRODAS, apresentando boa concordância. Dessa forma, os resultados foram considerados adequados e promissores para esta etapa inicial de investigação.

PALAVRAS-CHAVE: Engenho autopropulsado, balística externa, CFD, coeficientes aerodinâmicos.

BALLISTIC AND AERODYNAMIC ANALYSIS OF A 70 MM ROCKET USING CFD

ABSTRACT: This study aims to obtain aerodynamic data for a 70 mm rocket through Computational Fluid Dynamics (CFD). To achieve this goal, a theoretical foundation was established based on the governing equations for compressible flow, including the finite volume method and mesh generation within the computational domain. The rocket was modeled in a CFD environment, and simulations were carried out considering variations in angle of attack and Mach number to assess its aerodynamic behavior under different operating conditions. The numerical results were compared with data obtained from the ballistic software PRODAS, showing good agreement. Therefore, the findings were considered suitable and promising for this preliminary stage of investigation.

KEYWORDS: Rocket-assisted projectile, External ballistics; CFD; Aerodynamic coefficients.

INTRODUÇÃO

Historicamente, a artilharia foi central nos conflitos armados, mas foi progressivamente substituída pelo poder aéreo nas forças ocidentais. No entanto, a guerra na Ucrânia tem mostrado o ressurgimento da artilharia terrestre como elemento estratégico, com destaque para obuses e lançadores múltiplos de foguetes (National Defense, 2022). Nesse contexto, o Exército Brasileiro desenvolve o Programa Estratégico ASTROS 2020, sistema multicalibre de alta mobilidade e longo alcance (Exército Brasileiro, 2025). Entre seus armamentos, destaca-se o foguete de 70 mm para treinamento, de baixo custo, cuja análise aerodinâmica visa aprimorar o desempenho e a precisão.

Este trabalho visa estudar o escoamento aerodinâmico sobre um foguete de 70 mm por meio de simulações numéricas em CFD (ANSYS FLUENT), comparando os resultados com dados do PRODAS (Projectile Rocket Ordnance Design and Analysis System), com o objetivo de validar o modelo e contribuir para estudos preliminares de desempenho.

MATERIAL E MÉTODOS

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é uma ferramenta que permite prever o comportamento de escoamentos por meio da solução numérica das equações de conservação da massa, do momento e da energia. Essa abordagem é essencial para modelar fenômenos complexos, como a turbulência, caracterizada por escoamentos caóticos e não determinísticos que afetam diretamente a transferência de calor e o transporte de quantidade de movimento (ANSYS, 2021).

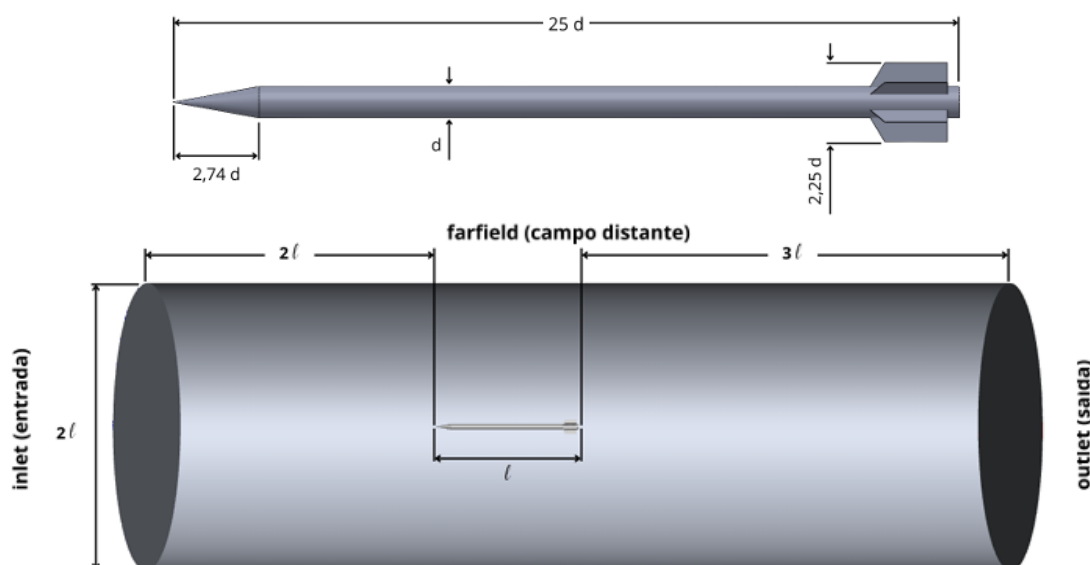
Neste trabalho, utilizaram-se simulações CFD com o método dos volumes finitos (FVM – Finite Volume Method), que discretiza o domínio em pequenos volumes de controle, convertendo as equações diferenciais em sistemas algébricos resolvidos numericamente. O processo foi conduzido no software ANSYS FLUENT (Silva, 2016; ANSYS, 2021). Para a modelagem da turbulência, adotou-se o modelo SST (Shear Stress Transport), que combina as características dos modelos k- ϵ e k- ω , alternando automaticamente entre eles conforme o regime de escoamento (Menter, 2009). A viscosidade turbulenta é determinada em função da energia cinética turbulenta (k) e da taxa de dissipação específica (ω). As equações que descrevem o movimento dos fluidos para escoamento compressível são as equações de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento e conservação da energia. Em tais equações o escoamento foi considerado em regime permanente (Fox et al., 2016; ANSYS, 2021). O foguete sofrerá uma força resultante F que pode ser dividida em duas partes: a força de arrasto F_D (componente na direção do movimento) e a força de sustentação F_L (componente perpendicular à direção do movimento) (Fox et al., 2016). Assim para escoamento sobre qualquer corpo, os coeficientes de arrasto C_D e sustentação C_L são mostrados na equação 1.

$$C_D = f(Re) \equiv \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{e} \quad C_L \equiv \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_p} \quad (1)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 ilustra o modelo do foguete 70 mm (diâmetro d) com suas dimensões e o domínio computacional utilizado. Tal domínio consiste em um cilindro com as dimensões especificadas, subtraído do sólido do foguete, representando, portanto, a região ativa pelo qual o fluido escoará. A condição inicial definida inclui um *inlet* de velocidade, cuja velocidade corresponde ao número de Mach da simulação, um *farfield* de pressão com a mesma velocidade do *inlet* e pressão de 101325 Pa, e um *outlet* de pressão com pressão idêntica à da região de *farfield* (ANSYS, 2021).

Figura 1. Dimensões do Foguete 70 mm e domínio computacional.



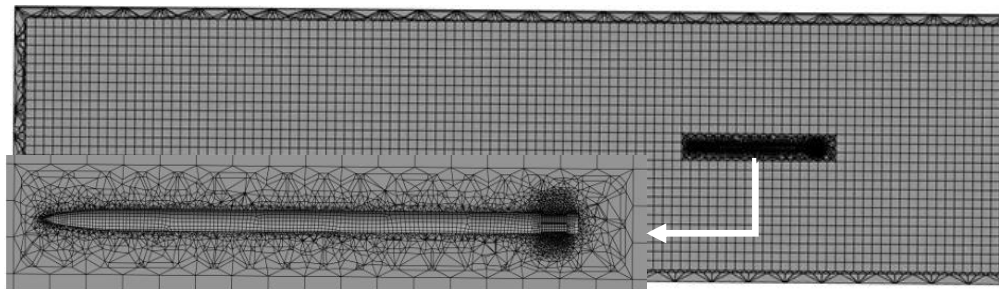
Em relação as propriedades do escoamento, utilizou-se os valores de referência conforme Tabela 1 para todas as simulações.

Tabela 1. Propriedades do escoamento.

| Propriedades | Valores |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Área (m ²) | 0,00397259 |
| Massa Específica (kg/m ³) | 1,176655 |
| Pressão (Pascal) | 101325 |
| Temperatura (K) | 300 |
| Viscosidade (kg/m·s) | 1,7894x10 ⁻⁵ |

No estudo em questão, a malha foi criada utilizando o modelo híbrido, de modo que a malha estruturada ao longo do grande volume de controle permite maior simplicidade e uniformidade nas condições da simulação, enquanto o tamanho dos elementos adapta-se em uma geometria tetraédrica a partir da sua proximidade da superfície do foguete, permitindo um refinamento da malha, principalmente na região das aletas. A malha resultante, representada nas Figura 2, é composta por 1197654 elementos e 522565 nós.

Figura 2. Malha no domínio computacional e detalhe do refinamento próximo ao foguete.



As equações de conservação foram resolvidas numericamente por meio do método dos volumes finitos, utilizando o software ANSYS FLUENT, com o modelo de turbulência SST e considerando os efeitos de compressibilidade do escoamento.

As simulações foram conduzidas para ângulos de ataque de 0° a 10°, e números de Mach de 0,5 a 2,5. Os limites superiores de 10° e Mach 2,5 foram definidos por atenderem aos objetivos da pesquisa, considerando as características operacionais do foguete de 70 mm (McCoy, 2012).

A partir dessas simulações, obtiveram-se os coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) em diferentes condições de escoamento, permitindo a construção de suas curvas em função do número de Mach. As Figuras 3 e 4 ilustram a variação desses coeficientes com o ângulo de ataque.

Os resultados mostram que os valores de C_D e C_L aumentam com o incremento do ângulo de ataque e do número de Mach (M), comportamento esperado devido ao aumento da força de arrasto e sustentação. Observa-se ainda um aumento acentuado desses coeficientes na vizinhança de $M = 1$, atribuído à formação de ondas de choque normais e oblíquas, características da transição para o regime supersônico. Verifica-se, também, que para $\alpha = 0^\circ$, os valores de C_L são praticamente nulos, com apenas resíduos numéricos, o que está de acordo com a ausência esperada de força de sustentação nesse caso. As curvas obtidas evidenciam uma relação direta entre o aumento do ângulo de ataque e os coeficientes aerodinâmicos (Carlucci & Jacobson, 2018).

Figura 3. Coeficiente de arrasto x Mach.

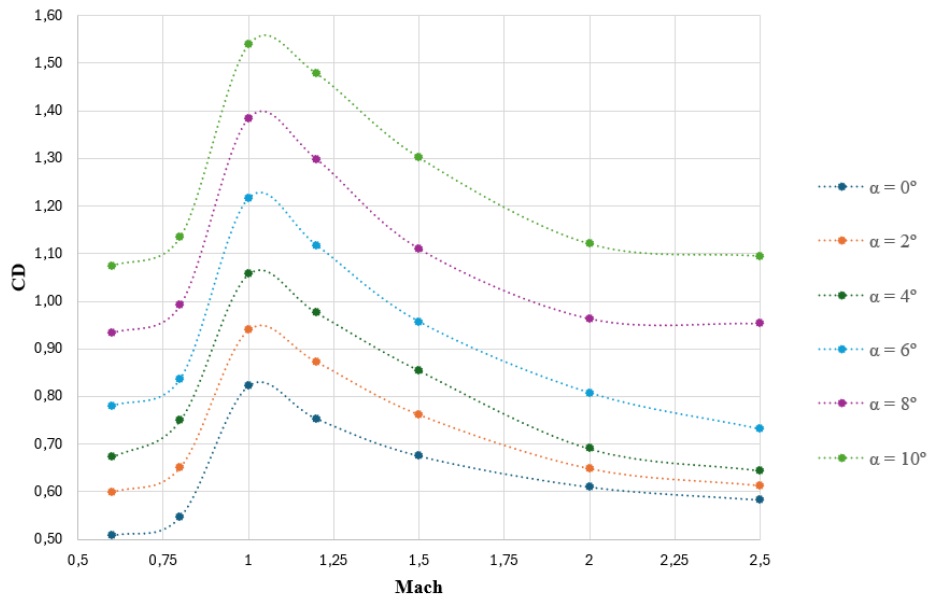
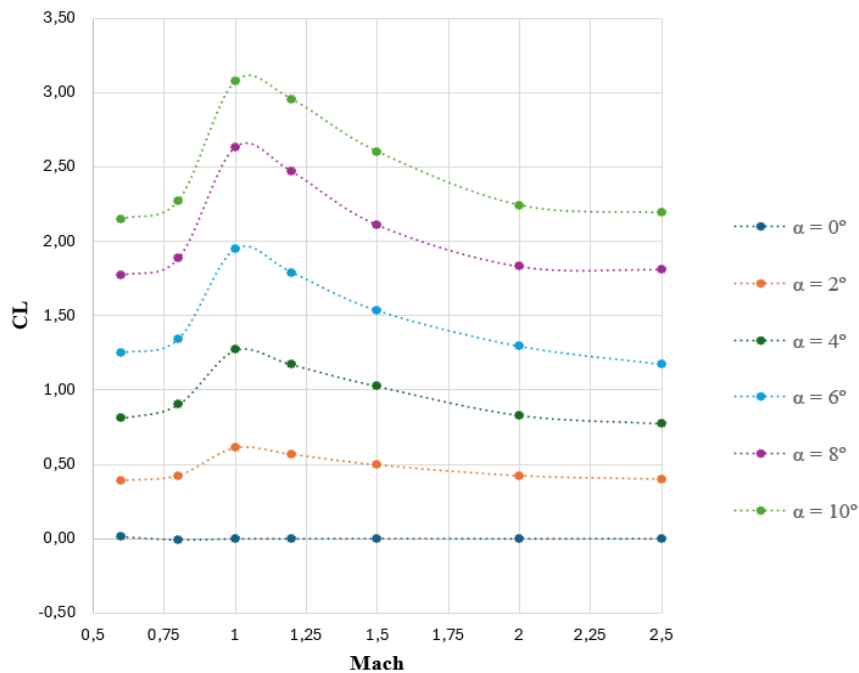


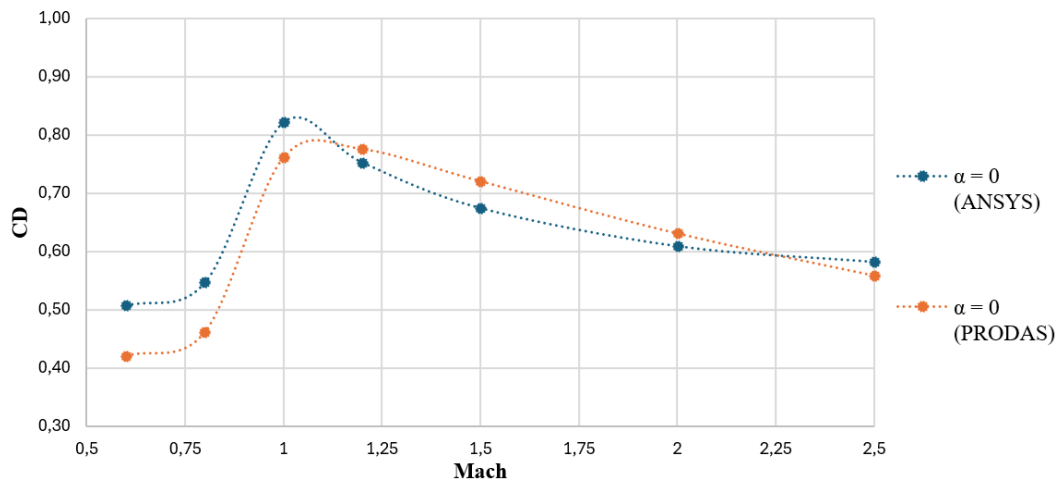
Figura 4. Coeficiente de sustentação x Mach.



Com o objetivo de comparar os coeficientes de arrasto obtidos nas simulações em CFD, utilizaram-se dados provenientes de simulações realizadas no programa balístico PRODAS, empregando um modelo com geometria semelhante. Devido às limitações da versão utilizada do PRODAS (2003), não foi possível reproduzir fielmente a geometria do foguete. A Figura 5 apresenta a comparação entre os resultados obtidos por ambas as simulações para ângulo de ataque de 0° .

Apesar das diferenças entre as curvas de arrasto obtidas por CFD e pelo PRODAS, a tendência geral dos resultados é semelhante, o que valida qualitativamente a análise. Mesmo com as limitações do modelo no PRODAS, os dados são coerentes e reforçam a confiabilidade do estudo, servindo como base para futuros aprimoramentos.

Figura 5. Comparação das curvas obtidos pelo CFD e o programa PRODAS.



CONCLUSÃO

Este estudo comprovou a viabilidade do uso de CFD para a obtenção de dados aerodinâmicos de um foguete de 70 mm, contribuindo para a compreensão do seu comportamento em diferentes condições de voo. As simulações permitiram calcular os coeficientes de arrasto e sustentação em uma faixa de números de Mach e ângulos de ataque, com resultados coerentes com a teoria aerodinâmica.

A comparação com dados PRODAS, apesar das limitações impostas pela simplificação geométrica da versão utilizada, apresentou boa concordância qualitativa, validando a metodologia empregada. Dessa forma, o trabalho reforça a utilidade do CFD como ferramenta de análise preliminar em estudos balísticos e estabelece uma base sólida para futuras investigações voltadas ao aperfeiçoamento do desempenho e da precisão desses foguetes no contexto do sistema multicalibre.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Exército Brasileiro e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio institucional e pelo incentivo a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANSYS. Ansys Fluent Theory Guide. 2021.
- CARLUCCI, D. E.; JACOBSON, S. S. Ballistics: Theory and Design of Guns and Ammunition. CRC Press, 3rd edition, 2018
- EXÉRCITO BRASILEIRO. Programa Estratégico ASTROS. Informativo. 2025. Disponível em: <https://epex.eb.mil.br/index.php/programas-estrategicos-do-exercito/astros>. Acesso em: 21 de julho de 2025.
- MCCOY, R. L. Modern Exterior Ballistics: The launch and flight dynamics of symmetric projectiles. Schiffer Military History, Atglen, PA, 2nd edition, 2012.
- NATIONAL DEFENSE. Ukraine War Proves Big Guns Are Back. Nota Técnica. 2022. Disponível em: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2022/9/16/analysis-ukraine-war-proves-big-guns-are-back>. Acesso em: 21 de julho de 2025.
- MENTER, F. R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. International Journal of Computational Fluid Dynamics, v.23, n.4, p.305-316, 2009.
- SILVA, A. B. Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) na simulação de vazamentos em dutos. 134f. Dissertação (Mestrado em CFD). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.