



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BERNARDO LIMA ALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PERFIL AERODINÂMICO NO CONSUMO DE  
COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES LEVES**

Recife  
2025

BERNARDO LIMA ALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PERFIL AERODINÂMICO NO CONSUMO DE  
COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES LEVES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de Pernambuco, como requisito  
parcial para a obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Barbosa Lopes Júnior.

Recife  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Alves, Bernardo Lima.

Análise da Influência do Perfil Aerodinâmico no Consumo de Combustível  
em Veículos Automotores Leves / Bernardo Lima Alves. - Recife, 2025.  
p. 63 : il., tab.

Orientador(a): Guilherme Barbosa Lopes Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica -  
Bacharelado, 2025.

Inclui referências, anexos.

1. Perfil aerodinâmico. 2. Consumo de combustível. 3. Computacional Fluid  
Dynamics. 4. Força de arrasto. 5. Força de sustentação. I. Lopes Júnior, Guilherme  
Barbosa. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

BERNARDO LIMA ALVES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO PERFIL AERODINÂMICO NO CONSUMO DE  
COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES LEVES**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de Pernambuco, Centro de  
Tecnologia e Geociências, como requisito  
parcial para a obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Guilherme Barbosa Lopes Júnior (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno Figueiredo (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dr. Marcus Costa de Araújo (Examinadora Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência do perfil aerodinâmico na eficiência de consumo de combustível de veículos automotores leves. A pesquisa iniciou-se com a definição de duas geometrias de estudo para serem modeladas tridimensionalmente. Os modelos são baseados em automóveis reais, visando comparar a variação em suas forças resistivas atuantes com a variação em seus consumos de combustível, para o ciclo de condução em estrada e o ciclo de condução urbana. A coleta de dados para as forças resistivas ocorre através de simulações numéricas em *Computacional Fluid Dynamics*, onde os modelos foram avaliados no teste de independência de malha, através do método *Grid Convergence Index*, e analisados em diferentes cenários de velocidade em regime permanente, extraindo resultados para a força de arrasto e a força de sustentação de cada. Os dados para o consumo de combustível são obtidos pelas informações divulgadas pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem veicular. As análises realizadas mostraram um aumento do consumo de combustível com o aumento da força de arrasto e a diminuição do consumo com o aumento da força de sustentação. Concluiu-se que a força de arrasto é um componente importante do consumo de combustível e que a força de sustentação também gera um impacto, porém reduzido, no consumo de combustível, uma vez que suas influências são maiores em velocidades mais elevadas.

**Palavras-chave:** Perfil aerodinâmico. Consumo de combustível. *Computacional Fluid Dynamics*. Força de arrasto. Força de sustentação.

## ABSTRACT

This work aims to analyze how aerodynamics profiles influence the efficiency in fuel consumption for light motor vehicles. The research begins by defining two case study geometries to be three-dimensional modeled. The models are based in real life automobiles, looking to compare the variation of their acting resistive forces and the variation of their fuel consumption, for highway driving cycles and urban driving cycles. The data collection for the resistive forces uses numerical simulations in Computational Fluid Dynamics, where models are evaluated for the grid independency test, through the Grid Convergence Index, and analyzed in different speed scenarios for a steady flow, extracting results for drag and lift forces. The data for fuel consumption are obtained through the information available in the *Programa Brasileiro de Etiquetagem veicular*. The analysis showed an increase in fuel consumption with the rise of drag force and a decrease in fuel consumption with the rise of lift force. In conclusion, the drag force is an important component of fuel consumption and the lift force also generates an impact, although a reduced one, in fuel consumption, as their influences are bigger in higher speeds.

**Key words:** Aerodynamic profile. Fuel consumption. Computational Fluid Dynamics. Drag force. Lift force.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Diagrama de forças atuantes em um veículo .....                                                                             | 21 |
| Figura 2: Fluxograma das etapas de pesquisa.....                                                                                      | 25 |
| Figura 3: Modelo Corolla .....                                                                                                        | 29 |
| Figura 4: Modelo Renegade .....                                                                                                       | 29 |
| Figura 5: Malha selecionada para o Modelo Corolla .....                                                                               | 32 |
| Figura 6: Malha selecionada para o Modelo Renegade .....                                                                              | 35 |
| Figura 7: Contorno de pressão a 100 km/h para o Modelo Corolla .....                                                                  | 39 |
| Figura 8: Contorno de pressão a 80 km/h para o Modelo Renegade.....                                                                   | 39 |
| Figura 9: Contorno de pressão a 100 km/h para o Modelo Renegade.....                                                                  | 40 |
| Figura 10: Linhas de velocidade do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZY para o Modelo Corolla.....              | 45 |
| Figura 11: Linhas de velocidade do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZX para o Modelo Corolla.....              | 45 |
| Figura 12: Linhas de velocidade do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZY para o Modelo Renegade.....             | 46 |
| Figura 13: Linhas de velocidade do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZX para o Modelo Renegade.....             | 46 |
| Figura 14: Energia cinética de turbulência no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZY para o Modelo Corolla.....                 | 47 |
| Figura 15: Energia cinética de turbulência no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZX para o Modelo Corolla.....                 | 48 |
| Figura 16: Energia cinética de turbulência no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZY para o Modelo Renegade.....                | 48 |
| Figura 17: Energia cinética de turbulência do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZX para o Modelo Renegade ..... | 49 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1: Informações sobre os modelos .....                                                                                                 | 26 |
| Tabela 4.1: Características dimensionais das malhas do Modelo Corolla .....                                                                    | 30 |
| Tabela 4.2: Índices GCI para as forças de arrasto e de sustentação para o Modelo Corolla .....                                                 | 32 |
| Tabela 4.3: Características dimensionais das malhas do Modelo Renegade .....                                                                   | 33 |
| Tabela 4.4: Índices GCI para as forças de arrasto e de sustentação Modelo Renegade .....                                                       | 34 |
| Tabela 4.5: Forças de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Corolla .....                                                    | 36 |
| Tabela 4.6: Constantes de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Corolla .....                                                | 37 |
| Tabela 4.7: Forças de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Renegade .....                                                   | 38 |
| Tabela 4.8: Constantes de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Renegade .....                                               | 41 |
| Tabela 4.9: Autonomia na cidade e na estrada para o Toyota Corolla e o Jeep Renegade .....                                                     | 41 |
| Tabela 4.10: Consumo em cada ciclo de condução para o Toyota Corolla e o Jeep Renegade .....                                                   | 42 |
| Tabela 4.11: Forças atuantes em cada ciclo de condução para o Modelo Corolla e o Modelo Renegade .....                                         | 43 |
| Tabela 4.12: Relação entre a força de arrasto e as forças resistivas em cada ciclo de condução para o Modelo Corolla e o Modelo Renegade ..... | 43 |
| Tabela 4.13: Variação do tipo de arrasto com a velocidade para o Modelo Corolla ..                                                             | 44 |
| Tabela 4.14: Variação do tipo de arrasto com a velocidade para o Modelo Renegade .....                                                         | 44 |
| Tabela 4.15: Componentes da força de resistência ao rolamento para o Modelo Corolla .....                                                      | 50 |
| Tabela 4.16: Componentes da força de resistência ao rolamento para o Modelo Renegade .....                                                     | 50 |
| Tabela 4.17: Componentes da força de resistência ao rolamento para o Modelo Corolla .....                                                      | 51 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 2.1: Velocidade em função do tempo no ciclo de condução em estrada .....                        | 23 |
| Gráfico 2.2: Velocidade em função do tempo no ciclo de condução urbana .....                            | 24 |
| Gráfico 4.1: Força de arrasto para cada malha .....                                                     | 31 |
| Gráfico 4.2: Força de sustentação para cada malha .....                                                 | 31 |
| Gráfico 4.3: Força de arrasto para cada malha .....                                                     | 33 |
| Gráfico 4.4: Força de sustentação para cada malha .....                                                 | 34 |
| Gráfico 4.5: Curva das forças de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Corolla .....  | 37 |
| Gráfico 4.6: Curva das forças de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Renegade ..... | 38 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                     |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                             | <b>10</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS .....                                                     | 11        |
| 1.1.1    | <b>Objetivo Geral .....</b>                                         | <b>11</b> |
| 1.1.2    | <b>Objetivos Específicos .....</b>                                  | <b>11</b> |
| 1.2      | JUSTIFICATIVAS .....                                                | 12        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                                  | <b>13</b> |
| 2.1      | FORÇA DE ARRASTO .....                                              | 13        |
| 2.2      | FORÇA DE SUSTENTAÇÃO.....                                           | 14        |
| 2.3      | REGIME PERMANENTE.....                                              | 14        |
| 2.4      | MODELOS DE TURBULÊNCIA <i>REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES</i>       | 15        |
| 2.4.1    | <b>Energia cinética de turbulência.....</b>                         | <b>17</b> |
| 2.4.2    | <b>Modelo <math>\kappa</math>-<math>\epsilon</math> RNG .....</b>   | <b>18</b> |
| 2.5      | MÉTODO <i>GRID CONVERGENCE INDEX</i> .....                          | 19        |
| 2.6      | FORÇAS ATUANTES EM UM AUTOMÓVEL .....                               | 20        |
| 2.7      | CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES LEVES.....           | 22        |
| 2.7.1    | <b>Ciclo de condução em estrada.....</b>                            | <b>22</b> |
| 2.7.2    | <b>Ciclo de condução urbana.....</b>                                | <b>23</b> |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                             | <b>25</b> |
| 3.1      | CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....                                     | 25        |
| 3.2      | ETAPAS DA PESQUISA E COLETAS DE DADOS.....                          | 25        |
| 3.2.1    | <b>Desenvolvimento dos modelos tridimensionais.....</b>             | <b>25</b> |
| 3.2.2    | <b>Construção das malhas .....</b>                                  | <b>27</b> |
| 3.2.3    | <b>Teste de independência de malha.....</b>                         | <b>27</b> |
| 3.2.4    | <b>Simulações numéricas com diferentes velocidades .....</b>        | <b>28</b> |
| 3.2.5    | <b>Análise dos resultados .....</b>                                 | <b>28</b> |
| <b>4</b> | <b>DISCUSSÕES E RESULTADOS OBTIDOS.....</b>                         | <b>29</b> |
| 4.1      | MODELOS DESENVOLVIDOS .....                                         | 29        |
| 4.2      | TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA .....                               | 30        |
| 4.2.1    | <b>Teste de independência de malha para o Modelo Corolla .....</b>  | <b>30</b> |
| 4.2.2    | <b>Teste de independência de malha para o Modelo Renegade .....</b> | <b>33</b> |
| 4.3      | CONSTANTE DE ARRASTO E CONSTANTE DE SUSTENTAÇÃO .....               | 35        |

|       |                                                                                                    |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.1 | Constantes para o Modelo Corolla.....                                                              | 36 |
| 4.3.2 | Constantes para o Modelo Renegade.....                                                             | 38 |
| 4.4   | RELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E AS FORÇAS<br>RESISTIVAS EM VEÍCULOS AUTOMORES LEVES ..... | 41 |
| 4.4.1 | Impacto da força de arrasto no consumo de combustível .....                                        | 43 |
| 4.4.2 | Impacto da força de sustentação no consumo de combustível.....                                     | 49 |
| 5     | CONCLUSÃO.....                                                                                     | 52 |
| 5.1   | LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS .....                                                               | 52 |
|       | REFERÊNCIAS.....                                                                                   | 53 |
|       | ANEXO A – VELOCIDADES NO CICLO DE CONDUÇÃO EM ESTRADA .....                                        | 58 |
|       | ANEXO B – VELOCIDADES NO CICLO DE CONDUÇÃO URBANA .....                                            | 61 |

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento energético de forma sustentável tem se tornado uma pauta cada vez mais discutida, uma vez que o constante crescimento da demanda energética começa a causar danos crescentes ao meio ambiente. Diante deste cenário, em dezembro de 2015, líderes de diversos países, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP21) em Paris, assinaram o Acordo de Paris. Uma das metas estipuladas pelo acordo é a emissão zero, visando neutralizar a emissão líquida de carbono na atmosfera terrestre (UNFCCC, 2015).

As emissões de carbono são cada vez mais frequentes devido à sua relação direta com o setor de transportes, o qual também passa por um aumento constante de demanda. O consumo de combustível fóssil em automóveis e outros meios de transporte libera para a atmosfera vários gases, destacando-se o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), um dos principais causadores do aumento do efeito estufa (Agarwal; Mustafi, 2021). Este efeito é o fenômeno de reabsorção de grandes comprimentos de onda oriundas da radiação solar. Quando atingem a Terra, essas ondas são refletidas de volta, entretanto parte das ondas não consegue escapar da atmosfera terrestre (Mitchell, 1989). A crescente emissão dos gases do efeito estufa (GEE) significa a maior absorção da radiação solar, causando, conseqüentemente, o aumento das temperaturas globais (Darkwah et al., 2018).

No Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024), 35,1% da oferta interna de energia é não renovável (petróleo e derivados), sendo então a principal fonte energética do país. Isso demonstra a dependência que existe por essas fontes. De acordo com o BEN, os meios de transporte de cargas e passageiros é o setor que mais demanda energia no Brasil, com 33%. Dentre o consumo total de energia do setor de transporte, apenas 22,5% são devido às fontes renováveis ( $\text{CO}_2$  ou ciclo neutro). Com base nesses dados, fica perceptível que é necessário buscar novas soluções para controlar as emissões de carbono.

A fim de alcançar novos resultados, uma estratégia que vem sendo promovida é a melhoria da eficiência nos processos energéticos. A Dinamarca, por exemplo, após a crise petrolífera em 1973, passou a investir em medidas de melhora no aproveitamento energético, resultando em uma estabilização da quantidade de combustível consumido por um período de mais de 30 anos, apesar do crescimento econômico da região (Lund, 2007). Enquanto isso, a Empresa de Pesquisa Energética

(EPE), define, no Caderno de Ações Norteadoras para o Avanço da Eficiência Energética no Brasil de 2024, eficiência energética como: “Realização de um serviço energético utilizando menos energia, mantendo o nível de conforto”. Ao relacionar o exemplo dinamarquês com esta definição, fica claro que é possível avançar no caminho de desenvolvimento sustentável, sem negligenciar as necessidades imediatas da sociedade e do indivíduo.

O estudo de perfis aerodinâmicos, em veículos que circulam nos meios urbanos, tem papel essencial para a redução da emissão de gases poluentes e melhoria na eficiência de consumo dos combustíveis fósseis (Shams Taleghani; Torabi, 2025). Nesse contexto, a diminuição das forças de resistência do ar durante o movimento do automóvel é uma das principais formas de atingir esta melhoria (Abinesh; Arunkumar, 2014). Para a realização de pesquisas na área, a utilização de ferramentas computacionais nas análises aerodinâmicas tem se tornado cada vez mais comum, pois o progresso tecnológico desses métodos permite maior precisão na descrição dos fenômenos (Shams Taleghani; Torabi, 2025). Percebe-se, portanto, que a identificação dos fatores que afetam a performance aerodinâmica de um automóvel, pode trazer resultados positivos para um desenvolvimento sustentável, especificamente na diminuição da emissão de gases poluentes.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O trabalho tem como objetivo analisar diferentes perfis aerodinâmicos em busca de um melhor entendimento da eficiência no consumo de combustível fóssil de veículos automotores leves.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos definidos para atingir o objetivo geral são:

- Definir geometrias para análise dos veículos estudados;
- Desenvolver diferentes cenários de velocidade para realização das simulações numéricas;

- Relacionar as características dos perfis aerodinâmicos com o consumo de combustível fornecido pelo PBE veicular;
- Identificar os aspectos aerodinâmicos que melhorariam a eficácia energética do automóvel.

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

Do ponto de vista ambiental, a melhoria da eficiência em processos energéticos e a diminuição das emissões de gases por meios de transporte são dois importantes tópicos de preocupação global, quando se discute um desenvolvimento sustentável. Nacionalmente, o país começa a incentivar soluções. De acordo com a Lei 10.847/2004 (Brasil, 2024): “promover estudos e produzir informações para subsidiar planos e programas de desenvolvimento energético ambientalmente sustentável, inclusive, de eficiência energética”.

De um ponto de vista comercial, as empresas buscam soluções aerodinâmicas viáveis e eficientes para seus automóveis como forma de tornar seus produtos mais atraentes para o mercado, ao minimizar os gastos de seus consumidores em combustíveis (Alam; Watkins, 2013).

É, portanto, do contexto da necessidade ambiental e da busca econômica para melhorar a eficácia do consumo energético em automóveis, que surge o tema do presente trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão discutidos os principais conceitos teóricos utilizados durante a realização deste trabalho.

### 2.1 FORÇA DE ARRASTO

A força de arrasto, de acordo com Çengel e Cimbala (2011), é a resistência que um fluido exerce ao movimento de um corpo em seu meio. Analisando esta definição no escopo dos meios de transporte, percebe-se que existe uma forte ligação entre o arrasto e a eficiência do movimento.

Em situações de velocidade constante, a exemplo de um veículo em uma rodovia federal, a força de arrasto se torna um fator mais proeminente no consumo de combustível do carro, pois sem demandas de aceleração e, considerando um trecho plano, a resistência ao arrasto é a fonte que mais demanda potência do motor (Salati; Schito; Cheli, 2017).

A força de arrasto,  $F_d$ , é calculada conforme a Eq. (1) (Fox; McDonald; Prittchard, 2011):

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \cdot v^2 \cdot A \cdot \rho \quad (1)$$

onde  $A$  é a área de contato do fluido na superfície em movimento,  $v$  é a velocidade relativa do movimento entre o corpo e o fluido,  $\rho$  é a densidade do fluido e  $C_d$  é o coeficiente de arrasto.

O coeficiente de arrasto é um parâmetro adimensional definido pela geometria do corpo, sendo fortemente influenciado por irregularidades superficiais e curvas (Tran-Cong; Gay; Michelides, 2003).

A força de arrasto pode ser dividida em um veículo, de maneira geral, em arrasto de pressão e arrasto de atrito. O arrasto de pressão origina da interação entre o fluido e a superfície perpendicular ao escoamento, causando a formação de vórtices após a passagem do corpo. O arrasto de atrito é a relação que surge do contato entre

fluido e a superfície paralela ao escoamento, resultando em tensões cisalhantes na superfície e o desenvolvimento de camadas limites no escoamento (Cienslinki et al., 2016).

## 2.2 FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

Os fluidos, dadas suas propriedades viscosas, têm a característica de seguir a geometria de um corpo durante um escoamento. Isto gera forças tangenciais em todas superfícies do veículo, porém isolando planos opostos e paralelos, a força resultante será sempre na superfície que o fluido tem menor pressão (Fox; McDonald; Pritchard, 2011).

De forma análoga à força de arrasto, a força de sustentação é calculada de acordo com a Eq. (2):

$$F_l = \frac{1}{2} C_l \cdot v^2 \cdot A \cdot \rho \quad (2)$$

onde a diferença é a existência do coeficiente de sustentação ( $C_l$ ), substituindo  $C_d$ . Este coeficiente é também influenciado fortemente pela geometria do corpo (Çengel; Cimbala, 2011).

Em automóveis, a força de sustentação tem diferentes consequências de acordo com seu sentido. Quando negativa, é chamada de downforce e aumenta o atrito entre os pneus e o solo, facilitando o controle, a frenagem e a realização de curvas. Quando positiva, gera mais instabilidades, entretanto causa melhoras na velocidade em linha reta (Howell; Le Good, 1999). Automóveis de competição buscam ter força de sustentação negativa, enquanto automóveis de passeios, normalmente, têm força de sustentação levemente positiva (Fu; Uddin; Robinson, 2018).

## 2.3 REGIME PERMANENTE

O regime permanente é o estado de escoamento em que as propriedades do volume de controle não variam com o tempo. Esta condição serve para a densidade, velocidade, pressão, energia, entre outros (Fox; McDonald; Pritchard, 2011). As propriedades podem sofrer variações com a mudança de posição ao longo do

escoamento, entretanto, em um mesmo ponto, essas propriedades não irão variar com o tempo (Çengel; Cimbala, 2011).

Em *Computacional Fluid Dynamics* (CFD), simulações que usam o regime permanente são comumente unidas aos modelos de turbulência RANS, pois apresentam soluções adequadas com poucos gastos computacionais (Guo et. al, 2024).

## 2.4 MODELOS DE TURBULÊNCIA *REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES*

Os fenômenos de turbulência são fisicamente descritos pelas equações de conservação de massa, do momento e de energia de Navier-Stokes. A solução, entretanto, dessas equações é complexa, uma vez que escoamento turbulentos são instáveis, tridimensionais e seus vórtices têm uma grande variedade de tamanho (Wilcox, 2001). Os modelos de turbulência surgem desse contexto, visando capturar a física necessária para entender o fenômeno com o modelo matemático mais simples possível, de forma que a solução possa ser encontrada sem a necessidade de gastos computacionais excessivos (Durbin; Shih, 2005).

Os modelos *Reynolds-averaged Navier-Stokes* (RANS) são aqueles que partem da junção de dois princípios: as equações médias de Reynolds e as equações de Navier-Stokes. A equação da conservação da massa e do momento de Navier-Stokes, para um fluido incompressível, podem ser vistas nas Eq. (3), Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6), respectivamente (Fox; McDonald; Pritchard, 2011):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

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

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  como as velocidades direcionais para as coordenadas cartesianas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.  $p$  é a pressão,  $\mu$  é a viscosidade do fluido e  $g$  é a aceleração gravitacional.

Considerando, porém, um escoamento unidimensional e incompressível, obtém-se a Eq (7) e a Eq. (8), para a conservação da massa e do momento:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial t_{ji}}{\partial x_j} \quad (8)$$

Para a Eq. (8), têm-se que  $t_{ji}$  é o tensor de tensões viscoso, definido pelo tensor de tensões,  $s_{ji}$ , visto na Eq (9) e Eq. (10).

$$t_{ji} = 2\mu s_{ji} \quad (9)$$

$$s_{ji} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

As equações médias de Reynolds surgem a partir da ideia de que, em escoamentos turbulentos, velocidade, pressão e as tensões cisalhantes, podem ser decompostas em um valor médio e um valor flutuante. Este valor médio pode ser obtido através de uma média temporal, média espacial ou média de conjunto. A média temporal é comumente utilizada em escoamentos turbulentos que não apresentam muita variação com o tempo. A Eq. (11) demonstra a função média no tempo,  $F_T(x)$ , de uma variável instantânea do escoamento,  $f(x, t)$ , enquanto as Eq. (12), Eq. (13) e Eq (14) demonstram a decomposição da velocidade, pressão e do tensor de tensões em seus valores médios e seus valores flutuantes (Wilcox, 2006):

$$F_T(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x, t) dt \quad (11)$$

$$u_i = U_i + u'_i \quad (12)$$

$$p = P + p' \quad (13)$$

$$s_{ij} = S_{ij} + S'_{ij} \quad (14)$$

onde  $U_i$  é a velocidade média e  $u'_i$  é a oscilação da velocidade da partícula em relação a velocidade média,  $P$  é a pressão média e  $p'$  é a oscilação da pressão da partícula em relação a pressão média,  $S_{ij}$  é o tensor de tensões médio e  $S'_{ij}$  é a oscilações das tensões do tensor em relação ao tensor de tensões médio. A partir das Eq. (12), Eq. (13) e Eq. (14), e aplicando-as à Eq. (8), chega-se à Eq. (15), chamada de equação RANS (Wilcox, 2006).

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ji} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \quad (15)$$

Importante destacar que para a equação RANS é assumido que as médias das flutuações são zero, o que leva à origem do termo  $-\overline{u'_j u'_i}$ . Este é denominado de tensor de tensões específico de Reynolds,  $\tau_{ij}$ , e como abordá-lo é o foco dos modelos de turbulência RANS (Wilcox, 2006). Estes modelos, de forma geral, apresentam boas performances em escoamentos limitados por paredes, utilizando pouco poder computacional, em comparação com os outros tipos, o que explica o motivo de serem utilizados há décadas (Menter, 2011).

#### 2.4.1 Energia cinética de turbulência

A energia cinética de turbulência,  $\kappa$ , é definida por Launder e Spalding (1974) pela Eq. (16):

$$\kappa = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (16)$$

Percebe-se que a energia cinética de turbulência de uma partícula é diretamente proporcional ao quadrado das flutuações de velocidade na turbulência, logo  $\kappa$  funciona como um indicador da intensidade de turbulência.

A dissipação de energia cinética de turbulência ocorre através da formação de vórtices menores dentro de vórtices mais largos, gerando uma cascata de energia. Quando presentes em vórtices de pequena escala, a energia cinética de turbulência é, então, dissipada na forma de energia interna (Richardson, 2007). A Eq. (17) define a taxa de dissipação de energia cinética de turbulência,  $\epsilon$  (Launder; Spalding, 1974). Onde  $\nu$  é a viscosidade cinética.

$$\varepsilon = \nu \overline{\left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)} \quad (17)$$

#### 2.4.2 Modelo κ-ε RNG

O modelo κ-ε foi desenvolvido por Launder e Spalding (1974). O modelo foi idealizado com o objetivo de solucionar κ e ε. Para isso, o modelo fornece duas equações: a equação da energia cinética de turbulência, Eq. (18), a qual origina da relação entre κ e  $\tau_{ii}$  ( $\tau_{ii} = -2\kappa$ ), e a equação da taxa de dissipação, Eq. (19). Sendo  $\nu_t$  a viscosidade cinética de turbulência, Eq. (20), e  $\sigma_\kappa$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $C_\mu$  e  $\sigma_\varepsilon$  são coeficientes adimensionais (Wilcox, 2006).

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + U_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\kappa} \right) \partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (18)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{\kappa} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (19)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (20)$$

Para a Eq. (18), o primeiro e o segundo termo representam, respectivamente, a variação de κ no tempo e o transporte de κ ao longo de um campo médio de velocidades. O terceiro termo é a produção média de energia cinética de turbulência. O quarto termo é a taxa de dissipação de energia de turbulência. O último termo representa a difusão molecular, o transporte turbulento e a difusão da pressão. A Eq. (19) é vista como empírica, uma vez que utiliza os coeficientes para tratar de termos complexos.

O modelo κ-ε RNG surge da teoria de renormalização de grupo. Utiliza-se agora um novo coeficiente  $C_{\varepsilon 2}$ , Eq. (21), definido pelo parâmetro λ, mostrado na Eq. (22).  $\bar{C}_{\varepsilon 2}$ , β e λ<sub>0</sub> são coeficientes empíricos adimensionais (Yakhot; Smith, 1992).

$$C_{\varepsilon 2} \equiv \bar{C}_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \lambda^3 \left( 1 - \frac{\lambda}{\lambda_0} \right)}{1 + \beta \lambda^3} \quad (21)$$

$$\lambda \equiv \frac{\kappa}{\varepsilon} (2S_{ij}S_{ji})^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

## 2.5 MÉTODO GRID CONVERGENCE INDEX

A independência de malha é um passo importante para as simulações computacionais de dinâmicas de fluidos. Uma malha convergente e independente é aquela que as soluções encontradas se adequam às necessidades do problema, não precisando de mais refinamento (Larsson; Toosi, 2018).

O conceito de independência de malha está relacionado com o erro de discretização. O erro de discretização, ou erro numérico, surge da diferença na solução encontrada pela simulação numérica e pela solução exata determinada pelas equações físicas que regem o problema (Ghosal, 1995). O refinamento da malha é uma das principais ferramentas utilizadas para reduzir o erro de discretização (Baker; Kelly; O'Sullivan, 2020). A independência de malha é obtida à medida que o refinamento gera malhas consecutivas com soluções próximas, indicando uma aproximação da solução numérica à solução exata (Rakowitz, 2002).

O método *Grid Convergence Index* (GCI) é uma forma de estimar o erro numérico de uma malha, determinando se malhas distintas atingem a mesma solução. O método foi desenvolvido com o objetivo de padronizar os valores obtidos nos testes de convergência (Roache, 1994). Ainda de acordo com Roache (1994), o cálculo do método é feito utilizando as Eq. (23), Eq. (24) Eq (25) e Eq. (26):

$$h_i = \left[ \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \Delta V_j \right]^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1} \quad (24)$$

$$\varepsilon = \frac{f1-f2}{f1} \quad (25)$$

$$GCI = \frac{F_s |\varepsilon|}{r^p - 1} \quad (26)$$

onde  $F_s$  é um fator de segurança;  $f1$ ,  $f2$  e  $f3$  são os valores obtidos para uma variável em cada uma das malhas;  $h$  é denominado de espaçamento médio, pois é

obtido a partir da razão entre a soma do volume de cada elemento de malha ( $\Delta V_j$ ) e o número total de elementos;  $r$  é a razão entre o espaçamento médio de duas malhas, onde a malha mais fina será sempre o denominador. O cálculo de  $p$ , a ordem de precisão do sistema, é realizado de acordo com a Eq. (27) e Eq. (28), sendo baseado no método da extrapolação de Richardson (Celik, et al., 2008), utilizando a resolução numérica de iteração do ponto fixo para solucionar a equação:

$$s = \text{sign}\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right) \quad (27)$$

$$p = \left| \ln \left| \frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1} \right| + \ln \left( \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \right| \cdot \frac{1}{\ln(r_{21})} \quad (28)$$

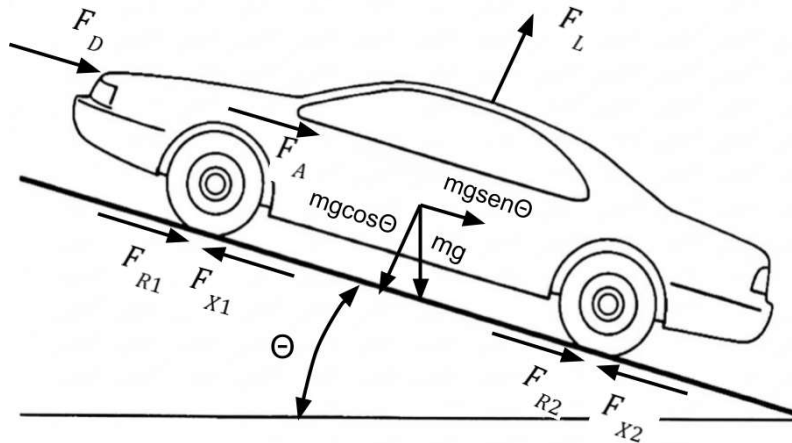
A Eq. (27) é expressa por uma função computacional (*sign*), a qual retorna -1 para valores negativos, 1 para valores positivos e 0 para valores iguais a zero.

A utilização do método GCI é muito comum para validar a aplicabilidade de uma malha em ambiente de simulação numérica.

## 2.6 FORÇAS ATUANTES EM UM AUTOMÓVEL

As principais forças de resistência ao movimento de um carro são o arrasto aerodinâmico, a resistência à rolagem, a inércia e a inclinação. Quando um carro estiver em baixas velocidades, a resistência predominante é à rolagem, enquanto em altas velocidades o arrasto aerodinâmico predomina, considerando uma velocidade constante (Filippone; Mohammed-Kassim, 2010). A força de sustentação, por sua vez, impacta diretamente na carga existente nos pneus (Buchheim; Maretzke; Piatek, 1985). Um diagrama de forças está demonstrado pela Figura 1:

Figura 1: Diagrama de forças atuantes em um veículo



Fonte: Adaptado Gillespie (1992)

onde  $m$  é a massa,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\theta$  é a inclinação do solo,  $F_R$  é a resistência ao rolamento e  $F_A$  é a força inercial.  $F_D$  e  $F_L$ , dados pelas Eq. (1) e Eq. (2) respectivamente, são a força de arrasto e sustentação.  $F_X$  é a soma das forças de atrito entre o pneu dianteiro ( $F_{X1}$ ) e traseiro ( $F_{X2}$ ) com o solo, o qual permite o movimento do carro.

A força de resistência ao rolamento, a força da gravidade no eixo x e a força inercial são chamadas de forças resistivas ( $F_{RES}$ ) e podem ser calculados pelas Eq. (29), Eq. (30), Eq. (31) e Eq. (32), respectivamente (Mohammed-Kassim; Filippone, 2010).

$$F_R = (-mg + F_L)C_R \cos(\theta) \quad (29)$$

$$F_{GX} = mg \sin(\theta) \quad (30)$$

$$F_A = m \frac{dV}{dt} \quad (31)$$

$$F_{RES} = F_D + F_R + F_A + F_{GX} \quad (32)$$

A força inercial,  $F_A$ , corresponde à força necessária para acelerar o automóvel. A resistência ao rolamento se refere à perda de energia que ocorre durante o movimento do pneu. Isto ocorre devido à deformação da área de contato do pneu com o pavimento durante o movimento e à dissipação de energia térmica da borracha (Andersen et al., 2015). O coeficiente de resistência ao rolamento é adimensional,

calculado de acordo com a Eq. (33), onde  $V$  está em m/s, sendo multiplicado por um coeficiente empírico, em s/m (Gillespie, 1992):

$$C_R = 0,0041 + 0,0000917 V \quad (33)$$

Considerando, portanto, um automóvel em regime permanente e sem inclinação, é possível obter, através da 2ª Lei de Newton, a Eq. (34):

$$\sum F_{X_{RESULTANTES}} = 0; F_X - F_D - F_R = 0; F_X = F_{RES} \quad (34)$$

## 2.7 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM VEÍCULOS AUTOMOTORES LEVES

O PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem) veicular é um programa que visa fornecer informações de consumo energético de veículos automotores leves aos consumidores. Para isso, o programa categoriza os automóveis em diferentes níveis de consumo de combustível, assim como disponibiliza valores de referência para o consumo, tanto de gasolina, quanto de etanol, em ciclo de condução urbana e em ciclo de condução de estrada (INMETRO, 2022).

O INMETRO (2022) ainda prevê que os ensaios sejam realizados de acordo com a norma ABNT NBR 7024, a fim de garantir a padronização dos resultados. Importante ressaltar que a maior parte dos valores obtidos estão em uma faixa em torno de 20% do consumo real observado nesses veículos. O comportamento do motorista é uma característica individual e irreplicável que, juntamente com a diferença entre as condições climáticas do ensaio e as condições climáticas reais, ajudam a explicar essa variação.

### 2.7.1 Ciclo de condução em estrada

A ABNT NBR 7024 define critérios para realização da medição de consumo de combustível em veículos automotores leves. Entre as disposições estabelecidas por essa norma, destaca-se a disponibilização da tabela de velocidade instantânea pelo tempo para o ciclo de condução de estrada (Anexo A) com medição por dinamômetro de chassi.

O ciclo de condução em estrada é composto por sequências de aceleração, desaceleração e manutenção de velocidade de cruzeiro, com variação do tempo, velocidade inicial e velocidade final dessas sequências de forma não repetitiva (ABNT NBR 7024, 2017).

O Gráfico 2.1 mostra a variação da velocidade com o tempo de acordo com as velocidades instantâneas fornecidas pelo Anexo A.

Gráfico 2.1: Velocidade em função do tempo no ciclo de condução em estrada



Fonte: Adaptado ABNT NBR (2017)

A ABNT NBR 7024 (2017) ainda prevê que, em um ensaio, este ciclo é repetido duas vezes: a primeira como um ciclo de aquecimento e em seguida como ciclo de teste.

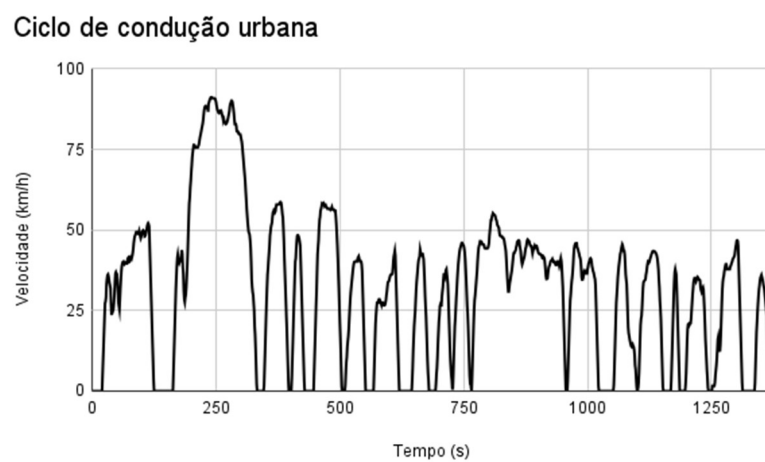
### 2.7.2 Ciclo de condução urbana

Apesar de o cálculo do consumo de combustível ser definido pela NBR 7024, as coordenadas de velocidade em função do tempo para o ciclo de condução urbana (Anexo B) com medição por dinamômetro de chassi são determinadas de acordo com a ABNT NBR 6601 (2021).

O ciclo de condução urbana é caracterizado por sequências de regime de marcha lenta, aceleração e desaceleração, com variações não repetitivas do período de duração e velocidade de cada (ABNT NBR 6601, 2021).

O Gráfico 2.2 mostra a variação da velocidade com o tempo de acordo com as velocidades instantâneas fornecidas pelo Anexo B.

Gráfico 2.2: Velocidade em função do tempo no ciclo de condução urbana



Fonte: Adaptado ABNT NBR (2017)

Comparativamente com o ciclo de condução em estrada, percebe-se que o ciclo de condução urbana apresenta mais acelerações e desacelerações, levando a menores períodos de manutenção de velocidade de cruzeiro, além de momentos de velocidade nula ao longo do ciclo.

### 3 METODOLOGIA

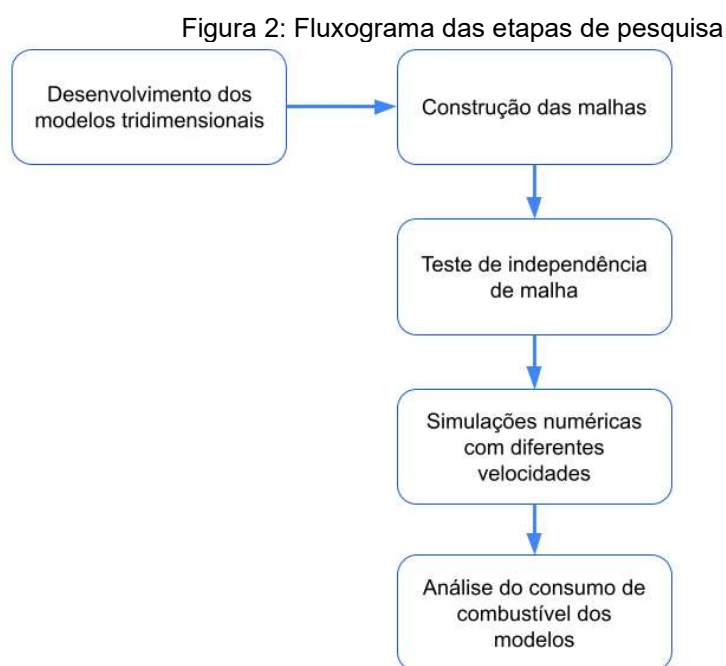
Este capítulo visa explicar a classificação, as etapas e os métodos aplicados para o desenvolvimento da pesquisa.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa é descritiva quanto aos seus objetivos, qualitativa e quantitativa em sua abordagem, e experimental quanto a seus procedimentos técnicos. O método científico utilizado é o indutivo.

#### 3.2 ETAPAS DA PESQUISA E COLETAS DE DADOS

A Figura 2 demonstra o fluxograma das etapas da pesquisa:



Fonte: Autoria própria (2025)

##### 3.2.1 Desenvolvimento dos modelos tridimensionais

O desenvolvimento dos modelos tridimensionais ocorre a partir da definição das geometrias de estudo. Para isso, a primeira geometria de estudo escolhida foi o

veículo Toyota Corolla GR-S 2024, automóvel da categoria Grande (Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, 2024). A segunda geometria de estudo definida foi o veículo Jeep Renegade Sport, automóvel da categoria Utilitário Esportivo Compacto (INMETRO, 2024). As informações dimensionais, usadas para o desenvolvimento dos modelos, e os valores de massa, utilizados nas análises dos resultados, foram disponibilizadas pelo Manual do Proprietário Corolla (2024) e pelo Manual do Proprietário Jeep Renegade (2024), respectivamente, podendo ser vistas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Informações sobre os modelos

| MODELO   | MASSA<br>(kg) | ALTURA<br>(mm) | LARGURA<br>(mm) | COMPRIMENTO<br>(mm) | DISTÂNCIA<br>DO SOLO<br>(mm) |
|----------|---------------|----------------|-----------------|---------------------|------------------------------|
| Corolla  | 1410          | 1455           | 2079            | 4635                | 148                          |
| Renegade | 1468          | 1696           | 2023            | 4268                | 192                          |

Fonte: Autoria própria (2025)

A construção dos modelos foi feita utilizando o software de modelagem tridimensional *Space Claim* disponível no *Ansys 2025*. Durante o desenvolvimento, a fim de não construir estruturas sobrecarregadas de informações, optou-se por um detalhamento maior na carroceria, uma vez que é a parte mais impactante no estudo aerodinâmico. Pneus, rodas, assoalho e a região traseira do carro, portanto, tem um nível de complexidade geométrica inferior, já que têm menor influência nos resultados finais.

É importante destacar que a escolha por uma simplicidade maior em certas áreas dos automóveis modelados resulta em uma maior facilidade de processamento das etapas seguintes, seja para a construção da malha, seja para a realização das simulações aerodinâmicas. Além disso, as informações presentes nos manuais do proprietário são limitadas, portanto, algumas aproximações geométricas tiveram que ser feitas durante a modelagem.

O modelo baseado no Toyota Corolla GR-S será, daqui em diante, referido como Modelo Corolla, enquanto o modelo baseado no Jeep Renegade Sport será referido como Modelo Renegade.

### 3.2.2 Construção das malhas

A malha é desenvolvida com a ferramenta *Mesh* do *Ansys* 2025. A malha emula um túnel de vento retangular, portanto as faces laterais são consideradas como regiões de parede, enquanto a face frontal será a entrada do escoamento e a face traseira, a saída. O automóvel é, também, considerado como parede, entretanto em uma região interna da malha. Os elementos de malha são tetraédricos.

Como está sendo utilizada a versão estudantil do *Ansys* 2025, as malhas aptas para simulações são limitadas a 1 milhão de elementos. As regiões de contato, entre fluido e superfície, e nas mudanças de geometria, devem ter uma maior concentração de elementos em uma malha mais refinada.

O controle do número de elementos das malhas do Modelo Corolla foi feito utilizando a taxa de crescimento dos elementos, isto é, a partir de um tamanho mínimo, os elementos irão aumentar com a proporção definida pela taxa de crescimento. A partir da primeira malha gerada, houve um aumento gradual da taxa de crescimento, cada aumento gerando uma nova malha. Desta forma foram desenvolvidas um total de 7 malhas, onde a primeira malha contém o maior número de elementos e este número segue decrescendo até a sétima malha.

O Modelo Renegade teve, inicialmente, o controle do número de elementos feito pela taxa de crescimento. Entretanto, no desenvolvimento da quarta malha, houve um erro em sua geração. Para corrigir esse problema, alterou-se o ângulo normal de curvatura de  $18^\circ$ , o valor padrão, para  $18,2^\circ$ , pois isso permite que um elemento tenha menos pontos ao redor de uma curvatura, perdendo, então, um pouco do refinamento.

Assim como o Modelo Corolla, o Modelo Renegade tem em sua primeira malha o maior número de elementos e na sétima malha, o menor, decrescendo ao longo do das gerações das malhas.

### 3.2.3 Teste de independência de malha

O teste de independência de malha é feito com o método GCI. Para realização desse teste, as sete malhas de cada modelo foram submetidas a simulações utilizando a ferramenta *Fluent* do *Ansys* 2025. As condições de simulação (regime

permanente com velocidade de 80 km/h, o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG e 3500 iterações) são idênticas para todas as malhas. A escolha por este modelo de turbulência e por este número de iterações se deu pelos seus bons desempenhos em experiências prévias com o *software*. Malhas consecutivas, de ambos os modelos, têm uma diferença no número de elementos entre 20 mil e 35 mil.

O GCI é calculado usando tanto a força de arrasto, quanto a força de sustentação, como a variável  $f$ , visto na Eq. (23), pois são as variáveis predominantes no foco da pesquisa. O fator de segurança,  $F_s$ , é igual a 1,25, usado para duas ou mais malhas (Roache, 1998).

A malha escolhida para dar sequência à pesquisa deve estar em uma zona de estabilização dos resultados, indicando a sua convergência. Nos casos de adequação de mais de uma malha, o nível de refinamento também é um fator importante para a escolha.

### 3.2.4 Simulações numéricas com diferentes velocidades

Os cenários de velocidade escolhidos buscam compreender como a mudança na velocidade afeta os fenômenos atuantes nos modelos. Os cenários são desenvolvidos para se ter incrementos de 20 km/h na velocidade, iniciando a 40 km/h, até 120 km/h, o que totaliza 5 cenários de velocidade constante distintos.

A única variação entre cenários é a velocidade, portanto, assim como na etapa de teste de independência, as simulações numéricas foram feitas em regime permanente, com o modelo de turbulência  $\kappa$ - $\epsilon$  RNG e com 3500 iterações para cada cenário, utilizando a ferramenta *Fluent* do *Ansys* 2025.

Esta é uma etapa importante, pois permite relacionar a mudança de comportamento do escoamento, a variação das forças e a dissipação de energia, com a velocidade.

### 3.2.5 Análise dos resultados

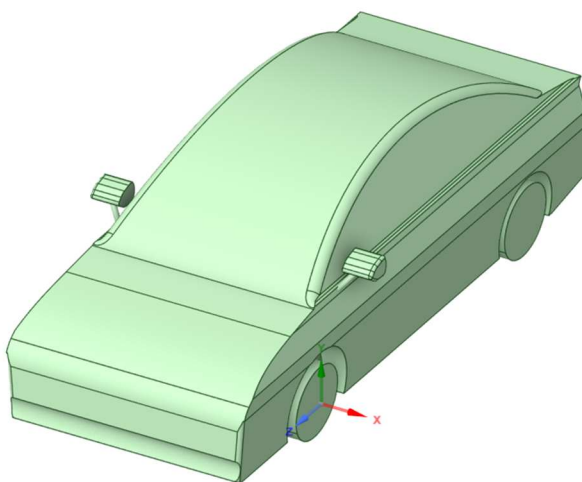
A extração de figuras relevantes para a análise dos resultados foi feita com a ferramenta *Result* do *Ansys* 2025.

## 4 DISCUSSÕES E RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 MODELOS DESENVOLVIDOS

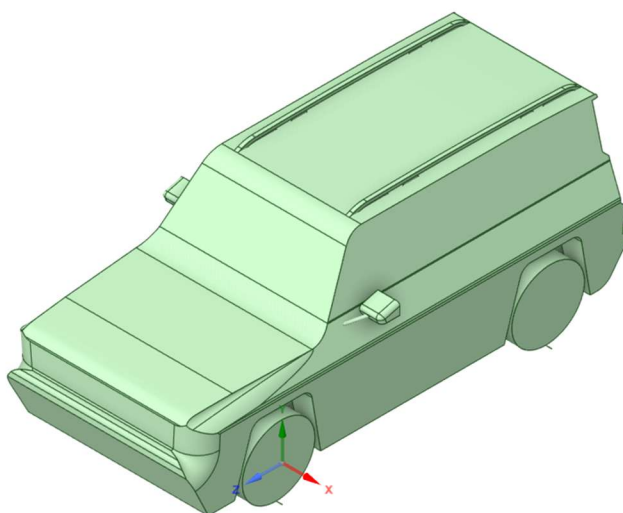
A Figura 3 mostra o modelo tridimensional desenvolvido com base no Corolla, já a Figura 4 mostra o modelo tridimensional desenvolvido com base no Renegade.

Figura 3: Modelo Corolla



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 4: Modelo Renegade



Fonte: Autoria própria (2025)

Comparativamente, o Modelo Renegade é mais alto, enquanto o Modelo Corolla é mais comprido e tem o assoalho mais próximo do chão. Vale ainda destacar que, como visto na Figura 4, o Modelo Renegade tem mais detalhes frontais e a presença de racks, enquanto o Modelo Corolla não os tem.

## 4.2 TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA

### 4.2.1 Teste de independência de malha para o Modelo Corolla

As características de desenvolvimento das malhas (taxa de crescimento, ângulo normal de curvatura e número de elementos) podem ser vistos na Tabela 4.1.

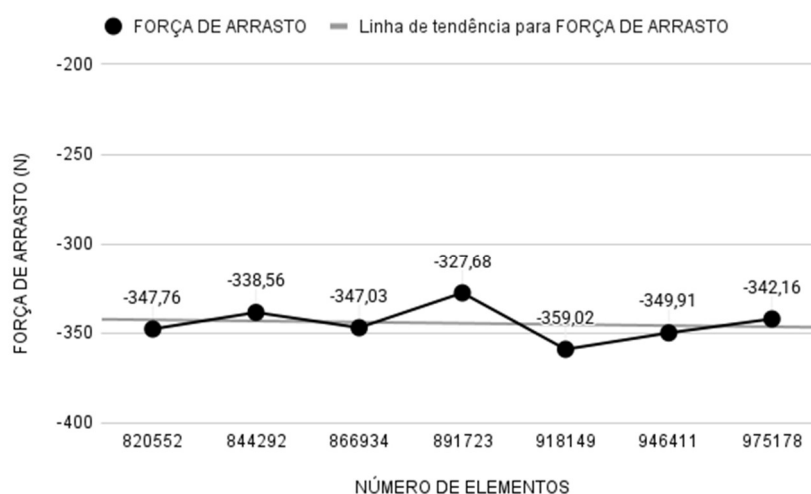
Tabela 4.1: Características dimensionais das malhas do Modelo Corolla

| <b>MALHA</b> | <b>TAXA DE CRESCIMENTO</b> | <b>ÂNGULO NORMAL DE CURVATURA (°)</b> | <b>NÚMERO DE ELEMENTOS</b> |
|--------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Malha 1      | 1,225                      | 18                                    | 975178                     |
| Malha 2      | 1,23                       | 18                                    | 946411                     |
| Malha 3      | 1,235                      | 18                                    | 918149                     |
| Malha 4      | 1,24                       | 18                                    | 891723                     |
| Malha 5      | 1,245                      | 18                                    | 866934                     |
| Malha 6      | 1,25                       | 18                                    | 844292                     |
| Malha 7      | 1,255                      | 18                                    | 820552                     |

Fonte: Autoria própria (2025)

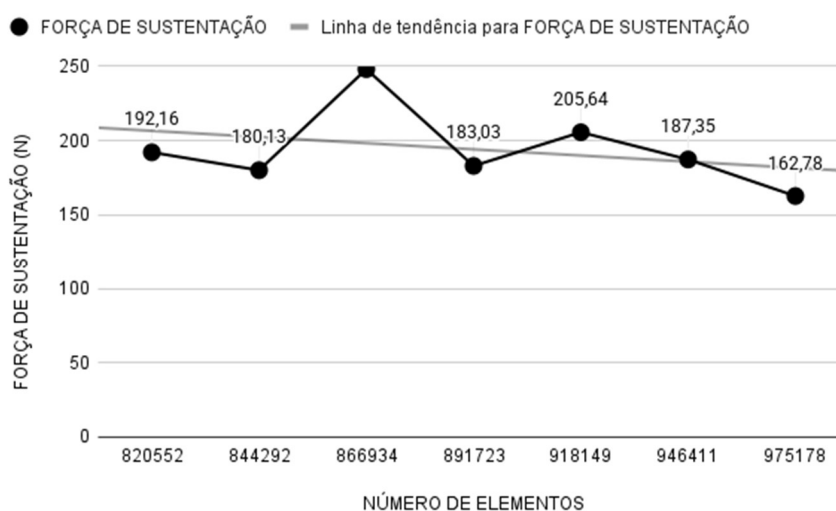
O Gráfico 4.1 mostra a variação da força de arrasto de acordo com o número de elementos, enquanto o Gráfico 4.2 mostra a variação da força de sustentação de acordo com o número de elementos.

Gráfico 4.1: Força de arrasto para cada malha



Fonte: Autoria própria (2025)

Gráfico 4.2: Força de sustentação para cada malha



Fonte: Autoria própria (2025)

Observando os valores do Gráfico 4.1, percebe-se que não há praticamente nenhuma variação da força de arrasto com o refinamento das malhas, explicitado por uma linha de tendência aproximadamente constante. Entretanto, ao observar o Gráfico 4.2, é possível perceber que a Malha 5 obteve um valor superior para a força de sustentação. Analisando-se a linha de tendência, vê-se um decaimento dessa força com o refinamento das malhas. A Tabela 4.2 mostra os valores obtidos para o método GCI, usando tanto a força de arrasto, quanto a força de sustentação, como variáveis.

Tabela 4.2: Índices GCI para as forças de arrasto e de sustentação para o Modelo Corolla

| <b>GCI</b> | <b>FORÇA DE ARRASTO</b> | <b>FORÇA DE SUSTENTAÇÃO</b> |
|------------|-------------------------|-----------------------------|
| $GCI_{56}$ | 0,369                   | 0,063                       |
| $GCI_{45}$ | 0,061                   | 9,649                       |
| $GCI_{34}$ | 0,181                   | 0,07                        |
| $GCI_{23}$ | 0,013                   | 0,505                       |
| $GCI_{12}$ | 0,177                   | 0,52                        |

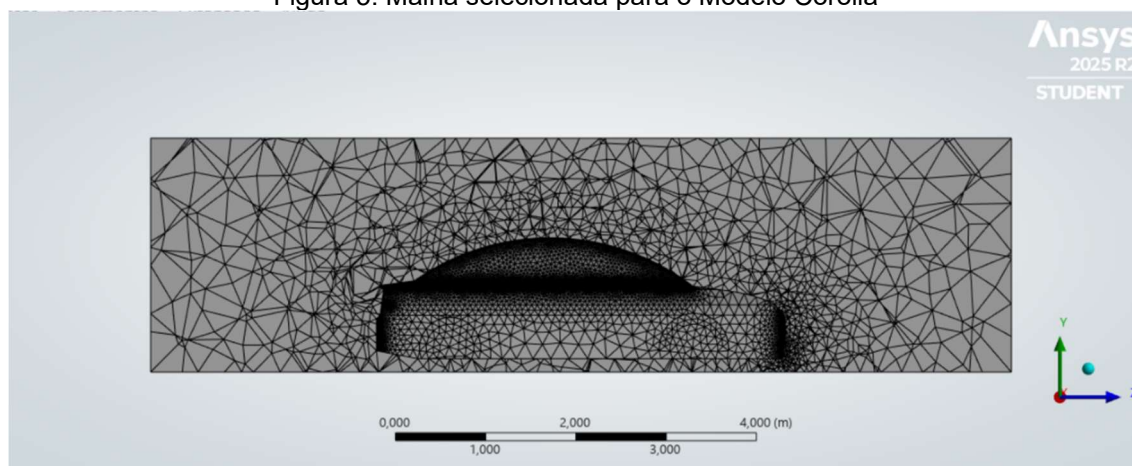
Fonte: Autoria própria (2025)

Desta forma, fica possível observar que o  $GCI_{45}$  para a força de sustentação, pelo fato da Malha 5 ter tido um valor para esta força maior que os demais, é o único que teve um índice de erro maior. Os demais resultados do GCI demonstram erros baixos, indicando uma boa convergência das malhas.

A malha selecionada para ser utilizada nas simulações seguintes foi a Malha 2. Por ter apresentado bons índices de GCI, assim como resultados adequados para a força de arrasto e de sustentação, além de um grau de refinamento maior, em comparação com as outras, pode-se concluir que esta é uma malha adequada para uso.

Pela Figura 5 é possível visualizar a malha desenvolvida, destacando a maior concentração de elementos em regiões de maiores mudanças geométricas.

Figura 5: Malha selecionada para o Modelo Corolla



Fonte: Autoria própria (2025)

### 4.2.2 Teste de independência de malha para o Modelo Renegade

As características de desenvolvimento das malhas (taxa de crescimento, ângulo normal de curvatura e número de elementos) podem ser vistos na Tabela 4.3.

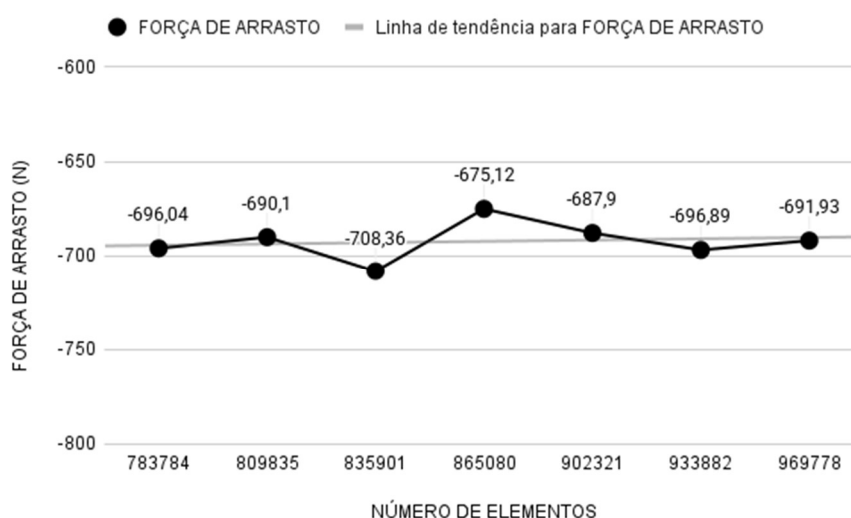
Tabela 4.3: Características dimensionais das malhas do Modelo Renegade

| MALHA   | TAXA DE CRESCIMENTO | ÂNGULO NORMAL DE CURVATURA (°) | NÚMERO DE ELEMENTOS |
|---------|---------------------|--------------------------------|---------------------|
| Malha 1 | 1,215               | 18                             | 969778              |
| Malha 2 | 1,22                | 18                             | 933882              |
| Malha 3 | 1,225               | 18                             | 902321              |
| Malha 4 | 1,23                | 18,2                           | 865080              |
| Malha 5 | 1,235               | 18,2                           | 835901              |
| Malha 6 | 1,24                | 18,2                           | 809835              |
| Malha 7 | 1,245               | 18,2                           | 783784              |

Fonte: Autoria própria (2025)

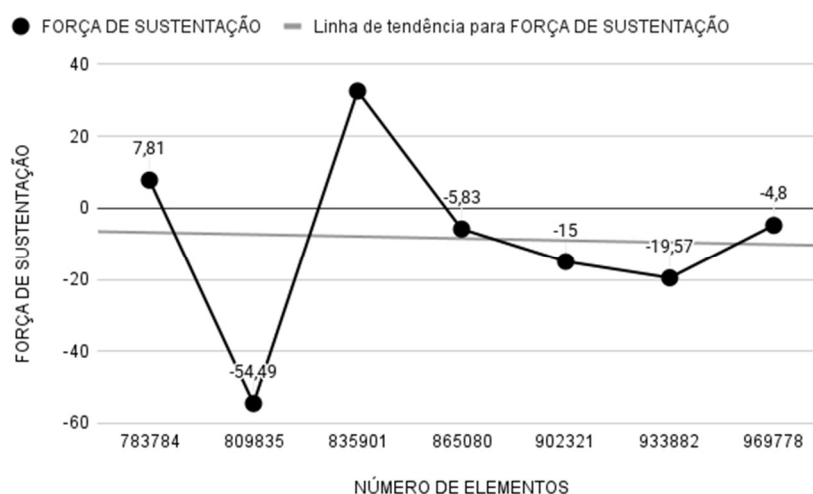
O Gráfico 4.3 mostra a variação da força de arrasto de acordo com o número de elementos, enquanto o Gráfico 4.4 mostra a variação da força de sustentação de acordo com o número de elementos.

Gráfico 4.3: Força de arrasto para cada malha



Fonte: Autoria própria (2025)

Gráfico 4.4: Força de sustentação para cada malha



Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se, pelo Gráfico 4.3, que os resultados obtidos para a força de arrasto são muito similares, independentemente do grau de refinamento. Observando o Gráfico 4.4, percebe-se que os valores de força de sustentação para a Malha 5 e para a Malha 6 fogem do esperado, uma vez que as demais malhas tiveram resultados próximos de zero. A linha de tendência do Gráfico 4.4 mostra que o refinamento das malhas tem resultados mais distantes do zero. A Tabela 4.4 mostra os valores obtidos para o método GCI, usando tanto a força de arrasto, quanto a força de sustentação, como variáveis.

Tabela 4.4: Índices GCI para as forças de arrasto e de sustentação Modelo Renegade

| GCI        | FORÇA DE ARRASTO | FORÇA DE SUSTENTAÇÃO |
|------------|------------------|----------------------|
| $GCI_{56}$ | 0,015            | 8,211                |
| $GCI_{45}$ | 0,08             | 5,997                |
| $GCI_{34}$ | 0,011            | 0,141                |
| $GCI_{23}$ | 0,114            | 0,53                 |
| $GCI_{12}$ | 0,01             | 1,917                |

Fonte: Autoria própria (2025)

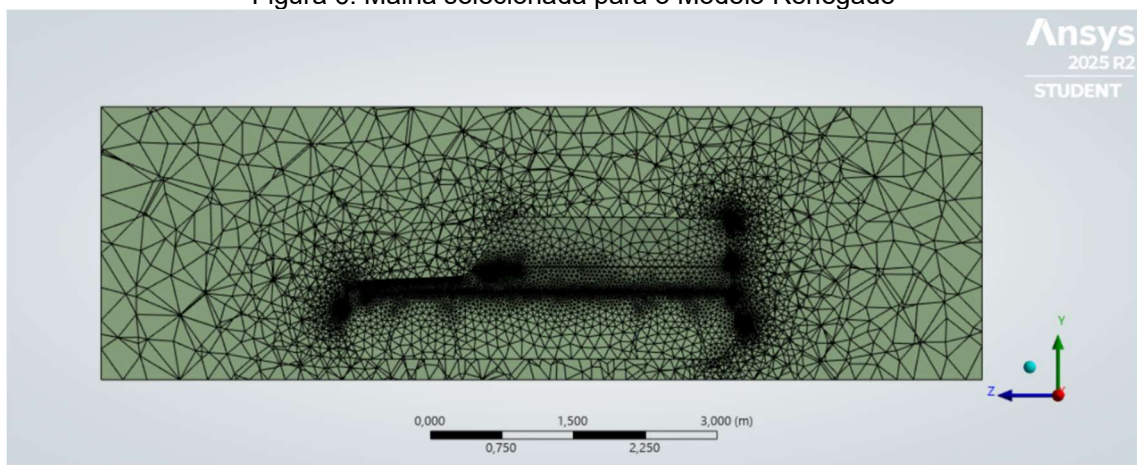
O efeito dos valores discrepantes da força de sustentação para a Malha 5 e Malha 6 podem ser observados pelo  $GCI_{45}$  e  $GCI_{56}$ , os quais mostram índices de erro relevantes. Os baixos índices do GCI para a força de arrasto e para os demais índices

GCI da força de sustentação são esperados, dada a pouca variação dos valores obtidos para as forças.

A malha escolhida para dar continuidade às simulações foi a Malha 2. Esta foi a malha escolhida, pois apresenta baixos índices de GCI, valores adequados para as forças e um elevado refinamento. Infere-se, portanto, que esta é uma malha adequada para uso.

Pela Figura 6 é possível visualizar a malha desenvolvida, destacando a maior concentração de elementos em regiões de maiores mudanças geométricas.

Figura 6: Malha selecionada para o Modelo Renegade



Fonte: Autoria própria (2025)

#### 4.3 CONSTANTE DE ARRASTO E CONSTANTE DE SUSTENTAÇÃO

A força de arrasto é calculada com a Eq. (1). Percebe-se, porém, que a área de contato com o fluido,  $A$ , a densidade do ar,  $\rho$ , e o coeficiente de arrasto,  $C_D$ , não variam. Logo a constante de arrasto,  $K_A$ , é definida pela Eq. (35), sendo calculada a partir da Eq. (36):

$$K_A = \frac{\rho C_D A}{2} \quad (35)$$

$$K_A = \frac{F_D}{V^2} \quad (36)$$

De maneira análoga, pode-se achar a constante de sustentação,  $K_S$ , pela Eq. (37) e calculá-la pela Eq. (38):

$$K_S = \frac{\rho C_L A}{2} \quad (37)$$

$$K_S = \frac{F_L}{V^2} \quad (38)$$

A definição dessas constantes permite que as forças sejam achadas em função apenas da velocidade, sem a necessidade de realizar novas simulações computacionais.

#### 4.3.1 Constantes para o Modelo Corolla

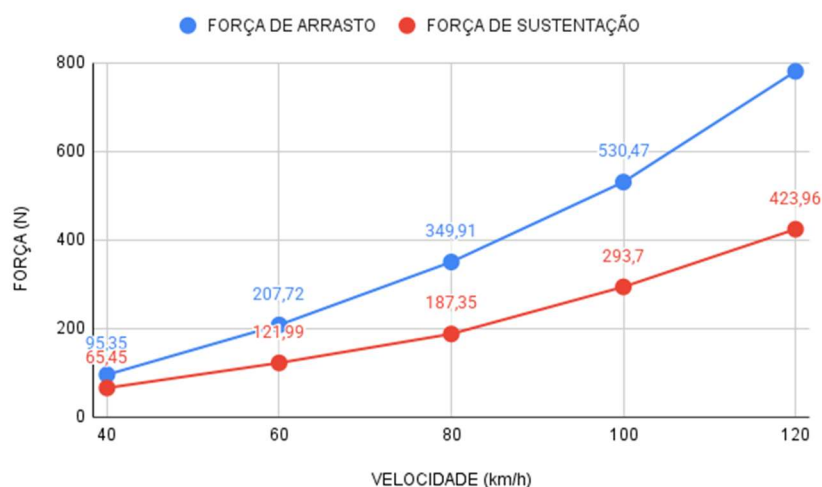
A Tabela 4.5 mostra os valores das forças de arrasto e de sustentação para cada cenário de velocidade, enquanto o Gráfico 4.5 mostra a variação dessas forças com a variação da velocidade. O sinal negativo da força de arrasto indica apenas o sentido da força.

Tabela 4.5: Forças de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Corolla

| VELOCIDADE (km/h) | FORÇA DE ARRASTO (N) | FORÇA DE SUSTENTAÇÃO (N) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|
| 40                | -95,35               | 65,45                    |
| 60                | -207,72              | 121,99                   |
| 80                | -349,91              | 187,35                   |
| 100               | -530,47              | 293,7                    |
| 120               | -780,53              | 423,96                   |

Fonte: Autoria própria (2025)

Gráfico 4.5: Curva das forças de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Corolla



Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que ambas as curvas tendem a crescer, o que faz sentido, uma vez que essas forças variam com o quadrado da velocidade. Utilizando a Eq. (36) e a Eq. (37), a Tabela 4.6 mostra os valores obtidos para as constantes de arrasto e sustentação em cada cenário:

Tabela 4.6: Constantes de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Corolla

| VELOCIDADE (km/h) | $K_A$ (kg/m) | $K_s$ (kg/m) |
|-------------------|--------------|--------------|
| 40                | -0,772       | 0,53         |
| 60                | -0,748       | 0,439        |
| 80                | -0,709       | 0,38         |
| 100               | -0,687       | 0,381        |
| 120               | -0,702       | 0,382        |

Fonte: Autoria própria (2025)

Percebe-se que há muita similaridade nos valores obtidos tanto para a constante de arrasto, quanto para a constante de sustentação. Isto indica que as soluções encontradas estão de acordo com o esperado. A constante de arrasto a ser utilizada por este modelo ( $K_{AC}$ ) é determinada pela média das constantes de arrasto dos cenários de velocidade. Já a constante de sustentação a ser utilizada por este modelo ( $K_{SC}$ ), é determinada pela média das constantes de sustentação dos cenários de velocidade. Obtendo, portanto:

$$K_{AC} = -0,724 \text{ kg/m}$$

$$K_{SC} = 0,422 \text{ kg/m}$$

O sinal negativo para  $K_{AC}$  indica apenas que a força é contrária ao movimento.

### 4.3.2 Constantes para o Modelo Renegade

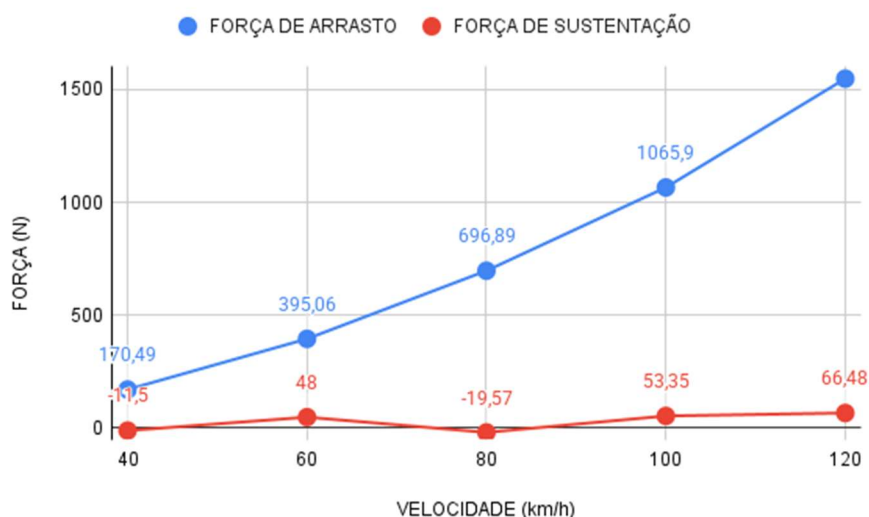
A Tabela 4.7 mostra os valores das forças de arrasto e de sustentação para cada cenário de velocidade, enquanto o Gráfico 4.6 mostra a variação dessas forças com a variação da velocidade. O sinal negativo da força de arrasto indica apenas o sentido da força.

Tabela 4.7: Forças de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Renegade

| VELOCIDADE (km/h) | FORÇA DE ARRASTO (N) | FORÇA DE SUSTENTAÇÃO (N) |
|-------------------|----------------------|--------------------------|
| 40                | -170,49              | -11,50                   |
| 60                | -395,06              | 48,00                    |
| 80                | -696,89              | -19,57                   |
| 100               | -1065,90             | 53,35                    |
| 120               | -1548,01             | 66,48                    |

Fonte: Autoria própria (2025)

Gráfico 4.6: Curva das forças de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Renegade



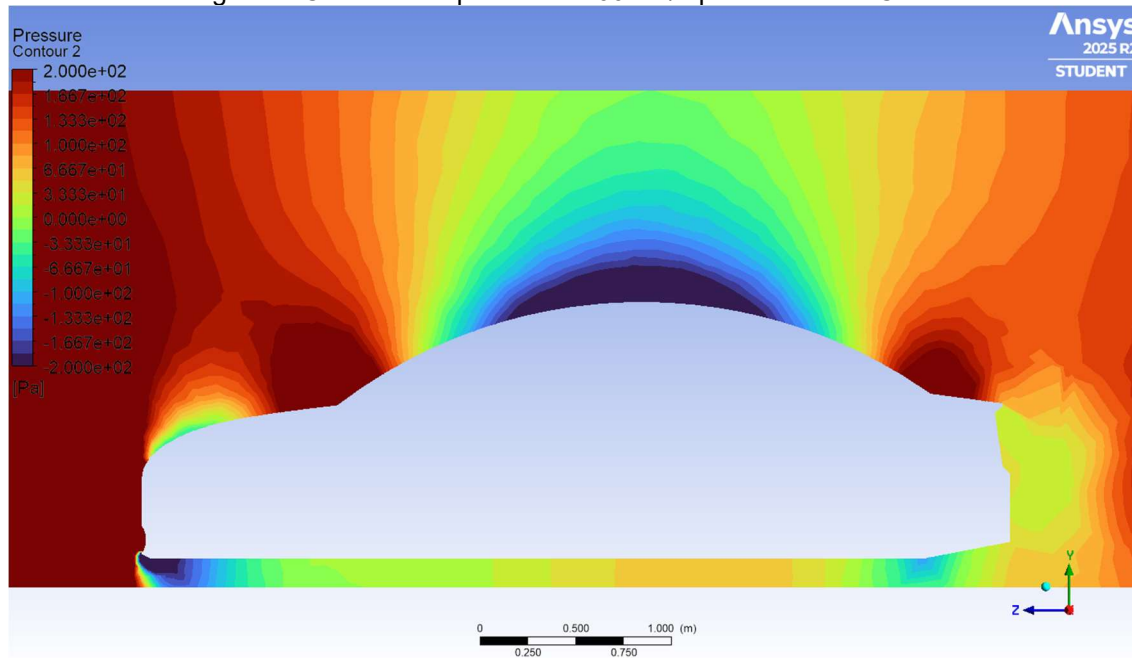
Fonte: Autoria própria (2025)

Enquanto a força de arrasto tem o comportamento de crescimento já esperado, a força de sustentação oscila entre valores positivos e negativos em torno do zero.

A Figura 7 mostra o contorno de pressões no plano YZ localizado na seção média do Modelo Corolla para uma velocidade de 100 km/h. A Figura 8 e a Figura 9

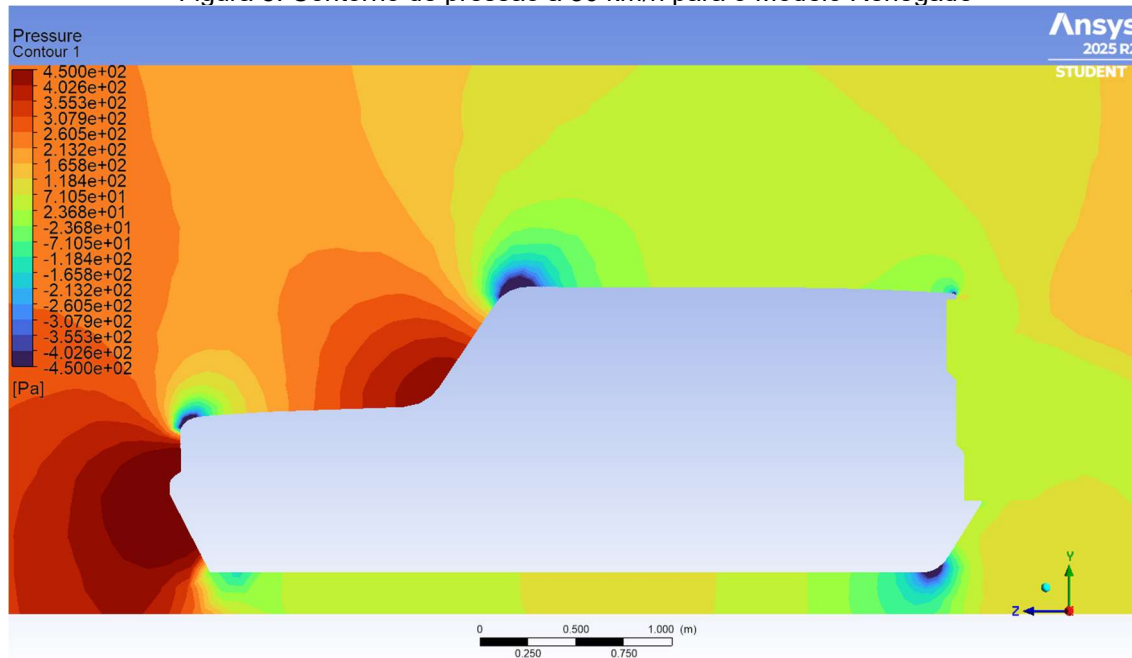
mostram o contorno de pressões no plano YZ localizado na seção média do Modelo Renegade para velocidades de 80km/h e 100 km/h, respectivamente.

Figura 7: Contorno de pressão a 100 km/h para o Modelo Corolla



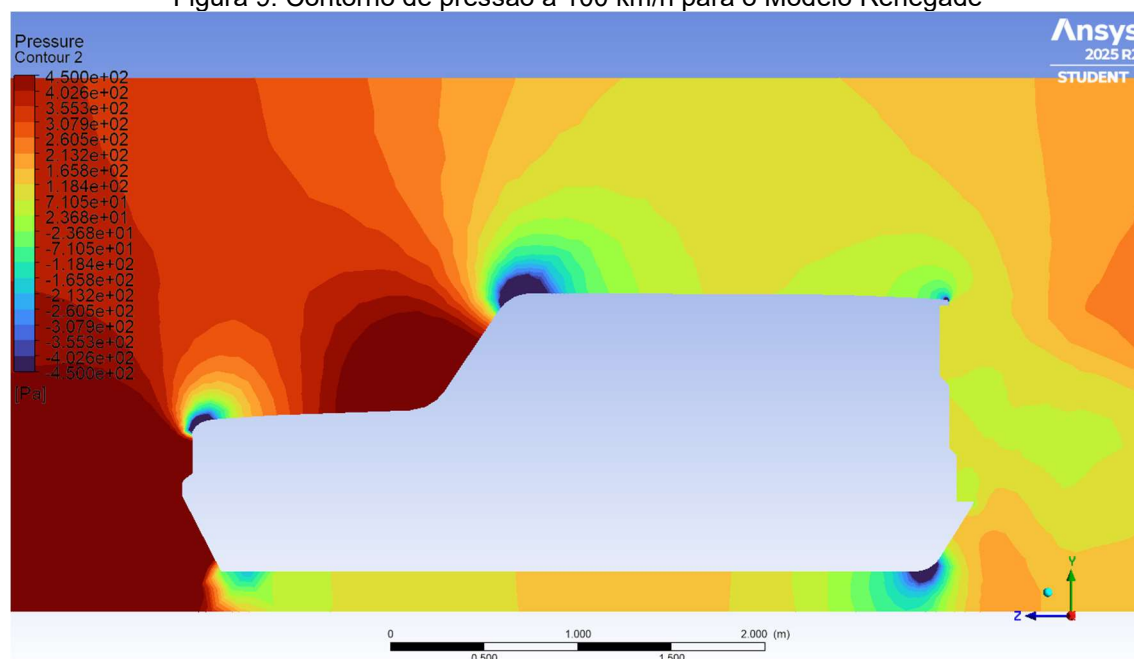
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 8: Contorno de pressão a 80 km/h para o Modelo Renegade



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 9: Contorno de pressão a 100 km/h para o Modelo Renegade



Fonte: Autoria própria (2025)

Observando a Figura 7, percebe-se que as regiões imediatamente acima e abaixo do modelo apresentam zonas de pressão bastante distintas entre si. Apesar de as partes frontal e traseira do modelo terem pressão mais alta na região superior, a área do teto do modelo tem uma zona de pressão relativa menor que -200 Pa, significativamente menor que a sua respectiva região inferior. Isto explica, portanto, o movimento ascendente do fluido em grande parte do assoalho do modelo, o que levou ao resultado da força de sustentação positiva neste cenário ( $F_L = 293,7 \text{ N}$ ).

Observando a Figura 8 e a Figura 9, percebe-se uma zona de maior pressão no fim do capô e início do para-brisa do modelo em comparação com essa região inferior, enquanto o teto tem uma zona com pressão menor em comparação com sua contraparte inferior. Ao contrário do Modelo Corolla, o Modelo Renegade não apresenta um claro indicador do movimento resultante do fluido, portanto o valor resultante está bastante próximo do zero, o que gera oscilações nas soluções encontradas. Isto é explicitado pela existência de valores tanto positivos, quanto negativos para a força de sustentação nos diferentes cenários, validando o cálculo da constante de sustentação através da média.

A Tabela 4.8 expõe os valores obtidos nas simulações, para o Modelo Renegade, utilizando diferentes cenários de velocidade.

Tabela 4.8: Constantes de arrasto e de sustentação para cada velocidade no Modelo Renegade

| VELOCIDADE (km/h) | $K_A$ (kg/m) | $K_s$ (kg/m) |
|-------------------|--------------|--------------|
| 40                | -1,381       | -0,093       |
| 60                | -1,422       | 0,173        |
| 80                | -1,411       | -0,040       |
| 100               | -1,381       | 0,070        |
| 120               | -1,395       | 0,060        |

Fonte: Autoria própria (2025)

Seguindo o mesmo procedimento do Modelo Corolla, obtêm-se:

$$K_{AR} = -1,398 \text{ kg/m}$$

$$K_{SR} = 0,034 \text{ kg/m}$$

O sinal negativo para  $K_{AR}$  indica que a força é contrária ao movimento. Como esperado,  $K_{SR}$  é um valor próximo a zero.

#### 4.4 RELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E AS FORÇAS RESISTIVAS EM VEÍCULOS AUTOMORES LEVES

A Tabela 4.9 mostra a autonomia de gasolina, em km/L, do Toyota Corolla GR-S 2024 e do Jeep Renegade Sport 2024 para a cidade e para a estrada, de acordo com os dados do PBE veicular (2024):

Tabela 4.9: Autonomia na cidade e na estrada para o Toyota Corolla e o Jeep Renegade

| MODELO                   | AUTONOMIA NA<br>CIDADE (km/L) | AUTONOMIA NA<br>ESTRADA (km/L) |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Toyota Corolla GR-S 2024 | 12,3                          | 14,9                           |
| Jeep Renegade Sport 2024 | 10,9                          | 12,7                           |

Fonte: Adaptado INMETRO (2024)

A fim de comparar o consumo dos carros em função do tempo, a relação, demonstrada pela Eq. (39), é utilizada:

$$C = \frac{V}{A_T} \quad (39)$$

onde o consumo  $C$  é obtido em L/h através da razão entre a velocidade,  $V$ , em km/h e autonomia,  $A_T$ , em km/L. O consumo passa a ser diretamente proporcional à velocidade, em análises sem aceleração.

O consumo calculado pela Eq. (39), entretanto, não é uma representação real do consumo de combustível daquele automóvel. Por desconsiderar as variações de velocidade durante o ciclo, o consumo,  $C$ , é apenas uma forma alternativa de observar os dados já existentes de autonomia. O objetivo desta transformação é, portanto, facilitar a comparação dos resultados obtidos entre os modelos, a fim de analisar a variação das forças resistivas e do consumo com o aumento da velocidade.

Com base no Gráfico 2.1 e no Gráfico 2.2, as velocidades médias,  $\bar{V}$ , para os ciclos de condução urbana e em estrada foram obtidas a partir da soma da velocidade em cada ponto dividido pelo tempo total do ciclo. Sendo assim:

$$\bar{V}_{URBANO} = 31,48 \text{ km/h}$$

$$\bar{V}_{ESTRADA} = 77,58 \text{ km/h}$$

Utilizando as velocidades médias e as autonomias da Tabela 4.10 na Eq. (36), obtêm-se o consumo médio de cada modelo para cada ciclo de condução. Esses valores estão expostos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Consumo em cada ciclo de condução para o Toyota Corolla e o Jeep Renegade

| MODELO                   | CICLO DE CONDUÇÃO | CONSUMO (L/h) |
|--------------------------|-------------------|---------------|
| Toyota Corolla GR-S 2024 | Urbana            | 2,56          |
| Jeep Renegade Sport 2024 | Urbana            | 2,89          |
| Toyota Corolla GR-S 2024 | Em estrada        | 5,21          |
| Jeep Renegade Sport 2024 | Em estrada        | 6,11          |

Fonte: Autoria própria (2025)

Comparando o consumo em ciclo de condução urbana, percebe-se que o Renegade consome em média 0,33 L/h a mais que o Toyota, enquanto na estrada a diferença sobe para 0,9 L/h, um aumento de 272,73% entre os dois modelos. Percebe-se, portanto, que o aumento do consumo cresceu junto à velocidade média e que o Renegade foi mais impactado por esse crescimento.

Considerando a velocidade média para cada ciclo de consumo é possível calcular a força de arrasto, de sustentação e de resistência ao rolamento, através das Eq. (36), Eq. (38) e Eq. (29). Assim, é também possível calcular as forças resistivas atuantes contra o carro, em regime permanente, a partir da Eq. (32).

A Tabela 4.11 mostra as forças de arrasto, de sustentação, de resistência ao rolamento e resistivas para os modelos, em função da velocidade média de cada ciclo.

Tabela 4.11: Forças atuantes em cada ciclo de condução para o Modelo Corolla e o Modelo Renegade

| MODELO          | $\bar{V}$ (km/h) | $F_D$ (N) | $F_L$ (N) | $F_R$ (N) | $F_{RES}$ (N) |
|-----------------|------------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| Modelo Corolla  | 31,48            | -55,36    | 32,27     | -67,65    | -123,01       |
| Modelo Renegade | 31,48            | -106,90   | 2,60      | -70,58    | -177,48       |
| Modelo Corolla  | 77,58            | -336,23   | 195,98    | -82,85    | -419,08       |
| Modelo Renegade | 77,58            | -649,23   | 15,79     | -87,41    | -736,64       |

Fonte: Autoria própria (2025)

Para a velocidade média em ciclo de condução urbana, a diferença entre as forças resistivas do Modelo Renegade e do Modelo Corolla é de 54,47 N. Esta diferença para a velocidade média em ciclo de condução em estrada, porém, aumenta para 317,56 N, um crescimento de 583%.

O crescimento na diferença entre as forças resistivas atuantes em cada modelo, com o aumento da velocidade, pode ser uma das causas para o aumento na diferença de consumo de combustível entre o Renegade e o Corolla em cada ciclo. O Renegade, desta forma, aparenta ser mais impactado pelo aumento da velocidade.

#### 4.4.1 Impacto da força de arrasto no consumo de combustível

Analisando os dados obtidos na Tabela 4.11 para a força de arrasto, percebe-se um crescimento de 607,31% na diferença da força de arrasto entre o Modelo Renegade e o Modelo Corolla. A fim de observar o impacto gerado pelo aumento do arrasto, busca-se obter o quanto esta força representa das forças resistivas totais atuantes em cada modelo, para cada um dos ciclos estudados. A Tabela 4.12 demonstra essa relação.

Tabela 4.12: Relação entre a força de arrasto e as forças resistivas em cada ciclo de condução para o Modelo Corolla e o Modelo Renegade

| MODELO          | CICLO DE CONDUÇÃO | $\frac{F_D}{F_{RES}}$ |
|-----------------|-------------------|-----------------------|
| Modelo Corolla  | Urbana            | 0,450                 |
| Modelo Renegade | Urbana            | 0,602                 |
| Modelo Corolla  | Em estrada        | 0,802                 |
| Modelo Renegade | Em estrada        | 0,881                 |

Fonte: Autoria própria (2025)

Percebe-se que a força de arrasto para o Modelo Renegade, além de ser maior, ainda representa uma porcentagem maior das resistências totais ao movimento do automóvel. Isto, entretanto, já era esperado, uma vez que a constante de arrasto,  $K_{AR}$ , obtido para o Modelo Renegade, visto na Seção 4.3, era maior que a constante de arrasto,  $K_{AC}$ , obtida para o Modelo Corolla.

Para melhor entender essa diferença, a força de arrasto é dividida em arrasto de pressão e arrasto de atrito. A Tabela 4.13 mostra os resultados encontrados para cada uma nos cenários com velocidade de 80 km/h e com velocidade de 40 km/h para o Modelo Corolla. A Tabela 4.14 traz esses mesmos dados, porém para o Modelo Renegade.

Tabela 4.13: Variação do tipo de arrasto com a velocidade para o Modelo Corolla

| <b>TIPO DE ARRASTO</b> | <b><math>V = 40 \text{ km/h}</math></b> | <b><math>V = 80 \text{ km/h}</math></b> |
|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Arrasto de pressão     | -89,59 N                                | -329,81 N                               |
| Arrasto de atrito      | -5,73 N                                 | -20,1 N                                 |

Fonte: Autoria própria (2025)

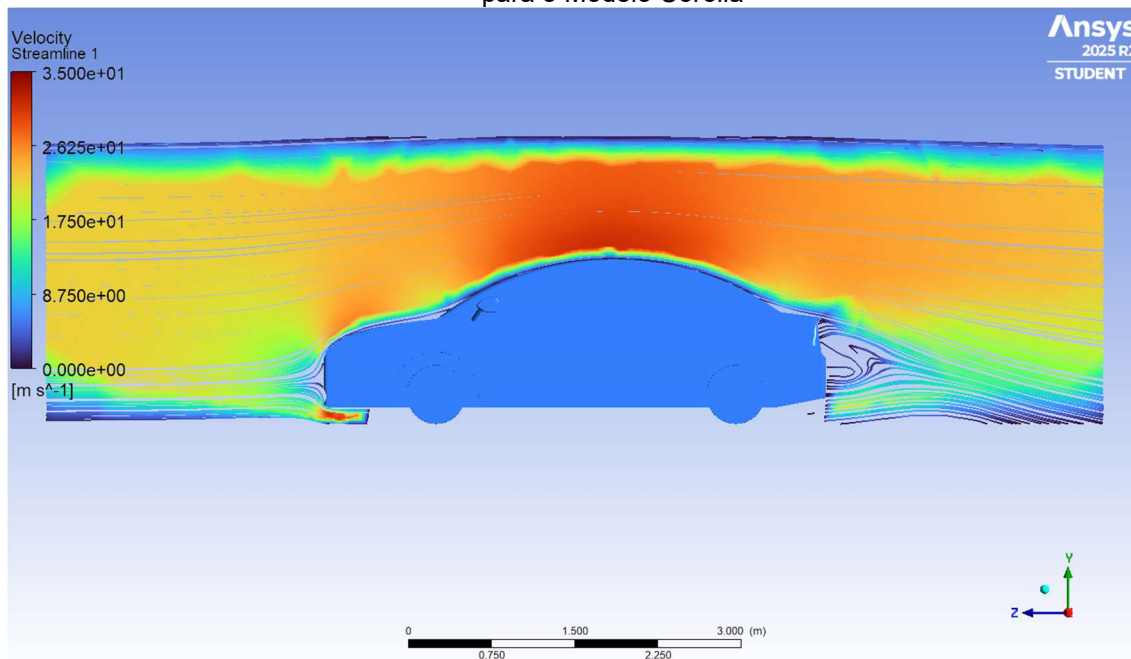
Tabela 4.14: Variação do tipo de arrasto com a velocidade para o Modelo Renegade

| <b>TIPO DE ARRASTO</b> | <b><math>V = 40 \text{ km/h}</math></b> | <b><math>V = 80 \text{ km/h}</math></b> |
|------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Arrasto de pressão     | -164,93 N                               | -676,56 N                               |
| Arrasto de atrito      | -5,56 N                                 | -19,33 N                                |

Fonte: Autoria própria (2025)

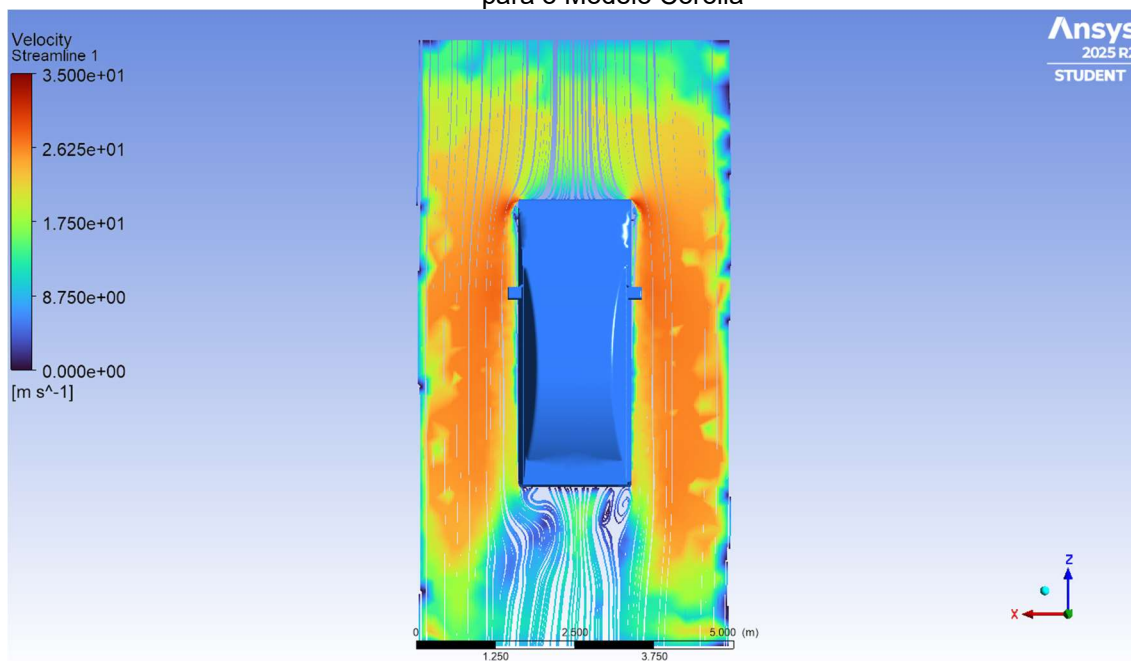
Fica claro que, em ambos os modelos, o arrasto de pressão é predominante, sendo, também, a componente responsável pela diferença na força de arrasto entre os modelos. A Figura 10 e a Figura 11 mostram as linhas de velocidade do escoamento, no cenário com velocidade igual a 80 km/h, no plano YZ localizado na seção média e no plano XZ na seção localizada no ponto médio da roda, respectivamente, do Modelo Corolla. A Figura 12 e a Figura 13 mostram as linhas de velocidade do escoamento nos mesmos recortes e cenário de velocidade que as duas figuras anteriores, para o Modelo Renegade.

Figura 10: Linhas de velocidade do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZY para o Modelo Corolla



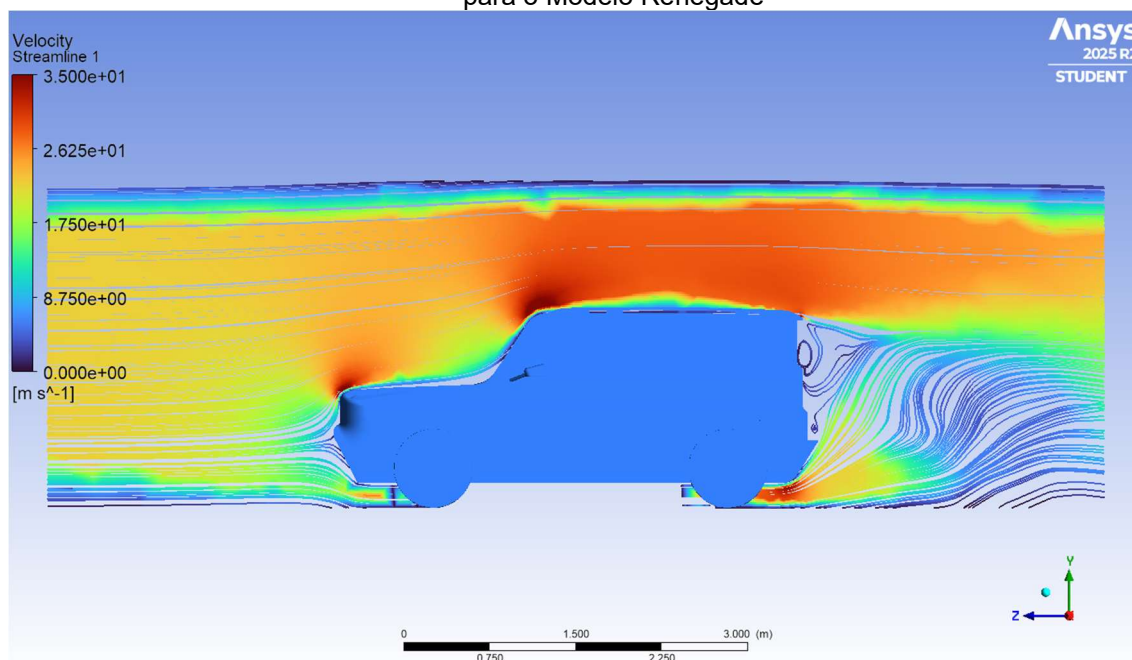
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 11: Linhas de velocidade do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZX para o Modelo Corolla



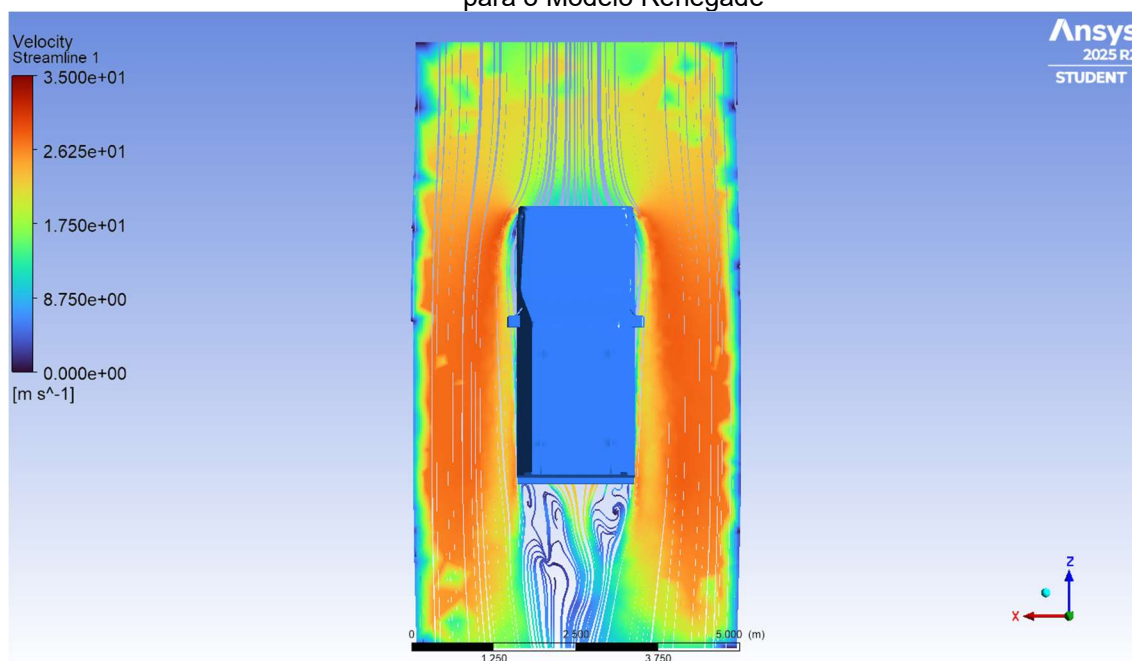
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 12: Linhas de velocidade do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZY para o Modelo Renegade



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 13: Linhas de velocidade do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZX para o Modelo Renegade



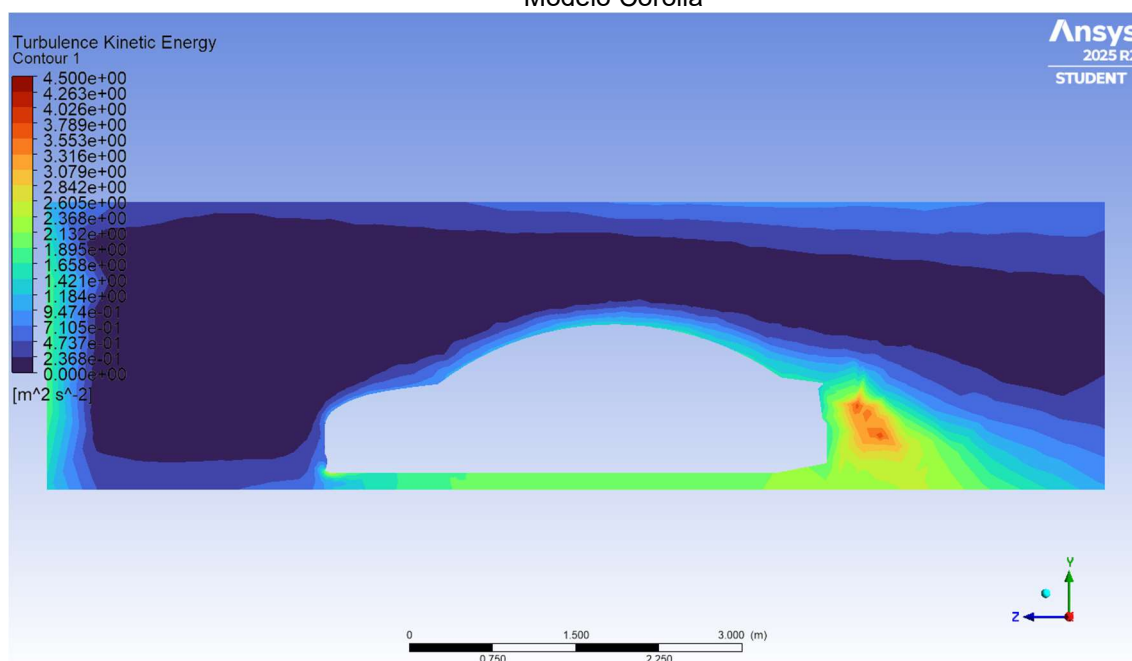
Fonte: Autoria própria (2025)

O arrasto de atrito tem como característica a formação de camadas limite e, ao analisar as figuras acima, não há uma diferença significativa visível na formação dessas camadas entre os modelos, explicando os valores próximos obtidos para essa força. As regiões de formação de turbulência, característica do arrasto de pressão,

ocorrem em locais parecidos nos modelos (parte traseira do modelo), porém, a fim de observar a intensidade da turbulência formada, será vista a energia cinética de turbulência.

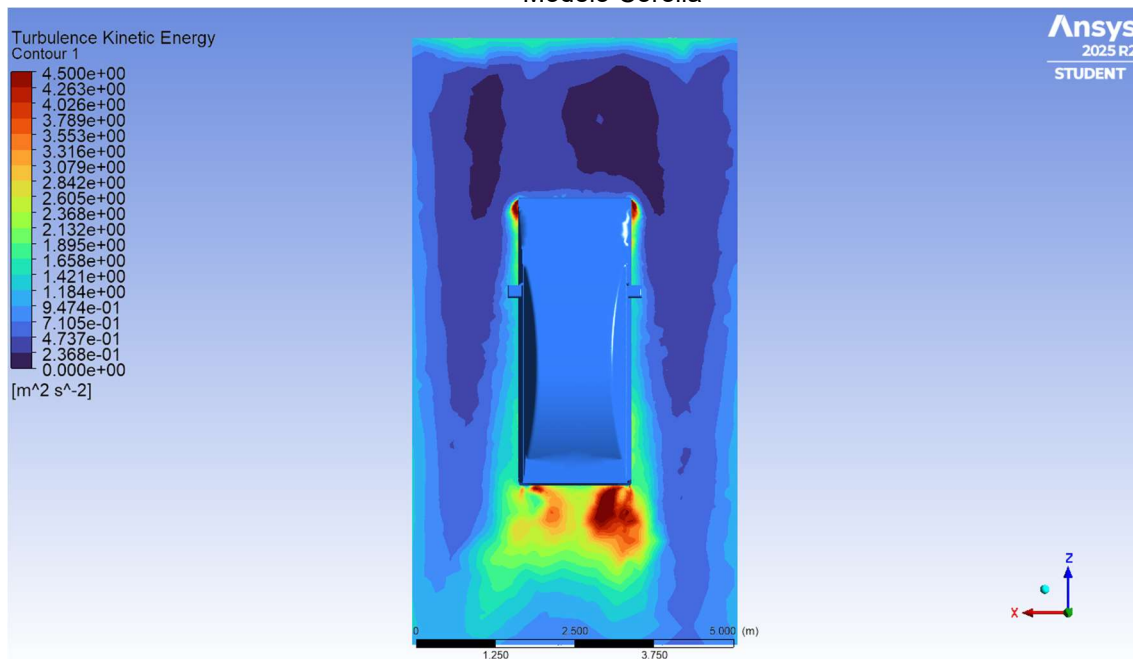
A Figura 14 e a Figura 15 mostram a energia cinética de turbulência, na simulação com cenário de velocidade igual a 80 km/h, no plano YZ localizado na seção média e no plano XZ na seção localizada no ponto médio da roda, respectivamente, do Modelo Corolla. A Figura 16 e a Figura 17 mostram a energia cinética de turbulência nos mesmos recortes e cenário de velocidade que as duas figuras anteriores, mas para o Modelo Renegade.

Figura 14: Energia cinética de turbulência no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZY para o Modelo Corolla



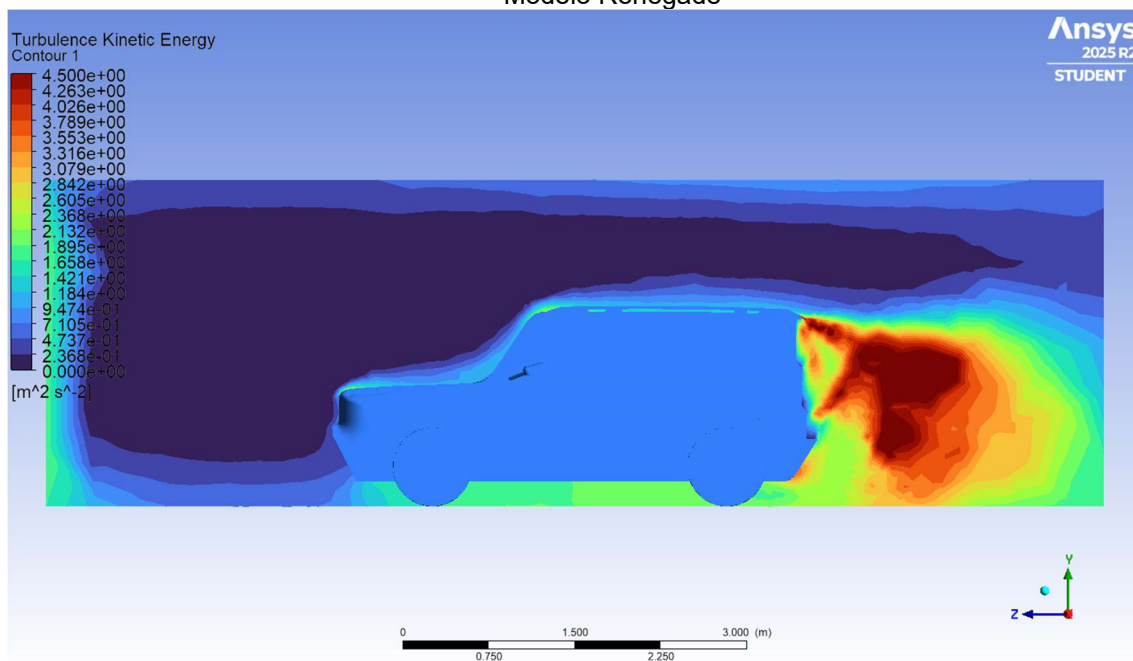
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 15: Energia cinética de turbulência no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZX para o Modelo Corolla



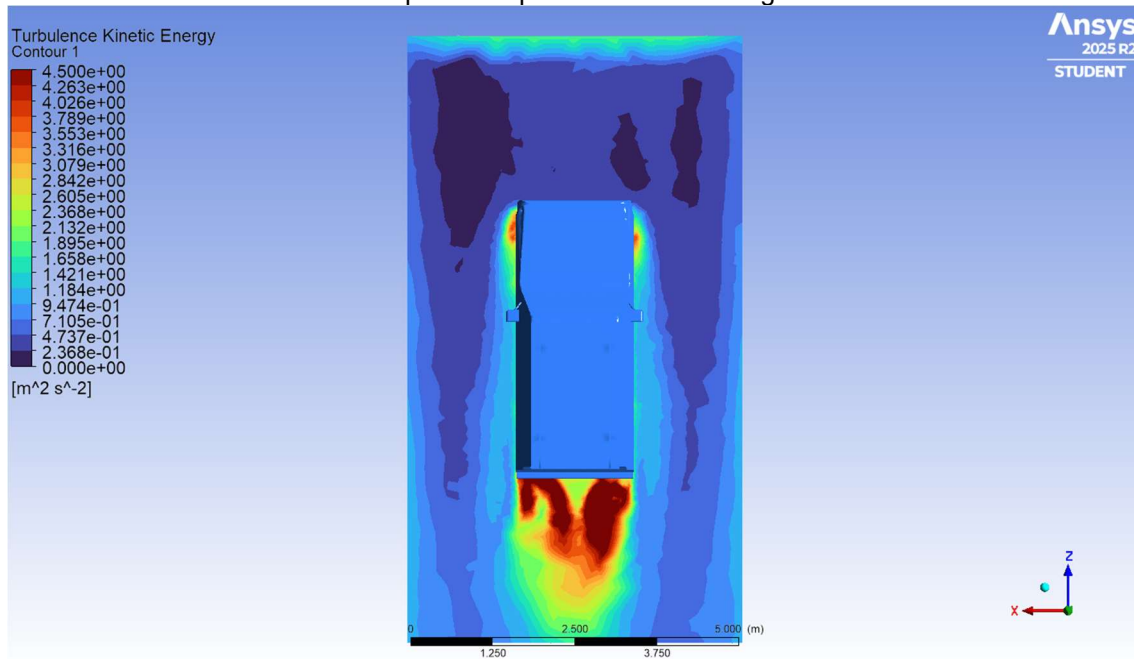
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 16: Energia cinética de turbulência no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZY para o Modelo Renegade



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 17: Energia cinética de turbulência do escoamento no cenário de velocidade de 80 km/h no plano ZX para o Modelo Renegade



Fonte: Autoria própria (2025)

Percebe-se, portanto, que o Modelo Renegade apresenta uma área maior e mais intensa de formação de turbulências. Isto é evidenciado ao comparar a energia cinética de turbulência média,  $\bar{\kappa}$ , de cada modelo:

$$\bar{\kappa}_{COROLLA} = 0,375 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$\bar{\kappa}_{RENEGADE} = 0,467 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

Um  $\bar{\kappa}$  maior implica que, em média, as partículas do Modelo Renegade tem mais energia cinética de turbulência.

No mais, é notável que a força de arrasto, mais especificamente o arrasto de pressão, tem uma grande influência no aumento das forças resistivas. Esta força, então, deve ser um fator impactante no consumo de combustível.

#### 4.4.2 Impacto da força de sustentação no consumo de combustível

O impacto da força de sustentação está relacionado diretamente com a força de resistência ao rolamento. Quando se analisa as forças resistivas no movimento de um automóvel. Tendo a Eq. (29) como o cálculo da força de resistência ao rolamento, pode-se reescrevê-la, de forma a dividi-la em duas componentes: a resistência ao rolamento oriundo da massa do automóvel,  $F_{RG}$ , e a resistência ao rolamento oriundo

da força de sustentação,  $F_{RS}$ . Este procedimento está demonstrado pela Eq. (40) e pela Eq. (41):

$$F_R = -mg(0,0041 + 0,0000917V) + F_L(0,0041 + 0,0000917 V) \quad (40)$$

$$F_R = F_{RG} + F_{RS} \quad (41)$$

A Tabela 4.15 exhibe os resultados obtidos para  $F_{RS}$  e  $F_{RG}$ , assim como a porcentagem que representa do total da força de resistência ao rolamento, nos dois ciclos de condução para o Modelo Corolla. A Tabela 4.16 exhibe os resultados das mesmas variáveis para o Modelo Renegade.

Tabela 4.15: Componentes da força de resistência ao rolamento para o Modelo Corolla

| <b>CICLO DE CONDUÇÃO</b> | <b><math>F_{RS}</math> (N)</b> | <b><math>\frac{F_{RS}}{F_R}</math></b> | <b><math>F_{RG}</math> (N)</b> | <b><math>\frac{F_{RG}}{F_R}</math></b> |
|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| Urbana                   | 0,158                          | -0,23%                                 | -67,8                          | 100,23%                                |
| Em estrada               | 1,191                          | -1,44%                                 | -84,06                         | 101,44%                                |

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 4.16: Componentes da força de resistência ao rolamento para o Modelo Renegade

| <b>CICLO DE CONDUÇÃO</b> | <b><math>F_{RS}</math> (N)</b> | <b><math>\frac{F_{RS}}{F_R}</math></b> | <b><math>F_{RG}</math> (N)</b> | <b><math>\frac{F_{RG}}{F_R}</math></b> |
|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| Urbana                   | 0,013                          | -0,02%                                 | -70,59                         | 100,02%                                |
| Em estrada               | 0,096                          | -0,11%                                 | -87,5                          | 100,11%                                |

Fonte: Autoria própria (2025)

A força de sustentação muito próxima de zero no Modelo Renegade resulta em um pequeno impacto na resistência ao rolamento. Observando, então, os valores obtidos pelo Corolla, percebe-se que, mesmo quando a força de sustentação tem um valor alto, a redução que causa na resistência ao rolamento é, ainda assim, baixa. Isto fica mais perceptível vendo que, para o ciclo de condução em estrada, uma força de sustentação de 195,98 N, resulta em um  $F_{RS} = 1,19$  N, uma melhora de apenas de 1,44% no total da força de resistência ao rolamento.

A Tabela 4.17 mostra o impacto de  $F_{RS}$  e  $F_R$  nas forças resistivas totais para os ciclos de condução urbana e em estrada para o Modelo Corolla:

Tabela 4.17: Componentes da força de resistência ao rolamento para o Modelo Corolla

| <b>CICLO DE CONDUÇÃO</b> | $\frac{F_{RS}}{F_{RES}}$ | $\frac{F_R}{F_{RES}}$ |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Urbana                   | -0,13%                   | 54,99%                |
| Em estrada               | -0,28%                   | 19,77%                |

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se, então, que a força de rolamento é a força resistiva predominante em velocidades mais baixas e que a melhora gerada pela força de sustentação na força de resistência ao rolamento é mais perceptível em velocidades mais altas.

Analisando os valores obtidos para a força de resistência ao rolamento, são constatados resultados similares para os dois modelos, incluindo um aumento semelhante na força de resistência ao rolamento quando a velocidade cresce. Isto ocorre mesmo com a diferença da força de sustentação entre os modelos. Relacionando estes valores com o consumo de combustível, espera-se que o consumo devido à resistência ao rolamento seja parecido entre os automóveis selecionados. A força de sustentação, por sua vez, aparenta ser um fator com pouco impacto na melhoria do consumo de combustível de um automóvel, já que, apesar dos resultados distintos entre os modelos, não causou uma grande redução na força de resistência ao rolamento.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a influência da força de arrasto e da força de sustentação no consumo de combustível em dois veículos automotores leves. A partir de simulações numéricas em CFD, a pesquisa estabeleceu, inicialmente, uma base de cálculo das forças aerodinâmicas para os dois modelos desenvolvidos, em seguida buscou-se encontrar uma correlação entre essas forças e o consumo de combustível nos dois automóveis estudados.

Sendo a força de arrasto um fator importante para o consumo de combustível em um automóvel, ela se mostrou mais impactante em velocidades mais elevadas. Entretanto a variação da força de arrasto não representou uma relação direta da variação de consumo do combustível, pois há também outros fatores que influenciam este consumo.

A força de sustentação aparenta ser um fator com baixa influência no consumo de combustível, mesmo tendo um impacto maior em velocidades mais altas.

### 5.1 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

Um dos pontos limitantes do trabalho foi o valor máximo de um milhão para o número de elementos na construção das malhas, o que impediu um maior refinamento destas. A falta de informações relacionadas às dimensões dos modelos tridimensionais, o que levou a geometrias mais simples e aproximadas do modelo real, tornou-se outro ponto limitante. Destacam-se ainda as simplificações relacionadas aos cálculos de correlação entre forças aerodinâmicas e consumo de combustível, tal qual a utilização da velocidade constante, o que limitou a análise de resultados.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a implementação de novos parâmetros que afetam o consumo de combustível. A realização de análises que: utilize o regime transiente para as simulações numéricas em CFD, leve em consideração a força inercial para o cálculo das forças resistivas atuantes em um veículo e se baseia nas velocidades instantâneas para estabelecer uma relação com o consumo de combustível, pode ampliar os resultados encontrados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ABINESH, J.; ARUNKUMAR, J. **CFD analysis of aerodynamic drag reduction and improve fuel economy**. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, v. 3, n. 4, p. 430–440, out. 2014.

ABNT NBR 6601:2021. **Veículos rodoviários automotores leves — Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 57 p.

ABNT NBR 7024:2017. **Veículos rodoviários automotores leves — Medição do consumo de combustível — Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 15 p.

AGARWAL, Avinash Kumar; MUSTAFI, Nirendra Nath. **Real-world automotive emissions: monitoring methodologies, and control measures**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 137, p. 110624, 2021. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110624>.

ALAM, F.; WATKINS, Simon. **Implication of vehicle aerodynamics on fuel savings and the environment**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL, INDUSTRIAL AND MATERIALS ENGINEERING (ICMIME 2013), 1.–3. nov. 2013, Rajshahi, Bangladesh. Proceedings... Rajshahi, 2013. p. 50. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Implication-of-Vehicle-Aerodynamics-on-Fuel-Savings-Alam-Watkins/38e4b9775d6e1f6d548ce6abdbf4e01865b4f019>. Acesso em: 03 dez. 2025.

ANDERSEN, Lasse G.; LARSEN, Jesper K.; FRASER, Elsje S.; SCHMIDT, Bjarne; DYRE, Jeppe C. **Rolling resistance measurement and model development**. *Journal of Transportation Engineering*, v. 141, n. 2, p. 04014075, 2015. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000673.

BAKER, Nazar, KELLY, Ger, & O’SULLIVAN, Paul D. (2020). **A grid convergence index study of mesh style effect on the accuracy of the numerical results for an indoor airflow profile**. *International Journal of Ventilation*, 19(4), 300–314. <https://doi.org/10.1080/14733315.2019.1667558>

BRASIL. Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004. **Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural – ANATER e dá outras**

**providências.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 mar. 2004. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/lei/l10.847.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.847.htm)>. Acesso em: 5 jul. 2025.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional 2024: ano base 2023.** Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>>. Acesso em: 5 jul. 2025.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Caderno de ações norteadoras para o avanço da eficiência energética no Brasil.** Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-acoes-norteadoras-para-o-avanco-da-eficiencia-energetica-no-brasil>>. Acesso em: 5 jul. 2025.

BUCHHEIM, R.; MARTZEKE, J.; PIATEK, R. **The control of aerodynamic parameters influencing vehicle dynamics.** *Vehicle System Dynamics*, v. 14, n. 2-3, p. 71–91, 1985. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/44467606>. Acesso em: 03 dez. 2025.

CELIK, Ismail B.; GHIA, Ugo; ROACHE, Patrick J.; FREITAS, Carlos J.; COLEMAN, Hugh; RADD, Paul E. **Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications.** *Journal of Fluids Engineering*, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações.** 2. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CIEŚLIŃSKI, Artur; PRYM, Wojciech; STAJUDA, Mateusz; WITKOWSKI, Dariusz. **Investigation on Aerodynamics of Super-Effective Car for Drag Reduction.** *Mechanics and Mechanical Engineering*, Łódź, v. 20, n. 3, p. 295–308, 2016

DARKWAH, Williams Kweku; ODUM, Bismark; ADDAE, Maxwell; KOOMSON, Ato Desmond; KWAKYE, Benjamin Danso; EWURABENA ASANTE, Oti-Mensah; ASENSO, Theophilus Quachie; BUANYA, Beryl Adormaa. **Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming.** *Journal of Scientific Research and Reports*, [S.l.], v. 17, n. 6, p. 1–9, 2018. DOI: 10.9734/JSRR/2017/39630. Disponível em:

<https://journaljsrr.com/index.php/JSRR/article/view/830>. Acesso em: 3 dez. 2025

DURBIN, P.A. & SHIH, T.-P. 2005 **An overview of turbulence modeling**. In WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, 1st edn (ed. B. Sunden & M. Faghri), vol. 1, pp. 1–29. WIT Press.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

FU, Chen; UDDIN, Mesbah; ROBINSON, A. Clay. **Turbulence modeling effects on the CFD predictions of flow over a NASCAR Gen 6 racecar**. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 176, p. 98–111, 2018. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.03.016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610517308127>. Acesso em: 3 dez. 2025.

GHOSAL, Sandip. **Analysis of discretization errors in LES**. *Center for Turbulence Research – Annual Research Briefs*, 1995. p. 3-24

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: SAE International, 1992.

GUO, Zijian; CHEN, Xiaodong; LIU, Tanghong; CHEN, Zhengwei; BORDBAR, Amir. **Turbulence approaches for numerical predictions of vehicle-like afterbody vortex flows**. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 283, p. 109667, 2024. ISSN 0020-7403. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109667>.

HOWELL, Jeff.; LE GOOD, Geoff. **The influence of aerodynamic lift on high speed stability**. In: SAE INTERNATIONAL. *SAE Technical Paper 1999-01-0650*. 1999. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/44667971>. Acesso em: 03 dez. 2025.

INMETRO. **Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – PBEV: Tabelas de consumo e eficiência energética de veículos automotores leves – 2024**. Atualização: 31 dec. 2024. Rio de Janeiro, 2024.

INMETRO. **Metodologia para dados de consumo veicular**. Atualização: 02 mar. 2022. Rio de Janeiro, 2022.

LAUNDER, Brian E.; SPALDING, David B. **The numerical computation of turbulent flows**. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974. DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782574900292>. Acesso em: 3 dez. 2025.

LUND, Henrik. **Renewable energy strategies for sustainable development.** *Energy*, [S.l.], v. 32, n. 6, p. 912–919, 2007. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.017>>.

MENTER, Florian R. **Turbulence modeling for engineering flows.** [S.l.]: ANSYS, Inc., 2011.

MITCHELL, John F. B. **The “Greenhouse” effect and climate change.** *Reviews of Geophysics*, Washington, DC, v. 27, n. 1, p. 115–139, 1989. DOI: <<https://doi.org/10.1029/RG027i001p00115>>.

MOHAMED-KASSIM, Zulfaa; FILIPPONE, Antonio. **Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 15, n. 5, p. 275–284, 2010. DOI: 10.1016/j.trd.2010.02.010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Paris Agreement.** 2015. Disponível em: <<https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>>. Acesso em: 5 jul. 2025.

RAKOWITZ, Markus. **Grid refinement study with a UHCA wing-body configuration using Richardson extrapolation and grid convergence index GCI.** In: WAGNER, Siegfried; RIST, Ulrich; HEINEMANN, Hans-Jürgen; HILBIG, Rolf (eds.). *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2002. (Notes on Numerical Fluid Mechanics – NNFM, v. 77). Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-45466-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-540-45466-3_36). Acesso em: 1 Dez. 2025.

RICHARDSON, Lewis F. **Weather prediction by numerical process.** Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

ROACHE, Patrick J. **Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies.** *Journal of Fluids Engineering*, [S.l.], v. 116, n. 3, p. 405–413, set. 1994. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2910291>

ROACHE, Patrick J. **Verification and Validation in Computer Science.** New Mexico: Hermosa Pub, 1998.

SALATI, L.; SCHITO, P.; CHELI, F. **Wind tunnel experiment on a heavy truck equipped with front-rear trailer device.** *Journal of Wind Engineering and Industrial*

Aerodynamics, [S.I.], v. 171, p. 101–109, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.016>>.

SHAMS TALEGHANI, Arash; TORABI, Farschad. **Recent developments in aerodynamics**. *Frontiers in Mechanical Engineering*, São Francisco, v. 10, 2025. DOI: 10.3389/fmech.2024.1537383. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/mechanical-engineering/articles/10.3389/fmech.2024.1537383/full>. Acesso em: 11 ago. 2025.

STELLANTIS DO BRASIL. **Manual do proprietário: Jeep Renegade – 2024**. Betim, 2024.

TOOSI, Siavash; LARSSON, Johan. **Grid-Adaptation and Convergence-Verification in Large Eddy Simulation: a robust and systematic approach**. In: 2018 Fluid Dynamics Conference, 2018. AIAA Paper 2018-3406. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/6.2018-3406>. Acesso em: 3 dez. 2025.

TOYOTA DO BRASIL. **Manual do proprietário: Corolla – 2024**. São Paulo, 2024.

TRAN-CONG, Sabine; GAY, Michael; MICHAELIDES, Efstathios E. **Drag coefficients of irregularly shaped particles**. *Powder Technology*, [S.I.], v. 139, n. 1, p. 21–32, 2004. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2003.10.002>>.

WILCOX, David. **Turbulence modeling — an overview**. In: 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2001. Paper 2001-724. Disponível em: <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/6.2001-724>. Acesso em: 3 dez. 2025.

WILCOX, David C. **Turbulence Modeling for CFD**. 3. ed. La Cañada, CA: DCW Industries, Inc., 2006.

YAKHOT, Victor; SMITH, Leslie M. **The renormalization group, the  $\epsilon$ -expansion and derivation of turbulence models**. *Journal of Scientific Computing*, v. 7, p. 35–61, 1992. DOI: 10.1007/BF01060210.

**ANEXO A – VELOCIDADES NO CICLO DE CONDUÇÃO EM ESTRADA**

|            | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> | <b>8</b> | <b>9</b> |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>0</b>   | 0        | 0        | 0        | 3,2      | 7,9      | 13       | 18,2     | 23,3     | 27,8     | 31,5     |
| <b>10</b>  | 35,1     | 38,6     | 41,5     | 43,6     | 45,1     | 46,7     | 48,3     | 49,4     | 50,7     | 51,8     |
| <b>20</b>  | 52,9     | 53,9     | 54,9     | 55,7     | 56,2     | 56,5     | 57,5     | 57,8     | 57,6     | 56,8     |
| <b>30</b>  | 56,2     | 55,5     | 55,7     | 56       | 56,5     | 57,5     | 58,1     | 58,3     | 58,7     | 59,1     |
| <b>40</b>  | 59,4     | 59,5     | 59,5     | 59,5     | 59,5     | 59,5     | 59,5     | 59,7     | 60       | 60,8     |
| <b>50</b>  | 62,1     | 63,2     | 64,4     | 65,5     | 66,6     | 67,9     | 69       | 70       | 70,8     | 71,3     |
| <b>60</b>  | 71,6     | 72,1     | 72,3     | 72,4     | 72,6     | 73,1     | 73,5     | 74       | 74,5     | 74,8     |
| <b>70</b>  | 75,3     | 75,5     | 75,6     | 75,8     | 76       | 76,1     | 76       | 75,8     | 75,6     | 75,5     |
| <b>80</b>  | 75,5     | 75,5     | 75,6     | 75,8     | 75,8     | 76       | 75,8     | 75,6     | 75,5     | 74,8     |
| <b>90</b>  | 74,5     | 74,4     | 74,5     | 74,8     | 75,5     | 75,8     | 76,3     | 76,8     | 77,2     | 77,6     |
| <b>100</b> | 78,1     | 78,5     | 79       | 79,2     | 79       | 79       | 78,9     | 78,9     | 79       | 79,2     |
| <b>110</b> | 79,3     | 79,5     | 79,7     | 79,7     | 79,7     | 79,5     | 79       | 78,7     | 78,2     | 77,9     |
| <b>120</b> | 77,4     | 76,8     | 76,3     | 76,1     | 76,4     | 76,9     | 77,1     | 77,2     | 77,1     | 77,1     |
| <b>130</b> | 77,1     | 77,2     | 77,2     | 77,2     | 77,1     | 76,1     | 74       | 69,7     | 66,3     | 63,6     |
| <b>140</b> | 63,1     | 62,8     | 62,8     | 62,9     | 63,6     | 64,5     | 66       | 67,6     | 69,4     | 70,3     |
| <b>150</b> | 71       | 71,3     | 71,5     | 71,8     | 71,9     | 72,3     | 72,7     | 73,5     | 73,9     | 74,5     |
| <b>160</b> | 75,3     | 75,5     | 75,6     | 75,8     | 76,6     | 77,1     | 77,2     | 77,2     | 77,1     | 76,9     |
| <b>170</b> | 76,1     | 75,2     | 74,4     | 73,9     | 73,5     | 73,2     | 73,1     | 72,9     | 72,4     | 70,8     |
| <b>180</b> | 69,4     | 67,9     | 66,8     | 66,8     | 67,8     | 69       | 70       | 70,7     | 70,2     | 69,7     |
| <b>190</b> | 69,2     | 69,4     | 69,8     | 70,7     | 71,3     | 71,8     | 72,3     | 72,1     | 71,5     | 70,7     |
| <b>200</b> | 69,8     | 69,5     | 69,5     | 69,4     | 69,2     | 69,2     | 69,4     | 69,8     | 70,7     | 70,8     |
| <b>210</b> | 70       | 68,6     | 66,8     | 65,5     | 64,4     | 64,4     | 64,9     | 66       | 67,6     | 68,7     |
| <b>220</b> | 69,4     | 69,5     | 69,8     | 70,7     | 71,3     | 71,9     | 72,6     | 73,1     | 73,7     | 74,8     |
| <b>230</b> | 75,5     | 76       | 76,3     | 76,1     | 76,1     | 76       | 76       | 76       | 75,8     | 75,6     |
| <b>240</b> | 75,6     | 75,5     | 75,3     | 75,5     | 75,6     | 76       | 76,4     | 77,1     | 77,2     | 77,2     |
| <b>250</b> | 77,2     | 77,2     | 77,2     | 77,4     | 77,6     | 77,6     | 77,4     | 78,2     | 78,7     | 79       |
| <b>260</b> | 79       | 79       | 79       | 79       | 78,9     | 78,7     | 77,6     | 76,8     | 76,4     | 79       |
| <b>270</b> | 75,2     | 74,4     | 74       | 73,7     | 73,4     | 73,1     | 72,7     | 72,4     | 71,9     | 71,6     |
| <b>280</b> | 71,7     | 70       | 68,9     | 67,6     | 64,5     | 62,1     | 60,4     | 57,6     | 55,8     | 54,7     |

|            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>290</b> | 53,6 | 52,3 | 51   | 49,2 | 47,6 | 46,3 | 45,7 | 46   | 47,5 | 50,5 |
| <b>300</b> | 53,8 | 57,3 | 60,4 | 62,9 | 64,7 | 66,1 | 67,3 | 68,2 | 68,9 | 69,7 |
| <b>310</b> | 70,5 | 71,3 | 71,9 | 72,4 | 72,7 | 73,1 | 73,2 | 73,7 | 74   | 74,2 |
| <b>320</b> | 74,3 | 75,3 | 75,8 | 76,8 | 77,7 | 78,9 | 80   | 81   | 82,1 | 83,2 |
| <b>330</b> | 84,3 | 85,8 | 86,6 | 87,7 | 88,8 | 89,8 | 90,8 | 91,6 | 91,7 | 91,9 |
| <b>340</b> | 92,2 | 92,7 | 93   | 93,3 | 93,5 | 94   | 95,5 | 94,6 | 94,8 | 95   |
| <b>350</b> | 95   | 94,8 | 94,6 | 94,3 | 94   | 93,7 | 93,5 | 93,3 | 93,2 | 92,7 |
| <b>360</b> | 92,4 | 92,1 | 91,9 | 91,7 | 91,7 | 91,6 | 91,6 | 91,6 | 91,7 | 91,7 |
| <b>370</b> | 91,7 | 91,7 | 91,7 | 91,7 | 91,7 | 91,7 | 91,7 | 91,6 | 91,4 | 90,9 |
| <b>380</b> | 90,4 | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,3 | 90,8 | 91,2 | 91,6 | 91,6 | 92,2 |
| <b>390</b> | 92,4 | 92,4 | 92,1 | 91,7 | 91,6 | 91,1 | 90,6 | 90,3 | 90,8 | 91,2 |
| <b>400</b> | 91,9 | 92,5 | 93   | 93,3 | 93,3 | 93,3 | 93,3 | 93,3 | 93,3 | 93,2 |
| <b>410</b> | 93   | 92,9 | 92,9 | 93   | 93,2 | 93,3 | 93,5 | 94   | 94,8 | 95,1 |
| <b>420</b> | 95,6 | 96,2 | 96,4 | 96,2 | 95,9 | 95,6 | 95,3 | 95,1 | 95   | 94,8 |
| <b>430</b> | 94,5 | 94,3 | 94,1 | 94   | 94   | 93,8 | 93,7 | 93,5 | 93,3 | 93,3 |
| <b>440</b> | 93,2 | 93,2 | 93,2 | 93,2 | 93,2 | 93,3 | 93,5 | 93,5 | 93,7 | 93,7 |
| <b>450</b> | 93,7 | 93,5 | 93,3 | 93,3 | 93,3 | 93,3 | 93,3 | 93,3 | 93,2 | 93,2 |
| <b>460</b> | 93,3 | 93,5 | 93,5 | 93,7 | 93,8 | 93,8 | 93,8 | 93,7 | 93,5 | 93,3 |
| <b>470</b> | 93   | 92,5 | 91,9 | 91,7 | 91,1 | 90,3 | 90,1 | 89,8 | 89,3 | 88,8 |
| <b>480</b> | 88,7 | 88,5 | 88,4 | 88,4 | 88,4 | 88,4 | 88,4 | 88,4 | 88,5 | 88,5 |
| <b>490</b> | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 88,5 | 88,7 | 88,7 | 88,5 | 88,4 | 88,4 | 88,2 |
| <b>500</b> | 88   | 87,9 | 87,5 | 87,4 | 87,4 | 87,2 | 87,1 | 87,1 | 87,1 | 86,9 |
| <b>510</b> | 86,9 | 86,9 | 86,9 | 86,9 | 86,9 | 86,9 | 86,9 | 87,1 | 87,2 | 87,7 |
| <b>520</b> | 88,2 | 88,4 | 88,5 | 88,7 | 88,8 | 88,8 | 89   | 89,2 | 89,3 | 89,5 |
| <b>530</b> | 89,6 | 89,8 | 90   | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,1 |
| <b>540</b> | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90,1 | 90   | 90   | 90   |
| <b>550</b> | 89,8 | 89,5 | 89,2 | 88,8 | 88,7 | 88,5 | 88,4 | 87,9 | 87,5 | 87,2 |
| <b>560</b> | 87,1 | 86,6 | 85,9 | 86,8 | 85,5 | 85,1 | 84,4 | 84,3 | 84   | 83,8 |
| <b>570</b> | 83,7 | 83,7 | 83,7 | 83,7 | 83,8 | 83,7 | 83,7 | 83,5 | 83   | 82,7 |
| <b>580</b> | 82,2 | 81,6 | 81   | 80,1 | 79,3 | 78,4 | 77,6 | 77,4 | 77,2 | 77,2 |
| <b>590</b> | 77,4 | 77,9 | 78,7 | 78,9 | 79   | 79   | 78,9 | 78,9 | 78,7 | 78,2 |
| <b>600</b> | 77,7 | 77,2 | 77,1 | 76,9 | 76,8 | 77,1 | 77,7 | 78,9 | 79   | 78,9 |
| <b>610</b> | 78,7 | 77,2 | 75,8 | 74,4 | 74,2 | 74,2 | 74,4 | 75,5 | 76,9 | 78,9 |

|            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>620</b> | 80   | 81,4 | 82,9 | 84   | 84,8 | 85,3 | 86,3 | 86,9 | 87,1 | 87,5 |
| <b>630</b> | 88   | 88,7 | 89,2 | 89,2 | 88,5 | 87,7 | 86,3 | 84,5 | 80,8 | 77,6 |
| <b>640</b> | 74,8 | 74,4 | 74   | 74   | 74,5 | 75,3 | 76,4 | 77,6 | 78,5 | 79,7 |
| <b>650</b> | 80,8 | 81,6 | 82,2 | 83,2 | 84   | 84,5 | 83,8 | 83   | 82,2 | 82,1 |
| <b>660</b> | 82,1 | 82,2 | 82,7 | 83,2 | 83,7 | 84   | 84,5 | 85   | 84,8 | 84,7 |
| <b>670</b> | 84,2 | 84,2 | 84,3 | 84,5 | 84,8 | 84,8 | 84,3 | 83,8 | 83,2 | 82,2 |
| <b>680</b> | 81,3 | 80,6 | 80,1 | 80   | 79,8 | 79,7 | 79,2 | 80   | 80,5 | 80,8 |
| <b>690</b> | 81,4 | 82,2 | 83   | 83,5 | 83,7 | 83,8 | 84,3 | 85,1 | 85,8 | 86,4 |
| <b>700</b> | 87,2 | 87,7 | 88,2 | 88,5 | 89,3 | 90   | 90,3 | 90,6 | 90,8 | 90,9 |
| <b>710</b> | 91,2 | 91,6 | 91,7 | 92,2 | 92,9 | 93,7 | 94,6 | 95,1 | 95,3 | 95,1 |
| <b>720</b> | 94,6 | 94,1 | 93,5 | 92,9 | 92,2 | 91,9 | 91,4 | 90,9 | 90,4 | 89,3 |
| <b>730</b> | 87,9 | 87,1 | 86,4 | 85,6 | 86,1 | 84,5 | 83,7 | 82,6 | 81,3 | 79,7 |
| <b>740</b> | 78,1 | 76,6 | 75,3 | 73,4 | 71,1 | 68,4 | 63,1 | 57,8 | 52,5 | 47,2 |
| <b>750</b> | 43,1 | 39,4 | 34,6 | 31,4 | 28   | 24,3 | 20   | 15,6 | 11,3 | 8    |
| <b>760</b> | 5,3  | 3,2  | 1,1  | 0    | 0    | 0    |      |      |      |      |

Fonte: ABNT NBR 7024 (2017)

## ANEXO B – VELOCIDADES NO CICLO DE CONDUÇÃO URBANA

|            | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>0</b>   | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>10</b>  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>20</b>  | 0    | 4,8  | 9,5  | 13,8 | 18,5 | 23   | 27,2 | 27,8 | 29,1 | 33,3 |
| <b>30</b>  | 34,9 | 36   | 36,2 | 35,6 | 34,6 | 33,6 | 32,8 | 31,9 | 27,4 | 24   |
| <b>40</b>  | 24   | 24,5 | 24,9 | 25,7 | 27,5 | 30,7 | 34   | 36,5 | 36,9 | 36,5 |
| <b>50</b>  | 36,4 | 34,3 | 30,6 | 27,5 | 26,4 | 25,4 | 28,5 | 31,9 | 34,8 | 37,3 |
| <b>60</b>  | 38,9 | 39,6 | 40,1 | 40,2 | 39,6 | 39,4 | 39,8 | 39,9 | 39,8 | 39,6 |
| <b>70</b>  | 39,6 | 40,4 | 41,2 | 41,4 | 40,9 | 40,1 | 40,2 | 40,9 | 41,8 | 41,8 |
| <b>80</b>  | 41,4 | 42   | 43   | 44,3 | 46   | 47,2 | 48   | 48,4 | 48,9 | 49,4 |
| <b>90</b>  | 49,4 | 49,1 | 48,9 | 48,8 | 48,9 | 49,6 | 48,9 | 48,1 | 47,5 | 48   |
| <b>100</b> | 48,8 | 49,4 | 49,7 | 49,9 | 49,7 | 48,9 | 48   | 48,1 | 48,6 | 49,4 |
| <b>110</b> | 50,2 | 51,2 | 51,8 | 52,1 | 51,8 | 51   | 46   | 40,7 | 35,4 | 30,1 |
| <b>120</b> | 24,8 | 19,5 | 14,2 | 8,9  | 3,5  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>130</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>140</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>150</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 5,3  | 10,6 | 15,9 |
| <b>160</b> | 21,2 | 26,6 | 31,9 | 35,7 | 39,1 | 41,5 | 42,5 | 41,4 | 40,4 | 39,8 |
| <b>170</b> | 40,2 | 40,6 | 40,9 | 41,5 | 43,8 | 42,6 | 38,6 | 36,5 | 31,2 | 28,5 |
| <b>180</b> | 27,7 | 29,1 | 29,9 | 32,2 | 35,7 | 39,4 | 43,9 | 49,1 | 53,9 | 58,3 |
| <b>190</b> | 60   | 63,2 | 65,2 | 67,8 | 70   | 72,6 | 74   | 75,3 | 76,4 | 76,4 |
| <b>200</b> | 76,1 | 76   | 75,6 | 75,6 | 75,6 | 75,6 | 75,6 | 76   | 76,3 | 77,1 |
| <b>210</b> | 78,1 | 79   | 79,7 | 80,5 | 81,4 | 82,1 | 82,9 | 84   | 85,6 | 87,1 |
| <b>220</b> | 87,9 | 88,4 | 88,5 | 88,4 | 87,9 | 87,9 | 88,2 | 86,7 | 89,3 | 89,6 |
| <b>230</b> | 90,3 | 90,6 | 91,1 | 91,2 | 91,2 | 90,9 | 90,9 | 90,9 | 90,9 | 90,9 |
| <b>240</b> | 90,8 | 90,3 | 89,8 | 88,7 | 87,9 | 87,2 | 86,9 | 86,4 | 86,3 | 86,7 |
| <b>250</b> | 86,9 | 87,1 | 87,1 | 86,6 | 85,9 | 85,3 | 84,7 | 83,8 | 84,3 | 83,7 |
| <b>260</b> | 83,5 | 83,2 | 82,9 | 83   | 83,4 | 83,8 | 84,5 | 85,3 | 86,1 | 86,9 |
| <b>270</b> | 88,4 | 89,2 | 89,5 | 90,1 | 90,1 | 89,8 | 88,8 | 87,7 | 86,3 | 84,5 |
| <b>280</b> | 82,9 | 82,9 | 82,9 | 82,2 | 80,6 | 80,5 | 80,6 | 80,5 | 79,8 | 79,7 |

|            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>290</b> | 79,7 | 79,7 | 79   | 78,2 | 77,4 | 76   | 74,2 | 72,4 | 70,5 | 68,6 |
| <b>300</b> | 66,8 | 64,9 | 62   | 59,5 | 56,6 | 54,4 | 52,3 | 50,7 | 49,2 | 49,1 |
| <b>310</b> | 48,3 | 46,7 | 44,3 | 39,9 | 34,6 | 32,3 | 30,7 | 29,8 | 27,4 | 24,9 |
| <b>320</b> | 20,1 | 17,4 | 12,9 | 7,6  | 2,3  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>330</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>340</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1,6  | 6,9  | 12,2 | 17,5 |
| <b>350</b> | 22,9 | 27,8 | 32,2 | 36,2 | 38,1 | 40,6 | 42,8 | 45,2 | 48,3 | 49,6 |
| <b>360</b> | 50,9 | 51,7 | 52,3 | 54,1 | 55,5 | 55,7 | 56,2 | 56   | 55,5 | 55,8 |
| <b>370</b> | 57,1 | 57,9 | 57,9 | 57,9 | 57,9 | 57,9 | 57,9 | 58,1 | 58,6 | 58,7 |
| <b>380</b> | 58,6 | 57,9 | 56,5 | 54,9 | 53,9 | 50,5 | 46,7 | 41,4 | 37   | 32,7 |
| <b>390</b> | 28,2 | 23,3 | 19,3 | 14   | 8,7  | 3,4  | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>400</b> | 0    | 0    | 4,2  | 9,5  | 14,5 | 20,1 | 25,4 | 30,7 | 36   | 40,2 |
| <b>410</b> | 41,2 | 44,3 | 46,7 | 48,3 | 48,4 | 48,3 | 47,8 | 47,2 | 46,3 | 45,1 |
| <b>420</b> | 40,2 | 34,9 | 29,6 | 24,3 | 19   | 13,7 | 8,4  | 3,1  | 0    | 0    |
| <b>430</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>440</b> | 0    | 0    | 0    | 5,3  | 10,6 | 15,9 | 21,2 | 26,6 | 31   | 37,2 |
| <b>450</b> | 42,5 | 44,7 | 46,8 | 50,7 | 53,1 | 54,1 | 56   | 56,5 | 57,3 | 58,1 |
| <b>460</b> | 57,9 | 58,1 | 58,3 | 57,9 | 57,5 | 57,9 | 57,9 | 57,3 | 57,1 | 57   |
| <b>470</b> | 56,6 | 56,6 | 56,6 | 56,6 | 56,6 | 56,6 | 56,3 | 56,5 | 56,6 | 57,1 |
| <b>480</b> | 56,6 | 56,3 | 56,3 | 56,3 | 56   | 55,7 | 55,8 | 53,9 | 51,5 | 48,4 |
| <b>490</b> | 45,1 | 41   | 36,2 | 31,9 | 26,6 | 21,2 | 16,6 | 11,6 | 6,4  | 1,6  |
| <b>500</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1,9  | 5,6  | 8,9  | 10,5 | 13,7 |
| <b>510</b> | 15,4 | 16,9 | 19,2 | 22,5 | 25,7 | 28,5 | 30,6 | 32,3 | 33,8 | 35,4 |
| <b>520</b> | 37   | 38,3 | 39,4 | 40,1 | 40,2 | 40,2 | 40,2 | 40,2 | 40,2 | 41,2 |
| <b>530</b> | 41,5 | 41,8 | 41,2 | 40,6 | 40,2 | 40,2 | 40,2 | 39,3 | 37,2 | 31,9 |
| <b>540</b> | 26,6 | 21,2 | 15,9 | 10,6 | 5,3  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>550</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>560</b> | 0    | 5,3  | 10,6 | 15,9 | 20,9 | 23,5 | 25,7 | 27,4 | 27,4 | 27,4 |
| <b>570</b> | 28,2 | 28,5 | 28,5 | 28,2 | 27,4 | 27,2 | 26,7 | 27,4 | 27,5 | 27,4 |
| <b>580</b> | 26,7 | 26,6 | 26,6 | 26,7 | 27,4 | 28,3 | 29,8 | 30,9 | 32,5 | 33,8 |
| <b>590</b> | 34   | 34,1 | 34,8 | 35,4 | 36   | 36,2 | 36,2 | 36,2 | 36,5 | 38,1 |
| <b>600</b> | 40,4 | 41,8 | 42,6 | 43,5 | 42   | 36,7 | 31,4 | 26,1 | 20,8 | 15,4 |
| <b>610</b> | 10,1 | 4,8  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

|            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>620</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>630</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 3,2  | 7,2  | 12,6 | 16,4 |
| <b>640</b> | 20,1 | 22,5 | 24,6 | 28,2 | 31,5 | 33,8 | 35,7 | 37,5 | 39,4 | 40,7 |
| <b>650</b> | 41,2 | 41,8 | 43,9 | 43,1 | 42,3 | 42,5 | 42,6 | 42,6 | 41,8 | 41   |
| <b>660</b> | 38   | 34,4 | 29,8 | 26,4 | 23,3 | 18,7 | 14   | 9,3  | 5,6  | 3,2  |
| <b>670</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 2,3  |
| <b>680</b> | 5,3  | 7,1  | 10,5 | 14,8 | 18,2 | 21,7 | 23,5 | 26,4 | 26,9 | 26,6 |
| <b>690</b> | 26,6 | 29,3 | 30,9 | 32,3 | 34,6 | 36,2 | 36,2 | 35,6 | 36,5 | 37,5 |
| <b>700</b> | 37,8 | 36,2 | 34,8 | 33   | 29   | 24,1 | 19,3 | 14,5 | 10   | 7,2  |
| <b>710</b> | 4,8  | 3,4  | 0,8  | 0,8  | 5,1  | 10,5 | 15,4 | 20,1 | 22,5 | 25,7 |
| <b>720</b> | 29   | 31,5 | 34,6 | 37,2 | 39,4 | 41   | 42,6 | 43,6 | 44,4 | 44,9 |
| <b>730</b> | 45,5 | 46   | 46   | 45,5 | 45,4 | 45,1 | 44,3 | 43,1 | 41   | 37,8 |
| <b>740</b> | 34,6 | 30,6 | 26,6 | 24   | 20,1 | 15,1 | 10   | 4,8  | 2,4  | 2,4  |
| <b>750</b> | 0,8  | 0    | 4,8  | 10,1 | 15,4 | 20,8 | 25,4 | 28,2 | 29,6 | 31,4 |
| <b>760</b> | 33,3 | 35,4 | 37,3 | 40,2 | 42,6 | 44,3 | 45,1 | 45,5 | 46,5 | 46,5 |
| <b>770</b> | 46,5 | 46,3 | 45,9 | 45,5 | 45,5 | 45,5 | 45,4 | 44,4 | 44,3 | 44,3 |
| <b>780</b> | 44,3 | 44,3 | 44,3 | 44,3 | 44,4 | 45,1 | 45,9 | 48,3 | 49,9 | 51,5 |
| <b>790</b> | 53,1 | 53,1 | 54,1 | 54,7 | 55,2 | 55   | 54,7 | 54,7 | 54,6 | 54,1 |
| <b>800</b> | 53,3 | 53,1 | 52,3 | 51,5 | 51,3 | 50,9 | 50,7 | 49,2 | 48,3 | 48,1 |
| <b>810</b> | 48,1 | 48,1 | 48,1 | 47,6 | 47,5 | 47,5 | 47,2 | 46,5 | 45,4 | 44,6 |
| <b>820</b> | 43,5 | 41   | 38,1 | 35,4 | 33   | 30,9 | 30,9 | 32,3 | 33,6 | 34,4 |
| <b>830</b> | 35,4 | 36,4 | 37,3 | 38,6 | 40,2 | 41,8 | 42,8 | 42,8 | 43,1 | 43,5 |
| <b>840</b> | 43,8 | 44,7 | 45,2 | 46,3 | 46,5 | 46,7 | 46,8 | 46,7 | 45,2 | 44,3 |
| <b>850</b> | 43,5 | 41,5 | 40,2 | 39,4 | 39,9 | 40,4 | 41   | 41,4 | 42,2 | 43,3 |
| <b>860</b> | 44,3 | 44,7 | 45,7 | 46,7 | 47   | 46,8 | 46,7 | 46,5 | 45,9 | 45,2 |
| <b>870</b> | 45,1 | 45,1 | 44,4 | 43,8 | 42,8 | 43,5 | 44,3 | 44,7 | 45,1 | 44,7 |
| <b>880</b> | 45,1 | 45,1 | 45,1 | 44,6 | 44,1 | 43,3 | 42,8 | 42,6 | 42,6 | 42,6 |
| <b>890</b> | 42,3 | 42,2 | 42,2 | 41,7 | 41,2 | 41,2 | 41,7 | 41,5 | 41   | 39,6 |
| <b>900</b> | 37,8 | 35,7 | 34,8 | 34,8 | 34,9 | 36,4 | 37,7 | 38,6 | 38,9 | 39,3 |
| <b>910</b> | 40,1 | 40,4 | 40,6 | 40,7 | 41   | 40,6 | 40,2 | 40,3 | 40,2 | 39,8 |
| <b>920</b> | 39,4 | 39,1 | 39,1 | 39,4 | 40,2 | 40,2 | 39,6 | 39,6 | 38,8 | 39,4 |
| <b>930</b> | 40,4 | 41,2 | 40,4 | 38,6 | 35,4 | 32,3 | 27,2 | 21,9 | 16,6 | 11,3 |
| <b>940</b> | 6    | 0,6  | 0    | 0    | 0    | 3,2  | 8,5  | 13,8 | 19,2 | 24,5 |

|             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>950</b>  | 28,2 | 29,9 | 32,2 | 34   | 35,4 | 37   | 39,4 | 42,3 | 44,3 | 45,2 |
| <b>960</b>  | 45,7 | 45,9 | 45,9 | 45,9 | 44,6 | 44,3 | 43,8 | 43,1 | 42,6 | 41,8 |
| <b>970</b>  | 41,4 | 40,6 | 38,6 | 35,4 | 34,6 | 34,6 | 35,1 | 36,2 | 37   | 36,7 |
| <b>980</b>  | 36,7 | 37   | 36,5 | 36,5 | 36,5 | 37,8 | 38,6 | 39,6 | 39,9 | 40,4 |
| <b>990</b>  | 41   | 41,2 | 41   | 40,2 | 38,8 | 38,1 | 37,3 | 36,9 | 36,2 | 35,4 |
| <b>1000</b> | 34,8 | 33   | 28,2 | 22,9 | 17,5 | 12,2 | 6,9  | 1,6  | 0    | 0    |
| <b>1010</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>1020</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>1030</b> | 0    | 1,9  | 6,4  | 11,7 | 17,1 | 22,4 | 27,4 | 29,8 | 32,2 | 35,1 |
| <b>1040</b> | 37   | 38,6 | 39,9 | 41,2 | 42,6 | 43,1 | 44,1 | 44,9 | 45,5 | 45,1 |
| <b>1050</b> | 44,3 | 43,5 | 43,5 | 42,3 | 39,4 | 36,2 | 34,6 | 33,2 | 29   | 24,1 |
| <b>1060</b> | 19,8 | 17,9 | 17,1 | 16,1 | 15,3 | 14,6 | 14   | 13,8 | 14,2 | 14,5 |
| <b>1070</b> | 14   | 13,8 | 12,9 | 11,3 | 8    | 6,8  | 4,2  | 1,6  | 0    | 0,2  |
| <b>1080</b> | 1    | 2,6  | 5,8  | 11,1 | 16,1 | 20,6 | 22,5 | 23,3 | 25,7 | 29,1 |
| <b>1090</b> | 32,2 | 33,8 | 34,1 | 34,3 | 34,4 | 34,9 | 36,2 | 37   | 38,3 | 39,4 |
| <b>1100</b> | 40,2 | 40,1 | 39,9 | 40,2 | 40,9 | 41,5 | 41,8 | 42,5 | 42,8 | 43,3 |
| <b>1110</b> | 43,5 | 43,5 | 43,5 | 43,3 | 43,1 | 43,1 | 42,6 | 42,5 | 41,8 | 41   |
| <b>1120</b> | 39,6 | 37,8 | 34,6 | 32,2 | 28,2 | 25,7 | 22,5 | 17,2 | 11,9 | 6,6  |
| <b>1130</b> | 1,3  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>1140</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 3,4  | 8,7  | 14   | 19,3 | 24,6 | 29,9 |
| <b>1150</b> | 34   | 37   | 37,8 | 37   | 36,2 | 32,2 | 26,9 | 21,6 | 16,3 | 10,9 |
| <b>1160</b> | 5,6  | 0,3  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,3  |
| <b>1170</b> | 2,4  | 5,6  | 10,5 | 15,8 | 19,3 | 20,8 | 20,9 | 20,3 | 20,6 | 21,1 |
| <b>1180</b> | 21,1 | 22,5 | 24,9 | 27,4 | 29,9 | 31,7 | 33,8 | 34,6 | 35,1 | 35,1 |
| <b>1190</b> | 34,6 | 34,1 | 34,6 | 35,1 | 35,4 | 35,2 | 34,9 | 34,6 | 34,6 | 34,4 |
| <b>1200</b> | 32,3 | 31,4 | 30,9 | 31,5 | 31,9 | 32,2 | 31,4 | 28,2 | 24,9 | 20,9 |
| <b>1210</b> | 16,1 | 12,9 | 9,7  | 6,4  | 4    | 1,1  | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>1220</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 1,6  | 2,6  |
| <b>1230</b> | 4,8  | 6,4  | 8    | 10,1 | 12,9 | 16,1 | 16,9 | 15,3 | 13,7 | 12,2 |
| <b>1240</b> | 14,2 | 17,7 | 22,5 | 27,4 | 31,4 | 33,8 | 35,1 | 35,7 | 37   | 38   |
| <b>1250</b> | 38,8 | 39,4 | 39,4 | 38,6 | 37,8 | 37,8 | 37,8 | 37,8 | 37,8 | 37,8 |
| <b>1260</b> | 38,6 | 38,8 | 39,4 | 39,8 | 40,2 | 40,9 | 41,2 | 41,4 | 41,8 | 42,2 |
| <b>1270</b> | 43,5 | 44,7 | 45,5 | 46,7 | 46,8 | 46,7 | 45,1 | 39,8 | 34,4 | 29,1 |

|             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>1280</b> | 23,8 | 18,5 | 13,2 | 7,9  | 2,6  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>1290</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>1300</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 2,4  |
| <b>1310</b> | 7,7  | 13   | 18,3 | 21,2 | 24,3 | 27   | 29,5 | 31,4 | 32,7 | 34,3 |
| <b>1320</b> | 35,2 | 35,6 | 36   | 35,4 | 34,8 | 34   | 33   | 32,3 | 31,5 | 29,8 |
| <b>1330</b> | 28,2 | 26,6 | 24,9 | 22,5 | 17,7 | 12,9 | 8,4  | 4    | 0    | 0    |
| <b>1340</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |      |
| <b>1350</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>1360</b> | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| <b>1370</b> | 0    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Fonte: ABNT NBR 6601 (2021)