

# ANÁLISE COMPUTACIONAL VIA CFD DA RESISTÊNCIA AERODINÂMICA DE UM VEÍCULO MILITAR

<sup>1</sup>FELIPE EGITO, <sup>1</sup>BRUNA LOIOLA, <sup>1</sup>DIOGO FERNANDES

<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia (IME)

<egito.fellipe@eb.mil.br> <bruna.loiola@ime.eb.br>

<diogo.fernandes@ime.eb.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v19.3933

**Resumo.** Este trabalho tem como finalidade estudar o comportamento aerodinâmico de um veículo terrestre militar. Para que o estudo fosse realizado, foi selecionada a viatura Guarani, atualmente empregada pelo Exército Brasileiro. Com o uso das ferramentas computacionais oferecidas pelo *software* ANSYS/Fluent, simulou-se o escoamento de ar em torno de um modelo geométrico baseado na viatura, permitindo obter resultados relacionados ao arrasto aerodinâmico do veículo para algumas velocidades. Como forma de complementar a análise, realizou-se a impressão 3D da geometria modelada para submetê-la ao estudo no túnel de vento, possibilitando comparar com os resultados encontrados na simulação. A partir de simulações computacionais e experimentos, estudou-se de forma satisfatória a resistência aerodinâmica sobre a viatura, encontrando-se valores para o coeficiente de arrasto na faixa de 0,60 a 0,69. Com isso, um dos objetivos da pesquisa foi contribuir para a análise da viabilidade do estudo do arrasto aerodinâmico sobre um veículo militar por meio de métodos computacionais, experimentos em túnel de vento de baixa escala e técnicas de manufatura aditiva, gerando menos custos de desenvolvimento para um projeto.

**Palavras-chave:** aerodinâmica; guarani; *fluent*; coeficiente de arrasto; túnel de vento.

## COMPUTATIONAL ANALYSIS VIA CFD OF THE AERODYNAMIC DRAG OF A MILITARY VEHICLE

**Abstract.** This work aims to study the aerodynamic behavior of a military ground vehicle. For the study to be carried out, the *Guarani*, a vehicle currently employed by the Brazilian Army, was selected. Using computational tools provided by software Ansys/Fluent, airflow was simulated around a geometric model based on the vehicle, allowing the obtaining of results related to the aerodynamic drag of the vehicle for some speed values. To complement the analysis, a 3D print of the modeled geometry was performed to submit it to the wind tunnel analysis, allowing for comparison with the results obtained in the simulation. Based on the computational simulations and experiments, the aerodynamic resistance on the vehicle was satisfactorily studied, yielding drag coefficient values in the range of 0.60 to 0.69. Thus, one of the objectives of the research was to contribute to the analysis of the feasibility of studying aerodynamic drag on a military vehicle through computational methods, low-scale wind tunnel experiments and additive manufacturing techniques, generating lower development costs for a project.

**Keywords:** aerodynamics; *guarani*; *fluent*; drag coefficient; wind tunnel.

### 1 INTRODUÇÃO

A aerodinâmica de um veículo é um campo que sempre está suscetível a novos estudos, motivado principalmente pela importância da redução da força de arrasto em relação à redução dos custos operacionais e também no que diz respeito à otimização das configurações dos veículos [Barbut e Negrus 2011, Luo, Li e Zhang 2022]. Além disso, a crescente preocupação ambiental e a necessidade de se criar produtos mais eficientes são fatores que

têm impulsionando pesquisadores a realizarem estudos acerca da aerodinâmica veicular, originando uma grande procura por conhecimento nesta área. As pessoas estão se conscientizando de que os recursos naturais estão cada vez mais escassos, para uma população mundial que cresce continuamente. Portanto, é preciso criar meios para que se comprometa o mínimo possível o meio ambiente e, por isso, há a necessidade de se obter veículos cada vez mais eficientes em termos de aproveitamento energético [Castejon 2011, Hussein e Rakha 2022].

Entender como os fenômenos da aerodinâmica se relacionam com o consumo de combustível nos automóveis, à medida que o arrasto impõe resistência ao deslocamento dos mesmos, é algo que tem estimulado as indústrias automotivas a investirem grandes esforços na obtenção de ferramentas que possam representar as condições de tráfego normais e, assim, conseguir prever o desempenho do produto em desenvolvimento [Piechna 2021]. Os túneis de vento e a simulação computacional surgem neste ambiente como as principais ferramentas de análise e previsão do escoamento ao redor do veículo [Castejon 2011].

No contexto de veículos militares, um novo blindado foi criado na última década com o intuito modernizar a Cavalaria Mecanizada, capaz de levar até 11 militares, oferecendo vantagens operacionais, como maior proteção blindada e anti-minas. Trata-se da Viatura Blindada de Transporte de Pessoal - Média Sobre Rodas (VBTP - MSR) 6x6 Guarani, fruto da parceria entre a IVECO *Defence Vehicles* e o Exército Brasileiro, apresentada na Figura 1.

O desenvolvimento da VBTP Guarani teve início em 2007 no Escritório de Projetos do Departamento de Ciência e Tecnologia (DCT), no Rio de Janeiro, com a participação ativa dos engenheiros militares da Diretoria de Fabricação, organização militar subordinada ao DCT. O projeto destaca-se pelo seu caráter inovador, agregando modernos sistemas de armas e sistema de comando e controle (comunicações), compondo a Nova Família de Blindados Sobre Rodas (NFBR) em implementação na Força Terrestre [Defesanet 2019].

Com a finalidade de atender as necessidades operacionais da tropa, a VBTP Guarani nasceu de um projeto desenvolvido por e para militares do Exército Brasileiro, diferente de outras viaturas utilizadas pelas Forças Armadas que são obtidas a partir de adaptações de veículos militares ou civis. Além disso, dentre as viaturas desenvolvidas especificamente para o ambiente operacional, o Guarani é capaz de atingir maiores velocidades, em comparação com outros veículos da mesma classe. Dessa forma, dada a grandiosidade do projeto da viatura e a importância que seu desenvolvimento representa, tornam-se oportunas as análises que visam estudar o seu desempenho.

Em veículos militares terrestres, a resistência aerodinâmica é geralmente uma preocupação secundária em comparação com sua capacidade de oferecer proteção e de operar em diversos ambientes e terrenos, mas ainda assim desempenha um papel significativo, especialmente em veículos que atingem uma velocidade mais elevada, como os transportes blindados e os veículos de combate [Pan *et al.* 2023, Sudin *et al.* 2014, Uddin *et al.* 2023]. Como forma de estender a necessidade do estudo da resistência aerodinâmica de veículos aos aspectos operacionais de combate, este trabalho possui a finalidade de realizar a análise aerodinâmica de uma viatura de emprego militar, no caso, a VBTP Guarani, visando determinar alguns aspectos como o comportamento do escoamento e o coeficiente de arrasto sobre o veículo, avaliando a sua eficiência no teatro de operações. Essa análise é efetuada de forma numérica e experimental.

As simulações numéricas são efetuadas por meio do software ANSYS/Fluent replicando a geometria do veículo real na análise computacional, simulando um escoamento externo de ar em torno do modelo construído de acordo com os parâmetros inseridos. A partir do Método dos Volumes Finitos (MVF), é possível obter alguns comportamentos da viatura quando imersa em um escoamento de ar, podendo calcular o coeficiente de arrasto para várias velocidades.

Com a finalidade de analisar os resultados das simulações, uma análise experimental das forças aerodinâmicas de um modelo reduzido da VBTP Guarani obtido por meio de impressão 3D é efetuada pela análise do escoamento de ar em um túnel de vento. Tal abordagem busca comparar os resultados de procedimentos distintos com o intuito de avaliar uma metodologia de obtenção de coeficientes aerodinâmicos.

Durante o desenvolvimento de um novo veículo, ou mesmo em projetos de adaptações, várias alterações de *design* podem ocorrer ao longo dos estudos, modificando seu comportamento aerodinâmico. Para aferir os novos coeficientes de arrasto de forma experimental, seria necessário realizar alterações em *mockups* e submetê-los a túneis de vento que comportem o veículo por completo, sendo nem sempre viável. O emprego da manufatura aditiva nesse caso busca analisar um método que consiste em obter uma versão de menor escala do veículo para estudá-los em túneis de vento menores e mais acessíveis, reduzindo custo e tempo em um projeto, além de torná-lo mais flexível.

**Figura 1:** VBTP - MSR 6x6 Guarani.

Fonte: [Brazil 2019].

## 2 METODOLOGIA

Em engenharia é comum utilizar simulações numéricas para observação em tempo real dos efeitos da variação de determinados parâmetros. A prática da utilização de experimentos em laboratórios é uma abordagem eficaz de promover a aprendizagem ativa e a compreensão dos conceitos científicos. Elas permitem explorar fenômenos reais, aplicar teorias e observar resultados concretos. Dessa forma, esse trabalho pretende aliar essas duas metodologias para analisar os efeitos aerodinâmicos ao redor de um veículo militar.

### 2.1 Análise computacional

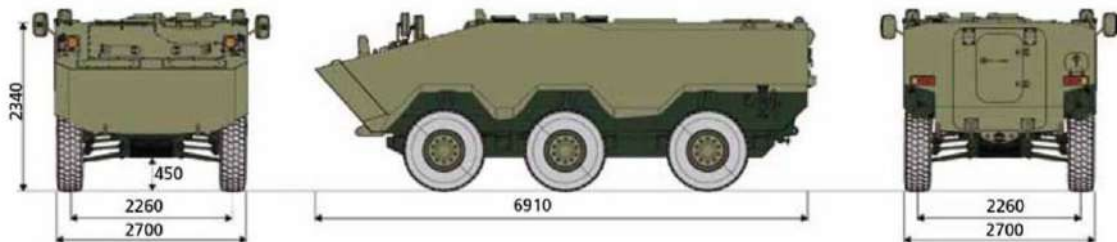
Uma alternativa para a realização de simulações de análise aerodinâmica é a utilização de pacotes computacionais que possuem a capacidade de realizar cálculos via CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional), que tem como objetivo avaliar as grandezas físicas envolvidas em um escoamento (pressão, velocidade e temperatura, por exemplo) por métodos numéricos [Kapote 2023].

Essa metodologia consiste em dividir o sistema a ser avaliado em partes menores conforme os tipos de resultado a serem obtidos e as dimensões desse sistema como um todo. Após essa divisão, cada uma dessas partes será avaliada individualmente conforme suas condições de fronteira e segundo as equações diferenciais que regem o fenômeno a ser estudado na simulação.

Nesse contexto, utilizou-se o pacote computacional ANSYS/Fluent para simular o escoamento de ar em torno do modelo da VBTP Guarani, obtendo os resultados para o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ). A geometria utilizada na simulação foi desenvolvida baseando-se nas dimensões originais da viatura, contidas na Figura 2. Utilizando os aspectos geométricos mais relevantes para a simulação, como comprimento, altura e largura do veículo, e desprezando aspectos menos importantes da geometria foi obtida a geometria computacional ilustrada na Figura 3. A Figura 4 ilustra o volume empregado para o escoamento de ar na simulação, representado pelo paralelepípedo

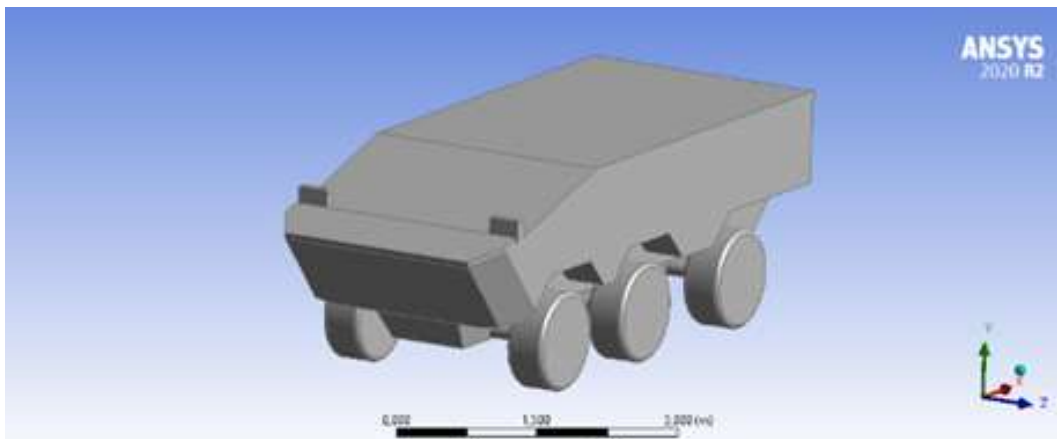
em volta da geometria.

**Figura 2:** Principais dimensões da VBTP Guarani.



Fonte: [Defesanet 2019].

**Figura 3:** Vista isométrica da geometria.



Fonte: Autores (2024).

Com a geometria construída, discretizou-se a malha numérica, definindo a quantidade de elementos finitos de forma que se adequasse à finalidade da simulação. A Figura 5 mostra as malhas aplicadas ao volume ocupado pelo ar, onde o maior grau de refinamento é encontrado nas proximidades da superfície do veículo. Ao todo, foram utilizados 446.387 nós e 2.360.987 elementos tetraédricos de malha.

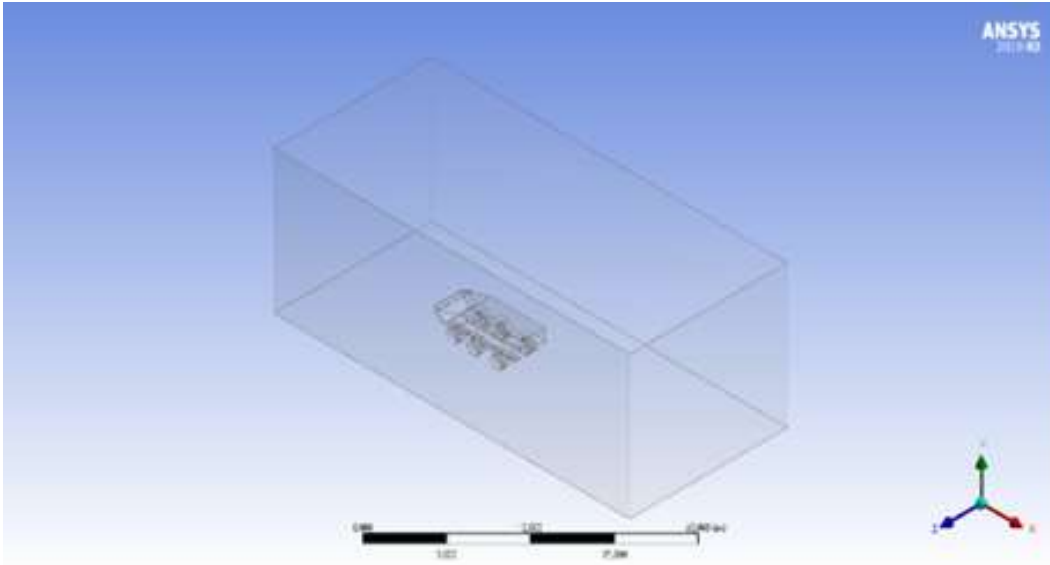
O problema físico em estudo pode ser modelado matematicamente pelas equações de conservação de massa e conservação da quantidade de movimento linear nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  do Sistema Cartesiano. Foram consideradas as hipóteses de regime permanente e escoamento incompressível pela faixa de velocidades utilizadas na simulação. Sejam  $u$ ,  $v$  e  $w$  as velocidades em um ponto qualquer do escoamento nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , a equação de conservação de massa pode ser representada pela Equação (1).

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

A conservação da quantidade de movimento linear nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  estão expressas pelas Equações (2), (3) e (4), respectivamente, onde  $p$  representa a pressão estática,  $\mu$  a viscosidade dinâmica e  $\rho$  a massa específica.

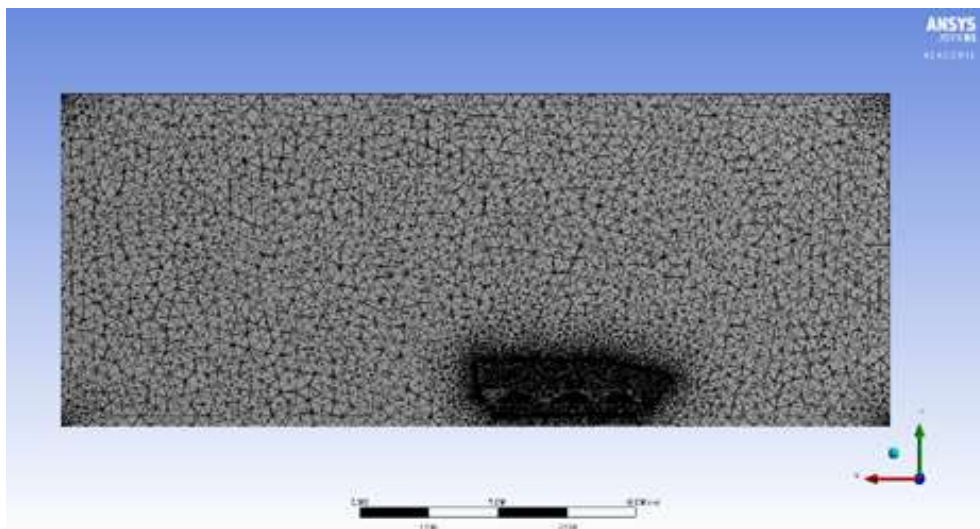
$$\rho \left[ \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2)$$

**Figura 4:** Volume adotado pelo ar em torno da geometria.



Fonte: Autores (2024).

**Figura 5:** Malha discretizada utilizada nas simulações.



Fonte: Autores (2024).

$$\rho \left[ \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} \right] = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (4)$$

A partir das propriedades do ar ambiente, das velocidades a serem utilizadas e das dimensões do veículo, foi calculada uma faixa de valores do número de Reynolds para o escoamento, a qual indicou um regime turbulento. Por esse motivo, foi necessário utilizar um modelo de turbulência. O modelo  $k - \epsilon$  é o mais conhecido entre os



que envolvem duas equações diferenciais de transporte. Este se destaca devido à robustez, precisão e estabilidade. Além disso, atualmente é considerado como padrão entre os modelos de turbulência para simulações industriais e é incorporado na maioria dos códigos comerciais de CFD [Gabbi 2013]. Esse modelo é baseado nas equações de conservação de *momentum* e introduz duas novas variáveis ao sistema de equações. A primeira é a variável  $k$  que representa a energia cinética da turbulência, que é definida como a variação das flutuações em velocidade e possuindo  $m^2/s^2$  como unidade. Tem-se também  $\varepsilon$ , representando a dissipação da turbulência, ou seja, a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam e tem  $m^2/s^3$  como unidade [Gabbi 2013].

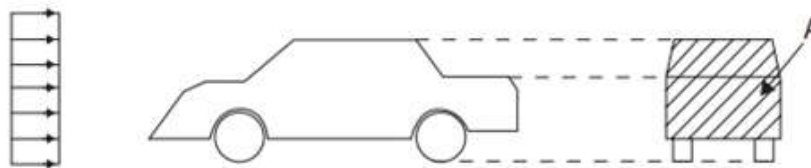
Determinadas as equações diferenciais a serem utilizadas, foram aplicadas as condições de contorno apropriadas para simular o escoamento de ar em torno do veículo. Na seção de entrada da seção de teste foram consideradas nulas as componentes de velocidade em  $y$  e  $z$ :  $v = w = 0$ , e a componente da velocidade em  $x$  foi considerada como constante  $u = V_\infty$ , onde  $V_\infty$  é definido como um parâmetro a ser inserido na simulação. A região de contato entre a viatura e o ar foi considerada com velocidade relativa nula, respeitando a condição de não deslizamento. A pressão na seção de saída foi considerada a mesma do ambiente.

Dessa forma, o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  *realizable* foi empregado e o fluido considerado para o escoamento foi o ar (dados na Tabela 1). Dada a velocidade máxima que o veículo atinge (110 km/h), empregou-se quatro velocidades para a entrada do escoamento de ar de acordo com porcentagens do valor da velocidade máxima ( $V_{max}$ ) da viatura: 100%, 75%, 50% e 25%. De acordo com a geometria do veículo, ajustou-se os valores de referência para o cálculo de  $C_D$ . Esses valores são a área de referência (calculada conforme representado pela Figura 6 e seu comprimento. Considerando as dimensões originais da viatura, foi adotada uma área de 5,103 m<sup>2</sup> e um comprimento de 6,91 m.

**Tabela 1:** Propriedades Físicas do ar na simulação.

Propriedade	Valor
Temperatura (T)	300K
Massa específica ( $\rho$ )	1,1614kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade dinâmica ( $\mu$ )	1,846.10 <sup>-5</sup> Ns/m <sup>2</sup>

**Figura 6:** Área de referência para o cálculo do arrasto sobre um veículo.



Fonte: [Brunetti 2018].

## 2.2 Análise experimental

Para comparar com os resultados encontrados na simulação computacional, utilizou-se um equipamento de impressão 3D capaz de recriar o modelo da viatura em menor escala, podendo aplicá-lo em testes no túnel de vento. Para permitir que a impressão fosse efetuada, separou-se a carcaça do veículo de seus eixos e de suas rodas para que fossem impressos separadamente. Em seguida, realizou-se a montagem das peças, constituindo o modelo reduzido da viatura mostrado na Figura 7, o qual possui comprimento de 19 cm.

Na carcaça, foi necessário realizar um furo cego na parte inferior da mesma. Essa modificação, a qual pode ser vista pela Figura 8, possui a finalidade de inserir um eixo de formato circular de diâmetro 11,65 mm e altura de 20 cm a ser utilizado como suporte da miniatura no experimento do túnel de vento. Assim como o modelo reduzido da viatura, o eixo a ser encaixado no furo também foi construído por impressão 3D.

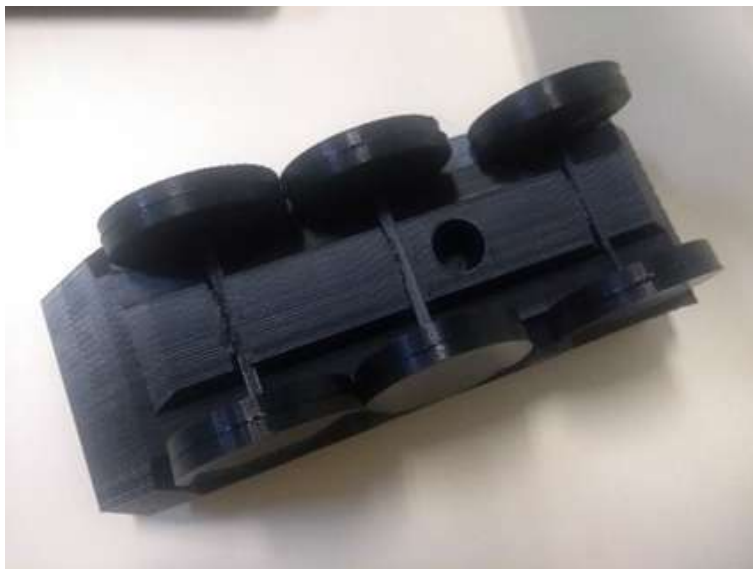
Com o modelo devidamente construído, montou-se o veículo na base do túnel de vento, encaixando-se o eixo corretamente na balança. A Figura 9 mostra o posicionamento do modelo no interior do túnel, onde a grade

**Figura 7:** Fotografia em perfil isométrico do modelo impresso.



Fonte: Autores (2024).

**Figura 8:** Fotografia do furo inferior para encaixe do suporte no modelo.



Fonte: Autores (2024).

mostrada na lateral esquerda representa o local onde ocorre a entrada do escoamento de ar. A Figura 10 mostra o encaixe do eixo na balança de 2 componentes.

Para a medição da velocidade do escoamento de ar no interior do túnel, é instalado na parte superior do mesmo um tubo de Pitot, mostrado pela Figura 11. Com esse dispositivo, é possível obter a diferença entre os valores das pressões total ( $p_t$ ) e estática ( $p_{est}$ ) e a partir da Equação (5) obter o valor da velocidade do escoamento. O valor da massa específica do ar ( $\rho$ ) pode ser obtido adotando-se a hipótese de gás ideal, por meio da Equação (6), onde  $R$  é a constante gasosa do ar, 287 J/kg/K, e  $T$  é sua temperatura absoluta no momento do experimento [Fox, MCDonald e Pritchard 2014]. As propriedades medidas e a massa específica calculada estão presentes na Tabela 2.

**Figura 9:** Fotografia do modelo impresso no interior do túnel de vento.



Fonte: Autores (2024).

**Figura 10:** Fotografia da balança utilizada no experimento.



Fonte: Autores (2024).

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_{est})}{\rho}} \quad (5)$$

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (6)$$

Acionando-se o túnel, controlou-se a velocidade do ar em seu interior até atingir as velocidades que foram adotadas no método computacional. A célula de carga da balança é a componente responsável por realizar a medição da força de arrasto ( $F_D$ ) que é imposta ao modelo. A mesma contém um sensor que transmite ao usuário



**Figura 11:** Fotografia do tubo de Pitot utilizado no experimento.

Fonte: Autores (2024).

**Tabela 2:** Físicas do ar no experimento.

Propriedade	Valor
Temperatura (T)	299K
Massa específica ( $\rho$ )	1,18kg/m <sup>3</sup>
Pressão atmosférica (p)	101,3kPa

o valor da força calculada em Newton. A partir desses valores e das propriedades do ar constantes na Tabela 2, calculou-se o coeficiente de arrasto  $C_D$  para cada velocidade conforme a Equação (7) [Fox, MCDonald e Pritchard 2014], utilizando um valor de  $A = 41,58 \text{ cm}^2$  para a área de referência.

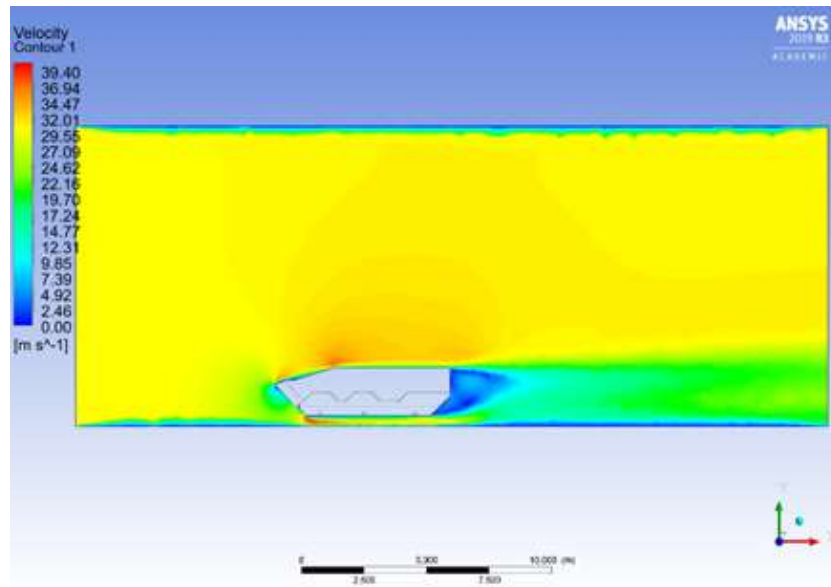
$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (7)$$

### 3 RESULTADOS

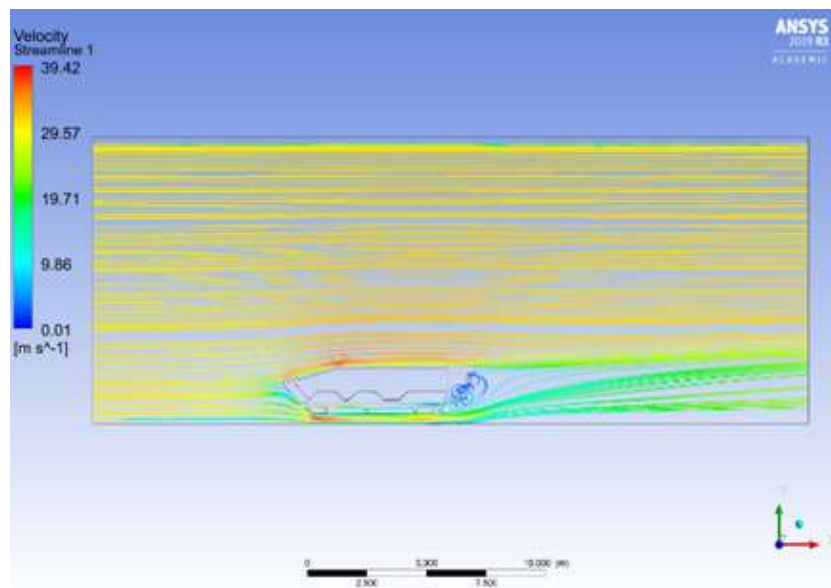
Ajustados os parâmetros numéricos inerentes ao modelo empregado, efetivou-se a simulação definindo uma quantidade máxima de 1500 iterações, para certificar de que a convergência fosse atingida. As simulações mostraram resultados estáveis para o valor do coeficiente de arrasto com cerca de 250 iterações.

Ao final, obteve-se os campos de velocidade do escoamento de ar para os quatro casos estudados. Como exemplo, as Figuras 12, 13 e 14 mostram, respectivamente, o campo de velocidades, as linhas de corrente e a distribuição de pressão para a situação de velocidade máxima. As figuras ilustram os resultados para a seção transversal central do modelo construído, perpendicular ao eixo  $z$ .

Pela análise das figuras, é possível verificar alguns aspectos condizentes com a aerodinâmica veicular. Por exemplo, pela Figura 12, é observada a condição de não deslizamento nas superfícies do veículo e nas paredes que delimitam o domínio do ar, indicada pelo valor nulo da velocidade do escoamento nesses pontos. Pela Figura 13, nota-se a recirculação do ar na região traseira do veículo. A Figura 14 mostra uma região de acréscimo de pressão na parte frontal do veículo, correspondendo à situação de estagnação do ar, o que é possível confirmar pela redução da velocidade no mesmo ponto, conforme mostrado na Figura 12. Esses dois últimos aspectos surgem devido à geometria do veículo e contribuem para o incremento do coeficiente de arrasto aerodinâmico. A presença de uma alta face vertical na parte traseira, como ocorre, inclusive, em alguns veículos civis (por exemplo, ônibus e

**Figura 12:** Campo de velocidades obtido na simulação.

Fonte: Autores (2024).

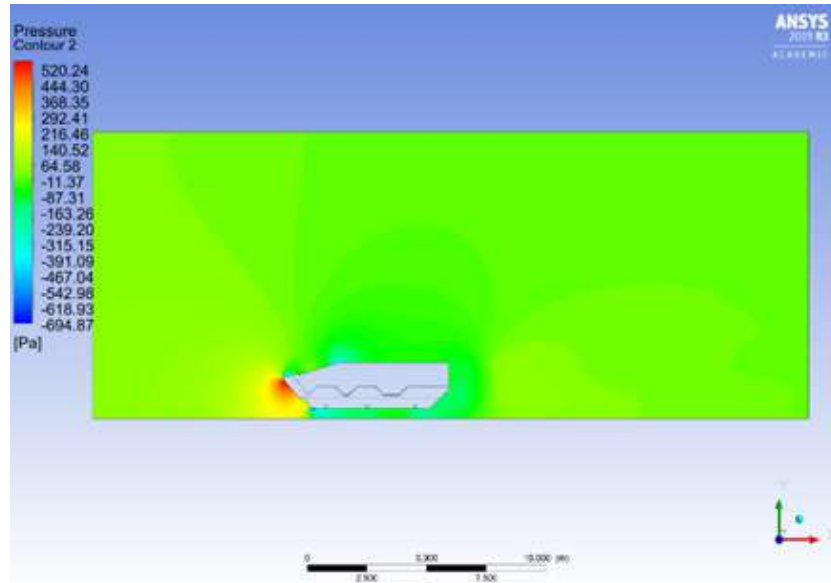
**Figura 13:** Linhas de corrente obtidas na simulação.

Fonte: Autores (2024).

caminhões), gera uma variação abrupta de geometria que pode ocasionar na separação de escoamento de ar e criar a recirculação quando as linhas de corrente alcançam a parte de trás do veículo, como pode-se observar na Figura 13, aumentando o valor de  $C_D$ .

Submetendo o modelo impresso da viatura a diferentes velocidades no túnel de vento e adotando as propriedades do ar presentes na Tabela 2, obteve-se os valores experimentais para o coeficiente de arrasto.

Para contornar eventuais flutuações atinentes ao experimento, ao variar lentamente a velocidade de 0 a  $V_{max}$  (110 km/h), registrou-se os valores da força de arrasto  $F_D$  quando se atingia velocidades em torno de 25%, 50%,

**Figura 14:** Distribuição de pressão obtida na simulação.

Fonte: Autores (2024).

75% e 100%  $V_{max}$ , as quais foram empregadas na simulação computacional. Com base nas variações para os valores de  $F_D$ , calculou-se valores experimentais médios para o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) e seus desvios padrões ( $\sigma$ ) para cada uma das quatro velocidades de referência.

A Tabela 3 mostra os resultados encontrados para o coeficiente de arrasto nos cálculos experimentais e computacionais.

**Tabela 3:** Resultados obtidos para o coeficiente de arrasto.

$V$	Resultados experimentais		Resultados computacionais
	$C_D$	$\sigma$	$C_D$
100% $V_{max}$	0,65	-	0,60
75% $V_{max}$	0,64	0,01	0,61
50% $V_{max}$	0,69	0,04	0,61
25% $V_{max}$	0,69	0,10	0,62

Pela análise da Tabela 3, percebe-se que os valores médios experimentais ficaram ligeiramente superiores aos valores computacionais, com erro relativo máximo de 13,11% (50%  $V_{max}$ ) e mínimo de 4,92% (75%  $V_{max}$ ), tendo como base os resultados obtidos na simulação. Tal incremento nos resultados para  $C_D$  pode ter sido contribuído pela presença do eixo de fixação do modelo obtido por impressão 3D ao túnel, o qual não foi considerado na simulação computacional e que também é atingido pelo escoamento de ar, elevando o valor da força de arrasto calculada.

Além disso, nota-se que os maiores valores de desvio padrão foram encontrados para as menores velocidades. Possivelmente, isso se deve às imprecisões no cálculo da força de arrasto  $F_D$  pela célula de carga, uma vez que os valores de força obtidos para as menores velocidades podem estar próximos à faixa de tolerância dos valores registrados pela célula, gerando maior influência no resultado final. Ademais, o desvio padrão para a velocidade de 100%  $V_{max}$  não foi calculado porque só foi registrada uma velocidade experimental próxima a essa velocidade de referência.

Adicionalmente, não era de se esperar que os valores fossem exatamente os mesmos, pois não há semelhança dinâmica entre os dois casos, uma vez que os números de Reynolds para a simulação e o experimento não são iguais. Porém, é interessante que mesmo para faixas distintas do número de Reynolds, os valores do coeficiente de

arrasto são próximos e podem ser aproximados por valores entre 0,60 e 0,69.

Tendo em vista essas imprecisões, pode-se afirmar que os resultados obtidos no túnel de vento se aproximaram de maneira satisfatória aos encontrados na análise computacional. De acordo com a Tabela 4, os valores de  $C_D$  encontrados para o veículo estudado se assemelham ao listado para algumas vans e ônibus, o que é compreensível devido a semelhanças geométricas como altura, largura, comprimento e variação brusca de geometria na transição para a região traseira. O resultado obtido também pode ser encontrado, segundo a Tabela 4, para carros conversíveis. Nesse caso, o aumento do valor de  $C_D$ , em comparação com os automóveis de passeio, ocorre pela opção de remover o teto do veículo, o que ocasiona no aumento de arrasto aerodinâmico devido à criação de regiões de recirculação no interior da cabine do automóvel.

**Tabela 4:** Valores do coeficiente de arrasto para algumas classes de veículos.

Veículo	$C_D$
Automóvel de passeio	0,30-0,52
Conversível	0,60-0,70
Carro esporte	0,25-0,30
Vans	0,40-0,58
Ônibus	0,50-0,80
Caminhão	0,74-1,00
Motocicleta	1,8

Fonte: [Brunetti 2018, Wong 2008].

#### 4 CONCLUSÃO

A análise computacional da força de arrasto sobre a modelo da VBTP Guarani permitiu atingir resultados consistentes, quando comparados a valores para veículos previstos na literatura, levando em consideração a magnitude da viatura e a faixa de velocidades que a mesma atinge.

Foi possível constatar que para velocidades entre 0 e 110 km/h, apesar do aumento da força de arrasto com o acréscimo da velocidade, o valor do coeficiente de arrasto permanece na faixa de 0,60 a 0,69.

Como forma de ratificar os resultados encontrados, obteve-se a geometria da viatura por manufatura aditiva, ou impressão 3D, alcançando-se resultado satisfatório. A partir da réplica da viatura, foi possível submetê-la aos testes no túnel de vento para atingir resultados experimentais e compará-los com a análise computacional.

Submetendo o modelo aos mesmos valores de velocidade de escoamento utilizados na simulação computacional, o experimento no túnel de vento permitiu obter resultados para o coeficiente de arrasto próximos aos obtidos anteriormente, apresentando alguns desvios, mas dentro do esperado.

Somando os resultados computacionais e experimentais, estudou-se satisfatoriamente o efeito do arrasto sobre a VBTP Guarani, auxiliando a modelagem da resistência aerodinâmica da viatura quando é necessária a aplicação do coeficiente de arrasto.

A metodologia apresentada neste trabalho, conjugando análise computacional e análise experimental com o auxílio de manufatura aditiva, visa encontrar alternativas durante o desenvolvimento de um veículo civil ou militar, tornando-o mais flexível e acessível. Como exemplo de futuras aplicações, têm-se os projetos das versões da própria VBTP Guarani, que consistem em utilizar a mesma plataforma veicular porém com algumas adaptações para atender a determinada finalidade operacional.

**REFERÊNCIAS**

- BARBUT, D.; NEGRUS, E. M. Cfd analysis for road vehicles - case study. University of Bucharest, 2011.
- BRAZIL, P. *Iveco Veículos de Defesa oferece ao Exército Chileno seus veículos blindados Guarani 6x6 e Freccia 8x8*. 2019. Disponível em: <https://www.planobrazil.com/2019/01/03/iveco-veiculos-de-defesa-oferece-ao-exercito-chileno-seus-veiculos-blindados-guarani-6x6-e-freccia-8x8/>. Acesso em: 02 set. 2024.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna - Vol. 1*. São Paulo: BLUCHER, 2018. ISBN 9788521218135.
- CASTEJON, D. V. Métodos de redução do arrasto e seus impactos sobre a estabilidade veicular. *Mestrado em Engenharia Mecânica*, Universidade de São Carlos, 2011.
- DEFESANET. *Programa Estratégico Guarani: Aquisição e Desenvolvimento de Outros Modelos de Viaturas Blindadas*. 2019. Disponível em: <https://www.defesanet.com.br/terrestre/programa-estrategico-guarani-aquisicao-e-desenvolvimento-de-outros-modelos-de-viaturas-blindadas/>. Acesso em: 02 set. 2024.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução a Mecânica dos Flúidos*. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- GABBI, R. Modelagem matemática do escoamento turbulento em canal axissimétrico com "bluff-body". *Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. UNIJUI, RGS*, 2013.
- HUSSEIN, A. A.; RAKHA, H. A. Vehicle platooning impact on drag coefficients and energy/fuel saving implications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 71, n. 2, p. 1199–1208, 2022.
- KAPOTE, R. R. Aerodynamic drag reduction of heavy vehicle using computational fluid dynamics (cfd). *Available at SSRN 4736909*, 2023.
- LUO, Q.; LI, J.; ZHANG, H. Drag coefficient modeling of heterogeneous connected platooning vehicles via bp neural network and pso algorithm. *Neurocomputing*, Elsevier, v. 484, p. 117–127, 2022.
- PAN, D. *et al*. A review on drag reduction technology: Focusing on amphibious vehicles. *Ocean Engineering*, Elsevier, v. 280, p. 114618, 2023.
- PIECHNA, J. A review of active aerodynamic systems for road vehicles. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 23, p. 7887, 2021.
- SUDIN, M. N. *et al*. Review of research on vehicles aerodynamic drag reduction methods. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, v. 14, n. 02, p. 37–47, 2014.
- UDDIN, M. *et al*. Aerodynamics of landing maneuvering of an unmanned aerial vehicle in close proximity to a ground vehicle. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, v. 5, n. 2023-01-0118, p. 2029–2046, 2023.
- WONG, J. *Theory of Ground Vehicles*. Canadá: Wiley, 2008. ISBN 9780470170380.