

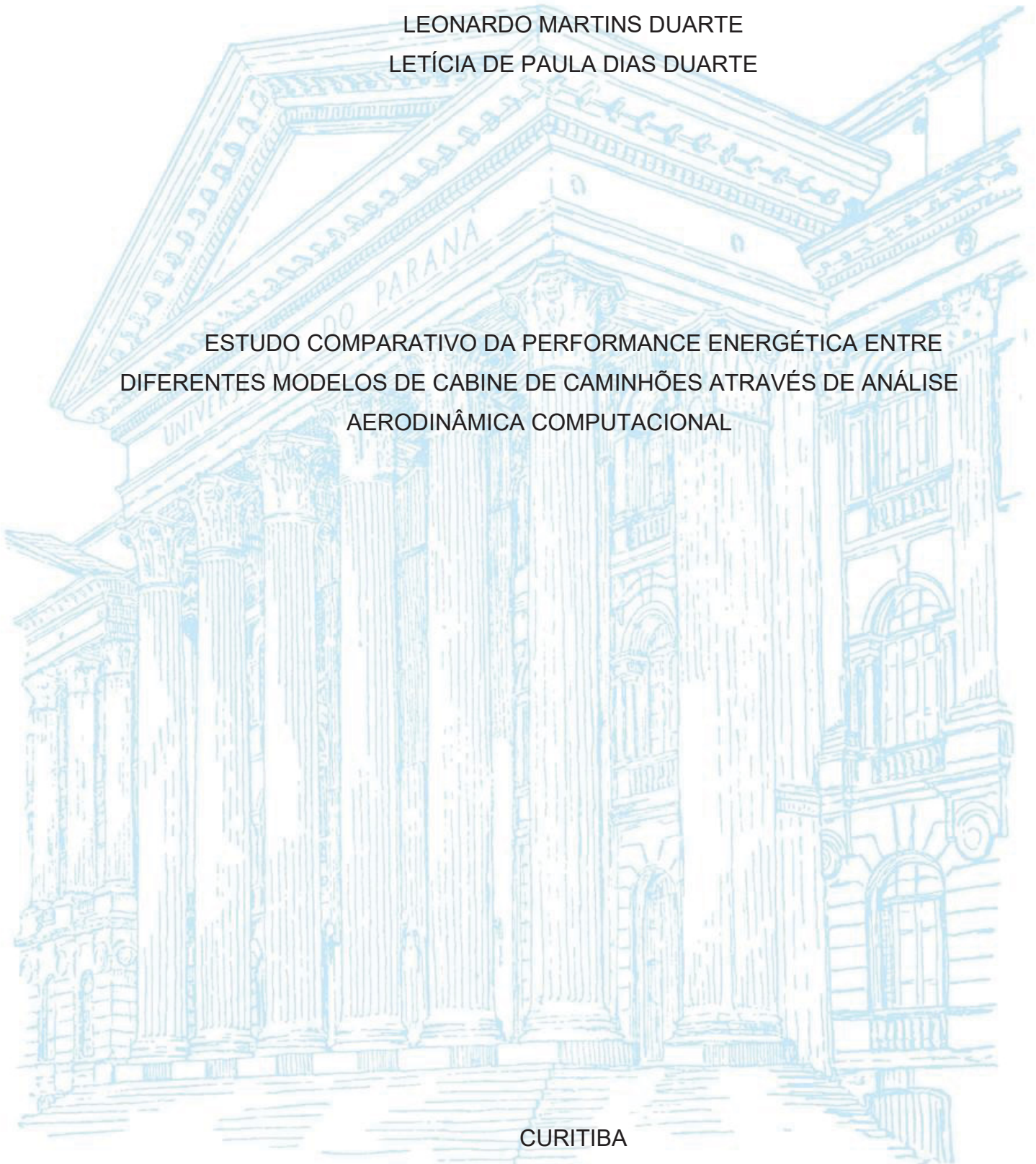
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JADSON DE SOUZA SANTOS  
LEONARDO MARTINS DUARTE  
LETÍCIA DE PAULA DIAS DUARTE

ESTUDO COMPARATIVO DA PERFORMANCE ENERGÉTICA ENTRE  
DIFERENTES MODELOS DE CABINE DE CAMINHÕES ATRAVÉS DE ANÁLISE  
AERODINÂMICA COMPUTACIONAL

CURITIBA

2025



JADSON DE SOUZA SANTOS  
LEONARDO MARTINS DUARTE  
LETÍCIA DE PAULA DIAS DUARTE

ESTUDO COMPARATIVO DA PERFORMANCE ENERGÉTICA ENTRE  
DIFERENTES MODELOS DE CABINE DE CAMINHÕES ATRAVÉS DE ANÁLISE  
AERODINÂMICA COMPUTACIONAL

TCC apresentado ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Automotiva, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia Automotiva.

Orientador: Prof. Dr. Stephan Hennings Och

CURITIBA  
2025

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre dois tipos de caminhões utilizados no transporte rodoviário de cargas: os convencionais e os Cab Over Engine (COE). A pesquisa foca na influência do arrasto aerodinâmico no consumo de combustível, considerando as diferenças de geometria e design aerodinâmico de cada modelo. Utilizando simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), foram obtidos os coeficientes de arrasto e analisados os padrões de fluxo de ar ao redor dos veículos. Os resultados indicam que os caminhões convencionais apresentam menor coeficiente de arrasto, sugerindo maior eficiência aerodinâmica e potencial economia de combustível em viagens de longa distância. O estudo também discute as implicações das normas regulatórias e as vantagens de cada configuração, contribuindo para o desenvolvimento de veículos mais sustentáveis e eficientes no transporte rodoviário.

Palavras-chave: Aerodinâmica; Caminhões convencionais; Cab Over Engine (COE); CFD; Eficiência de combustível.

## **ABSTRACT**

This study provides a comparative analysis of two types of trucks used in road freight transportation: conventional trucks and Cab Over Engine (COE) models. The focus is on the impact of aerodynamic drag on fuel consumption, considering the differences in geometry and aerodynamic design of each model. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were employed to determine the drag coefficients and analyze airflow patterns around the vehicles. The results show that conventional trucks exhibit lower drag coefficients, indicating better aerodynamic efficiency and potential fuel savings during long-distance trips. The study also discusses regulatory implications and the advantages of each configuration, contributing to the development of more sustainable and efficient vehicles in road transportation.

Keywords: Aerodynamics; Conventional trucks; Cab Over Engine (COE); CFD; Fuel efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ARRASTO AERODINÂMICO PARA DIFERENTES FORMATOS .....	20
FIGURA 2 – INSTALAÇÕES DE TESTE DE TÚNEL DE VENTO .....	24
FIGURA 3 – CARRO DE F1 DENTRO DO TÚNEL DE VENTO .....	25
FIGURA 4 – COEF. AERODINÂMICO POR TIPO DE VEÍCULO .....	26
FIGURA 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS CAMINHÕES MACK.....	27
FIGURA 6 – MACK ANTHEM .....	28
FIGURA 7 – VOLVO FH540.....	28
FIGURA 8 – CDF CARRO F1 .....	29
FIGURA 9 – MACK SOB AS LINHAS DE FLUXO .....	30
FIGURA 10 – MODELO 3D DO VEÍCULO COE PARA SIMULAÇÃO .....	32
FIGURA 11- MODELO 3D DO VEÍCULO COE PARA SIMULAÇÃO .....	32
FIGURA 12 – MODELO 3D DO VEÍCULO CONVENCIONAL PARA SIMULAÇÃO .	33
FIGURA 13- MODELO 3D DO VEÍCULO CONVENCIONAL PARA SIMULAÇÃO ...	33
FIGURA 14 – EXEMPLO DE MALHA .....	36
FIGURA 15 – ENVELOPE MODELO CONVENCIONAL .....	39
FIGURA 16 – ENVELOPE MODELO COE .....	40
FIGURA 17 – MALHA DO MODELO CONVENCIONAL .....	42
FIGURA 18 – MALHA DO MODELO COE.....	42
FIGURA 19 – RESULTADOS DO MODELO CONVENCIONAL .....	43
FIGURA 20 – RESULTADOS DO MODELO CONVENCIONAL .....	43
FIGURA 21 – LINHAS DE VELOCIDADE DO MODELO CONVENCIONAL.....	44
FIGURA 22 – LINHAS DE VELOCIDADE DO MODELO COE .....	44
FIGURA 23 – LINHAS DE PRESSÃO DO MODELO CONVENCIONAL .....	45
FIGURA 24 – LINHAS DE PRESSÃO DO MODELO COE .....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TABELA DE COEFICIENTES DE ARRASTO .....	23
--	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	18
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1 AERODINÂMICA E COEFICIENTE DE ARRASTO .....	19
2.2 RELAÇÃO COEFICIENTE DE ARRASTO X CONSUMO DE COMBUSTÍVEL ..	21
2.3 TÚNEIS DE VENTO .....	24
2.4 NORMAS & LEGISLAÇÕES PARA TRANSPORTE DE CARGA .....	26
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
3.1 MÉTODO CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC) .....	29
3.2 MODELAGEM CAD E PREPARAÇÃO DO MODELO .....	31
3.3 QUALIDADE DA MALHA .....	35
3.4 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO .....	37
3.4.1 Hipóteses da incompressibilidade .....	37
3.4.2 Fluxo Laminar vs. Turbulento .....	37
3.4.3 Homogeneidade e Isotropia .....	38
3.4.4 Simplificações geométricas .....	38
3.4.5 Condições de contorno.....	38
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário por caminhões é um componente essencial da cadeia logística global, responsável por movimentar uma vasta gama de mercadorias de maneira eficiente e flexível. Este modo de transporte é amplamente utilizado devido à sua capacidade de oferecer serviços de entrega porta a porta, adaptabilidade a diferentes tipos de carga e cobertura geográfica extensa (Smith, 2023).

A importância do transporte rodoviário reside em sua capacidade de acessar praticamente qualquer localidade, desde grandes centros urbanos até áreas rurais remotas. Isso o torna indispensável para a distribuição de mercadorias em regiões onde outros modos de transporte, como ferroviário ou aquaviário, não são viáveis. Além disso, a flexibilidade operacional dos caminhões permite ajustar rotas e horários de acordo com as necessidades específicas dos clientes, possibilitando uma resposta rápida a mudanças na demanda e condições de mercado. Existem diferentes tipos de caminhões, cada um adequado a aplicações específicas.

Caminhões leves são utilizados principalmente para entregas urbanas e de curta distância, sendo ideais para cargas menores e mais frequentes. Por outro lado, caminhões pesados são projetados para transportar grandes cargas em longas distâncias, sendo fundamentais para o transporte de matérias-primas, produtos industriais e mercadorias em grande escala. Em termos de eficiência e economia, o transporte rodoviário por caminhões oferece um custo-benefício significativo.

Embora possa ter custos operacionais elevados, como combustível e manutenção, ele é geralmente mais econômico para distâncias curtas e médias. A entrega direta reduz a necessidade de múltiplas transferências de carga, economizando tempo e recursos (IEA, 2019).

No mundo hoje, existem duas variações principais de designs de cabine que diferenciam os caminhões: os Convencionais, atualmente mais associados ao transporte rodoviário norte americano, e os chamados Cab Over Engine (COE), dominantes no Brasil e na Europa.

Os caminhões Cab Over Engine possuem um design onde o motor está localizado diretamente abaixo da cabine, resultando em um veículo mais compacto. Essa configuração permite um maior comprimento de carga útil, tornando-os ideais para operações urbanas e de distribuição, onde a manobrabilidade é crucial (Union

Pacific, 2022). Além disso, o acesso ao motor para manutenção é facilitado, pois a cabine pode ser inclinada para frente, permitindo reparos rápidos.

Por outro lado, os caminhões convencionais têm o motor na frente da cabine, criando um "nariz" ou capô. Além disso, a cabine mais espaçosa proporciona maior conforto ao motorista, um fator importante em jornadas prolongadas. A segurança também é aprimorada, pois a estrutura do capô oferece maior proteção em colisões frontais (AAR, 2020).

Uma rivalidade popularmente conhecida como "Bicudo" vs "Cara Chata", a escolha entre um ou outro é influenciada por uma combinação de fatores, incluindo design, eficiência, aplicações específicas, preferências regionais, mas principalmente questões legislativas, visto que em muitos países, as regulamentações de comprimento total dos veículos favorecem o uso de caminhões COE, pois permitem maximizar o espaço de carga dentro dos limites legais enquanto que nos Estados Unidos, as regulamentações de comprimento consideram somente o trailer.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A eficiência no consumo de combustível é um aspecto crucial na operação de caminhões, especialmente em um contexto de crescente preocupação com custos operacionais e impacto ambiental. O arrasto aerodinâmico, que é a resistência que o ar exerce sobre um veículo em movimento, desempenha um papel significativo na determinação da eficiência de combustível. Ao comparar caminhões convencionais e Cab Over Engine (COE), as diferenças no design aerodinâmico são fundamentais para entender suas respectivas eficiências (Smith, 2023).

Como citado anteriormente, os caminhões convencionais, caracterizados pelo motor localizado na frente da cabine, apresentam um design mais aerodinâmico que tende a reduzir o arrasto, o que os tornaria mais eficientes em termos de consumo de combustível, especialmente em viagens de longa distância de velocidades constantes e elevadas (IEA, 2019). A forma do capô ajuda a direcionar o ar de maneira que ele não colida diretamente com a superfície plana da cabine, diminuindo a resistência.

Por outro lado, os caminhões Cab Over Engine (COE) têm o motor localizado diretamente abaixo da cabine, resultando em uma frente plana. Este design, embora tenha suas vantagens no espaço de carga, não favorece o arrasto aerodinâmico. A

frente plana cria uma barreira ao fluxo de ar, aumentando a resistência e, conseqüentemente, o consumo de combustível.

Por não dividirem o mesmo mercado, não se pode dizer que estes dois modelos são concorrentes, no entanto, ignorando os fatores externos relacionados à legislação e conforto, e considerando uma aplicação rodoviária de longas distâncias que preza pela redução do consumo de combustível, qual dos dois veículos tem uma vantagem aerodinâmica e conseqüentemente mais econômica? Caso se confirme a vantagem dos Convencionais é possível medir o tamanho dessa diferença?

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar a influência do arrasto aerodinâmico no consumo de combustível, através da comparação entre dois tipos de design de caminhões: Convencionais X Cab Over Engine (COE).

A investigação busca entender como as diferenças de geometria entre esses modelos impactam a eficiência de combustível, considerando as características aerodinâmicas de cada um.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A aerodinâmica desempenha um papel fundamental na eficiência e no desempenho dos caminhões, influenciando diretamente o consumo de combustível e a estabilidade do veículo. A resistência do ar impacta significativamente os custos operacionais e a sustentabilidade do transporte rodoviário.

A otimização da geometria dos caminhões, aliada ao uso de materiais leves e sistemas ativos de controle aerodinâmico, tem mostrado potencial para ampliar esses benefícios. Estudos indicam que a implementação de dispositivos aerodinâmicos e a reformulação de componentes, como reboques, podem reduzir o coeficiente de arrasto em até 20%, resultando em economias de combustível expressivas. Isso faz com que simulações por computador e testes de bancada se tornem cada vez mais essenciais para determinar o coeficiente de arrasto de forma confiável e orientar melhorias no projeto.

### 2.1 AERODINÂMICA E COEFICIENTE DE ARRASTO

A resistência do ar é composta principalmente pela força de arrasto, que é influenciada pelo coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) do veículo. O  $C_d$  é uma medida adimensional que reflete a eficiência aerodinâmica de um objeto em movimento através de um fluido, neste caso, o ar.

Um coeficiente de arrasto mais baixo indica que o veículo enfrenta menos resistência, resultando em menor consumo de combustível. A força de arrasto ( $F_d$ ) pode ser calculada pela seguinte fórmula:

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

Ou ainda

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

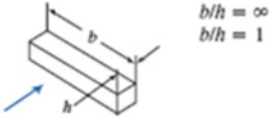




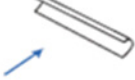
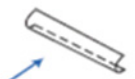
onde:

- $(F_d)$  = força de arrasto (N)
- $(\rho)$  = densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ )
- $(v)$  = velocidade do veículo em relação ao ar (m/s)
- $(A)$  = área frontal do veículo ( $\text{m}^2$ )
- $(C_d)$  = coeficiente de arrasto (adimensional)

O design aerodinâmico de caminhões envolve a forma da cabine, a disposição dos apêndices e a configuração geral do veículo. Um design otimizado pode reduzir a área frontal e suavizar as superfícies, minimizando a turbulência e o arrasto. Por exemplo, caminhões com cabines mais arredondadas e defletores de ar têm mostrado melhorias significativas na eficiência do combustível (HUCHO, 1998).

A relação entre o coeficiente de arrasto e o consumo de combustível é direta: quanto menor o  $C_d$ , menos energia é necessária para vencer a resistência do ar, o que se traduz em um menor consumo de combustível. Estudos indicam que uma redução de 0,1 no  $C_d$  pode resultar em uma economia de combustível de até 5% em velocidades de cruzeiro, que é particularmente relevante para caminhões que operam em longas distâncias (HWANG; KIM, 2013).

FIGURA 1 – ARRASTO AERODINÂMICO PARA DIFERENTES FORMATOS

Objeto	Diagrama	$C_D (Re \geq 10^3)$
Prisma retangular		2,05 1,05
Disco		1,17
Anel		1,20
Hemisfério (extremidade aberta voltada para o escoamento)		1,42
Hemisfério (extremidade aberta voltada para jusante)		0,38
Seção em C (lado aberto voltado para o escoamento)		2,30
Seção em C (lado aberto voltado para jusante)		1,20

FONTE: (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2011)

## 2.2 RELAÇÃO COEFICIENTE DE ARRASTO X CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Pesquisas anteriores têm explorado a relação entre aerodinâmica e eficiência de combustível em caminhões. Hucho e Tschöke (2005) fornecem uma análise abrangente sobre como diferentes formas de veículos afetam o coeficiente de arrasto, discutindo a importância de otimizar a geometria dos caminhões para melhorar a eficiência do combustível. Hsu e Chen (2015) investigaram a relação entre o arrasto aerodinâmico e o consumo de combustível em caminhões pesados, demonstrando que melhorias aerodinâmicas podem levar a uma redução significativa no consumo de diesel. Além disso, Hwang et al. (2016) focaram na aplicação de simulações computacionais para otimizar o design aerodinâmico de caminhões. Os resultados mostraram que a implementação de defletores de ar e outras modificações aerodinâmicas poderia reduzir o  $C$  em até 15%, resultando em economias de combustível substanciais. Hossain et al. (2018) analisaram o impacto de diferentes configurações de reboques em caminhões, revelando que a aerodinâmica do reboque também é crucial para a eficiência geral do combustível. A pesquisa concluiu que reboques com designs aerodinâmicos podem reduzir o arrasto em até 20%.

Com o avanço da tecnologia, novas abordagens, como o uso de materiais leves e sistemas de controle ativo de aerodinâmica, estão sendo exploradas. A implementação de dispositivos que ajustam a forma do caminhão em tempo real, dependendo das condições de velocidade e vento, pode otimizar ainda mais a eficiência do combustível. A otimização da aerodinâmica não apenas melhora a eficiência do combustível, mas também contribui para a estabilidade do veículo em altas velocidades, reduzindo o risco de acidentes e melhorando a segurança. Em conclusão, a aerodinâmica é um fator crítico na eficiência do consumo de combustível de caminhões. A redução do coeficiente de arrasto não apenas melhora a economia de combustível, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa.

Estudos têm mostrado que a aerodinâmica desempenha um papel crucial no consumo de combustível de caminhões. Caminhões convencionais, com cabines mais longas e formas mais arredondadas, tendem a ter um coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) mais favorável em comparação com alguns modelos COE. No entanto, a eficiência do combustível não depende apenas da aerodinâmica, mas também de fatores como peso, tipo de motor e tecnologia de transmissão. O estudo realizado por Hsu e Chen (2015) analisou o impacto da configuração do caminhão no consumo de combustível, revelando que caminhões convencionais apresentaram uma eficiência de combustível superior em comparação com caminhões COE em determinadas condições de operação. A pesquisa indicou que, embora os caminhões COE possam ser mais manobráveis, eles frequentemente enfrentam desafios aerodinâmicos que podem resultar em um maior consumo de combustível, especialmente em velocidades de cruzeiro.

Após a quantificação dos coeficientes de arrasto do caminhão referência e dos caminhões europeu e americano, esses coeficientes serão submetidos a equação 3 de consumo de combustível. Essa equação que relaciona o consumo de combustível com o arrasto, pode ser encontrada no trabalho de Lenngren e Hakanson (2010).

$$FS(\%) = \frac{8\Delta C_d}{15} \quad (3)$$

Para efeitos de comparação, a tabela a seguir resume os dados de consumo de combustível de caminhões convencionais e caminhões COE, com base em estudos de Hsu e Chen:

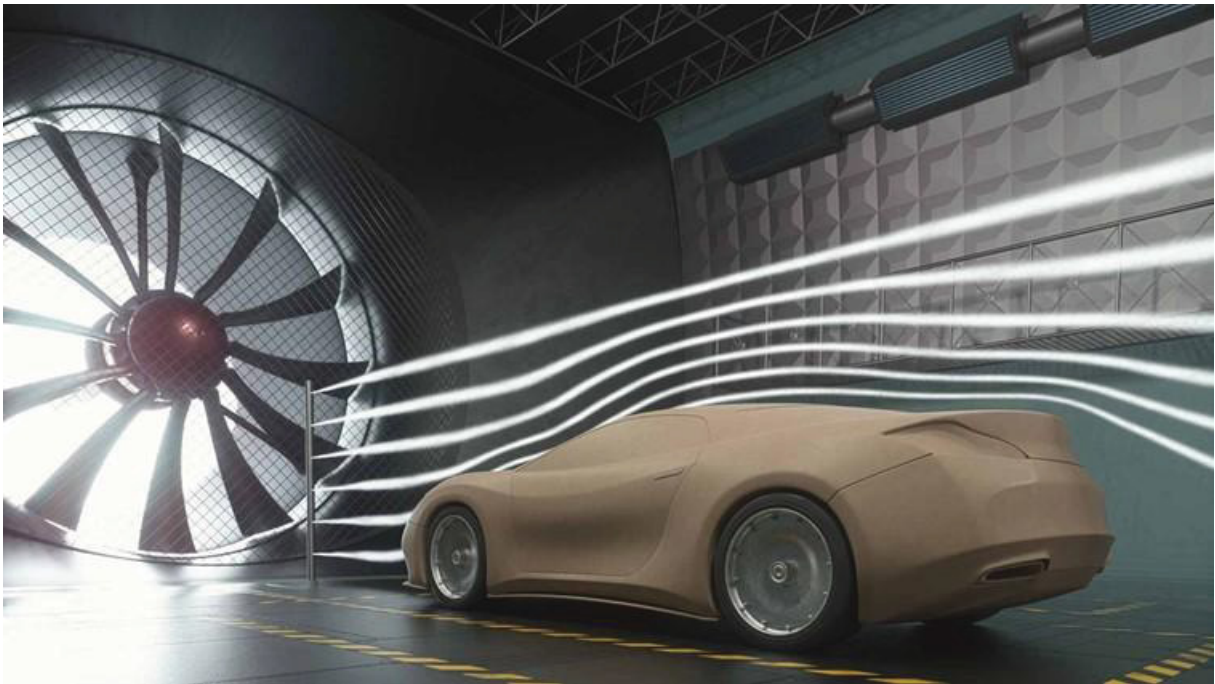
TABELA 1 - TABELA DE COEFICIENTES DE ARRASTO

<b>Tipo de Caminhão</b>	<b>Área Frontal (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Coefficiente de Arrasto (C<sub>d</sub>)</b>	<b>Consumo de Combustível (L/100 km)</b>
Caminhão Convencional	7,5	0,40	30
Caminhão COE	6,8	0,45	32

## 2.3 TÚNEIS DE VENTO

Apesar de não ter sido aplicada no presente trabalho, vale a menção aos túneis de vento, que são instalações laboratoriais projetadas para simular condições de fluxo de ar ao redor de veículos ou componentes aerodinâmicos, permitindo a análise detalhada do comportamento aerodinâmico em escala controlada. É capaz de fornecer dados precisos sobre resistência ao avanço, sustentação, fluxo de ar e distribuição de pressões, aspectos essenciais para otimizar o desempenho de componentes, especialmente em setores onde a eficiência aerodinâmica é crítica.

FIGURA 2 – INSTALAÇÕES DE TESTE DE TÚNEL DE VENTO



FONTE: <https://dewesoft.com/pt/blog/lista-de-instalacoes-de-teste-de-tunel-de-vento>

Na Fórmula 1, por exemplo, os túneis de vento desempenham papel fundamental na fase de desenvolvimento dos carros, permitindo que engenheiros testem diferentes configurações aerodinâmicas, como asas e difusores. Tanta é a importância dos testes no túnel de vento que há um limite de horas de uso por equipe que visa promover a igualdade de condições entre as equipes, evitando que aquelas com maior capacidade financeira ou recursos possam realizar mais testes.

FIGURA 3 – CARRO DE F1 DENTRO DO TÚNEL DE VENTO

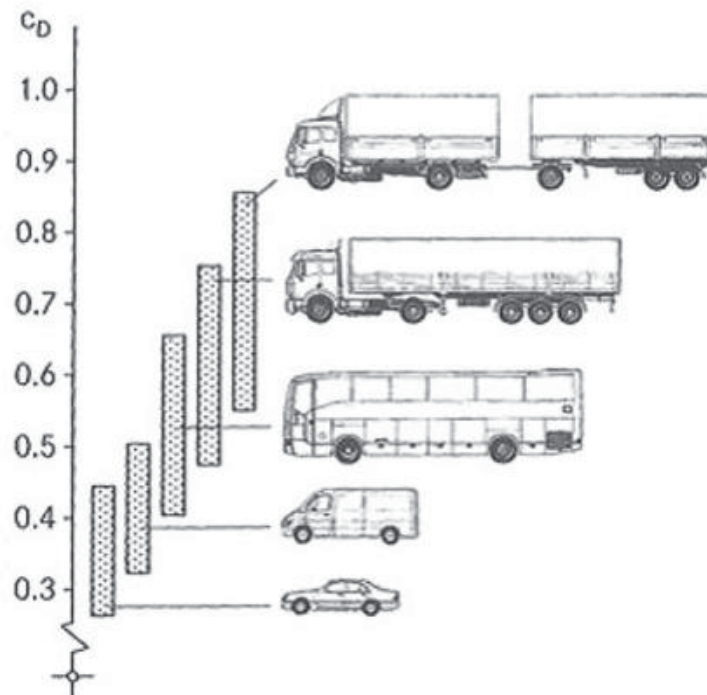


FONTE: [www.projetomotor.com.br](http://www.projetomotor.com.br)

Apesar do avanço das simulações CFD, os túneis de vento continuam sendo essenciais, pois fornecem dados experimentais que validam e complementam os resultados obtidos por computadores. Enquanto os softwares de CFD podem modelar uma vasta gama de condições e cenários, eles ainda dependem de modelos matemáticos que podem não capturar todos os detalhes do fluxo real, especialmente em situações turbulentas ou com geometria complexa.

Vale ressaltar ainda que os coeficientes de arrasto, conhecidos como  $C_x$  ou  $C_d$ , são frequentemente determinados por meio de testes em túneis de vento. Esses testes proporcionam uma medição experimental direta do comportamento aerodinâmico do veículo, permitindo calcular o coeficiente de arrasto de forma precisa. Seguem os valores tabelados de alguns  $C_x$  conhecidos para referência:

FIGURA 4 – COEF. AERODINÂMICO POR TIPO DE VEÍCULO



FONTE: Hucho, WH. 1987,p.300

## 2.4 NORMAS & LEGISLAÇÕES PARA TRANSPORTE DE CARGA

A legislação no Brasil é bastante restritiva em relação ao limite máximo de carga no eixo dianteiro dos caminhões, estabelecendo um limite de 6.000 kgf, conforme regulamentação do CONTRAN. Em contrapartida, na União Europeia, a diretiva (Directive EU 2015/719) permite um limite máximo de 7.100 kgf. Essa diferença resulta em uma posição mais frontal da quinta roda nos caminhões europeus, o que reduz a distância entre o caminhão e o trailer.

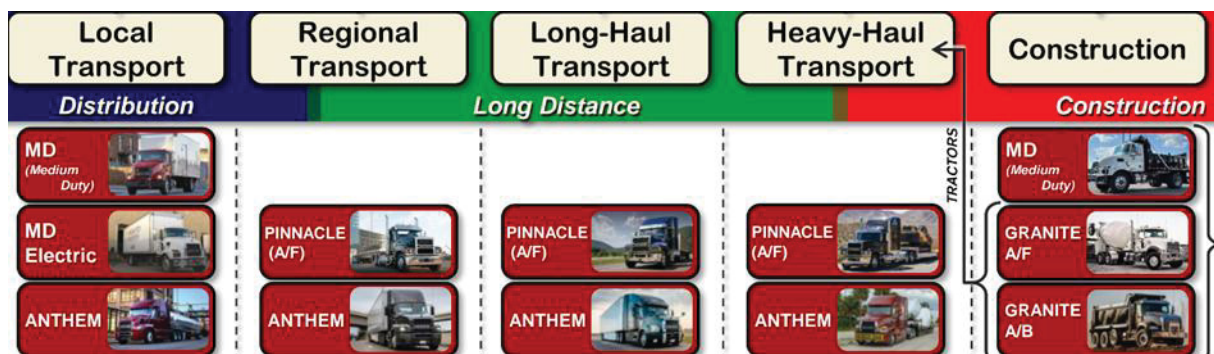
Outro exemplo de divergência nas normas é o comprimento máximo permitido para caminhões com uma carreta semirreboque de 3 eixos. No Brasil, o limite é de 18,6 metros, conforme o CONTRAN. Nos Estados Unidos, não há um limite máximo para essa configuração; o único critério é um comprimento mínimo da carreta de 14,63 metros, conforme o US Department of Transportation. Essa distinção permite que os caminhões americanos não precisem ser projetados para serem curtos, possibilitando um melhor aproveitamento da carga transportada e permitindo o desenvolvimento de veículos mais longos e aerodinâmicos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para este trabalho, foram realizadas simulações utilizando o método CFD (Computational Fluid Dynamics), considerando um veículo para cada configuração mencionada. O objetivo é selecionar, dentro de cada configuração, os modelos mais adequados para aplicação rodoviária, onde os caminhões alcançam velocidades superiores a 60 km/h, tornando os dispositivos aerodinâmicos efetivos.

No âmbito dos caminhões convencionais, o modelo escolhido foi o da marca americana Mack Truck, que oferece uma ampla gama de modelos que variam conforme a aplicação. Com base na tabela abaixo, o Anthem foi considerado o modelo ideal para representar os bicudos neste estudo.

FIGURA 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS CAMINHÕES MACK



FONTE: [www.macktrucks.com](http://www.macktrucks.com)

FIGURA 6 – MACK ANTHEM

FONTE: [www.macktrucks.com](http://www.macktrucks.com)

Para o Cab Over Engine, o modelo selecionado foi o Volvo FH540. Dono de um grande potencial de venda no ramo dos pesados estradeiros no Brasil, este modelo representa bem a categoria e a aplicação desejada para realização do comparativo.

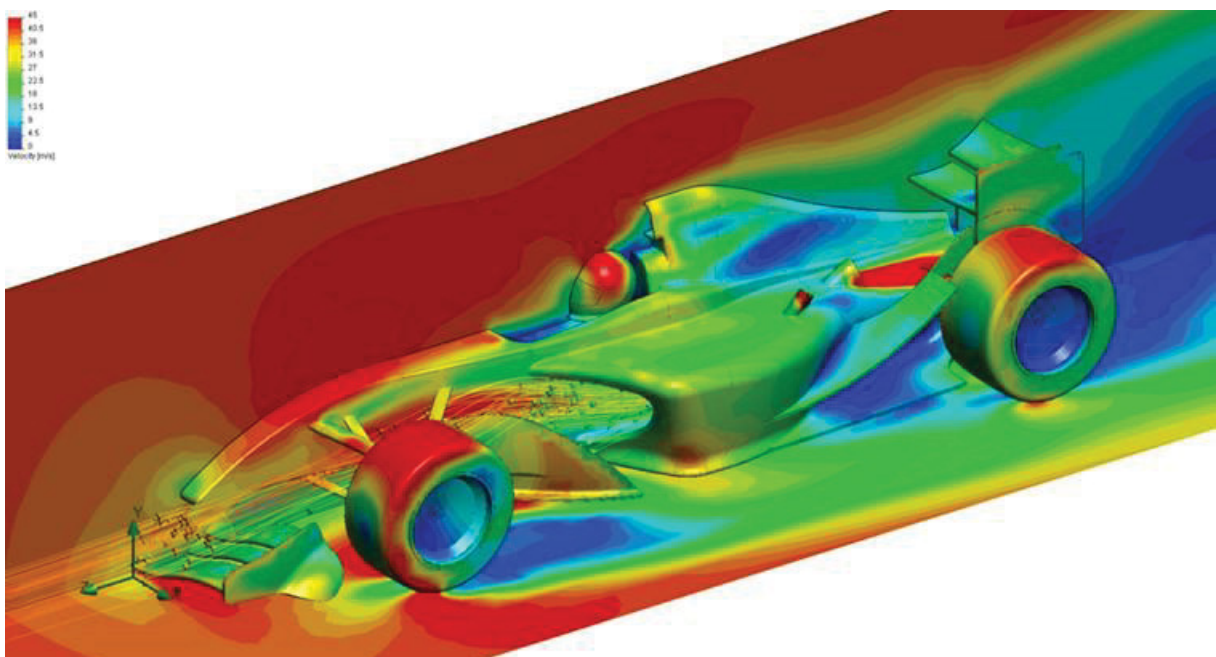
FIGURA 7 – VOLVO FH540

FONTE: [www.volvotrucks.com.br](http://www.volvotrucks.com.br)

### 3.1 MÉTODO CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC)

Em português, a Dinâmica de Fluidos Computacional constitui uma área da mecânica dos fluidos que emprega simulações numéricas e algoritmos computacionais para a análise de problemas envolvendo fluxos de fluidos. Sua aplicação abrange diversos setores industriais, incluindo os ramos aeroespacial, automotivo, civil e energético. A origem do CFD remonta à década de 1960, momento em que foram desenvolvidos os primeiros métodos numéricos para a resolução das equações de Navier-Stokes, que descrevem o movimento de fluidos viscosos. Com o avanço da capacidade computacional, especialmente na década de 1980, a disponibilização de softwares comerciais possibilitou a democratização do uso dessa tecnologia, ampliando sua aplicação em projetos de engenharia e pesquisa.

FIGURA 8 – CDF CARRO F1



FONTE: [www.albrodpulf1.wordpress.com](http://www.albrodpulf1.wordpress.com)

O procedimento de uma simulação de CFD é composto de algumas etapas sequenciais: definição do problema, modelagem geométrica, discretização do domínio por meio da geração de uma malha, configuração do método numérico e execução da solução, seguida da análise dos resultados através de técnicas de pós-processamento. Essas etapas permitem a análise detalhada de fenômenos como fluxo turbulento, transferência de calor e interações multifásicas, possibilitando

aplicações em diversas áreas, como a aerodinâmica de aeronaves, otimização de veículos automotores, estudos de escoamentos em estruturas civis, avaliação de sistemas de energia e simulações médicas de fluxo sanguíneo.

Dentre as vantagens do CFD, destacam-se a alta precisão na previsão do comportamento de fluidos, a capacidade de visualização dos fenômenos, a redução de custos e tempo em relação a testes físicos, além da flexibilidade para simular diferentes condições de operação. Entretanto, o método apresenta limitações, como elevado custo computacional, complexidade na modelagem de fenômenos complexos e a necessidade de validação experimental para assegurar a confiabilidade dos resultados. O fluxo de trabalho típico inclui a definição do problema, modelagem geométrica, discretização, configuração do solver, execução da simulação e análise dos resultados, sempre buscando validar os dados obtidos.

FIGURA 9 – MACK SOB AS LINHAS DE FLUXO



FONTE: [www.macktrucks.com](http://www.macktrucks.com)

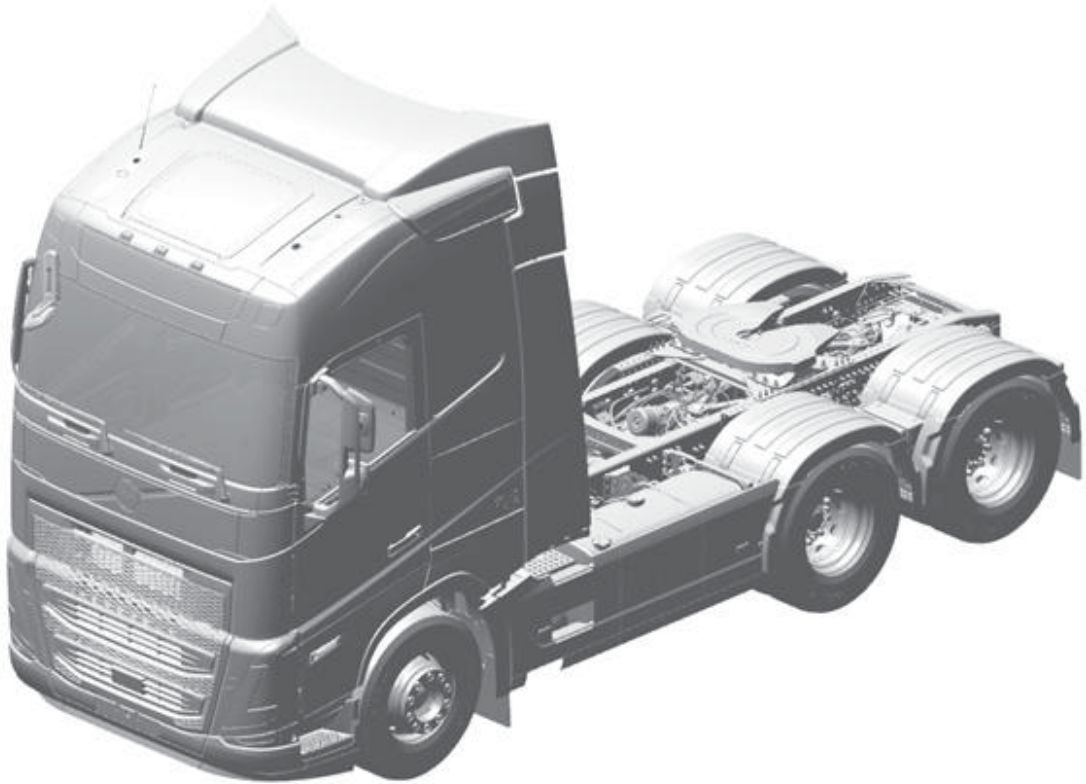
### 3.2 MODELAGEM CAD E PREPARAÇÃO DO MODELO

A modelagem geométrica do domínio computacional, realizada por meio de softwares de desenho assistido por computador (CAD), constitui uma etapa fundamental na preparação de simulações de CFD, especialmente na indústria automotiva. Essa fase consiste na criação de um modelo tridimensional que representa a geometria do objeto de estudo, como veículos, componentes mecânicos ou estruturas civis. A precisão e detalhamento dessa modelagem influenciam diretamente na qualidade e confiabilidade dos resultados das simulações, sendo essencial para o desenvolvimento de projetos mais eficientes e com menor resistência ao fluxo.

Na indústria automotiva, a modelagem CAD é empregada para representar a geometria de veículos, incluindo carroceria, sistemas de resfriamento, rodas e outros componentes relevantes. Ferramentas como AutoCAD, SolidWorks e CATIA são amplamente utilizadas para esse propósito. A modelagem deve contemplar detalhes essenciais ao fenômeno de interesse, como a forma da carroceria, a disposição dos elementos e as superfícies de contato com o ar. Além disso, é comum realizar simplificações geométricas, removendo detalhes que não influenciam significativamente o fluxo, como pequenos furos ou arestas, a fim de facilitar a geração da malha de discretização.

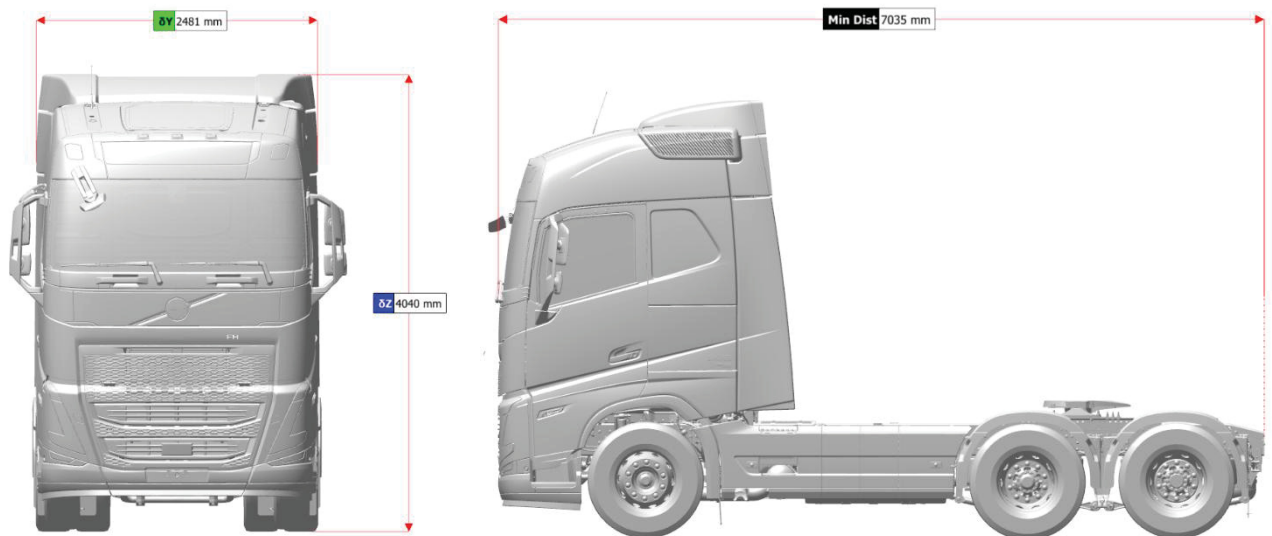
Para este trabalho foi utilizado o Software Creo Parametric, que por sua vez exportou os arquivos .stp conforme os modelos abaixo:

FIGURA 10 – MODELO 3D DO VEÍCULO COE PARA SIMULAÇÃO  
VISTA ISOMÉTRICA



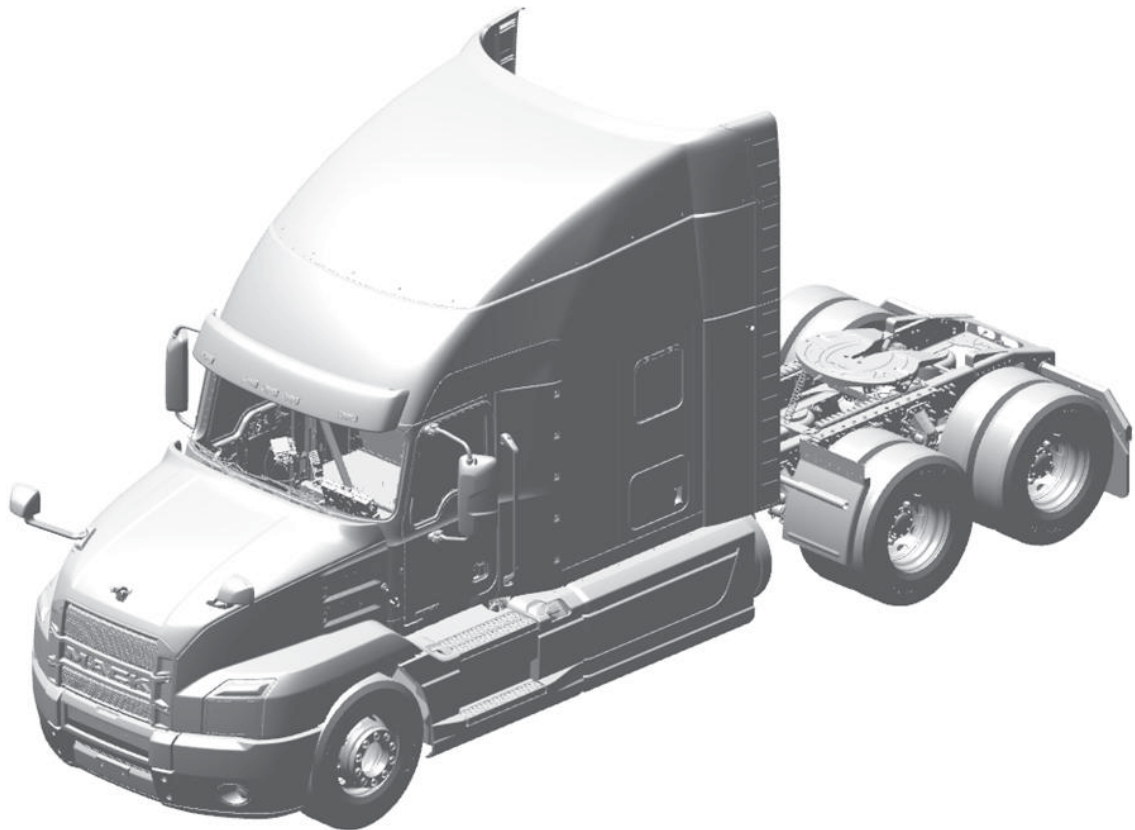
FONTE: Os Autores (2025)

FIGURA 11- MODELO 3D DO VEÍCULO COE PARA SIMULAÇÃO  
VISTAS FRONTAL E LATERAL



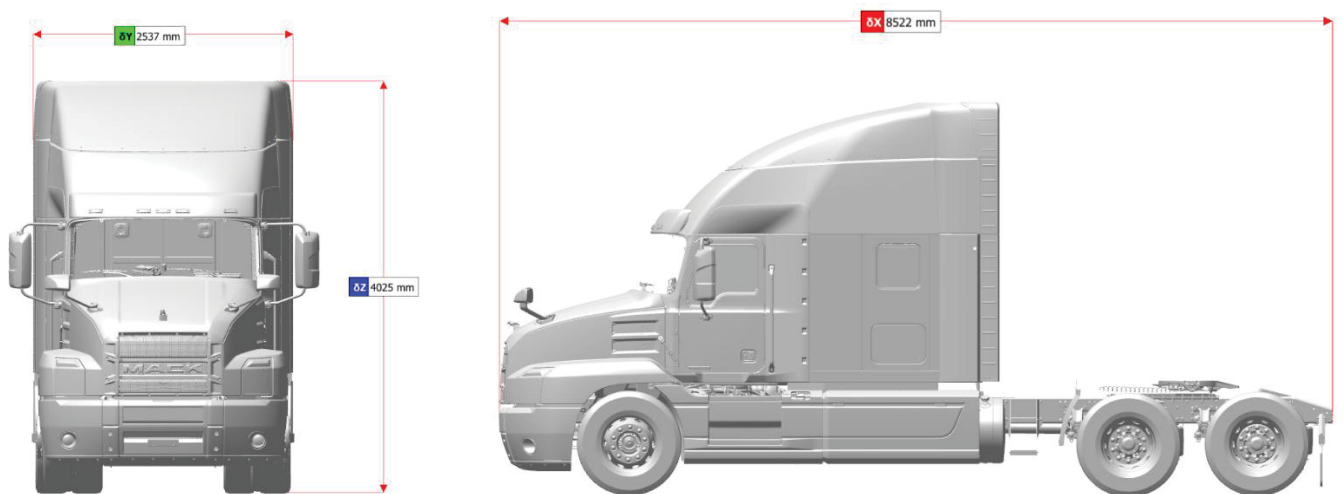
FONTE: Os Autores (2025)

FIGURA 12 – MODELO 3D DO VEÍCULO CONVENCIONAL PARA SIMULAÇÃO  
VISTA ISOMÉTRICA



FONTE: Os Autores (2025)

FIGURA 13- MODELO 3D DO VEÍCULO CONVENCIONAL PARA SIMULAÇÃO  
VISTAS FRONTAL E LATERAL



FONTE: Os Autores (2025)

Após a modelagem, o modelo deve ser exportado em formatos compatíveis com o software de CFD, como STL, IGES ou STEP. A qualidade da geometria e a precisão na definição das superfícies são fatores determinantes para a geração de uma malha de alta qualidade, especialmente em regiões de alta variação de fluxo, como bordas e interfaces. Antes de proceder à malha, é imprescindível validar a geometria, verificando possíveis erros ou inconsistências que possam comprometer a análise. Exemplos de aplicações incluem a modelagem de veículos para análise de desempenho aerodinâmico, sistemas de resfriamento e fluxo de ar ao redor do veículo, com o objetivo de otimizar a eficiência aerodinâmica e reduzir o arrasto, contribuindo para melhorias no consumo de combustível e no desempenho geral.

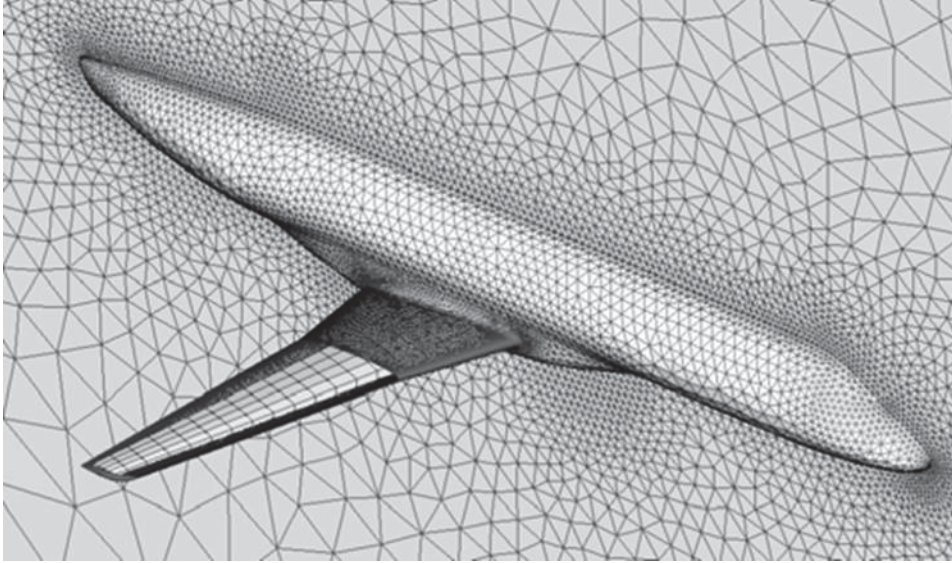
### 3.3 QUALIDADE DA MALHA

A qualidade da malha em CFD é um aspecto essencial que influencia diretamente a precisão, estabilidade e eficiência das simulações. Ela é composta pela discretização do domínio contínuo em elementos finitos ou volumes finitos, e sua qualidade depende de diversos fatores. O tamanho dos elementos deve ser adequado para capturar as características do fluxo: elementos muito grandes podem não resolver gradientes importantes, enquanto elementos muito pequenos aumentam o tempo de cálculo sem ganho proporcional de precisão. A forma dos elementos também é importante; elementos hexaédricos oferecem maior estabilidade e precisão, enquanto tetraédricos são mais fáceis de gerar em geometrias complexas (Anderson, 1995; Grenson, 2023).

O refinamento da malha em regiões de interesse, como áreas próximas a obstáculos ou superfícies, é fundamental para captar fenômenos como turbulência e separação de fluxo. Além disso, a criação de subcamadas e camadas limite, usando técnicas como elementos prismáticos, é crucial para resolver gradientes de velocidade em regiões próximas às superfícies, garantindo uma transição adequada do fluxo laminar para turbulento (Versteeg & Malalasekera, 2007). A uniformidade da malha e a conectividade entre os elementos também impactam na qualidade da solução, ajudando a evitar problemas de convergência e erros numéricos (Anderson, 1995; Grenson, 2023).

A técnica de geração de malha deve ser escolhida de acordo com a complexidade da geometria e os objetivos da simulação. Malhas estruturadas são eficientes para geometrias simples, enquanto malhas não estruturadas oferecem maior flexibilidade para geometrias complexas. Malhas híbridas combinam ambos os tipos, aproveitando suas vantagens (Anderson, 1995; Grenson, 2023). Uma malha de alta qualidade é fundamental para obter resultados precisos, confiáveis e que capturem fenômenos físicos complexos, além de melhorar a eficiência computacional, reduzindo o tempo necessário para obter soluções estáveis e detalhadas. FIGURA 8 – CDF CARRO F1

FIGURA 14 – EXEMPLO DE MALHA



FONTE: Shigeru Obayashi, 2006

### 3.4 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO

O modelo físico-matemático em dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é uma representação matemática que descreve o comportamento de fluidos em movimento e suas interações com superfícies sólidas. Esse modelo é fundamental para simulações que visam prever como um fluido se comporta sob diferentes condições e configurações geométricas.

Nos itens que se seguem foram listadas as hipóteses consideradas neste e na maioria dos trabalhos de CFD, que formam as são suposições feitas para simplificar o modelo matemático e tornar a simulação computacional viável. São essenciais para reduzir a complexidade dos problemas e podem variar dependendo do tipo de fluxo, das condições de contorno e dos objetivos da simulação.

#### 3.4.1 Hipóteses da incompressibilidade

A hipótese de incompressibilidade é frequentemente utilizada em simulações de fluxo de ar em baixas velocidades, como na aerodinâmica de veículos terrestres. Sob esta hipótese, a densidade do fluido é considerada constante, o que simplifica as equações de Navier-Stokes. A equação de continuidade para um fluido incompressível é expressa como:

$$\nabla \cdot u = 0$$

Esta hipótese é válida quando a velocidade do fluxo é significativamente menor que a velocidade do som no fluido, geralmente para números de Mach menores que 0.3 (Anderson, 1995).

#### 3.4.2 Fluxo Laminar vs. Turbulento

O tipo de fluxo, laminar ou turbulento, é determinado pelo número de Reynolds, que é uma medida da razão entre forças inerciais e viscosas no fluido. Para números de Reynolds baixos, o fluxo é laminar e suave, enquanto para números altos, o fluxo se torna turbulento e caótico. Em simulações de CFD, modelos de turbulência como o k- $\epsilon$  e o k- $\omega$  são usados para capturar os efeitos do fluxo turbulento.

O regime turbulento é caracterizado por flutuações rápidas e irregulares na velocidade e pressão do fluido, exigindo modelagem complexa para prever seu comportamento (Wilcox, 1998).

### 3.4.3 Homogeneidade e Isotropia

Em alguns modelos de turbulência, o fluxo é assumido como homogêneo e isotrópico, o que significa que as propriedades do fluido são uniformes em todas as direções. Esta hipótese simplifica a modelagem da turbulência, mas pode não ser válida em todos os casos, especialmente em fluxos com gradientes significativos, como em torno de obstáculos ou em regiões de separação de fluxo (Wilcox, 1998).

### 3.4.4 Simplificações geométricas

Para reduzir o custo computacional, a geometria do problema pode ser simplificada. Isso pode incluir a remoção de pequenos detalhes que não afetam significativamente o fluxo ou a utilização de simetria para reduzir o domínio de simulação. Essas simplificações devem ser cuidadosamente avaliadas para garantir que não comprometam a precisão dos resultados (Anderson, 1995).

Essas hipóteses são fundamentais para a implementação de simulações CFD, mas devem ser cuidadosamente escolhidas e justificadas para garantir que os resultados sejam representativos do fenômeno real. A validação contra dados experimentais ou soluções analíticas é frequentemente necessária para verificar a precisão das hipóteses adotadas.

### 3.4.5 Condições de contorno

As condições de contorno desempenham um papel fundamental na definição do comportamento do fluido nas fronteiras do domínio de análise. Elas simulam o ambiente ao redor do escoamento e permitem que o modelo capture com precisão as interações do fluido com as superfícies e o ambiente externo. Entre as condições de contorno mais comuns estão:

- a) Condições de entrada e saída: definem como o fluido entra e sai do domínio;
- b) Condições de parede: simulam superfícies sólidas;
- c) Condições de simetria: reduzem a complexidade do problema sem comprometer a precisão.

A escolha adequada dessas condições é essencial para obter resultados realistas e confiáveis na análise aerodinâmica.

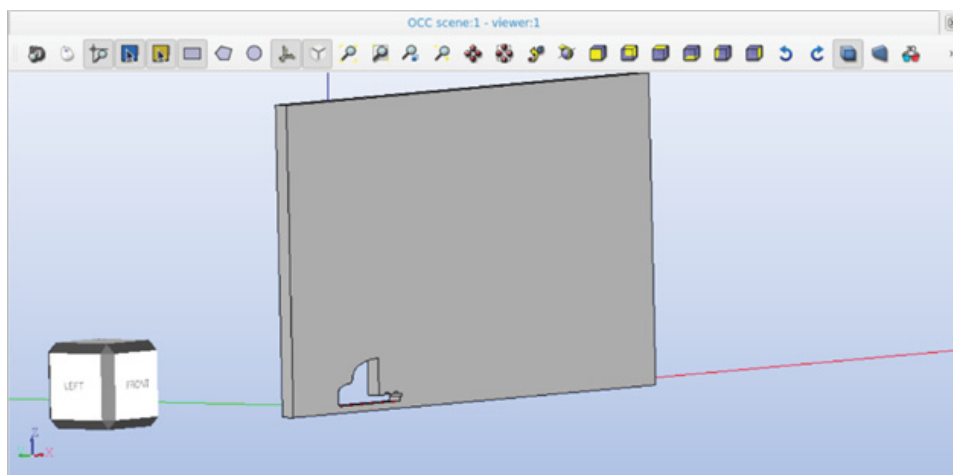
## 4 RESULTADOS

Para iniciar a simulação, primeiro é necessário criar o túnel de vento ao redor do veículo. Para isso, usou-se o SALOME através de uma máquina virtual. No software, importou-se o 3D no formato STEP e criou-se uma caixa com dimensões  $X = 40$ ,  $Y=1$  e  $Z=22$  a partir da origem do veículo. Vale ressaltar que o presente trabalho foi realizado uma simulação 2D, por isso a escolha do  $Y$  unitário.

Porém, como o túnel de vento não pode iniciar direto no veículo, deve haver um espaço para o ar se desenvolver, trasladou-se a caixa para  $X = -5$ ;  $Y= -0,3$  e  $Z= -0,5$  que corresponde ao solo onde o escoamento irá passar por baixo do veículo.

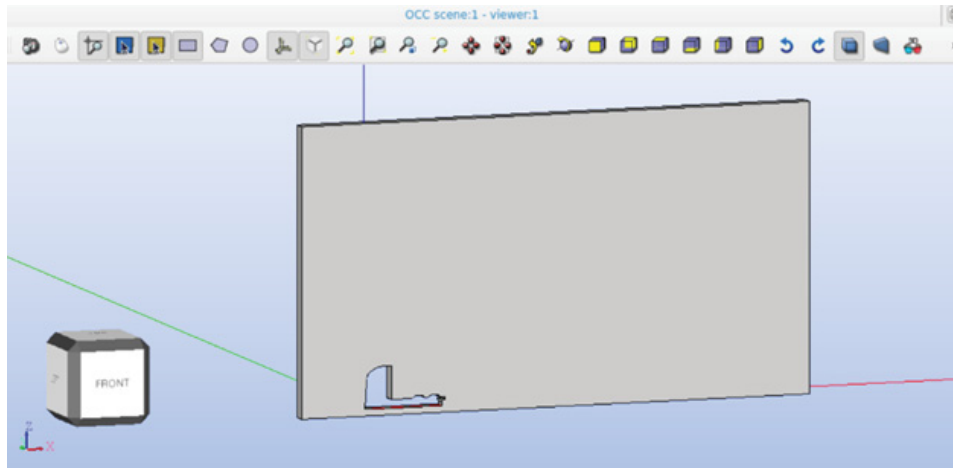
Em seguida foi utilizada a ferramenta “cut” no caminhão, já que a simulação é feita no escoamento de ar em volta do veículo e não no objeto, conforme figura abaixo.

FIGURA 15 – ENVELOPE MODELO CONVENCIONAL



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 16 – ENVELOPE MODELO COE



FONTE: Os autores (2025).

Na árvore, selecionou-se a ferramenta cut para separar as faces de condição de contorno através do comando “Explode”. As mesmas foram renomeadas para:

- Face da entrada de ar: inlet
- Face da saída: outlet
- Face superior: freeStream
- Face inferior: floor
- Faces livres: empty

Próximo passo é acessar a interface Mesh no Salome para criar a malha. Para isso, utilizou-se o algoritmo “Extrusion 3D”, no ícone de 1D selecionou-se o algoritmo “wire discretisation”, em hipótese definiu-se o número de segmentos igual a 1 para que seja feita uma malha na direção Y. Criou-se também uma submalha em uma das faces empty (Y normal) com a seguinte configuração: algoritmo “NETGEN 1D-2D”, hipótese “NETGEN 2D Parameters” com argumentos de máximo tamanho de malha 0,2 e mínimo de 0,05.

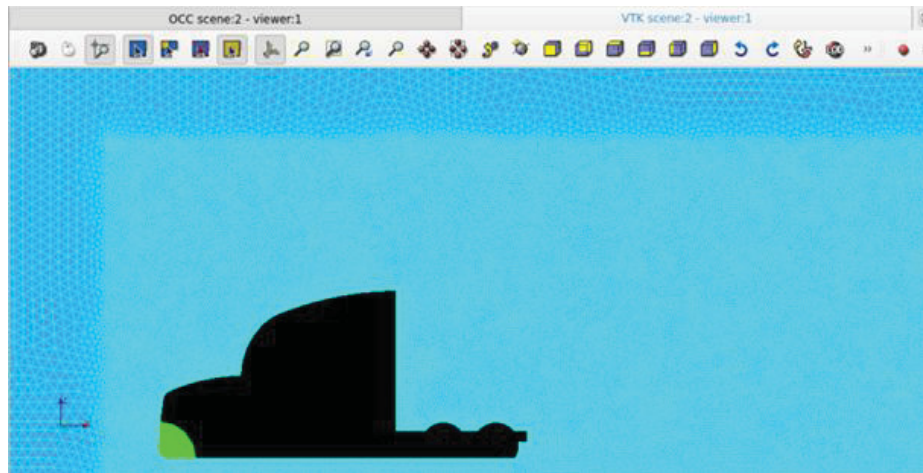
Para detalhar a alta variação de velocidade em volta do caminhão criou-se a malha de elementos normais a superfície do veículo através da Viscous Layers 2D na face que descreve o contorno do veículo. Para isso foi necessário explodir uma das faces empty, em Edge, e então criou-se um grupo para as linhas ao redor do caminhão. Esse grupo de linhas (line\_car) foi adicionado na viscous layer com tamanho de 0,1, número de tamanhos 7 e fator de expansão de 1,3.

Essa camada é mais refinada e normal a superfície com objetivo de simular melhor a camada limite.

Em seguida foi feita uma face ao redor do caminhão com intuito de refinar a malha próximo ao caminhão. Na malha incluiu-se Local Size nessa face com tamanho de malha de 0,05 e também a line\_car com 0,05.

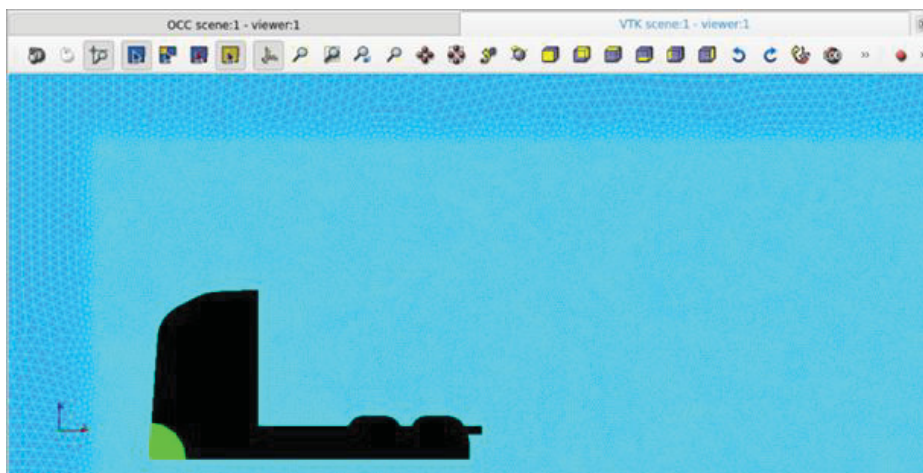
As malhas calculadas estão nas imagens abaixo.

FIGURA 17 – MALHA DO MODELO CONVENCIONAL



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 18 – MALHA DO MODELO COE



FONTE: Os autores (2025).

O próximo passo foi revisar o grupo de faces para que ficassem apenas as faces das condições de contorno (inlet, outlet, COE/Mack, empty, freeStream e floor).

Por fim, o arquivo foi exportado para UNV file.

No terminal, é possível acessar os arquivos da geometria e a malha criadas. Para realizar a tradução da malha para o OpenFoam, utilizou-se o comando "ideasUnvToFoam".

Para a presente simulação foi utilizada uma velocidade de 20m/s na direção x, onde o caminhão possui a condição de não deslizamento (velocidade nula) assim como o solo. A pressão relativa foi considerada zero, ou seja, a pressão atmosférica. Nesse requisito o caminhão e o solo são considerados como zero gradiente.

O regime considerado foi regime laminar e viscosidade do ar como  $1.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Os coeficientes aerodinâmicos calculados de forma direta estão no arquivo “forceCoeffs”, onde as dimensões de referência do caminhão são explicitadas.

Por fim, foi executada a simulação através do comando “simpleFoam”.

Como resultado, o coeficiente de arrasto foi de 0,69 para o Mack e 2,15 para o COE.

FIGURA 19 – RESULTADOS DO MODELO CONVENCIONAL

```
forceCoeffs forceCoeffs1 write:
  Cm      = -0.731355
  Cd      = 0.695302
  Cl      = 0.512757
  Cl(f)   = -0.474976
  Cl(r)   = 0.987733

End

LETICIADEPAULADIASDUARTE@s imubuntu:~/Documentos/Mack$
```

FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 20 – RESULTADOS DO MODELO CONVENCIONAL

```
forceCoeffs forceCoeffs1 write:
  Cm      = -0.656727
  Cd      = 2.15038
  Cl      = 2.65184
  Cl(f)   = 0.669194
  Cl(r)   = 1.98265

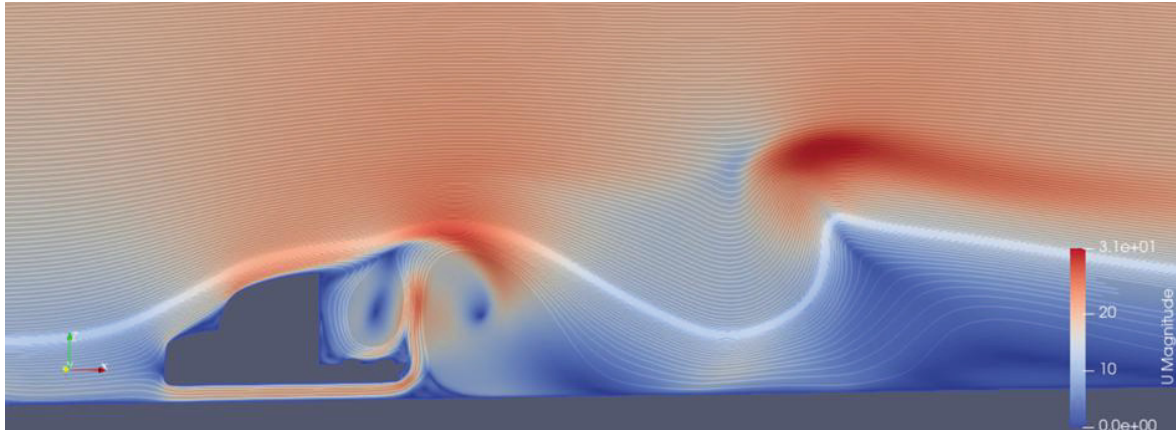
End

LETICIADEPAULADIASDUARTE@s imubuntu:~/Documentos/COE$
```

FONTE: Os autores (2025).

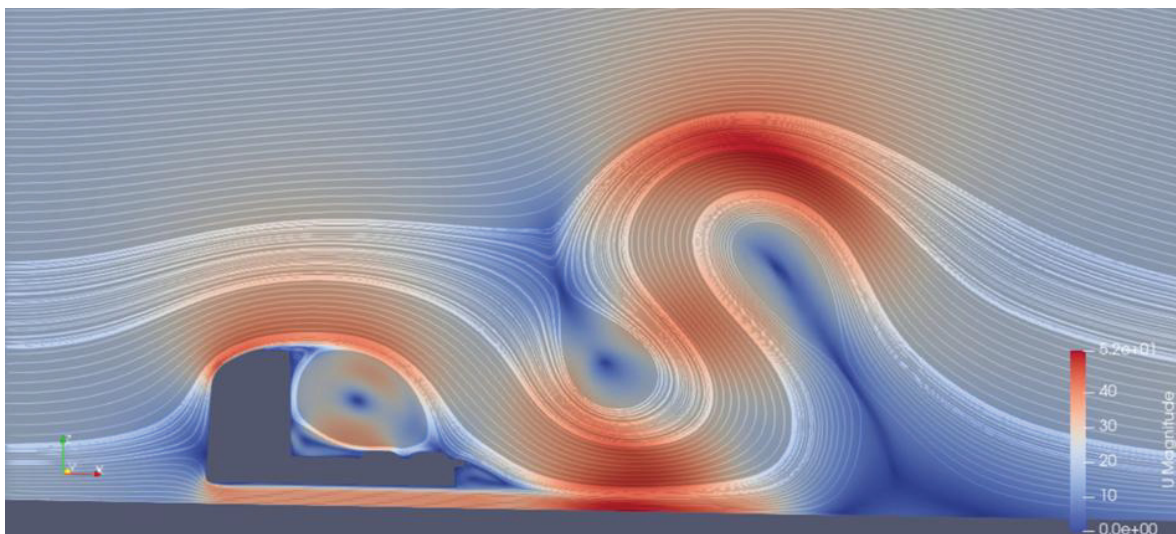
Abaixo estão as linhas de fluxo.

FIGURA 21 – LINHAS DE VELOCIDADE DO MODELO CONVENCIONAL



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 22 – LINHAS DE VELOCIDADE DO MODELO COE

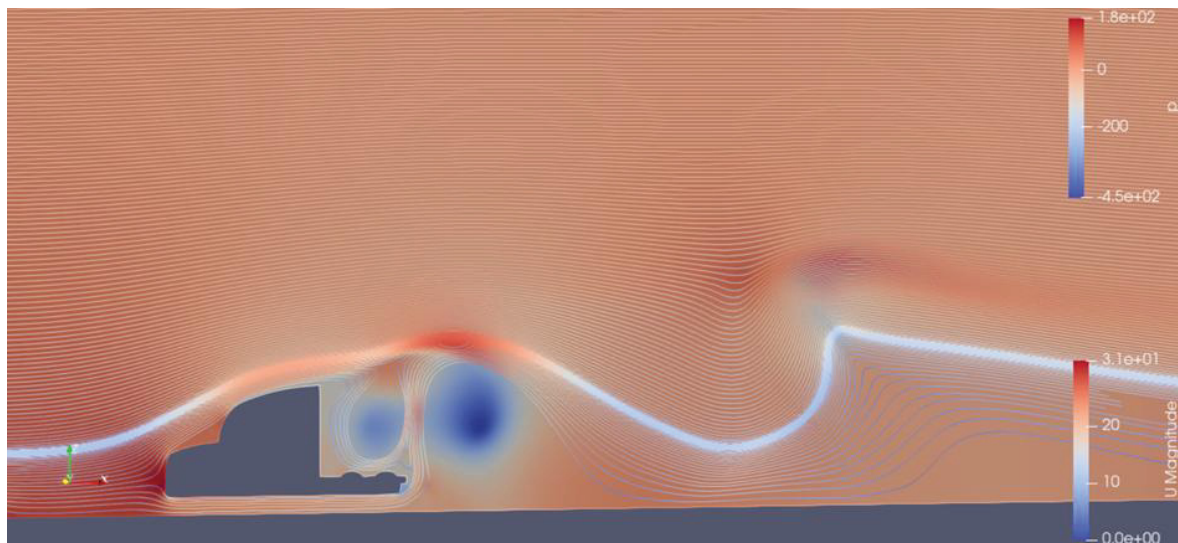


FONTE: Os autores (2025).

Em ambas as imagens acima pode-se notar o campo de velocidade com efeito solo embaixo do caminhão onde a velocidade aumenta. Quanto maior a velocidade embaixo do veículo maior o downforce, o aumento da velocidade provoca a queda de pressão o que “empurra” o veículo para baixo.

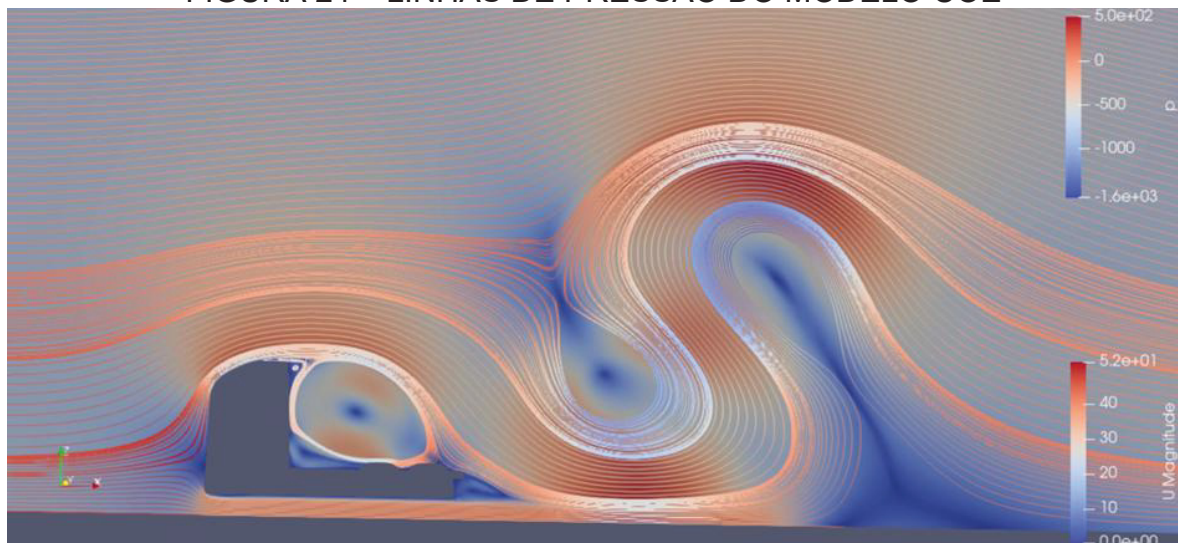
Há descolamento da camada limite na parte do capot do Mack, no final do parabrisa e no final do veículo com zona de baixa pressão de ambos os modelos. Na maior curvatura há aceleração do fluido por acumular o ar após uma mudança brusca na geometria do COE em relação ao Mack.

FIGURA 23 – LINHAS DE PRESSÃO DO MODELO CONVENCIONAL



FONTE: Os autores (2025).

FIGURA 24 – LINHAS DE PRESSÃO DO MODELO COE



FONTE: Os autores (2025).

Nas imagens acima, é possível observar também o ponto de estagnação na frente do veículo. Nesse ponto há alta pressão, bastante massa de fluido no mesmo volume o que é importante para o radiador onde há bastante ar para trocar calor, porém do ponto de vista do arrasto é ruim, pois há pressão alta na frente do veículo e pressão baixa na parte de trás do veículo. Pode-se observar que essa situação é pior no modelo COE em relação ao Mack.

Os vórtices é onde perde eficiência aerodinâmica. Atrás do caminhão já era esperado. O vazio observado representa o local onde o fluido não consegue chegar, criando assim um vácuo com muita turbulência o que provoca o arrasto. O vórtice representa perda de eficiência aerodinâmica.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou avaliar a influência do design aerodinâmico na eficiência de combustível de caminhões, comparando modelos convencional e Cab Over Engine (COE) por meio de simulações CFD. Com base na literatura, era esperado que a redução do coeficiente de arrasto de aproximadamente 0,1 resultasse em uma economia de até 5% no consumo de combustível em condições de cruzeiro de longa distância.

A tendência era que, de fato, o coeficiente de arrasto dos Convencionais fosse inferior ao COE. No entanto, os resultados obtidos indicaram um  $C_d$  de 2,15 para o COE, um valor significativamente superior ao esperado e que, na prática, não condiz com dados experimentais ou referências de mercado. Essa discrepância sugere que houve algum erro na simulação, possivelmente relacionado à modelagem, malha ou condições de contorno adotadas, o que compromete a confiabilidade dos resultados obtidos. Como consequência, a estimativa de economia de combustível baseada nesse valor de  $C_d$  foi excessivamente otimista, chegando a aproximadamente 66%, um número claramente irrealista para a situação real de operação de caminhões.

Diante disso, conclui-se que, embora a simulação seja uma ferramenta poderosa para análise aerodinâmica, ela deve ser complementada por validações experimentais e ajustes na modelagem para garantir resultados mais precisos. A expectativa de uma economia de até 5% reforça a importância de uma modelagem adequada e de validações com dados reais. Para trabalhos futuros, recomenda-se revisar a modelagem, verificar as condições de contorno e realizar testes em túneis de vento ou em campo, a fim de obter dados mais confiáveis e realistas. Assim, será possível estabelecer conclusões mais precisas sobre o impacto do design aerodinâmico na eficiência de combustível de caminhões.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill, 1995.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. Introduction to Fluid Mechanics. Wiley, 2011.
- GRENSON, M. Modelagem e Malha em CFD. Editora Técnica, 2023.
- HUCH, W. H. Aerodynamics of Road Vehicles. SAE International, 1987.
- HUCH, W. H.; TSCHÖKE, T. Aerodynamic Optimization of Vehicles. SAE Technical Paper, 2005.
- HSU, C. H.; CHEN, Y. Aerodynamic Drag and Fuel Consumption in Heavy Trucks. Journal of Transportation Engineering, v. 141, n. 3, p. 04014086, 2015.
- HWANG, S.; KIM, J. Impact of Aerodynamic Design on Fuel Efficiency. International Journal of Automotive Technology, v. 17, n. 2, p. 245-253, 2013.
- LENNGREN, M.; HAKANSON, J. Fuel Consumption and Aerodynamic Drag. Vehicle Engineering Journal, 2010.
- OBAYASHI, S. CFD Mesh Generation Techniques. Journal of Computational Physics, v. 210, p. 123-135, 2006.
- WILCOX, D. C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, 1998.
- U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Regulations for Truck Lengths. [S.l.], s.d.
- CONTRAN (Brazilian National Traffic Council). Normas de Transporte de Carga. Resoluções e Portarias, 2020.
- IEA (International Energy Agency). Global Transport Energy Review. 2019.
- SMITH, A. Transport Logistics and Fuel Efficiency. Logistics Journal, v. 45, n. 4, p. 567-580, 2023.
- UNION PACIFIC. Design Features of Over-Engine Cab Trucks. Industry Report, 2022.