

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME MARTINI MIOTTO
HENRY BECQUEREL RYUICHI NAKANO

**ANÁLISE EM CFD DA EFICIÊNCIA DE ACESSÓRIOS
AERODINÂMICOS INSTALADOS EM CAMINHÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
(TCC 2)

CURITIBA

2018

GUILHERME MARTINI MIOTTO
HENRY BECQUEREL RYUICHI NAKANO

**ANÁLISE EM CFD DA EFICIÊNCIA DE ACESSÓRIOS
AERODINÂMICOS INSTALADOS EM CAMINHÕES**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Matos Germer

CURITIBA

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta de Projeto de Pesquisa “Análise em CFD da Eficiência de Acessórios Aerodinâmicos Instalados em Caminhões”, realizada pelos alunos Guilherme Martini Miotto e Henry Becquerel Ryuichi Nakano, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Eduardo Matos Germer
Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC
Orientador

Prof. Dr. Luciano Fernando dos Santos Rossi
Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC
Avaliador

Prof. Dr. Paulo Henrique Dias dos Santos
Departamento Acadêmico de Mecânica, DAMEC
Avaliador

Curitiba, 29 de Junho de 2018.

RESUMO

MIOTTO, Guilherme M., NAKANO, Henry B.Q. Análise em CFD da Eficiência de Acessórios Aerodinâmicos Instalados em Caminhões. 127 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Curitiba, 2018. O transporte rodoviário no Brasil é o maior responsável pela movimentação de cargas no país. Este modal de transporte faz uso de caminhões que consomem uma grande quantidade de óleo diesel, sendo que um dos fatores de maior impacto no consumo de combustível em veículos é o arrasto aerodinâmico. Apesar de muito já ter sido feito para melhoria na aerodinâmica de caminhões, ainda há espaço para melhorias. Este trabalho busca avançar nesta área, e para isto analisou quatro tipos de apêndices aerodinâmicos, usando o *software* comercial Ansys Fluent®, versão *student*. As análises foram realizadas em regime de velocidade de 25 m/s (90km/h), espaço bidimensional, regime permanente e escoamento incompressível. O modelo de turbulência usado foi o *k-ε realizable* e usou-se aproximações de segunda ordem de acurácia e malha quadrilateral dominante. O modelo numérico foi validado com base em experimentos em túnel de vento e em outros estudos com as mesmas premissas deste. A solução numérica para o caminhão e baú originais resultou em uma redução do coeficiente de arrasto aerodinâmico (C_d) de 39% ao usar o defletor de teto, 14% para o defletor frontal, 12% para o extensor traseiro e 5% para o redutor de *gap*. A previsão é que estas reduções no C_d gerem economia de até 22% no consumo de combustível.

Palavras-chave: caminhão, aerodinâmica, coeficiente de arrasto, CFD.

ABSTRACT

MIOTTO, Guilherme M., NAKANO, Henry B.Q. Analysis of the efficiency of aerodynamic devices installed on trucks. 127 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Road transport in Brazil is the main responsible for the cargo handling in this country. This kind of transport makes use of trucks that consumes a huge amount of diesel oil, being the aerodynamic drag one of the main factors in fuel consumption. Even with a lot made to improve the truck aerodynamic, there is still enough space to improve it. This work seeks to advance in this area, and to do it, it analyzed four kinds of aerodynamic devices with the commercial software Ansys Fluent®, student version. The analysis were carried out with a velocity of 25m/s (90km/h), bidimensional space, steady state and incompressible flow. The turbulence model used was *realizable* $k-\epsilon$, with second order accuracy approximations and quadrilateral dominant mesh. The numerical model was validated based on a wind tunnel experiment that followed the same scope as this work. The numerical solution for the original truck and trailer resulted in an aerodynamic drag reduction of 39% for the roof deflector device, 14% for the bumper deflector device, 12% for the rear extensor and 5% for the gap seal. The forecast is to reduce the fuel consumption up to 9%.

Key words: truck, aerodynamics, drag coefficient, CFD.

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Grade de simulações.....	48
Quadro 02 – Teste de independência de malha (validação)	81
Quadro 03 – Teste de independência de malha (caminhão base)	83
Quadro 04 – Resultados da simulação do caminhão base com defletor de teto.....	87
Quadro 05 – Resultados da simulação do caminhão base com defletor dianteiro	89
Quadro 06 – Resultados da simulação para caminhão base com extensor traseiro.	91
Quadro 07 – Resultados da simulação para caminhão base com redutor de <i>gap</i>	93
Quadro 08 – Valores de C_d dos acessórios aerodinâmicos e caminhão base	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo da utilização das modalidades de transporte entre países de extensão territorial semelhantes.....	15
Figura 2 - Modelos propostos para análise em túnel de vento.....	18
Figura 3 - Gráfico para a variação de coeficiente de arrasto para o cavalo.....	18
Figura 4 - Coeficiente de arrasto para o baú.....	19
Figura 5 - Análise de Browand para redução do consumo de combustível.....	21
Figura 6 - Análise da influência da distância de acompanhamento entre veículos e a redução do coeficiente de arrasto	21
Figura 7 – Gráficos do ensaio com o caminhão isolado (linha vermelha) e em comboio (linha azul).....	23
Figura 8 - Modelos propostos com diferentes semi-reboques aerodinâmicos para a simulação e análise do coeficiente de arrasto.....	24
Figura 9 - Malha do campo de escoamento para os modelos.....	24
Figura 10 - Linhas de corrente e distribuições de pressão obtidas através da simulação	25
Figura 11 - Exemplo de uso das saias laterais.....	26
Figura 12 - Paralama vazado.....	26
Figura 13 - Redutor de gap entre cavalo e baú.....	27
Figura 14 - Uso de calotas para melhorar o fluxo de ar pela roda.....	27
Figura 15 - Geradores de vortex aplicados à carroceria do caminhão.....	28
Figura 16 - Flaps utilizados na traseira do baú para reduzir o arrasto.....	28
Figura 17 - Exemplo de aplicação dos defletores de teto.....	29
Figura 18 - Ilustração da camada limite em um escoamento sobre uma placa plana.....	34
Figura 19 - Análise da força de arrasto atuando sobre um carro, e os fatores que a influenciam.....	36
Figura 20 - Exemplo de discretização utilizada para determinação de propriedades em torno de uma asa.....	41
Figura 21 - Modelo Geométrico Utilizado.....	43
Figura 22 - 10 caminhões mais vendidos de 2016.....	43
Figura 23 - Definição do domínio e malha.....	45
Figura 24 - Ensaio em túnel de vento, escala 1/32.....	46
Figura 25 - Ensaio do modelo no túnel de vento.....	46
Figura 26 - Modelo simplificado, usado como base na simulação.....	47

Figura 27 - Resultado da simulação no software.....	47
Figura 28 - Fluxograma da metodologia aplicada para desenvolvimento do trabalho.....	49
Figura 29 - 10 caminhões mais vendidos de 2017.....	53
Figura 30 - Fluxograma da metodologia aplicada para desenvolvimento do trabalho.....	54
Figura 31 - Diferença entre reboque e semi-reboque.....	55
Figura 32 - Caminhão base em 3D.....	56
Figura 33 - Caminhão base em 2D e escala 1:32.....	57
Figura 34 - Defletor de teto instalado em um Scania R440.....	58
Figura 35 - Dimensões do defletor de teto (escala 1:32).....	58
Figura 36 - Dimensões do defletor dianteiro (escala 1:32).....	59
Figura 37 - Dimensões do extensor traseiro (escala 1:32).....	60
Figura 38 - Dimensões do redutor de gap (escala 1:32).....	60
Figura 39 - Modelo geométrico em 2 dimensões utilizado para validação do modelo numérico (escala 1:32).....	61
Figura 40 - Domínio para simulação no software.....	63
Figura 41 - Exemplo de malha quadrilateral dominante.....	64
Figura 42 – Refino de malha na região traseira do caminhão.....	64
Figura 43 – Refino de malha no domínio completo.....	65
Figura 44 - Exemplo de refino de malha onde foi dobrado o número de elementos, a figura da esquerda tem menos elementos (malha mais grossa) e a da direita mais elementos (malha mais fina).....	66
Figura 45 - Volume de controle usado para ilustrar o processo de discretização.....	69
Figura 46 - Fronteiras do domínio numérico.....	72
Figura 47 - Especificação do computador utilizado nas simulações numéricas.....	76
Figura 48 - Experimento com o modelo em escala 1/32 em túnel de vento.....	77
Figura 49 – Massa específica e viscosidade do fluido empregado nas simulações de validação.....	79
Figura 50 - Validação - Gráfico de convergência (resíduos).....	80
Figura 51 - Gráfico de convergência de C_d (validação).....	81
Figura 52 - Gráfico de convergência para o caminhão base (resíduos).....	83
Figura 53 - Gráfico de convergência para o caminhão base (C_d).....	83
Figura 54 - Vetores de velocidade do caminhão base (m/s).....	84
Figura 55 - Coeficiente de pressão do caminhão base.....	84

Figura 56 - Gráfico de convergência para caminhão base com defletor de teto (resíduos).....	85
Figura 57 - Gráfico de convergência para caminhão base com defletor de teto (C_d)....	85
Figura 58 - Vetores de velocidade do caminhão base com defletor de teto (m/s).....	86
Figura 59 - Coeficiente de pressão do caminhão base com defletor de teto.....	86
Figura 60 - Gráfico de convergência para caminhão base com defletor dianteiro (resíduos).....	87
Figura 61 - Gráfico de convergência para caminhão base com defletor dianteiro (C_d).....	87
Figura 62 - Vetores de velocidade do caminhão base com defletor dianteiro (m/s)....	88
Figura 63 - Coeficiente de pressão do caminhão base com defletor dianteiro.....	88
Figura 64 - Gráfico de convergência para caminhão base com extensor traseiro.....	89
Figura 65 - Gráfico de convergência para caminhão base com extensor traseiro (C_d).....	89
Figura 66 - Vetores de velocidade do caminhão base com extensor traseiro (m/s)....	91
Figura 67 - Coeficiente de pressão do caminhão base com extensor traseiro.....	91
Figura 68 - Gráfico de convergência para caminhão base com redutor de gap (resíduos).....	92
Figura 69 - Gráfico de convergência para caminhão base com redutor de gap (C_d)....	92
Figura 70 - Vetores de velocidade do caminhão base com redutor de gap (m/s).....	93
Figura 71 - Coeficiente de pressão do caminhão base com redutor de gap.....	93
Figura 72 - Redução percentual do C_D em relação ao caminhão base.....	94
Figura 73 - Redutor de gap Xstream.....	96

LISTA DE SIGLAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
3D	Tridimensional
CFD	Computer Fluid Dynamics
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
LBM	Lattice Boltzmann Method
DES	Detached Eddy Simulation
FENABRAVE	Federação Nacional de Distribuição de Veículos Automotores
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
NBR	Norma Brasileira
ISO	International Organization for Standardization
AET	Autorização Especial de Trânsito
MVF	Método dos Volumes Finitos
2D	Bidimensional
CNT	Confederação Nacional de Trânsito

LISTA DE SÍMBOLOS

m/s	Metros por segundo
C_D	Coeficiente de arrasto
\sqrt{A}	Raiz quadrada da área de secção transversal do caminhão
m	Metros
$\Delta(\text{consumo})$	Consumo de combustível do caminhão em comboio
$\Delta(\text{consumo em isolamento})$	Consumo de combustível do caminhão isolado
$C_{D_{\text{iso}}}$	Coeficiente de arrasto do caminhão em isolamento
$C_{D_{\text{tandem}}}$	Coeficiente de arrasto do caminhão em comboio
η	Coeficiente adimensional de relação de forças resistivas
r_o	Coeficiente de resistência à rolagem
W	Peso do veículo
ρ	Massa específica do ar
V	Velocidade do veículo
A	Área da secção transversal
D	Força de arrasto
U	Velocidade do veículo
RR	Força de resistência à rolagem
AuxP	Potência auxiliar
FC	Consumo de combustível
bsfc	Eficiência de consumo de combustível
Re	Número de Reynolds
U_∞	Velocidade de corrente livre
L	Comprimento característico
ν	Viscosidade cinemática
τ	Tensão de cisalhamento
μ	Viscosidade dinâmica
dV/dy	Distribuição de velocidade ao longo do eixo y
τ_P	Tensão de cisalhamento na parede
U_{ext}	Velocidade do escoamento de corrente livre externo
F_D	Força de arrasto
C_P	Coeficiente de pressão
p	Pressão local
p_∞	Pressão do escoamento externo livre
V_∞	Velocidade do escoamento externo livre
∂	Derivada parcial
u	Componente da velocidade no eixo x
v	Componente da velocidade do eixo y
w	Componente da velocidade no eixo z
g_x	Componente gravitacional no eixo x
g_y	Componente gravitacional no eixo y
g_z	Componente gravitacional no eixo z
$u(x,y,z,t)$	Composição da velocidade instantânea do escoamento
$\bar{u}(x,y,z,t)$	Composição da velocidade média do escoamento
$u'(x,y,z,t)$	Composição da velocidade flutuante do escoamento
k	Energia cinética do escoamento

σ_k	Número de Prandtl para a energia cinética
G_k	Geração de energia cinética turbulenta de velocidade média
G_b	Geração de energia cinética de velocidade flutuante
ε	Taxa de dissipação de turbulência
Y_M	Contribuição da dilatação flutuante para a taxa de dissipação
S_k	Termo fonte definido pelo usuário
C_μ	Coefficiente de relação entre k e ε
FS(%)	Redução percentual do consumo de combustível
ΔC_D	Variação no coeficiente de arrasto
mm	milímetro
m^2	Metro quadrado
kg	Quilograma
C_{Dg}	Coefficiente de arrasto para a malha grosseira
C_{Df}	Coefficiente de arrasto para a malha fina
\vec{v}	Vetor de velocidade
\vec{A}	Vetor área superficial
I	Matriz identidade
τ	Tensor de tensão
Σ	Somatório
J_f	Taxa de fluxo de massa pela superfície f
A_f	Área da superfície f
\emptyset	Escalar para simbolizar uma das componentes da velocidade
p_f	Pressão na superfície f
a_p	Coefficiente linearizado para a célula
a_{nb}	Coefficiente linearizado para células vizinhas
nb	Células vizinhas
ϕ_{up}	Valor do nó seguinte
ip	Ponto de integração
\vec{r}	Vetor do nó a montante até o nó atual
β	Valor mínimo de todos os valores de ponto de integração em torno do nó
N	Função de forma do elemento
n	Nó
$\nabla \emptyset$	Gradiente com relação à célula seguinte
C_d validação	Coefficiente de arrasto do artigo usado para validação
C_d simulação	Coefficiente de arrasto obtido na simulação

SUMÁRIO

1.	Introdução	15
2.	Revisão bibliográfica	17
2.1	Objetivos	29
2.2	Justificativa	29
2.3	Fechamento	30
3.	Fundamentação Teórica	32
3.1	Escoamento	32
3.2	O ar	35
3.3	Coefficiente de Arrasto	35
3.4	Coefficiente de pressão	37
3.5	Navier-Stokes	37
3.6	Turbulência	38
3.7	Análise em CFD	41
4.	METODOLOGIA	42
4.1	Validação e verificação do Modelo	44
4.2	Grade de simulações	48
4.3	Descrição da Metodologia	49
4.4	Cálculo do consumo de combustível	52
4.5	Justificativa da Metodologia	52
5.	Modelagem Geométrica	53
5.1	Caminhão base	53
5.1.1	Caminhão	53
5.1.2	Semi-reboque	55
5.2	Acessórios aerodinâmicos	58
5.2.1	Defletor de teto	58
5.2.2	Defletor dianteiro	59
5.2.3	Extensor traseiro	60
5.2.4	Redutor de <i>gap</i>	61
5.3	Caminhão de validação	61
6.	Modelagem numérica	63
6.1	Definição do Domínio Físico	63
6.2	Discretização do domínio físico (geração da malha)	64
6.2.1	Teste de independência das malhas	66
6.3	Discretização do modelo matemático.	68
6.4	Condições de contorno	73
6.5	Modelo de turbulência	74
6.6	Modelagem do Fluido de escoamento	75
6.7	Critério de convergência	76
6.8	Recurso computacional	77
7.	Validação	78
7.1	Erros associados	79
7.2	Parâmetros da validação	79
7.3	Resultado da validação	80
8.	Resultados e discussão	83
8.1	Caminhão base	83
8.2	Caminhão base com defletor de teto	86

8.3	Caminhão base com defletor dianteiro	88
8.4	Caminhão base com extensor traseiro	90
8.5	Caminhão base com redutor de <i>gap</i>	92
8.6	Comparativo entre acessórios aerodinâmicos	94
8.7	Avaliação da redução do consumo de combustível	97
9.	CONCLUSÃO	99
	Referências	120

1. INTRODUÇÃO

Há décadas a preocupação com o consumo de combustível e a emissão de poluentes de veículos automotores está presente no planejamento e execução de projetos e normas governamentais. Na Europa, por exemplo, continente referência no controle de emissão de poluentes, existem normas bastante restritivas que regulamentam a emissão de poluentes de veículos desde 1993.

No Brasil, um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apontou que em 2013 o setor de transportes consumiu 24,393 mil tep (tonelada equivalente de petróleo) de gasolina e 39,077 mil tep de óleo diesel (EPE, 2016).

Diante da tendência de redução das emissões e, conseqüentemente, o consumo de combustíveis fósseis, são importantes as análises que reduzam o consumo no transporte de passageiros e de cargas.

Na estrutura modal do transporte de cargas do Brasil, através do estudo da EPE (2016), o transporte rodoviário figura como o mais utilizado, em relação aos demais, representando aproximadamente 58% do total da matriz. Quando comparado a outros países de extensão territorial semelhante, os números tomam uma proporção ainda maior (Fig.1), demonstrando a dependência desse tipo de transporte para a nação, que conta com um total de 1,75 milhão de quilômetros de estradas e rodovias por toda a sua extensão territorial (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, 2017).

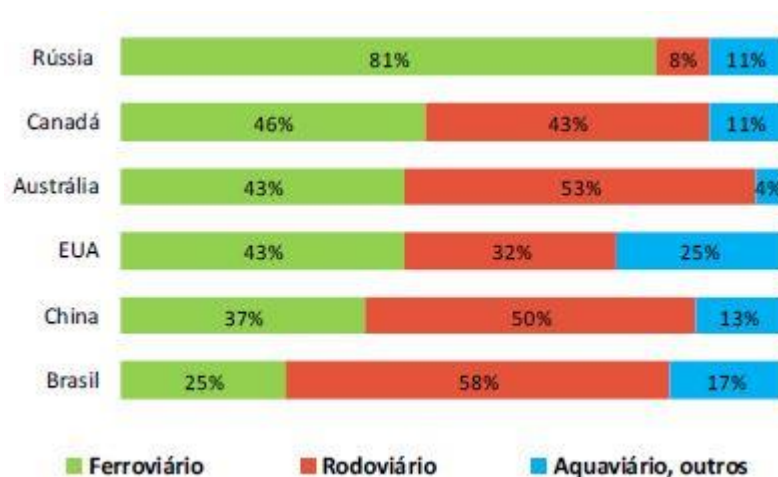


Figura 1 - Comparativo da utilização das modalidades de transporte entre países de extensão territorial semelhantes

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016)

A desvantagem dessa modalidade de transporte é o elevado custo, tanto em combustível quanto em manutenção das vias (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, 2017). Do ponto de vista energético, motivação do presente trabalho, estima-se que aproximadamente um terço de toda a produção energética do país seja utilizada para transporte, e 42% dessa parcela seja para transporte de cargas. O que agrava esses dados é que das matrizes de transporte disponíveis, o rodoviário é o menos eficiente energeticamente (o que reflete na tarifa do frete) e o mais poluente por tonelada transportada (EPE, 2016). Além disso, a infraestrutura dos meios de transporte é pilar fundamental para a competitividade de um país. Quando comparado aos países desenvolvidos, em pesquisa do Banco Mundial, constatou-se que o Brasil gasta quase o dobro desses países com custos logísticos (10-12% dos países desenvolvidos, ante a 20% do Brasil) (EPE, 2016).

Um dos fatores que mais impactam os custos operacionais é o consumo de combustível, fonte de energia para movimentação do veículo. A energia térmica obtida no processo de combustão é utilizada para realização de trabalho mecânico pelo motor do caminhão, que funciona segundo o ciclo Diesel. Parte desta energia será perdida para o ambiente em forma de calor, e a outra parte será convertido em trabalho mecânico, sendo consumido de diversas formas como: atritos internos do motor, movimentação do veículo, resistência ao rolamento, bombeamento, atrito de partes móveis, resistência aerodinâmica, entre outros.

Diante da relevância socioeconômica do transporte rodoviário brasileiro, aprimoramentos no setor que diminuam os custos operacionais e emissões de poluentes podem ter resultados significativos quando aplicados à cadeia de transportes. O presente trabalho busca melhorar a aerodinâmica, reduzindo o trabalho para vencer a resistência do ar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil a eficiência energética voltada a meios de transporte ainda é um assunto pouco explorado nos estudos acadêmicos. Em outros países com frota expressivamente rodoviária, como os Estados Unidos da América (EUA) e China, diversos estudos têm sido feitos, sendo que alguns deles apresentam dados relevantes, que serão usados como base para o estudo desenvolvido no presente trabalho.

Hammache e Michaelian (2001) elaboraram um importante estudo feito para avaliação do coeficiente de arrasto em veículos de transporte. Tendo o apoio do governo federal dos EUA, tinham o interesse de diminuir o consumo de combustível, reduzindo a dependência de petróleo de outros países (principalmente os Emirados Árabes). Tiveram também o apoio institucional da Universidade da Carolina do Sul, que ao fornecer o túnel de vento para desenvolvimento do projeto, buscava contribuir para a sociedade os ganhos obtidos com esse estudo (BROWAND et al 2001).

Importante destacar que dados levantados pelo departamento de energia dos EUA para o “*roadmap 21st century truck*” apontam que mais da metade do combustível consumido pelos caminhões em seus trajetos nas estradas é para superar o arrasto aerodinâmico (DEPARTMENT OF ENERGY, 2006), reforçando a necessidade de trabalhos para melhoria neste parâmetro.

Hammache e Michaelian (2001) desenvolveram um protótipo em escala de um caminhão (Figura 2), para posterior experimentação em um túnel de vento. Respeitando os princípios de similaridade, variaram alguns fatores, como a distância entre o cavalo e o baú, e o ângulo de guinada (ângulo do vento em relação à direção de deslocamento do objeto), para simular ventos cruzados, comuns nas estradas e a diferença de altura entre cavalo e baú. Os resultados obtidos foram, que o coeficiente de arrasto do baú triplica, ao aumentar de 0 a $1.55\sqrt{A}$ (na qual “A” é a área de secção transversal do caminhão) a distância entre o baú e o cavalo. Identificaram também que uma diferença de 15% de altura entre os dois elementos, gera um aumento de 9% no arrasto.

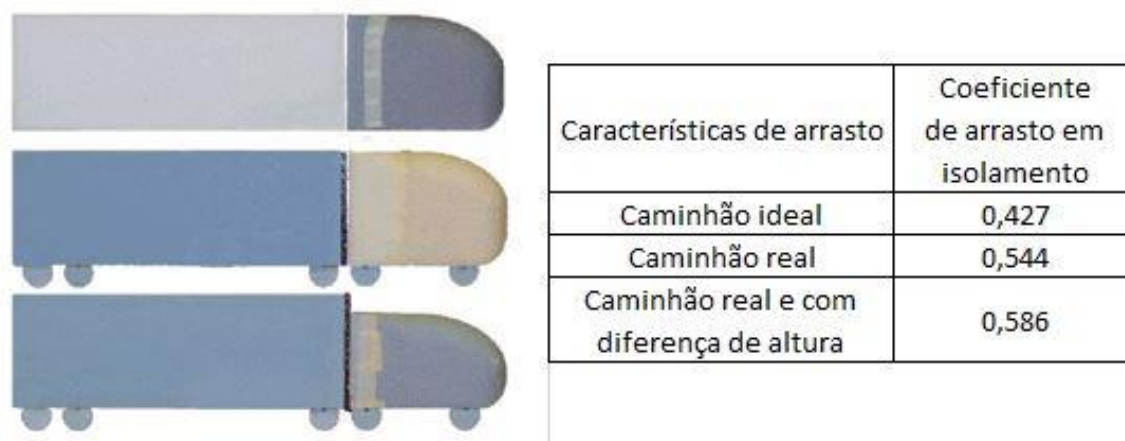


Figura 2 - Modelos propostos para análise em túnel de vento

Fonte: BROWAND et al (2001)

Na Fig. 3, tem-se o resultado do coeficiente de arrasto (com fator de correção), onde se nota que, para pequenos ângulos de guinada, o coeficiente de arrasto do cavalo não é influenciado pela distância entre este e o baú. Para distâncias entre $0.25\sqrt{A}$ e $0.5\sqrt{A}$, ocorre um pico de aumento do coeficiente, e, após essa faixa, o aumento da distância resulta em uma queda do coeficiente, e uma das explicações para isso foi a existência de um forte escoamento cruzado que atua na região entre o cavalo e o baú.

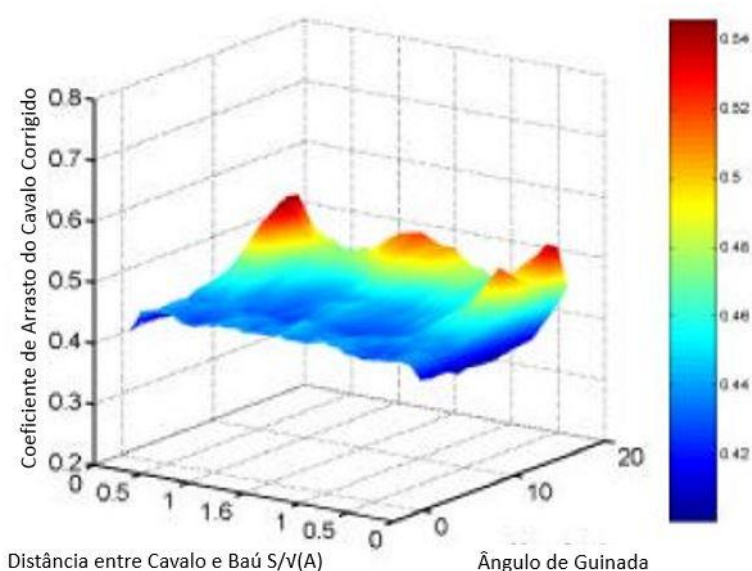


Figura 3 - Gráfico para a variação de coeficiente de arrasto para o cavalo

Fonte: BROWAND et al (2001)

Já na Figura 4, pode-se verificar que quanto maior o espaçamento entre baú e cavalo, maior é o coeficiente de arrasto para o baú, fortemente relacionado à função de “escudo” que o cavalo exerce sobre ele, e o arrasto também aumenta com o aumento do ângulo de guinada.

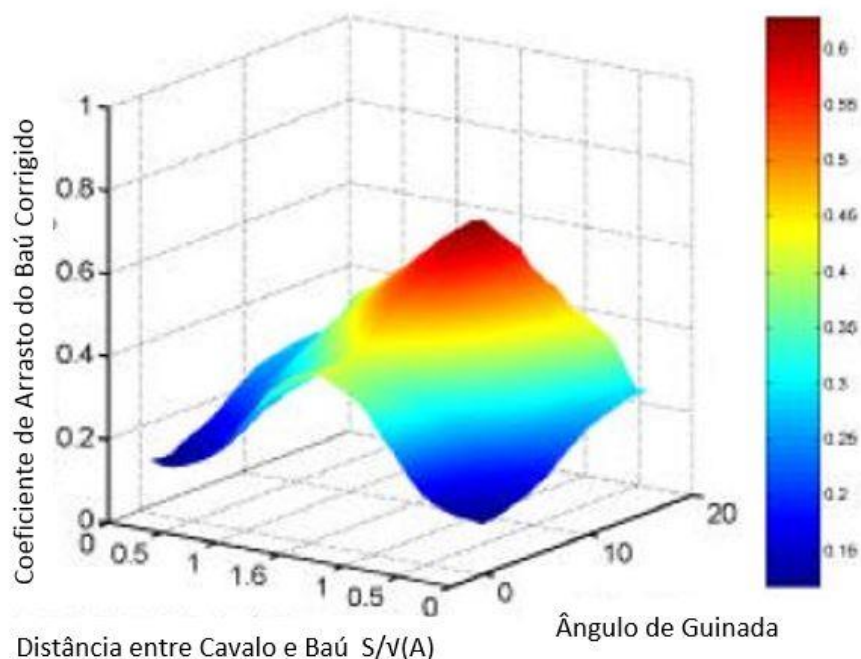


Figura 4 - Coeficiente de arrasto para o baú

Fonte: BROWAND et al (2001)

Outro resultado importante desse estudo foi a análise da redução de arrasto para caminhões em comboio. O objetivo foi levantar dados para a proposta de projeto da Daimler-Chrysler chamado *Electronic Tractor Hitch*, no qual os caminhões seriam guiados por sistemas infravermelhos, e apenas o motorista do primeiro caminhão precisaria dirigir, enquanto os demais descansariam. Os benefícios seriam no quesito qualidade de vida, ecológico e econômico. As estimativas foram de 10 a 15% de economia de combustível, para um gasto de US\$35.000,00 por ano para compra e manutenção desse sistema, por caminhão, e, em apenas 18 meses, o sistema se pagaria, tornando-se extremamente viável. Além disso, pesquisas mostravam que 2/3 dos caminhoneiros adquiririam esse sistema de guia por infravermelho (BROWAND et al 2001).

Os resultados obtidos para análise em comboio, mostram que entre 0 e 0,5m de distância entre os caminhões (impraticável no mundo real), os ganhos vão até 50% de redução no arrasto. Vale ressaltar que a redução de arrasto vale também para o caminhão que vai na frente, não limitando os ganhos apenas ao de trás.

Para calcular os ganhos com consumo de combustível pela redução do arrasto, utiliza-se a equação (1), na qual $\Delta(\text{consumo})$ representa o consumo de combustível do caminhão em comboio, $\Delta(\text{consumo em isolamento})$ representa o consumo do caminhão sem outro na frente, e C_{Diso} e C_{Dtandem} são respectivamente o coeficiente de arrasto do caminhão em isolamento e comboiando outro caminhão a frente (BOHN; SOVRAN, 1983).

$$\frac{\Delta(\text{consumo})}{\Delta(\text{consumo em isolamento})} = \eta \frac{(C_{\text{Diso}} - C_{\text{Dtandem}})}{C_{\text{Diso}}} \quad (1)$$

onde η vem da equação (2), na qual r_0 é o coeficiente de resistência à rolagem (dados obtidos de literatura ou fornecido pelo fabricante), W o peso do veículo em [N], ρ a massa específica do ar em [kg/m³], V a velocidade do veículo [m/s], A a área de secção transversal em [m²], e C_D o coeficiente de arrasto em isolamento, obtido da literatura, simulação ou testes.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{2r_0W}{\rho V^2 A C_D}} \quad (2)$$

O valor usual de h é na casa de 0,6 a 0,8. Considerando um cenário ideal, sem aceleração e frenagem, uma redução de 25% no coeficiente de arrasto gera uma economia entre 15 e 20% de consumo de combustível (BROWAND et al 2001).

Browand (2015) apresentou trabalho no Workshop em transportes avançados, onde ele afirma que a potência necessária para superar o arrasto é a maior demanda em altas velocidades nas estradas, e que 90% do arrasto é devido ao arrasto de

pressão. Browand analisou através de uma das variações da equação de Sovran (equações 3 e 4, nas quais D representa a força de arrasto, RR a força de resistência à rolagem, U a velocidade de deslocamento, AuxP a potência auxiliar, FC o consumo de combustível e bsfc a eficiência no consumo de combustível, inerente ao motor) que existem três maneiras principais de reduzir o consumo de combustível: diminuir a seção transversal do veículo, diminuir a velocidade nas rodovias, e alterar a forma do veículo para deixá-lo aerodinamicamente mais “amigável” (BROWAND, 2015), conforme Figura 5.

$$\text{Potência} = DU + RRU + \text{AuxP}$$

(3)

$$\text{FC} = (\text{bsfc}) \text{Potência}$$

(4)

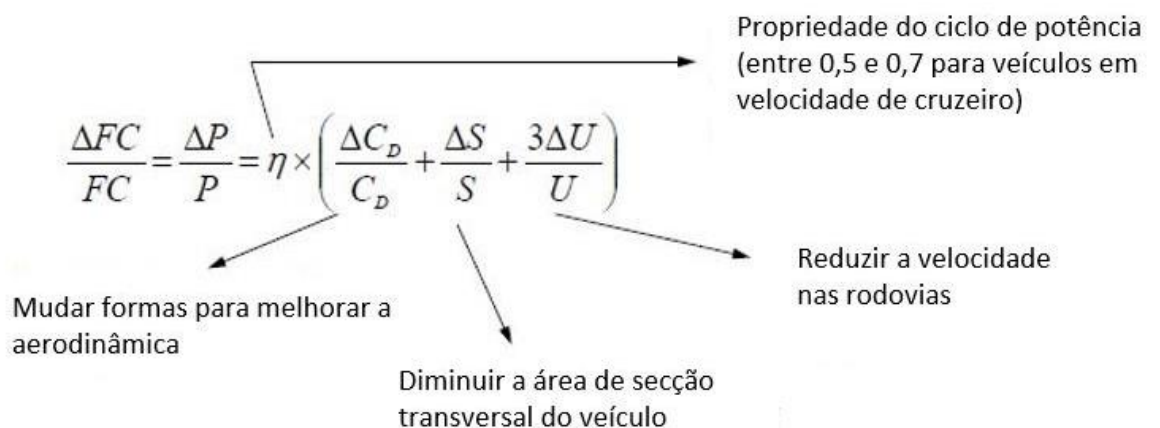


Figura 5 - Análise de Browand para redução do consumo de combustível

Fonte: BROWAND (2015)

Browand chegou aos mesmos resultados que Hammache e Michaelian, ao reduzir a distância de “acompanhamento” entre os veículos, ambos se beneficiam da redução de arrasto, conforme Figura 6.

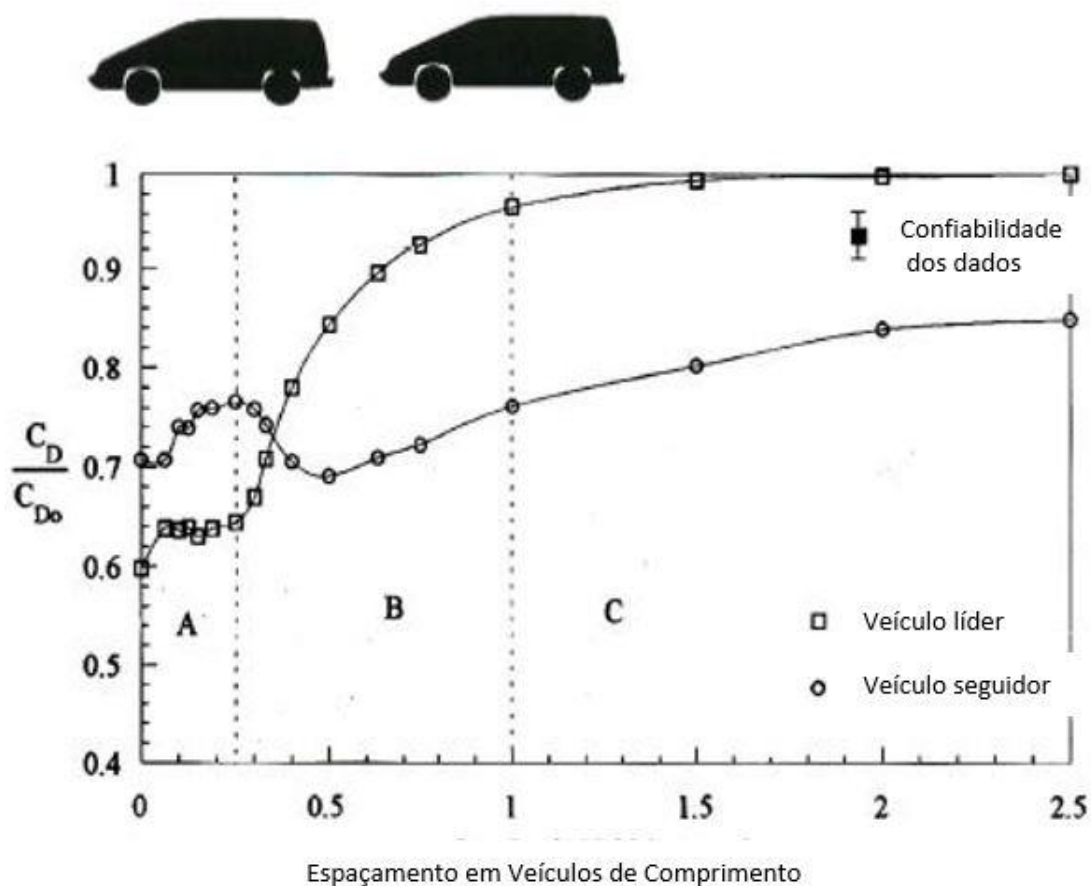


Figura 6 - Análise da influência da distância de acompanhamento entre veículos e a redução do coeficiente de arrasto

Fonte: BROWAND (2015)

O resultado, ao transformar em consumo de combustível, foi de uma redução de 7% em média, para um espaçamento de 80% do comprimento de um veículo, ao final do experimento (Figura 7).

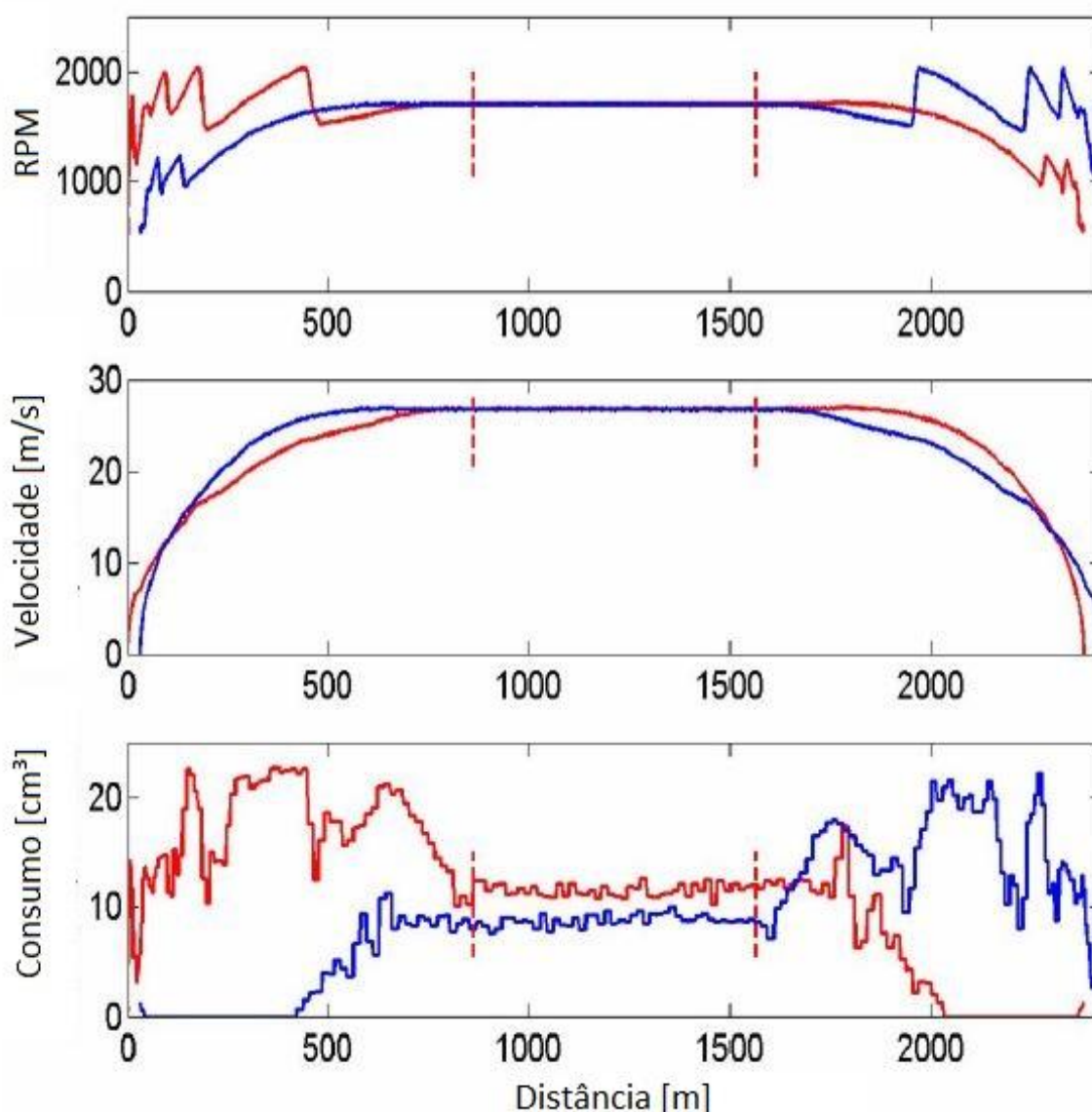


Figura 7 – Gráficos do ensaio com o caminhão isolado (linha vermelha) e em comboio (linha azul)

Fonte: BROWAND (2015)

Os dois artigos de Browand et al (2001) e Browand (2015) tomados como referência utilizaram experimentos em túnel de vento e reais, respectivamente. Todavia, para este trabalho, será utilizado o método numérico de simulação computacional, portanto, foi necessário um embasamento técnico também nessa área para o cálculo do coeficiente de arrasto. Hu et al (2012) abordaram o problema numericamente, a fim de otimizar o design de caminhões em seu país, melhorando sua eficiência. Utilizando um modelo simplificado de um caminhão, omitindo pequenos detalhes tais como janelas, maçanetas e retrovisores, além de suavizar a superfície e

o fundo do modelo em 3D. Propôs-se seis modelos, alternando apêndices aerodinâmicos para a simulação (Figura 8), e definiu as condições de contorno (HU et al 2012).

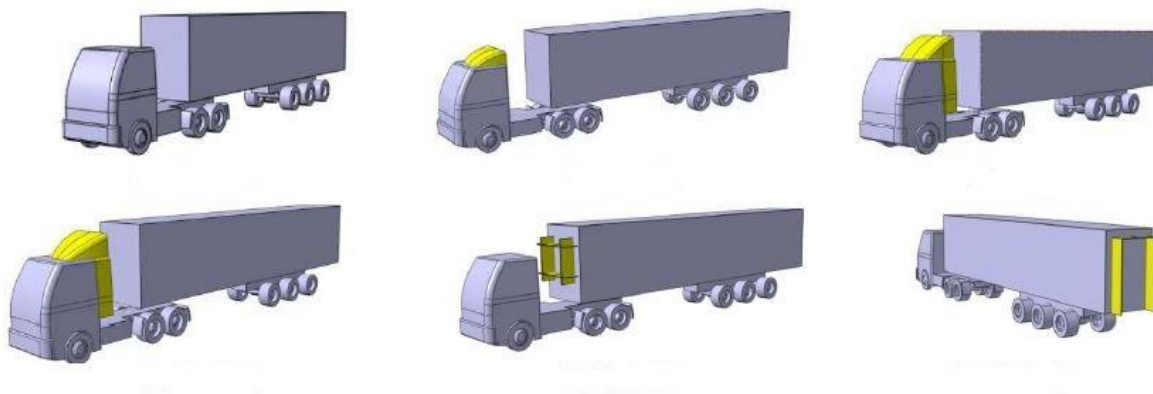


Figura 8 - Modelos propostos com diferentes semi-reboques aerodinâmicos para a simulação e análise do coeficiente de arrasto

Fonte: HU et al (2012)

Considerando o domínio computacional como uma vez e meia o comprimento total do veículo, para a região à frente, três vezes na parte de trás, três vezes a altura acima do veículo e três vezes a largura nas laterais como o domínio computacional, utilizou uma malha de tetraedros para obter um melhor refinamento. Estende-se três camadas dos prismas a partir da superfície do corpo, e após refinamento, a malha ficou como na Fig. 9. Para turbulência utilizou-se o modelo $k-\epsilon$ *realizable* (*realizable* $k-\epsilon$).

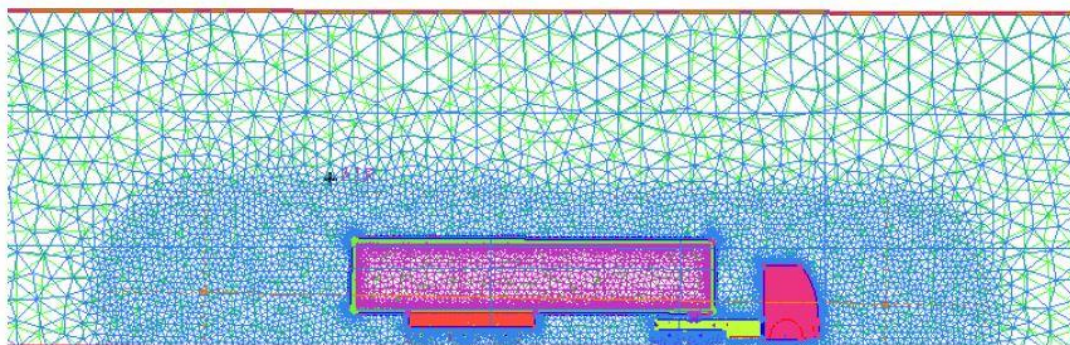


Figura 9 - Malha do campo de escoamento para os modelos

Fonte: HU et al (2012)

Os resultados obtidos da simulação de Hu et al (2012) podem ser vistos na Figura 10. Observa-se a redução da área vermelha (turbulência) entre o modelo 1 para os modelos 2, 3 e 4, nos quais alterna-se diferentes geometrias do defletor (semi-reboque com maior percentual de redução de arrasto), reduzindo a região de turbulência, reduz-se o coeficiente de arrasto. No caso, respectivamente em 18,71%, 44,31% e 46,93% (HU et al 2012).

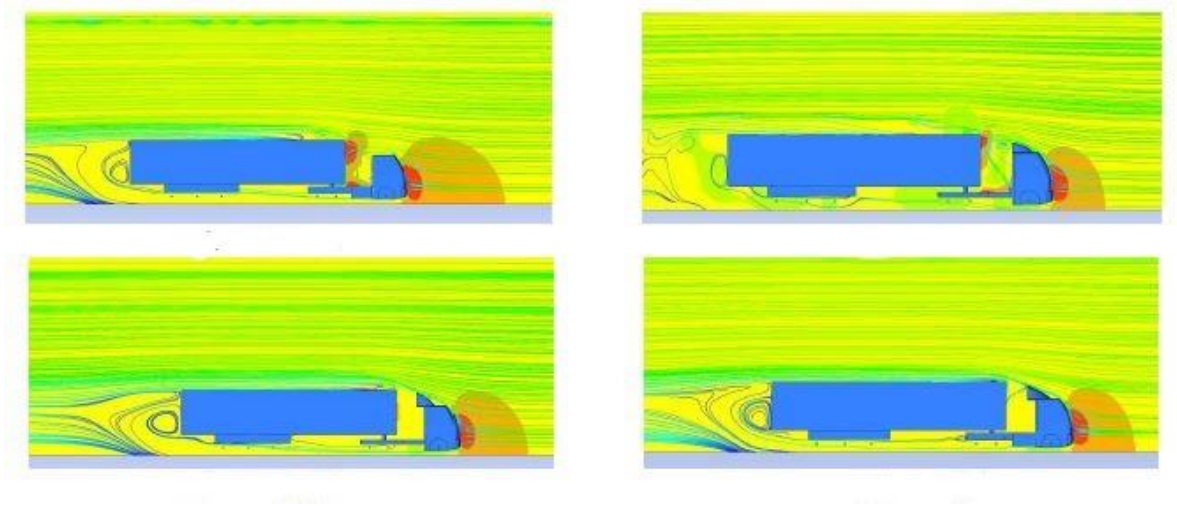


Figura 10 – Linhas de corrente e distribuições de pressão obtidas através da simulação

Fonte: HU et al (2012)

Outro artigo tomado como base para a formulação do presente projeto foi escrito por Mugnaini (2015), onde ele utilizou a simulação numérica para avaliação dos apêndices aerodinâmicos. Para a simulação, Mugnaini definiu um domínio semelhante ao de Wang, porém o modelo utilizado foi o RNG $k-\epsilon$, por ser considerado o mais apropriado para vórtices e escoamentos transitórios, escoamentos complexos, com redemoinhos moderados, por exemplo em modelos com separação de camada limite, formação de vortex na parte de trás dos veículos e stall (redução abrupta do coeficiente de sustentação) em difusores (MUGNAINI, 2015).

Mugnaini (2015) em seu trabalho focou apenas em pequenos semi-reboques, tais como geradores de vórtex e flaps, tanto para o baú quanto para o cavalo. Após calcular a redução do coeficiente de arrasto para cada semi-reboque, fez também o cálculo de redução do consumo de combustível em galões por ano.

Após avaliar estudos já desenvolvidos, relacionados a simulações numéricas, pesquisou-se o desenvolvimento de dispositivos (apêndices) comerciais usados para redução do arrasto aerodinâmico, e os que mais se destacaram foram os que seguem (TRUCKING EFFICIENCY, 2017):

- Saias laterais (Fig. 11): são os mais comuns de se encontrar em uso, e tem como função prevenir que o ar entre na parte inferior do baú, gerando turbulência.



Figura 11 - Exemplo de uso das saias laterais

Fonte: TRUCKING EFFICIENCY (2017)

- Para-lamas vazados (Fig. 12): o objetivo deste apêndice é permitir a passagem do ar através do para-lama, mas ainda assim garantir sua funcionalidade de repelir o spray de água e demais objetos.



Figura 12 - Paralama vazado

Fonte: TRUCKING EFFICIENCY (2017)

- Redutores de gap entre baú e cavalo (Fig. 13): conforme foi constatado nos artigos de Browand, Hammache e Michaelian (2001), um dos grandes geradores de arrasto nos caminhões é a distância entre o baú e o cavalo. O objetivo deste apêndice é eliminar essa vazio existente entre a cabine e o início do baú.



Figura 13 - Redutor de gap entre cavalo e baú

Fonte: TRUCKING EFFICIENCY (2017)

- Calotas (Fig. 14): garante um escoamento de ar contínuo ao passar pela lateral das rodas.



Figura 14 - Uso de calotas para melhorar o fluxo de ar pela roda

Fonte: TRUCKING EFFICIENCY (2017)

- Geradores de vórtex (Fig. 15): um dos dispositivos mais recentes, controla o escoamento de ar, reduzindo a turbulência do escoamento no sentido paralelo ao de movimentação do veículo.

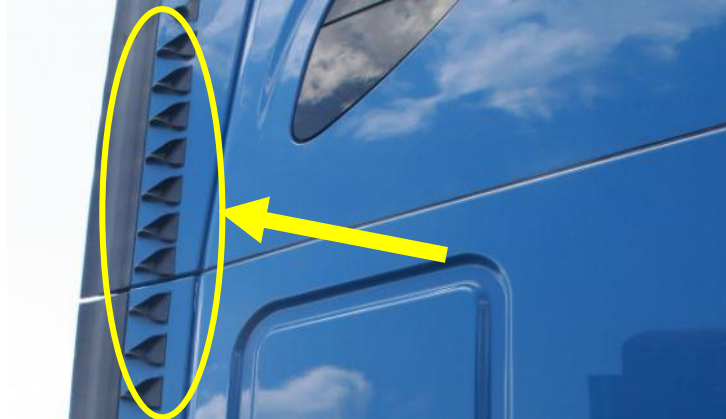


Figura 15 - Geradores de vortex aplicados à carroceria do caminhão
Fonte: TRUCKING EFFICIENCY (2017)

- Flaps traseiros de baú (extensores) (Fig. 16): modifica o escoamento de ar, tornando a superfície traseira menos propensa à turbulência, e consequentemente, arrasto.

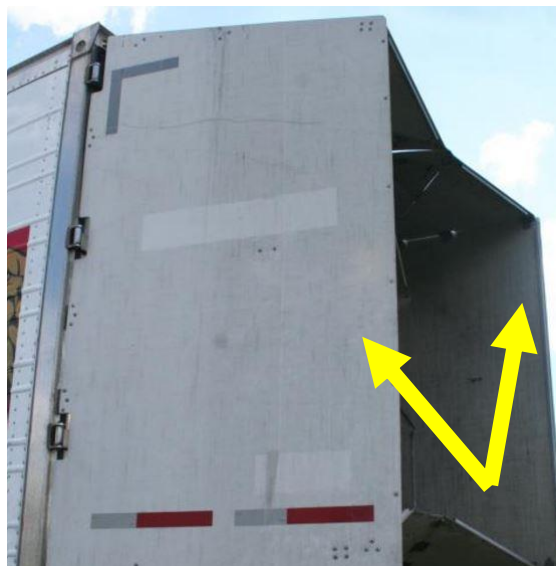


Figura 16 - Flaps utilizados na traseira do baú para reduzir o arrasto
Fonte: TRUCKING EFFICIENCY (2017)

- Defletores de teto e lateral (Fig. 17): quase tão comuns quanto as saias, os defletores são essenciais para reduzir o arrasto quando existe

diferença de altura entre o cavalo e o baú (AIRPLEX: CAR, UTE, TRUCK ACCESSORIES, 2014).



Figura 17 - Exemplo de aplicação dos defletores de teto

Fonte: TRUCKING EFFICIENCY (2017)

2.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar, numericamente, quatro acessórios aerodinâmicos existentes no mercado, quanto a seu efeito na redução de consumo de combustível.

Tal objetivo será obtido através da determinação numérica dos coeficientes de arrasto, com o uso de software de CFD comercial, o *Ansys Fluent*® 16 versão *Student*.

A avaliação dos apêndices será feita usando um perfil de caminhão e baú bastante utilizado no Brasil, tornando-o aplicável para uma vasta gama de veículos em qualquer região do país.

2.2 Justificativa

Com um volume elevado de demanda pela modalidade de transporte de carga rodoviário no Brasil, é importante para o desenvolvimento e crescimento do país, trabalhos que busquem a melhoria da eficiência da sua matriz de transporte predominante.

Alguns estudos mostram que simples modificações na carenagem do veículo têm impactos relevantes no consumo de combustível, como por exemplo, na Copa do Mundo de Futebol de 2014, quando muitas pessoas colocaram bandeiras acopladas ao carro, um estudo constatou que o consumo de combustível teve um aumento de 3% (JORNAL DO CARRO, 2014).

Nas rodovias, à velocidade de cruzeiro, o percentual de energia gasto apenas para vencer a força de resistência do ar, para caminhões comuns, é de aproximadamente 50% (DEPARTMENT OF ENERGY, 2006), verificando o quão relevante é a melhoria aerodinâmica para reduzir o arrasto e garantir um menor consumo de combustível.

O Brasil é um país extremamente dependente do sistema rodoviário de transportes. Por ser essencial para a competitividade do país, almeja-se aumentar a eficiência dessa modalidade, analisando quais os apêndices já existentes que trazem maior ganho na redução de arrasto. Ao reduzir o arrasto, reduz-se o consumo de combustível da matriz, e com isso, ganha-se competitividade por redução do custo com o frete, auxiliando no desenvolvimento do país (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016).

O que motivou os integrantes deste estudo é a relevância que esta contribuição pode gerar no cenário competitivo econômico do país, o quão pouco explorado é este assunto, principalmente no Brasil, e o interesse dos autores em seguir profissionalmente no ramo automotivo. Além claro, das possibilidades que um trabalho como este proporciona, dando visibilidade através do pioneirismo, até o conhecimento dos autores, no âmbito nacional e o impacto do estudo na sociedade.

2.3 Fechamento

Para embasar o presente trabalho, foi fundamental a contextualização do tema para destacar sua relevância no cenário atual da necessidade de aumento da eficiência energética, e o impacto no Brasil, um país altamente dependente de sua malha rodoviária e transporte por caminhão.

Diversos estudos já abordaram essa questão, tanto em âmbito de ensaios em rodovias com caminhões sujeitos às condições reais de operação (BROWAND, 2015),

mas também com simulações numéricas em software (HU et al 2012). O presente trabalho focará em simulação 2D, utilizando o software Ansys Fluent (versão Student), na qual será analisado dois semi-reboques para a cabine, e dois para o baú, semelhantes ao que foi utilizado por Hu et al (2012), para ter embasamento comparativo de resultados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por objetivo delinear os conceitos mais importantes, necessários para o entendimento da sequência do trabalho.

3.1 Escoamento

O escoamento é o movimento de um fluido, um material que sujeito à uma tensão mínima, se deforma indefinidamente, tendendo a escoar (FOX et al 2009).

A relação entre tensão e taxa de deformação classifica os fluidos em newtonianos e não newtonianos. Para os fluidos Newtonianos, existe uma linearidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação resultante desse esforço, enquanto para o não Newtoniano, essa relação não é linear (FOX et al 2009).

O fluido ao escoar, pode estar limitado por alguma superfície sólida ou não. No segundo caso chama-se escoamento externo. Tal escoamento se dá pela imersão de um corpo em um fluido não limitado por superfícies sólidas (FOX et al 2009).

Ao escoar o fluido pode também sofrer variação de sua massa específica. Com base nisto, pode-se dividir os escoamentos em compressível ou incompressível. Escoamentos incompressíveis são aqueles cuja variação da massa específica pode ser considerada desprezível. Para o caso do ar, se a velocidade do escoamento for inferior à 30% (ou até 100m/s) da velocidade do som, a variação da massa específica é inferior à 5%, podendo ser desconsiderada, sendo o ar, nestes casos, tratado como incompressível (FOX et al 2009).

Os escoamentos dos fluidos newtonianos podem ser classificados em laminares ou turbulentos, no qual o escoamento laminar é caracterizado por ser suave e estável, no caso do escoamento ao longo da placa plana, é a região da camada limite próxima ao bordo de ataque. Se essa placa for grande o suficiente, o escoamento irá evoluir e tornar-se turbulento. O escoamento turbulento é caracterizado por ser mais intenso, com movimento caótico e cruzamentos de fluxos. Entre essas duas regiões existe a camada de transição. O ponto crítico no qual o escoamento torna-se turbulento é quando o número de Reynolds ultrapassa o valor de 500.000. Por terem características extremamente diferentes, os cálculos de suas propriedades

(espessura da camada limite, e coeficiente de tensão) também variam (CROWE et al 2009).

Uma das propriedades mais importantes de se analisar em escoamentos externos é o coeficiente de arrasto, que será abordado nos próximos itens.

Como o objeto em análise é um caminhão em movimento, imerso no ar a velocidades relativamente baixas, considera-se tal escoamento como escoamento externo e incompressível, de fluido newtoniano (FOX et al 2009).

O número de Reynolds é um adimensional que relaciona a velocidade da corrente livre (U_{∞}), o comprimento característico (L) e a viscosidade cinemática (ν), conforme a equação 5. O valor do número de Reynolds é importante para definir o efeito da viscosidade (para Reynolds baixo) e forças cinéticas (para Reynolds altos) (CROWE; ELGER; WILLIAMS; ROBERSON, 2009).

$$Re = \frac{U_{\infty} L}{\nu}$$

(5)

Ilustra-se o seguinte cenário: uma placa plana, fixa e estacionária; um fluido (qualquer), iniciando seu movimento em uma região fora da placa até atingí-la, resultando em uma interação entre a parede da placa e o fluido em movimento, sem deslizamento (para uma partícula em contato com a placa estacionária, a partícula também está estacionária). Para fluidos Newtonianos, toda a tensão é diretamente proporcional à variação da velocidade, conforme a equação 6, aonde τ é a tensão de cisalhamento, μ é viscosidade dinâmica, e dV/dy é a distribuição da velocidade (CROWE et al 2009).

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy}$$

(6)

O principal significado físico dessa expressão é que todas as partículas exercem uma força em sua respectiva partícula acima no plano, por consequência dessa tensão. Conforme aproxima-se da placa, a condição de não deslizamento cria uma camada no interior do fluido que vai sendo “freada” pela placa, e essa região é conhecida como camada limite, que é a região onde a velocidade do escoamento varia entre a de fluxo livre até zero na superfície da placa, como na Figura 18. A espessura da camada limite é definida como a distância que vai da superfície da placa, até o ponto no escoamento em que a velocidade do fluido é 99% da de fluxo livre (CROWE; ELGER; WILLIAMS; ROBERSON, 2009).

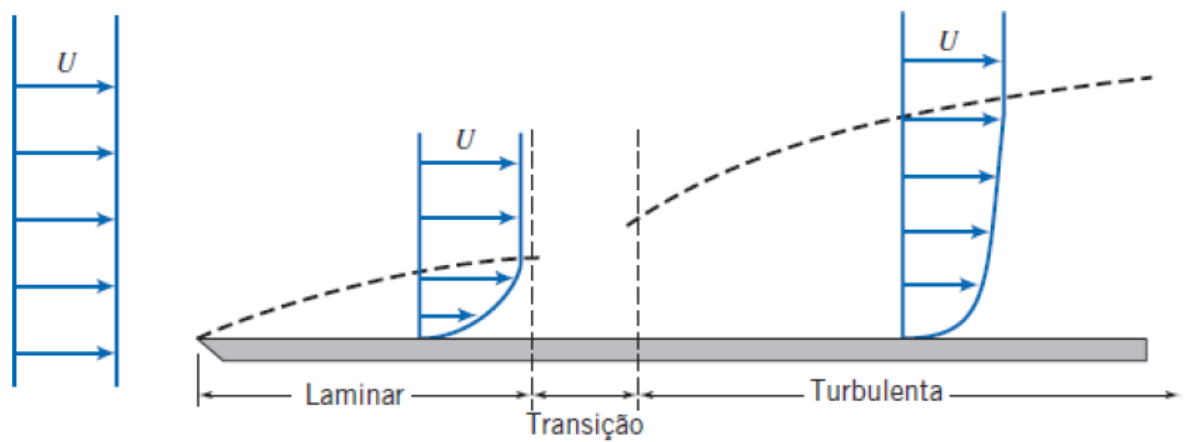


Figura 18 - Ilustração da camada limite em um escoamento sobre uma placa plana

Fonte: (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2009)

Um caso importante do escoamento externo é o de escoamento externo em cilindros, onde nota-se que conforme número de Reynolds aumenta, o escoamento muda de natureza, existindo um ponto no qual as partículas do escoamento em análise se desprendem da superfície. Essa separação ocorre quando o fluido segue um trajeto de contorno do corpo em questão, e subitamente ocorre o desvio (principalmente por questões geométricas do corpo) e o surgimento de uma região de turbulência, na parte posterior do corpo em análise (CROWE; ELGER; WILLIAMS; ROBERSON, 2009).

3.2 O ar

O ar atmosférico é composto majoritariamente por Nitrogênio (78,08%), Oxigênio (20,95%) e Argônio (0,93%). O ar, por conter massa, exerce uma pressão sobre todos os corpos, e tem sua massa específica fortemente influenciada pela gravidade do planeta (regiões mais próximas do nível do mar apresentam maior massa específica do ar). Outra propriedade fundamental para o estudo é a sua resistência. Quanto maior for a velocidade de deslocamento de um corpo, maior é a resistência do ar contra esse movimento (TODA MATÉRIA, 2017).

3.3 Coeficiente de Arrasto

Arrasto é a força exercida por um fluido sob um objeto imerso em tal fluido, quando há um movimento relativo entre tal objeto e o fluido. O arrasto é composto de duas partes o arrasto de fricção, relacionado ao atrito, e o arrasto de pressão, relacionado à forma. O arrasto devido à diferença de pressão, portanto, é o que mais impacta nas análises presentes neste estudo, visto que estará sendo analisado coeficientes de pressão gerados por alterações na geometria do caminhão (CROWE et al 2009).

Para a quantificação do arrasto, utiliza-se um adimensional, que é o coeficiente de arrasto, dado pela equação 7, na qual τ_p é a tensão de cisalhamento na parede, ρ é massa específica do fluido, e U_{ext} é a velocidade do escoamento de corrente livre (CROWE et al 2009). Da eq.(7) vê-se que o coeficiente de arrasto é uma relação entre as tensões viscosas e a pressão dinâmica.

$$C_D = \frac{\tau_p}{\rho \frac{U_{ext}^2}{2}}$$

(7)

O arrasto é uma força que surge pela viscosidade do ar, e se opõe ao movimento de objetos. Por ser inevitável, deve ser minimizado a fim de diminuir o desperdício de energia utilizado para vencê-lo.

O arrasto pode ser definido em dois tipos: de forma e de fricção. O de forma é resultante do desbalanceamento de pressão entre a parte da frente e de trás dos objetos imersos no fluido escoando. Já o arrasto de fricção é resultado do contato entre o fluido e a rugosidade do objeto em análise (CROWE et al 2009).

O arrasto, então, pode ser tratado como o atrito do ar contra corpos em movimento (Figura 19), e que aumenta proporcionalmente com a velocidade com que esse corpo se move em relação a ele (eq. 8), no qual C_D é o coeficiente de arrasto do corpo, ρ a massa específica do fluido, A a área de secção transversal do corpo e V a velocidade de deslocamento do corpo. O coeficiente de arrasto é fundamental para determinar a facilidade com que esse corpo irá se mover através do ar, e reduzi-lo é o objetivo para atingir uma maior eficiência (F1 TECHNICAL, 2006).

$$F_D = \frac{C_D \rho A V^2}{2}$$

(8)

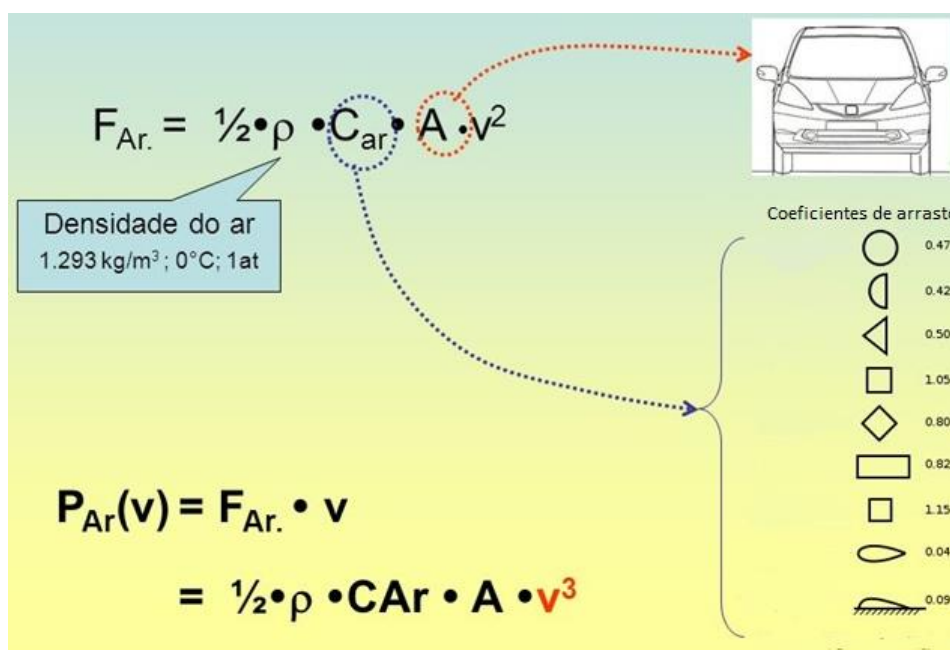


Figura 19 - Análise da força de arrasto atuando sobre um carro, e os fatores que a influenciam

Fonte: INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (2011)

3.4 Coeficiente de pressão

O coeficiente de pressão, calculado pela eq.(9), caracteriza o padrão do fluxo de ar em volta de um corpo, representando as alterações de pressão estática induzidas por esse fluxo, aonde p é a pressão local, p_∞ e V_∞ são pressão e velocidade do escoamento externo livre. A geometria, dimensão e forma do corpo em volta do qual existe esse fluxo, além de sua rugosidade, influenciam diretamente na distribuição desse coeficiente de pressão (CUNHA, 2010).

$$C_p = \frac{(p - p_\infty)}{\rho_\infty \frac{V_\infty^2}{2}}$$

(9)

3.5 Navier-Stokes

São equações que representam o princípio da conservação da quantidade de movimento linear, utilizadas para descrever o comportamento do fluido, analisando de forma tridimensional (eqs. (10), (11), (12) e (13)). Juntamente com a equação de Bernoulli, é uma das relações mais utilizadas em mecânica dos fluidos. A única restrição para aplicação desse conjunto de equações é que o fluido seja newtoniano e a hipótese do *continuum* seja respeitada. Apesar de ampla utilização, a obtenção da solução analítica é viável somente para poucos casos (FOX et al 2009).

A eq.(10) apresenta a equação da conservação da massa, e as eqs. (11), (12) e (13) representam as equações da conservação da quantidade de movimento. Todas considerando o fluido incompressível. No caso turbulento, existe a decomposição da velocidade, que constitui essas equações, o que será mais explorado no capítulo de turbulência.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

(10)

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

(11)

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

(12)

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

(13)

3.6 Turbulência

Diz-se que um escoamento é turbulento quando as partículas se misturam de forma não linear, em redemoinhos, devido à variações aleatórias do campo de velocidades tridimensional. O maior empecilho para estudo de tal tipo de escoamento é seu movimento caótico e a falta de previsibilidade, dificultando análises estatísticas, por exemplo. O adimensional utilizado para determinar se um regime é turbulento ou não, é o número de Reynolds, já definido no item 2.1 (FOX et al 2009).

Para análise de escoamentos turbulentos, utiliza-se a decomposição de Reynolds. Basicamente, conforme eq. (14), consiste no cálculo da velocidade instantânea, $u(x,y,z,t)$, a partir da somatória de seu valor médio $\overline{u(x,y,z,t)}$ com seu valor flutuante $u'(x,y,z,t)$. Estas decomposições, ao serem substituídas nas equações de Navier Stokes geram novas equações com novas incógnitas, chamadas tensões de Reynolds (fluxo de momento gerado pela flutuação turbulenta), gerando mais incógnitas do que equações. Para poder resolver este problema, criaram os chamados modelos de turbulência (FOX et al 2009).

$$u(x,y,z,t)=\overline{u(x,y,z,t)}+u'(x,y,z,t) \quad (14)$$

Existem diversos modelos de turbulência disponíveis atualmente. Porém, apesar da extensa pesquisa e desenvolvimento que já foram realizados nesta área, ainda não existe um modelo universal que possa ser aplicado a todas as áreas de estudo. Diante deste cenário, é necessário avaliar os estudos existentes em busca daquele que melhor se adeque às condições de escoamento que ocorrem num caminhão pesado e que não necessite alta capacidade de processamento.

Dentre os modelos de turbulência existentes para aplicações aerodinâmicas encontram-se:

1. Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos via Equações de Médias de Reynolds (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes)
2. Simulação de Grandes Escalar (LES – Large Eddy Simulation)
3. Simulação Numérica Direta (DNS – Direct Numerical Simulation)
4. Método Lattice Boltzmann (LBM – Lattice Boltzmann method)
5. Simulação dos Vórtices Desprendidos (DES – Detached Eddy Simulation)

A forma mais comum de se simular turbulência é através do cálculo das médias das propriedades do escoamento, conhecido como equações RANS (LENNGREN; HÅKANSSON, 2010). Além disso, segundo o estudo realizado pela DAIMLER (MADUGUND; GARRISON, 2009), o modelo RANS, que tem como premissa a modelagem e resolução das equações 15 e 16, é adequado para análises qualitativas do desempenho aerodinâmico de variações de forma e é capaz de gerar a tendência de arrasto de uma determinada modificação de projeto. Este mesmo estudo também apontou que o método DES é mais acurado durante a validação de método CFD (mais detalhado no próximo capítulo) e componente aerodinâmicos, porém, é computacionalmente caro de operar.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

(15)

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right)$$

(16)

O método RANS não exige alta capacidade de processamento como o DES ou LES, e é o método mais utilizado para simular turbulência em aplicações industriais (LANFRIT, 2005).

Porém, dentro do método RANS ainda existem diversos modelos de turbulência, dentre eles: o k-ε e o k-ω. Para o este trabalho, escolheu-se o modelo k-ε, visto que ele foca na energia cinética (daí o termo k) e na dissipação turbulenta do escoamento na forma ε. Esse modelo se baseia na solução das equações de energia cinética e de dissipação turbulenta ε, razão na qual a flutuação de velocidades se dissipam. Os seus coeficientes são derivados empiricamente e a viscosidade é determinada a partir de uma única escala, então a difusão turbulenta calculada é a única cuja ocorre nessa escala específica, sendo que na verdade todas as escalas de movimento contribuem para a difusão turbulenta. Outro aspecto é o de que a viscosidade molecular é desprezável. É um método robusto para estudos parametrizáveis com Reynolds elevados, escoamentos completamente turbulentos, fácil de implementar e não requer um computador mais potente para realizar a simulação. A equação modelada pelo software para o k-ε *realizable* são mostradas é mostrada pela eq. (17). Para a modelagem da viscosidade turbulenta, é resolvida a eq. (18) (ANSYS INC, 2013).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

(17)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

(18)

3.7 Análise em CFD

A análise de problemas de mecânica dos fluidos usando a dinâmica dos fluidos computacional (CFD), tem por objetivo resolver numericamente problemas complexos, que não têm solução analítica. Usando para isto técnicas numéricas e computacionais. Com vastas aplicações, principalmente no desenvolvimento de projetos na indústria, essa análise é utilizada para o estudo de campos de escoamento, desde simples ventiladores aos carros de Fórmula 1. Por ter um custo inferior aos experimentos reais, é muito vantajosa, porém deve-se ser criterioso na parametrização do problema a fim de obter resultados significativos e verossímeis (FOX et al 2009).

A principal estratégia da análise em CFD é discretizar o domínio, ou seja, gerar as malhas. O problema pode ser tratado como uni, bi ou tridimensional, conforme a complexidade do escoamento. Após a determinação dessa malha com N elementos, como na Fig. 20, obtém-se um sistema de equações para determinação das propriedades nesses N elementos (FOX et al 2009).

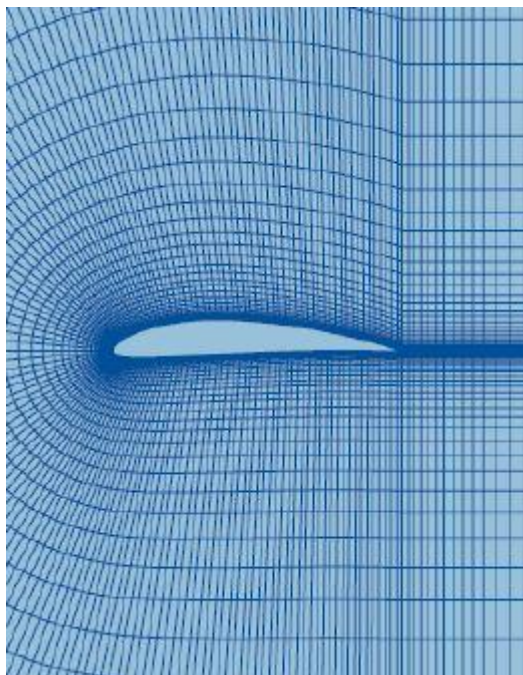


Figura 20 - Exemplo de discretização utilizada para determinação de propriedades em torno de uma asa

Fonte: FOX et al (2009)

4. METODOLOGIA

O presente trabalho foca nas modificações que poderão ser utilizadas no caminhão, ou no semi-reboque, a fim de reduzir o arrasto aerodinâmico. Tais alterações serão comparadas com o projeto original (sem acessório algum) para poder mensurar a redução no arrasto aerodinâmico através da análise comparativa.

As alterações aerodinâmicas podem ser divididas em alterações feitas no caminhão e no semi-reboque. Através de uma pesquisa que visou encontrar os apêndices que já existem, chegou-se à uma lista de acessórios que serão avaliados. Esta lista é composta por dois acessórios aerodinâmicos para o caminhão e mais dois para o semi-reboque. O critério para a seleção levou em conta a facilidade de instalação do acessório e o fato de já terem sido testados em outros estudos, para fins de validação e comparação. A lista de acessórios que serão testados é a seguinte:

Acessórios instalados no caminhão:

- Defletor de teto;
- Defletor dianteiro.

Acessórios instalados no semi-reboque:

- Redutor de gap;
- Extensor traseiro.

Os acessórios são avaliados um a um isoladamente, a fim de determinar a real contribuição na redução de arrasto proporcionada por cada acessório avaliado.

O enfoque aqui dado visa auxiliar o desenvolvimento tecnológico do transporte rodoviário de cargas brasileiro. O ideal seria avaliar a instalação destes acessórios em modelos de caminhões e semi-reboques com vendas representativas no mercado brasileiro. Como isto demandaria uma quantidade de tempo de simulação muito grande, será analisado o modelo geométrico simplificado de caminhão pesado com frente reta e motor sob a cabine e semi-reboque do tipo baú. O modelo geométrico simplificado em CAD (Fig. 21) se torna necessário em virtude do tempo e custo de análise em CFD, que seriam muito maiores caso fosse utilizado uma geometria complexa.

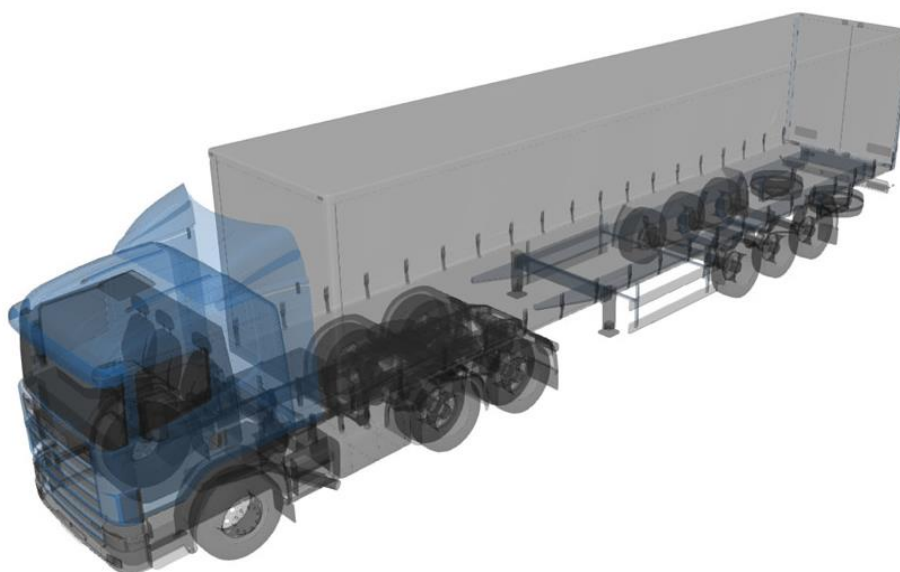


Figura 21– Modelo Geométrico Utilizado

Fonte: 3dcadbrowser.com

O tipo caminhão pesado com frente reta e motor sob a cabine representou 100% dos 10 caminhões pesados mais vendidos em 2016, mostrado na Fig. 22 (Fenabreve, 2017). As dimensões do semi-reboque analisado são as máximas permitidas pelo CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito).

Pesado						
	Modelo	2016 Nov	2016 Dez		2016 Acumulado	Part.
1º	SCANIA/R440	163	135	▼	1.905	12,07%
2º	VOLVO/FH 460	131	198	▲	1.618	10,25%
3º	VOLVO/FH 540	95	124	▲	1.479	9,37%
4º	M.BENZ/AXOR 3344	44	48	▲	716	4,54%
5º	SCANIA/P310	47	51	▲	624	3,95%
6º	DAF/XF105	35	71	▲	558	3,54%
7º	SCANIA/G 440	37	10	▼	481	3,05%
8º	VOLVO/VM 330	32	30	▼	467	2,96%
9º	MAN/TGX 29.440	3	5	▲	463	2,93%
10º	SCANIA/P 360	32	65	▲	459	2,91%
Total		1.179	1.367	▲	15.778	100%

Figura 22 - 10 caminhões mais vendidos de 2016

Fonte: Fenabreve (2017)

Os acessórios serão modelados de acordo com os que já foram testados nos trabalhos de Lenngren e Hakansson (2010), Hsu e Davis (2009) e Hu, Li, Liao e Wang (2012), e que já estão no mercado. Além disso, terão sua geometria também simplificada pelos mesmos motivos citados no parágrafo anterior.

Os testes serão executados simulando a velocidade de 25m/s pois, acima de 22,22m/s o arrasto aerodinâmico é o maior responsável pelo consumo de combustível do caminhão (LENNGREN; HÅKANSSON, 2010). Além disso, 25m/s é o limite de velocidade máximo permitido para caminhões em rodovias brasileiras de pista simples e dupla (Código de Trânsito Brasileiro Art. 61, 2017).

4.1 Validação e verificação do Modelo

A base do trabalho são as informações obtidas nas simulações com software comercial de CFD. Portanto, é necessário garantir que as condições simuladas e, conseqüentemente, os resultados obtidos, se aproximem o máximo possível da realidade, e principalmente, que sejam confiáveis.

Para a validação do método de simulação em CFD do caminhão, embasou-se em três artigos principais. No primeiro deles, Reddy e Govardhana (2014) avaliaram o arrasto da chamada “forma” de Ahmed. Sua metodologia de simulação CFD, no que diz respeito à definição da malha e setup (Figura 23), foi utilizada para embasamento das simulações aplicadas no presente estudo (REDDY; GOVARDHANA, 2014).

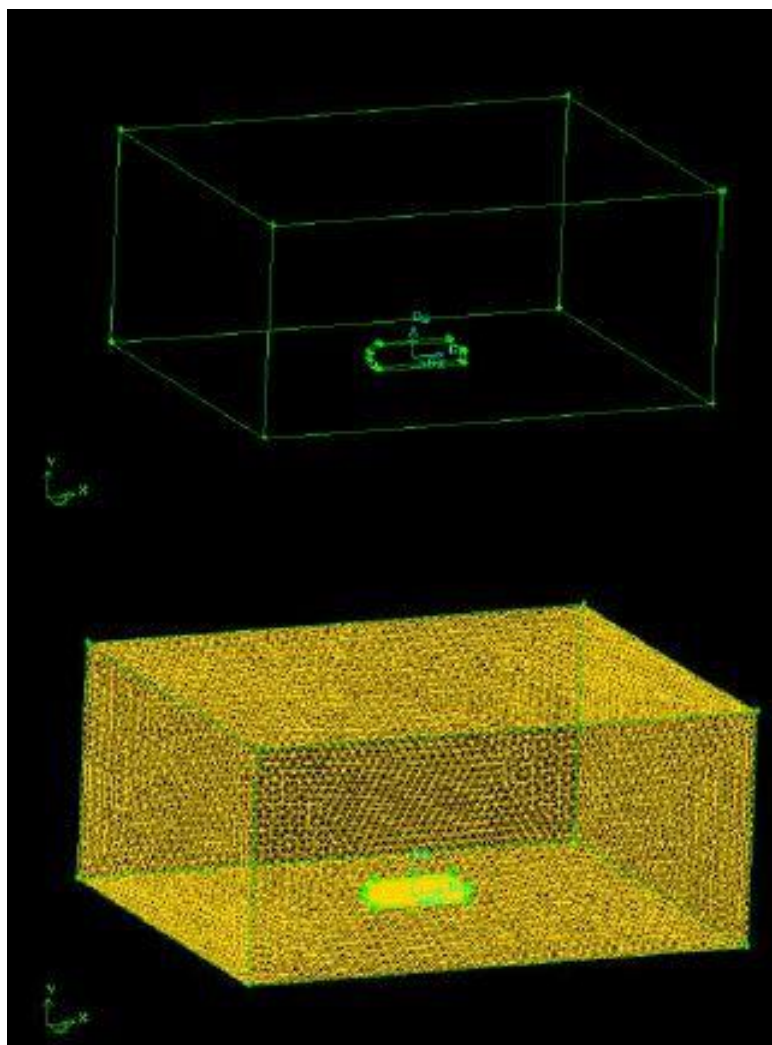


Figura 23 - Definição do domínio e malha

Fonte: REDDY; GOVARDHANA (2014)

O próximo passo para validação é a comparação de resultados experimentais, em túnel de vento (Fig. 24), com o resultado obtidos na simulação. Para isso, foi utilizado o artigo de Bayindirli, Akansu e Salman (2016), no qual utilizaram um caminhão em escala 1/32 e variado a faixa do número de Reynolds entre 117.000 e

844.000, determinando experimentalmente o coeficiente de pressão e de arrasto (BAYINDIRLI et al 2016).



Figura 24 - Ensaio em túnel de vento, escala 1/32

Fonte: BAYINDIRLI et al (2016)

Por último, foi utilizado como referência o trabalho de Ali e Mahmood (2013), no qual é correlacionado testes de túnel de vento (Fig. 25) com a simulação em 2D de um caminhão (Fig. 26 e 27), aspecto fundamental para validar a simulação, correlacionando os perfis de pressão, velocidade, linhas de corrente e vetores de velocidade (ALI; MAHMOOD, 2013).

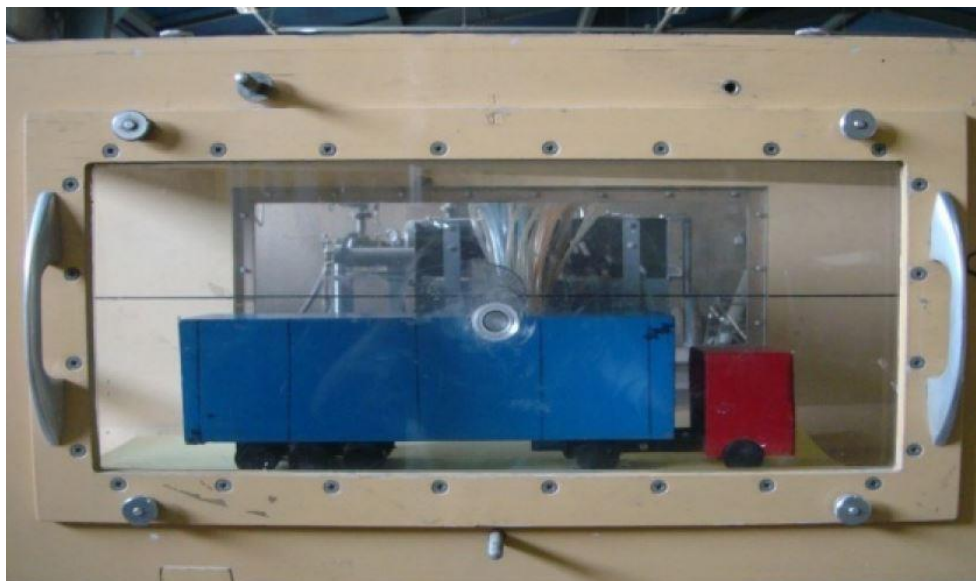


Figura 25 - Ensaio do modelo no túnel de vento

Fonte: ALI; MAHMOOD (2013)

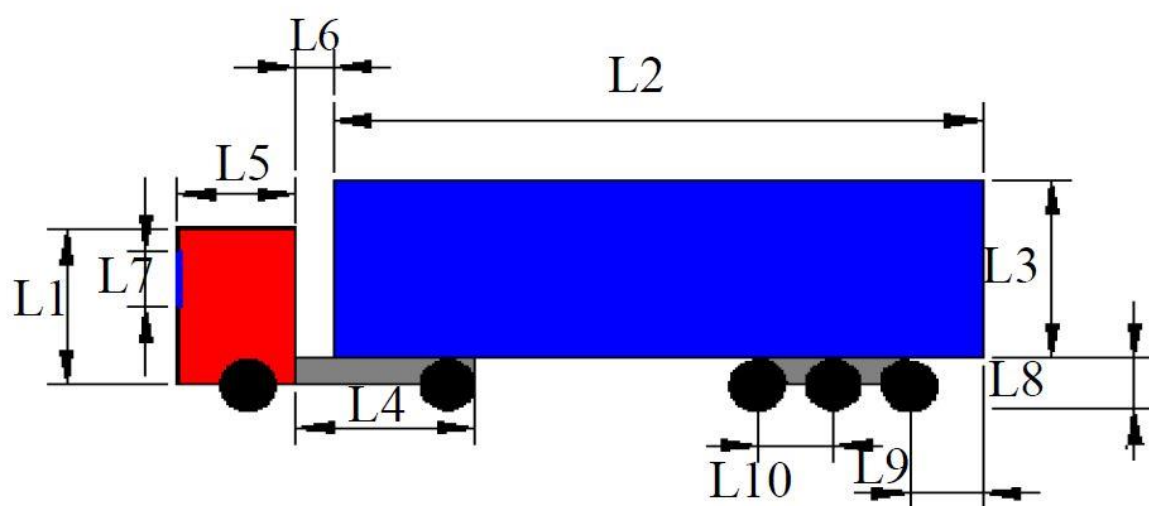


Figura 26 - Modelo simplificado, usado como base na simulação

Fonte: ALI; MAHMOOD (2013)

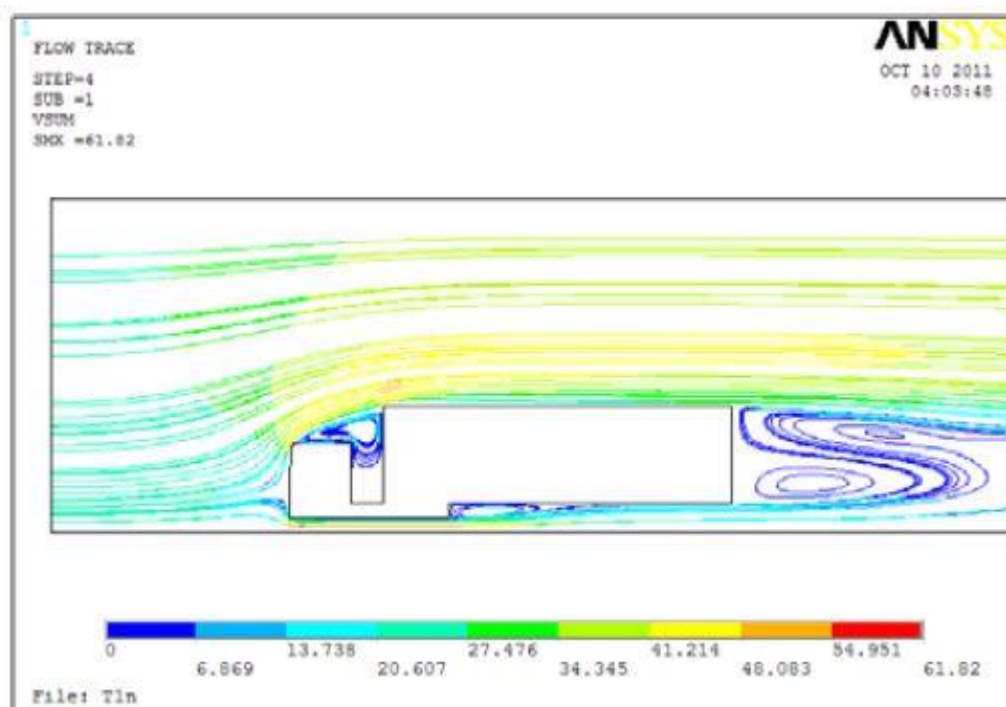


Figura 27 - Resultado da simulação no software

Fonte: ALI; MAHMOOD (2013)

Com base nos três passos citados acima, o modelo será considerado validado para uma variação máxima de até 10% no coeficiente de arrasto, ao comparar os dados da solução numérica com os dados dos artigos utilizados como base.

4.2 Grade de simulações

A sequência de simulações realizadas está discriminada no Quadro 01. Alguns termos utilizados como: Teste de independência das malhas, malha e elementos serão explicados no capítulo 06.

Simulação 1 - Validação do modelo numérico	Teste de ind. de malha 1.1 – Obtenção do C_D para malha de 26457 elementos, usando dados do trabalho (BAYINDIRLI; AKANSU; SALMAN, 2016)
Simulação 2 - Validação do modelo numérico	Teste de ind. malha 1.2 – Obtenção do C_D para malha de 51160 elementos, usando dados do trabalho (BAYINDIRLI; AKANSU; SALMAN, 2016)
Simulação 3 - Validação do modelo numérico	Teste de ind. malha 1.3 – Obtenção do C_D para malha de 101415 elementos, usando dados do trabalho (BAYINDIRLI; AKANSU; SALMAN, 2016)

Simulação 4 - Validação do modelo numérico	Teste de ind. malha 1.4 – Obtenção do C_D para malha de 202595 elementos, usando dados do trabalho (BAYINDIRLI; AKANSU; SALMAN, 2016)
Simulação 5 - Avaliação do modelo geométrico (caminhão base)	Teste de ind. malha 2.1 - Obtenção do C_D para malha de 26052 elementos, usando o caminhão-base e o método numérico validado.
Simulação 6 - Avaliação do modelo geométrico (caminhão base)	Teste de ind. malha 2.2 - Obtenção do C_D para malha de 49931 elementos, usando o caminhão-base e o método numérico validado.
Simulação 7 - Avaliação do modelo geométrico (caminhão base)	Teste de ind. malha 2.3 - Obtenção do C_D para malha de 99729 elementos, usando o caminhão-base e o método numérico validado.
Simulação 8 - Avaliação do defletor de teto	Obtenção do C_D do caminhão base com defletor de teto, para malha de 101502 elementos, usando o caminhão-base e o método numérico validado.
Simulação 9 - Avaliação do defletor dianteiro	Obtenção do C_D do caminhão base com defletor dianteiro, para malha de 101044 elementos, usando o caminhão-base e o método numérico validado.
Simulação 10 - Avaliação do extensor traseiro	Obtenção do C_D do caminhão base com extensor traseiro, para malha de 101551 elementos, usando o caminhão-base e o método numérico validado.
Simulação 11 - Avaliação do redutor de gap	Obtenção do C_D do caminhão base com redutor de gap, para malha de 98997 elementos, usando o caminhão-base e o método numérico validado.

Quadro 01 – Grade de simulações

Fonte: Autoria própria

4.3 Descrição da Metodologia

As simulações e análises citadas até agora serão conduzidas mediante simulações via software CFD (*Fluent Ansys® 16 versão Student*). Serão sempre executadas com o mesmo modelo de referência e mesmo procedimento de testes afim de gerar resultados que possam ser analisados comparativamente. Desta forma, será possível mensurar a alteração percentual que determinado acessório provocou no coeficiente de arrasto global.

Numa situação real, o caminhão não está sujeito a apenas ventos frontais, há também ventos laterais. Como a execução do teste de cada acessório de interesse em diferentes ângulos tomaria muito tempo, cada teste será realizado apenas com o ângulo de guinada de 0° (SKRUCANY; SARKAN; GNAP, 2016), (LENNGREN; HÅKANSSON, 2010).

A metodologia aplicada para o desenvolvimento da proposta deste trabalho é pautada no seguinte fluxograma composto por 8 ações principais, como na Figura 28:

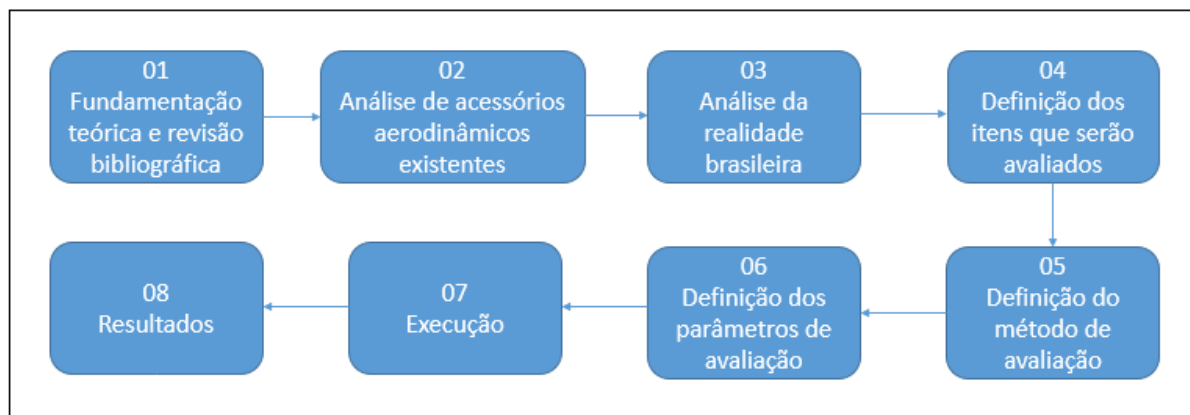


Figura 28 - Fluxograma da metodologia aplicada para desenvolvimento do trabalho

Fonte: Autoria própria

1. Revisão bibliográfica: Realização de estudo extenso da literatura pertinente à área acadêmica na qual se situa este projeto (Dinâmica de fluidos e termodinâmica), através da consulta a livros consagrados, artigos e monografias que abordam análise de escoamento de ar em corpos sólidos.
2. Análise de acessórios aerodinâmicos existentes: A fim de elucidar o que já existe e quais são as alternativas para redução do arrasto aerodinâmico em caminhões, é necessário pesquisar, reunir, analisar e comparar os acessórios aerodinâmicos que já foram desenvolvidos. Esta é a base para o objetivo principal do trabalho que é encontrar quais acessórios são mais eficientes na redução deste tipo de arrasto.
3. Análise da realidade brasileira: Consulta a estudos realizados no âmbito do transporte rodoviário brasileiro, análises mercadológicas, leis e regulamentações que regem o transporte de cargas e tráfego de caminhões em território nacional. Etapa necessária para descartar acessórios que não se encaixam na legislação brasileira e ter um panorama do cenário atual no que diz respeito a quais tipos de caminhões e semi-reboques são os mais utilizados.

4. Definição dos itens que serão avaliados: A partir da bagagem adquirida nos itens anteriores, há a definição de quais acessórios aerodinâmicos serão avaliados, e também as características do caminhão e do semi-reboque no qual estes acessórios serão instalados.
5. Definição do método de avaliação: Com o modelo que será avaliado e suas variações definidas no item 4 e, levando-se em consideração as limitações a serem enfrentadas, definiu-se o melhor método de trabalho como sendo a simulação por software CFD.
6. Definição dos parâmetros de avaliação: O software de simulação CFD permite a definição de diversas condições de contorno e de teste. Com o conhecimento adquirido no item 1, é necessário definir as condições de testes que gerarão num resultado confiável e possível de ser validado com a realidade. Além disso, é importante considerar as condições de rodagem reais de um caminhão, como por exemplo a interferência de ventos laterais.
7. Execução: Execução das simulações propostas no item 4, com os parâmetros definidos no item 6. Os testes devem ser realizados sempre com os mesmos parâmetros afim de possibilitar a análise comparativa dos resultados e assim alcançar o objetivo principal do trabalho.
8. Resultados: Com os resultados obtidos, é feita a análise comparativa para determinar quais são os acessórios mais eficientes na redução do arrasto aerodinâmico.

Serão realizadas 5 simulações:

1. Caminhão e semi-reboque sem nenhum acessório aerodinâmico;
2. Caminhão com defletor de teto integrado e semi-reboque sem acessório;
3. Caminhão com defletor frontal e semi-reboque sem acessório;
4. Caminhão sem acessório e semi-reboque com redutor de gap;
5. Caminhão sem acessório e semi-reboque com extensor traseiro.

4.4 Cálculo do consumo de combustível

Após obter o coeficiente de arrasto sem e com os semi-reboques, esses serão aplicados na equação 19, obtida na dissertação de mestrado de Hakansson e Lenngren (2010), na qual é relacionado diretamente a redução do coeficiente de arrasto (ΔC_D) e a redução do consumo de combustível (FS):

$$FS (\%) = \frac{\Delta C_D 16}{30} \quad (19)$$

4.5 Justificativa da Metodologia

Após embasamento adquirido com os demais artigos, concluiu-se que existem inúmeros métodos para calcular o coeficiente aerodinâmico de caminhões, mas todos eles recaem em quatro categorias básicas:

- Modelagem computacional – Análise CFD
- Teste em túnel de vento
- Teste de rodagem em pista de teste
- Teste de rodagem em rodovias

A análise aqui tratada será desenvolvida a partir de modelagem computacional. Esta abordagem já é consagrada no meio da análise de escoamento de fluidos. E, apesar de haver erros associados ao modelo matemático turbulento adotado, os ensaios em software CFD se aproximam dos ensaios realizados em túnel de vento conforme estudo realizado por Carregari (2006). Porém, os resultados obtidos no CFD devem ser validados pela comparação com ensaios reais afim de garantir que eles estão provendo resultados precisos e representativos (PATTEN, 2012).

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência (pela redução do arrasto) dos acessórios aerodinâmicos em relação ao caminhão sem acessório algum

instalado, apenas a simulação em software CFD fornecerá os resultados com a precisão necessária. Este tipo de abordagem foi utilizado com sucesso em diversos estudos que utilizaram apenas o software CFD para melhorar a eficiência aerodinâmica de veículos Cinar e Arslan (2010) e Malmberg (2015).

Além disso, Hakansson e Lenngren e Mugnaini analisaram especificamente acessórios aerodinâmicos em caminhões pesados utilizando CFD e, mesmo utilizando abordagens e modelos diferentes, chegaram a resultados confiáveis e satisfatórios.

Outros fatores determinantes para a escolha do CFD foram as limitações a serem enfrentadas. Tais limitações consistem, primeiramente, em não haver túnel de vento disponível para executar testes com modelos físicos em escala reduzida. Também há a dificuldade em projetar, fabricar e testar, em testes de rodagem, acessórios aerodinâmicos em caminhões reais. E por último, caso fossem executados testes de rodagem, eles teriam que ser conduzidos em larga escala, pois, os caminhões teriam que percorrer uma distância significativa para ser possível realizar uma comparação estatística confiável dos resultados, e também seria necessário um nível aceitável de repetibilidade para que a aferição das melhorias aerodinâmicas fosse confiável.

5. MODELAGEM GEOMÉTRICA

5.1 Caminhão base

5.1.1 Caminhão

Para a definição da geometria do caminhão base que será avaliado, buscou-se, através do site da Fenabrave (Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores), o caminhão do tipo pesado mais vendido no ano de 2017, conforme Fig. 29.

Pesado

	Modelo	2017 Nov	2017 Dez		2017 Acumulado	Part.
1°	SCANIA/R440	376	461	▲	3.033	16,05%
2°	VOLVO/FH 540	264	258	▼	2.008	10,62%
3°	VOLVO/FH 460	211	175	▼	1.956	10,35%
4°	DAF/XF105	144	85	▼	880	4,66%
5°	M.BENZ/AXOR 3344	17	15	▼	859	4,54%
6°	M.BENZ/ACTROS 2651	94	109	▲	719	3,80%
7°	SCANIA/P310	80	77	▼	687	3,63%
8°	SCANIA/R480	70	96	▲	564	2,98%
9°	SCANIA/G 440	35	14	▼	515	2,72%
10°	VOLVO/FH 500	60	48	▼	505	2,67%
	Total	2.123	2.234	▲	18.902	100%

Figura 29 - 10 caminhões mais vendidos de 2017

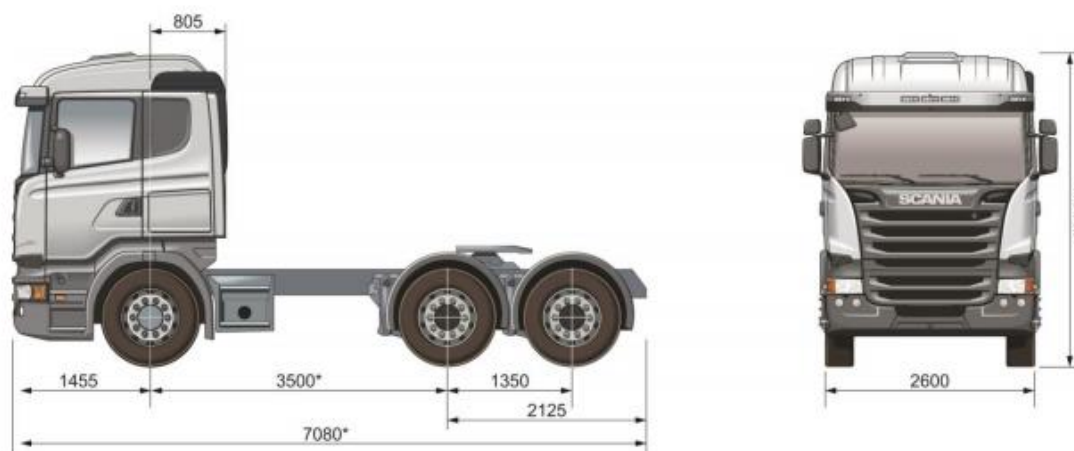
Fonte: Fenabrave (2018)

Diante dos dados apresentados, o caminhão do tipo pesado mais representativo para o mercado brasileiro é o Scania R440. Porém, este modelo possui inúmeras variações de chassi e configuração de rodas que não estão discriminadas no relatório da Fenabrave.

Dentre as opções oferecidas pela Scania para o mercado brasileiro, optou-se pelo modelo R440, de chassi LA6x4, e configuração de rodas RB662+R660.

Suas principais dimensões estão disponíveis no catálogo da Scania, que pode ser acessado pelo site da própria fabricante, conforme Fig. 30.

R 440 LA6x4 RB662+R660



***Pode variar em função entre-eixo **Pode variar dependendo da altura do pneu e altura do chassi*

Figura 30 - Caminhão Scania R440 LA6x4 RB662+R660

Fonte: SCANIA, (2018)

O caminhão escolhido é chamado de caminhão trator trucado.

5.1.2 Semi-reboque

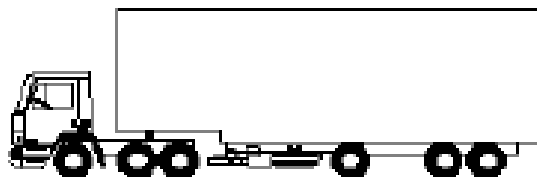
As dimensões do semi-reboque são regulamentadas pelo CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) através das resoluções seguintes:

- n°318, de 05 de Junho de 2009
- n°210, de 13 de Novembro de 2006

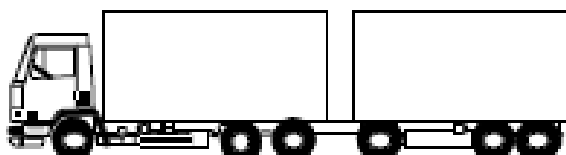
A resolução n°210 cita a norma NBR NM ISO 1726 para definição do balanço dianteiro e altura máxima do conjunto caminhão + semi-reboque. Balanço dianteiro é a distância entre o ponto de atracamento entre o semi-reboque e o caminhão, e a dianteira do semi-reboque, representado pela distância 1600mm na figura 32.

O semi-reboque que será utilizado é do tipo baú e é chamado de semi-reboque, por ser apoiado nos eixos traseiros do caminhão. Caso todo o peso do semi-reboque fosse apoiado no solo e não no caminhão, ele seria chamado de reboque.

Caminhão Trator Trucado + Semi-reboque



Caminhão Trucado + Reboque

**Figura 31 - Diferença entre reboque e semi-reboque**

Fonte: GUIA DO TRC, (2018)

Diante dos documentos acima citados, e levando em consideração as dimensões do modelo de caminhão já escolhido, as dimensões do semi-reboque foram definidas de modo a ficar no máximo permitido pelas resoluções citadas sem que o caminhão seja considerado especial e, assim, precise de uma AET (Autorização especial de trânsito) para circular.

Em outras palavras, escolheu-se simular o maior semi-reboque possível sem que ele seja enquadrado como especial pela legislação vigente.

A única exceção se aplica ao balanço traseiro, que ao invés dos 3500mm máximos permitidos pela resolução 210, optou-se por utilizar 2500mm, de forma a aproximar o posicionamento dos eixos da realidade encontrada nos semi-reboques comercializados no Brasil.

As dimensões do conjunto caminhão + semi-reboque, bem como as dimensões máximas permitidas, encontram-se na Fig. 32.

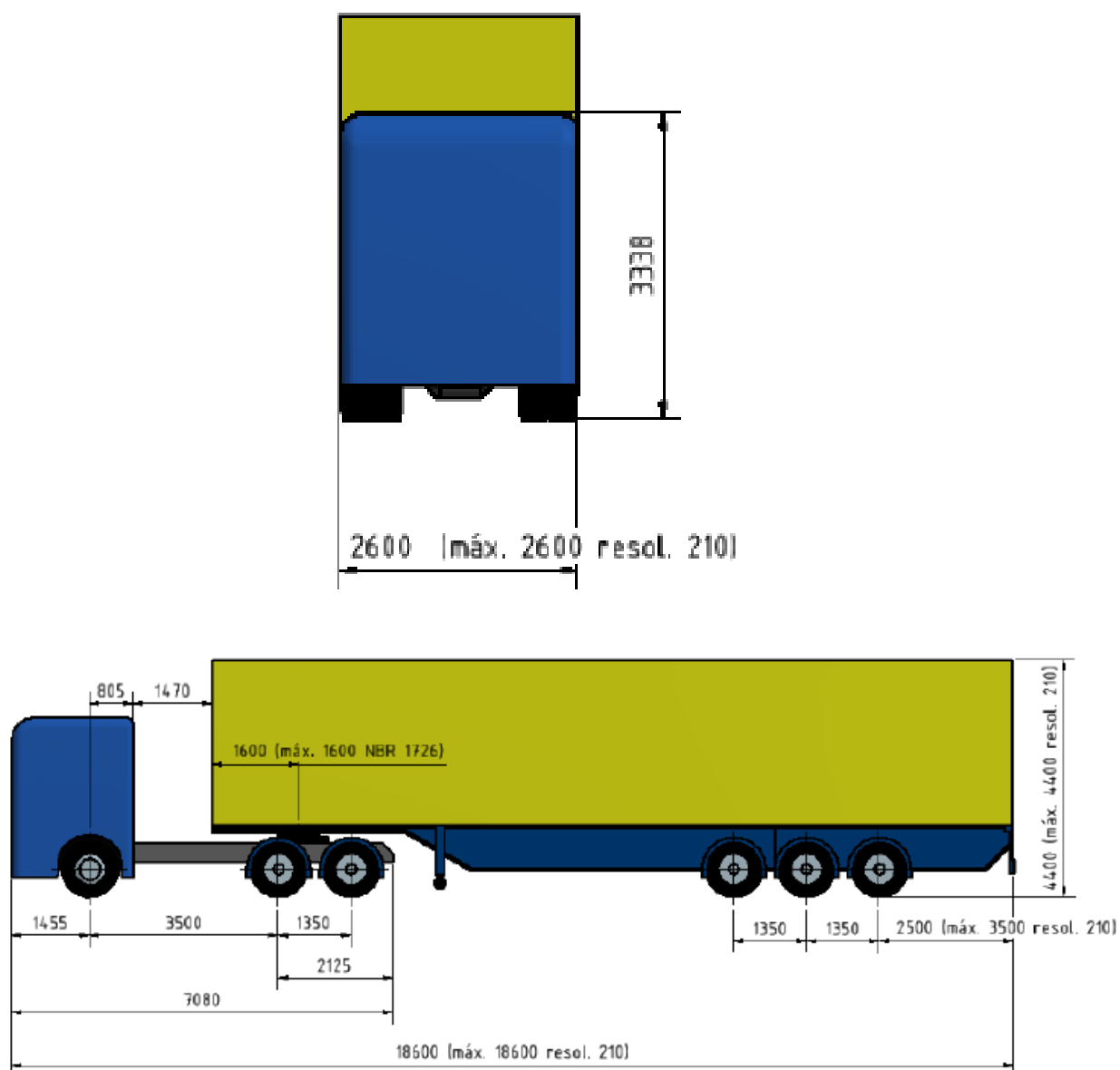


Figura 32 – Caminhão base em 3D

Fonte: Autoria própria.

O esquema mostrado na figura 32 é do modelo em 3 dimensões levemente simplificado. Mas, conforme será mencionado no próximo capítulo, foi necessário reduzir o modelo a 2 dimensões e escala 1:32, além de simplifica-lo. Assim, o modelo geométrico do caminhão base para a avaliação dos acessórios aerodinâmicos (Scania R440 com semi-reboque) ficou da seguinte forma, conforme Fig. 33.

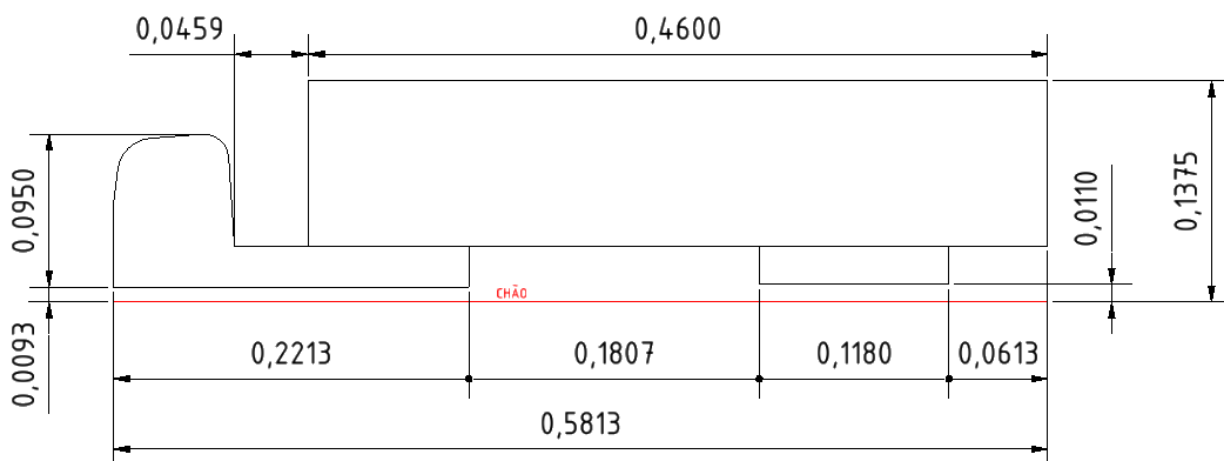


Figura 33 – Caminhão base em 2D e escala 1:32

Fonte: Autoria própria

Área frontal do caminhão base: 0.01041625m²

Percebe-se que a parte das rodas, tanto do caminhão quanto do semi-reboque, foi simplificada, afim de abrandar as exigências de memória e processamento do computador. Também é perceptível que apesar das simplificações, a geometria da cabine segue a mesma geometria do caminhão real, isto foi realizado para aproximar a simulação da realidade e trazer resultados mais precisos no que tange a avaliação aerodinâmica do conjunto.

5.2 Acessórios aerodinâmicos

Este trabalho irá avaliar 4 acessórios aerodinâmicos instalados no caminhão base.

Os acessórios são:

- Defletor de teto
- Defletor dianteiro
- Extensor traseiro
- Redutor de *gap*

5.2.1 Defletor de teto

A geometria do defletor de teto foi definida a partir de um modelo (ajustável) instalado em um caminhão Scania idêntico ao adotado neste trabalho, conforme Fig. 34 e 35:



Figura 34 – Defletor de teto instalado em um Scania R440

Fonte: Autoria própria

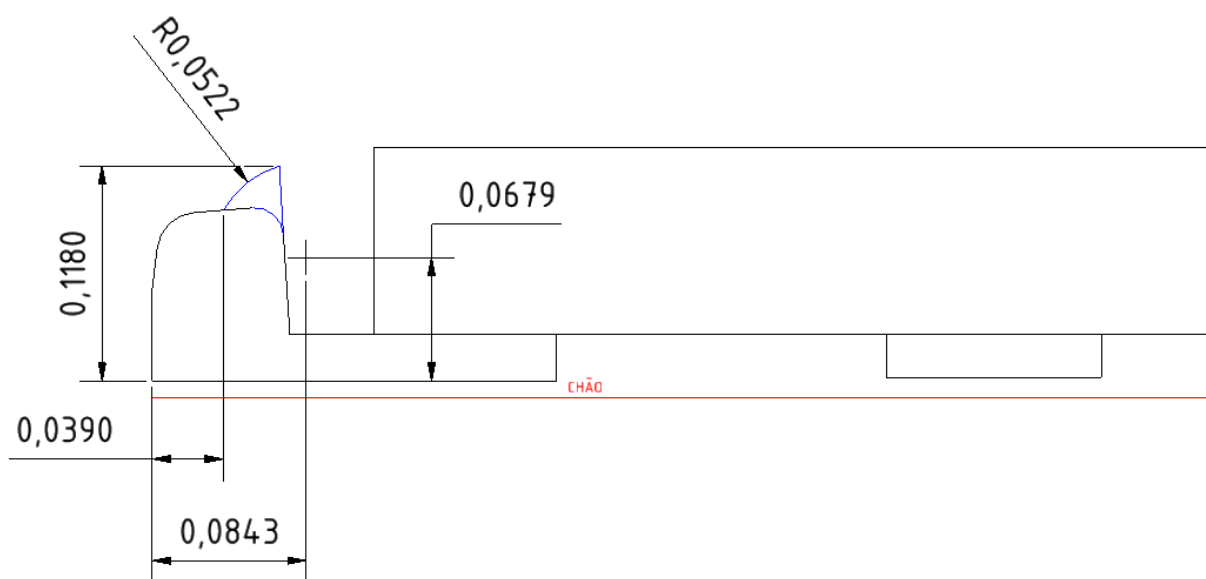


Figura 35 – Dimensões do defletor de teto (escala 1:32)

Fonte: Autoria própria

Área frontal do caminhão base com defletor de teto: 0.01041625m²

5.2.2 Defletor dianteiro

Não há uma lei que especifique a distância mínima da parte mais baixa do caminhão em relação ao solo. Diante disto, foi aqui adotado o mesmo critério estabelecido pelo CONTRAN para veículos de peso bruto total até 3500kg, através da resolução n°469 de 20 de março de 2014, que diz:

“A altura mínima permitida para circulação deve ser maior ou igual a 100 mm, medidos verticalmente do solo ao ponto mais baixo da carroceria ou chassi.”

A geometria do defletor dianteiro, portanto, ficou conforme a Fig 36:

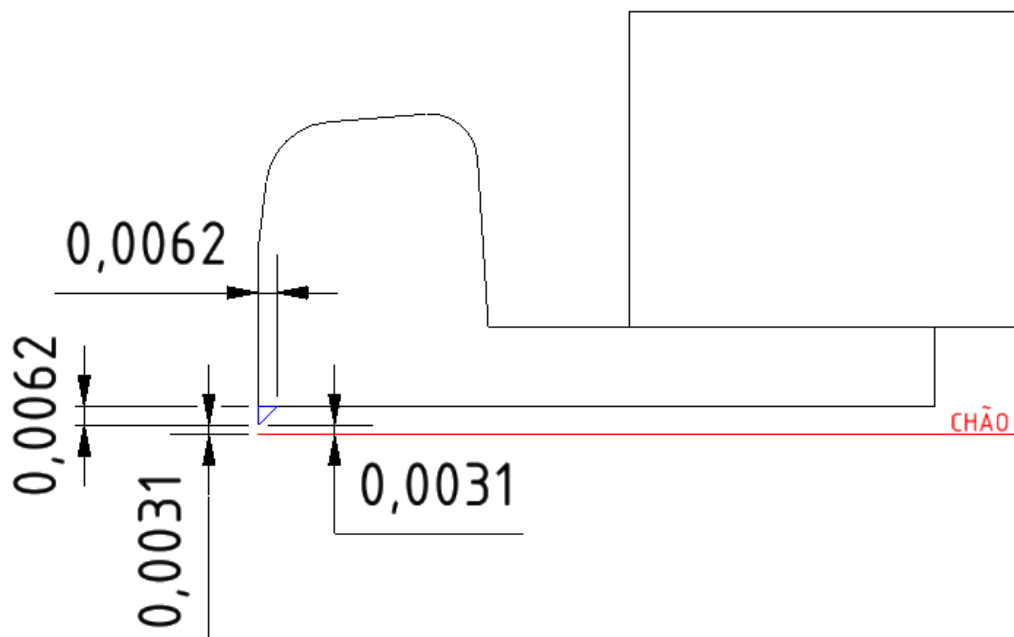


Figura 36 – Dimensões do defletor dianteiro (escala 1:32)

Fonte: Autoria própria

Área frontal do caminhão base com defletor dianteiro: 0.01092m²

5.2.3 Extensor traseiro

Para a modelagem do extensor traseiro, foi utilizado o mesmo modelo empregado por Hakanson e Lenngren em sua respectiva tese de mestrado, conforme Fig. 37 (HAKANSON; LENNGREN, 2010):

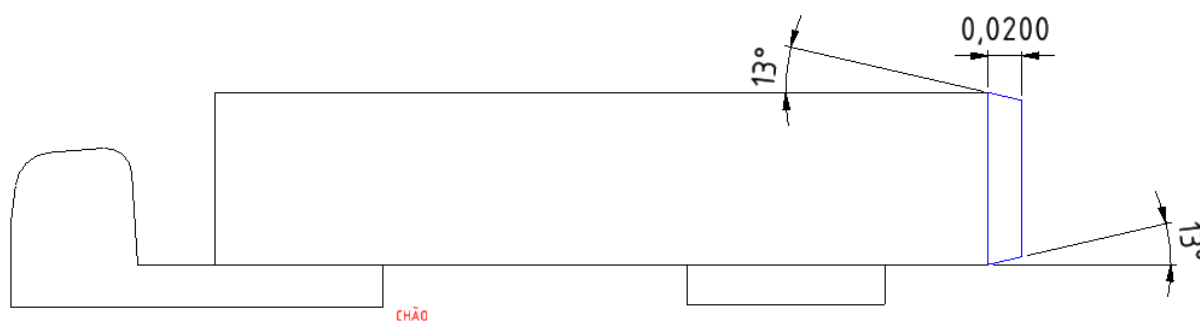


Figura 37 – Dimensões do extensor traseiro (escala 1:32)

Fonte: Autoria própria

Área frontal do caminhão base com extensor traseiro: 0.01041625m²

5.2.4 Redutor de *gap*

O redutor de *gap* foi modelado conectando o ponto mais alto da cabine até o semi-reboque, conforme Fig. 38:

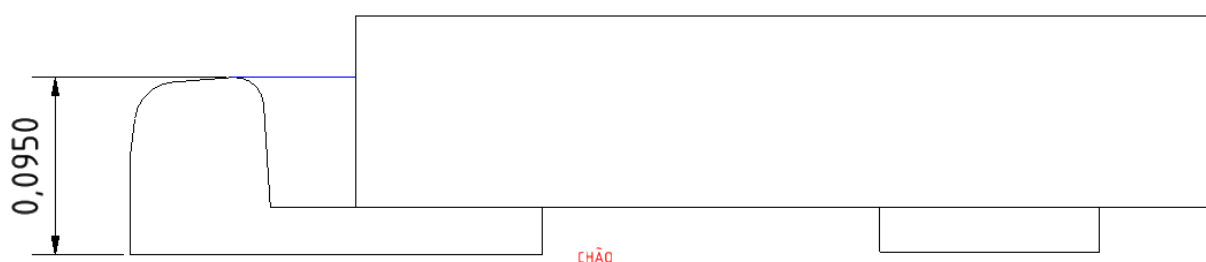


Figura 38 – Dimensões do redutor de gap (escala 1:32)

Fonte: Autoria própria

Área frontal do caminhão base com redutor de *gap*: 0.01041625m²

5.3 Caminhão de validação

A validação será realizada baseando-se nos resultados obtidos no trabalho de Bayındırlı, Akansu e Salman (2016).

. Os detalhes deste trabalho são tratados no capítulo específico de validação. Porém, cabe tratar aqui a definição do modelo geométrico para validação.

O modelo geométrico, conforme Fig. 39, utilizado na validação, é um modelo simplificado em 2 dimensões, do caminhão em escala 1:32, utilizado nos testes em túnel de vento do trabalho acima citado.

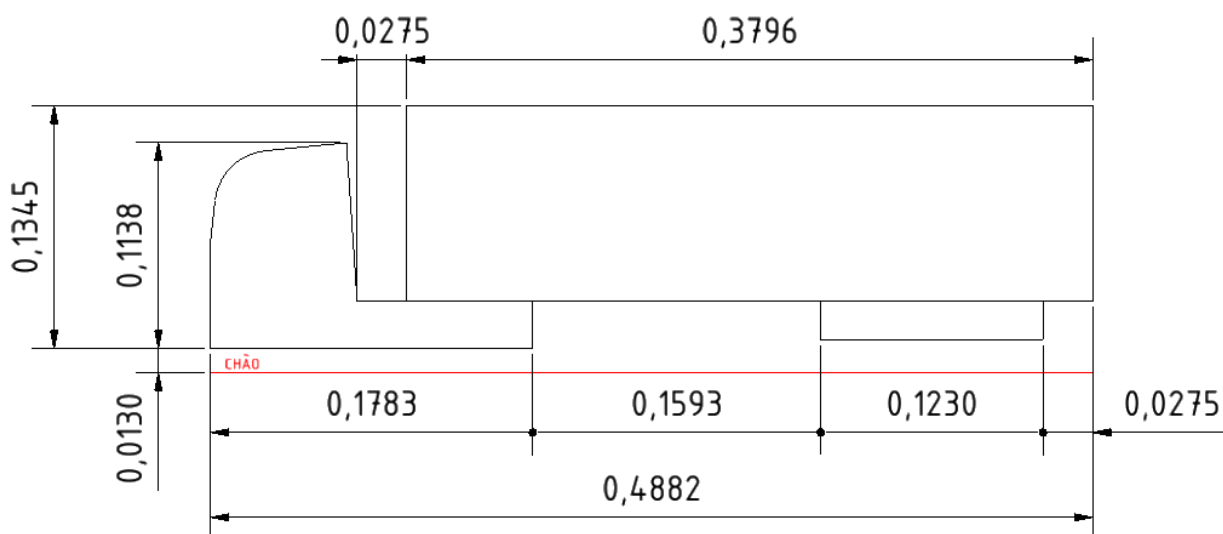


Figura 39 – Modelo geométrico em 2 dimensões utilizado para validação do modelo numérico (escala 1:32)

Fonte: Autoria própria

Área frontal do caminhão de validação: 0,0132m² (BAYINDIRLI et al 2016).

6. MODELAGEM NUMÉRICA

Este capítulo apresenta as equações usadas para a análise teórica do problema, através do uso de métodos numéricos e computacionais.

6.1 Definição do Domínio Físico

Para definir o domínio físico, é necessário, inicialmente, ter os dados das geometrias dos caminhões que serão avaliados. A seguir são elencadas as 6 diferentes geometrias que serão usadas no trabalho. São elas:

- Caminhão para validação do modelo numérico (BAYINDIRLI et al 2016);
- Caminhão Base utilizado para a avaliação dos acessórios, porém sem nenhum acessório instalado;
- Caminhão Base com defletor de teto;
- Caminhão Base com defletor dianteiro;
- Caminhão Base com extensor traseiro;
- Caminhão Base com redutor de *gap*;

Apesar de 6 geometrias diferentes, os perfis de caminhões serão somente dois, o primeiro usado para fazer a validação do modelo matemático / numérico e o segundo, chamado de caminhão base, para o estudo dos acessórios. As dimensões destas geometrias já foram apresentadas no capítulo 5.

A princípio todas as geometrias utilizadas seriam em três dimensões (3D) e escala 1:1, porém, devido às limitações de software (versão *student*) e também devido às limitações de tempo de processamento e memória do computador utilizado, o modelo geométrico foi reduzido a duas dimensões (2D), em escala 1:32, e teve suas formas geométricas simplificadas. Desta forma, abrandam-se as exigências sobre os recursos computacionais para a simulação, e facilita-se a convergência do modelo matemático com o modelo numérico adotado. Apesar desta medida, manteve-se uma boa correlação com a realidade. Isto é demonstrado no próximo capítulo, que trata da validação da modelagem numérica.

Definida a geometria, é necessário então definir as dimensões do domínio físico, que é a região que engloba o caminhão e a vizinhança. Tal domínio deve ser definido de modo que as fronteiras não perturbem o escoamento. Rodi (1997) definiu que as dimensões ideais para simulações em software são as seguintes, ilustradas na Fig. 40:

a - 3,5 vezes a altura total do caminhão

b - 10 vezes a altura total do caminhão

c - 6 vezes a altura total do caminhão



Figura 40 – Domínio para simulação no software

Fonte: Autoria própria

A relação ditada por Rodi (1997) foi utilizada para a definição do domínio usado em todas as simulações realizadas neste trabalho.

6.2 Discretização do domínio físico (geração da malha)

A definição da malha é uma das partes mais importantes do processo de simulação. Ela tem impacto direto na convergência da simulação e na precisão dos resultados.

Dentre os tipos de elementos de malhas possíveis de se usar para simulações em duas dimensões pode-se citar a quadrilateral dominante, a triangular e a multizona quadrilateral/triangular.

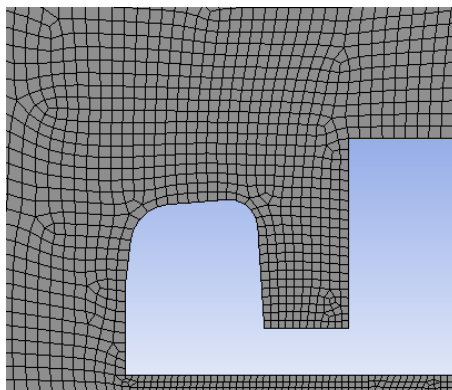


Figura 41 – Exemplo de malha quadrilateral dominante

Fonte: Autoria própria

Neste trabalho foi adotada uma malha estruturada, quadrilateral dominante pois, além de ter permitido a convergência do modelo numérico nas simulações com mais rapidez, foi citada como a mais indicada para o tipo de escoamento abordado neste trabalho (LANFRIT, 2005).

A Fig. 42 mostra detalhadamente o refino de malha na região traseira do caminhão, enquanto a Fig. 43 mostra o efeito do refino no domínio como um todo. Ambas as figuras ilustram o caminhão base.

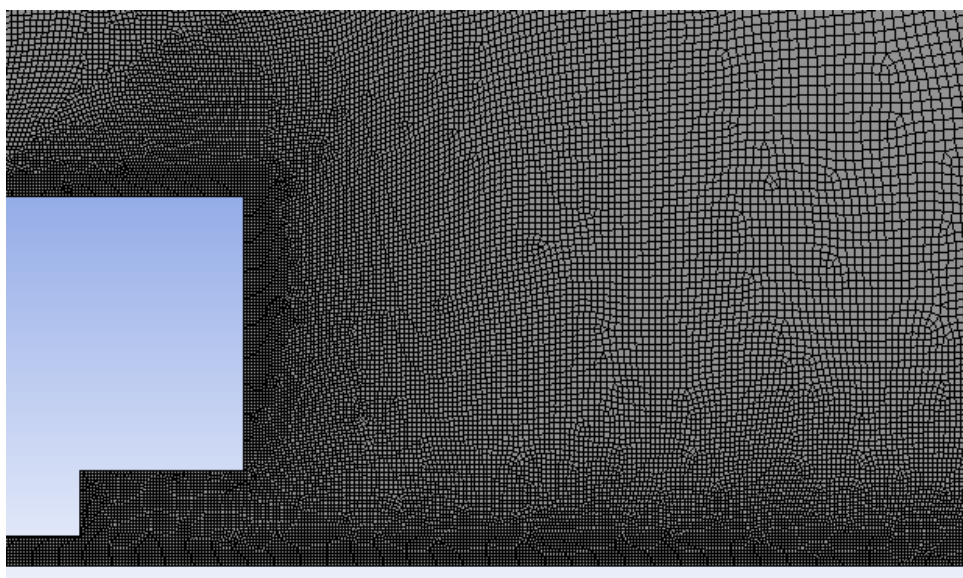


Figura 42 – Refino de malha na região traseira do caminhão

Fonte: Autoria própria

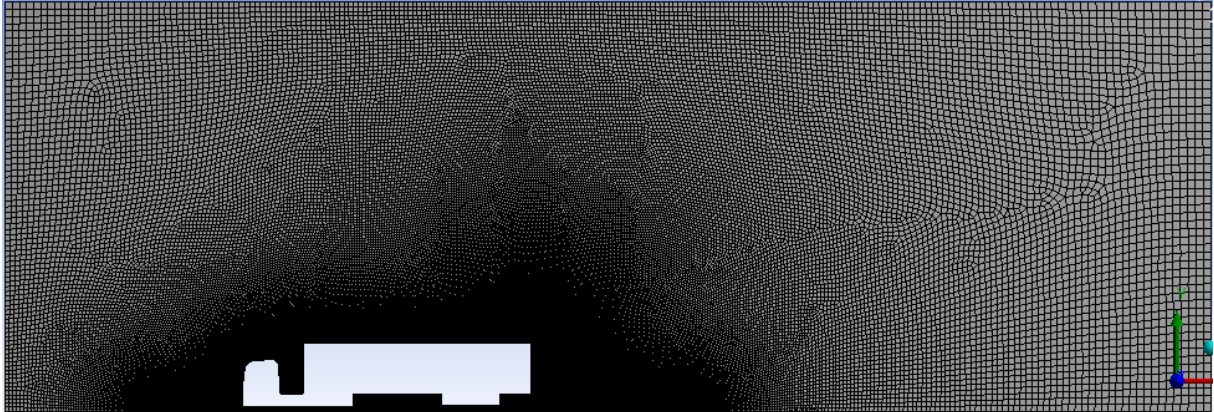


Figura 43 – Refino de malha no domínio completo

Fonte: Autoria própria

6.2.1 Teste de independência das malhas

Outra consideração importante a respeito da malha, diz respeito a quantos volumes são necessários para se obter um resultado numérico adequado. Quanto maior este número, mais preciso é o resultado da simulação. Por outro lado, ocorre um aumento no tempo de simulação e surgem mais dificuldades para convergência do processo iterativo.

Então, deve-se buscar um ponto ótimo, onde tenha-se o mínimo de volumes possível, com uma solução numérica aceitável. Este é o intuito do teste de independência de malhas, que consiste basicamente em rodar a mesma simulação, variando apenas o número de elementos da malha. Sabe-se que não existe resultado numérico independente da malha, porém, existirá um ponto onde a variação do número de elementos irá resultar em um impacto desprezível na solução numérica. Ao atingir este ponto, considera-se que a malha mais grossa entre as duas comparadas, é a malha indicada para realizar o estudo. Isto porque a malha mais fina (com mais elementos) irá gerar uma solução muito próxima da malha mais grossa, com maior custo computacional (KULKARNI; SHAH, 2016).

Para este trabalho, em virtude das limitações de software e processamento já citadas anteriormente, uma variação inferior a 5% no coeficiente de arrasto aerodinâmico será considerada uma variação suficientemente pequena para encerrar o teste de independência das malhas e definir a malha a ser utilizada. Desta forma, será definida uma malha grossa (inicial) e a cada teste será dobrado o número de

elementos da malha, sendo o resultado do coeficiente de arrasto comparado entre as duas. No momento em que a eq. (20), onde C_{Dg} é o C_D para malha grossa, e C_{Df} é o C_D para malha fina, for satisfeita será finalizado o processo.

$$\frac{|C_{Dg}-C_{Df}|}{C_{Df}} \leq 0,05 \quad (20)$$

A Fig. 44 mostra duas malhas, a da esquerda é a malha grossa, e a da direita é a malha fina com aproximadamente o dobro de elementos da mais grossa.

A malha, em todas as simulações, foi construída a partir da definição inicial do tamanho dos elementos de malha nas arestas do caminhão, e no chão próximo a ele.

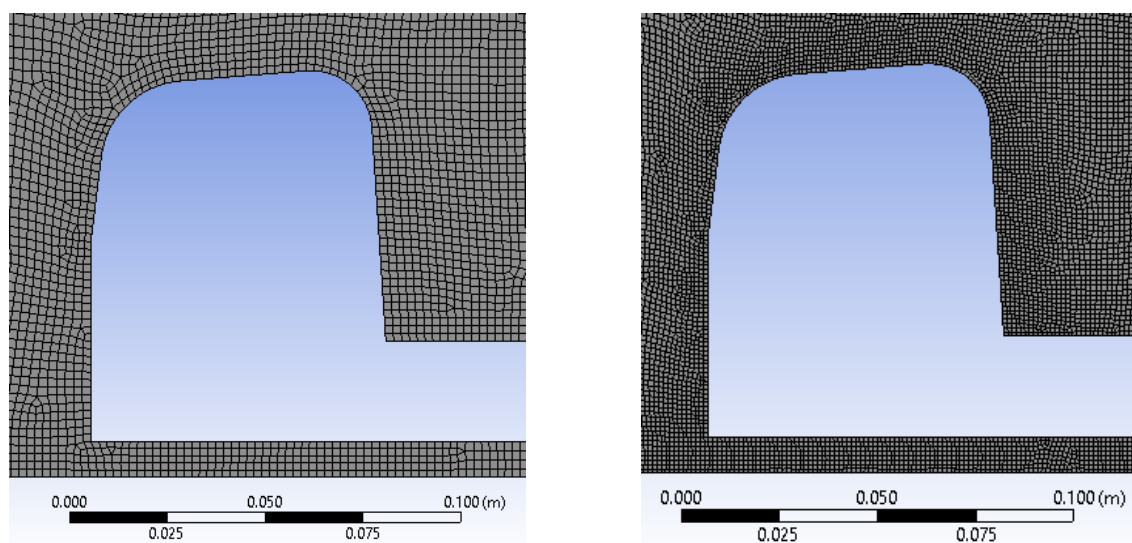


Figura 44 - Exemplo de refino de malha onde foi dobrado o número de elementos, a figura da esquerda tem menos elementos (malha mais grossa) e a da direita mais elementos (malha mais fina)

Fonte: Autoria própria

O tamanho dos elementos de malha cresce, conforme se afastam das arestas do caminhão, a uma taxa definida de 2%, até um tamanho máximo padrão definido no software ($7,5134 \times 10^{-2} \text{ m}^2$), isto é chamado refino de malha e deve ser aplicado nas regiões próximas ao caminhão, onde o escoamento é mais complexo. A exceção fica

para a tampa traseira do caminhão, cuja taxa de crescimento foi definida em 1% por se tratar da região de esteira aerodinâmica¹.

6.3 Discretização do modelo matemático.

Após discretizado o domínio, é necessário adequar as equações modelo ao novo domínio físico, que não é mais contínuo, mas sim discreto. Tal processo chama-se discretização das equações.

A discretização das equações será feita usando o método dos volumes finitos (MVF). Neste método, as equações do modelo matemático são integradas em cada volume elementar. Neste trabalho, as equações não foram discretizadas, uma vez que foi utilizado o *software* comercial Ansys Fluent ®, versão *student*, onde este processo já está feito. Portanto, tal procedimento não será pormenorizado, serão apresentadas somente as considerações pertinentes à discretização.

O escoamento foi modelado como incompressível, bidimensional, em regime permanente, isotérmico, e de propriedades constantes.

As equações usadas para a solução numérica são descritas considerando as equações de continuidade do regime permanente, conservação da quantidade de movimento e transporte de um escalar na forma integral (ANSYS INC, 2013):

Conservação da massa em regime permanente, na eq. (21) (na formulação integral):

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (21)$$

\vec{v} =Vetor de velocidade

\vec{A} =Vetor área superficial

ρ =Massa específica do fluido

Conservação da quantidade de movimento, na eq. (22) (na formulação integral):

¹ Para visualização de como a malha foi gerada no *software*, ver Apêndice A.

$$\oint \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = - \oint p I \cdot d\vec{A} + \oint \tau \cdot d\vec{A} \quad (22)$$

I=Matriz identidade

τ =Tensor tensão

O *software* utiliza o MVF para discretizar as equações acima gerando um conjunto de relações algébricas, que juntas formam um sistema de equações lineares, passível de serem resolvidas numericamente. Ou seja, as equações serão aplicadas em cada volume de controle, do domínio computacional, gerando uma equação discretizada para cada volume (ANSYS INC, 2013).

A forma discretizada da conservação da massa em regime permanente e dada pela eq. (23):

$$\sum_f^{N_{\text{faces}}} J_f A_f = 0 \quad (23)$$

J_f =Taxa de fluxo de massa pela superfície f

A_f =Área da superfície f

Para se chegar a tal equação, a equação da conservação da quantidade de movimento foi integrada sobre o volume de controle da Fig. 45.

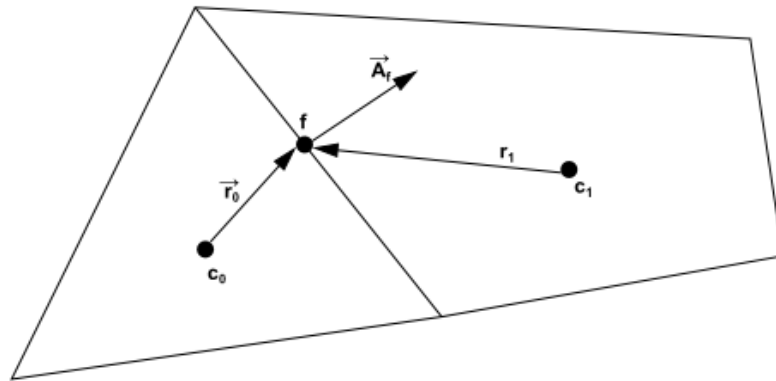


Figura 45 – Volume de controle usado para ilustrar o processo de discretização

Fonte: ANSYS INC., (2013)

A equação de transporte de um escalar, após discretizada, é conforme a eq. (24):

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{\text{faces}}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{\text{faces}}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V$$

(24)

Lembrando que o escalar ϕ para este caso pode ser a velocidade u e v .

Tal equação discretizada, apresentada em sua forma genérica, fica na forma da eq. (25):

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + \sum p_f A + S_\phi$$

(25)

nb = Diz respeito às células vizinhas (neighbors cells)

a_p e a_{nb} = Coeficientes linearizados para ϕ e ϕ_{nb} respectivamente

p_f = Pressão na superfície f

Para se chegar às equações discretizadas da conservação da quantidade de movimento e da conservação da massa, foram usadas aproximações para os termos advectivos, difusivos e de pressão.

Para o termo advectivo foi usado o esquema de alta resolução, de 2ª ordem dado pela eq. (26):

$$\varphi_{ip} = \varphi_{up} + \beta \nabla \varphi \cdot \Delta \vec{r} \quad (26)$$

φ_{up} = Valor do nó seguinte

ip = Ponto de integração

\vec{r} = Vetor do nó a montante até o nó atual

β = Valor mínimo de todos os valores de ponto de integração em torno do nó (Barth; Jespersen, 1989)

Para o termo difusivo é usada aproximação da eq. (27):

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \right|_{ip} = \sum_n \left. \frac{\partial N_n}{\partial \alpha} \right|_{ip} \varphi_n \quad (27)$$

N = Função de forma do elemento

n = nó

Já o gradiente de pressão é dado pela eq. (28):

$$P_{ip} = \sum_n N_n(s_{ip}, t_{ip}, u_{ip}) P_n \quad (28)$$

s, t e u=Parâmetros da função de forma

A vazão mássica, conforme eq. (29):

$$\dot{m}_{ip}=(\rho U_j \Delta n_j)_{ip} \quad (29)$$

U=Vetor velocidade

n=Vetor superfície externa

O tratamento do acoplamento pressão-velocidade considerado foi o acoplado (*coupled*). Este algoritmo resolve o sistema de equações de conservação de quantidade de movimento e conservação da massa ao mesmo tempo, proporcionando uma solução robusta e eficiente para regimes permanente, e também uma taxa de convergência maior (ANSYS INC, 2013).

A discretização espacial dentro do método acoplado dos termos de pressão, quantidade de movimento, energia cinética da turbulência e taxa de dissipação da turbulência, é de segunda ordem. A precisão oriunda da segunda ordem advém da expansão por série de Taylor da solução central da célula sobre seu centroide, conforme eq. (30) (ANSYS INC, 2013):

$$\phi_f = \phi + \nabla \phi \cdot \vec{r} \quad (30)$$

ϕ =Valor central da célula

$\nabla \phi$ =Gradiente com relação à célula seguinte

\vec{r} = Vetor de desloc. do centróide de célula a montante para o centróide da face

6.4 Condições de contorno

As condições de contorno (Fig.46) consideradas foram:

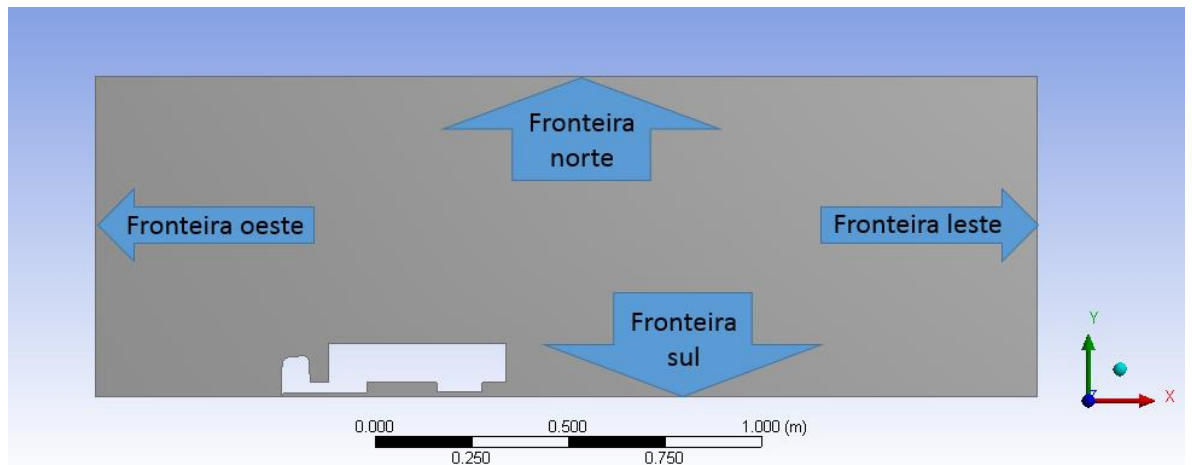


Figura 46 – Fronteiras do domínio numérico

Fonte: Autoria própria

- **Fronteira oeste:**
 - Pressão manométrica = 0
 - Velocidade $V_x = 25\text{m/s}$ (90 km/h)
 - Velocidade $V_y = 0\text{m/s}$
 - Intensidade turbulenta = 1% (BAYINDIRLI et al 2016)
 - Taxa de viscosidade turbulenta = 10% (Valor padrão do *software*)

As simulações foram todas realizadas com velocidade de 25m/s (90km/h) que é a velocidade máxima permitida para caminhões de acordo com a legislação vigente (LEI n°13.281, 2016).

A velocidade do escoamento de corrente livre será considerada uniforme, com a componente y da velocidade nula e na direção x a velocidade será 25m/s. Isso significa que não há ângulo de guinada (que não será simulado em virtude do tempo disponível para a realização das simulações).

A pressão manométrica foi definida como sendo zero por se tratar de um escoamento a pressão atmosférica.

A intensidade da turbulência foi definida como sendo 1% em todas as simulações. Este valor foi definido por ser o mesmo encontrado no trabalho de Bayindirli et al (2016) ao validar o modelo com base nos resultados de túnel de vento.

Já a taxa de viscosidade turbulenta, que é a viscosidade turbulenta dividida pela viscosidade laminar, foi definida com o valor padrão do *software*. Esta taxa é variável no escoamento, mas o *software* define um valor fixo para ser possível alcançar uma solução estável. O valor padrão apresentou bons resultados nas simulações teste realizadas, e por isso foi adotado para todas as simulações com bons resultados também.

- **Fronteira leste:**
 - Pressão manométrica = 0
 - Intensidade turbulenta do contra fluxo: 1%
 - Taxa de viscosidade turbulenta: 10%

Para a face de saída, foi definido que não há variação de pressão em relação à entrada. Isto é garantido pelo tamanho do domínio definido (RODI, 1997). Os valores relacionados à turbulência foram mantidos iguais aos da face de entrada pelos mesmos motivos que levaram à definição destes valores.

- **Fronteiras norte e sul:**
 - Parede estacionária
 - Condição de não escorregamento
 - Constante de rugosidade: 0.5 (valor padrão do *software*)

6.5 Modelo de turbulência

O escoamento foi modelado como incompressível e permanente, além disso, não há troca térmica entre as superfícies. Resta então definir apenas o modelo de turbulência que será utilizado.

Para definir se o escoamento é turbulento ou não, é necessário definir inicialmente o comprimento característico do caminhão, para então calcular o número de Reynolds. O comprimento característico é o comprimento do caminhão na direção do escoamento (MUGNAINI, 2015). No caso do modelo geométrico aqui definido, o comprimento característico é de 18,6m, porém, o modelo simulado em escala 1:32 tem este valor de 0,58125m. As demais variáveis como massa específica, viscosidade cinemática e velocidade do escoamento, estão aqui definidas mas são explicadas detalhadamente na sequência.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{1.225 \cdot 25 \cdot 0.58125}{5.59188 \cdot 10^{-7}} = 318,33 \cdot 10^5$$

ρ =Massa específica

μ =Viscosidade absoluta

V=Velocidade do escoamento

L=Comprimento característico

Como o número de Reynolds é maior que 5×10^5 , o escoamento é turbulento (FOX, 2009).

O fato do escoamento ser turbulento, demanda a escolha de um modelo de turbulência adequado para a simulação. Conforme explicado no capítulo 4, que tratou a modelagem matemática, o modelo de turbulência mais adequado para o tipo de escoamento aqui tratado é o $k-\epsilon$ *realizable*. Este modelo foi escolhido por ser amplamente utilizado na indústria automobilística com bons resultados, ter boa precisão, rápida convergência e ser adequado para o tipo de escoamento aqui tratado (MUGNAINI, 2015). As equações do modelo de turbulência adotado não serão detalhadas devido à sua complexidade e por não ter sido definida pelos autores deste trabalho.

6.6 Modelagem do Fluido de escoamento

O material usado no escoamento real é o ar atmosférico. O valor de massa específica e viscosidade do material são os valores padrão do *software*. Os valores padrão estão próximos aos valores encontrados na literatura (FOX, 2009), que são:

$$\text{Massa específica} = 1,19 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Viscosidade cinemática} = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

Como o escoamento real será simulado em escala, algumas considerações devem ser feitas. Se forem considerados dois escoamentos diferentes em termos de velocidade, viscosidade e massa específica, por exemplo, sobre corpos geometricamente semelhantes (um em escala e o outro em tamanho real), se ambos os escoamentos tiverem o mesmo número de Reynolds, então é possível afirmar que

os dois escoamentos terão o mesmo valor de C_l (coeficiente de sustentação), C_D (coeficiente de arrasto aerodinâmico) e C_P (coeficiente de pressão), mesmo sendo escoamentos diferentes. Escoamentos com esta característica são denominados escoamentos “dinamicamente similares”, e o número de Reynolds é dito “parâmetro de similaridade” (ANDERSON, 2015).

Para o escoamento de ar atmosférico sobre o caminhão base em tamanho real, tem-se o seguinte valor de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 25 \cdot 18,6}{1,7894 \cdot 10^{-5}} = 318,33 \cdot 10^5$$

Para o escoamento sobre o caminhão base em escala ser dinamicamente similar ao sobre o caminhão base em tamanho real, o número de Reynolds de ambos deve ser igual. Isto poderia ser satisfeito variando a velocidade, massa específica ou viscosidade do fluido. Decidiu-se variar a viscosidade cinemática, tornando-a 32 vezes menor que a do ar atmosférico. Assim, o número de Reynolds do escoamento sobre o caminhão base em escala, testado no *software*, é:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 25 \cdot 0,58125}{5,59188 \cdot 10^{-7}} = 318,33 \cdot 10^5$$

Portanto, as propriedades do fluido utilizado na simulação são:

- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 5,59188 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m.s}$

E desta forma a similaridade é respeitada.

6.7 Critério de convergência

O critério de convergência é o responsável por garantir que os valores obtidos com a simulação são representativos e precisos, é ele que define o tamanho do erro de iteração. O principal e mais usado critério de convergência se chama resíduo. Resíduo se refere à medida do desequilíbrio local de cada equação de volume de

controle. É a medida mais importante de convergência no que se refere diretamente a se as equações foram resolvidas com precisão.

Para problemas como os tratados neste trabalho, o critério de convergência padrão do *software* e recomendado para os resíduos é 10^{-3} (ANSYS INC, 2013). Bernardes (2017) analisou o aerofólio frontal de um carro de Fórmula 1, que é uma simulação mais sensível ao erro do que a de um caminhão, e utilizou 10^{-3} como critério de convergência com sucesso. Porém, durante os testes realizados para o caminhão, notou-se que algumas simulações convergiam quando o critério de convergência para os resíduos era 10^{-6} , mas não quando o critério era 10^{-3} . Portanto, para proporcionar maior precisão e robustez ao método numérico, o critério de convergência adotado para os resíduos foi de 10^{-6} .

6.8 Recurso computacional

Para a realização das simulações, foi utilizado o software Ansys Fluent ® 16 versão *student*, instalado num computador pessoal com as seguintes especificações, conforme Fig. 47:

Processador	Intel(R) Core(TM) i5-3317U CPU @ 1.70GHz 1.70 GHz
RAM instalada	4.00 GB (3.89 GB utilizáveis)
Tipo de sistema	Sistema Operacional de 64 bits, processador com base em x64

Figura 47 – Especificação do computador utilizado nas simulações numéricas

Fonte: Autoria própria

Com estas configurações de *hardware* e *software*, e as condições definidas no *software* para o trabalho, o tempo de simulação médio para as malhas consideradas no estudo foi de 6200 segundos, o que equivale a 2 horas e 40 minutos.

No apêndice A é mostrado detalhadamente todas as etapas do desenvolvimento do processo de simulação. O objetivo é possibilitar a reprodução dos resultados aqui obtidos de maneira mais clara, prática e objetiva.

7. VALIDAÇÃO

A validação é uma das principais maneiras de garantir a precisão e confiabilidade das simulações computacionais (OBERKAMPF; TRUCANO, 2002).

Uma das melhores maneiras de verificar e validar os resultados obtidos numericamente, no que tange à confiabilidade e precisão dos mesmos, é através da comparação de resultados experimentais com os resultados numéricos obtidos. Desta forma, é possível afirmar que o método numérico tem boa correspondência com o comportamento real do elemento simulado.

A validação do modelo numérico aqui utilizado foi realizada tendo como base o trabalho de Bayındırlı et al. (2016).

O trabalho mencionado aborda a realização de testes experimentais em túnel de vento (Fig. 48) para a obtenção do coeficiente de arrasto aerodinâmico de um caminhão. Nele, foi utilizado um caminhão e semi-reboque em escala 1:32, com dimensões e geometrias bem próximas aos do caminhão que aqui foi utilizado.



Figura 48 – Experimento com o modelo em escala 1/32 em túnel de vento

Fonte: BAYINDIRLI; AKANSU; SALMAN, (2016)

O procedimento de validação consistiu em modelar geometricamente o mesmo caminhão utilizado no trabalho de base, para então obter o coeficiente de arrasto

aerodinâmico numericamente. O procedimento de modelagem geométrica foi abordado no capítulo 5.

7.1 Erros associados

O método numérico empregado neste trabalho resolverá um caso bidimensional, enquanto o teste experimental é tridimensional. O caso bidimensional, portanto, é uma aproximação do caso real e, sendo uma aproximação do caso real, erros de até 10% podem ser tolerados (CASAL, 2014).

Para a validação aqui tratada, não será adotada uma margem de erro tão severa afim de obter-se resultados mais precisos e condizentes com a realidade. Portanto, a margem de erro adotada em função do caso bidimensional será de 6.3%.

No teste experimental, a incerteza sobre os valores dos coeficientes de arrasto aerodinâmico obtidos declarada é de 4,7% (BAYINDIRLI et al 2016).

Somando a incerteza devido ao caso 2D (6,3%), com a incerteza do teste experimental (4,7%), temos uma incerteza total de 11%.

Ou seja, o processo de validação só pode ser considerado concluído e válido quando satisfeita a eq. (31):

$$\left| \frac{C_d \text{ validação} - C_d \text{ simulação}}{C_d \text{ validação}} \right| \leq 11\%$$

(31)

7.2 Parâmetros da validação

As considerações realizadas e parâmetros configurados para a validação, são os mesmos que foram expostos no capítulo anterior, com duas exceções. A primeira delas é a velocidade do fluido de corrente, que para a validação é de 25 m/s, pois foi essa a velocidade utilizada no teste experimental em túnel de vento (BAYINDIRLI et al 2016). A segunda diz respeito às propriedades do fluido do escoamento. Como o teste em túnel de vento foi realizado com ar atmosférico, no processo de validação foi utilizado fluido com as propriedades do ar atmosférico padrão do software. Os valores

padrão (figura 49) estão próximos aos valores encontrados na literatura (FOX, 2009) conforme foi explicado no capítulo 6.6.

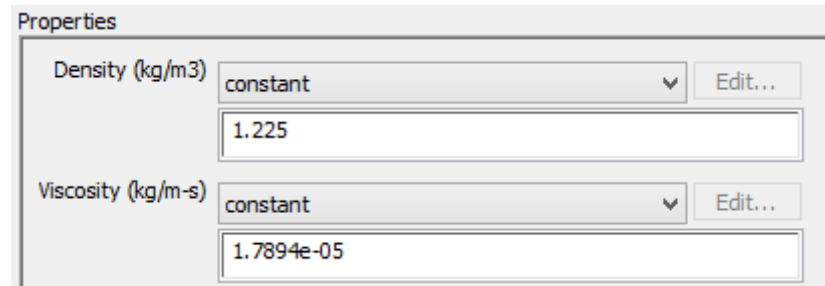


Figura 49 – Massa específica e viscosidade do fluido empregado nas simulações de validação

Fonte: Autoria própria

7.3 Resultado da validação

Para garantir que o número de elementos da discretização do domínio é adequado, é necessário realizar o teste de independência das malhas, conforme explicado no capítulo anterior. Como a validação é um processo crítico e a base do trabalho, o critério de parada do teste de independência das malhas foi severizado na eq. (32):

$$\frac{|C_{Dg}-C_{Df}|}{C_{Df}} \leq 0,01 \quad (32)$$

Os resultados das simulações com diferentes níveis de refino de malha estão no Quadro (02).

Número de elementos	Número de nós	Número de iterações até a convergência	C_d	ΔC_d	ΔC_d (%)
26457	26980	411	0.74394		
51160	51979	824	0.78261	0.03867	4.94%
101415	102841	1381	0.77612	0.00649	0.84%
202595	203176	1816	0.77751	0.00223	0.29%

Quadro 02 – Teste de independência de malha (validação)

Fonte: Autoria própria

Com cerca de 100.000 elementos foi possível atender ao critério de parada. A simulação com cerca de 200.000 elementos foi realizada para mostrar que os resultados continuariam convergindo.

Também é possível verificar a boa convergência do método numérico empregado através da análise dos gráficos de resíduo, que atendeu o critério de parada, e do C_d , que apresentou um comportamento estável a partir da 500ª iteração aproximadamente, conforme Fig. (50) e (51).

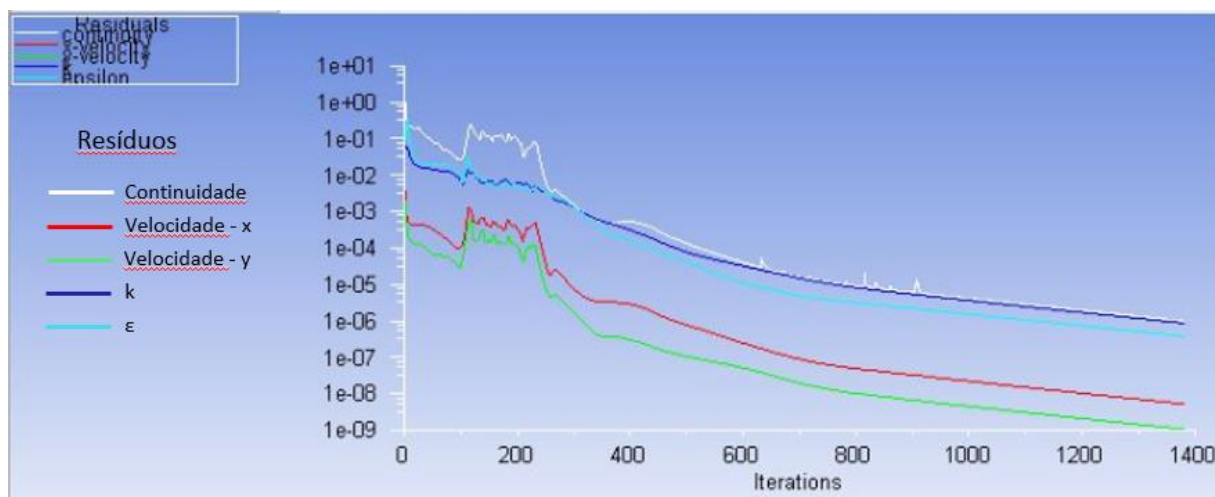


Figura 50 – Validação - Gráfico de convergência (resíduos)

Fonte: Autoria própria

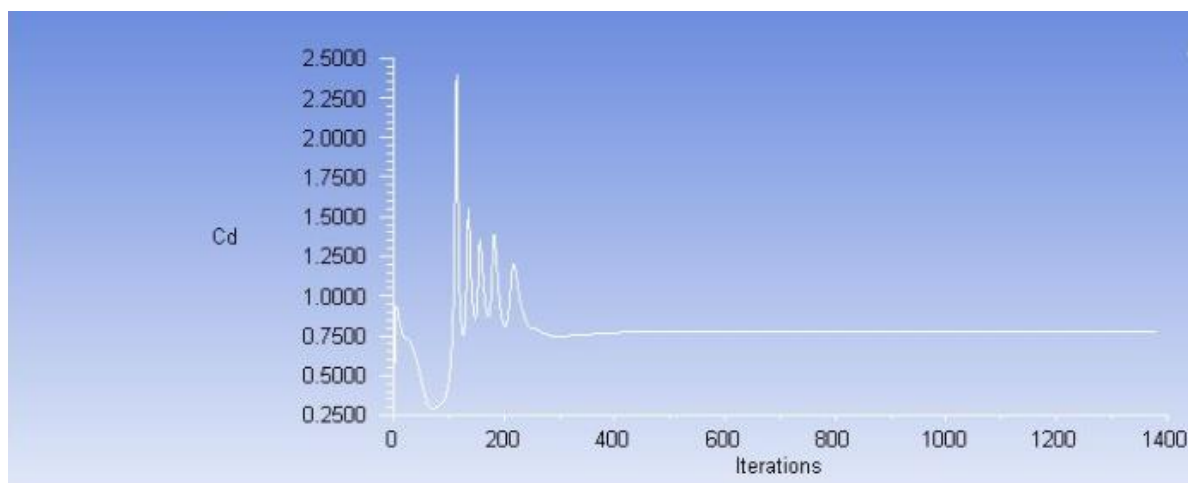


Figura 51 – Gráfico de convergência de C_d (validação)

Fonte: Autoria própria

O coeficiente de arrasto aerodinâmico encontrado no teste experimental foi de 0.704 (BAYINDIRLI et al 2016), enquanto o resultado encontrado na validação do modelo numérico, que atingiu o critério de parada primeiro, foi de 0,77612. A diferença entre os dois coeficientes é de 10,24%, portanto, a condição para validação foi atingida, o que significa que o modelo considerado atende às necessidades. Tal modelo numérico, validado, foi utilizado em todas as simulações realizadas para avaliação do caminhão base e acessórios aerodinâmicos.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações de cada geometria mencionada no capítulo 5.

O coeficiente de arrasto aerodinâmico de cada geometria com acessório aerodinâmico, será comparado com o coeficiente de arrasto aerodinâmico do caminhão base. Desta forma, é possível determinar qual acessório foi mais eficaz na redução do C_d . O C_d calculado pelo software é o C_d médio do caminhão levando-se em consideração sua área frontal.

8.1 Caminhão base

Como condição base, o teste de independência de malhas deve ser realizado para o caminhão base. Isto é necessário pois a geometria do caminhão base é um pouco diferente da geometria do caminhão de validação. A condição de parada do teste de independência de malhas será a mesma mostrada no capítulo 6.

O resultado do teste encontra-se no Quadro (03):

Número de elementos	Número de nós	Número de iterações até a convergência	C_d	ΔC_d	ΔC_d (%)
26052	25499	445	0.89848		
49931	49053	936	1.04740	0.14892	14.22%
99729	98314	1326	1.08180	0.0344	3.18%

Quadro 03 – Teste de independência de malha (caminhão base)

Fonte: Autoria própria

Com cerca de 100 000 elementos de malha, o critério de parada foi satisfeito (variação de C_d inferior a 4%), por isto, as simulações dos acessórios aerodinâmicos serão realizadas com malhas contendo cerca de 100 000 elementos.

O coeficiente de arrasto aerodinâmico do caminhão base obtido é de 1.0818. Este será o valor de referência para se avaliar a eficiência dos acessórios instalados.

A simulação que encerrou o teste de independência de malhas apresentou boa convergência, com C_d tendo comportamento estável a partir da 500ª iteração aproximadamente. O critério de parada da simulação foi satisfeito. Nas Figs. 52 e 53

podem ser observadas as convergências dos resultados. As oscilações iniciais presentes em todas as simulações são devido ao comportamento instável do processo iterativo nas primeiras iterações.

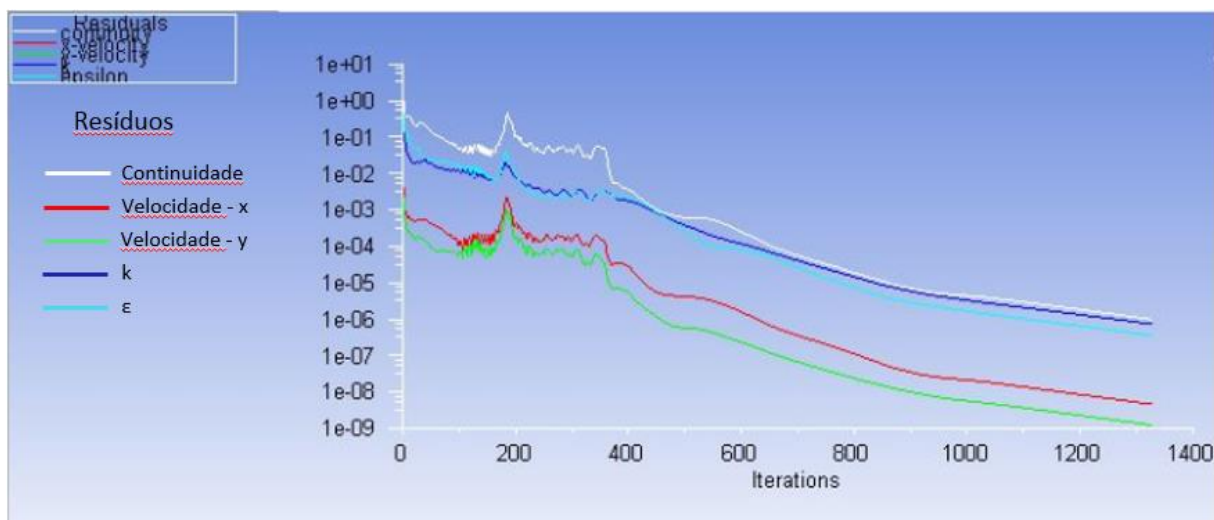


Figura 52 – Gráfico de convergência para o caminhão base (resíduos)

Fonte: Autoria própria

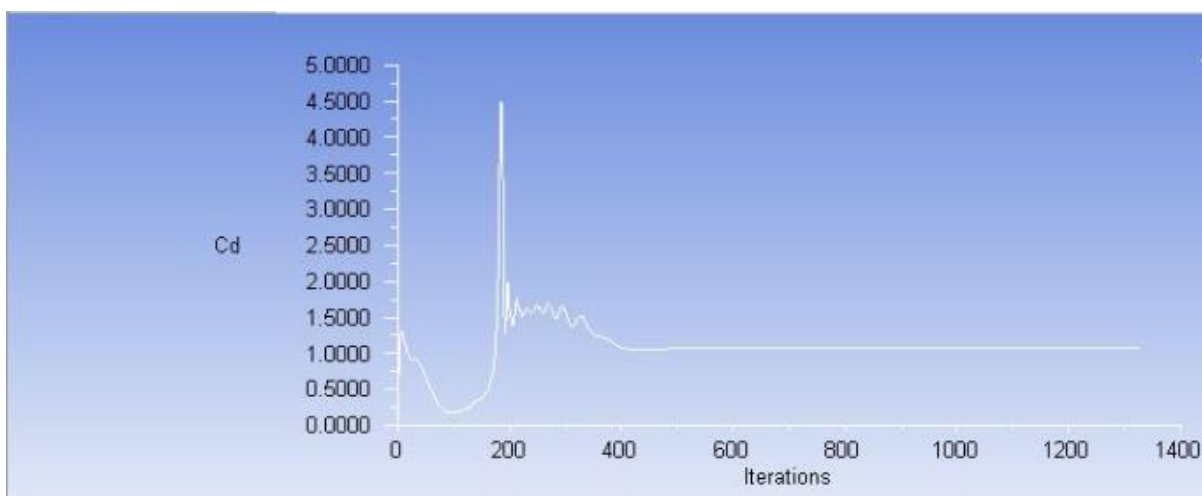


Figura 53 – Gráfico de convergência para o caminhão base (Cd)

Fonte: Autoria própria

As Figs. (54) e (55) mostram os vetores de velocidade e campo de pressão.

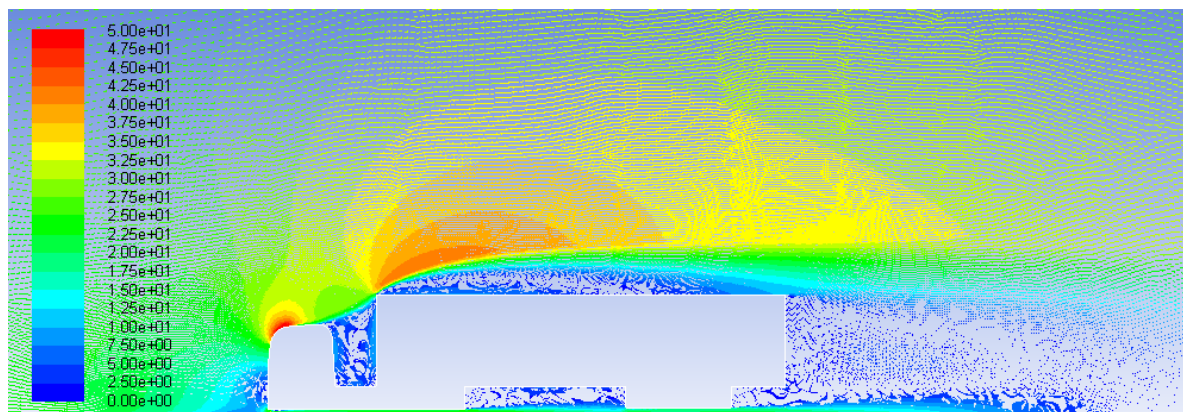


Figura 54 – Vetores de velocidade do caminhão base (m/s)

Fonte: Autoria própria

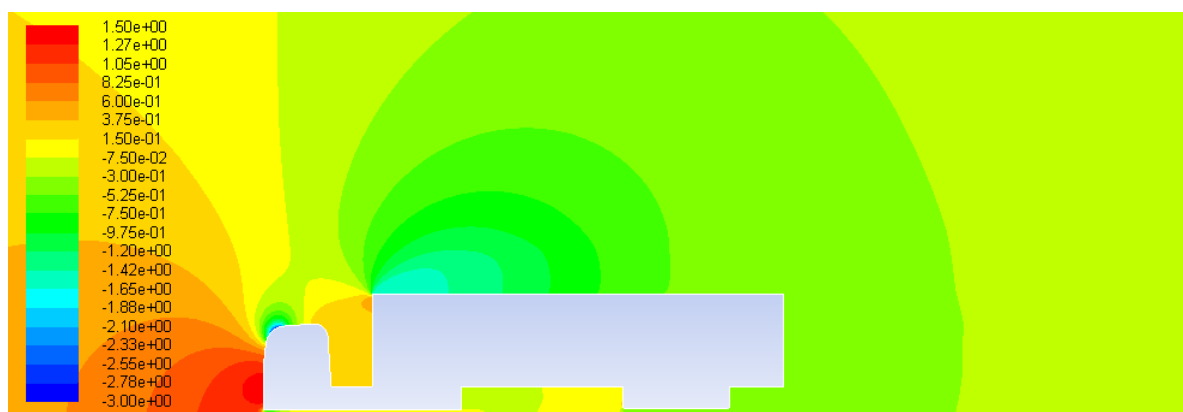


Figura 55 – Coeficiente de pressão do caminhão base

Fonte: Autoria própria

Ao analisar a Fig. 54, é possível verificar regiões turbulentas (regiões em azul) entre o caminhão e o semi-reboque, na parte superior e inferior do semi-reboque, e na região de esteira aerodinâmica localizada na parte posterior do semi-reboque. Regiões turbulentas são instáveis e indicam grandes perdas de energia do escoamento que aumentam o coeficiente de arrasto aerodinâmico (HAKANSSON; LENNGREN, 2010). Portanto, acessórios que minimizem estas regiões tem grande potencial para reduzir significativamente o arrasto aerodinâmico do veículo.

Já ao analisar a Fig. 55, nota-se duas “bolhas” de baixa pressão representadas pelas regiões em azul claro localizadas nas porções superiores iniciais do caminhão e do semi-reboque. A região de baixa pressão do caminhão é um efeito da aceleração do fluxo em função da geometria arredondada da cabine. A aceleração do fluxo pode ser notada pelos vetores em vermelho nesta mesma região da Fig. 54, que representa

um escoamento com velocidade de 50m/s (180km/h). Já a “bolha” de baixa pressão do semi-reboque, é provocada pelo choque do escoamento com a face reta do semi-reboque e, devido à direção do escoamento, se expande até cerca de $\frac{1}{4}$ do comprimento do semi-reboque.

8.2 Caminhão base com defletor de teto

A simulação atendeu ao critério de convergência e o C_d apresentou comportamento estável a partir da 400ª iteração, conforme Figs. (56) e (57).

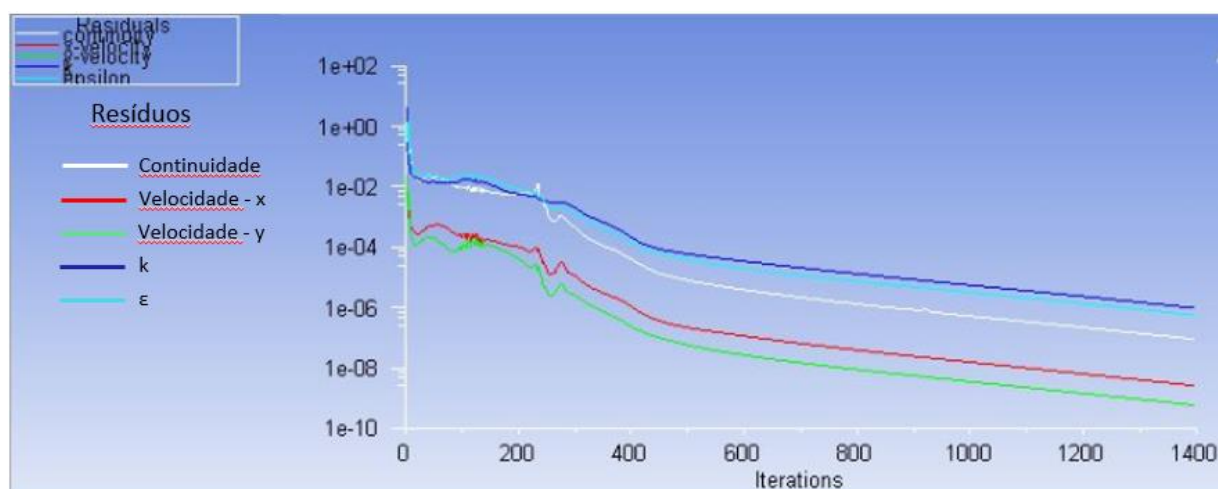


Figura 56 – Gráfico de convergência para caminhão base com defletor de teto (resíduos)

Fonte: Autoria própria

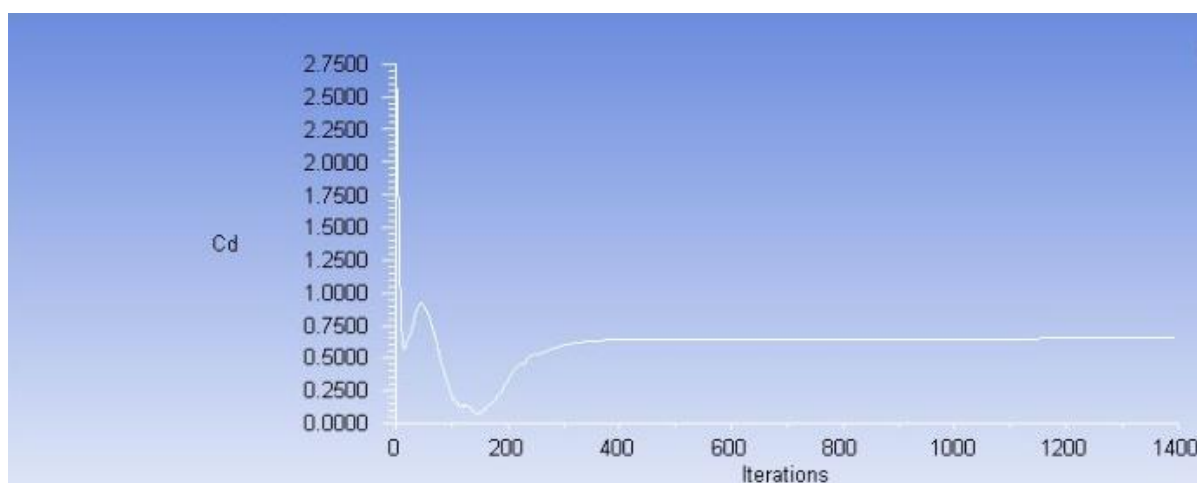


Figura 57 – Gráfico de convergência para caminhão base com defletor de teto (C_d)

Fonte: Autoria própria

As características da simulação, bem como o C_d obtido, encontram-se no Quadro (04) abaixo:

Número de elementos	Numero de nós	Número de iterações até a convergência	C_d
103057	101502	1190	0.65872

Quadro 04 – Resultados da simulação do caminhão base com defletor de teto

Fonte: Autoria própria

As Fig. (61) e (62) mostram os vetores de velocidade e campo de pressão

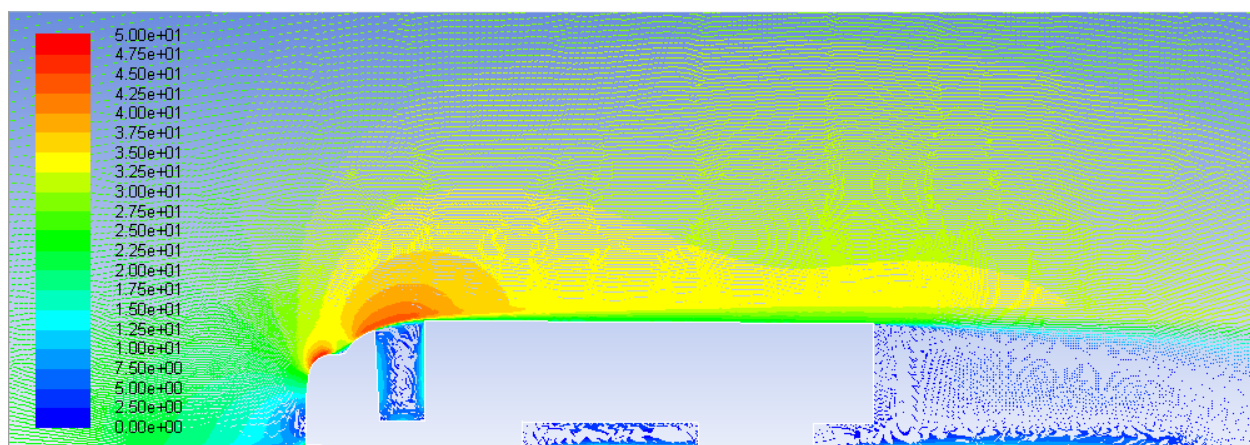


Figura 58 – Vetores de velocidade do caminhão base com defletor de teto (m/s)

Fonte: Autoria própria

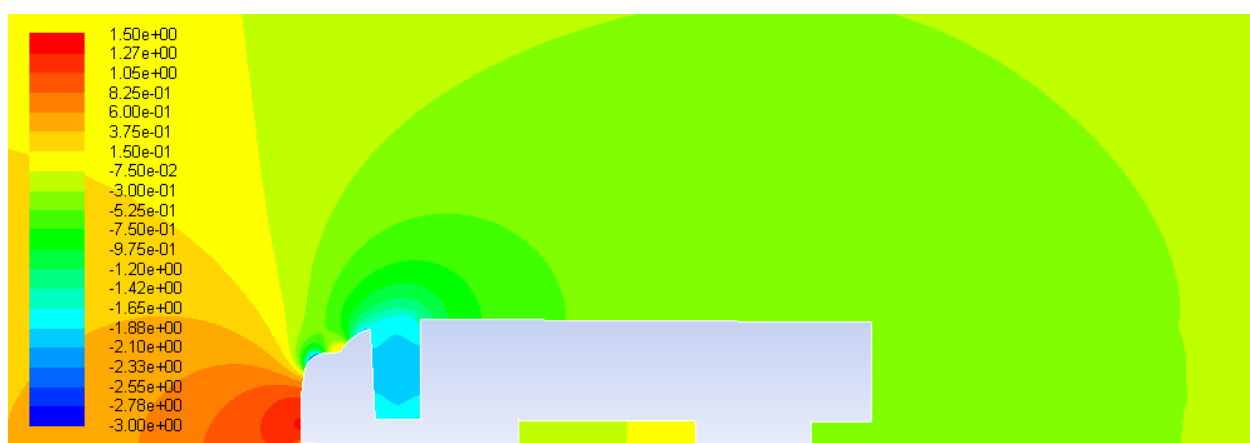


Figura 59 – Coeficiente de pressão do caminhão base com defletor de teto

Fonte: Autoria própria

Ao analisar a Fig. 58, nota-se que o defletor de teto atua diretamente na região turbulenta localizada acima e ao longo de todo o semi-reboque, reduzindo-a com

bastante eficiência a ponto de o escoamento nesta região deixar de ser turbulento e se tornar laminar. Esta é a principal razão para a grande redução notada no C_d (39,11%) quando comparado com o caminhão base. Além disso, ao analisar a Fig. 59, nota-se que a “bolha” de baixa pressão localizada na porção superior inicial do semi-reboque desapareceu e surgiu uma região de baixa pressão localizada no espaço entre o caminhão e o semi-reboque. Isto indica que o escoamento está mais suave nesta região e que ele não mais adentra este espaço entre caminhão e semi-reboque.

8.3 Caminhão base com defletor dianteiro

A simulação atendeu o critério de convergência e o C_d apresentou comportamento estável a partir da 50ª iteração. No início houve um pico no valor de C_d bem superior às demais simulações, mas logo em seguida houve a convergência e estabilização do mesmo, como pode ser observado nas Figs. (60) e (61).

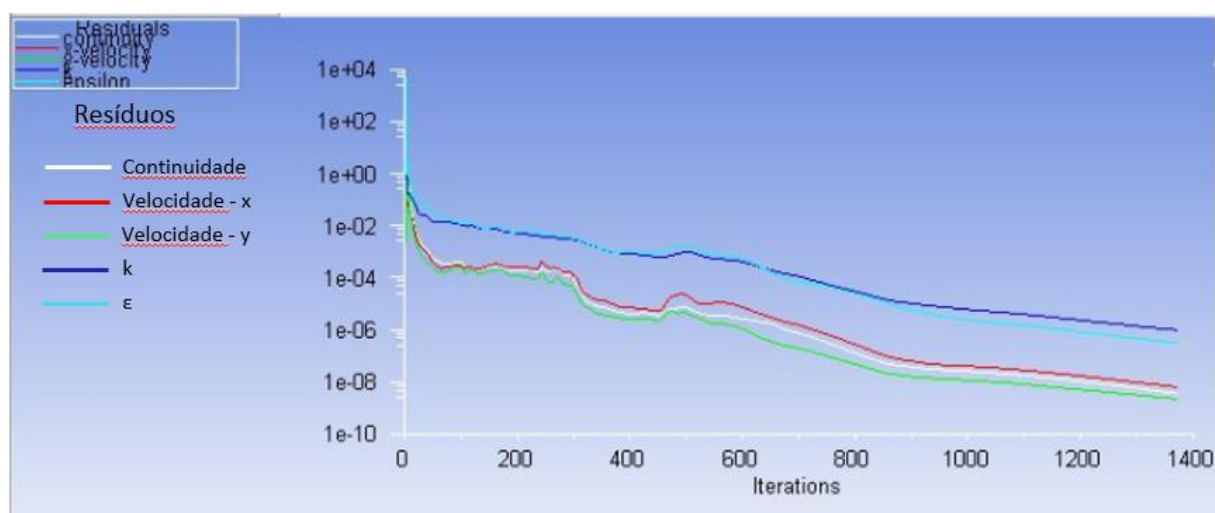


Figura 60 – Gráfico de convergência para caminhão base com defletor dianteiro (resíduos)

Fonte: Autoria própria

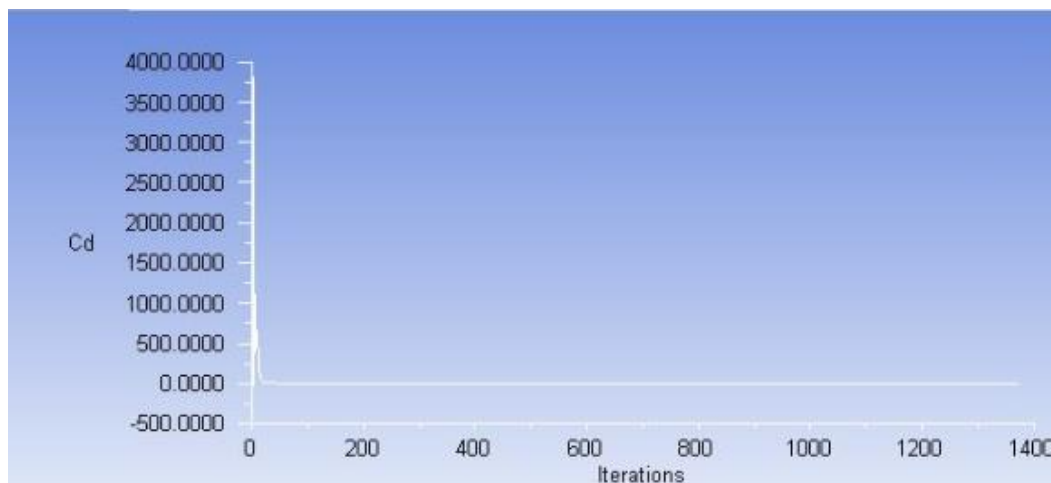


Figura 61 –Gráfico de convergência para caminhão base com defletor dianteiro (C_d)
 Fonte: Autoria própria

As características da simulação, bem como o C_d obtido, encontram-se no Quadro (05):

Número de elementos	Numero de nós	Número de iterações até a convergência	C_d
102570	101044	1340	0.92522

Quadro 05 – Resultados da simulação do caminhão base com defletor dianteiro
 Fonte: Autoria própria

As Figs. (62) e (63), geradas após a simulação que mostram os vetores de velocidade e campo de pressão.

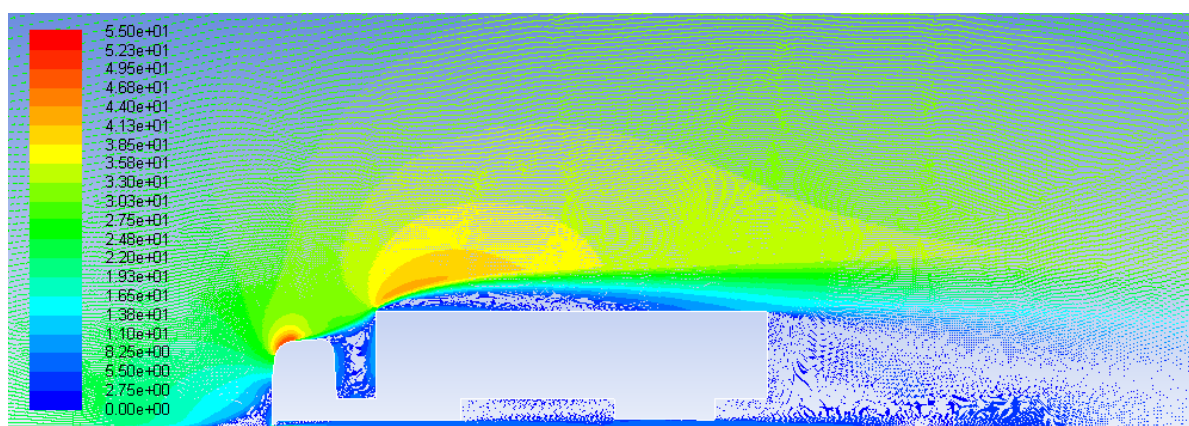


Figura 62 – Vetores de velocidade do caminhão base com defletor dianteiro (m/s)
 Fonte: Autoria própria

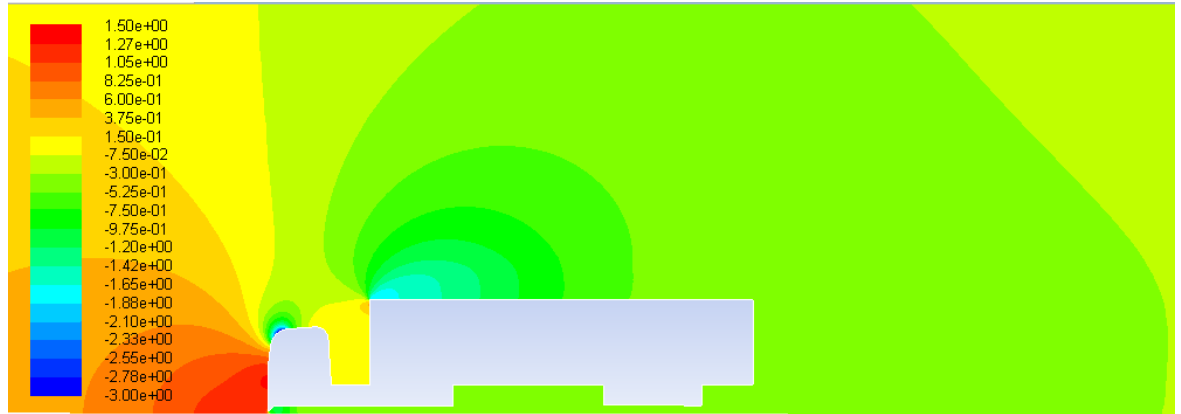


Figura 63 – Coeficiente de pressão do caminhão base com defletor dianteiro

Fonte: Autoria própria

O defletor dianteiro atua restringindo o escoamento na parte inferior do caminhão, como pode ser visualizado na Fig. 62 (região azul indica baixa velocidade do escoamento) e 63 (região verde indica baixo coeficiente de pressão quando comparado com os demais escoamentos). Isto significa que há menos atrito entre o fluido e a parte inferior do caminhão, o que leva à redução do C_d . Também é possível notar na Fig. 62, que esta restrição do escoamento provoca efeitos na região de esteira aerodinâmica através da desaceleração do escoamento na porção inferior da esteira (próximo ao chão), isto diminui a perda de energia do escoamento, o que também ajuda na diminuição do C_d .

8.4 Caminhão base com extensor traseiro

A simulação atendeu o critério de convergência e o C_d apresentou comportamento estável a partir da 600ª iteração, conforme Fig. (64) e (65).

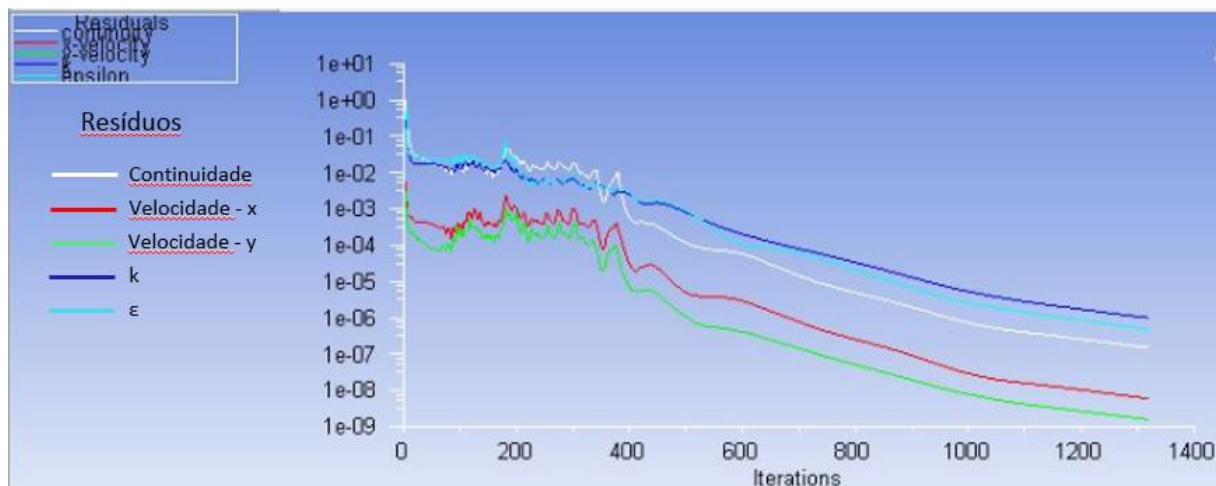


Figura 64 – Gráfico de convergência para caminhão base com extensor traseiro

Fonte: Autoria própria

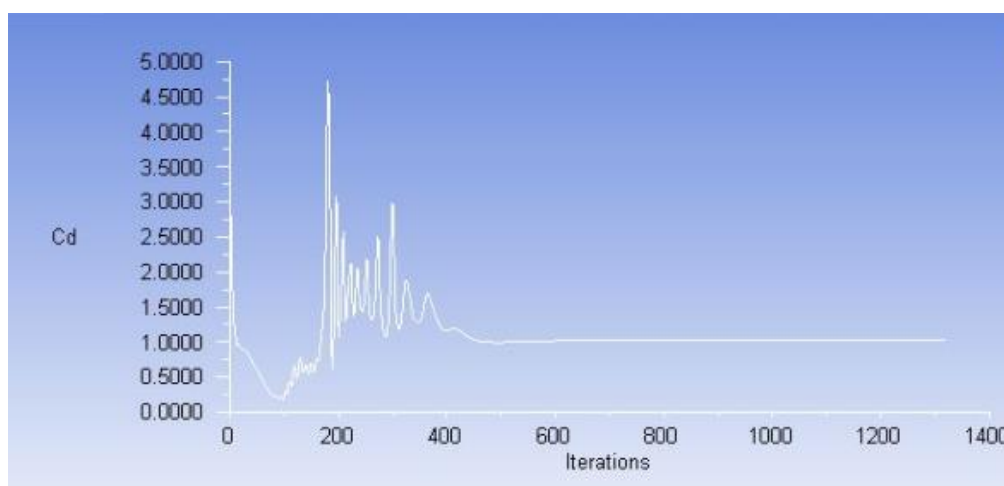


Figura 65 – Gráfico de convergência para caminhão base com extensor traseiro (C_d)

Fonte: Autoria própria

As características da simulação, bem como o C_d obtido, encontram-se no Quadro (06):

Número de elementos	Numero de nós	Número de iterações até a convergência	C_d
103101	101551	1120	0.95278

Quadro 06 – Resultados da simulação para caminhão base com extensor traseiro

Fonte: Autoria própria

As Fig. (66) e (67), geradas após a simulação que mostram os vetores de velocidade e campo de pressão estão a seguir:

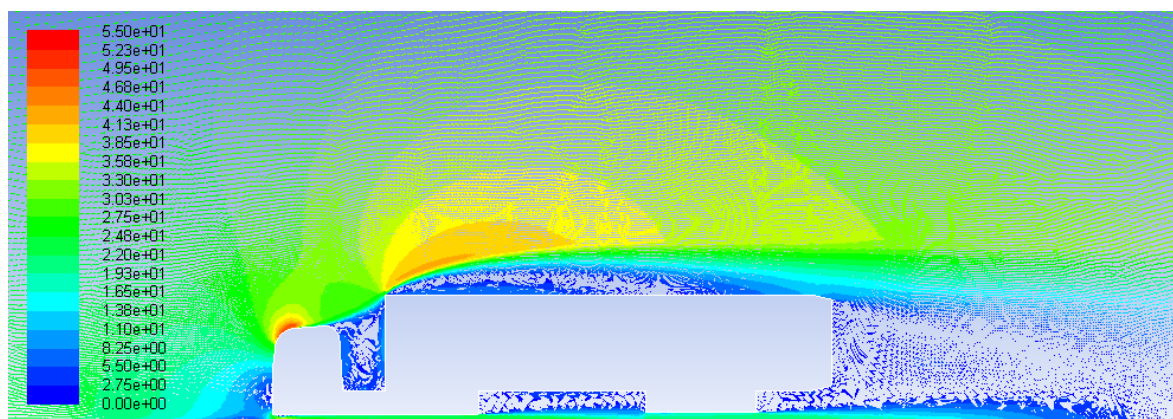


Figura 66 – Vetores de velocidade do caminhão base com extensor traseiro (m/s)

Fonte: Autoria própria

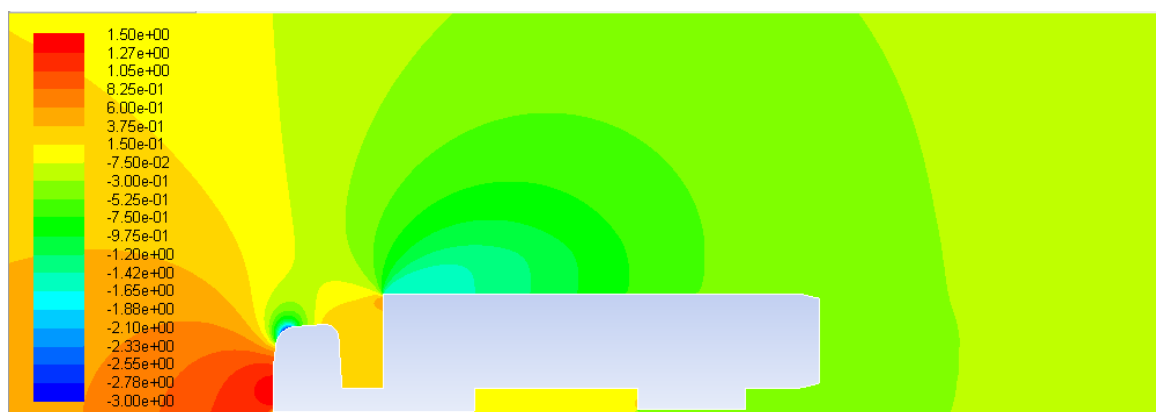


Figura 67 – Coeficiente de pressão do caminhão base com extensor traseiro

Fonte: Autoria própria

O extensor traseiro atua suavizando a esteira aerodinâmica, como pode ser visualizado na Fig. 66. Esta suavização diminui a perda de energia do escoamento, auxiliando na diminuição do C_d . Já o coeficiente de pressão permanece muito similar ao caminhão base, como pode ser visualizado na Fig. 67, indicando que não há mudanças significativas na velocidade do escoamento ao longo do caminhão.

8.5 Caminhão base com redutor de *gap*

A simulação atendeu o critério de convergência e o C_d apresentou comportamento estável a partir da 600ª iteração, conforme as Figs. (68) e (69).

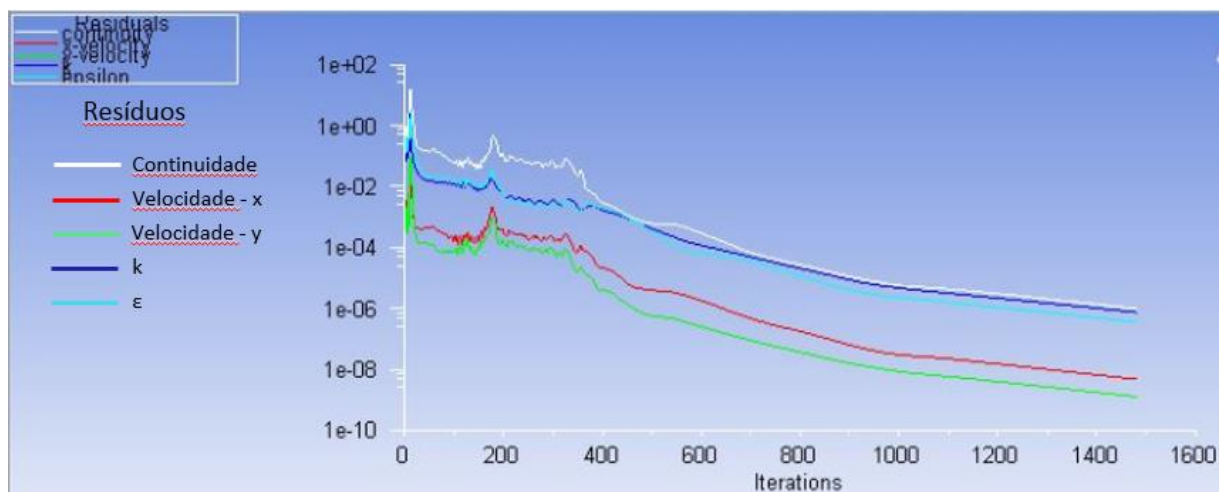


Figura 68 – Gráfico de convergência para caminhão base com redutor de *gap* (resíduos)

Fonte: Autoria própria

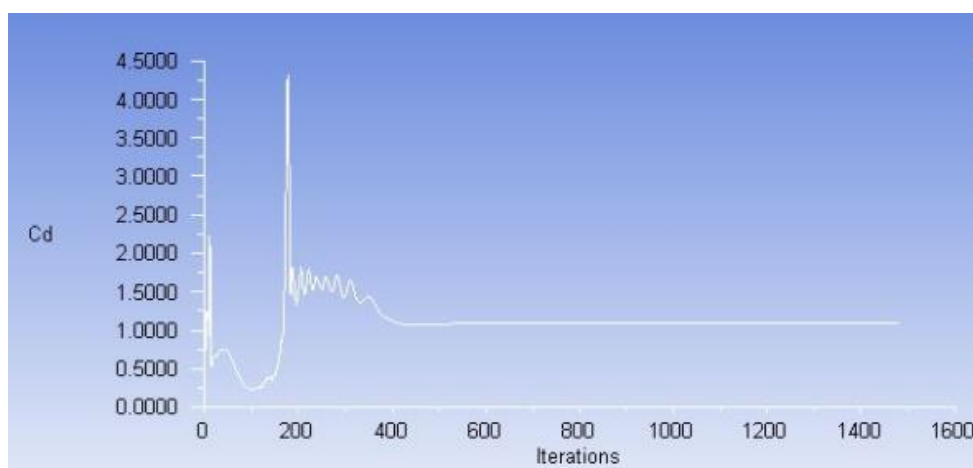


Figura 69 – Gráfico de convergência para caminhão base com redutor de *gap* (C_d)

Fonte: Autoria própria

As características da simulação, bem como o C_d obtido, encontram-se no Quadro (07):

Número de elementos	Numero de nós	Número de iterações até a convergência	C_d
100460	98997	1239	1.02500

Quadro 07 – Resultados da simulação para caminhão base com redutor de *gap*

Fonte: Autoria própria

As Figs. (70) e (71), geradas após a simulação que mostram os vetores de velocidade e campo de pressão.

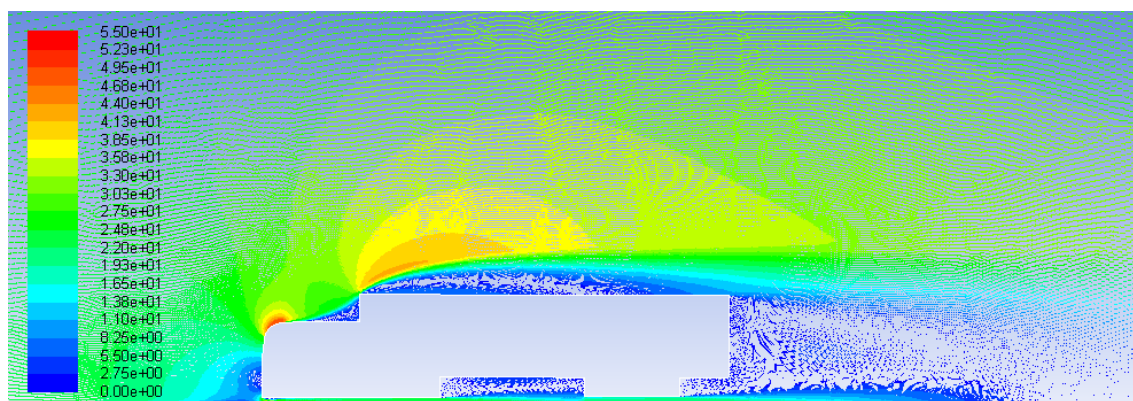


Figura 70 – Vetores de velocidade do caminhão base com redutor de *gap* (m/s)
Fonte: Autoria própria

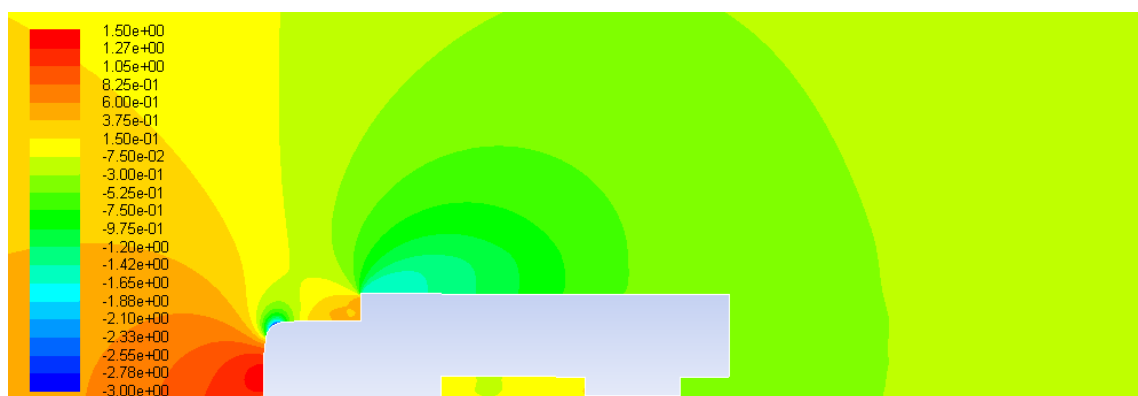


Figura 71 – Coeficiente de pressão do caminhão base com redutor de *gap*
Fonte: Autoria própria

O reduto de gap elimina a região de baixa pressão entre o caminhão e o implemento. Isto significa que a interação entre o ar retido neste região a baixa pressão e velocidade e o escoamento acelerado na parte imediatamente superior não existe mais, contribuindo assim para a redução da perda de energia do escoamento e redução do C_d . Já ao analisar as Figs. 70 e 71, é possível notar que o escoamento permanece muito semelhante ao escoamento em torno do caminhão base, por isto, a redução do C_d não é tão significativa quanto os demais acessórios.

8.6 Comparativo entre acessórios aerodinâmicos

O C_d obtido com a instalação de cada acessório aerodinâmico foi comparado com o C_d do caminhão para avaliar qual foi mais eficaz na redução do arrasto aerodinâmico.

No Quadro (08) tem-se todos os C_d obtidos com as simulações, e na Fig. (72), mostra-se a redução percentual do C_d que os acessórios aerodinâmicos testados proporcionaram em relação ao caminhão base.

Tipo	C_d
Caminhão Base	1.08180
Defletor de teto	0.65872
Defletor dianteiro	0.92522
Extensor traseiro	0.95278
Redutor de gap	1.02500

Quadro 08 – Valores de C_d dos acessórios aerodinâmicos e caminhão base
Fonte: Autoria própria

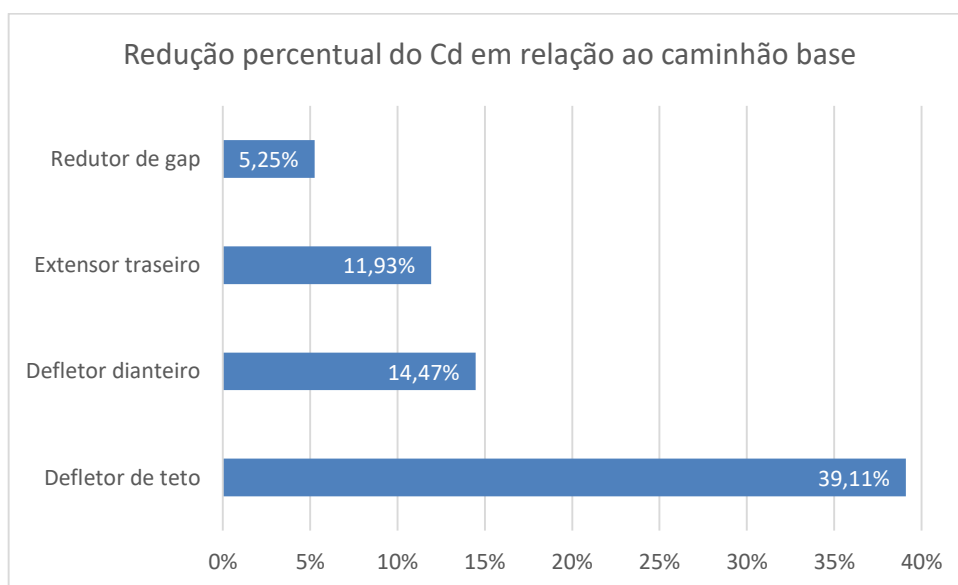


Figura 72 – Redução percentual do C_d em relação ao caminhão base
Fonte: Autoria própria

O percentual de redução obtido com o defletor de teto e extensor traseiro está coerente com o resultado obtido no trabalho de Wang, Hu, Liao e Li (2012), que fez uso de outra geometria de caminhão, onde a redução chegou a 44,31% e 9,31% respectivamente.

Já o extensor dianteiro, no trabalho de Ali e Mahmood (2013), chegou à uma redução do C_d de 12,5%, o que também está coerente com o resultado aqui obtido.

Quanto ao defletor dianteiro, não foi possível encontrar nenhum trabalho similar que o tivesse avaliado. Porém, como os demais acessórios apresentaram resultados coerentes, e o defletor dianteiro utilizou a mesma metodologia dos demais para ser avaliado, seu resultado conseqüentemente também parece ser válido.

A Fig.(72) deixa claro a grande eficácia do defletor de teto em relação aos demais. Já o defletor dianteiro e o extensor traseiro obtiveram desempenho semelhante, enquanto o redutor de *gap* foi o mais modesto de todos os acessórios testados.

O defletor de teto é o acessório aerodinâmico mais comum no mercado brasileiro. Sendo possível inclusive comprar um caminhão novo com ele já instalado. Porém, ele deve ser bem dimensionado, pois caso não seja, pode aumentar o C_d do caminhão ao invés de reduzi-lo (ÇINAR; ARSLAN, 2010).

O defletor dianteiro é uma peça simples e também simples de ser instalada. Oferece grande potencial de redução de arrasto aerodinâmico, porém, é pouco empregado no Brasil. Isto possivelmente é devido à proximidade entre o defletor e o chão, somado ao estado de conservação ruim da maioria da malha rodoviária brasileira, onde 48,3% dela é considerada regular, ruim ou péssima (CNT, 2016). Estes dois fatores degradariam o defletor em pouco tempo. Porém, a pesquisa e desenvolvimento de um defletor dianteiro funcional e resistente poderia ser explorado.

Quanto ao extensor traseiro, que também possui grande potencial de redução de arrasto, nunca foi visto instalado em um caminhão circulando pelas rodovias brasileiras pelos autores do trabalho, bem como o redutor de *gap*. O emprego do extensor traseiro não traz os problemas de conservação que o defletor dianteiro possui e também é um acessório relativamente simples.

O redutor de *gap* é o acessório que oferece a redução de C_d mais modesta de acordo com as simulações. Além disso, há grandes desafios para sua instalação, uma vez que o caminhão e o semi-reboque são articulados. Apesar destes desafios, existem soluções no mercado que já os superaram, como o acessório da Fig. (73) oferecido pela empresa XStream, nos Estados Unidos da América:



Figura 73 – Redutor de gap XStream

Fonte: (XStream Trucking Inc., 2017)

Até o conhecimento dos autores, não existe nenhuma pesquisa a respeito das características da frota de caminhões nacionais no que diz respeito à instalação de acessórios aerodinâmicos. As constatações realizadas a respeito do defletor de teto, defletor dianteiro, extensor traseiro e redutor de *gap*, foram realizadas baseadas na percepção dos autores: brasileiros nativos e que utilizam as rodovias da região de Curitiba para deslocamento diário.

8.7 Avaliação da redução do consumo de combustível

Com o cálculo dos C_d após instalação dos semi-reboques, o passo final é o cálculo da redução percentual do consumo de combustível. Utilizando a eq. (19), foram obtidas as seguintes reduções percentuais para cada semi-reboque, conforme Quadro (09).

Tipo	Redução de consumo (%)
Defletor de teto	22,6
Defletor dianteiro	8,4
Extensor traseiro	6,9
Redutor de gap	3,0

Quadro 09 – Redução percentual do consumo de combustível para cada semi-reboque

Fonte: Autoria própria

Como esperado, o semi-reboque que causa a maior redução de arrasto é o que gera maior redução de consumo de combustível.

A redução de combustível constatada elucida a enorme importância e eficiência que acessórios aerodinâmicos possuem, importância esta que por muitas vezes é negligenciada por proprietários de caminhões e transportadoras.

No trabalho de Borges e Reis (2014), é mostrado com bastante robustez e detalhes os gastos operacionais de uma grande transportadora desde o seguro até a folha de pagamento de funcionários. Neste trabalho, foi mostrado o gasto com combustível como responsável por 21% dos custos operacionais totais. Com esse dado e tomando como exemplo o defletor de teto, acessório mais eficiente, há um potencial de redução no custo do frete de aproximadamente 5%, considerando os dados referentes àquele ano. Com o custo de implementação desse acessório alternando entre R\$1.500,00 e R\$2.500,00, o retorno do investimento se daria em um curto período de tempo.

Os ganhos financeiros que a instalação de um acessório aerodinâmico adequado e bem dimensionado podem trazer parece não estar muito disseminado no Brasil, e trabalhos como este visam trazer a notoriedade que esta questão merece.

9. CONCLUSÃO

Já era de conhecimento a dependência do país com relação à modalidade rodoviária de transporte, mas os impactos que pequenas alterações aerodinâmicas (tais como defletor frontal e extensor traseiro) tiveram no C_d foram surpreendentes.

A redução do C_d obtida foi de 5,25% para o redutor de *gap*, chegando a até 39,11% para o defletor de teto, isto mostra que mesmo o acessório mais ineficiente na redução do C_d é capaz de prover resultados significativos. A dinâmica envolvida no escoamento foi abordada para explicar os fenômenos envolvidos que justificavam a redução do C_d e porque um acessório é mais eficiente que o outro. Esta análise deve ser realizada a fim de guiar o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de qualquer projeto de acessório aerodinâmico. Também ficou claro o grande potencial de ganho financeiro com a instalação de acessórios aerodinâmicos em caminhões, onde a redução no preço do frete pode chegar a 5% para uma grande transportadora.

Outro cenário que chamou a atenção foi o de pioneirismo, até o conhecimento dos autores, do desenvolvimento deste projeto no cenário brasileiro, uma vez que foram encontrados apenas referenciais bibliográficos estrangeiros, mostrando a carência de literatura e informação do país, o que torna o projeto deveras relevante para o conhecimento e desenvolvimento socioeconômico e ecológico da nação.

No que tange a modelagem numérica em si, a qualidade da malha se mostrou determinante para a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos. O modelo desenvolvido se mostrou robusto e apropriado para simulações de escoamento em caminhões, além de ter alcançado uma estreita correlação com a realidade. O custo operacional para realização das simulações foi insignificante devido à utilização da versão gratuita do *software* (versão *student*), porém, uma licença comercial profissional pode chegar à R\$250 000,00. Ou seja, a utilização do software para fins comerciais exige bastante domínio e conhecimento da ferramenta para justificar a aquisição de uma licença deste valor. Talvez por isto o desenvolvimento de acessórios aerodinâmicos seja tão tímido no Brasil.

O sucesso alcançado pelo modelo desenvolvido, somado aos conhecimentos adquiridos durante o desenvolvimento do trabalho, preencheram uma importante

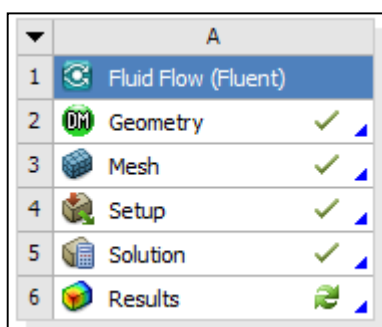
lacuna deixada pela formação acadêmica e agregou uma competência desejada no meio profissional.

Como complemento deste trabalho, a análise de outros tipos de acessórios ou geometrias de caminhão poderá ser realizado. Outra opção é a realização das simulações dos acessórios em 3 dimensões, para então avaliar com precisão o erro que a aproximação em 2 dimensões gera.

Apêndice A – Configuração do software para simulação

O processo de modelagem numérica é complexo. Então para facilitar o entendimento e a exposição deste processo, ele será abordado na ordem cronológica do desenvolvimento. Esta ordem cronológica é definida pelo próprio software, onde só é possível avançar uma etapa quando a anterior foi devidamente concluída.

Esta ordem cronológica é dividida em 4 partes principais:



Etapas da simulação no software

Fonte: Autoria própria

- Geometria (*Geometry*):
 - Definição do tipo de geometria 1D, 2D ou 3D;
 - Definição do domínio;
 - Definição da geometria do caminhão que será simulada.
- Malha (*mesh*):
 - Definição dos parâmetros da malha;
 - Geração da malha;
 - Definição das paredes, chão, face de entrada e face de saída do escoamento;
 - Definição do contorno do caminhão;
- Configuração (*setup*):
 - Definição do modelo de turbulência;
 - Definição do tipo de escoamento;
 - Definição do fluido utilizado no escoamento, suas propriedades e velocidade;
 - Definição das condições de contorno;
 - Definição dos valores de referência;
 - Definição dos métodos de solução;
 - Definição do critério de convergência;
- Solução e resultados (*solution and results*):
 - Obtenção do resultado da simulação;
 - Geração de gráficos e imagens com os resultados da simulação.

1. Geometria

1.1 Modelo geométrico

O primeiro passo para iniciar a simulação é a definição da geometria do caminhão que será simulado.

Os detalhes de cada geometria foram mostrados e explicados no capítulo 5.

1.2 Domínio

Definida a geometria, é necessário então definir o domínio físico, que é a região que engloba o caminhão e a vizinhança. Tal domínio deve ser definido de modo que as fronteiras não perturbem o escoamento. Rodi (1997) definiu que as dimensões ideais para simulações em software são as seguintes:

a – 3,5 vezes a altura total do caminhão

b – 10 vezes a altura total do caminhão

c – 6 vezes a altura total do caminhão



Domínio para simulação no software

Fonte: Autoria própria

A relação ditada por Rodi (1997) foi utilizada para a definição do domínio de todas as simulações realizadas neste trabalho.

2 Malha

2.1 Tipo de malha

A definição da malha é uma das partes mais importantes do processo de simulação. Ela tem impacto direto na convergência da simulação e na precisão do resultado.

Dentre os tipos de elementos de malhas possíveis de se usar para simulações em 2 dimensões pode-se citar:

Quadrilateral dominante

Triangular

Multizona quad/tri

Neste trabalho foi adotada uma malha estruturada, quadrilateral dominante pois, além de ter permitido a convergência do modelo numérico nas simulações com mais rapidez, é a mais indicada para o tipo de escoamento abordado neste trabalho (LANFRIT, 2005).

2.2 Dados da malha

O tamanho dos elementos de malha cresce, conforme se afastam das arestas do caminhão, a uma taxa definida de 2% até um tamanho máximo padrão definido no software ($7,5134 \times 10^{-2} \text{m}^2$). A exceção fica para a tampa traseira do caminhão, cuja taxa de crescimento foi definida em 1% por ser tratar da região de esteira aerodinâmica.

As principais características da malha adotada podem ser visualizadas a seguir:

[-] Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (3.7567e-004 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (3.7567e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (3.7567e-002 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (7.5134e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.020
Minimum Edge Length	2.1936e-002 m
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	Quadrilateral Dominant
Element Midside Nodes	Use Global Setting
Free Face Mesh Type	Quad/Tri

Características da malha utilizada

Fonte: Autoria própria

3 Configuração

Nesta etapa, é necessário informar ao software todas as considerações que se deseja fazer em relação ao escoamento e método iterativo. Estas entradas serão abordadas a seguir.

3.1 Escoamento e domínio

Assim que se abre esta etapa no software, é necessário definir quatro informações básicas a partir do conhecimento prévio que já se tem sobre o escoamento.

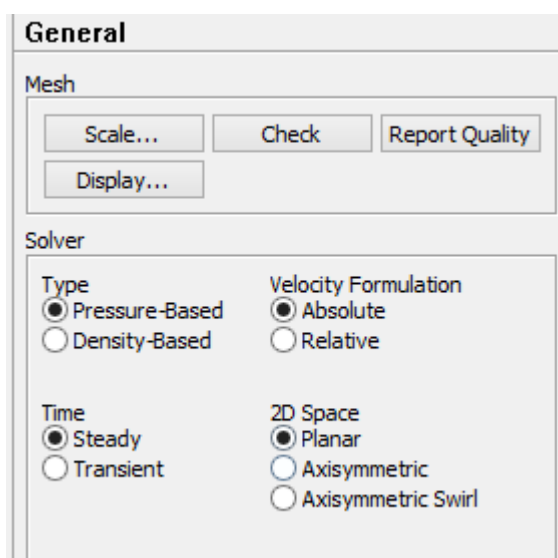
A primeira delas é o tipo de regime do escoamento, se ele é permanente ou transiente. Como no caso aqui estudado as propriedades do fluido não variam com o tempo, ele é considerado permanente.

A segunda tem relação com a compressibilidade do fluido durante o escoamento, por se tratar de um baixo número de Mach, foi considerado que o fluido é incompressível. Para escoamentos incompressíveis, o tipo *pressure-based* é o mais recomendado (ANSYS INC, 2013).

A terceira diz respeito ao domínio. Como não há nenhum tipo de simetria o espaço é chamado de planar.

A quarta e última é relacionada à formulação da velocidade. Como o escoamento não rotaciona na maior parte do domínio, a formulação “Velocidade absoluta” é a mais adequada para as simulações tratadas neste trabalho (ANSYS INC, 2013).

Esta parte da configuração fica da seguinte forma no software:



Configuração geral

Fonte: Autoria própria

3.2 Modelo de turbulência

O fato do escoamento ser turbulento, demanda a escolha de um modelo de turbulência adequado para a simulação. Conforme explicado no capítulo 4, que tratou a modelagem matemática, o modelo de turbulência mais adequado para o tipo de escoamento aqui tratado é o $k-\epsilon$.

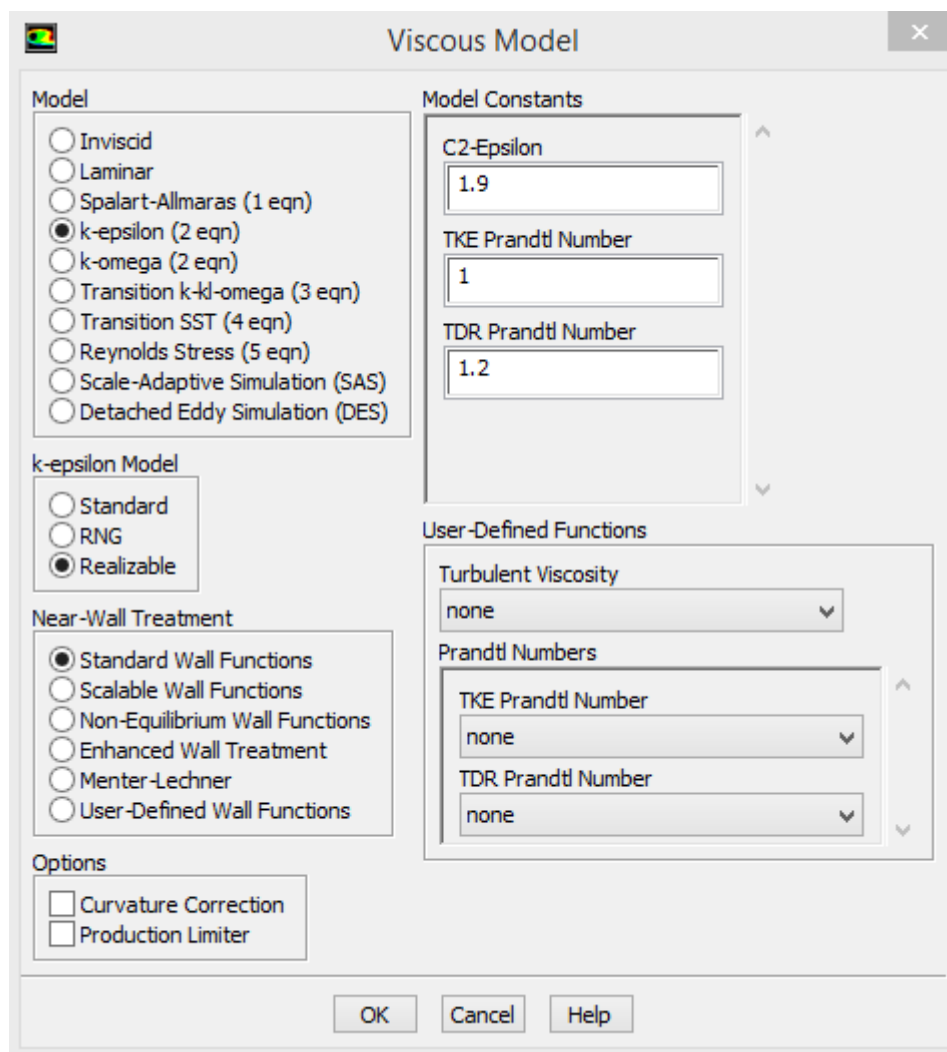
Porém no software, não basta apenas definir o modelo de turbulência, é preciso definir também outros parâmetros inerentes ao modelo escolhido.

O primeiro parâmetro a ser definido diz respeito ao modelo de turbulência, se será o padrão, RNG ou *realizable*. O modelo *realizable* proporciona um rendimento superior aos demais para o tipo de escoamento aqui tratado (ANSYS INC, 2013). Além disso, ele facilitou a convergência e melhorou a acurácia nas simulações teste preliminares. As constantes do modelo escolhido permaneceram com os valores nativos do programa pois se mostraram adequadas nas simulações teste preliminares. Caso houvesse algum problema de convergência, elas teriam de ser retrabalhadas.

O software permite a escolha de uma função específica para tratar as regiões próximas à parede. Isto é necessário e aperfeiçoa os resultados da simulação pois, nestas regiões, em escoamentos turbulentos, o escoamento é significativamente afetado pela presença da parede. Para escoamentos turbulentos, além do atrito com a parede já esperado, em regiões muito próximas à parede o amortecimento viscoso reduz as flutuações da velocidade tangencial, enquanto o bloqueio cinemático reduz as flutuações normais (ANSYS INC, 2013). Por isto a parede inferior do túnel de vento simulado (chão) também teve o refino de malha levado em consideração, conforme explicado anteriormente.

A função escolhida para tratar as regiões próximas às paredes foi a padrão (*standard*). A escolha se justifica por ser a função mais utilizada neste tipo de simulação, tendo sido empregada com sucesso em outros trabalhos deste tipo (BERNARDES JÚNIOR, 2017).

Esta parte da configuração fica da seguinte forma no software:

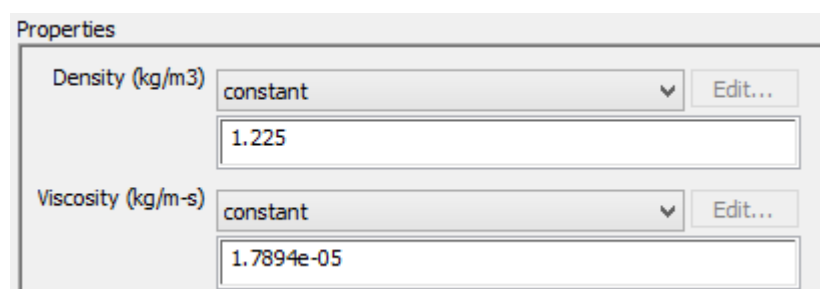


Modelo de turbulência

Fonte: Autoria própria

3.3 Material do fluido de escoamento para validação

O material escolhido como fluido de escoamento é o ar atmosférico. O valor de massa específica e viscosidade do material são os valores padrão do software. Os valores padrão estão próximos aos valores encontrados na literatura (FOX, 2009).



Fluido de escoamento para validação

Fonte: Autoria própria

3.4 Material do fluido de escoamento para demais simulações

Devido às considerações realizadas no capítulo 6.6, o fluido para as demais simulações possui as propriedades abaixo:

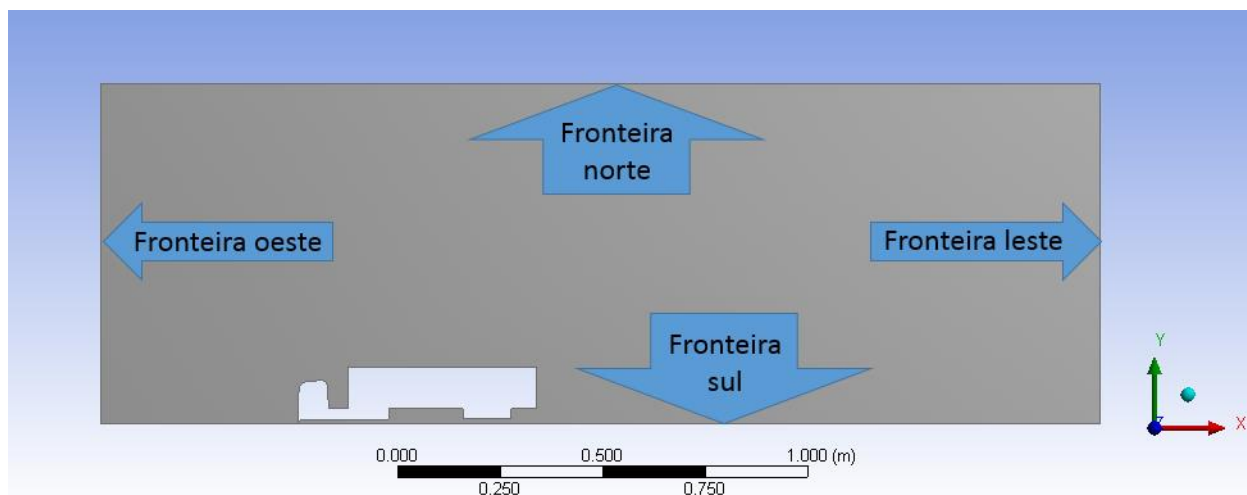
Properties	
Density (kg/m ³)	constant <input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text" value="1.225"/>
Viscosity (kg/m-s)	constant <input type="button" value="Edit..."/>
	<input type="text" value="5.59188e-07"/>

Fluido de escoamento para validação

Fonte: Autoria própria

3.5 Condições de contorno

Aqui são informadas as condições de contorno do escoamento. Como estamos tratando um túnel de vento com uma entrada e uma saída e sem troca térmica, as condições de contorno serão definidas apenas para as faces de entrada e saída.



Fronteiras do domínio numérico

Fonte: Autoria própria

3.5.1 Condições de contorno fronteira oeste

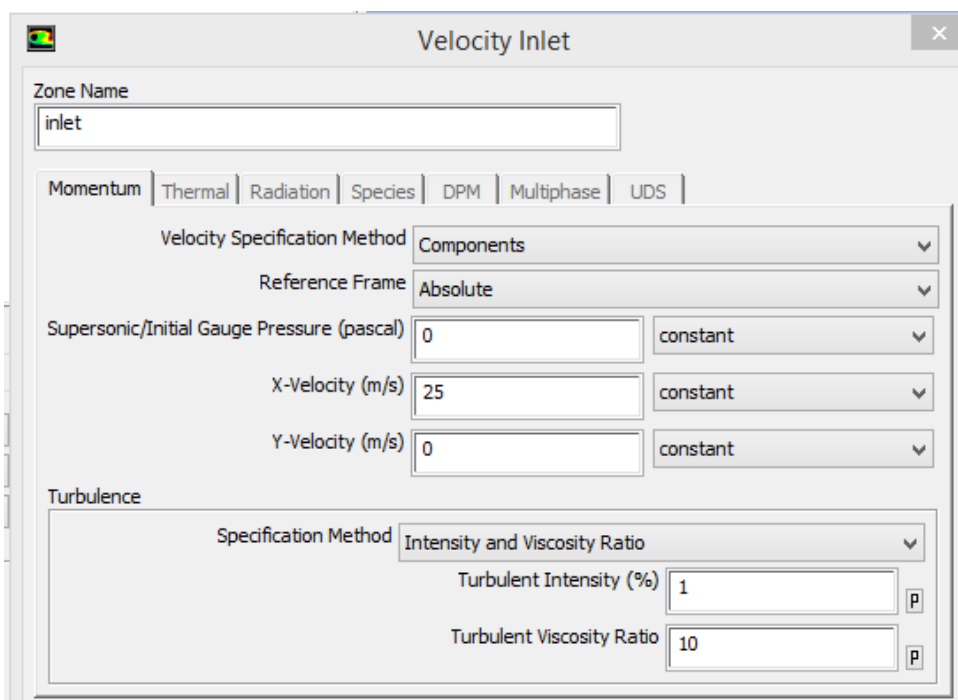
As simulações serão todas realizadas com velocidade de 25m/s (90km/h) que é a velocidade máxima permitida para caminhões de acordo com a legislação vigente (LEI nº13.281, 2016).

O componente de velocidade terá valor 0 em todas as direções exceto na direção x, onde o valor será 25m/s. Isso significa que não há ângulo de guinada (que não será simulado em virtude do tempo disponível para a realização das simulações).

A pressão manométrica foi definida como sendo zero por se tratar de um escoamento em pressão atmosférica.

A intensidade da turbulência foi definida como sendo 1% em todas as simulações. Este valor foi definido por ser o mesmo encontrado no túnel de vento do artigo usado para validação (BAYINDIRLI; AKANSU; SALMAN, 2016).

Já a taxa de viscosidade turbulenta, que é a viscosidade turbulenta dividida pela viscosidade laminar, foi definida com o valor nativo do software. Esta taxa é variável no escoamento, mas o software define um valor fixo para ser possível alcançar uma solução estável. O valor nativo apresentou bons resultados nas simulações teste realizadas, e por isso foi adotado para todas as simulações com bons resultados também.

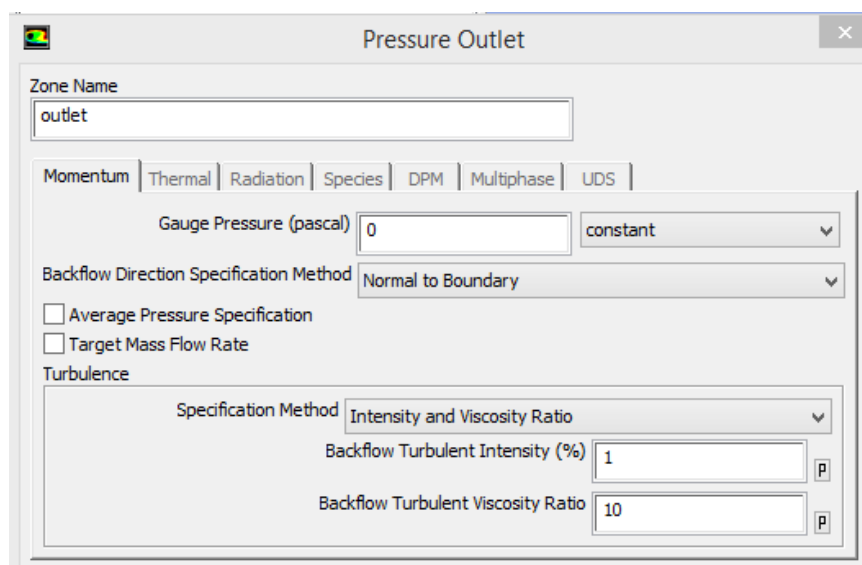


Condições de contorno na fronteira oeste

Fonte: Autoria própria

3.5.2 Condições de contorno fronteira leste

Para a face de saída, foi definido que não há variação de pressão em relação à entrada. Isto é garantido pelo tamanho do domínio definido (RODI, 1997). Os valores relacionados à turbulência foram mantidos iguais aos da face de entrada pelos mesmos motivos que levaram à definição destes valores.



Condições de contorno na fronteira leste

Fonte: Autoria própria

3.5.3 Condições de contorno fronteira norte e sul

Parede estacionária

Sem cisalhamento

Constante de rugosidade: 0.5 (valor padrão do software)

The image shows the 'Wall Boundary Conditions' panel in ANSYS Fluent. The 'Momentum' tab is selected. The 'Wall Motion' section has 'Stationary Wall' selected. The 'Motion' section has 'Relative to Adjacent Cell Zone' checked. The 'Shear Condition' section has 'No Slip' selected. The 'Wall Roughness' section has 'Roughness Height (m)' set to 0 and 'Roughness Constant' set to 0.5, both with 'constant' dropdown menus.

Condições de contorno nas fronteiras norte e sul

Fonte: Autoria própria

3.6 Valores de referência

Os valores de referência são utilizados pelo software para calcular derivadas físicas e coeficientes não dimensionais, como o coeficiente de arrasto aerodinâmico, por exemplo.

Os valores de referência são computados da fronteira oeste, mas é necessário definir a área frontal do caminhão que varia conforme os acessórios instalados e se é o caminhão de validação ou não. A área frontal de cada caminhão está especificada no capítulo 5.

A seguir está um exemplo de como fica esta parte da configuração. Os dois parâmetros podem variar entre uma simulação e outra, dependendo do modelo geométrico, é a área frontal e a viscosidade.

Reference Values	
Compute from	inlet
Reference Values	
Area (m ²)	0.01041625
Density (kg/m ³)	1.225
Depth (m)	1
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	288.16
Velocity (m/s)	25
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Valores de referência

Fonte: Autoria própria

4 Solução

Após a definição dos parâmetros inerentes ao escoamento em si, como: propriedades do fluido, condições de contorno e modelo de turbulência, é necessário definir os parâmetros referentes ao cálculo numérico em si. Esta etapa é realizada no mesmo ambiente da etapa anterior, porém, em outra aba.

Existem 4 etapas principais aqui: Métodos de solução, monitores e critério de convergência, inicializador de solução e execução do cálculo. Cada etapa será abordada a seguir.

4.1 Métodos de solução

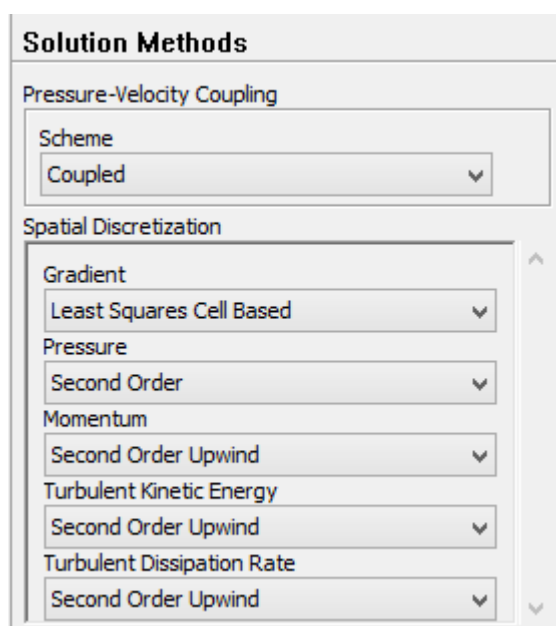
A primeira definição a ser realizada é a do algoritmo utilizado no cálculo numérico. Dentre os algoritmos disponíveis para os sistemas “*pressure-based*”, como os deste trabalho, o algoritmo “*coupled*” é o mais adequado.

A segunda definição diz respeito à discretização espacial dos termos de convecção nas equações da solução.

A avaliação do gradiente será pelo método dos mínimos quadrados devido à alta precisão associada e à menor capacidade de processamento necessária (ANSYS INC, 2013). Além disto, este método apresentou os melhores resultados e taxa de convergência nas simulações teste realizadas.

Na discretização espacial, os termos de pressão, momento, energia cinética da turbulência e taxa de dissipação específica da turbulência foram alterados para segundo grau. Com isto, a precisão e velocidade de convergência da solução foram aumentados.

Esta parte da configuração fica da seguinte forma no software:



Métodos de solução

Fonte: Autoria própria

4.2 Controles de solução

Os controles de solução permitem configurar parâmetros de solução comuns.

O número de Courant do escoamento, quando o tipo “*pressure-based*” de solução é escolhido associado ou esquema “*Coupled*” definido no item anterior, é usado para estabilizar a convergência.

Os fatores explícitos de relaxação, para o esquema tipo “*Coupled*” definem a relaxação explícita entre sub-iterações de momento e pressão. Já os fatores de sub-relaxação se aplicam a todas as equações que estão sendo resolvidas pela solução “*pressure-based*”.

Todos os itens mencionados acima foram usados na configuração nativa do software e apresentaram um bom comportamento nas simulações realizadas.

Solution Controls

Flow Courant Number
200

Explicit Relaxation Factors
Momentum 0.5
Pressure 0.5

Under-Relaxation Factors

Density
1

Body Forces
1

Turbulent Kinetic Energy
0.8

Turbulent Dissipation Rate
0.8

Turbulent Viscosity
1

Controles de solução

Fonte: Autoria própria

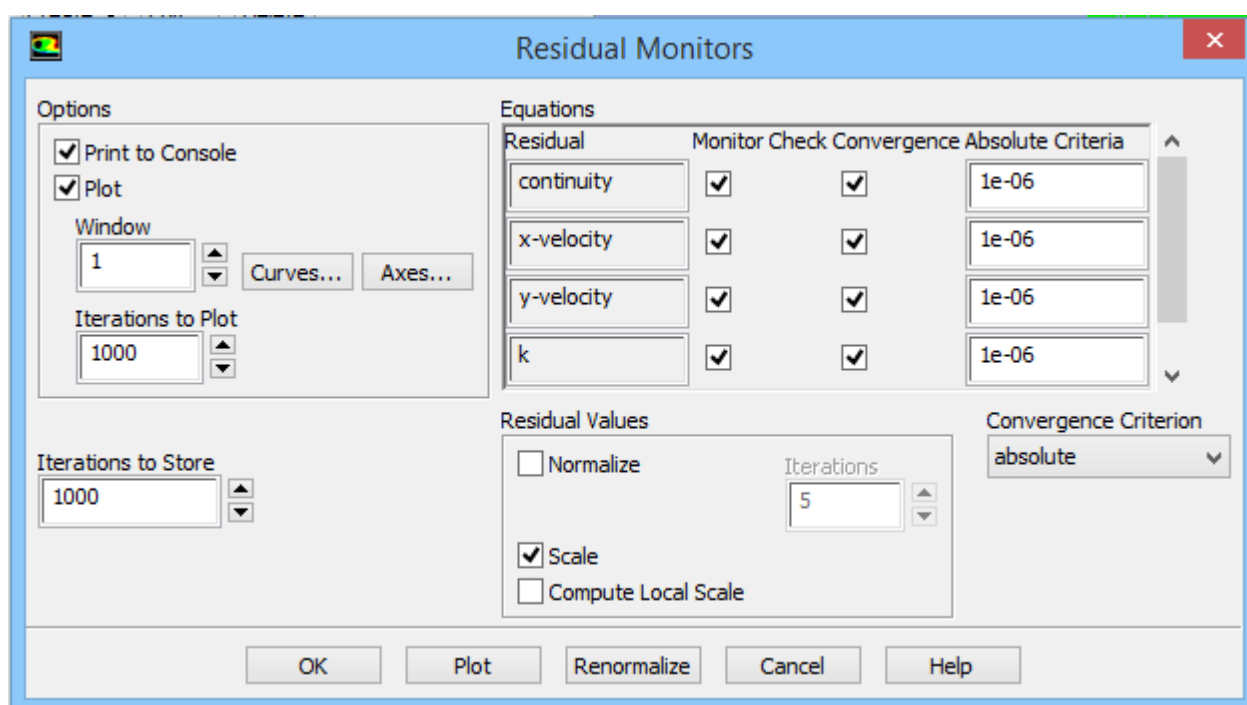
4.3 Monitores e critério de convergência

O gerenciador de convergência permite definir o critério de convergência que encerrará a simulação. É dito que a simulação convergiu quando todos os critérios de convergência configurados foram atingidos.

O principal e mais usado critério de convergência se chama resíduo. Resíduo se refere à medida do desequilíbrio local de cada equação de volume de controle. É

a medida mais importante de convergência no que se refere diretamente a se as equações foram resolvidas com precisão.

Para problemas como os tratados neste trabalho, o critério de convergência padrão do software e também o recomendado para os resíduos é 10^{-3} (ANSYS INC, 2013). Porém, durante os testes realizados, notou-se que algumas simulações convergiam quando o critério de convergência para os resíduos era 10^{-3} , mas não quando o critério era 10^{-6} . Portanto, para proporcionar maior precisão e robustez às simulações aqui realizadas, o critério de convergência adotado para os resíduos foi de 10^{-6} .



Critério de convergência

Fonte: Autoria própria

Para avaliar o critério de convergência e o comportamento geral da simulação em tempo real, é possível configurar quais parâmetros serão plotados num gráfico iteração por iteração. Para as simulações aqui realizadas, foi plotado o gráfico dos resíduos e do coeficiente de arrasto aerodinâmico.

Todas as simulações realizadas aqui só foram consideradas válidas após o atingimento do critério de convergência e também da avaliação da convergência do coeficiente de arrasto aerodinâmico.

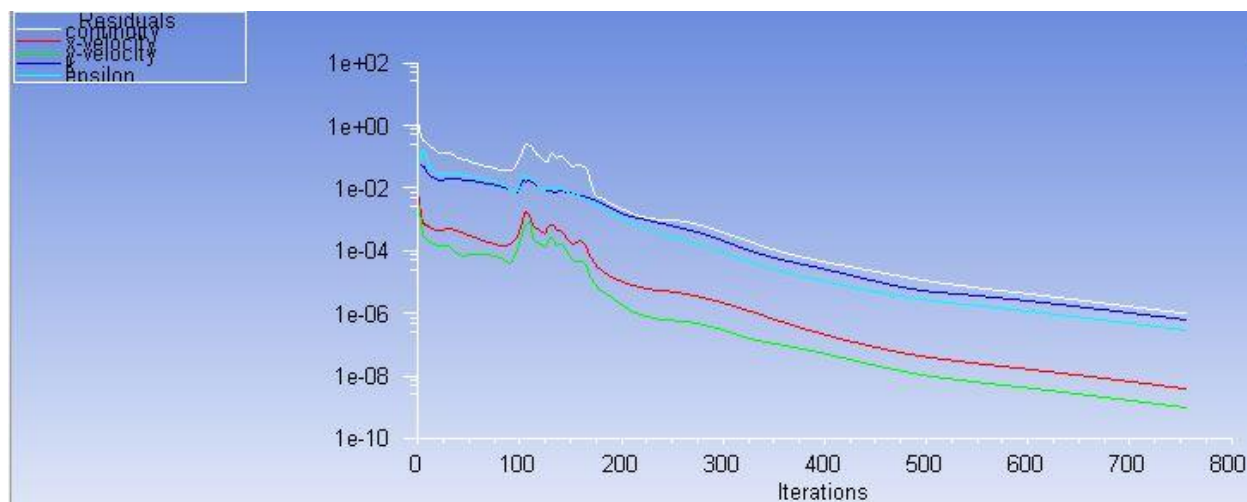


Gráfico dos resíduos de uma simulação que convergiu

Fonte: Autoria própria

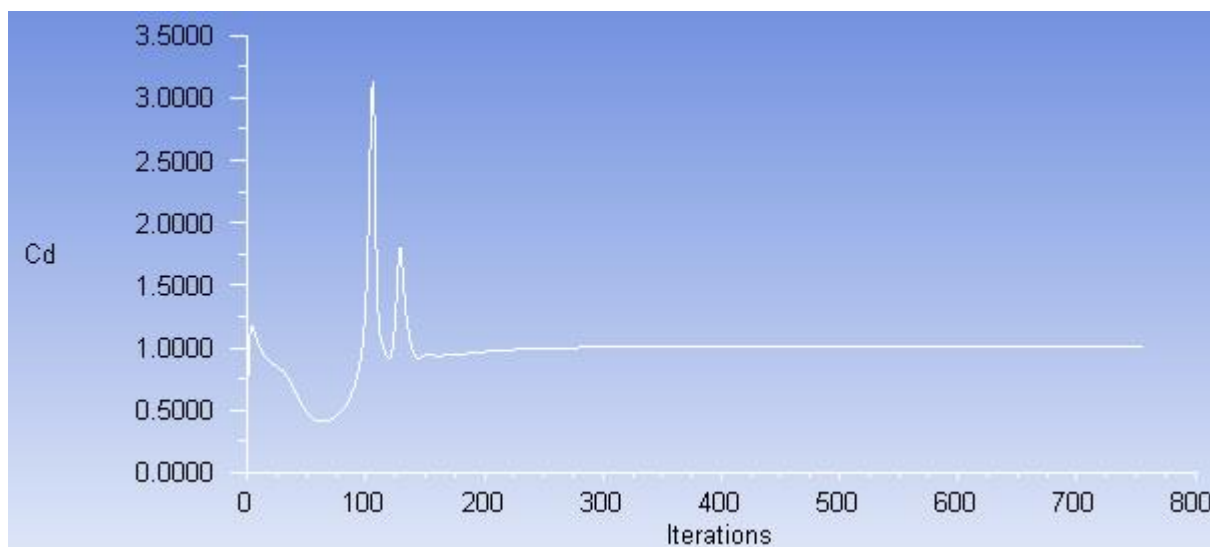


Gráfico do coeficiente de arrasto aerodinâmico de uma simulação que convergiu

Fonte: Autoria própria

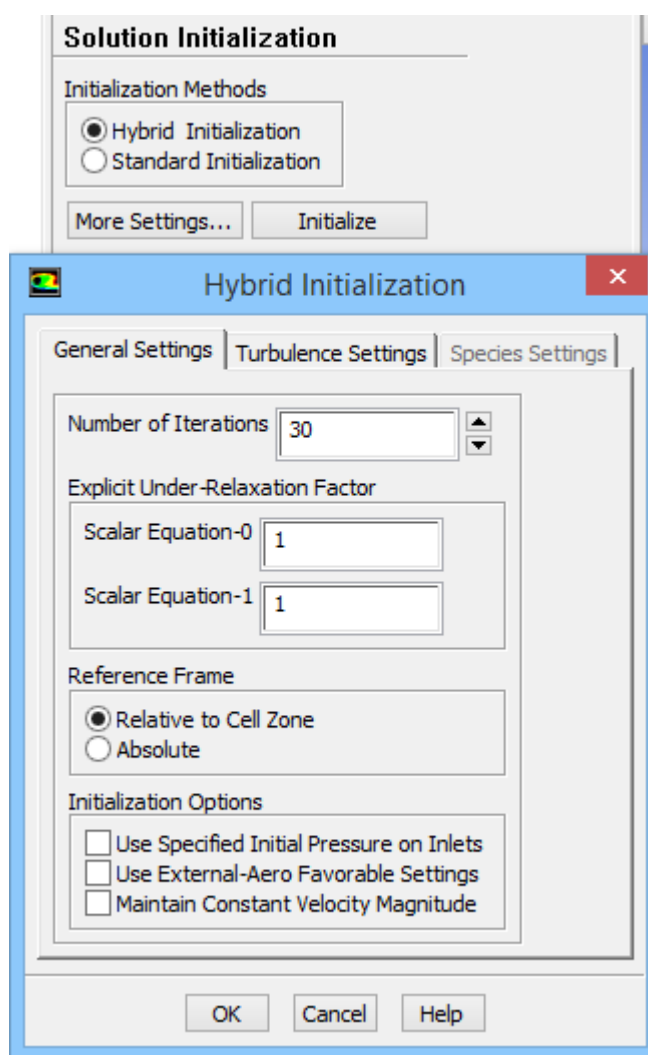
4.4 Inicializador de solução

O inicializador de solução permite a definição de valores para as variáveis do escoamento que serão utilizadas para a primeira iteração (ANSYS INC, 2013). Um inicializador bem ajustado reduz o tempo de convergência.

O método de inicialização escolhido foi o híbrido. Este método define os valores de inicialização através de interpolações onde, as variáveis como temperatura,

turbulência e etc., são corrigidas automaticamente baseado em valores médios do domínio. Ao contrário do método padrão, onde o usuário define os valores das variáveis.

No método híbrido, é possível definir o número de iterações. Após alguns testes, chegou-se ao número de 30 iterações como sendo suficiente para uma boa primeira iteração. Os parâmetros inerentes à turbulência são iguais aos parâmetros definidos nas condições de contorno.



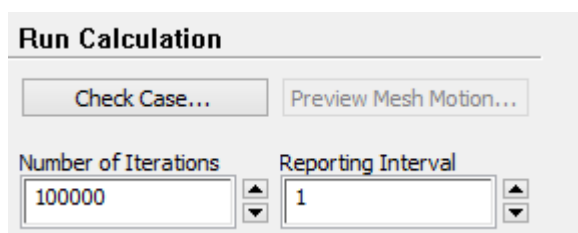
Inicializador de solução

Fonte: Autoria própria

4.5 Execução do cálculo numérico

A execução do cálculo é um processo bastante simples. Após a rodar o inicializador de soluções, basta definir o número de iterações limite para o cálculo numérico em si e iniciá-lo.

Como deseja-se que a simulação pare quando atingir o critério de convergência e não quando o número de iterações limite for alcançado, foi utilizado um valor bem alto:

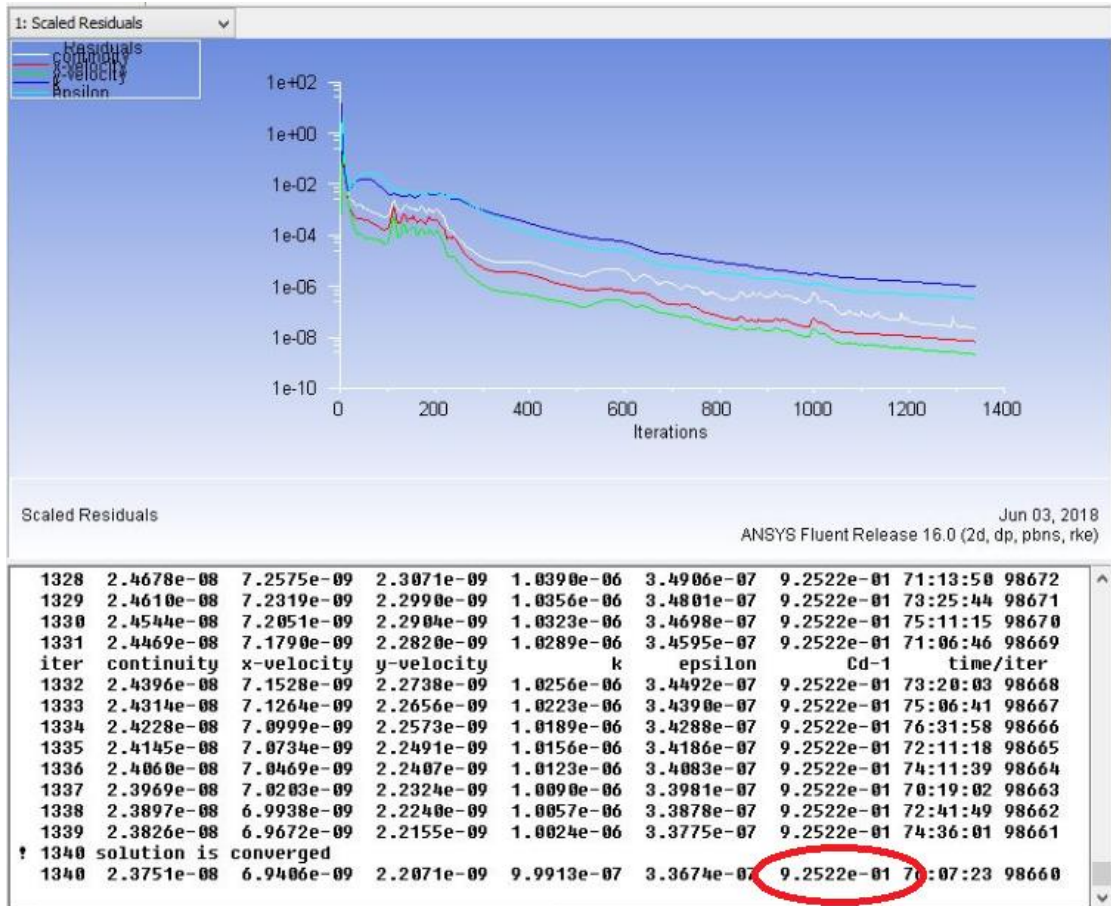


Execução do cálculo numérico

Fonte: Autoria própria

4.6 Resultado

Quando a simulação houver convergido, o resultado estará expresso conforme destacado a seguir:



Resultado da simulação

Fonte: Autoria própria

REFERÊNCIAS

AIRPLEX: CAR, UTE, TRUCK ACCESSORIES. **Truck – Air Deflector (Roof)**. Auckland, 2014. Disponível em: <http://www.airplex.co.nz/truck-air-deflector> Acesso em 05/07/2017.

AIT MOUSSA, Abdellah; FISCHER, Justin; YADAV, Rohan. **Aerodynamic Drag Reduction for a Generic Truck Using Geometrically Optimized Rear Cabin Bumps**. Journal of Engineering, v. 2015, 2015.

ANDERSON JR, John David. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica: Introdução ao Voo**. São Paulo, 2015.

ANDRADE, Fernando Oliveira de. **Modelos de Turbulência RANS**. 2018.

ANSYS INC. **ANSYS Fluent Theory Guide - Release 15.0**. Canonsburg [s.n.]. 2013.

BARTH, T.J.; JESPERSON, D.C. **The Design and Application of Upwind Schemes on Unstructured Meshes**. 1989.

BAYINDIRLI, Cihan; AKANSU, Yahya Erka; SALMAN, Mustafa Sahir. **The Determination of Aerodynamic Drag Coefficient Of Truck and Trailer Model By Wind Tunnel Tests**. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, v. 5, n. 2, p. 53-60, 2016.

BERNARDES JR, Eli José. **Análise Numérica Fluidodinâmica Estrutural da Asa Dianteira de um Carro de Fórmula 1**. João Pessoa, 2017.

BOHN, M.; SOVRAN, G. **Tractive-Energy-Based Formulae for the Impact of Aerodynamics on Fuel Economy Over the EPA Driving Schedules**. Detroit, 1983.

BROWAND, F.; HAMMACHE, M.; MICHAELIAN, M.. **Aerodynamic Forces on Truck Models, Including Two Trucks in Tandem**. California, 2001.

BROWAND, F.. **Reducing Aerodynamic Drag and Fuel Consumption**. Stanford, 2015.

CARREGARI, André Luiz. **Estudo do escoamento de ar sobre a carroceria de um ônibus usando um programa de CFD e comparação com dados experimentais**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CASA CIVIL SUBCHEFIA PARA ASSUNTOS JURÍDICOS. **Lei Nº 13.281, de 4 de Maio de 2016**. Brasília, 2016.

CASAL, Ivan González. **Aerodynamic Analysis and Improvement of a Roof Box Car**. Kraków, 2014.

CINAR, C.; ARSLAN, M. Ozgur. **Aerodynamic optimization Study For Roof Spoiler And Side Extender Parts Of Ford Heavy Duty Truck Using Cfd Tools**. European Conference on Computational Fluid Dynamics. 2010.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT aponta 58,2% das rodovias com problemas**. 2016. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Imprensa/noticia/pesquisa-cnt-aponta-58-das-rodovias-com-problemas> Acesso em 13/06/2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Rodoviário**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Modal/modal-rodoviario-cnt> Acesso em 22/04/2017.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Resolução Nº 210, de 13 de Novembro de 2006**. Brasília, 2006.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO. **Resolução Nº 318, de 05 de Junho de 2009**. Brasília, 2009.

CROWE, C. T.; ELGER, D. F.; WILLIAMS, B. C.; ROBERSON, A.. **Engineering Fluid Mechanics**. New York, 2009.

CUNHA, Leonardo Jorge Brasil de Freitas. **Proposição de Um Método de Estimativa de Coeficiente de Pressão em Aberturas de Edificações Naturalmente Ventiladas com Uso do CFD**. 2010.

DEPARTMENT OF ENERGY. **21st Century Truck Partnership Roadmap**. Washington, 2006. Disponível em: https://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f8/21ctp_roadmap_2007.pdf Acesso em: 07/05/2017.

DIRETORIA DE INFRA-ESTRUTURA RODOVIÁRIA. **Quadeo de Fabricacntes de Veículos**. 2008.

DOYLE, Josh; HARTFIELD, Roy; ROY, Christopher. **Aerodynamic optimization for freight trucks using a genetic algorithm and CFD**. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2008. p. 323.

EL-ALTI, Mohammad et al. **Experimental and computational studies of active flow control on a model truck-trailer**. EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 2012. p.01012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Demanda de Energia**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf> Acesso em: 22/04/2017

FENABRAVE. **Informativo – Emplacamentos**. São Paulo, 2018.

FOIAS, C., MANLEY, O., ROSA, R., TEMAM, R.; **Navier-Stokes Equations and Turbulence**. 2001.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T.. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro, 2009.

F1 TECHNICAL. **What is the drag coefficient in an F-1 car?** Disponível em: <https://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=1861> Acesso em 13/06/2018.

GOVARDHANA, M., REDDY, B. Veerabhadra. **Estimation of Drag and Lift on Ahmed Body Using CFD Analysis**. 2014.

GUIA DO TRC. **Quadro resumo da Legislação de Pesos e Dimensões**. 2018.

HSU, Fu-Hung; DAVIS, Roger. **Design Optimization of Tractor-Trailers for Drag Reduction**. 27th AIAA Applied Aerodynamics Conference. 2009. p. 3963.

HU, X.; Li, T.; LIAO, L.; Wang, X. **Numerical Simulation to Investigate Influence of Additional Devices on Aerodynamic Drag for Heavy-duty Commercial Truck.** Changchun, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Força de Arrasto e Eficiência Energética.** 2011.

JORNAL DO CARRO. **Bandeirinhas Aumentam o Consumo em 3%.** São Paulo, 2014. Disponível em: <http://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/bandeirinhas-aumentam-consumo-em-3/> Acesso em 22/04/2017.

KULKARNI, Shreenidhi R. et al. **Aerodynamic Simulation of A Truck To Reduce The Drag Force.** Internation Journal of Engineering Research. 2015. p. 613-617.

KULKARNI, Siddharth Suhas; CHAPMAN, Craig; SHAH, Hanifa. **Computational Fluid Dynamics (CFD) Mesh Independency Study of A Straight Blade Horizontal Axis Tidal Turbine.** Birmingham, 2016.

LANFRIT, Marco. **Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT.** 2005.

LENNGREN, Malin; HÅKANSSON, Christoffer. **CFD Analysis of Aerodynamic Trailer Devices for Drag Reduction.** 2010.

MADUGUND, Dinesh; GARRISON, Anna. **Class 8 Truck External Aerodynamics,** 2009.

MALMBERG, Johan. **Improving Aerodynamic Performance of a Truck: a Numerical Based Analysis**. 2015.

MCAULIFFE, Brian R. **Improving the aerodynamic efficiency of heavy duty vehicles: wind tunnel test results of trailer-based drag-reduction technologies**. 2015.

MENTER, F. **Zonal two equation kw turbulence models for aerodynamic flows**. 23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference. 1993. p. 2906.

MUGNAINI, C. M.. **Aerodynamic Drag Reduction of a Tractor Trailer Using Vortex Generators: A Computational Fluid Dynamic Study**. Sacramento, 2015.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL et al. **Technologies and approaches to reducing the fuel consumption of medium-and heavy-duty vehicles**. National Academies Press, 2010.

PAIVA, F.; COSTA, A.; Barros, R. C. **Sobre a Determinação de Coeficientes de Arrasto de Perfis de Secções Angulosas, Isolados ou em Grupo, Através da Dinâmica de Fluidos Computacional**. Porto, 2014.

PATTEN, Jeff et al. **Review of aerodynamic drag reduction devices for heavy trucks and buses**. National Research Council Canada NRC Technical Report CSTT-HVC-TR, v. 205, 2012.

PERSSON, Tobias. **Wind Tunnel Effects on Truck Aerodynamica and Soiling**. 2017.

PEVITT, C. et al. **A Computational Simulation of Aerodynamic Drag Reductions for Heavy Commercial Vehicles**. 18th Australasian Fluid Mechanics Conference Launceston. Australia. 2012. p. 191-194.

POINTER, W. David; SOFU, Tanju; WEBER, David. **Commercial CFD Code Validation for Heavy-Vehicle External Aerodynamics Simulation**. The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains. Springer Berlin Heidelberg, 2004. p. 473-483.

REED, Nicolas Robert. **A Qualitative Experimental Study of Drag Reduction Devices for Tractor Trailers with Ground Effects**. 2014.

RODI, W. **Comparison of LES and RANS Calculations of the Flow around Bluff Bodies,**” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997.

SCANIA. **Especificação Técnica R 440 LA6x4 RB662+R660**. 2014.

SHUKRI, I. A.; AKRAM, A. M. **Improvement of aerodynamics characteristic of heavy trucks**. 3rd International Conference on Trends in Mechanical and Industrial Engineering (ICTMIE'2013) January. 2013. p. 8-9.

SILVA, V. B.; REIS, G. E.; **Kit Ativo Para Redução de Arrasto Aerodinâmico em Veículos Pesados**. 2014.

SKRUCANY, Tomas; SARKAN, Branislav; GNAP, Jozef. **Influence of Aerodynamics Trailer Devices on Drag Reduction Measured in a Wind Tunnel**. *EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOSC*, v. 18, n. 1, p. 151, 2016.

STORMS, Bruce L. et al. **A Summary of the Experimental Results For a Generic Tractor-Trailer in the Ames Research Center 7-by 10-foot and 12-foot Wind tunnels.** 2006.

TODA MATÉRIA. **Propriedades do ar.** Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/propriedades-do-ar/> Acesso em 28/05/2018.

TRANSPORT TOPICS. **XStream Launches Articulated Device to Close Tractor-Trailer Gap.** 2013. Disponível em: <http://www.ttnews.com/articles/xstream-launches-articulated-device-close-tractor-trailer-gap> Acesso em 13/06/2018.

TRUCANO, Timothy G.; OBERKAMPF, William L. **Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics.** Albuquerque, 2002.

WILCOX, David C. **Basic Fluid Mechanics.** DCW industries, 2000.

WOODROOFFE, John. **Reducing Truck Fuel Use and Emissions: Tires, Aerodynamics, Engine Efficiency, and Size and Weight Regulations.** 2014.