

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE NUMÉRICA DOS CONTORNOS DE VELOCIDADE E DISTRIBUIÇÕES
DE PRESSÃO DO ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL SOBRE PERFIS VEICULARES
UTILIZANDO CFD

por

William Simon

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Simon, William
Análise Numérica dos Contornos de Velocidade e
Distribuições de Pressão do Escoamento Bidimensional
sobre Perfis Veiculares utilizando CFD / William
Simon. -- 2021.
26 f.
Orientador: Alexandre Vagtinski De Paula.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2021.

1. CFD. 2. Distribuição de pressão. 3. Contornos de
velocidade. 4. Aerodinâmica veicular. I. De Paula,
Alexandre Vagtinski, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

William Simon

ANÁLISE NUMÉRICA DOS CONTORNOS DE VELOCIDADE E DISTRIBUIÇÕES
DE PRESSÃO DO ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL SOBRE PERFIS VEICULARES
UTILIZANDO CFD

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Sérgio Viçosa Möller

Prof. Bardo E. Joseff Bodmann

Prof. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, maio de 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

ANÁLISE NUMÉRICA DOS CONTORNOS DE VELOCIDADE E DISTRIBUIÇÕES DE PRESSÃO DO ESCOAMENTO BIDIMENSIONAL SOBRE PERFIS VEICULARES UTILIZANDO CFD

William Simon

william17simon@hotmail.com

Resumo. As forças aerodinâmicas são um fator determinante no desempenho de veículos. Este trabalho utiliza uma análise bidimensional simplificada de CFD do escoamento de ar sobre perfis de veículos a fim de avaliar sua aerodinâmica através da distribuição de pressão e de contornos de velocidade. A técnica de volumes finitos foi escolhida para resolver as equações médias de Reynolds, sendo utilizado o modelo de turbulência $k-\omega$ SST. Três tipos de veículos foram analisados, sendo eles um sedan médio, um SUV e uma pick-up grande. O número de Reynolds dos escoamentos situou-se entre $1,16 \times 10^{10}$ e $1,35 \times 10^{10}$. Os resultados mostram que a pressão na parte superior dos modelos apresentou grande variação entre as geometrias, sendo que veículos com formas mais suaves apresentaram maiores velocidades e menores pressões, contribuindo para uma sustentação positiva. A pressão na parte inferior dos modelos apresentou menor variação entre as geometrias, sendo que mesmo os modelos com maior altura do solo apresentaram velocidades elevadas e pressões reduzidas, contribuindo para uma sustentação negativa. Assim formas ditas “menos aerodinâmicas” não necessariamente tem características aerodinâmicas menos favoráveis em relação à sustentação. As análises, pela facilidade em modelar geometrias e custo computacional reduzido, se mostram interessantes e úteis para realização de comparações e obtenção de resultados preliminares.

Palavras-chave: CFD, distribuição de pressão, contornos de velocidade, aerodinâmica veicular

Numerical Analysis of Velocity Field and Pressure Distribution of the Flow over Vehicle Profiles using CFD

Abstract Aerodynamic forces are a determining factor on vehicle performance. This work utilizes a 2D simplified CFD flow analysis to evaluate its aerodynamics through pressure distributions and velocity contours. The finite volumes method was chosen to solve the RANS equations, using the $k-\omega$ SST turbulence model. Three vehicle types were analyzed, being them one midsize sedan, one SUV and one pick-up truck. Reynolds numbers for the flows were between $1,16 \times 10^{10}$ and $1,35 \times 10^{10}$. The results show that pressure over the models showed big differences between the geometries, with vehicles with smoother shapes showing faster speeds and lower pressures, contributing towards positive lift. Pressure under the models showed less variation between the geometries, with even vehicles with higher ground clearance showing high speed and low pressures, contributing towards negative lift. Thus, so-called “less aerodynamic” shapes do not necessarily have less favorable aerodynamic characteristics in relation to lift. The analysis, by the ease of modelling geometries and low computational cost, are shown to be interesting and useful for making comparisons and obtaining preliminary results.

Keywords: CFD, pressure distribution, velocity contour, vehicle aerodynamics

NOMENCLATURA

Símbolos:

F_L	Força de Sustentação	[N]
C_L	Coefficiente de Sustentação	
u	Velocidade do fluido	[m/s]
x, y	Posição	[m]
A	Área	[m ²]
a_L	Aceleração lateral	[m/s ²]
r	Razão de refinamento da malha	
p	Ordem de convergência observada	
F_s	Fator de Segurança	

Símbolos gregos:

ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
μ	Viscosidade do fluido	[Pa.s]
δ_L	Ângulo do volante	[°]
ψ	Ângulo de guinada	[°]
ε	Erro relativo	

Abreviaturas e acrônimos:

CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (do inglês <i>Computational Fluid Dynamics</i>)
RANS	Equações Médias de Reynolds (do inglês Reynolds Averaged Navier-Stokes)
DNS	Simulação Numérica Direta (do inglês Direct Numerical Simulation)
SRS	Simulação com Solução de Escala (do inglês Scale-Resolving Simulation)
LES	Simulação de Grandes Escalas (do inglês Large Eddy Simulation)
GCI	Índice de Convergência de Malha (do inglês <i>Grid Convergence Index</i>)
SUV	Veículo utilitário esportivo (do inglês <i>sport utility vehicle</i>)
CAD	Desenho Assistido por Computador (do inglês Computer Assisted Drawing)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	vii
2.	FUNDAMENTAÇÃO	vii
2.1	Forças Aerodinâmicas em Veículos	vii
2.2	Mecânica dos Fluidos Computacional	ix
3.	METODOLOGIA	xi
3.1	Modelagem do Problema	xi
3.2	Dinâmica dos Fluidos Computacional	xiii
3.2.1	Domínio Computacional e Malha	xiii
3.2.2	Condições de Contorno	xiv
3.2.3	Solução e Convergência	xiv
3.3	Apresentação dos Resultados	xv
4.	RESULTADOS	xv
4.1	Contornos de Pressão e Velocidade	xv
4.2	Forças e Coeficientes de Reação	xx
4.3	Índice de Convergência de Malha	xx
5.	CONCLUSÕES	xxi
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	xxi
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	xxii
	ANEXO A.....	xxiv
	ANEXO B.....	xxvi

1. INTRODUÇÃO

As forças aerodinâmicas são um fator importante para as principais características de desempenho de um veículo, incluindo aceleração e velocidade, consumo de combustível, aderência, estabilidade, conforto e segurança. Ainda, os efeitos aerodinâmicos têm se tornado mais significativos à medida em que desenvolvimentos tecnológicos recentes permitem maior potência e desempenho, mesmo em veículos de passeio, aumentando as velocidades envolvidas.

Dentre as características aerodinâmicas de um veículo, aquela que parece receber a maior atenção, por parte da indústria automobilística e também em estudos acadêmicos, é o coeficiente de arrasto, já que é fator determinante para o consumo de combustível, e conseqüentemente emissão de poluentes atmosféricos. No entanto, se no passado o coeficiente de arrasto devia ser apenas o menor possível sem afetar excessivamente o design do veículo, hoje o desenvolvimento aerodinâmico deve atender requisitos bem específicos, e a definição e alcance de coeficientes de sustentação alvo são absolutamente necessários (SCHUETZ, 2015).

As forças de sustentação, o momento causado por estas forças e as reações correspondentes nos eixos do veículo são carregamentos que alteram a distribuição de carga (e de aderência) nos veículos, e precisam ser considerados, juntamente com muitos outros fatores, para garantir que os veículos apresentem condições adequadas de estabilidade e dirigibilidade.

Mesmo assim, sabemos que o design de automóveis é determinado primariamente por princípios estéticos, sendo que as propriedades aerodinâmicas devem ser consideradas, mas não necessariamente aparentes (SCHUETZ, 2015).

As técnicas de Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD) têm se mostrado cada vez mais importantes no estudo e desenvolvimento aerodinâmico de veículos, sendo utilizadas tanto pela indústria automotiva quanto por estudantes e pesquisadores. O trabalho de Verma et al. (2020) mostra como pequenas modificações na geometria podem afetar significativamente as propriedades aerodinâmicas, no caso alterando o ângulo de ataque de um pequeno *spoiler* traseiro em um veículo sedan. Tastan (2011) também demonstrou as capacidades da mecânica dos fluidos computacional e diferentes modelos de turbulência para produzir resultados compatíveis com dados experimentais.

Assim, este trabalho busca estudar as características do escoamento sobre perfis de diferentes veículos (sedans, *SUVs* e *pick-ups*) a partir da análise dos campos de velocidade e da distribuição de pressões sobre os perfis, obtidos a partir de uma análise de CFD bidimensional. A identificação de regiões de alta ou baixa pressão, de aceleração do escoamento, de separação da camada limite, de recirculação do escoamento, entre outras, relacionadas às características geométricas dos modelos estudados visa permitir uma análise simplificada de sua aerodinâmica.

Esta análise pode ser utilizada para fazer comparações e obter propriedades quando dados completos da geometria não estão disponíveis ou quando o custo computacional destas análises é muito elevado.

2. FUNDAMENTAÇÃO

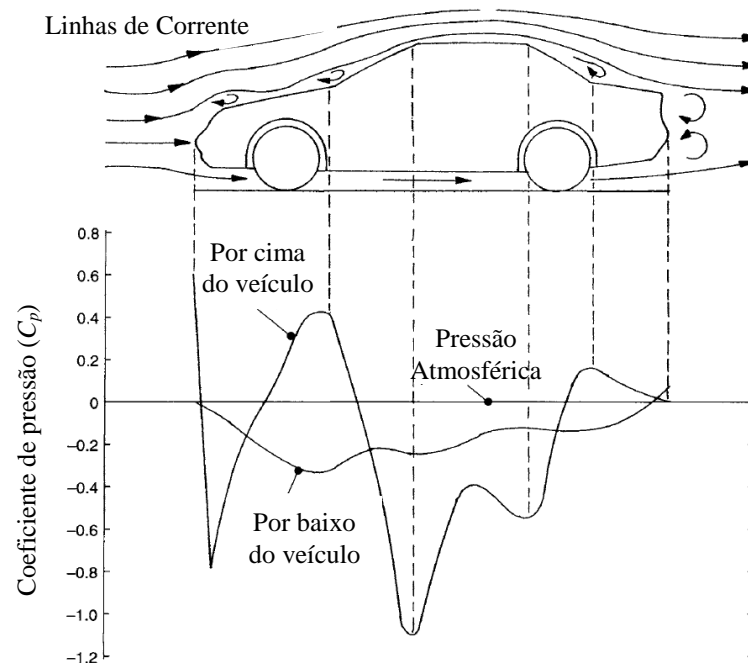
2.1 Forças Aerodinâmicas em Veículos

De acordo com Hucho (1993), quando visto sob o aspecto de mecânica dos fluidos, os veículos de estrada podem ser considerados como corpos rombudos em grande proximidade com o solo. Como é característico do escoamento externo em corpos rombudos o escoamento

é tridimensional, as camadas limites podem ser turbulentas e a separação e junção da camada limite são comuns. Ainda, elementos em rotação, fluxos internos, cavidades, entre outros fatores influenciam o escoamento.

Devido ao formato do veículo, o escoamento pela sua parte superior se acelera quando contorna as curvaturas e percorre um caminho mais longo. A aceleração do escoamento e a redução de pressão correspondente tende a resultar-se na forma de sustentação, conforme ilustra a Figura 1 (HEISLER, 2002).

Figura 1 – Distribuição de pressão acima e abaixo do veículo



Fonte: Adaptado de Heisler (2002)

Por outro lado, a restrição para a passagem do escoamento na parte inferior, juntamente com os ângulos e a curvatura dos para-choques do veículo, forma um tubo de Venturi, onde a parede representada pela estrada está em movimento, e aqui a aceleração do escoamento e redução de pressão correspondente gera sustentação negativa, também chamada de *downforce*, conforme ilustra a Figura 2 (HEISLER, 2002).

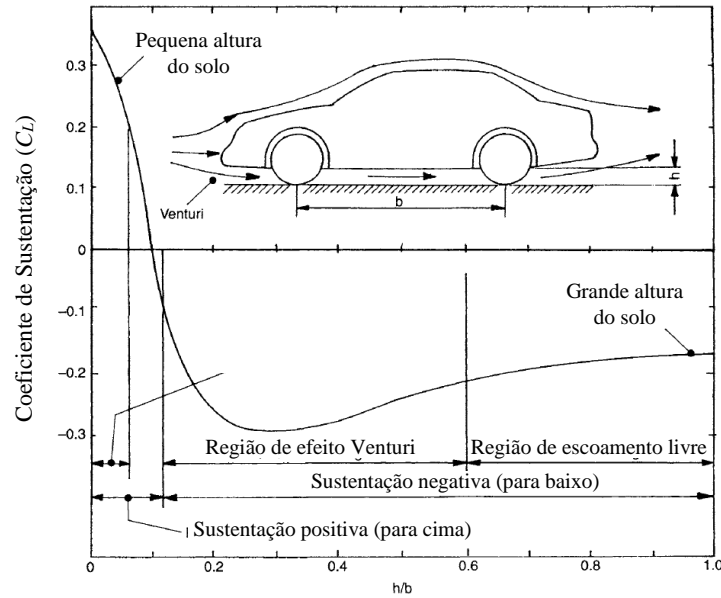
A força de sustentação resultante pode ser quantificada pelo Coeficiente de Sustentação C_L , definido pela Equação 1

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho u^2 A} \quad (1)$$

onde F_L é a força de sustentação, ρ é a massa específica do fluido (ar), u é a velocidade de corrente livre do escoamento e A é uma área de referência. O coeficiente relaciona, portanto, a força, a pressão dinâmica e a área para o escoamento.

A área de referência utilizada para este trabalho é a área frontal. Em outros problemas envolvendo sustentação, a área de referência pode ser a área horizontal projetada. Em veículos a área frontal é mais frequentemente reconhecida como a área de referência pois é usada para o coeficiente de arrasto.

Figura 2 – Coeficiente de sustentação em função da altura do solo



Fonte: Adaptado de Heisler (2002)

2.2 Mecânica dos Fluidos Computacional

As equações que governam o problema em estudo são as Equações de Navier-Stokes, Eq. (2), e a Equação de Continuidade, Eq. (3), escritas na forma indicial, também conhecida como notação de Einstein, para um escoamento incompressível e com viscosidade constante

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica do fluido escoando, t é o tempo, u_i é a velocidade, x_i é a posição, f_i é a força por unidade de massa, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica, e $i, j = 1, 2$ ou 3 , são as dimensões do problema.

Na metodologia utilizada neste trabalho o software comercial *ANSYS Fluent*® foi utilizado para resolver estas equações através do método de volumes finitos.

Mesmo que a turbulência, em princípio, seja descrita pelas equações de Navier-Stokes, a solução até as menores escalas temporais e espaciais por Simulação Numérica Direta (DNS) não é viável para a maioria das situações, já que os requisitos computacionais excedem as capacidades disponíveis em qualquer futuro próximo (ANSYS FLUENT, 2021). Métodos em que ao menos parte do espectro de turbulência é resolvido diretamente, chamados de *Scale-Resolving Simulation* (SRS), têm aplicação em engenharia, mas o custo computacional ainda é muito mais elevado, não sendo adequados para a análise simplificada proposta neste trabalho.

Assim, o método mais utilizado é o das equações médias de Reynolds (RANS), em que as variáveis são decompostas entre componentes médios e flutuantes (ANSYS FLUENT, 2021). No entanto, este procedimento introduz outras variáveis, e mais alguma equação é necessária

para o fechamento do problema. As equações necessárias para o fechamento com RANS são equações determinísticas conhecidas como modelos de turbulência, sendo que vários modelos existem e estão disponíveis nos softwares comerciais.

Dentre os modelos disponíveis com o *ANSYS Fluent*® o mais simples é o modelo de Spalart-Allmaras. Um modelo de uma equação, possui algumas limitações conhecidas e não é recomendado pelo *Fluent User's Guide* (2021) como um modelo para utilização geral. Ainda, a utilização de modelos mais complexos, como o modelo de Tensão de Reynolds (RSM), com sete equações, só é recomendado para escoamentos onde há vantagens conhecidas desta utilização, justificando o aumento no custo computacional.

Entre os modelos de duas equações, o modelo *k- ω SST* é aquele que se mostra mais preciso e robusto para uma grande variedade de escoamentos, já que inclui todos os refinamentos dos outros modelos, além de incluir o transporte de tensão de cisalhamento turbulenta (SST) na definição de viscosidade turbulenta, segundo o *Fluent Theory Guide* (2021). Ainda, como demonstrado por Tastan (2011), o custo computacional para o modelo *k- ω SST* não é significativamente maior em relação aos demais modelos de duas equações. Este modelo é utilizado como padrão para o *ANSYS Fluent*®.

O modelo *k- ω SST* foi desenvolvido por Menter (1994), e utiliza uma formulação *k- ω* na região interna da camada limite e gradualmente passa a utilizar a formulação mais robusta do modelo *k- ϵ* nas outras regiões. Desta forma o modelo se mostra adequado para tratar de gradientes adversos de pressão e separação da camada limite, sendo adequado para a maioria dos escoamentos em engenharia (ANSYS FLUENT, 2021).

As equações de transporte para este modelo são dadas pela Equação 4, para a energia cinética turbulenta *k* e pela Equação 5, para taxa de dissipação específica ω

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega + G_{\omega b} \quad (5)$$

onde Γ_k e Γ_ω são a difusividade efetiva de *k* e ω , G_k e G_ω são referentes à produção de *k* e ω , Y_k e Y_ω são referentes à dissipação de *k* e ω pela turbulência, S_k e S_ω são termos fonte definidos, G_b e $G_{\omega b}$ representam efeitos de empuxo, e D_ω é um termo de difusão cruzada.

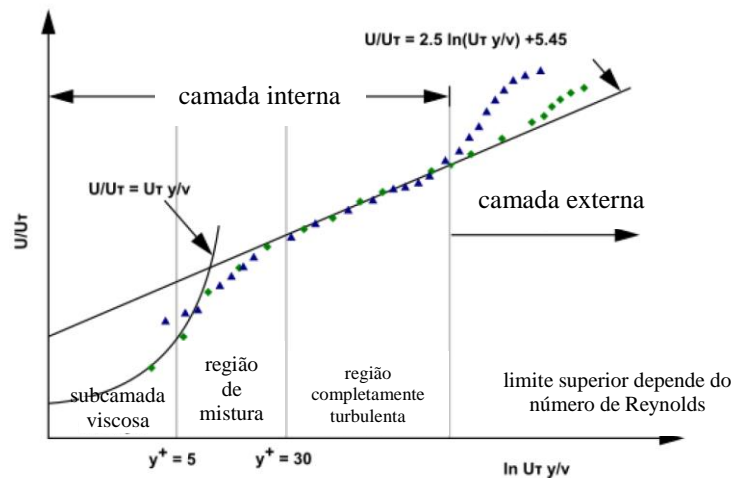
As demais equações e constantes para o modelo são apresentadas no Anexo A.

Ainda, para que o escoamento seja corretamente caracterizado a simulação numérica deve considerar os efeitos da camada limite. A Figura 3 apresenta as diferentes regiões da camada limite. Na figura, podemos observar que y^+ é um número adimensional que indica a região de qualquer ponto na camada limite e é definido pela Equação 6

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (6)$$

onde ρ é a massa específica do fluido escoando, u_τ é a velocidade de fricção, y é a coordenada na direção normal e μ é a viscosidade dinâmica.

Figura 3 – Subdivisões da camada limite



Fonte: Adaptada de ANSYS (2021)

Assim, a modelagem utilizada para o problema deve ser capaz de resolver a camada limite até a subcamada viscosa ou utilizar funções de parede. No modelo $k-\omega$ SST, é utilizada uma formulação insensível a y^+ para a equação ω . Desta forma a malha pode ser refinada continuamente sem que ocorra uma deterioração da solução quando o modelo deixa de usar funções de parede e passa a resolver completamente a camada limite (ANSYS FLUENT, 2021).

3. METODOLOGIA

3.1 Modelagem do Problema

Uma análise de mecânica dos fluidos computacional completa sobre um veículo apresenta algumas dificuldades que são determinantes na escolha da metodologia utilizada. São elas:

- *Custo computacional significativo:* uma simulação tridimensional para a aerodinâmica de um veículo com uma malha suficientemente refinada deve ter mais de 10 milhões de elementos, mesmo depois de considerada a simetria no plano transversal. O escoamento ao redor do veículo é totalmente tridimensional, turbulento e separações são típicas (SCHUETZ, 2015), e a região afetada pelo escoamento, que precisa ser resolvida, se estende por várias vezes o comprimento do veículo. Desta forma, mesmo com avanços na capacidade de processamento dos computadores, o tempo computacional necessário é bastante significativo, entre 15 e 20 horas, no mínimo.
- *Modelamento preciso da geometria:* dados geométricos precisos para veículos em produção, não estão disponíveis para utilização, sendo possivelmente protegidos como propriedade intelectual. Modelagens simplificadas devem ignorar detalhes que, apesar de pequenos, podem ser bastante significativos no resultado final, sendo que são frutos do próprio desenvolvimento aerodinâmico realizado pelos fabricantes.

Este trabalho propõe uma análise simplificada, em que se analisa o escoamento bidimensional sobre a forma de perfil dos veículos. Esta análise pretende identificar algumas das principais características do escoamento, como regiões de alta pressão e velocidade, os descolamentos de camada limite e regiões de recirculação, dentre outros, a fim de estudar como

as características da geometria contribuem para a sustentação aerodinâmica através da comparação entre diferentes modelos.

Uma análise deste tipo poderia ser utilizada quando os dados completos da geometria não estão disponíveis ou quando o custo computacional da análise é crítico, por exemplo para:

- Realizar comparações quando os dados de geometria são protegidos.
- Analisar geometrias já nos estágios iniciais do desenvolvimento, quando apenas o perfil do veículo está em desenvolvimento.
- Utilizar técnicas que realizam grande número de análises, por exemplo, algoritmos de otimização ou inteligência artificial.

Algumas das características mais importantes da geometria são definidas pelo perfil, por exemplo, a altura dos pontos de estagnação, a inclinação, comprimento e curvatura das superfícies que cobrem a maior parte da área do veículo (capô, para-brisa e teto), a altura do solo, o comprimento e altura do veículo, entre outras. A visualização do escoamento no plano de perfil também é uma das mais úteis para compreender e identificar suas características.

Este tipo de abordagem, de análise de perfis, é muito utilizada no estudo e desenvolvimento de perfis aerodinâmicos para asas e aerofólios. Destes estudos sabe-se como a diferença de pressão entre a parte superior e inferior do perfil gera um escoamento entre estas regiões, reduzindo a sustentação e gerando vórtices de borda de fuga, que aumentam o arrasto (FOX, 2004). A redução de sustentação e aumento de arrasto podem ser relacionados através da razão de aspecto. De fato, em veículos, nas arestas onde o ar escoava com algum ângulo, há a formação de vórtices em forma de cone similares aos observados em asas de aviões, especialmente em asas do tipo delta com baixa razão de aspecto (SCHUETZ, 2015).

As geometrias analisadas são modeladas a partir de veículos selecionados entre os mais vendidos no país segundo o informativo de emplacamento FENABRAVE (2020). A Tabela 1 apresenta as geometrias analisadas neste trabalho.

Tabela 1 – Descrição dos modelos analisados

	Categoria	Descrição
I	Sedan Médio	Veículo de um fabricante japonês que há anos é referência no segmento dos sedans médios
II	SUV	Veículo SUV compacto de fabricante americano, com design clássico inspirado em veículos militares
III	Pick-up Grande	Veículo Pick-up de fabricante italiano, um pouco menor do que outros da mesma categoria pois é mais voltado para passeio do que para aplicações comerciais

A modelagem da geometria foi realizada com um software de desenho em *CAD*. Uma fotografia de perfil do veículo foi importada como referência. A escala desta imagem foi definida utilizando a distância de entre eixos, que é de fácil identificação pelo centro das rodas e está sempre disponível entre as especificações técnicas, já que é uma das medidas mais importantes para o veículo. Quando disponíveis, outras medidas como altura do solo e altura total também foram usadas como referências.

O contorno foi definido utilizando principalmente *splines*, curvas que são definidas por pares de nós e pontos de controle. Uma *spline* sempre passa pelos nós e é tangente à reta entre o nó e o ponto de controle. O contorno do veículo foi identificado visualmente a partir de sua imagem. Os nós foram então definidos sobre este contorno e os pontos de controle ajustados para que a

spline melhor representasse perfil. Uma avaliação intuitiva foi utilizada para ignorar alguns detalhes, como antenas e acessórios, ou completar seções ocultas da geometria. O contorno do veículo foi subtraído do domínio computacional para definir o domínio de escoamento do fluido.

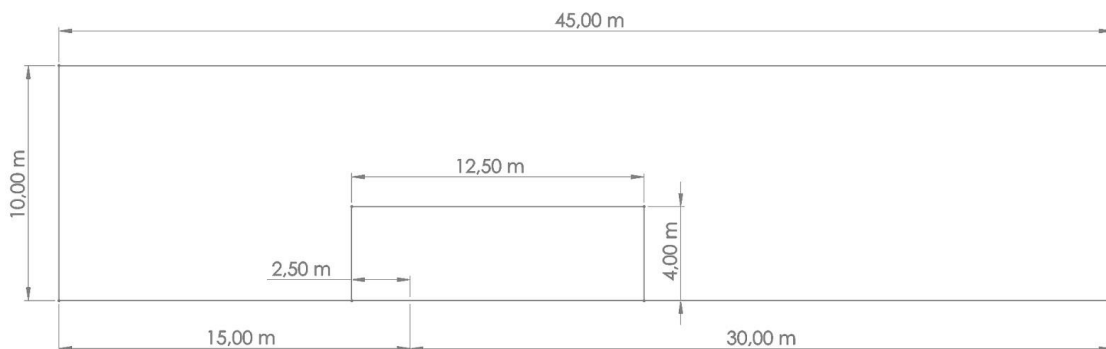
Finalmente, foi selecionada uma velocidade de 40 m/s, ou 144 km/h, para a análise. Este valor é elevado, mais alto do que o limite de velocidade em rodovias no Brasil, mas foi utilizado para representar um limite superior e não é uma velocidade irrealista para a potência e desempenho de veículos de passeio. O trabalho de Windsor e LeGood (1993) realizou testes com velocidades entre 110 e 160 km/h para avaliar a relação entre a estabilidade de veículos e as forças aerodinâmicas. O número de Reynolds dos escoamentos nos modelos dos veículos situou-se entre $1,16 \times 10^{10}$ e $1,35 \times 10^{10}$, sendo baseado na velocidade do ar incidente (40 m/s), no comprimento do veículo (entre 4,23 m e 4,91 m) e na viscosidade cinemática do ar ($1,45 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

3.2 Dinâmica dos Fluidos Computacional

3.2.1 Domínio Computacional e Malha

O domínio computacional para o problema foi definido seguindo-se as recomendações de Lanfrit (2005). Assim, o domínio compreende três comprimentos à frente do veículo e cinco comprimentos atrás e considera o efeito de bloqueio menor que 1,5% da seção transversal. A Figura 4 apresenta as dimensões do domínio computacional utilizado para todas as simulações, bem como da caixa interna utilizada para controle da malha.

Figura 4 – Dimensões do domínio computacional



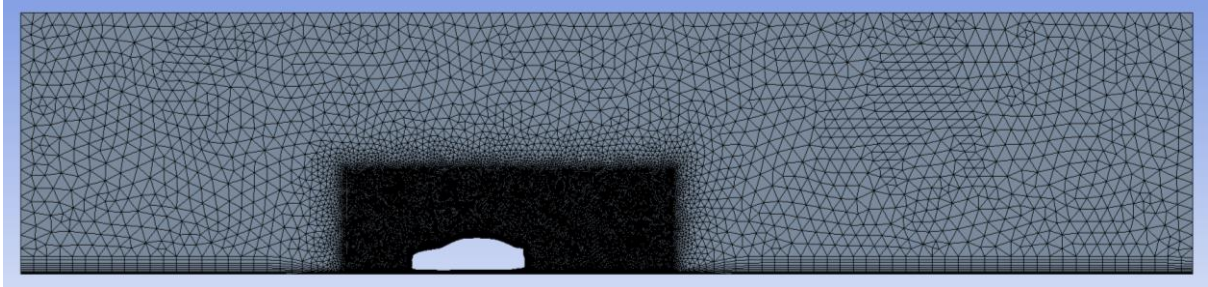
As dimensões na Figura 4 foram calculadas considerando um comprimento de 5 m, que é um limite superior para o comprimento dos modelos analisados.

Para a discretização do domínio foi utilizada uma malha híbrida, com elementos quadriláteros, gerados pelo recurso de *inflation* (crescimento de elementos na direção normal) a partir da superfície do veículo e do solo, e elementos triangulares no restante do domínio. A Figura 5 exibe a malha gerada para uma das geometrias estudada. A malha apresenta esta mesma forma geral para as demais geometrias.

A malha apresentada na Figura 5 é a mais fina das três malhas geradas para cada geometria. A malha mais fina segue a recomendação de Lanfrit (2005) para o tamanho de elemento na superfície. Para uma malha fina e velocidade de 40 m/s esta recomendação é um tamanho de elemento de 1,5 mm. O tamanho dos elementos no restante do domínio foram definidos de modo a garantir a discretização adequada, com uma transição suave entre as regiões. As outras

malhas geradas seguem uma razão de refinamento igual a dois, ou seja, o tamanho dos elementos é multiplicado por dois para gerar cada malha mais grosseira.

Figura 5 – Malha híbrida gerada para uma das geometrias analisadas



O modelo de turbulência utilizado possui uma formulação insensível a y^+ para a equação ω , conforme discutido na Seção 2.2. Segundo o *Fluent User's Guide* (2021) é importante garantir que a camada limite seja coberta por, pelo menos, 10 elementos normais à superfície e geralmente, garantir que a camada limite seja coberta com elementos suficientes é mais importante do que alcançar um determinado critério de y^+ . Camadas de elementos quadriláteros foram geradas por *inflation* usando a configuração de transição suave entre os elementos da superfície e do restante da malha. Foram utilizados os parâmetros razão de transição de 0,75, taxa de crescimento de 1,1 e o máximo de 20 camadas para a malha mais fina.

Usando estas configurações as malhas mais finas têm cerca de 240.000 elementos, as médias cerca de 120.000 elementos e as grosseiras cerca de 50.000 elementos.

3.2.2 Condições de Contorno

As condições de contorno são aplicadas buscando representar da melhor forma possível as condições do problema que está sendo modelado. As condições de contorno aplicadas foram:

- Entrada: velocidade de 40 m/s.
- Saída: pressão manométrica 0 Pa.
- Superfície do veículo: condição de não deslizamento.
- Superfície da pista: condição de não deslizamento, velocidade de 40 m/s.
- Limite superior: condição de simetria.

Para a intensidade de turbulência e a razão de viscosidade turbulenta foram utilizados os valores padrão do *ANSYS Fluent*, respectivamente 1% e 10 para a entrada e 5% e 10 para a saída. Estes mesmos valores são utilizados em outros trabalhos semelhantes (DUARTE, 2015; ABRAMCHUCK, 2014).

3.2.3 Solução e Convergência

O problema foi resolvido utilizando o método COUPLED para o acoplamento pressão-velocidade. A formulação das equações é de segunda ordem e a simulação é analisada em regime permanente.

Para avaliar a convergência foram monitorados os residuais das equações de k , ω , velocidade em x e y , e da equação da continuidade (conservação de massa), além do coeficiente de sustentação. Foi utilizado o critério de parada de 10^{-5} .

As simulações foram realizadas em computador com processador de seis núcleos, frequência entre 3,5 e 4,0 GHz e 8 GB de memória RAM. A convergência das soluções foi atingida entre 200 e 250 iterações, em um tempo típico menor do que 5 minutos.

3.3 Apresentação dos Resultados

Além dos contornos de pressão e velocidade e dos cálculos de força, centros de pressão e coeficientes de pressão, que já são integrados ao software comercial utilizado, os resultados do trabalho são apresentados de duas outras formas.

A primeira é a função definida pela Equação 7, a ser avaliada na superfície do veículo

$$f = p * \left| \frac{A_y}{A} \right| \quad (7)$$

onde p é a pressão, A é a área total e A_y é a área horizontal, ou seja, com normal na direção y .

Esta função representa a distribuição de pressão na superfície, mas é ponderada pela área horizontal para isolar a componente da pressão que gera forças de sustentação. O gráfico da função avaliada na superfície do veículo em função da coordenada x possui duas linhas que representam as pressões na parte superior e inferior do veículo. Áreas em que a pressão na parte superior é menor do que a pressão na parte inferior indica uma força de sustentação positiva, enquanto o contrário indica uma força negativa (*downforce*).

A segunda forma é o cálculo das forças de reação sobre cada eixo, correspondentes a força de sustentação. As forças de reação nos eixos dianteiro (R_f) e traseiro (R_r) são calculadas pelas Equações 8 e 9, obtida fazendo-se o somatório de força e momentos sobre o veículo

$$R_f = F_L \frac{x_r - x_p}{x_r - x_f} \quad (8)$$

$$R_r = F_L \frac{x_f - x_p}{x_f - x_r} \quad (9)$$

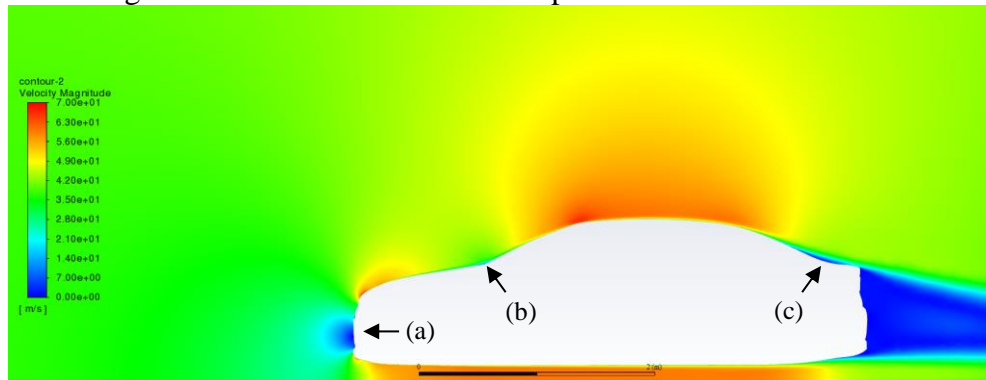
onde F_L é a força de sustentação, x_f é a coordenada x do eixo dianteiro, x_r a coordenada do eixo traseiro e x_p a coordenada o centro de pressão. Uma reação negativa representa um aumento na carga normal aplicada sobre cada eixo enquanto que uma força positiva representa uma redução da carga. Para cada força de reação, um coeficiente de sustentação correspondente é calculado pela Equação 1.

4. RESULTADOS

4.1 Contornos de Pressão e Velocidade

A Figura 6 apresenta os contornos de velocidade para o escoamento sobre o perfil de um modelo sedan médio. Em todos os resultados o escoamento de ar se dá no sentido da esquerda para a direita.

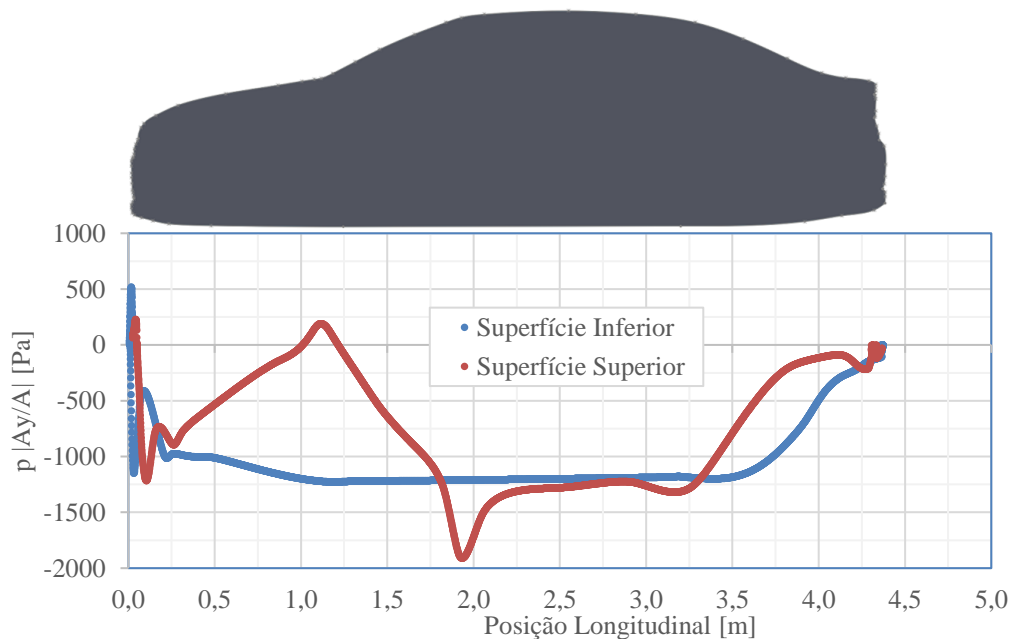
Figura 6 – Contorno de velocidade para o modelo sedan médio



O escoamento apresenta baixa velocidade na região em volta do ponto de estagnação frontal (indicada em (a)). Nesta região encontram-se as entradas de ar para o compartimento do motor e radiadores, que não estão presentes na modelagem utilizada. O trabalho de Duarte (2015) relatou problemas que podem aparecer com esta simplificação, quando esta região, que é de alta pressão, modifica o escoamento em outras partes do modelo. Neste caso, esta pressão poderia alterar a divisão do escoamento passando por cima ou por baixo do modelo. Sobre o teto do modelo, assim como na parte inferior, as velocidades são elevadas, entre 60 e 70 m/s. Ocorre separação do escoamento na região de transição entre o capô e o para-brisa (b). Segundo Tastan (2011) as velocidades reduzidas acabam diminuindo a perturbação nos limpadores de para-brisa e esta região de alta pressão é adequada para entradas de ar para o motor e ar-condicionado. Também ocorre separação sobre a região do porta-malas indicada em (c).

As pressões na superfície, avaliadas a partir da Equação 7, são apresentadas na Figura 7.

Figura 7 – Pressão estática na superfície para o modelo sedan médio



Na linha superior do modelo (linha em vermelho, no gráfico), a pressão aumenta a partir de $x = 0,25$ m, atingindo o valor máximo de cerca de 250 Pa em $x = 1,2$ m, na base do para-brisa.

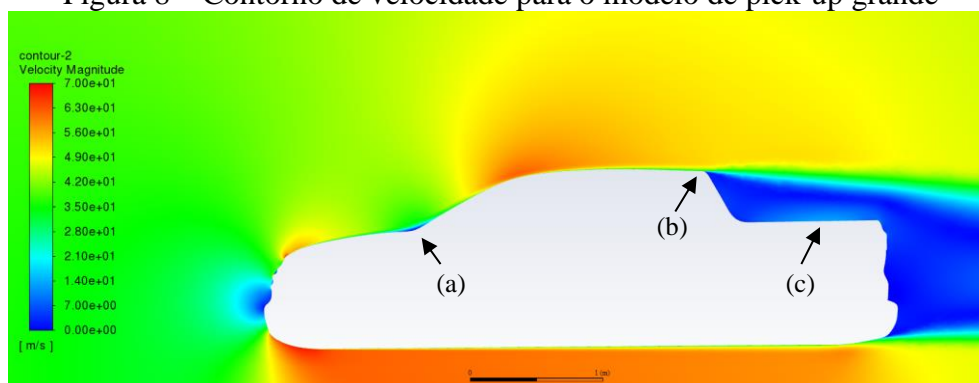
A pressão atinge um valor mínimo de quase -2000 Pa em $x = 1,8$ m, e se mantém no patamar de -1250 Pa sobre todo o teto, até $x = 3,25$ m. A partir deste ponto o escoamento vai recuperando a pressão até o comprimento final. Na linha inferior do modelo (linha em preto no gráfico) a pressão é próxima de -1250 Pa até $x = 3,5$ m, onde começa o ângulo de saída do para-choque traseiro e a pressão se recupera.

Entre $x = 1,75$ m e $3,25$ m a pressão na linha superior é menor do que na linha inferior. A área entre estas duas curvas representa uma pequena força de sustentação positiva. Para as regiões entre $x = 0,25$ m e $1,75$ m e $x = 3,25$ m e $4,3$ m a pressão é maior na linha superior do que na linha inferior e a diferença entre as curvas resulta em uma força de sustentação negativa. A força negativa gerada sobre o capô é maior do que a força negativa gerada sobre o porta-malas.

A distribuição de pressão apresentada na Figura 7 é compatível com dados da literatura apresentados na Figura 1 e também com os resultados de Tastan (2011), que também analisou um modelo de veículo sedan. Na parte superior a distribuição de pressão apresenta a forma esperada, enquanto na parte inferior a pressão reduz mais rapidamente ao longo do comprimento do veículo para os dados da literatura, provavelmente devido ao escoamento pelas laterais do veículo. A comparação dos valores numéricos não é possível pois as geometrias são distintas.

Para o modelo de pick-up grande os contornos de velocidade são apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Contorno de velocidade para o modelo de pick-up grande

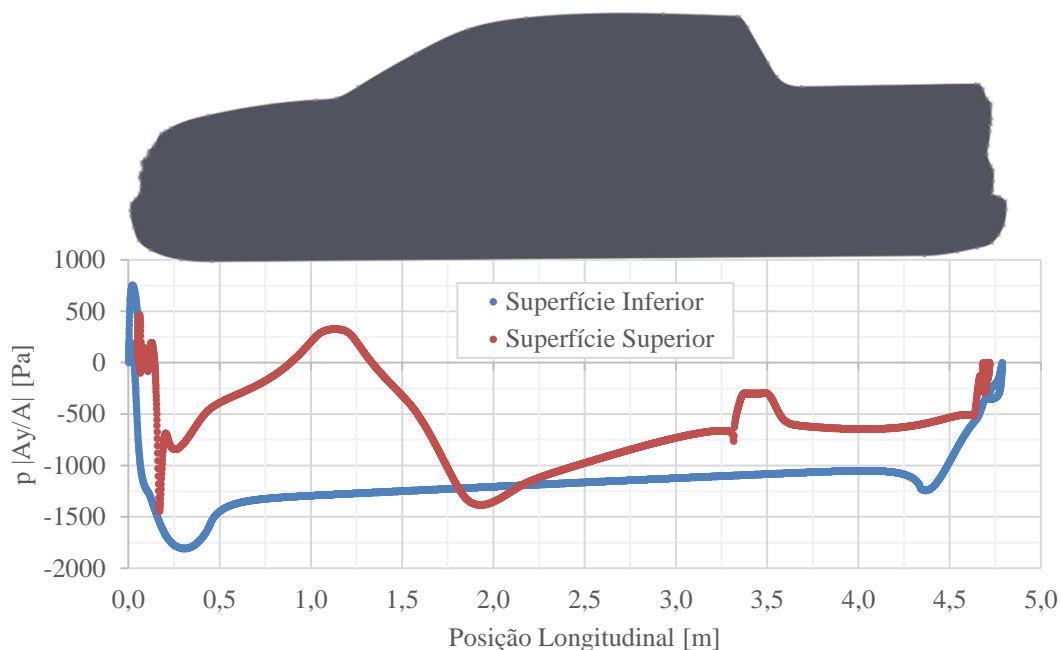


A velocidades na parte inferior do modelo e sobre o teto também são elevadas, entre 60 e 70 m/s. Há separação localizada do escoamento na base do para-brisa (a). O escoamento separa novamente no final do teto do modelo (b), onde a transição tem um ângulo próximo de 120° e o raio de curvatura é pequeno. Desta forma toda a região da caçamba (c) fica dentro desta região de separação e baixa velocidade. É importante destacar que o modelo utilizado representa uma caçamba fechada, mas muitas vezes os veículos circulam sem a tampa ou lona que isola o compartimento de carga.

Na Figura 9 é apresentada a distribuição de pressões na superfície do modelo.

Para a pressão na parte superior, o comportamento até $x = 2$ m é parecido com o modelo sedan. O valor mínimo, em $x = 1,8$ m é de cerca de -1500 Pa. A partir deste ponto a pressão cresce até -750 Pa, já que o teto é mais plano do que no modelo sedan. Depois de $x = 3,25$ m, região da caçamba, a pressão fica próxima de -500 Pa. Na parte inferior, a pressão tem um mínimo próximo de $x=0,3$ m e vai crescendo lentamente de -1500 Pa para -1000 Pa entre $x = 0,5$ m e $4,5$ m.

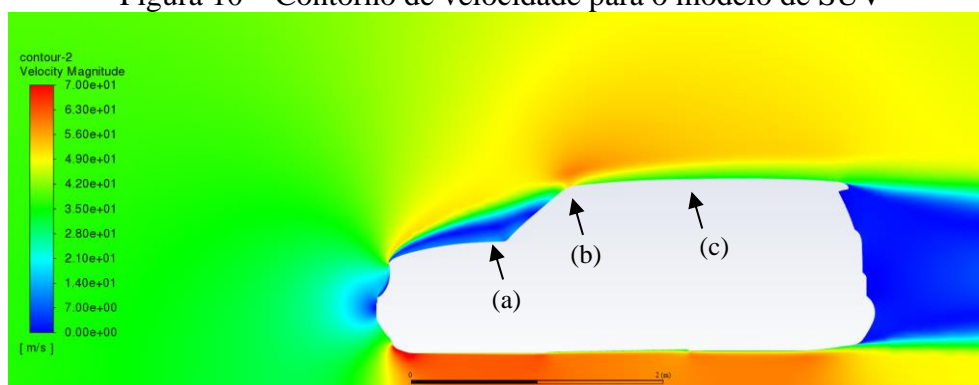
Figura 9 – Pressão estática na superfície para o modelo de pick-up grande



Apenas para uma pequena região em torno de $x = 2$ m a pressão na parte inferior do modelo é maior do que na parte superior, produzindo uma força de sustentação positiva. A força de sustentação é negativa para todo o restante do modelo, mas é maior na região frontal, entre $x = 0,25$ m e $1,75$ m, do que sobre a caçamba.

A Figura 10 apresenta os resultados de velocidade para o modelo de SUV.

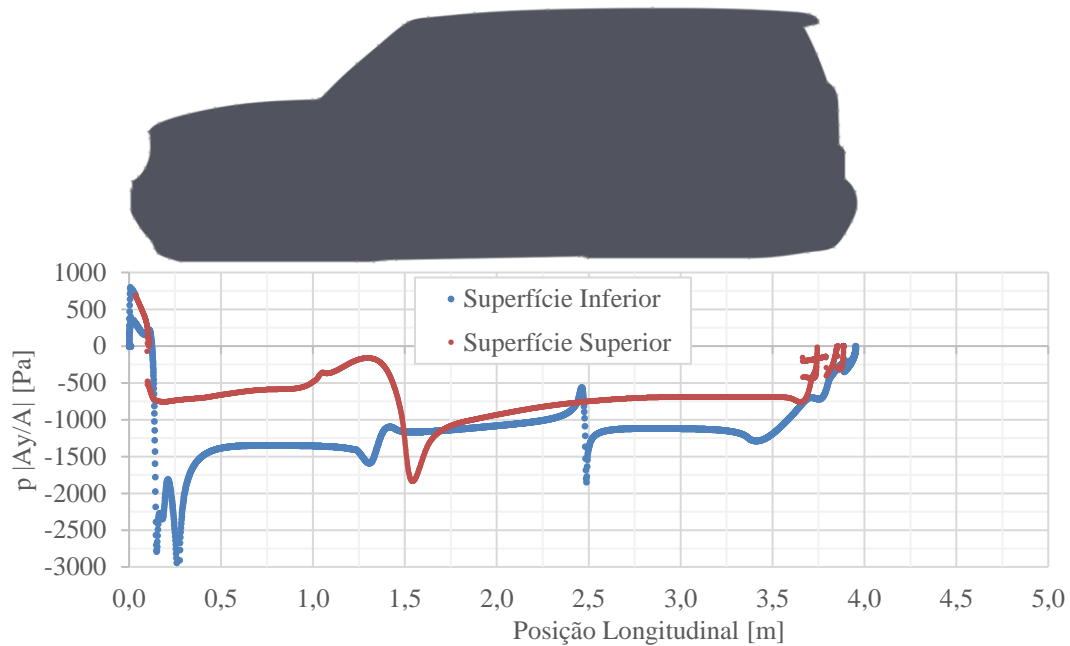
Figura 10 – Contorno de velocidade para o modelo de SUV



A geometria modelada para o veículo SUV apresenta um design mais agressivo, com linhas retas e raios de curvatura pequenos. Por causa disso se observa uma grande região de baixa velocidade sobre o capô e a maior parte do para-brisa (a). O escoamento com maior velocidade, cores laranja e amarela, fica separado da superfície em toda a frente do modelo, atinge a superfície um pouco antes do final do para-brisa (b) e se separa novamente na transição para o teto (c). Novamente, na parte inferior as velocidades são elevadas, próximas a 60 e 70 m/s.

Os efeitos desta geometria sobre a distribuição de pressão na superfície são apresentados na Figura 11.

Figura 11 – Pressão estática na superfície para o modelo de SUV



As pressões na parte superior do modelo apresentaram um comportamento diferente dos outros modelos. A pressão fica próxima de -750 Pa para quase todo o modelo. O valor mínimo em $x = 1,5$ m é de -1750 Pa, que ocorre quando há a segunda separação do escoamento no final do para-brisa. O valor máximo na base do para-brisa ($x = 1,25$ m) foi de -250 Pa, menor que os outros modelos e abaixo da pressão atmosférica, já que está toda esta região fica dentro de uma bolha de separação. Na parte inferior do modelo a pressão tem maiores variações já que a geometria não é completamente plana (na região entre os eixos a altura do solo é ligeiramente maior), variando entre -1500 Pa e -1000 Pa.

Da mesma forma que no modelo pick-up grande, a pressão na parte de cima só é menor do que na parte de baixo, gerando sustentação positiva, numa pequena região, entre $x = 1,5$ m e 1,75 m.

De modo geral, a pressão na parte superior apresentou maiores variações entre os modelos. Os modelos com ângulos e curvaturas mais suaves impõem menores perturbações ao escoamento, mas o escoamento com maior velocidade apresenta uma pressão menor, contribuindo para uma sustentação positiva. Por outro lado, a menor perturbação no escoamento é desejável para reduzir o arrasto, sugerindo que um equilíbrio deve ser atingido entre reduzir o coeficiente de arrasto sem gerar sustentação excessiva.

Em relação às pressões na parte inferior dos modelos, a diferença na altura do solo teve feito reduzido, de modo que para todos os modelos a pressão média é em torno de -1250 Pa. Segundo discutido a partir da Figura 2, um aumento na altura do solo não necessariamente implica em um aumento da pressão e redução do efeito do solo.

É importante lembrar que as características da geometria entre diferentes categorias de veículos não são resultado somente das condições aerodinâmicas. Os modelos de SUV e pick-ups geralmente utilizam um design mais agressivo, com linhas mais retas e raios de curvatura menores, para projetar uma imagem de força e robustez, enquanto a maior altura do solo é devido à uma proposta para a utilização fora de estrada.

4.2 Forças e Coeficientes de Reação

A Tabela 2 apresenta os valores das forças de reação e do coeficiente de sustentação para cada um dos eixos, calculados pelas equações 10 e 11, respectivamente.

Tabela 2 – Resultados das Forças e Coeficientes de Sustentação

Modelo	F_L [N/m]	R_f [N/m]	R_r [N/m]	C_{Lf}	C_{Lr}	Comparação de C_{Lf} em relação a C_{Lr}
I	-1195,38	-930,60	-256,78	-0,77	-0,21	3,67 vezes maior
II	-1856,70	-1404,29	-452,41	-1,04	-0,34	3,06 vezes maior
III	-2814,88	-2086,35	-728,53	-1,57	-0,55	2,85 vezes maior

As forças de sustentação e de reação são apresentadas em N/m, pois foi uma profundidade de 1m para a simulação bidimensional, de modo que todos os resultados são calculados por unidade de profundidade. Para obter-se um valor de força total sobre o veículo seria necessário multiplicar a força pela largura do veículo, ou, mais corretamente, sobre uma largura efetiva, que consideraria que a distribuição de pressão não é uniforme em toda a largura, mas se desenvolve até a linha central. Ainda, o comprimento diferente entre os modelos tem influência nos resultados de força (pois a área onde atuam as pressões é maior) e também dos coeficientes (já que o coeficiente é definido segundo a Equação 1, pela área frontal).

Os resultados da coluna mais à direita da Tabela 2 mostram que as forças (e coeficientes) de sustentação são 2,85 a 3,67 vezes maiores no eixo dianteiro do que no eixo traseiro. A maior sustentação sobre a frente do modelo já pôde ser percebida através dos gráficos de pressão analisados na Seção 4.1. Mesmo assim as reações têm sinal negativo para ambos os eixos, indicando um aumento da carga normal e, portanto, da aderência disponível.

4.3 Índice de Convergência de Malha

Os resultados obtidos aplicando a metodologia de cálculo para o GCI, descrita no Anexo B são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do Índice de Convergência de Malha (GCI)

Modelo	n	GCI_{21}	GCI_{21} (%)
I	6,58	3,7014e-05	0,0037
II	0,74	0,0174	2,3474
III	0,84	0,0900	3,7442

Estes resultados indicam que a malha mais fina apresenta um nível adequado de discretização espacial do domínio, se aproximando da condição teórica de uma malha contínua com uma variação sempre menor do que 4%. A Tabela 4 apresenta o valor exato da função, calculado a partir da extrapolação dos resultados, e o intervalo provável da solução do coeficiente de sustentação.

Tabela 4 – Resultados da função exata e do intervalo provável dos resultados

Modelo	f_{exact}	Intervalo Provável
I	-0,9837	[-0,9837, -0,9836]
II	-1,4126	[-1,4093, -1,3446]
III	-2,2192	[-2,1808, -2,0713]

Já que não estão disponíveis resultados que possam ser comparados diretamente com as análises realizadas, a utilização do índice de convergência de malha ajuda a validar os resultados obtidos, permitindo afirmar que os resultados devem estar no intervalo descrito na Tabela 4 com nível de confiança de 95%.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise simplificada do escoamento sobre o perfil de diferentes veículos utilizando a mecânica dos fluidos computacional. As simulações realizadas foram bidimensionais e utilizaram o modelo de turbulência $k-\omega$ SST. A partir dos resultados obtidos foi analisado o efeito das características da geometria para a sustentação aerodinâmica.

Os resultados mostram que na parte superior dos modelos as pressões e velocidades do escoamento foram bastante afetadas pela geometria. Os modelos com ângulos e transições mais suaves apresentaram maiores velocidades e menores pressões do escoamento, com uma contribuição positiva para a força de sustentação.

Na parte inferior dos modelos, as diferenças entre os ângulos de para-choques e na altura do solo tiveram menor efeito sobre as pressões e velocidades do escoamento. As velocidades foram sempre elevadas e a pressão reduzida tem uma contribuição negativa para a sustentação (*downforce*).

Assim, veículos com formas ditas “menos aerodinâmicas”, como linhas mais retas, transições mais agressivas e maior altura do solo, não necessariamente tem características aerodinâmicas menos desejáveis do ponto de vista da sustentação.

A metodologia de análise computacional utilizada, incluindo as condições de contorno, o modelo de turbulência, a malha computacional e outros parâmetros se mostraram adequados para obter os resultados desejados, atingindo os critérios de convergência da solução e bons resultados para a convergência da discretização espacial do problema.

Portanto, foi possível obter resultados qualitativos, como características e regiões de interesse para o escoamento (como regiões de altas pressões, separação de camada limite, entre outras), bem como resultados quantitativos de caráter preliminar ou para fins de comparação entre os perfis (como forças, coeficientes, entre outros). Por isso, devido a simplicidade para modelamento da geometria e ao custo computacional reduzido, a análise de CFD realizada se mostra como uma ferramenta muito interessante para a comparação e análise preliminar de geometrias em veículos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sequências para o estudo deste trabalho sugere-se uma comparação direta de análises 2D e 3D para a mesma geometria, investigando quais são os erros presentes nos resultados da análise simplificada. Além disso, também se sugere um estudo da influência de cada uma das simplificações no resultado final do problema. Como a análise empregada neste trabalho traz consigo várias simplificações, como por exemplo o movimento das rodas, o fluxo de ar no cofre do motor, o escoamento interno para arrefecimento do motor e para a cabine, a rugosidade das superfícies, entre outras, é importante saber quais simplificações podem ou não podem ser aplicadas para um nível de exatidão desejado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMCHUCK, Vagner. “**Estudo da Força de Arrasto sobre Veículos de Transporte de Pessoas empregando CFD**”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2014.

ANISH, A; SUTHEN, P.G.; VIJU, M.K. “**Modelling and Analysis of a Car for Reducing Aerodynamic Forces**”, IJETT, 2017.

ANSYS FLENT. “**Ansys Fluent Theory Guide**”, Release 2021R1, 2021.

ANSYS FLENT. “**Ansys Fluent User’s Guide**”, Release 2021R1, 2021.

DUARTE, Flávio Luçardo. “**Análise das Forças Aerodinâmicas sobre um Veículo de Competição empregando CFD**”. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2015.

FENABRAVE. “**Informativo - Emplacamentos**”, Ed. 216, 2021. Disponível em <fenabrave.org.br>.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. “**Introdução à Mecânica dos Fluidos**”, LTC, 8ª edição, 2004.

HEISLER, Heinsz. “**Advanced Vehicle Technology**”, Butterworth-Heinemann, 2ª edição, 2002.

HUCHO, Wolf-Heinrich, “**Aerodynamics of Road Vehicles**”, Annual Review of Fluid Dynamics, 1993.

LANFRIT, Marco. “**Best practice guidelines for handling automotive external aerodynamics in FLUENT**”, FLUENT Deutschland GmbH, Versão 1.2, 2005.

MENTER, F. R. “**Two-equation Eddy-viscosity Turbulence Models for Engineering Applications**”, AIAA Journal, Volume 2, nº 8, 1984.

PARAB, Akshay; SAKARWALA, Ammar; PASTE, Bhushan; PATIL, Vaibhav; “**Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent- Ansys 14.5**”, IJRMEE, 2014.

ROACHE, P. J. “**Verification and Validation in Computational Science and Engineering**”, Hermosa Publishers, 1994.

SCHUETZ, Thomas. “**Aerodynamics of Road Vehicles**”, SAE International, 5ª edição, 2015.

SLATER, John W. “**Examining Spatial (Grid) Convergence**”, NPARC Alliance CFD Verification and Validation, NASA, 2021. Disponível em <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html>>.

SLATER, John W. “**Uncertainty and Error in CFD Simulations**”, NPARC Alliance CFD Verification and Validation, NASA, 2021. Disponível em <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/errors.html>>.

SOLIMAN, Paulo Augusto. **“Estudo Numérico do Controle Passivo de Camada Limite via Geradores de Vórtices em Perfil Aerodinâmico de um Veículo de Competição”**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2018.

TASTAN, Umur. **“Investigation of Turbulence Models Used in Automotive Industry”**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Middle East Technology University, 2011.

VERMA, Rajesh P.; CHAUDHARY, Nitin Kumar; AVIKAL, Shwetank. **“Effect of direction of lip spoiler on the aerodynamic performance of a small passenger vehicle”**, Materials Today: Proceedings, 2020.

WINDSOR, S.C; Le GOOD, G.M. **“The Influence of Aerodynamic Lift on High Speed Stability of Passenger Cars”**, Conference Paper, 1993.

ANEXO A

O modelo de turbulência k - ω *SST* utiliza duas equações para resolver o problema de fechamento: as equações de transporte para a energia cinética turbulenta k , Equação A.1 e para a taxa de dissipação específica ω , Equação A.2

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega + G_{\omega b} \quad (\text{A.2})$$

onde ρ é a massa específica do fluido escoando, u é a velocidade, x é a posição, Γ_k e Γ_ω são a difusividade efetiva de k e ω , G_k e G_ω são referentes à produção de k e ω , Y_k e Y_ω são referentes à dissipação de k e ω pela turbulência, S_k e S_ω são termos fonte definidos, G_b e $G_{\omega b}$ representam efeitos de empuxo, e D_ω é um termo de difusão cruzada.

As difusividades efetivas são dadas pelas Equações A.3 e A.4

$$\Gamma_k = \mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (\text{A.3})$$

$$\Gamma_\omega = \mu \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (\text{A.4})$$

onde σ são os números de Prandtl turbulentos para k e ω e μ_t é a viscosidade turbulenta.

O modelo k - ω *SST*, inclui um limitador para a formulação de viscosidade turbulenta, conforme a Equação A.5, para melhor prever a separação do escoamento em superfícies.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left(\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right)} \quad (\text{A.5})$$

A função de mistura F_2 é dada pela Equação A.6

$$F_2 = \tanh(\phi_2^2) \quad (\text{A.6})$$

onde

$$\phi_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right) \quad (\text{A.7})$$

e y é a distância até a próxima superfície.

A produção de k e ω são definidas segundo as Equações A.8 e A.9.

$$G_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{A.8})$$

$$G_\omega = \frac{\alpha \alpha^*}{\nu_t} G_k \quad (\text{A.9})$$

A dissipação de k e ω são definidas por:

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (\text{A.10})$$

$$Y_\omega = \rho \beta \omega^2 \quad (\text{A.11})$$

As constantes do modelo são:

$$\sigma_{k,1} = 1,176; \sigma_{\omega,1} = 2; \sigma_{k,2} = 1; \sigma_{\omega,2} = 1,168 \quad (\text{A.12})$$

$$\alpha_1 = 0,31; \beta_{i,1} = 0,075; \beta_{i,2} = 0,0828 \quad (\text{A.13})$$

E ainda:

$$\alpha_\infty^* = 1; \alpha_\infty = 0,52; \alpha_0 = \frac{1}{9}; \beta_i = 0,072; R_\beta = 8 \quad (\text{A.14})$$

$$R_k = 6; R_\omega = 2,95; \zeta^* = 1,5; M_{t0} = 0,25; \sigma_k = 2; \sigma_\omega = 2 \quad (\text{A.15})$$

Fonte: *Ansys Fluent Theory Guide* (2021).

ANEXO B

O erro de discretização é o erro que ocorre pela representação das equações governantes do escoamento ou de outros modelos físicos, normalmente expressas como equações diferenciais, como expressões algébricas em um domínio discreto de espaço ou tempo (SLATER, 2021). O índice de convergência de malha (GCI) é um método para avaliar o erro de discretização espacial proposto por Roache (1998), sendo baseado nas extrapolações de Richardson. O GCI é utilizado em muitos trabalhos na área de aerodinâmica (ABRAMCHK, 2014; SOLIMAN; 2018).

Para uma razão de refinamento da malha constante (r), a ordem de convergência observada (n) é dada pela Equação B.1.

$$n = \frac{\ln\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right)}{\ln r} \quad (\text{B.1})$$

onde f_i , é a quantidade avaliada para a malha de índice i , e os índices indicam as três malhas analisadas, sendo 1 a malha mais fina e 3 a malha mais grosseira.

O erro relativo (ε) para a malha mais fina é dado pela Equação B.2, e conhecendo a ordem de convergência observada, o valor exato da função (f_{exact}), calculada para um domínio contínuo é estimado pela Equação B.3.

$$\varepsilon_{21} = \left| \frac{f_2 - f_1}{f_1} \right| \quad (\text{B.2})$$

$$f_{exact} = f_1 - \frac{f_2 - f_1}{r^n - 1} \quad (\text{B.3})$$

O índice de convergência de malha GCI é dado pela Equação B.4

$$GCI_{21} = \frac{F_s \varepsilon_{21}}{r^n - 1} \quad (\text{B.4})$$

onde F_s é um fator de segurança. O fator de segurança recomendado para uma análise com três malhas é $F_s = 1,25$ (SLATER, 2021). O intervalo provável para a função é então calculado pela Equação B.5.

$$[f_1(1 - GCI_{21}), f_1(1 + GCI_{21})] \quad (\text{B.5})$$

Segundo Schwer (2008), um fator de segurança de 1,25 pode ser entendido como um nível de confiança de 95% para este intervalo.