

ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA POSTERIOR EM VEÍCULOS DE PASSEIO

Pedro Henrique Lopes Micheletto (IC) e Edvaldo Angelo (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

O presente artigo apresenta um estudo a respeito da influência do ângulo do vidro traseiro de veículos em seu respectivo coeficiente de arrasto, utilizando-se para isso modelos numérico-computacionais tridimensionais. Através do software comercial Ansys Workbench®, foi estudado um modelo simplificado de veículo, tendo seu ângulo do vidro traseiro alterado para inúmeras simulações, além disso, também foi utilizado o modelo do corpo de Ahmed para a realização de simulações de apoio e verificação dos dados, para tais simulações foram utilizadas condições de contorno específicas para o escoamento. Os domínios computacionais foram feitos no Design Modeler® e depois exportados para o Ansys Workbench®, onde tiveram sua malha delimitada, as condições de contorno impostas e os resultados analisados. O modelo de turbulência escolhido para os testes numéricos foi o kw. As simulações verificaram a existência de dois tipos de vórtices, assim como descritos na literatura, que se apresentam como grandes causadores do aumento no coeficiente de arrasto, além disso, verificou-se a existência de um ângulo de cerca de 28° a 30° para o vidro traseiro, para o qual o coeficiente de arrasto é máximo, assim como reportado pela literatura, e encontrou valores de coeficiente de arrasto um pouco maiores do que os encontrados para os carros atuais.

Palavras-chave:

Coeficiente de arrasto, Ângulo do vidro traseiro, Vórtices.

ABSTRACT

This article presents a study about the influence of the vehicle's rear window angle on its respective drag coefficient, using three-dimensional numerical-computational models for this. Using the commercial software Ansys Workbench®, a simplified vehicle model was used, having its rear window angle changed for numerous simulations, furthermore, a model of the Ahmed's body was also used to carry out support simulations and verify the data. For such simulations, specific boundary conditions were used for the flow. The computational domains were made in Design Modeler® and then exported to Ansys Workbench®, Where its mesh was delimited, the boundary conditions imposed, and the results analyzed. The turbulency model chosen for the tests was the kw. The simulations verified the existence of two types of

vortices, such as described in the literature, that are described as major causes of the increase in the drag coefficient, furthermore, an angle of about 28° to 30° was found for the rear window, flow which the drag coefficient is maximum, as reported in the literature, and it was found drag coefficients slightly higher than those found for the current cars.

Keywords:

Drag coefficient, Rear window angle, Vortices.

1. INTRODUÇÃO

Problema de Pesquisa

Os veículos de passeio fazem parte da vida moderna e devido ao seu elevado número, são globalmente grandes consumidores de energia. Independente da origem dessa energia, se oriunda da combustão de combustíveis fósseis, biocombustíveis ou de energia elétrica, é indispensável que possuam eficiência energética de modo a diminuir o impacto e a demanda global por energia.

A eficiência energética dos veículos é influenciada por diversos fatores (GILLESPIE, 1992), entre eles, características construtivas mecânicas do veículo, como o tipo e tamanho do motor, sistemas de transmissão, interação dos pneus com o solo, e o formato da carroceria, que é a responsável pela aerodinâmica (KATZ, 2006). Além disso, a aerodinâmica também é influenciadora na estabilidade veicular em velocidades mais elevadas (KATZ, 2006 e CHENG *et al*, 2013). Dessa forma, os estudos aerodinâmicos para veículos de passeio, assim como para os veículos de competição, foram incorporados como uma importante etapa no projeto dessas máquinas.

A aerodinâmica é uma subárea da Mecânica dos Fluidos ou Fluidodinâmica que estuda os escoamentos de ar, complementada pela Hidrodinâmica (líquidos) e a Dinâmica dos gases (para os outros gases de modo geral) (ANDERSON, 2011). O objetivo principal dos estudos de fluidodinâmica é a determinação da complexa interação entre o escoamento de ar e corpos rombudos (como uma esfera ou a carroceria de um veículo) ou afilados (como as asas ou hidrofólios), predizendo forças e a transferência de calor entre ambos.

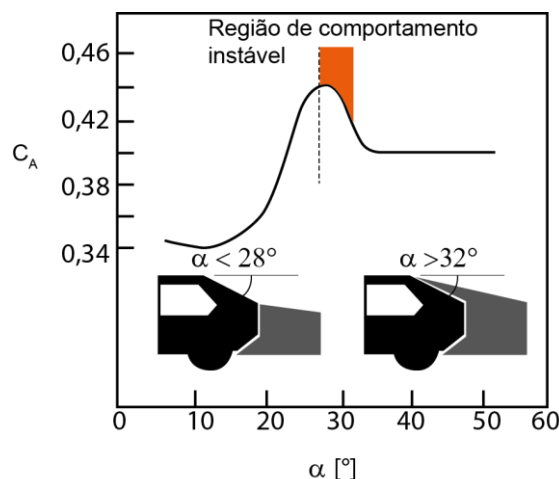
Os estudos aerodinâmicos para veículos são estudos de escoamentos externos, ou seja, aqueles que ocorrem ao redor de sólidos, diferentemente daqueles denominados internos, confinados ou limitados por dutos ou válvulas (ANGELO *et al.*, 2012). Nestas situações a interação entre o escoamento e o sólido, para qualquer movimento relativo entre ambos, causa efeitos cujo entendimento é indispensável para inúmeras aplicações de engenharia (WHITE, 2018).

O movimento relativo entre o fluido e um corpo é responsável pela ocorrência de tensões de cisalhamento e pressões na interface (POTTER, 2018 e ÇENGEL, 2015) que resultam em esforços globais sobre o sólido. Várias geometrias consideradas comuns como: placas planas, cilindros e esferas têm comportamento aerodinâmico bem conhecido e reportado na literatura técnica científica (FOX E MCDONALD, 2013). Contudo, geometrias mais complexas do que as citadas (carros, asas, aeronaves completas, entre outros) exigem estudos adicionais para a completa determinação do comportamento fluidodinâmico.

O desenho da parte frontal é um grande influenciador do comportamento aerodinâmico, contudo, sua parte posterior, segundo Hucho e Sovran (1993) é causadora dos principais efeitos aerodinâmicos que influenciam na força de resistência ao escoamento na direção de movimentação, denominada arrasto (MOREL, 1978). A figura 1 é uma reprodução daquela apresentada em Hucho e Sovran (1993) e indica o comportamento matemático de um adimensional chamado de coeficiente de arrasto (ÇENGEL, 2015) versus ângulo do vidro traseiro medido em relação ao solo horizontal. O coeficiente de arrasto é um adimensional diretamente proporcional à força de arrasto. O principal efeito do ângulo (α) se dá na formação de vórtices nas extremidades da carroceria, induzindo um escoamento altamente tridimensional nessas regiões. O ângulo (α) também influencia no tamanho da região de descolamento da camada limite, produzindo regiões de maior ou menor descolamento na parte posterior do veículo, impactando no calibre da esteira formada pelo corpo rombudo.

Os vórtices formados nas extremidades da carroceria produzem um efeito de indução de força de arrasto porque proporcionam a existência de uma componente de velocidade vertical descendente responsável pelo aumento do gradiente de velocidade entre a carroceria e o ar adjacente. Por outro lado, a turbulência gerada por tais vórtices também é suficiente para ajudar em determinados ângulos (α) no retardamento ou impedimento de descolamento da camada limite nas regiões centrais do vidro do carro, promovendo uma recuperação de pressão nesta região e em função do ângulo do vidro, uma ajuda na diminuição da força de arrasto. Essa complexa interação pode ser percebida pela não linearidade do gráfico de coeficiente de arrasto versus ângulo (α). A região indicada na figura 1 como região de comportamento aerodinâmico instável se configura como uma região em que há variações significativas e inconsistentes na faixa de valor do coeficiente de arrasto para esses ângulos (α) em particular, se traduzindo em flutuações e instabilidades no valor da força de arrasto.

Figura 1. Comportamento do coeficiente de arrasto versus ângulo do vidro traseiro com a horizontal (



Fonte: adaptado de Hucho e Sovran (1993).

A classificação dos veículos quanto ao formato da parte posterior da carroceria não é absoluta ou geral e algumas referências indicam nomes distintos para mesmos tipos de carroceria. Segundo pesquisas deste autor, a classificação em língua inglesa mais utilizada nos textos a que teve acesso, indica uma relação direta da nomenclatura com o ângulo (α) indicado na figura 1. Segundo Sivaraj, Parammasivam e Suganya (2018) são quatro designações, todas indicadas em língua inglesa como: [I] *fastback*: $\alpha < 22^\circ$, [II] *hatchback*: $22^\circ < \alpha < 50^\circ$, [III] *squareback*: $50^\circ < \alpha < 90^\circ$ e [IV] *notchback* or *sedan* (a única designação de carroceria com nomenclatura correspondente em língua portuguesa, indicada como sedã): um veículo que possui um patamar adjacente, na região do porta-malas, ou seja, um patamar mais ou menos horizontal como continuação do vidro traseiro. É importante mencionar que alguns *notchbacks*, assim como os sedans, podem apresentar um pequeno patamar horizontal adjacente ao vidro traseiro, neste caso, a diferenciação se dá pelo tamanho desse patamar, muito menor nos *notchbacks* do que nos sedãs.

Os estudos dos escoamentos podem ser realizados por três abordagens distintas (TU; YEOH; LIU, 2008): (a) analítica, (b) experimental e (c) numérica. Conforme indicado na literatura (ANDERSON, 1995), modelos para soluções analíticas são restritivos, pois dependem da adoção de uma série de hipóteses simplificadoras que geralmente distanciam os resultados do modelo teórico do comportamento físico real. Estudos aerodinâmicos que contem com testes controlados em laboratório são indispensáveis (HIRSCH, 2007), contudo, a construção dos modelos experimentais físicos e o emprego de técnicas avançadas de medição como a denominada na literatura inglesa com *Particle Image Velocimetry* (PIV) dependem de caros equipamentos e mão de obra especializada para operação, além de instrumentação bem escolhida, montada e calibrada. Além disso, muitas vezes, os projetistas pretendem testar várias condições de escoamento diferentes, o que exige múltiplos testes, multiplicando o número de horas de utilização das bancadas experimentais como as indicadas, elevando o custo de desenvolvimento. Ressalva seja feita que investigações aprofundadas geralmente são conduzidas com estudos analíticos, numéricos e experimentais em associação. Buscando exploração das melhores características de cada uma dessas abordagens em um estudo abrangente. Nesta condição, são realizados cálculos analíticos preliminares, com o posterior desenvolvimento de diversas alternativas geométricas e simulações dessas alternativas e escolha de apenas algumas dessas alternativas para realização de testes em laboratório.

A proposta deste trabalho é a utilização da abordagem numérica para o estudo aerodinâmico de configurações na traseira de um veículo de porte médio. Segundo a literatura especializada a abordagem pretendida apresenta diversas vantagens (TU; YEOH; LIU, 2008), que podem ser resumidamente e genericamente indicadas: Oportunidade de solução de

modelos matemáticos mais complexos, através da solução de equações diferenciais parciais com múltiplos termos, incluindo problemas tridimensionais em regime transitório e elaborados modelos de turbulência (para os casos em que há escoamento turbulento); a diminuição do tempo total de desenvolvimento do estudo porque permite (desde que haja recursos computacionais disponíveis) a simulação de diversas condições experimentais, de modo simultâneo e, a possibilidade de simulação de situações de difícil ou impossível reprodução em laboratório.

Objetivos

Objetivo geral. Investigar numericamente a influência da geometria posterior dos veículos de passeio na aerodinâmica. Para tanto, determinar para a geometria base escolhida e suas variantes a força de arrasto e comparar os resultados com os disponíveis na literatura.

Objetivo específico. Realizar simulações computacionais na condição de escoamento permanente, incompressível, externo, viscoso e tridimensional ao redor de uma geometria de veículo de passeio base, em velocidade única, comparando o resultado ao reportado na literatura técnico científica (HUCHO E SOVRAN, 1993). Modificar a geometria base para descobrir o comportamento aerodinâmico de formatos com alterações. Comparar os resultados da literatura obtidos para laterais perfeitamente verticais a geometrias com chanfros na lateral, simulando condições mais próximas dos desenhos de veículos atuais. Verificar a nucleação de vórtices sobre a carroceria.

Justificativa

Segundo Sivaraj, Parammasivam e Suganya (2018) a força de arrasto em um veículo de passeio com porte médio, se deslocando com velocidade de 100 km/h é responsável por oitenta por cento da força de resistência total ao deslocamento deste veículo. Nestas condições, especialmente encontradas em rodovias, qualquer diminuição no módulo da força de arrasto terá impacto no consumo de combustível. Vale lembrar que é uma condição de velocidade relativa entre o veículo e o ar. Mesmo um veículo em velocidade constante de 80 km/h em uma rodovia com vento de 20 km/h em sentido oposto ao movimento, experimenta uma velocidade relativa de 100 km/h em relação ao ar em escoamento.

Deste modo, estudos para análise de geometrias que possam diminuir a força de arrasto em veículos, têm potencial de encontrar desenhos e projetos mais favoráveis, contribuindo para a economia de energia. Adicionalmente, tais geometrias podem favorecer condições de operações mais seguras por permitirem ativamente, caso estejam planejadas para tal, na estabilidade veicular. Ainda que a literatura técnico-científica tenha reportados resultados para corpos genéricos, que se aproximam do formato geral de carrocerias de veículos, investigações adicionais desses comportamentos aerodinâmicos são necessárias

para comparação e ampliação dos estudos. O que se torna especialmente desejável e útil para condições geométricas distintas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Escoamento externo ao redor de corpos rombudos

A força de arrasto em um escoamento externo é a componente da força hidrodinâmica ou aerodinâmica exercida pelo escoamento no sólido na direção do escoamento (WHITE, 2018). Um adimensional que relaciona a força de arrasto (F_A) às condições de escoamento como a densidade do fluido em escoamento (ρ), a velocidade da corrente não perturbada (V_∞) e uma área de referência (A) é denominado coeficiente de arrasto (C_A) e é definido conforme a equação (1).

$$C_A = \frac{F_A}{\frac{1}{2} \rho \cdot V_\infty \cdot A} \quad (1)$$

Para escoamentos de corpos rombudos, como os veículos, a área de referência é a área projetada do corpo em um plano vertical exatamente perpendicular à direção da velocidade do escoamento ao longe.

Modelo matemático simplificado e método numérico

A simulação computacional compreende na resolução das equações de conservação para o domínio computacional. As equações (3), (4), (5) e (6) são, respectivamente, as equações de conservação de massa, conservação da quantidade de movimento na direção x , da conservação da quantidade de movimento na direção y e da conservação da quantidade de movimento na direção z (ANDERSON, 1995). As equações apresentadas resolvem escoamentos permanentes, tridimensionais (para coordenadas cartesianas) de fluidos incompressíveis em escoamento viscoso, sem efeito de forças de campo ou trocas térmicas. E, de acordo com o que já foi indicado, não têm solução analítica conhecida, exigindo solução numérica.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (6)$$

Nas equações de conservação no formato diferencial, a velocidade é escrita como combinação das componentes cartesianas ($\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$), a letra grega τ identifica as tensões normais e de cisalhamento, ρ a densidade do fluido e p a pressão. O modelamento matemático das tensões depende de equacionamento adicional (e adicionalmente um modelo de turbulência), que pode ser encontrado na literatura (ANSYS, 2012) e sua indicação neste projeto estenderia demasiadamente este trecho do texto. O método de solução do sistema de equações é o Método dos Volumes Finitos (MALISKA, 2012), realizado através de uma estratégia iterativa, pela minimização de resíduos.

O método numérico iterativo para solução do sistema de equações (de 3 a 6) é empregado sobre um domínio computacional discretizado, ou seja, as equações de conservação que são de natureza contínua, são resolvidas para regiões determinadas, que são pequenas divisões do escoamento completo, ou seja, a malha. O número de divisões para um dado domínio computacional, ou seja, o número de elementos na malha é obtido por processo iterativo de aumento sucessivo do número de elementos até a invariância dos resultados dentro de uma margem pré-estabelecida (STERN et al., 2001 e WILSON et al., 2001). Esse procedimento de refinamento sucessivo deve ser realizado para cada domínio computacional.

A imposição das condições de contorno sobre alguns elementos da malha deve levar em conta, para o caso estudado (escoamento tridimensional, incompressível e permanente), o comportamento elíptico do conjunto de equações diferenciais parciais (HIRSCH, 2007).

3. METODOLOGIA

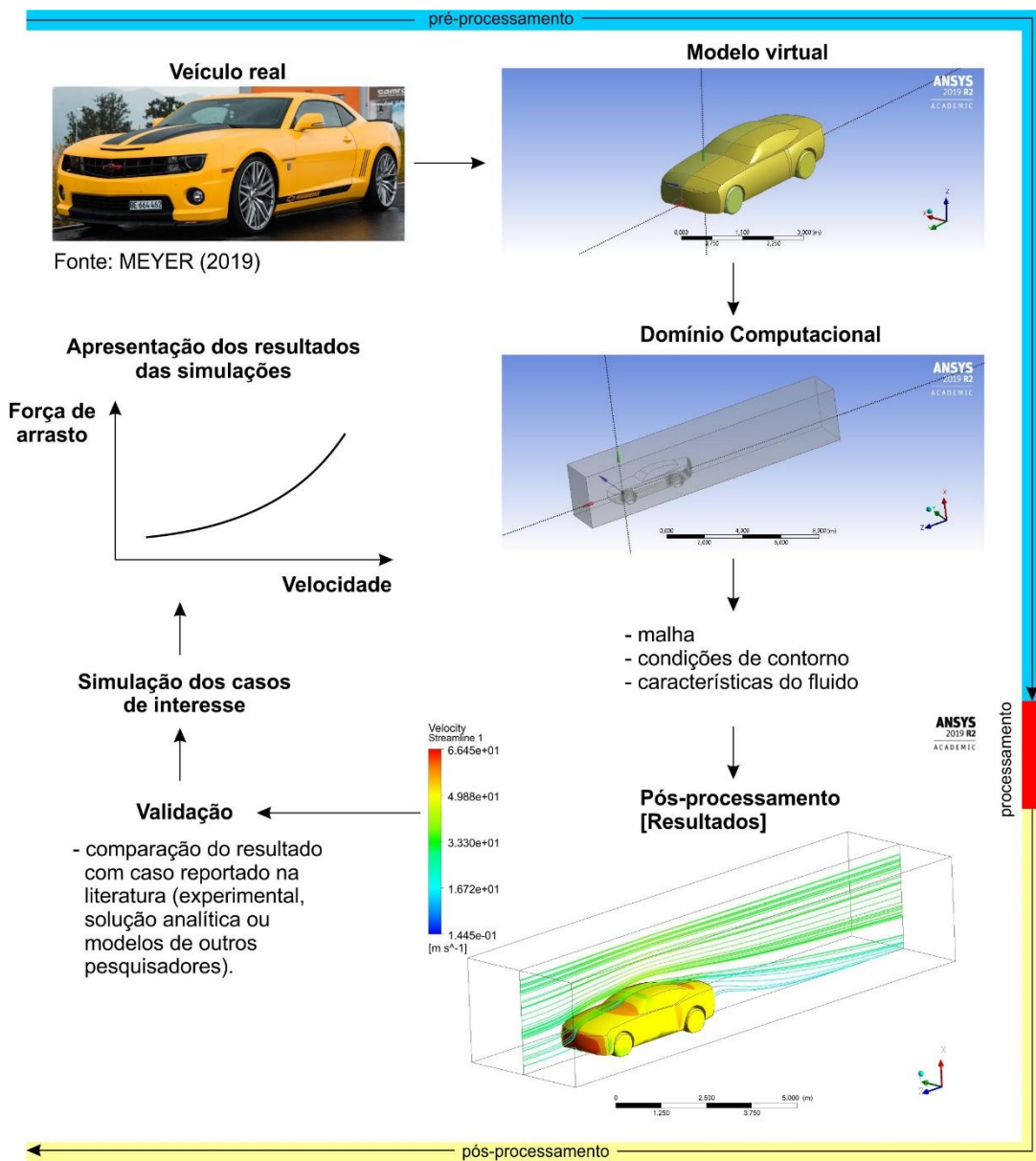
A metodologia empregada foi a análise numérica do escoamento ao redor do veículo em estudo e solução de um modelo matemático tridimensional. O modelo matemático desenvolvido resolve as equações de conservação de massa e quantidade de movimento (ANDERSON, 1995), para um sistema de coordenadas cartesiano e tridimensional. As técnicas de CFD empregadas foram implementadas através da utilização de um software de CFD comercial denominado ANSYS CFX®, que utiliza o Método dos Volumes Finitos (MALISKA, 2012) para solução das equações de conservação. Para cada domínio computacional, várias malhas foram construídas e testadas.

A construção das malhas obedeceu aos padrões bem estabelecidos encontrados na literatura técnico-científica (STERN et al., 2001 e WILSON et al., 2001). O modelo matemático

proposto tem como características: (a) Domínio computacional tridimensional; (b) Escoamento de um fluido em temperatura constante (em escoamento incompressível) – Escoamento isotérmico de ar; (c) Escoamento em regime permanente – sem variação de qualquer propriedade ou grandeza, localmente, ao longo do tempo; (d) Escoamento em regime turbulento – quando as forças de inércia têm supremacia sobre as forças viscosas. O modelo de turbulência utilizado para tratamento das flutuações de velocidade foi o modelo clássico $k - \omega$ (WILCOX, 2006);

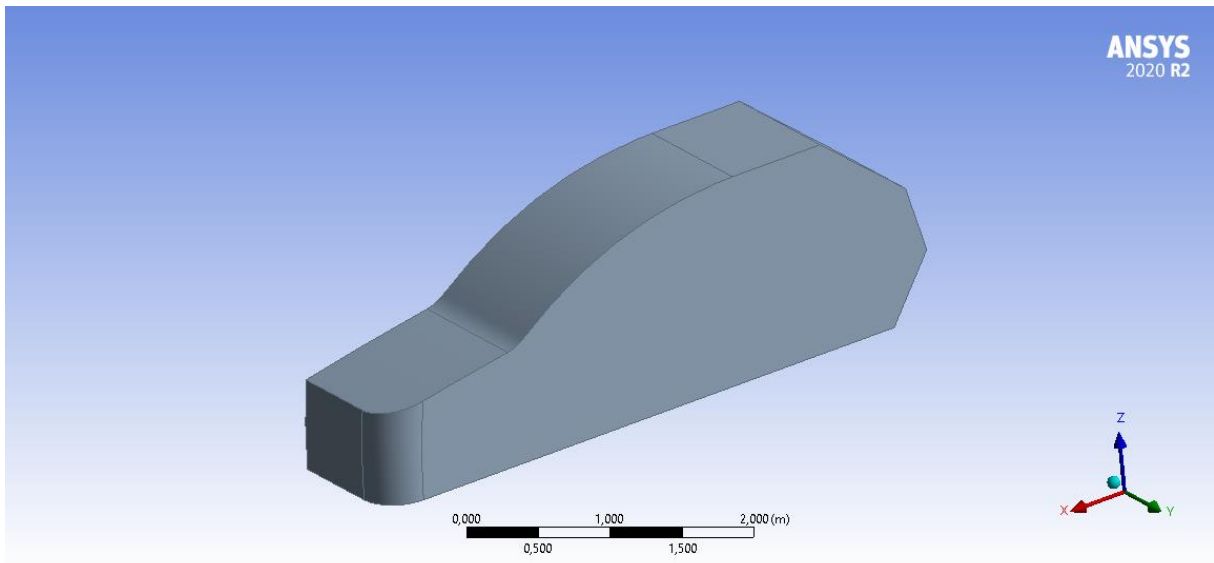
A sequência de solução obedece a seguinte ordem (indicada esquematicamente na figura 2, para um modelo de veículo genérico, que posteriormente foi adaptado para a geometria base de interesse, indicada na figura 3): **(a) pré-processamento**: escolha de um veículo e construção de um modelo virtual tridimensional com a devida simplificação de elementos geométricos não fundamentais. Construção do domínio computacional tridimensional (as etapas indicadas foram cumpridas usando um módulo do software ANSYS CFX® designado DESIGN-MODELER®), discretização do modelo computacional (através de um módulo especializado do ANSYS CFX® com capacidades de construção de diversos tipos de malhas e também dotado de controles específicos para refinamento em regiões particulares, conforme necessidade – módulo denominado CFX-MESHING®, imposição das condições de contorno e das propriedades do fluido, escolha do modelo de turbulência (utilização de um plano vertical de simetria para diminuição das demandas computacionais, obtendo assim diminuição do número de elementos), imposição dos valores para os resíduos do processo iterativo de solução das equações de conservação e o modelo de turbulência; **(b) processamento**: resolução numérica das equações de conservação e dos modelos adicionais escolhidos (emprego do módulo CFX-SOLVER®). Nesta etapa a solução numérica iterativa é acompanhada em tempo real pelo monitoramento dos resíduos e, **(c) pós-processamento**: tratamento dos resultados com a visualização e análise das simulações numérico-computacionais (emprego do módulo CFX-POST®), comparação com resultados indicados na literatura. Preparação das simulações (casos de interesse) e comparação final dos resultados.

Figura 2. Principais etapas da simulação da aerodinâmica de um veículo de passeio em condições de regime permanente e escoamento incompressível.



Fonte: o autor.

Alguns trabalhos publicados na literatura (ANGELO *et al*, 2015) tiveram como objetivo o estudo da influência da caixa de rodas e do conjunto roda pneu na aerodinâmica do veículo. No estudo proposto, infere-se que a influência desses elementos não seja fundamental e, por esse motivo, tais elementos serão suprimidos no modelo, conforme pode ser observado na figura 3, que apresenta uma representação esquemática do veículo base a ser simulado.

Figura 3. Modelo base para simulações.

Fonte: o autor.

Etapas de desenvolvimento do estudo

As etapas de execução do estudo foram:

- I. Atualização bibliográfica.
A atualização bibliográfica é um procedimento perene durante o desenvolvimento dos estudos, vislumbrando obter trabalhos com as mais recentes análises e conclusões sobre o problema de pesquisa;
- II. Estudo do sistema de equações diferenciais parciais que compõem o modelo (ANDERSON, 1995) e do Método dos Volumes Finitos (MALISKA, 2012). Estudo da técnica utilizada na dinâmica dos fluidos computacional para resolução de escoamentos (ANDERSON, 1995 e ÇENGEL, 2015). Aprendizado do ferramental computacional disponível para desenvolvimento do estudo (ANSYS, 2011 e ANSYS, 2012). O pacote ANSYS CFX® conta com diversos módulos (DESIGN MODELER®, CFX-PRE®, CFX-SOLVER®, CFX-POST®). O aprendizado de cada um é indispensável ao desenvolvimento da Iniciação Científica. Os estudos foram dirigidos por tutoriais disponíveis na documentação oficial do software, além de casos exemplo que o orientador possui em documentação adicional pessoal ainda não publicada, e que foi disponibilizada para estudo e preparação no âmbito do desenvolvimento da IC (a plataforma de organização do projeto foi o ANSYS WORKBENCH®)

- III. Análise da geometria e das condições de contorno para implementação no modelo matemático a ser desenvolvido no pacote ANSYS CFX®. Escolha de todas as condições de interesse de escoamento para simulação;
- IV. Construção dos modelos computacionais tridimensionais (baseados no modelo indicado na figura 3) no software DESIGN-MODELER® do pacote ANSYS CFX®, simulação das condições experimentais adotadas para comparação (escolhidas na etapa IV);
- V. Estudo de uma malha com densidade adequada de elementos para aplicação nos modelos (no software CFX-MESHING®);
- VI. Simulação computacional (no software CFX-SOLVER®) dos casos propostos para as condições de escoamento e investigação da alteração das dimensões do veículo base;
- VII. Análise dos resultados através de comparação dos resultados dos modelos matemáticos (no software CFX-POST®).

Estrutura da simulação

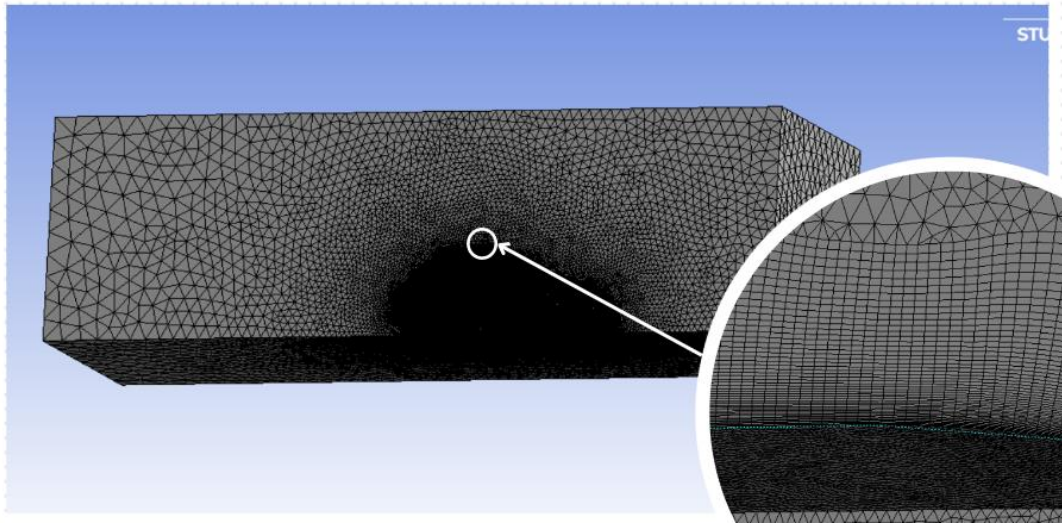
I. Geometria

É importante ressaltar que por ser um escoamento externo, a construção do corpo deve ser feita de forma que crie o contorno da superfície. Assim, como já citado, o corpo escolhido foi um veículo, cujos componentes geométricos não essenciais foram eliminados, o veículo tem um ângulo da janela traseira variável, mas com valor inicial de 40°. A região delimitada externa ao veículo representa o domínio computacional que foi estudado. Uma vez que existe simetria no corpo, apenas metade foi representado.

II. Malha

A princípio, foi utilizada uma malha não estruturada, feita de maneira automática pelo CFX-MESHING®, depois foi utilizado o método *face sizing* para a parte da superfície do veículo, delimitando o tamanho do comprimento dos lados dos elementos nessa região a 30mm, além disso, o método *inflation* também foi utilizado para a o domínio computacional em contato com a superfície do veículo, para tal método foram utilizadas inicialmente 5 camadas, ou seja o método criou 5 camadas de elementos paralelos à superfície do veículo, nas quais a malha tem uma melhor discretização, ambos os métodos podem ser identificados na figura 4.

Figura 4. Captura de tela da ferramenta CFX-MESHING® de malha com *face sizing* e *inflation*.



Fonte: autor.

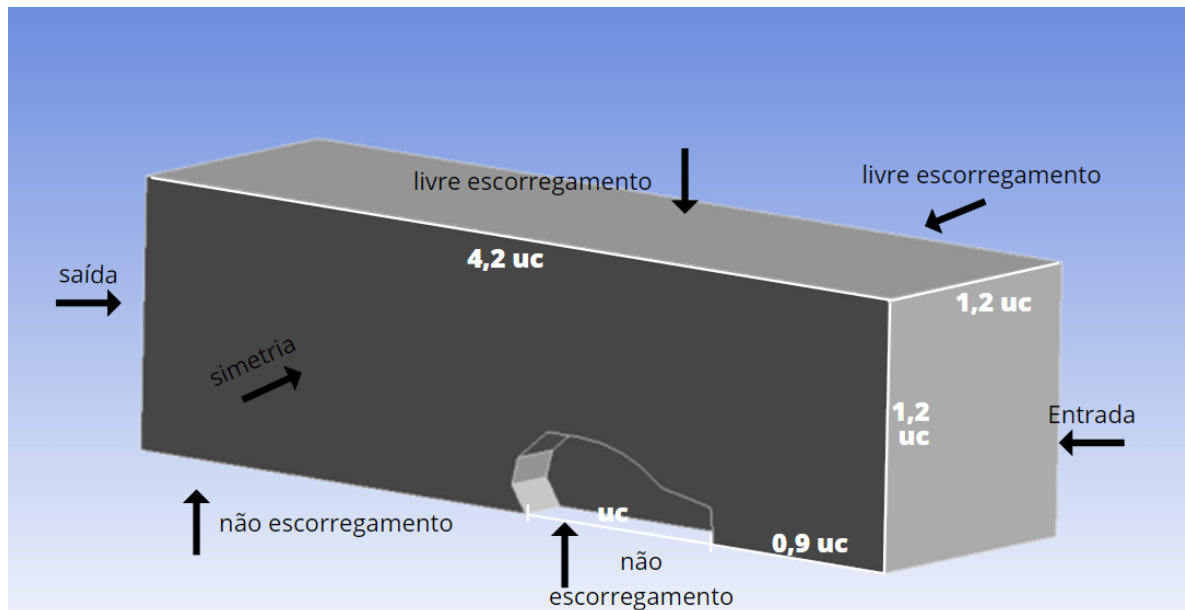
Logo em seguida os dados do tamanho do elemento para o *face sizing* e o número de camadas de *inflation* foram parametrizados como parâmetros de entrada, e a força de arrasto e o coeficiente de arrasto foram considerados como parâmetros de saída, a partir disso, o valor do *inflation* foi alterado para 50 camadas e o tamanho do elemento do *face sizing* foi reduzido até que a força de arrasto e o coeficiente de arrasto convergissem para valores fixos.

Desta forma foi utilizado como malha final, uma com um *inflation* de 50 camadas sobre a superfície do carro, e um *face sizing* de 30 mm, tendo este *face sizing* um *growth rate* de 1,05, valor este que representa a taxa de crescimento do tamanho do elemento à medida que ele se distancia da superfície do veículo; todos estes métodos sendo aplicados, a malha gerada no final tinha aproximadamente 2 milhões de elementos.

III. Condições de contorno

A figura 5 indica as regiões e as condições de contorno no domínio computacional tridimensional.

Figura 5. Representação do domínio computacional a ser estudado com as indicações de cada superfície.



Fonte: o autor.

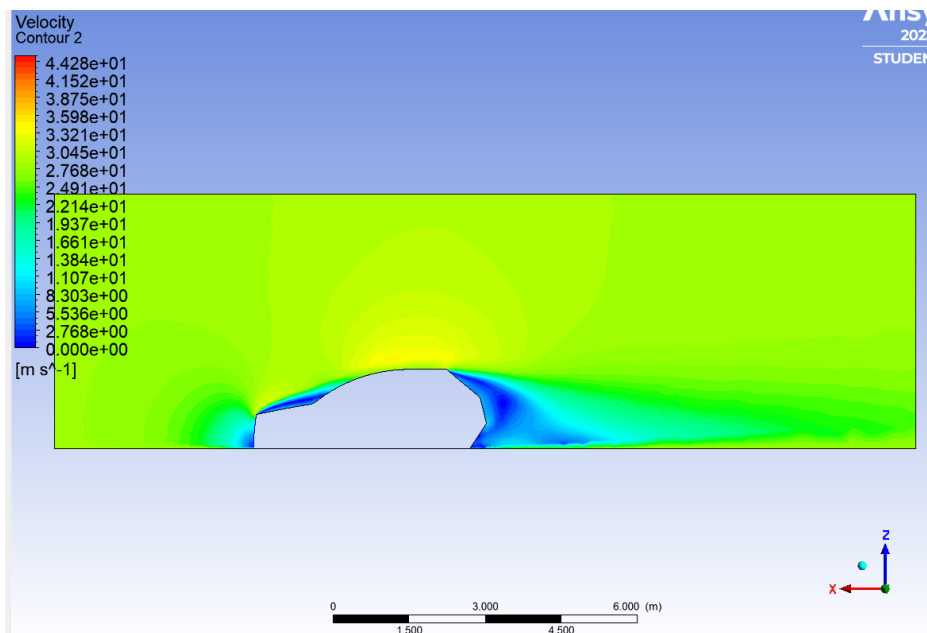
É importante lembrar que o fluido utilizado nessa simulação foi o ar a 25°C a uma velocidade de 100 km/h; sendo este um escoamento com 5% de turbulência em regime permanente, tendo sido utilizado k- ω (ANSYS, 2012) como modelo de turbulência. Além disso, a região do solo, além de ser uma região de não escorregamento, também se encontra a 100 km/h (na direção do escoamento), uma vez que a velocidade relativa (ao longo) do solo em relação ao fluido é nula.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foi realizada uma simulação com o ângulo do vidro traseiro a 40° e depois tal valor, sendo parametrizado foi alterado gerando mudanças tanto na força de arrasto quanto no coeficiente de arrasto, as seguintes análises foram feitas para o caso em que o ângulo traseiro é de 40°, sendo esta, a simulação considerada como padrão e tomada para verificação da coerência dos dados obtidos.

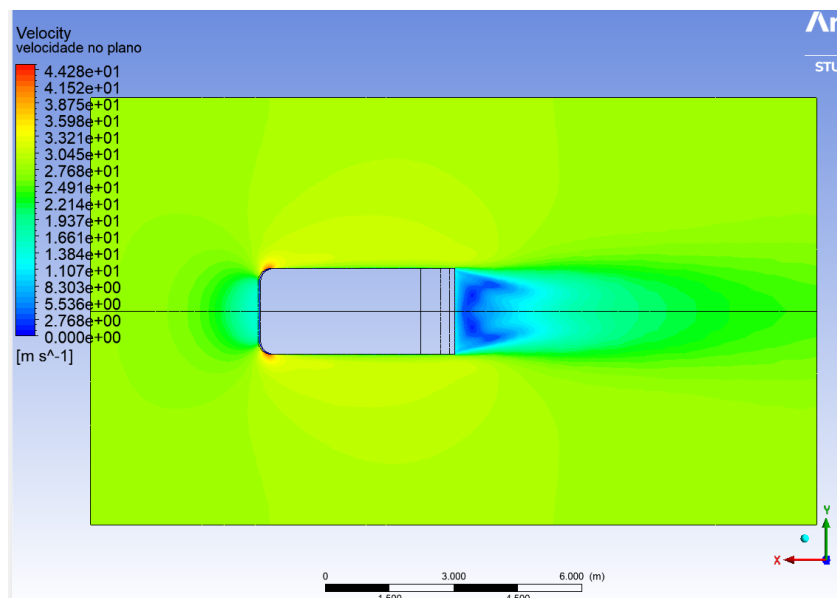
O resultado da simulação é coerente como indicam as figuras 6, 7 uma vez que a velocidade do fluido nas circunvizinhanças do corpo, na dianteira do veículo é menor, e em sua traseira também, o que ocorre devido a formação de vórtice na região traseira e descolamento da camada limite tanto na traseira quanto na dianteira; além disso há um aumento da velocidade do fluido na região superior ao veículo e em suas laterais.

Figura 6. Exemplo de resultado gráfico da simulação com ângulo do vidro traseiro de 40° e tendo a velocidade como grandeza de indicação no mapa de cores realizado no plano de simetria do veículo.



Fonte: o autor.

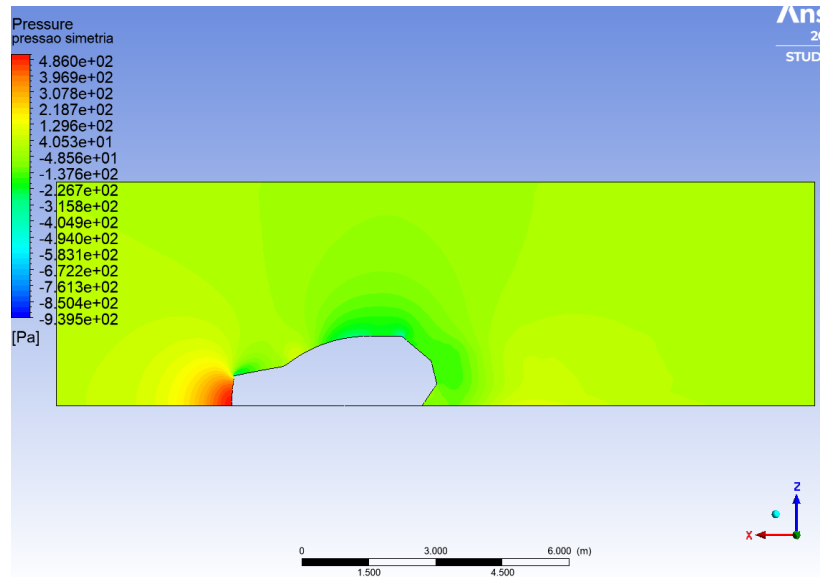
Figura 7. Exemplo de resultado gráfico da simulação com ângulo do vidro traseiro de 40° e tendo a velocidade como grandeza de indicação no mapa de cores, e apresentando-se uma vista superior, sendo a velocidade medida em um plano há 0,5 m do solo.



Fonte: o autor.

Observa-se também através da figura 8, que a pressão se apresenta de modo inversamente proporcional a velocidade, sendo maior onde a velocidade é menor, comportamento este já esperado.

Figura 8. Exemplo de resultado gráfico da simulação com ângulo do vidro traseiro de 40° e tendo a pressão como grandeza de indicação no mapa de cores realizado no plano de simetria do veículo.



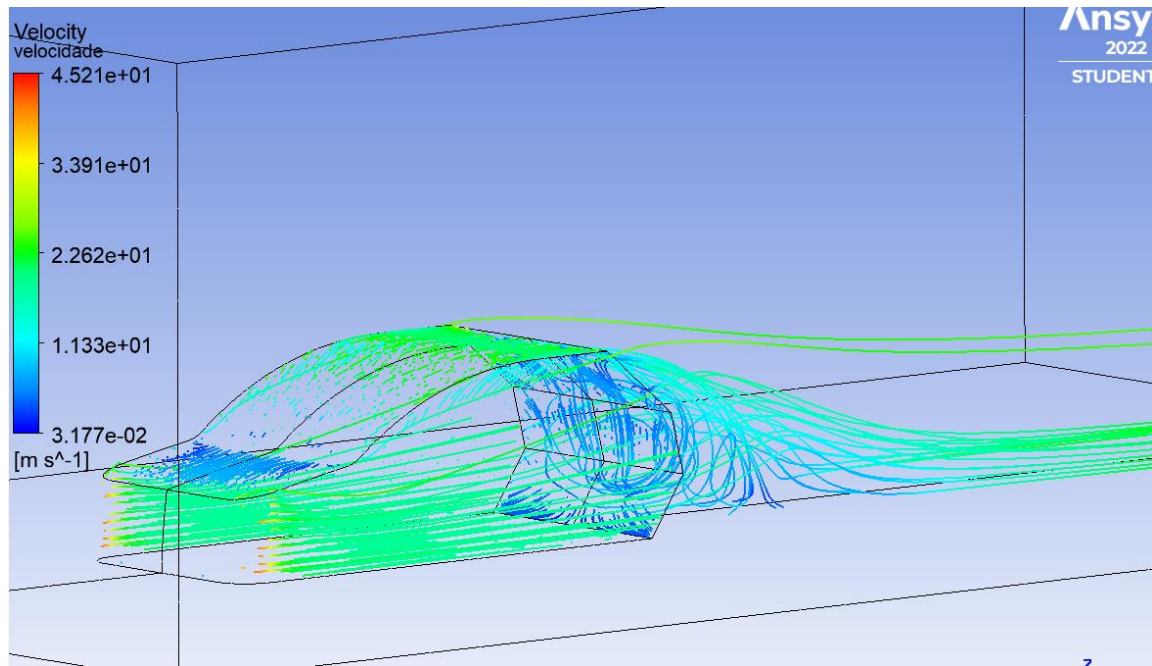
Fonte: o autor.

Na parte traseira ao veículo, chamada de região da esteira, a pressão e a velocidade do escoamento são baixas (veja figuras 7 e 8), indicando regiões de recirculação e conversão indesejável de parcelas de energia mecânica em calor.

Além disso, outra coisa que merece destaque é a formação de vórtices na região traseira do veículo, alguns deles se formam pela zona de baixa pressão nessa região, e pelo descolamento da camada limite, no entanto há também a formação de vórtices de fuga ou de reboque, que são gerados por vórtices de pressão em bordas oblíquas em relação ao fluxo local (HUCHO E SOVRAN, 1993), algo que acontece nas quinas traseiras do veículo. Ambos os tipos de vórtices causam um aumento na força de arrasto, e ambos são apresentados na figura 9.

A diferença de pressão entre a parte frontal e traseira do veículo, sendo muito superior na parte frontal e relativamente pequena na parte traseira prejudicam a aerodinâmica porque causam aumento indesejável na força de arrasto.

Figura 9. Exemplo de resultado gráfico da simulação com ângulo do vidro traseiro de 40° e tendo velocidade como grandeza de indicação nas linhas de fluxo.

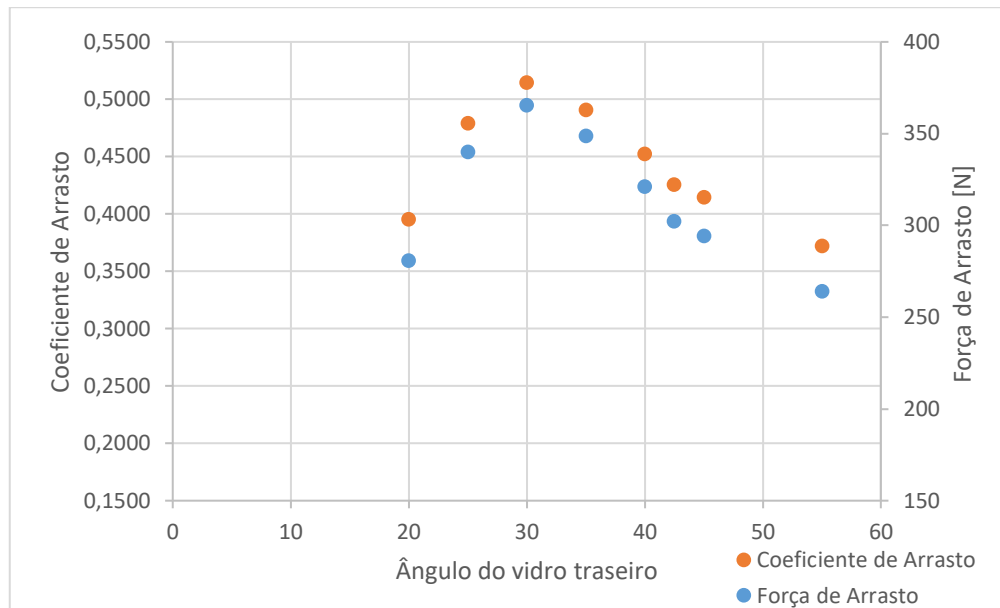


Fonte: o autor

As simulações foram realizadas de modo que, a cada nova simulação o ângulo do vidro traseiro era reduzido em 5°, partindo de um ângulo inicial de 40°; e depois, partindo novamente de 40°, foi aumentado em 5° a cada simulação, dessa forma foram cobertos valores de ângulos, desde 20° até 55°, sendo que a malha utilizada para essas simulações é justamente a obtida através do processo de simulações com *face sizing* e *inflation* que variavam, processo este já mencionado; os dados obtidos para força de arrasto e coeficiente de arrasto para essas simulações se encontram na figura 10.

A partir da figura 10 observa-se também que o coeficiente de arrasto variou de cerca de 0,372 a 0,514; valores estes que se aproximam de carros produzidos em 1975, que tinham um coeficiente de arrasto de 0,46 (HUCHO E SOVRAN, 1993); mas que representam valores muito altos para os carros atualmente, que tem um coeficiente de arrasto de aproximadamente 0,3.

Figura 10. Gráfico que relaciona a Força de Arrasto sobre metade do veículo, com o ângulo do vidro traseiro, em graus; eixo vertical direito indica o coeficiente de arrasto.



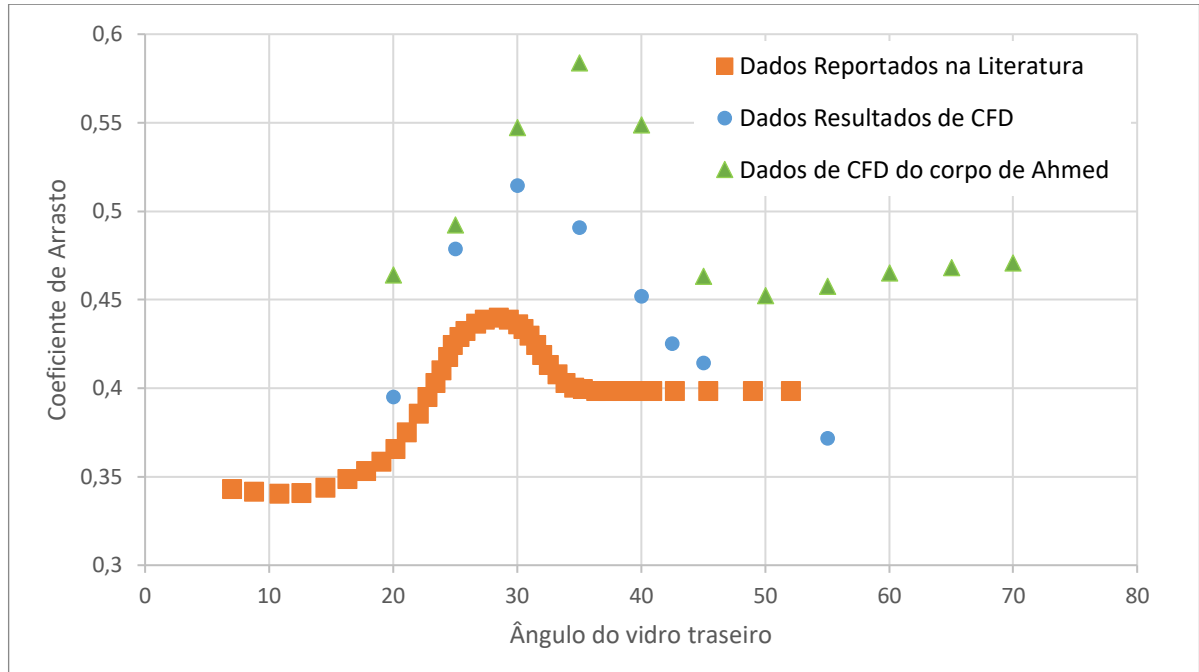
Fonte: o autor.

Todas as simulações utilizaram como critério de convergência resíduos médios quadráticos inferiores a 0,00001. Foi observado, de modo condizente com a bibliografia, a existência de um ângulo para o qual o coeficiente de arrasto e a força de arrasto são máximos e o fato de que este ângulo se encontra entre 28° e 30° estando de acordo com a bibliografia utilizada. (HUCHO E SOVRAN, 1993).

Uma simulação adicional foi utilizada como meio de estudo para um melhor aprofundamento do caso, para isso foram realizadas simulações semelhantes às feitas ao veículo modelo, mas se utilizando dessa vez de um corpo de Ahmed, para o qual teve como base o modelo exposto em Ferrari (2019) que se trata de uma geometria de modelo automobilístico simplificada, foram utilizadas para essa simulação as mesmas condições de contorno da simulação principal. Quanto à geometria uma grande diferença é o tamanho do *farfield*, que foi redimensionado para o tamanho do modelo. Quanto a malha suas principais características são um *inflation* de 10 camadas com *growth rate* de 1,07, e um *face sizing* de 15mm na superfície do modelo.

Os resultados dessa simulação se apresentaram muito semelhantes aos da simulação principal, sendo que o ângulo com coeficiente de arrasto máximo por volta de 35°, e coeficientes de arrasto que variam de 0,453 a 0,584. A figura 11 a seguir apresenta os dados de coeficiente de arrasto para os 3 casos; os da literatura, os da simulação principal, e os obtidos através do corpo de Ahmed.

Figura 11. Gráfico que relaciona Coeficiente de arrasto, com o ângulo do vidro traseiro, em graus; conforme a literatura, conforme obtido na simulação principal e com os dados do corpo de Ahmed.



Fonte: o autor.

A partir desse gráfico observa-se que apesar do erro no valor absoluto do coeficiente de arrasto, mesmo assim as curvas apresentam características como forma e ângulo de coeficiente máximo muito semelhantes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram realizadas simulações numérico computacionais, para escoamento externo, tridimensional, com ar a 100 km/h ao redor de um veículo, no qual o ângulo do vidro traseiro era alterado em cada simulação. Para isso o emprego de técnicas como o *face sizing* e o *inflation* foram fundamentais para um maior discretização perto da superfície do veículo.

Verificou-se assim a formação de vórtices de fuga na região traseira do automóvel, que são responsáveis por parte da força de arrasto gerada; além disso verificou-se a existência de um ângulo do vidro traseiro para o qual o coeficiente de arrasto é máximo, ambas constatações condizem com a literatura, além disso, o ângulo do vidro traseiro para o qual o coeficiente de arrasto é máximo reportado pela literatura se aproxima em muito do ângulo encontrado através das simulações; com exceção as simulações realizadas para o Corpo de Ahmed, para as quais o erro obtido foi um pouco maior.

Ademais, constatou-se que o coeficiente de arrasto encontrado através das simulações se apresentou maior do que o previsto, sendo que para as simulações, os valores rondavam entre 0,453 e 0,584, enquanto para a literatura esse valor é cerca de 0,3 para

automóveis recentes. Uma vez que o erro encontrado nos dados se apresenta de modo sistemático, ou seja, não há um problema de precisão, que seria verificado caso houvesse alguma deficiência na discretização da malha, mas sim, o problema está na exatidão dos dados, podemos inferir que este erro provém de uma característica inerente a todas as simulações realizadas.

Isso, em parte se deve à geometria utilizada no automóvel e especificamente à região frontal; na qual ocorre um processo de estagnação do escoamento e o descolamento da camada limite, o que pode se verificar através das figuras 6 e 8. Ademais, o comportamento dos dados apresentados na literatura pode ser verificado através das simulações e, caso haja a necessidade de uma maior precisão em tais, um estudo mais aprofundado deve ser feito utilizando-se de uma geometria frontal mais bem trabalhada.

6. REFERÊNCIAS

- ANGELO, E.; ANGELO, G.; ANDRADE, D. A. A mathematical model for metastable condition determination in highly flashing liquid flows through expansion devices. **Nuclear Engineering and Design**, v. 242, p. 257-266, 2012.
- ANGELO, E.; ANGELO, G.; SANTOS, P. H. G.; ANDRADE, D. A. Numerical Study of the Influence of Elements inside the Wheelhouse on the Passenger Vehicle Aerodynamic. **Open Journal of Fluid Dynamics**, v. 05, p. 199-207, 2015.
- ANDERSON, John D. **Fundamentals of aerodynamics**. New York: McGraw-Hill, 2011. 1106p.
- ANDERSON, John D. **Computational fluid dynamics**. The basics with applications. New York: McGraw-Hill, 1995.
- ANSYS INC. **Design Exploration User Guide**. Canonsburg: [s.n.], 2011.
- ANSYS INC. **Ansys CFX-Solver Theory Guide**. Canonsburg: [s.n.], 2012.
- ÇENGEL, Yunus A. **Mecânica dos fluidos**. 3ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- CHENG, S. Y., TSUBOKURA, M., OKADA, Y., NOUZAWA, T., NAKASHIMA, T., DOH, D. H. Aerodynamic stability of road vehicles in dynamic pitching motion. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 122, pp. 146-156, 2013.
- FERRARI, J. **Simulação numérica do escoamento turbulento sobre o corpo de Ahmed**. Tese (Graduação em Engenharia Aeroespacial) – Universidade de Brasília, Brasília p.68. 2019.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2013. xiv, 710 p.

GILLESPIE, T. D., **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.

HIRSCH, C. **Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**. Butterworth-Heinemann, 2007. 680p.

HUCHO, W., G. SOVRAN, G. (1993). Aerodynamics of Road Vehicles. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 25(1), pp. 485-537, 1993.

KATZ, J., **Race car aerodynamics: designing for speed**. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, 2006.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2012. xv, 453 p.

MOREL, T. Aerodynamic Drag of Bluff Body Shapes Characteristic of Hatch-Back Cars. SAE International, 1978, **Automotive Engineering Congress and Exposition**, v. 87, n. 1, p. 1270-1279, fev./1978. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/780267/>. Acesso em: 10 mai. 2022.

POTTER, M. C. **Mecânica dos fluidos**. Porto Alegre: Bookman, 2018.

SIVARAJ, G., PARAMMASIVAM, K., SUGANYA, G. Reduction of Aerodynamic Drag Force for Reducing Fuel Consumption in Road Vehicle using Basebleed. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, v. 11, no. 6, pp. 1489-1495, 2018.

STERN, F.; WILSON, R.; COLEMAN, H.; PATERSON, E. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations - Part 1: Methodology and procedures. **Journal of Fluids Engineering**, v. 123, n. 4, p. 793-802, 2001.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational fluid dynamics: a practical approach**. Amsterdam: Elsevier, 2008. 459 p.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 8 ed. Porto Alegre: ArtMed, 2018.

WILSON, R.; STERN, F.; COLEMAN, H.; PATERSON, E. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations - Part 2: Application for RANS simulation of a cargo/container ship. **Journal of Fluids Engineering**, v. 123, N. 4, pp. 803-810, 2001.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3. rd. D. C. W. Industries, 2006.