

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

LEONARDO JOSÉ BRÜCK

ANÁLISE DO EFEITO AERODINÂMICO GERADO EM UM ÔNIBUS RODOVIÁRIO
DECORRENTE DA SUBSTITUIÇÃO DOS ESPELHOS RETROVISORES
EXTERNOS POR CÂMERAS

Joinville

2021

LEONARDO JOSÉ BRÜCK

ANÁLISE DO EFEITO AERODINÂMICO GERADO EM UM ÔNIBUS RODOVIÁRIO
DECORRENTE DA SUBSTITUIÇÃO DOS ESPELHOS RETROVISORES
EXTERNOS POR CÂMERAS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Automotiva do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Leonel R. Cancino, Dr.
Eng.

Joinville

2021

Análise do efeito aerodinâmico gerado em um ônibus rodoviário decorrente da substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras

Leonardo José Brück

Esse trabalho de conclusão de curso foi julgado e aprovado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 06 de Maio de 2021.

Prof. Modesto H. Ferrer, Dr Eng.
Coodenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Leonel Rincon Cancino, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Andrea Piga Carboni, Dr. Eng.
CTJ – UFSC

Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr. Eng.
CTJ – UFSC

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo avaliar a redução no arrasto aerodinâmico gerado decorrente da substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras em um ônibus rodoviário. Um sistema de câmeras externas e displays internos podem ser utilizados para suprir a necessidade dos espelhos retrovisores. Foram realizadas simulações numeradas das geometrias propostas para cada configuração do ônibus, com o intuito de analisar e comparar os escoamentos encontrados e identificar uma redução significativa na resistência aerodinâmica. Além disso, esperava-se encontrar outros fatores que incentivassem a substituição dos espelhos retrovisores, entre eles é possível citar a diminuição da emissão de poluentes, a redução de pontos cegos para o motorista e a eliminação de deposição de sujeira nas janelas laterais do veículo. Os resultados foram apresentados em formato de tabelas, gráficos e imagens que posteriormente foram usados como base de cálculo chegando a uma economia de combustível de 2,09% para o ônibus com câmeras. Ainda, foi realizada uma análise de custo-benefício, concluindo que o custo para a implementação do conjunto de câmeras se pagaria em 5,21 anos através da redução dos gastos com combustível.

Palavras-chaves: Aerodinâmica. Coeficiente de arrasto. Economia de combustível. Ônibus rodoviário.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu professor orientador Leonel que me auxiliou muito para a realização deste trabalho, a Universidade Federal de Santa Catarina, a equipe de competição Formula CEM do campus de Joinville e ao professor Modesto por fornecer a licença para o programa de simulação *Ansys Fluent*.

A minha mãe e meu irmão que mesmo longe forneceram grande apoio emocional para seguir em frente, a minha noiva Gabriela que esteve ao meu lado durante todo esse percurso.

A Deus e ao universo por permitirem essa grande realização em minha vida.

LISTA DE SIGLAS

<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics
<i>DNS</i>	Direct Numerical Simulation
<i>LES</i>	Large Eddy Simulation
<i>RANS</i>	Reynolds Averaged Navier Stokes
<i>RSM</i>	Reynolds Stress Model
<i>RNG</i>	Re-Normalisation Group

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_m	Resistência mecânica (N)
Q_r	Resistência ao rolamento (N)
Q_s	Resistência ao aclone (N)
Q_a	Resistência aerodinâmica (N)
Q_i	Resistência a inércia (N)
f	Coefficiente de atrito
m	Massa (kg)
g	Aceleração gravitacional (m/s^2)
α	Ângulo (rad/s)
V	Velocidade do escoamento (m/s)
D	Arrasto aerodinâmico (N)
ρ	Densidade do ar (kg/m^3)
A	Área frontal (m^2)
w	Velocidade local (m/s)
s	Sessão transversal (m^2)
p_t	Pressão total (Pa)
p	Pressão estática (Pa)
cp	Coefficiente de pressão
p_∞	Pressão do escoamento livre (Pa)
v_∞	Velocidade do escoamento livre (m/s)
cd	Coefficiente de arrasto aerodinâmico
L	Comprimento do veículo (m)
k	Energia cinética turbulenta (J/kg)
ϵ	Taxa de dissipação turbulenta
Q_t	Resistência total ao movimento (N)
CAM_d	Custo médio anual gasto em óleo diesel (R\$)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Consumo de combustível necessário para superar cada resistência à tração em um ônibus.....	16
Figura 2: Área frontal.....	17
Figura 3: Janela lateral suja devido à influência do espelho retrovisor externo.....	18
Figura 4: Linhas de corrente em um ônibus.	19
Figura 5: Distribuição do coeficiente de pressão ao longo da carroceria de um ônibus.....	21
Figura 6: Domínio contínuo e o domínio discreto para um caso 1D.....	22
Figura 7: Ônibus Marcopolo New G7 Viaggio 1050.	23
Figura 8: Ônibus com espelhos retrovisores.	24
Figura 9: Ônibus com câmeras.	24
Figura 10: Câmera utilizada no caminhão Actors da Mercedes-Benz.....	25
Figura 11: Geometria simplificada do ônibus com espelhos retrovisores.....	25
Figura 12: Taxa de bloqueio.....	27
Figura 13: Túnel de vento virtual.	28
Figura 14: Teste de independência de túnel de vento.....	28
Figura 15: Elementos de malha presentes no estudo, vista lateral.	30
Figura 16: Elementos de malha presentes no estudo, vista frontal em corte.	30
Figura 17: Refinamentos do túnel de vento.....	31
Figura 18: Teste de independência de malha.	32
Figura 19: Condições de contorno no domínio computacional.....	34
Figura 20: Divisão das partes do veículo	35
Figura 21: Grau de modelagem e custo operacional.....	36
Figura 22: Gráfico dos residuais da simulação.....	38
Figura 23: Linhas de corrente, vista lateral.	41
Figura 24: Campo de pressão sobre o ônibus com espelhos.	42
Figura 25: Campo de pressão sobre o ônibus com câmeras.	42
Figura 26: Coeficiente de pressão agindo sobre o comprimento do ônibus.....	44
Figura 27: Linhas de corrente sobre a carroceria do ônibus com espelhos retrovisores.....	45
Figura 28: Linhas de corrente sobre a carroceria do ônibus com câmeras.....	45

Figura 29: Visão interna do veículo com câmeras.....50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficientes a e b.....	15
Tabela 2: Resultados dos testes de independência do túnel de vento.....	29
Tabela 3: Resultados dos testes de independência da malha computacional.	33
Tabela 4: Resultados do coeficiente de arrasto encontrado para cada superfície dos ônibus.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	14
2.2 ARRASTO AERODINÂMICO	16
2.3 ESCOAMENTO EXTERNO	18
2.4 COEFICIENTE DE PRESSÃO	20
2.5 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	21
3 METODOLOGIA.....	23
3.1 GEOMETRIA	23
3.1.1 Simplificações da geometria	25
3.2 CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DE VENTO VIRTUAL	26
3.2.1 Simplificações do túnel de vento virtual	27
3.2.2 Teste de independência de comprimento do túnel de vento virtual	27
3.3 MALHA COMPUTACIONAL.....	29
3.3.1 Teste de independência de malha	32
3.4 SETUP DA SIMULAÇÃO	33
3.4.1 Condições iniciais e de contorno	33
3.4.1.1 Velocidade de escoamento.....	35
3.4.2 Modelos de Turbulência.....	35
3.4.3 Método de convergência.....	37
4 RESULTADOS	39
4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	39
4.1.1 Campo de escoamento.....	40
4.2 ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL	46

4.3 ESTUDO DE CUSTO-BENEFÍCIO	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

É evidente que ao passar dos anos os veículos foram se tornando cada vez mais eficientes, econômicos e menos poluentes. Segundo Hucho (1987) o aumento dos preços de combustíveis e a necessidade de operação lucrativa incentivam as fabricantes de veículos a explorar varias maneiras de minimizar o consumo de combustível.

Wong (2001) realça outro ponto bastante relevante, principalmente nos dias atuais, que são as emissões de poluentes lançadas constantemente na nossa atmosfera. Com isso, fortalecemos ainda mais a preocupação com o consumo de combustível, tendo em vista que quanto menor o consumo, conseqüentemente, menor serão as emissões de poluentes geradas.

Para a redução do consumo de combustível de um veículo andando no plano é preciso minimizar a resistência ao rolamento e/ou a resistência aerodinâmica. Para um ônibus rodoviário a uma velocidade de 100km/h, a potência necessária para superar a resistência aerodinâmica é maior que a necessária para superar a resistência ao rolamento, (Wong, 2001)

Além disso, é evidente que o custo para a redução do consumo de combustível através de um projeto de melhoramento aerodinâmico é relativamente baixo, se comparado a um projeto voltado ao melhoramento da eficiência energética em motores de combustão interna.

Com base nos fatos citados, este trabalho versará sobre a diminuição do arrasto aerodinâmico, com o intuito de diminuir a potência necessária para superar a resistência aerodinâmica. Portanto, será abordada uma possível diminuição do coeficiente de arrasto e da área frontal de um ônibus rodoviário, através da substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras.

Para isso, é proposta uma geometria de um ônibus rodoviário com o auxílio do programa *SolidWorks* e, posteriormente, importada para o programa *Ansys Fluent* para a realização de simulações usando dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD). São apresentados os métodos utilizados para a geração da malha computacional aplicada a geometria proposta, assim como, toda a parte de *setup* e pós-processamento cabíveis.

O trabalho parte da avaliação das resistências impostas ao movimento de um veículo terrestre, expondo as principais equações e fenômenos que regem esse movimento. Além de uma apresentação sobre as forças aerodinâmicas encontradas para um ônibus trafegando em uma pista plana a uma velocidade constante.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise computacional em CFD do efeito aerodinâmico gerado devido à substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras em um ônibus rodoviário para alcançar a redução no consumo de combustível do veículo. Para isso foi proposto os seguintes objetivos específicos:

- Executar simulações em CFD para realizar uma comparação do coeficiente de arrasto entre o ônibus com retrovisores externos e o ônibus com câmeras.
- Analisar a diferença entre a perturbação gerada no escoamento do ar sobre os espelhos e as câmeras.
- Avaliar a redução nos custos gastos com combustível anualmente para um ônibus rodoviário.
- Suceder uma análise de custo-benefício para identificar o tempo necessário para o retorno do investimento da implementação das câmeras através da redução no consumo de combustível obtida.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado à base teórica necessária utilizada para a realização dos cálculos e métodos propostos para este estudo. Trazendo uma breve introdução sobre o tema que será abordado neste trabalho.

2.1 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

É evidente que nos dias atuais a preocupação na redução do consumo de combustível dos automóveis é de grande importância, não somente para veículos de passeio, mas também para veículos de carga e ônibus. Essa preocupação se dá por conta dos elevados preços dos combustíveis e, também, para a diminuição das emissões de poluentes na atmosfera.

Para a diminuição do consumo de combustível de um automóvel é necessário minimizar as resistências ao movimento do mesmo. A seguir serão expressas as resistências que se opõem ao movimento de um veículo.

Q_m = Resistência mecânica;

Q_r = Resistência ao rolamento;

Q_s = Resistência ao aclone;

Q_a = Resistência aerodinâmica;

Q_i = Resistência à inércia.

Segundo Nicolazzi et al. (2012) “A resistência total ao avanço do veículo é definida como a soma de todas as resistências ao movimento excluída a mecânica.” (p.126).

A resistência ao rolamento é gerada devido às perdas no par pneu-pista. A resistência ao aclone ocorre somente em veículos que estejam subindo, pelo fato que parte do seu peso não será absorvida pelo solo, resultando em uma força contrária ao movimento. A resistência à inércia ocorre em massas que estejam sofrendo aceleração ou desaceleração. A resistência mecânica é considerada como toda e qualquer perda que ocorre entre o volante do motor e os mancais das rodas motrizes.

Para o estudo proposto, será assumida uma condição em que o veículo estará trafegando no plano com uma velocidade constante durante toda a simulação. Com isso, os termos da resistência ao aclone e a resistência à inércia serão considerados nulos.

A resistência ao rolamento pode ser expressa pela seguinte equação:

$$Q_r = fG\cos(\alpha) \quad (01)$$

Onde: f = Coeficiente de atrito de rolamento;

$G = m \cdot g$ = Peso do veículo;

α = Ângulo de inclinação da pista = 0.

O coeficiente de atrito de rolamento varia de acordo com alguns parâmetros, entre eles estão o piso, a velocidade, a pressão de inflagem dos pneus, a carga radial e o tipo do pneu. Segundo Nicolazzi et al. (2012) uma orientação para determinar esse coeficiente de atrito é pela seguinte equação:

$$f = a + b \left(\frac{V}{100}\right)^2 \quad (02)$$

Onde a e b são tabelados de acordo com o tipo de pneu usado, conforme tabela 1. V é a velocidade do escoamento, que é dada em m/s.

Tabela 1: Coeficientes a e b .

	a	b
Pneus normais	0,0150	0,052
Pneus de alta histerese	0,0258	0,052

Fonte: Nicolazzi et al. (2012)

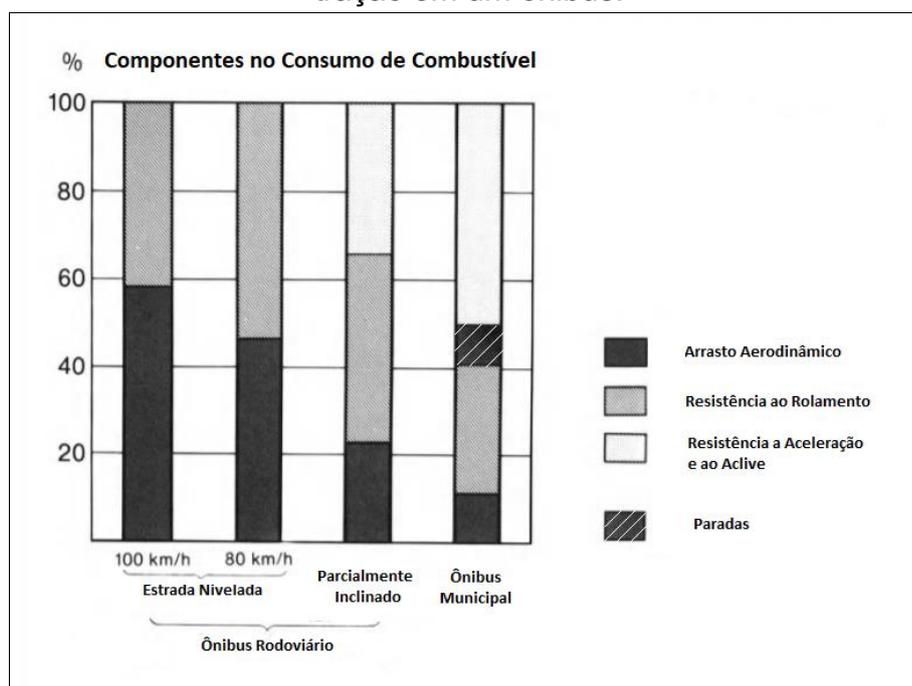
O presente trabalho tem ênfase na otimização e diminuição da resistência aerodinâmica que ocorre devido ao escoamento de ar externo sobre a carroceria do veículo e pelo escoamento interno. Uma análise mais aprofundada sobre essa resistência será abordada nos próximos tópicos.

2.2 ARRASTO AERODINÂMICO

Para veículos pesados e rodoviários é necessária uma velocidade de aproximadamente 100 km/h para que a potência necessária para vencer a resistência aerodinâmica supere a potência necessária para vencer as demais resistências, (Hucho, 1987).

Na figura 1, podemos visualizar a porcentagem de consumo de combustível necessária para superar cada resistência em um ônibus operando em diferentes condições. Notamos que para um ônibus rodoviário, em uma estrada nivelada, a resistência aerodinâmica é a dominante para uma velocidade de 100 km/h. Notamos ainda, que mesmo a 80 km/h, a participação da resistência aerodinâmica no consumo de combustível é superior a 40%.

Figura 1: Consumo de combustível necessário para superar cada resistência à tração em um ônibus.



Fonte: Adaptado do Hucho (1987)

A resistência aerodinâmica é gerada por duas fontes: Uma é o escoamento externo do ar sobre a carroceria do veículo, e a outra é o fluxo interno, responsável pelo sistema de refrigeração, aquecimento e ventilação do automóvel. Entre os dois casos, o dominante é o primeiro, responsável por mais de 90% da resistência aerodinâmica total de um veículo de passeio (Wong, 2001).

O presente trabalho tem ênfase no arrasto aerodinâmico exterior do ônibus, gerado pelo escoamento do ar viscoso sobre sua carroceria. Essa resistência aerodinâmica, também conhecida como arrasto aerodinâmico pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Q_a = D = \frac{\rho C_d A V^2}{2} \quad (03)$$

Onde : D = Arrasto aerodinâmico.

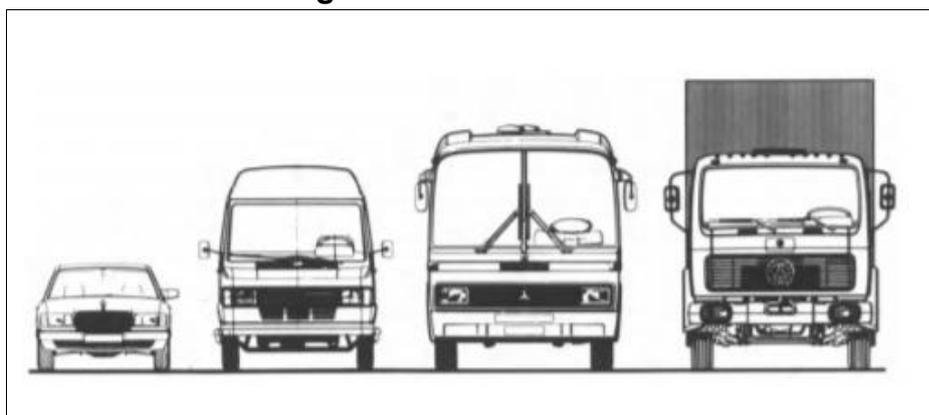
C_d = coeficiente de arrasto.

ρ = densidade do ar ambiente.

V = velocidade do veículo.

A = área frontal do veículo (Conforme figura 2).

Figura 2: Área frontal.



Fonte: Hucho (1987)

Pela equação 03 é possível visualizar que o arrasto aerodinâmico é proporcional ao quadrado da velocidade, assim como, proporcional ao coeficiente de arrasto, que é um parâmetro geométrico da carroceria, e a área frontal, que é um parâmetro dimensional do veículo.

Sabendo ainda que a densidade do ar é um parâmetro fixo, determinado principalmente pela pressão e temperatura ambiente, e a velocidade é um parâmetro variável, determinado pelo motorista. Só nos resta medir esforços para a otimização da área frontal e do coeficiente de arrasto, visando à diminuição da resistência aerodinâmica do veículo.

Com isso, o objetivo deste trabalho será em uma otimização dada tanto para a área frontal como para o coeficiente de arrasto, através da substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras em um ônibus rodoviário. Com a substituição, além da diminuição da área frontal do ônibus haverá uma otimização no fluxo de ar sobre sua carroceria, melhorando também o coeficiente de arrasto.

Além disso, Hucho (1987) recorda que, em veículos de carga e ônibus, os espelhos retrovisores externos são particularmente responsáveis pela deposição de sujeira nas janelas laterais do veículo, Conforme figura 3.

Figura 3: Janela lateral suja devido à influência do espelho retrovisor externo.



Fonte: Hucho (1987)

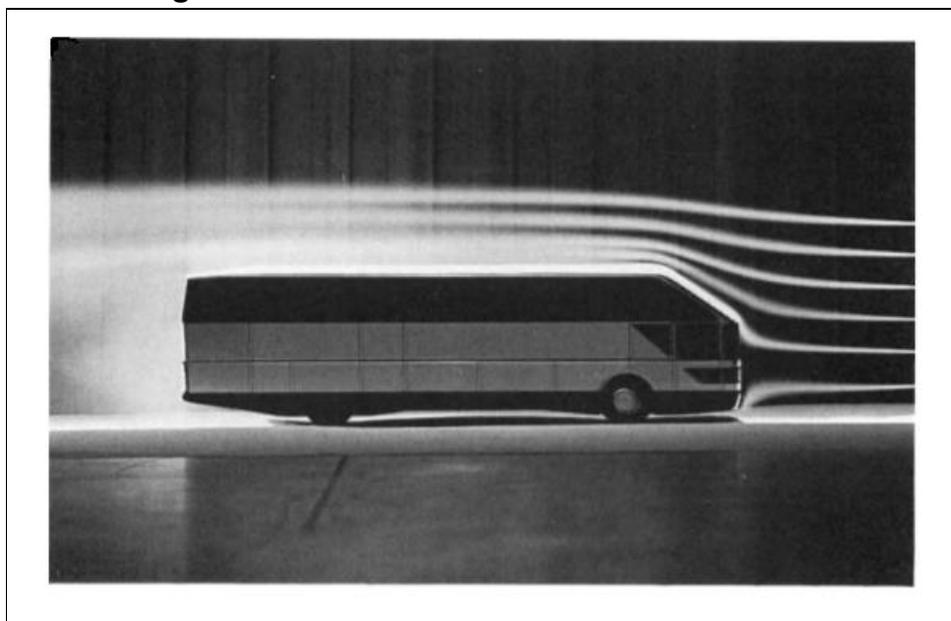
Com isso, a substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras nos garantirá não somente uma otimização na área frontal e no coeficiente de arrasto, mas também, reduzirá consideravelmente a deposição de sujeira nas janelas laterais do veículo, auxiliando na visibilidade e segurança para o motorista.

2.3 ESCOAMENTO EXTERNO

O fluxo do escoamento de ar externo ao redor do veículo gera as linhas de correntes, conforme figura 4. Quando não há separação do escoamento, as forças

geradas pelos efeitos viscosos do fluido se restringem a uma fina camada, denominada de camada limite.

Figura 4: Linhas de corrente em um ônibus.



Fonte: Hucho (1987)

Na região adjacente à superfície do veículo que compreende esta milimétrica camada, a velocidade do fluxo decresce, partindo da velocidade do escoamento na borda da camada limite até zero na superfície do veículo, por conta da condição de não escorregamento do fluido (Hucho, 1987).

O desenvolvimento do escoamento invíscido, presente acima da camada limite, determina a distribuição de pressão ao longo da carroceria do veículo. Desta forma é necessário apresentar alguns conceitos básicos da mecânica dos fluidos, começando pela conservação da massa aplicada a um fluido incompressível.

$$sw = \text{constante} \quad (04)$$

Onde s representa a seção transversal local de um pequeno tubo formado entre às linhas de corrente e w representa a velocidade local do fluido, que permanece constante ao longo de s . Pela equação 04, podemos concluir que onde há aproximação das linhas de corrente a velocidade local (w) é elevada.

Além disso, o escoamento obedece à lei de conservação da quantidade de movimento de Newton. Se aplicarmos essa lei para uma linha de fluxo invíscido e

incompressível, obteremos a seguinte equação, denominada de equação de *Bernoulli*:

$$p_t = p + \frac{\rho w^2}{2} = \text{constante} \quad (05)$$

Onde: p_t = pressão total.

p = pressão estática.

$\frac{\rho w^2}{2}$ = pressão dinâmica.

Pela equação 05, podemos afirmar que a pressão estática somada à pressão dinâmica é constante para um fluido invíscido e incompressível ao longo de uma linha de corrente. Além disso, podemos notar que a pressão estática é máxima para baixas velocidades de escoamento local, chegando a um valor máximo onde a velocidade do escoamento local tende à zero, como no ponto de estagnação encontrado, por exemplo, na parte frontal do veículo.

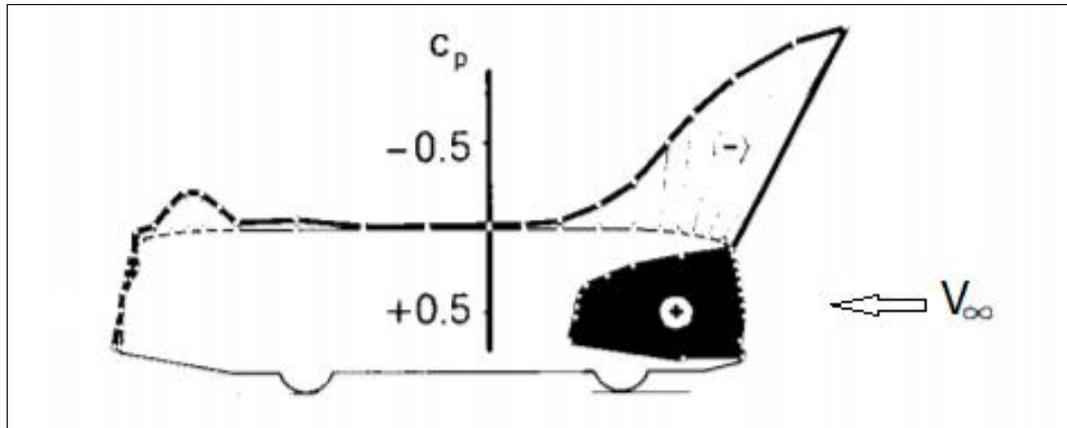
2.4 COEFICIENTE DE PRESSÃO

O coeficiente de pressão é uma grandeza adimensional que possui a máxima em +1 e a mínima chegando a valores negativos, esse coeficiente nos mostra se a pressão incidente local no contorno da carroceria está acima ou abaixo da pressão ambiente.

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} V_\infty^2} = 1 - \left(\frac{w}{V_\infty} \right)^2 \quad (06)$$

Onde V_∞ representa a velocidade do escoamento livre, que pode ser aproximada para a velocidade do veículo caso o ar ambiente não esteja perturbado. E p_∞ é a pressão do escoamento livre ou pressão ambiente.

Figura 5: Distribuição do coeficiente de pressão ao longo da carroceria de um ônibus.



Fonte: Hucho (1987)

Da figura 5, podemos notar algumas características no campo de pressão. Na parte frontal do veículo, ponto de estagnação, o coeficiente de pressão vale +1 representando a máxima pressão estática do escoamento. Na superfície entre a parte frontal e superior do ônibus é possível notar a drástica diminuição do c_p , pois neste ponto há a aproximação das linhas de corrente e o aumento da velocidade local, caracterizando um ponto de baixa pressão local e sucção. Já na parte traseira do veículo ocorre o aumento do c_p novamente, devido o descolamento da camada limite.

2.5 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

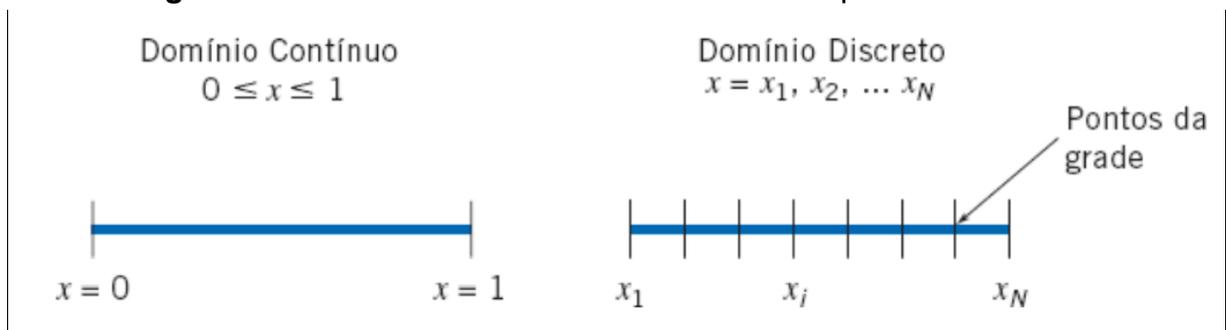
Para melhorar o desempenho de carros e veículos comerciais modernos, a indústria automotiva acelerou o uso de tecnologias e ferramentas de pesquisa de design. Uma dessas ferramentas é o CFD. A dinâmica de fluidos computacional é utilizada basicamente para obter soluções numéricas para problemas de escoamento de fluido com o uso de computadores, seja para o escoamento externo sobre a carroceria do veículo ou para o escoamento interno sobre o motor, o CFD está ajudando muito os engenheiros automotivos a compreender melhor o fluxo e processos, e por sua vez, auxiliando na obtenção de veículos mais aprimorados aerodinamicamente, John D. (2011).

As equações apresentadas até o momento são para casos reais, o qual acontece de forma contínua, mas para as simulações CFD é preciso converter para

a forma discreta através da geração da malha computacional dentro do domínio de interesse.

Segundo Fox e McDonald (2014), quase sempre a estratégia de estudos CFD é substituir o domínio contínuo de um problema para um domínio discreto usando uma malha ou grade. No domínio contínuo, cada variável do escoamento é definida em cada ponto do domínio e no domínio discreto, cada variável do escoamento é definida apenas nos pontos da malha. Na figura 6 a seguir, podemos visualizar a diferença entre o domínio discreto e o domínio contínuo para um caso 1D, analogamente, pode-se pensar para um caso 2D e 3D.

Figura 6: Domínio contínuo e o domínio discreto para um caso 1D.



Fonte: Fox e McDonald (2014)

Com isso, é possível ter uma noção da utilidade da malha computacional. Vale lembrar que a malha é um fator crucial para uma boa simulação, podendo gerar resultados muito distintos se a mesma não for bem feita e refinada o suficiente para o determinado problema em estudo.

Outro fator extremamente importante para uma simulação numérica CFD é a estratégia de resolução das equações de transportes que governam o escoamento. Na sessão 3.4.2 serão apresentadas algumas das principais técnicas utilizadas e suas diferenças, além de um estudo para determinar qual melhor se aplica para o problema proposto neste trabalho.

3 METODOLOGIA

A metodologia usada para este trabalho de conclusão de curso consiste no desenvolvimento da geometria do ônibus proposto no programa *SolidWorks* e, posteriormente, implementada no programa *Ansys Fluent* para a geração do domínio computacional, malha computacional e simulação CFD. O estudo inclui a análise de duas geometrias, uma com os espelhos retrovisores externos e outra com a substituição dos mesmos por câmeras, com o intuito de analisar a redução no coeficiente de arrasto.

3.1 GEOMETRIA

Para esse estudo foi escolhido o ônibus New G7 Viaggio 1050 da empresa Marcopolo. Este veículo possui um dos menores coeficientes de arrasto já encontrados para ônibus – $cd = 0,42$ – próximo dos alcançados por veículos de passeio, por conta da integração da parte superior da frente e do teto, com linhas aerodinâmicas e em formato de gota, (Rede Ônibus, 2017).

Para o presente estudo esperasse encontrar um coeficiente de arrasto inferior ao citado anteriormente, pois serão aplicadas varias simplificações na geometria e nas condições das simulações para conseguir minimizar os custos computacionais envolvidos.

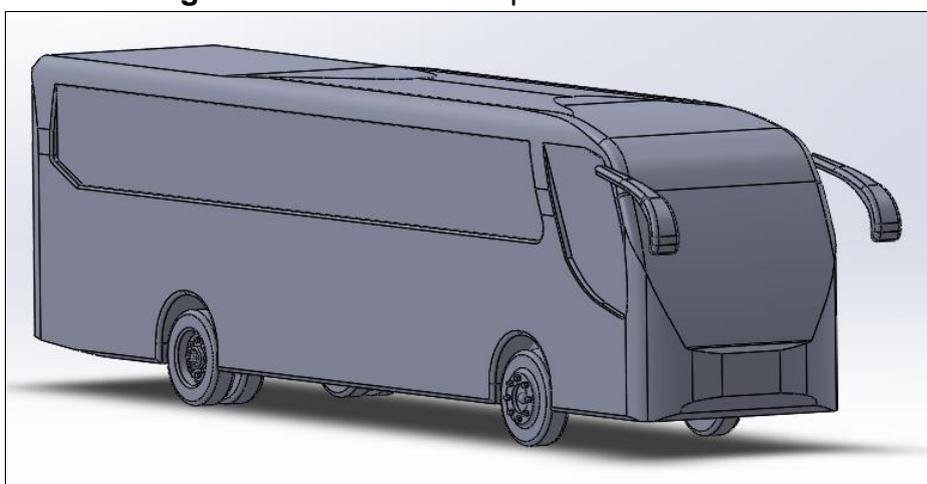
Figura 7: Ônibus Marcopolo New G7 Viaggio 1050.



Fonte: Marcopolo (2021).

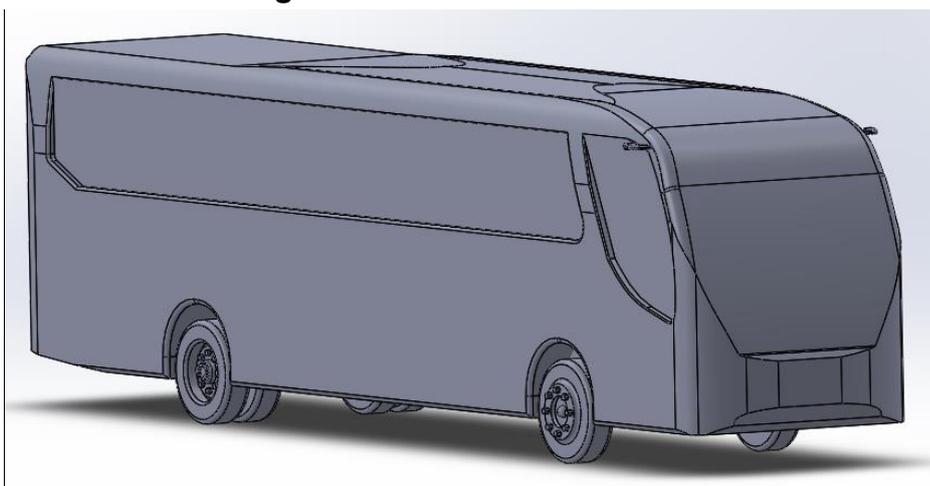
As geometrias dos ônibus foram desenvolvidas com o auxílio do programa *SolidWorks*, usando uma técnica que consiste em utilizar as vistas frontal, lateral e superior do veículo como base para se obter a geometria externa da carroceria do mesmo. Será criado uma única geometria para os dois casos e, posteriormente, criado uma montagem para a implementação dos espelhos retrovisores e das câmeras, mantendo assim a similaridade total entre os veículos em análise, conforme figuras 8 e 9.

Figura 8: Ônibus com espelhos retrovisores.



Fonte: Autor (2021)

Figura 9: Ônibus com câmeras.



Fonte: Autor (2021)

Para o projeto das câmeras presentes na figura 9, foi considerada a câmera utilizada no caminhão Actros da Mercedes-Benz, o primeiro veículo a chegar ao Brasil com essa tecnologia da substituição dos espelhos retrovisores. A figura 10 a

seguir apresenta a câmera utilizada no veículo, localizada na parte superior das portas.

Figura 10: Câmera utilizada no caminhão Actors da Mercedes-Benz.



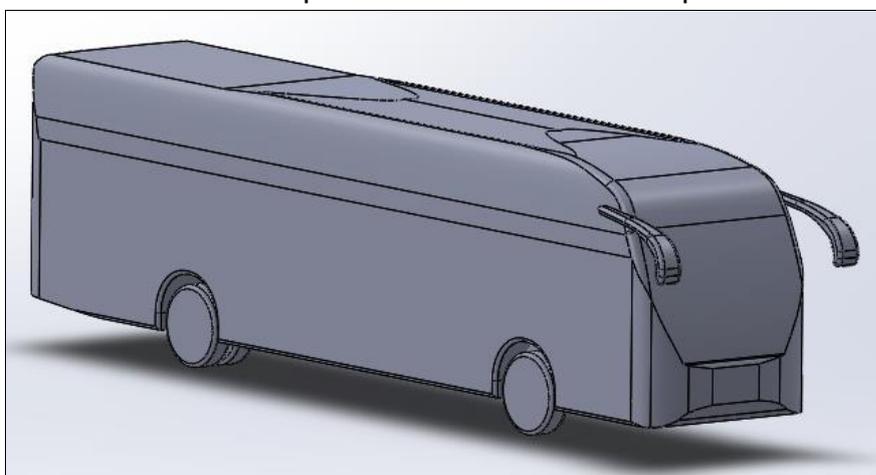
Fonte: QuatroRodas (2019).

3.1.1 Simplificações da geometria

Visando diminuir o custo computacional envolvido durante as simulações, devem-se realizar algumas simplificações na geometria proposta. Essas simplificações são pouco significantes para o resultado final, mas podem gerar grande custo operacional ou até mesmo dificultar a convergência dos resultados.

Com isso, algumas partes da geometria foram menosprezadas para realizar as simulações numéricas, como a parte inferior da carroceria, as lanternas, as janelas, as cavidades das rodas entre outros pequenos detalhes. Na figura 11 é possível visualizar a geometria simplificada do ônibus com os espelhos retrovisores, lembrando que as mesmas simplificações foram aplicadas para o ônibus com as câmeras.

Figura 11: Geometria simplificada do ônibus com espelhos retrovisores.



Fonte: Autor (2021).

3.2 CONSTRUÇÃO DO TÚNEL DE VENTO VIRTUAL

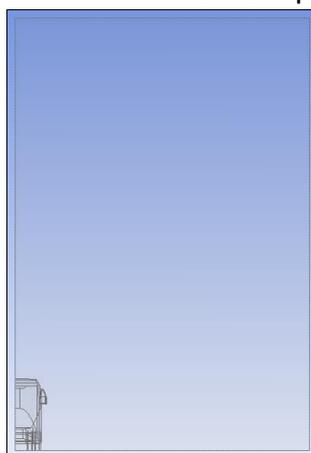
Com a geometria projetada e imposta às devidas simplificações, deve-se realizar a importação da mesma para o software de simulação. Neste estudo o software utilizado foi o *Ansys Fluent*.

Para simular o escoamento de ar sobre a carroceria do veículo é necessário à criação de um túnel de vento virtual. Denominado também de domínio computacional é de extrema importância para a obtenção de resultados satisfatórios para a simulação, pois é em seu interior que será desenvolvida a malha computacional e a resolução das equações de transportes do escoamento, Çengel e Cimbala (2012).

O dimensionamento do túnel de vento virtual está diretamente relacionado com as dimensões do veículo em estudo e, também, diretamente relacionado com os resultados da simulação. Com isso, será realizado um estudo de independência de túnel de vento virtual na seção 3.2.2, para analisar seu dimensionamento em relação ao comprimento.

Outro ponto determinante além do comprimento do túnel de vento é sua taxa de bloqueio. A taxa de bloqueio é a proporção da área frontal do veículo em relação a areal transversal do túnel de vento. Essa razão deve ser a menor possível, não excedendo 5%, para que as paredes do domínio não influenciem no escoamento próximo a geometria, (Hucho 1987).

Na figura 12 a seguir, podemos visualizar a influência da área frontal da geometria em relação à área transversal do túnel de vento. Neste caso a relação ficou em apenas 1,91%, garantindo a não influência das paredes do domínio computacional no escoamento próximo a geometria.

Figura 12: Taxa de bloqueio.

Fonte: Autor (2021)

3.2.1 Simplificações do túnel de vento virtual

Visando minimizar o custo computacional envolvido durante as simulações, será realizada uma simplificação por simetria na geometria. Com isso, será simulado somente metade do veículo que é simétrico no plano vertical ao longo do seu eixo longitudinal, (Hetawal et al. 2014).

Com isso, os resultados serão os mesmos e será garantida uma grande diminuição no custo operacional. Na figura 12 anterior, é possível visualizar essa simplificação que já havia sido imposta para a construção do túnel de vento virtual.

3.2.2 Teste de independência de comprimento do túnel de vento virtual

Como mencionado, as dimensões do túnel de vento virtual são de extrema importância para a obtenção de resultados satisfatórios. Nesta sessão é realizada uma análise da influência do comprimento do túnel de vento em relação aos resultados, visando chegar a um valor onde os resultados obtidos sejam independentes do comprimento do domínio computacional.

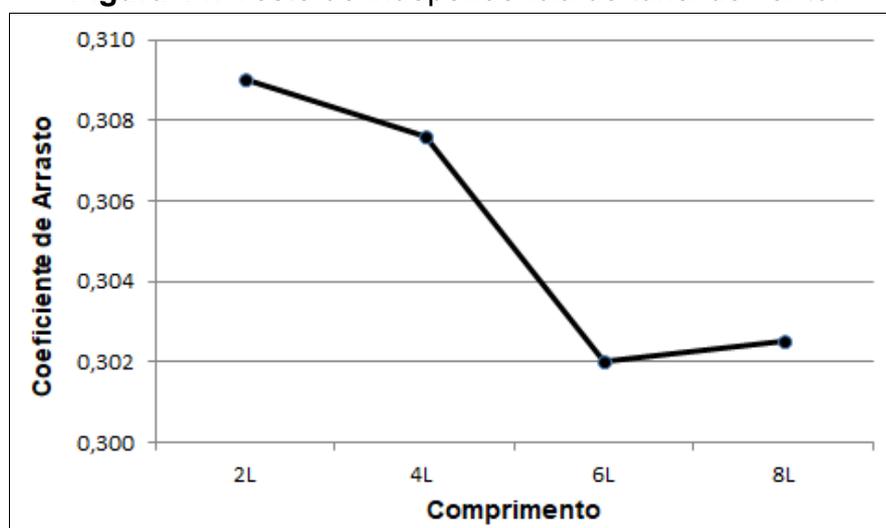
O dimensionamento do comprimento do túnel de vento será em relação ao comprimento do ônibus em estudo ($L = 13\text{m}$). Seguindo as recomendações da Agarwal (2013) é deixado um comprimento do túnel de vento fixo de $3L$ para frente do veículo, conforme figura 13. Tal comprimento é o suficiente para que o escoamento já esteja completamente desenvolvido antes de atingir a superfície da geometria.

Figura 13: Túnel de vento virtual.

Fonte: Autor (2021)

Fixado o comprimento para a parte da frente do veículo, serão realizadas simulações para diferentes comprimentos para a parte posterior do ônibus, no intuito de chegar a resultados independentes do comprimento do túnel de vento virtual.

Para todos os testes do domínio computacional, foi gerada uma malha computacional razoável que atendia a convergência necessária para as simulações. Foram utilizados os mesmos dimensionamentos dos elementos da malha para cada teste, chegando a resultados que dependem exclusivamente do comprimento do túnel de vento.

Figura 14: Teste de independência de túnel de vento.

Fonte: Autor (2021)

Foram realizados quatro testes de comprimentos para a parte traseira do veículo, partindo de um comprimento de 2L, para 4L, 6L até chegar ao valor de 8L, conforme figura 14. Os testes foram finalizados, pois a diferença no coeficiente de arrasto (c_d) encontrado entre os comprimentos de 6L e 8L foi de apenas 0,16%,

chegando assim, a resultados satisfatórios. A tabela 2 a seguir apresenta todos os parâmetros e resultados das simulações.

Tabela 2: Resultados dos testes de independência do túnel de vento.

Comprimento	cd	Diferença
2L	0,30900	-
4L	0,30762	0,4486%
6L	0,30202	1,8542%
8L	0,30250	0,1587%

Fonte: Autor (2021)

Com isso, todas as próximas simulações realizadas neste trabalho utilizarão um comprimento de túnel de vento de 3L para frente do veículo e 8L para a parte traseira do veículo. Visando ser um dimensionamento adequado para o problema em estudo.

3.3 MALHA COMPUTACIONAL

Como vimos à malha computacional é utilizada para criar o domínio discreto de um problema e é um elemento crucial para obter bons resultados de uma simulação numérica CFD. A geração da malha pode possuir diversas estratégias diferentes visando obter a melhor adequação ao problema proposto.

Neste estudo foi empregado por quase todo o domínio computacional a malha tetraédrica, por conseguir preencher com eficiência o volume de interesse, facilitando nos cálculos para domínios com um nível muito baixo de bloqueio sólido, conforme a necessidade para aplicações aerodinâmicas externas, Lanfrit (2005).

Além disso, nas regiões das paredes da geometria que ficam em contato direto com o escoamento externo, como toda a superfície do ônibus, as rodas, os espelhos e as câmeras e, ainda o chão do túnel de vento, foi adotado uma malha prismática, por conseguir gerar resultados mais realistas nestas regiões de grande viscosidade e complexidade, Lanfrit (2005).

Na figura 15 e 16 a seguir, é possível visualizar os tipos de elementos de malhas presentes no estudo e adotados para as diferentes regiões do domínio computacional. A figura 15 mostra uma vista lateral da geometria como um todo,

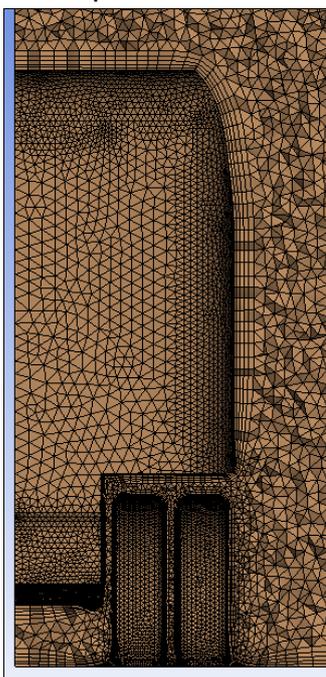
podendo visualizar o contorno da carroceria do ônibus e o chão pelos elementos de malha prismáticos. A figura 16 apresenta a vista frontal em corte, facilitando a visualização dos elementos prismáticos contornando toda a geometria, assim como, as rodas e o chão do túnel de vento.

Figura 15: Elementos de malha presentes no estudo, vista lateral.



Fonte: Autor (2021)

Figura 16: Elementos de malha presentes no estudo, vista frontal em corte.



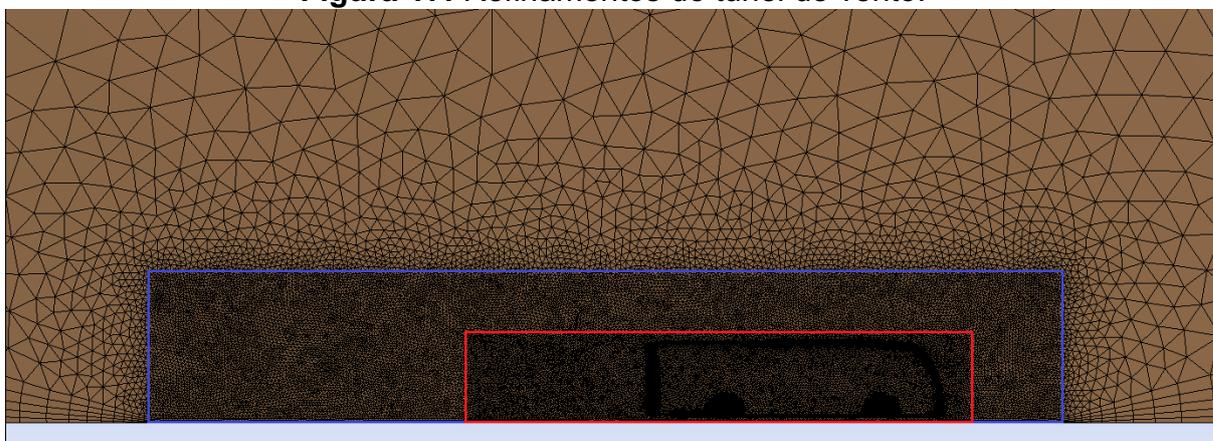
Fonte: Autor (2021)

Ainda, foram aplicados diferentes tamanhos de elementos de malha para as regiões mais complexas da geometria e do escoamento. A geometria possui partes planas grandes, como a parte lateral, o teto e o piso do veículo, nessas regiões foram empregados elementos de malha maiores que em regiões como os espelhos, câmeras e rodas e, até mesmo, em partes da carroceria que possuíam uma

curvatura mais acentuada, visando garantir um refinamento mais adequado para essas regiões de maior complexidade.

Para o túnel de vento virtual, também foi necessário realizar alguns refinamentos pontuais. Foram aplicados três tamanhos distintos para os elementos que compunham o escoamento do ar. Na figura 17, podemos visualizar esses diferentes refinamentos, presentes na região em vermelho sendo o mais refinado, na região em azul o intermediário e o restante do túnel de vento contendo um refinamento mais grosseiro.

Figura 17: Refinamentos do túnel de vento.



Fonte: Autor (2021)

Esses refinamentos presentes na figura 17 acima foram aplicados para garantir uma melhor captação dos efeitos aerodinâmicos gerados próximos à geometria, como o descolamento da camada limite e a formação dos vórtices e esteira. O comprimento dessas regiões depende do tamanho da esteira gerada pelo veículo.

Além disso, toda e qualquer malha apresentada neste estudo teve como critério de convergência manter um *Skewness* inferior a 0,90. O *Skewness* representa a diferença entre a forma de um elemento de malha e a forma do elemento adjacente. Malhas com elevados valores de *Skewness* podem gerar uma baixa exatidão, podendo desestabilizar os resultados, Rosado (2010).

Mesmo com todos esses atributos já aplicados para a geração da malha computacional, ainda é necessário realizar um estudo de independência de malha. Segundo Fox e McDonalds (2014), nunca devemos confiar em uma solução CFD sem estarmos realmente convencidos de que os resultados obtidos pela simulação

são independentes do tamanho dos elementos da malha para um nível de tolerância aceitável.

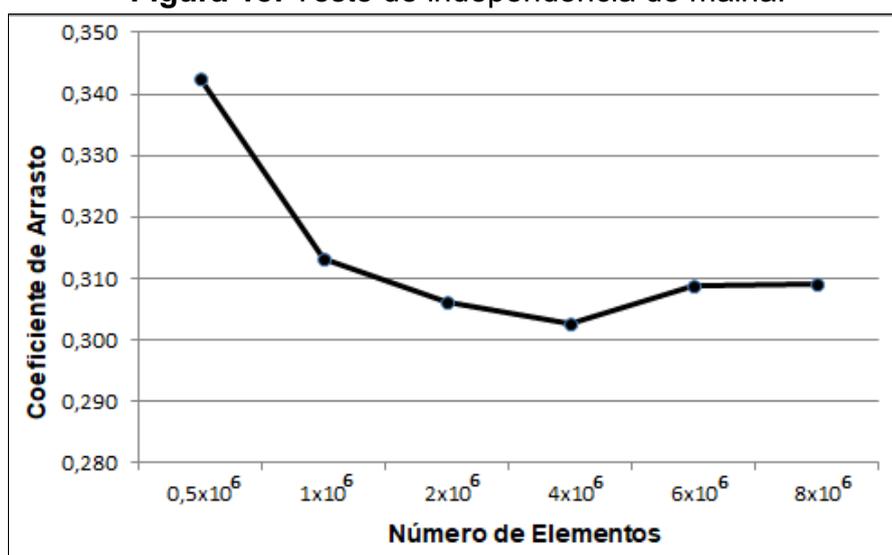
3.3.1 Teste de independência de malha

Nesta sessão será realizado um estudo da independência dos resultados das simulações com a densidade de elementos de malha aplicado. Para isso, são propostas várias simulações variando somente o número de elementos da malha, mantendo todos os outros parâmetros inalterados.

Como mencionado, dentro do domínio computacional existe vários refinamentos aplicado, tanto para as diferentes superfícies da geometria como para o escoamento do ar no domínio. À medida que o número de elementos da malha aumenta, cada um desses refinamentos aplicados teve sua densidade de elementos aumentada, visando melhorar a qualidade da malha como um todo.

Os testes foram iniciados com pouquíssimos elementos da malha e melhorados sucessivamente até que a diferença entre os resultados obtidos chegasse a níveis baixos. Foram realizadas simulações para seis tamanhos de elementos de malhas diferentes até chegar a resultados satisfatórios.

Figura 18: Teste de independência de malha.



Fonte: Autor (2021)

Pela figura 18 é possível visualizar os resultados obtidos durante o estudo de independência de malha. É possível concluir que à medida que a densidade de

elementos da malha aumenta a diferença entre os resultados diminui, chegando próximo à convergência. A diferença entre o coeficiente de arrasto (cd) encontrado para a malha com seis milhões de elementos e a malha com oito milhões de elementos ficou em apenas 0,061%, indicando a independência buscada. A tabela 3 a seguir apresenta todos os parâmetros e resultados das simulações.

Tabela 3: Resultados dos testes de independência da malha computacional.

Nº de Elementos	cd	Diferença
$0.5 * 10^6$	0,34259	-
$1.0 * 10^6$	0,31315	9,401%
$2.0 * 10^6$	0,30620	2,270%
$4.0 * 10^6$	0,30272	1,150%
$6.0 * 10^6$	0,30891	2,004%
$8.0 * 10^6$	0,30910	0,061%

Fonte: Autor (2021)

Com isso, podemos concluir que chegamos à independência dos resultados em relação ao número de elementos da malha. Para as próximas simulações, será aplicada uma malha com oito milhões de elementos, garantindo que a mesma é adequada para obter resultados independentes do tamanho da malha.

3.4 SETUP DA SIMULAÇÃO

Nesta etapa serão aplicados no software diversos parâmetros de interesse, como as condições iniciais e de contorno, o modelo de turbulência, o sentido e velocidade do escoamento, bem como, suas paredes fixas e móveis. Além disso, será imposta rotação as rodas e translação ao chão, entre outros parâmetros, visando à obtenção de resultados mais condizentes com a realidade.

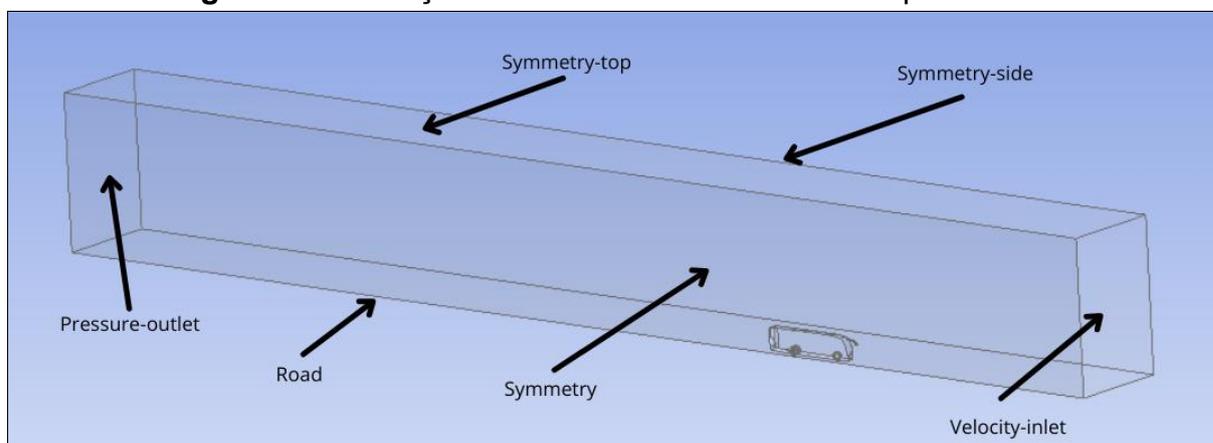
3.4.1 Condições iniciais e de contorno

Para a realização da simulação foi necessário impor condições iniciais e de contorno. Sabendo que o fluido em estudo é o ar a 15°C e 1atm, as seguintes condições foram impostas:

- Densidade – 1,225 kg/m³;
- Viscosidade – 1,789e-05 kg/m-s;
- Intensidade turbulenta – 5%;

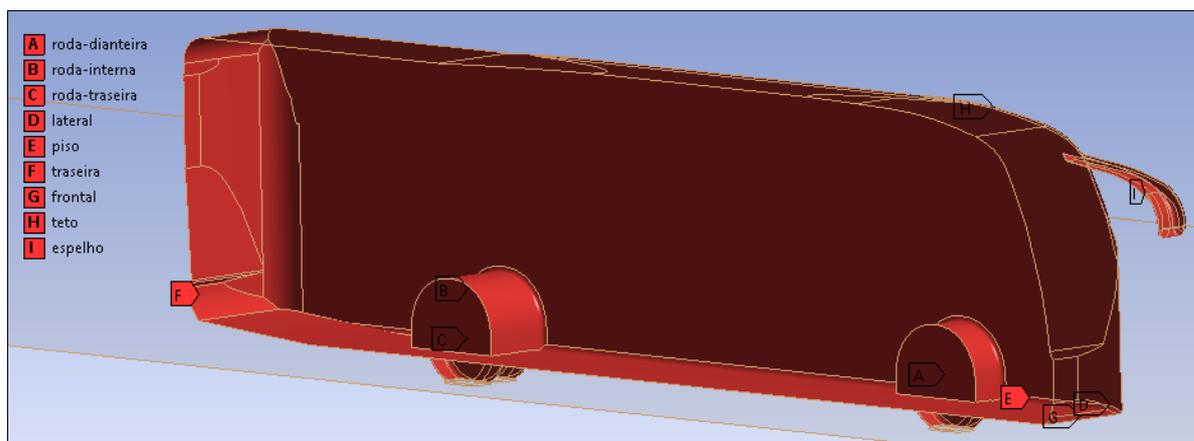
Além disso, foram impostas algumas condições de contorno no domínio computacional, conforme a figura 19. Nela é possível visualizar as paredes laterais e o teto que foram impostas condições de simetria, para o chão foi imposto translação no sentido e com a velocidade do escoamento e na parte de entrada foi imposta a velocidade do escoamento.

Figura 19: Condições de contorno no domínio computacional.



Fonte: Autor (2021)

Para todas as paredes da carroceria do veículo foi imposta a condição estática e de não escorregamento. Para manter a simulação mais próxima da realidade, nas rodas foram impostas rotações conforme a velocidade do escoamento. Além disso, o ônibus foi dividido em algumas superfícies principais, como frontal, traseira, lateral, teto, piso, cada roda separadamente e espelhos retrovisores ou câmeras, para obter a influência que cada parte gera no coeficiente de arrasto total do veículo, conforme figura 20.

Figura 20: Divisão das partes do veículo

Fonte: Autor (2021)

3.4.1.1 Velocidade de escoamento

A velocidade máxima permitida para um ônibus rodoviário em rodovias brasileiras é de 90 km/h, com uma tolerância de até 7 km/h, segundo o artigo 61 do código de trânsito brasileiro.

Para o presente estudo foi imposta uma velocidade de escoamento de 100 km/h, por se tratar de uma velocidade padrão utilizada em grande parte dos estudos aerodinâmicos CFD. Além disso, a velocidade é próxima do limite permitido nas rodovias brasileiras.

3.4.2 Modelos de Turbulência

Nesta etapa serão mencionadas algumas das principais técnicas utilizadas para a modelagem CFD. Tais técnicas servem para tentar prever e/ou calcular o comportamento do escoamento turbulento.

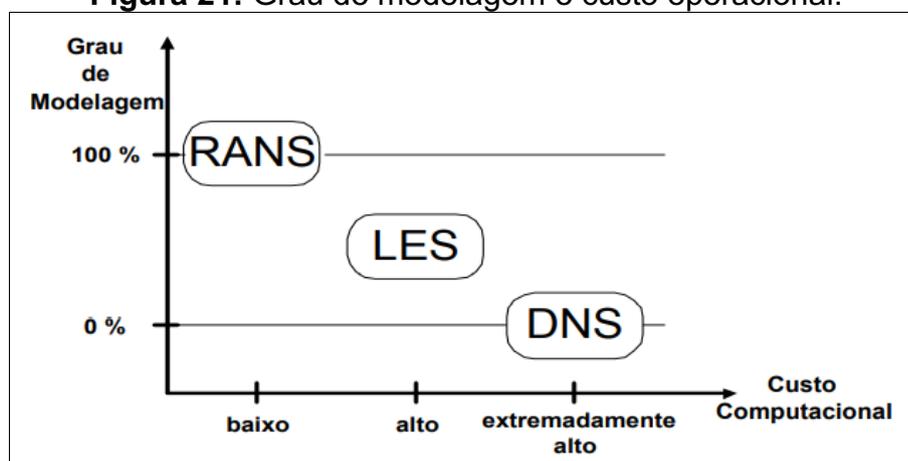
Alguns problemas de CFD podem utilizar uma técnica chamada de simulação numérica direta (DNS), onde as equações de Navier-Stokes tridimensionais e transientes são resolvidas em uma malha extremamente refinada sem modelagem da turbulência, a fim de capturar toda a magnitude do escoamento turbulento. Essa é uma técnica não muito utilizada para a engenharia, pois o custo computacional aumenta muito à medida que aumenta o número de Reynolds do escoamento, Rezende (2009).

Visando atingir números de Reynolds mais elevados foi criada a simulação das grandes escalas (LES). Essa técnica é uma simplificação da DNS, aqui as grandes escalas, considerada como os grandes vórtices turbulentos são resolvidos, enquanto os vórtices turbulentos de menor escala são modelados. Assim o custo computacional envolvido durante as simulações é significativamente menor, Çengel e Cimbala (2012).

Uma técnica mais sofisticada é modelar todos os vórtices turbulentos, de grande e pequena escala, com algum tipo de modelo de turbulência, assim somente as propriedades do escoamento são calculadas. Com isso, as equações de Navier-Stokes são substituídas pelas equações de Navier-Stokes média de Reynolds (RANS), Çengel e Cimbala (2012).

Pela figura 21 a seguir é possível ter uma noção em relação ao custo computacional e ao grau de modelagem envolvido em cada técnica citada. Fica evidente que para o uso na engenharia as modelagens com modelos de turbulência se tornam muito mais vantajosas para grande parte das aplicações por conta de seu elevado grau de modelagem, juntamente, com um baixo custo operacional.

Figura 21: Grau de modelagem e custo operacional.



Fonte: Rezende (2009)

Existem diversos modelos RANS presentes nos programas de simulação atualmente, no entanto, nenhum desses modelos é universal. Segundo Lanfrit (2005) é recomendável à utilização de dois tipos de modelos de turbulência para aplicações aerodinâmicas. Um deles é o modelo de turbulência $k - \epsilon$ Realizable e o outro é o modelo de turbulência das tensões de Reynolds (RSM).

O modelo $k - \varepsilon$ é um modelo de turbulência de duas equações. Ele adiciona outras duas equações de transporte para serem resolvidas simultaneamente com as outras equações de massa e momento. Onde k representa a energia cinética turbulenta e ε representa a taxa de dissipação turbulenta, Çengel e Cimbala (2012).

O modelo $k - \varepsilon$ possui algumas variações, entre elas possui a *Standard* que é o modelo padrão, possui a RNG que foi obtido usando uma técnica estatística chamada teoria da renormalização em grupo (RNG) e, por fim, possui a variação *Realizable* que adiciona uma nova formulação para a viscosidade turbulenta e uma nova equação de transporte para a taxa de dissipação turbulenta, Rosado (2010).

O modelo de turbulência RSM foi criado como uma alternativa para o fechamento das equações RANS, que consiste na obtenção de equações diretas para o transporte das tensões de Reynolds. As equações de transportes RSM são obtidas a partir das equações de Navier-Stokes e das equações de médias de Reynolds, Rezende (2009).

Segundo Lanfrit (2005) o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ *Realizable* chega a resultados com erros na casa de 2-5%, para aplicações aerodinâmicas. Já o modelo de turbulência RSM é mais completo, pois contabiliza rigorosamente a anisotropia da turbulência e o transporte de todas as tensões de Reynolds, no entanto, esse modelo eleva em cerca de 40% o tempo computacional durante a simulação e em 20% o custo de memória RAM do computador.

Para o presente estudo, que diz respeito a uma comparação do coeficiente de arrasto entre duas geometrias, sem a real necessidade de chegar a valores extremamente realistas e, ainda, visando que os recursos computacionais disponíveis não são muito sofisticados, será utilizado o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ *Realizable*.

3.4.3 Método de convergência

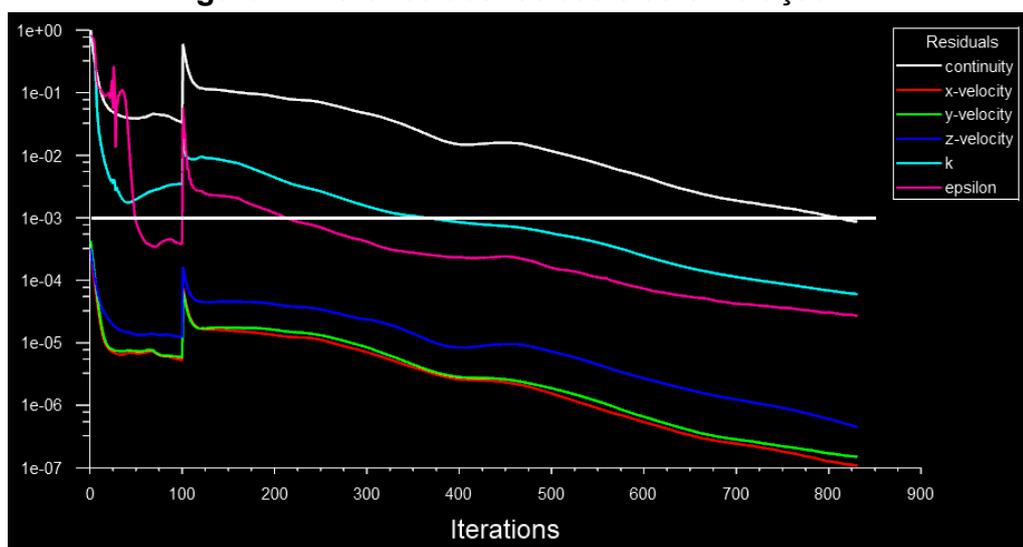
Durante as simulações foram empregados dois métodos de convergência, um método de primeira ordem que foi aplicado até as 100 primeiras iterações e um método de segunda ordem que foi aplicado para as demais iterações até a convergência dos resultados.

O método de primeira ordem é menos preciso, no entanto, muito bom para uma estimativa inicial auxiliando durante as primeiras iterações da simulação onde o

escoamento ainda está se formando. Após as 100 iterações iniciais, o escoamento já está inicializado, então, muda-se o método para a segunda ordem, que é muito mais preciso, para refinar os resultados até a convergência.

Pelos gráficos é possível visualizar facilmente essa mudança de métodos após as 100 primeiras iterações, pois ocorre uma mudança abrupta nos resultados, conforme figura 22 a seguir.

Figura 22: Gráfico dos residuais da simulação.



Fonte: Autor (2021)

Na figura 22 acima é possível visualizar uma linha traçada na região de $1e-03$, esse foi o critério de convergência utilizado para este trabalho. Todas as simulações tiveram os residuais de todas as variáveis de transporte abaixo de $1e-03$ para serem consideradas como convergida, garantindo uma boa precisão nos resultados.

4 RESULTADOS

Com todos os estudos anteriores realizados e, sabendo agora, quais os melhores parâmetros para as simulações do estudo proposto, será iniciada a apresentação dos resultados obtidos. Serão apresentados nessa sessão os resultados das simulações para o ônibus com espelhos retrovisores e para o ônibus com câmeras, além disso, será realizado um comparativo entre os escoamentos calculados e realizada uma análise de custo-benefício.

4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Para a realização das simulações das geometrias dos ônibus em estudo, foram empregados todos os parâmetros estudados e testados ao decorrer deste trabalho. Com isso, foi utilizado um domínio computacional contendo 156 metros de comprimento, sendo 39 metros dispostos para frente do veículo e 104 metros para trás. Além disso, foram empregadas para ambas as geometrias uma malha computacional de aproximadamente oito milhões de elementos.

Pelos estudos realizados foi possível determinar que o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ *Realizable* foi o que melhor se aplicou as condições do estudo. Ainda, foram aplicadas todas as condições iniciais e de contorno citadas anteriormente.

A tabela 4 apresenta o resultado das simulações do ônibus com espelhos retrovisores e do ônibus com câmera. Nela são apresentados os coeficientes de arrasto encontrados para cada veículo e a contribuição que cada superfície da carroceria possui neste parâmetro.

Tabela 4: Resultados do coeficiente de arrasto encontrado para cada superfície dos ônibus.

Superfície	Ônibus	
	Com Espelhos	Com Câmera
Piso	0,02433	0,02792
Frontal	0,23836	0,24048
Traseira	0,09631	0,10282
Espelho/Câmera	0,03154	0,00166
Teto	-0,02060	-0,02127
Lateral	-0,09770	-0,10420
Roda Dianteira	0,01296	0,01348
Roda Interna	0,01131	0,01415
Roda Traseira	0,01029	0,01381
Total	0,30680	0,28885

Fonte: Autor (2021)

Pelos resultados das simulações presentes na tabela 4 podemos concluir que o ônibus com câmeras teve um melhor desempenho, tendo um coeficiente de arrasto 6,21% menor se comparado ao veículo com espelhos retrovisores.

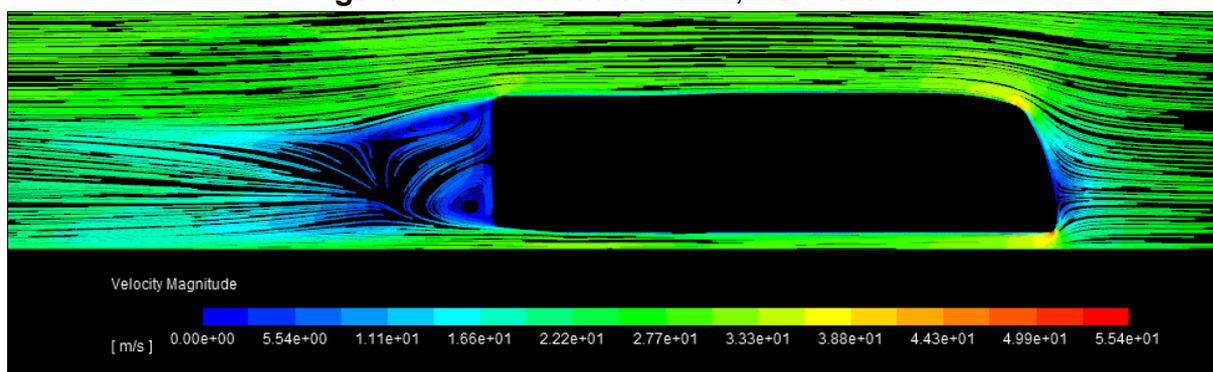
Como já era esperado, o veículo com câmeras apresentou não somente um ganho em relação ao coeficiente de arrasto, mas também um ganho considerável em relação à área frontal. O veículo com espelhos apresentou uma área frontal de 4,478 m² enquanto o veículo com câmeras apresentou uma área frontal de 4,300 m², obtendo um ganho de 3,97%.

Com esse melhor desempenho apresentado tanto no coeficiente de arrasto quanto na área frontal do veículo com câmeras, pela equação 03 é possível concluir que haverá uma diminuição do arrasto aerodinâmico como um todo. Partindo para uma redução da resistência aerodinâmica e, com isso, uma redução no consumo de combustível do ônibus.

4.1.1 Campo de escoamento

Nesta etapa são apresentadas as características do escoamento encontradas durante as simulações. Além disso, será realizada uma análise e comparação entre as diferenças no fluxo de ar encontrada para cada geometria.

Figura 23: Linhas de corrente, vista lateral.



Fonte: Autor (2021)

Na figura 23 podemos visualizar as linhas de corrente do escoamento sobre a geometria em uma vista lateral no plano de simetria do domínio computacional. Nela é possível identificar vários fenômenos importantes para a aerodinâmica, como as regiões de aproximação da camada limite e regiões de esteiras e recirculações.

As curvas da figura 23 foram extremamente semelhantes para os dois ônibus, pois a mesma está presente no plano de simetria, longe da influência dos espelhos ou das câmeras. Com isso, a imagem não apresenta uma comparação, mas sim uma apresentação do comportamento do escoamento encontrado.

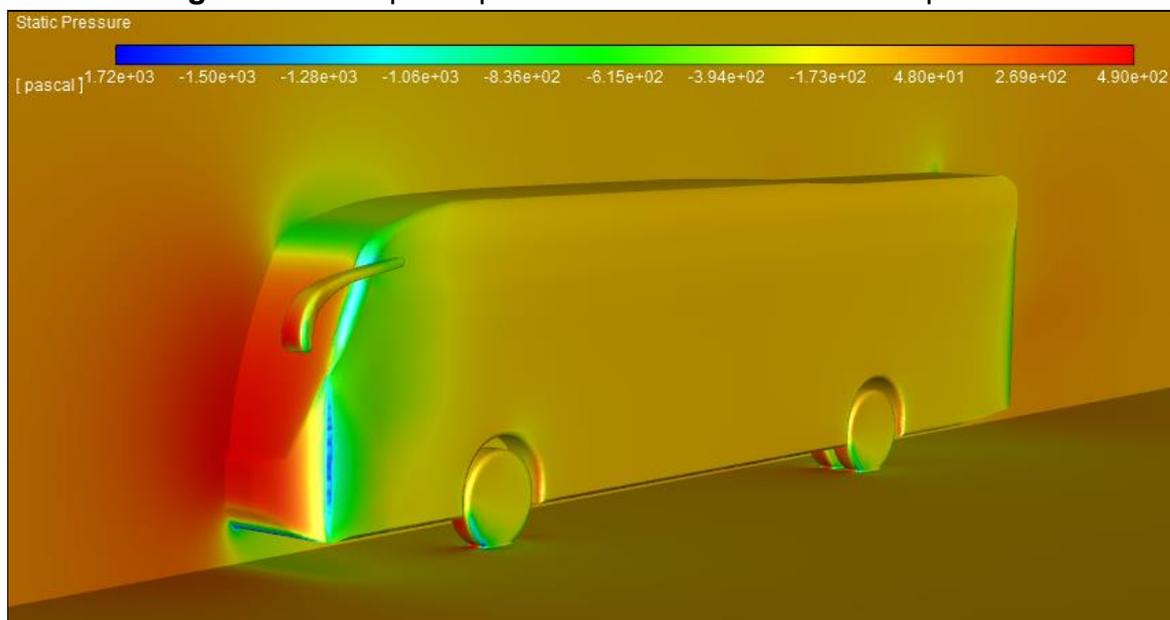
Na região de ligação da parte frontal e o teto, assim como da parte frontal e o piso, encontram-se regiões onde há aproximação das linhas de corrente, caracterizando um aumento significativo da velocidade do escoamento naquela região. Pela figura 23 esse aumento de velocidade é apresentado com a coloração avermelhada, conforme a legenda da imagem.

Na parte frontal do veículo ocorre outro fenômeno, há uma diminuição abrupta da velocidade do escoamento livre ao se “chocar” com a carroceria. Essa região é extremamente afetada e gera grande participação no coeficiente de arrasto, ali ocorre o ponto de estagnação do veículo que será melhor abordado ao decorrer desta sessão.

Ainda pela figura 23 podemos notar, na parte traseira do veículo, a formação de movimentos de recirculação bem definidos. Essas regiões são criadas pelo deslocamento da camada limite, formando as famosas esteiras. A expressão de “andar no vácuo” de um veículo vem deste fenômeno, pois a esteira não possui a mesma velocidade do escoamento livre, podendo possuir até mesmo velocidades

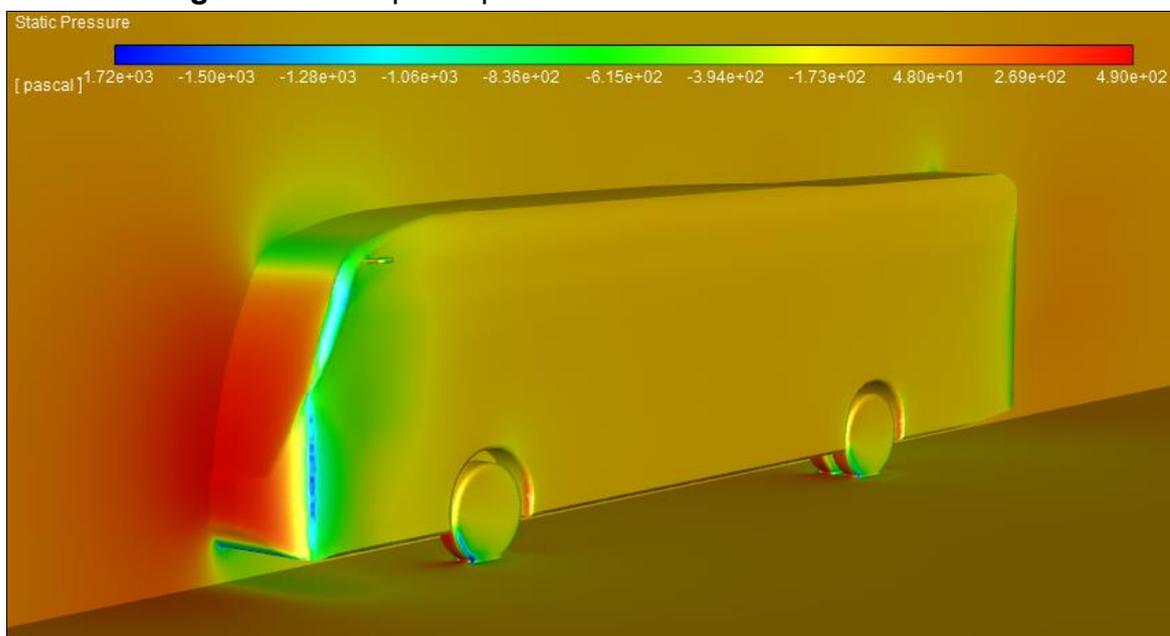
negativas próximas à carroceria, diminuindo consideravelmente a resistência com o ar para os veículos que estiverem atrás.

Figura 24: Campo de pressão sobre o ônibus com espelhos.



Fonte: Autor (2021)

Figura 25: Campo de pressão sobre o ônibus com câmeras.



Fonte: Autor (2021)

Pelas figuras 24 e 25 é possível visualizar a distribuição da pressão estática agindo sobre a carroceria dos ônibus. A região frontal é a mais afetada, gerando os

valores mais altos de pressão, nesta região encontra-se o ponto de estagnação do escoamento.

Pela tabela 4 apresentada anteriormente podemos notar que a parte frontal é a que mais influência para o aumento do coeficiente de arrasto do veículo. Para o ônibus com espelhos a parte frontal representa 77,7% do coeficiente de arrasto total do veículo e para o ônibus com câmeras ela representa 78,4%.

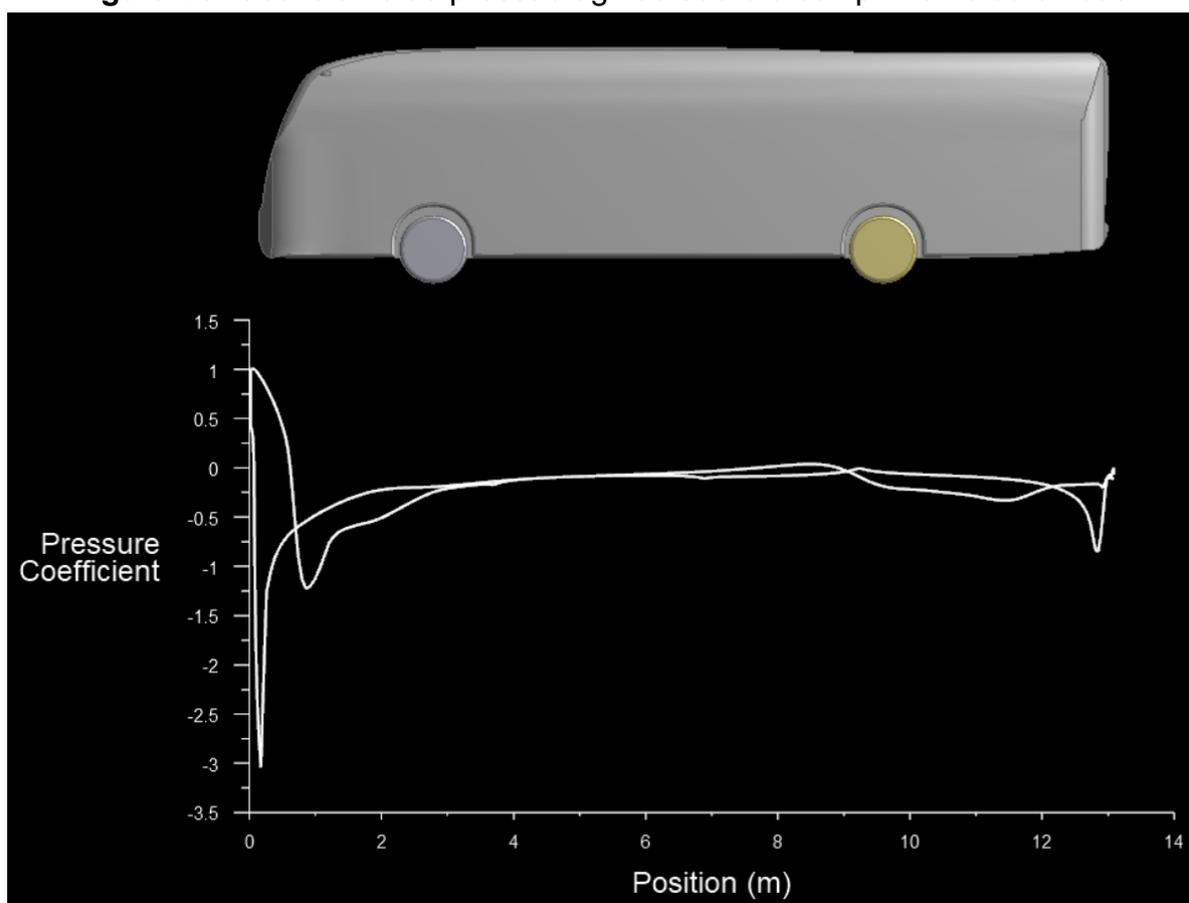
Nas regiões de ligação da parte frontal com a lateral do ônibus, ocorre uma queda repentina na pressão. Nestas regiões ocorre uma aproximação das linhas de corrente e um aumento da velocidade do escoamento, assim como, na parte frontal com o teto e na parte frontal com o piso, mencionadas anteriormente.

Comparando as figuras 24 e 25, podemos notar a grande diferença envolvida na pressão sofrida pelo espelho e pela câmera. O espelho possui uma área frontal muito superior a da câmera, com isso, a influência dele no coeficiente de arrasto é muito maior. O espelho contribui em 10,3% no total do coeficiente de arrasto do veículo enquanto a câmera contribui com apenas 0,54%, conforme valores apresentados na tabela 4.

Outro ponto relevante é que o espelho retrovisor possui uma área, de tamanho considerável, que fica normal ao escoamento. Nesta região frontal do espelho foram encontrados os mesmos valores de pressão encontrados no ponto de estagnação do veículo, que é onde são geradas as maiores forças contra o movimento.

Para ter uma ideia melhor da distribuição de pressão sobre a carroceria do ônibus, a figura 26 apresenta o coeficiente de pressão (cp) agindo sobre todo o comprimento da geometria. O comportamento de cp para ambos os veículos são extremamente idênticos, com isso, é realizado apenas uma análise das curvas e não uma comparação.

Figura 26: Coeficiente de pressão agindo sobre o comprimento do ônibus.



Fonte: Autor (2021)

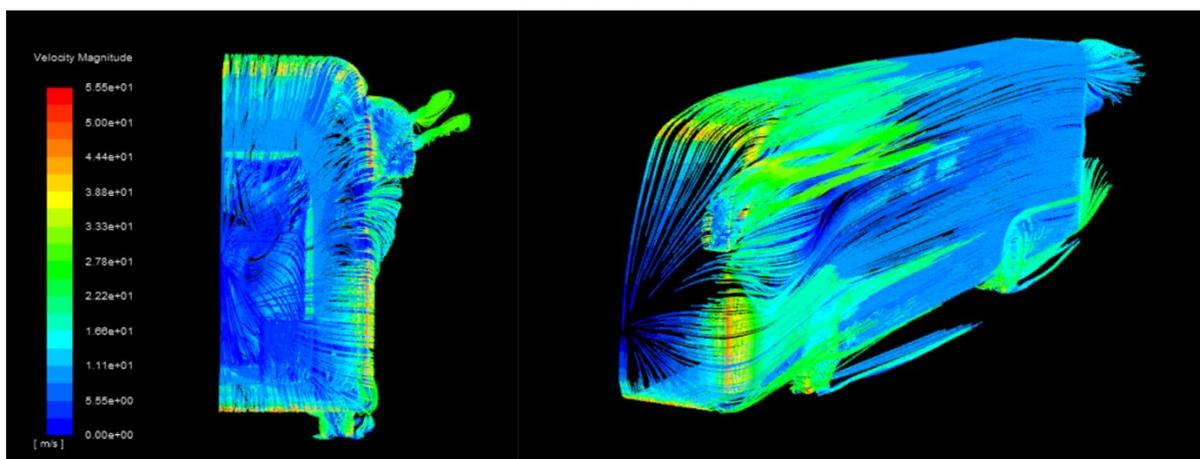
Pela figura 26 podemos notar duas curvas que se formaram no gráfico de cp , uma representa o coeficiente de pressão encontrado para o escoamento que passou por cima da geometria do veículo e a outra para o de baixo, se encontrando nas extremidades. Na posição de zero metros, parte frontal do veículo, notamos que o cp está no valor máximo +1, pois se trata do ponto de estagnação do ônibus.

À medida que o escoamento avança, ambas as curvas decaem, para o escoamento superior a curva cai a mínima na região de junção da parte frontal com o teto e para o inferior a curva cai muito mais bruscamente, pois a mínima ocorre na região de junção da parte frontal com o piso que fica bem mais próxima do ponto zero e possui uma curvatura da geometria mais abrupta.

Após atingirem as mínimas, as curvas se estabilizam à medida que o escoamento avança sobre o teto e o piso do veículo que não possui grandes alterações da geometria. Até chegarem à região traseira do ônibus, onde ambas as curvas decaem um pouco novamente antes da separação da camada limite.

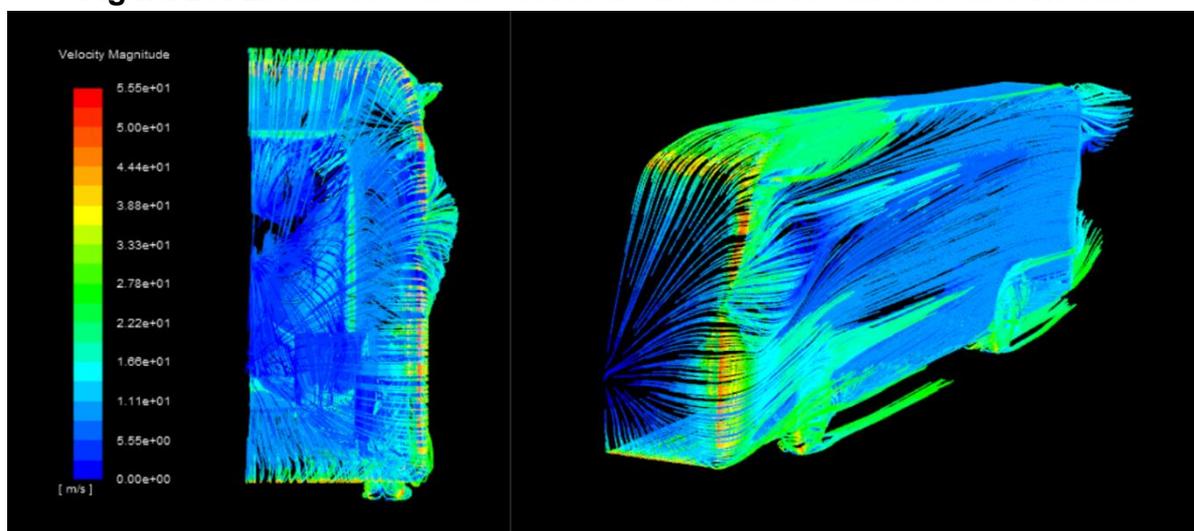
Para visualizar melhor o escoamento sobre o espelho retrovisor e a câmera, abaixo são apresentadas as figuras 27 e 28, que ilustram as linhas de correntes atuando sobre a carroceria dos veículos. As imagens mostram uma vista frontal e lateral para cada composição de ônibus.

Figura 27: Linhas de corrente sobre a carroceria do ônibus com espelhos retrovisores.



Fonte: Autor (2021)

Figura 28: Linhas de corrente sobre a carroceria do ônibus com câmeras.



Fonte: Autor (2021)

Pela análise das figuras 27 e 28 podemos notar facilmente a diferença entre a perturbação causada no escoamento para o ônibus com espelhos e com câmeras. Pela figura 28, notamos a pequena movimentação das linhas de corrente na região próxima a câmera, fazendo com que o escoamento apenas contorne sua geometria sem causar grandes perturbações.

Pela figura 27 nota-se que o movimento das linhas de corrente sobre a geometria do espelho é extremamente diferente que na câmera. Nele a perturbação do escoamento é muito grande, gerando vórtices e descolamento da camada limite que se estende por grande parte do comprimento do veículo.

Pela análise das figuras 27 e 28 podemos concluir que os espelhos retrovisores realmente são os principais causadores de deposição de sujeira nas janelas laterais dos ônibus. Por outro lado, com a câmera, o escoamento flui suave sobre a janela impedindo a deposição de sujeira.

4.2 ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL

Nesta sessão serão realizados alguns cálculos usando a formulação apresentada sobre as resistências contra o movimento do veículo. Como mencionado, as resistências contra o avanço são somente a de rolamento e a aerodinâmica.

As outras resistências não se aplicam para o caso em estudo, tendo um ângulo de inclinação da pista como zero e uma velocidade constante, que implica em uma aceleração nula.

Como apresentado anteriormente, Q_a representa o arrasto aerodinâmico ou resistência aerodinâmica e Q_r a resistência ao rolamento, conforme as equações 01 e 03, respectivamente. Portanto a resistência total ao movimento é calculada a partir da seguinte equação:

$$Q_t = Q_a + Q_r \quad (07)$$

Para os cálculos da equação da resistência ao rolamento foi necessário assumir alguns valores, pelos dados técnicos encontrados para o chassi Volvo B270f, utilizado em muitos ônibus com a carroceria em estudo, o veículo tem uma capacidade técnica total de 17,3 toneladas, Volvo (2021). Sabendo que a carroceria em estudo é uma versão de entrada da marca e possui poucos opcionais, além disso, o veículo dificilmente terá uma taxa de ocupação próxima a 100% na média, será assumido, visando uma margem de erro, um peso médio para as viagens do ônibus como sendo 75% da capacidade máxima.

Para determinar os parâmetros a e b da tabela 1, foi considerado um pneu padrão para o ônibus. A seguir são apresentados todos os valores utilizados para os cálculos da resistência ao rolamento e do coeficiente de rolamento.

$$a = 0,0150;$$

$$b = 0,052;$$

$$v = 28 \text{ m/s};$$

$$G = (17300 * 0,75) * 9,81 = 127284,75 \text{ N};$$

$$\alpha = 0^\circ$$

Aplicando os valores na equação 02 do coeficiente de rolamento, temos $f = 0,0191$. Aplicando os demais valores na equação 01, chegamos a uma resistência ao rolamento de $Q_r = 2431,1 \text{ N}$.

Para os cálculos da resistência aerodinâmica, serão utilizados os dados obtidos durante as simulações, para o coeficiente de arrasto e área frontal. Outro parâmetro utilizado será o ar padrão a 15°C e 1atm , portanto, com uma densidade $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

Serão realizados os cálculos de resistência aerodinâmica para as duas configurações de ônibus, com espelhos e com câmeras. Para posteriormente realizar uma análise da diminuição na resistência total, acarretando na economia de combustível buscada.

Aplicando os valores correspondentes de cada configuração dos veículos, chegamos aos seguintes resultados para a resistência aerodinâmica. Sendo Q_{ae} a resistência aerodinâmica para o ônibus com espelhos e Q_{ac} a resistência aerodinâmica para o ônibus com câmeras.

$$Q_{ae} = \frac{1,225 * 0,30680 * 4,478 * 28^2}{2} = 659,72 \text{ N}$$

$$Q_{ac} = \frac{1,225 * 0,28885 * 4,300 * 28^2}{2} = 596,43 \text{ N}$$

Pelos resultados encontrados para as resistências aerodinâmicas, foi possível obter uma diminuição de 10,61% da resistência para o veículo com câmeras.

Aplicando os valores encontrados na equação 07 da resistência total ao movimento do veículo, chegamos aos seguintes valores:

$$Q_{te} = Q_r + Q_{ae} = 3090,85N$$

$$Q_{tc} = Q_r + Q_{ac} = 3027,57 N$$

Sendo Q_{te} a resistência aerodinâmica total para o ônibus com espelhos e Q_{tc} a resistência aerodinâmica total para o ônibus com câmeras.

Pelos resultados encontrados chegamos a uma redução de 2,09% na resistência total ao movimento para o veículo com câmeras, andando no plano a uma velocidade constante. Esse resultado reflete diretamente na economia de combustível que será também de 2,09%.

Pelos dados encontrados da Secretaria da Infraestrutura e Logística (2010), um ônibus rodoviário realiza um percurso médio anual de 66,5 mil quilômetros. Pelos dados encontrados de consumo do Ministério do Meio Ambiente (2014), um ônibus rodoviário anda em média 3,0 quilômetros com um litro de óleo diesel.

Sabendo ainda que o preço médio do litro do óleo diesel no Brasil está em torno de R\$ 4,21, segundo a CNN Brasil (2021), é possível estimar o custo gasto em combustível para os ônibus em estudo. Assim, teremos um valor de quanto de economia em reais o ônibus com câmeras nos proporciona.

Partindo do percurso anual médio dividido pela quilometragem por litro de diesel chegaremos à quantidade de litros de diesel que em média um ônibus rodoviário consome anualmente. Então é necessário somente multiplicar esse consumo pelo preço atual do combustível para saber o custo anual médio gasto em óleo diesel para um ônibus rodoviário (CAM_d).

$$CAM_d = \left(\frac{66500}{3,0} \right) * 4,21 = R\$ 93321,7 \quad (08)$$

Pela equação 08 chegamos a um valor médio de aproximadamente 93,3 mil reais gastos por ano em óleo diesel. Esse valor será usado para representar o custo gasto com combustível do ônibus com espelhos. Sabendo que o ônibus com

câmeras possui uma economia de 2,09% no consumo de combustível em relação ao ônibus com espelhos, apresento a seguintes relações.

$$CAM_{de} = C_d = R\$ 93321,7$$

$$CAM_{dc} = CAM_{de} - (CAM_{de} * 0,0209) = R\$ 91371,2$$

Onde CAM_{de} representa o custo anual médio gasto em óleo diesel para o ônibus com espelhos e CAM_{dc} representa o custo anual médio gasto em óleo diesel para o ônibus com câmeras. Pelos resultados chegamos a uma economia média de R\$ 1950,4 por ano em óleo diesel.

Vale lembrar que uma redução no consumo de combustível através de um melhoramento aerodinâmico acarreta em uma redução proporcional de emissões de poluentes. Quanto menos o veículo consome, conseqüentemente, menos ele irá emitir de poluentes.

4.3 ESTUDO DE CUSTO-BENEFÍCIO

Nesta sessão será apresentado um estudo de custo-benefício referente à substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras em um ônibus rodoviário. Serão apresentados os valores encontrados para os espelhos do ônibus Marcopolo New g7 Viaggio 1050 e o conjunto de câmeras do caminhão da Mercedes-bens Actros.

Segundo os preços encontrados no site Eonibus (2021) cada lado dos espelhos retrovisores do ônibus custa R\$ 1400,00, chegando ao valor do par em R\$ 2800,00. Para o conjunto de câmeras e display não foram encontrados os valores reais. No entanto, segundo o Estradão (2020) o conjunto de câmeras e display é oferecido como um opcional do caminhão Actros por um valor de R\$ 11000,00.

Sabendo isso, será apresentado o valor dos espelhos retrovisores do caminhão, visando que o conjunto de câmeras irá custar aproximadamente 11 mil reais mais o preço dos espelhos originais do veículo que não virão juntos. Segundo valores encontrados no universo do caminhão (2021) cada lado dos espelhos

retrovisores custa R\$ 980,00. Com isso, será assumido, para o conjunto de câmeras e display, o valor de R\$ 12960,00.

Fazendo a diferença entre os valores dos espelhos retrovisores do ônibus e o valor assumido para as câmeras, chegamos a uma diferença de R\$ 10160. Esse seria o custo necessário para implementar o sistema de câmeras no ônibus, de acordo com os valores apresentados.

Sabendo em média o valor economizado anualmente em combustível pelo ônibus com câmeras, é possível determinarem em quanto tempo seria possível obter um retorno sobre esse investimento, levando em conta somente o ganho em relação ao consumo de combustível.

Para isso, basta dividir o custo necessário para a implementação do conjunto de câmeras pela economia média de combustível por ano encontrado para o veículo com câmeras. Com isso, concluímos que em 5,21 anos, em pouco mais de cinco anos e dois meses, o valor do investimento retornaria somente visando à redução no consumo de combustível.

Além disso, como já mencionado anteriormente, a substituição dos espelhos por câmeras auxilia em vários outros fatores além da economia de combustível. Como a diminuição das emissões de poluentes, a redução de alguns pontos cegos no veículo e a eliminação de deposição de sujeira na janela lateral, auxiliando na visibilidade do motorista e segurança.

Figura 29: Visão interna do veículo com câmeras.



Fonte: Daimler (2021)

A figura 29 ilustra como ficaria o veículo com câmeras de uma perspectiva do motorista. De início é possível visualizar a eliminação de um grande ponto cego na região onde ficariam os espelhos, melhorando na visibilidade e segurança. Vale ressaltar que o display interno fica em uma região bastante confortável e parecida com a dos espelhos, podendo assumir que não seria de difícil adaptação para os motoristas dos veículos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso tratou de identificar as influências aerodinâmicas geradas em um escoamento decorrente da substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras em um ônibus rodoviário abordando uma análise numérica computacional. O estudo procurou identificar principalmente uma redução no arrasto aerodinâmico do veículo, além de um melhoramento do fluxo de ar sobre sua carroceria.

Para isso foi proposto uma comparação entre as duas configurações de ônibus. Inicialmente foram realizados alguns testes de independência do domínio computacional e da malha computacional, visando atingir resultados que dependessem exclusivamente da diferença encontrada pela substituição dos espelhos retrovisores pelas câmeras.

Foi concluído que o veículo com câmeras realmente possui um ganho aerodinâmico em relação ao veículo padrão, constatou-se uma diminuição de 6,21% e 3,97% para o coeficiente de arrasto e para a área frontal, respectivamente. Essa combinação de ganho resultou em um arrasto aerodinâmico de 10,61% menor para o veículo com câmeras.

Além disso, pelos estudos de consumo de combustível, foi possível concluir que o ônibus com câmeras possui uma redução real no consumo de 2,09% em comparação ao ônibus com espelhos retrovisores. Ainda, pelas análises realizadas de custo-benefício, verificou-se que em pouco mais de cinco anos e dois meses o investimento para implementar o sistema de câmeras se pagaria somente pela redução no consumo de combustível.

Por fim, o presente trabalho pôde identificar alguns outros benefícios da substituição dos espelhos retrovisores por câmeras além da diminuição do consumo de combustível. Outro fator muito importante foi na diminuição de emissões de poluentes, além disso, houve uma redução de pontos cegos no veículo e uma eliminação da deposição de sujeira nas janelas laterais, auxiliando na segurando do motorista e seus passageiros.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através de estudos aerodinâmicos é possível encontrar inúmeras formas para a redução do arrasto aerodinâmico. O CFD possibilita a facilidade de testes e análises em escoamento, é evidente que existem diversas maneiras para a continuação do estudo proposto neste trabalho. Entre elas é possível realizar uma análise mais aprofundada sobre os modelos de turbulência, verificando a independência dos mesmos nos resultados obtidos. Outra sugestão para a continuação deste trabalho seria em alterações na geometria, tendo em vista que possíveis mudanças de ângulos e arredondamentos de arestas já podem resultar em um melhoramento aerodinâmico.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, R. Sustainable Ground Transportation: Technologies, Challenges and Opportunities. **ASME 2013 7th International Conference on Energy Sustainability**, p. 1-14, 2013.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2012.
- CNN BRASIL. Gasolina e diesel voltam a ter leve recuo nos postos, mostram dados da ANP. **Cnn Brasil**, 09 Abril 2021. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/2021/04/10/gasolina-e-diesel-voltam-a-ter-leve-recuo-nos-postos-mostram-dados-da-anp>>. Acesso em: 24 Abril 2021.
- DAIMLER. Easy Tech: The MirrorCam from Mercedes-Benz. **Daimler**, 28 janeiro 2021. Disponível em: <<https://www.daimler.com/magazine/technology-innovation/easy-tech-mirrorcam.html>>. Acesso em: 22 março 2021.
- EONIBUS. Espelho retrovisor manual lado Marcopolo G7 VG900 / PD 1050. **EONIBUS**, 08 abril 2021. Disponível em: <https://www.eonibus.com.br/Espelhos/-/Retrovisores/Retrovisores/espelho-retrovisor-manual-lado-esquerdo-marcopolo-g7-vg900---pd1050-10220093___1180802-SIT.html>. Acesso em: 08 Abril 2021.
- ESTRADÃO. Exclusivo: Testamos o novo Mercedes-Benz Actros 2651. **Estradão**, 18 jun. 2020. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/exclusivo-avaliamos-o-novo-actros-2651/>>. Acesso em: 10 abril 2021.
- FOX, R. R.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8ª. ed. S.I: LTC, 2014.
- HETAWAL, S. et al. Aerodynamics Study of Formula SAE Car. **Procedia Engineering, Volume 97, pages 1198-1207**, p. 1 - 10, 2014.
- HUCHO, W. H. **Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering**. Würzburg: Butterworth Heinemann, 1987.
- JONH D, A. J. **Fundamentals of Aerodynamics**. 5ª. ed. New York: Mc Graw Hill Companies, inc, 2011.
- LANFRIT, M. **Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT**. Darmstadt. 2005.
- MARCOPOLO. Viaggio 1050. **Marcopolo**, 01 Janeiro 2021. Disponível em: <<https://www.marcopolo.com.br/marcopolo/viaggio-1050>>. Acesso em: 10 Março 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosférica por Veículo Automotores Rodoviários**. Brasil. 2014.

NICOLAZZI, L. C.; LEAL, L. D. C. M.; ROSA, E. **Uma introdução à modelagem quase-estática de automóveis**. Florianópolis: UFSC, 2012.

QUATRORODAS. Impressões: Como é andar num caminhão de R\$ 700.000 que não tem retrovisor. **QuatroRodas**, 16 outubro 2019. Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/impressoes-como-e-andar-num-caminhao-de-r-700-000-que-nao-tem-retrovisor/>>. Acesso em: 6 abril 2021.

REDE ÔNIBUS. Marcopolo G7 1200. **Rede Ônibus**: O canal do ônibus, 10 Janeiro 2017. Disponível em: <<http://redeonibus.com.br/g7-1200/>>. Acesso em: 10 Abril 2021.

REZENDE, A. L. T. **Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada**. Rio de Janeiro. 2009.

ROSADO, A. N. R. D. P. **Estudo do Escoamento em Torno da Secção de uma Ponte: Simulação Computacional**. Campo alegre. 2010.

SECRETÁRIA DA INFRA-ESTRUTURA E LOGÍSTICA. **Solicitação de reajuste tarifário**. Rio Grande do Sul. 2010.

UNIVERSO DO CAMINHÃO. Espelho retrovisor Mb Actros Elétrico com Desembaçador cromado - Com suporte. **Universo do Caminhão**, 20 abril 2021. Disponível em: <<https://www.universodocaminhao.com.br/universo-parts/produto/espelho-retrovisor-mb-actros-eletrico-com-desembacador-cromado-com-suporte>>. Acesso em: 20 abril 2021.

VOLVO. Volvo 270F Fretamento. **Volvo ônibus Brasil**, 01 janeiro 2021. Disponível em: <<https://www.volvobuses.com.br/pt-br/our-offering/coaches/b270f-fretamento/specifications.html>>. Acesso em: 15 abril 2021.

WONG, J. Y. **Theory of Ground Vehicles**. 3^a. ed. Ottawa: John Wiley e Sons, inc, 2001.