



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS GREGÓRIO ABREU

LEANDRO GOMES BORGES

**UMA REVISÃO SOBRE O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE
CAMINHÕES POR MEIO DE PROJETO AERODINÂMICO**

UBERLÂNDIA

2022

CARLOS GREGÓRIO ABREU

LEANDRO GOMES BORGES

**UMA REVISÃO SOBRE O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE
CAMINHÕES POR MEIO DE PROJETO AERODINÂMICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal
de Uberlândia como requisito para
obtenção do título de graduação em
Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Rodrigo de Andrade

Eng. Daniel Lacerda de Andrade

Eng. Gustavo Cardoso Soares

Uberlândia, 29 de abril de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico este estudo, bem como minha conclusão na Graduação em Engenharia Mecânica ofertada pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia a cada pessoa que contribuiu minimamente ou grandiosamente na minha evolução como pessoa desde a minha infância até aqui. Agradeço em especial aos meus amigos de faculdade que no decorrer dos anos se tornaram uma família para mim. Agradeço minha esposa Isabela por não medir esforços em me incentivar a retomar os estudos e ter se tornado minha parceira para a vida. Sou grato aos meus irmãos por tudo que me ensinaram e compartilharam comigo. Agradeço minha mãe e pai por todo carinho, atenção e amor que me dedicaram em toda minha vida, além de todo o trabalho duro que tiveram dia e noite para me prover condições extremamente favoráveis para meu desenvolvimento acadêmico e emocional. Este sonho é compartilhado com vocês.

Leandro Gomes Borges

RESUMO

Quando comparados a veículos de passeio, os caminhões pouco sofreram alterações pelas fabricantes em relação ao seu formato durante os anos. Considerando o estudo do efeito aerodinâmico sobre os veículos, o principal motivo das fabricantes de caminhões não priorizarem a aerodinâmica dos mesmo em relação a outras atribuições técnicas, é a aleatoriedade das carretas que futuramente serão puxadas por tais veículos. Estas terão um papel determinante no arrasto que o conjunto formado por cavalo mecânico e semirreboque irá sofrer ao se deslocar através do ar. Além disso, tal questão tem uma consequência de alto impacto em diversos setores da sociedade, que é o gasto energético necessário para o transporte de cargas diversas. Dessa forma, o presente trabalho visa desenvolver um estudo bibliográfico com investigação do tema através da análise do uso da energia de combustível nos transportes rodoviários, além de, especificamente, analisar o benefício aerodinâmico que o uso de defletores de ar promovem em um caminhão, com consequente economia de combustível, visto a representatividade que o transporte de carga rodoviário possui no território brasileiro e a importância de dispositivos que diminuem o consumo energético.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 5 |
| 2. METODOLOGIA | 6 |
| 3. CONSUMO ENERGÉTICO DO SETOR DE TRANSPORTE DE CARGAS NO BRASIL | 7 |
| 4. HISTÓRIA DO CAMINHÃO | 10 |
| 5. CONSUMO ENERGÉTICO DE UM CAMINHÃO | 16 |
| 6. ESCOAMENTO, ARRASTO E AERODINÂMICA | 21 |
| 6.1 Escoamento laminar, turbulento e transitório | 23 |
| 6.2 Visualização do escoamento..... | 24 |
| 6.3 Arrasto aerodinâmico | 26 |
| 7. MELHORIAS AERODINÂMICAS PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA | 29 |
| 7.1 Aerodinâmica da cabine | 32 |
| 7.1.1 Defletores | 33 |
| 7.1.2 Espelhos | 35 |
| 7.1.3 Para-choques | 37 |
| 7.1.4 Outros acessórios..... | 37 |
| 7.2 Gestão do fluxo de ar ao redor do vão cabine-reboque..... | 38 |
| 7.2.1 Montados na cabine..... | 40 |
| 7.2.2 Montados no reboque | 41 |
| 7.3 Gestão do fluxo de ar sob o reboque | 42 |
| 7.3.1 Saias laterais | 43 |
| 7.3.2 Caixas na parte inferior do reboque | 43 |
| 7.4 Gestão do fluxo de ar na traseira do reboque | 44 |
| 7.4.1 Painéis de extensão | 45 |
| 8. EXPERIMENTO COM UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM EM TUNEL DE VENTO | 45 |
| 9. CONCLUSÃO | 49 |
| 10. BIBLIOGRAFIA | 51 |

1 INTRODUÇÃO

O consumo de combustível e a emissão de poluentes no ar atmosférico são preocupações constantes tanto para o desenvolvimento de novos projetos veiculares, quanto nas modificações de projetos de modelos já existentes. Durante a elaboração e condução desses projetos, se faz uma profunda análise e um estudo minucioso das características aerodinâmicas dos veículos, uma vez que por meio dessas análises, se tem condições de estabelecer requisitos de projetos ou equipamentos, capazes de proporcionar ganhos energéticos e auxiliar na diminuição dos efeitos das forças aerodinâmicas sobre o veículo projetado, o que tem relação direta com consumo de combustível e conseqüentemente com a emissão de poluentes.

Assim, a redução no consumo de combustível e o aumento da eficiência energética são dois dos principais objetivos do estudo da aerodinâmica veicular. Para dar mais clareza sobre, podemos definir a aerodinâmica como o estudo do comportamento do ar sobre uma determinada superfície, ou seja, a aerodinâmica veicular trata do escoamento de gases (especialmente ar) sobre os automóveis, tanto em baixas como em altas velocidades.

A melhoria de um projeto aerodinâmico se faz imprescindível, especialmente, para veículos de grande porte, como os utilizados para transporte de cargas, uma vez que esses veículos sofrem com maior intensidade os efeitos das forças aerodinâmicas, por conta da grande área de superfície que esses automóveis possuem.

Essa melhoria se torna ainda mais relevante quando se analisa a matriz de transporte de cargas de países como o Brasil, onde boa parte da movimentação de produtos e mercadorias é via terrestre e realizada por caminhões e carretas. Esta inquestionável importância do setor e o peso deste quanto ao consumo energético vai ao encontro de todas as limitações existentes atualmente, sejam estas no âmbito comercial ou no ambiental (IPCC, 2014). Isto ocorre, pois, o setor possui primordialmente os derivados de petróleo como principal fonte de energia.

O modal de transporte rodoviário consome mais energia durante suas operações que os modais ferroviário e aquaviário, respectivamente segundo e terceiro de maior relevância no transporte de cargas no país. Esse maior consumo faz com que a modalidade de transporte rodoviária seja a mais poluente por tonelada

transportada e a menos eficiente energeticamente, o que reflete na tarifa do frete, e por consequência no custo operacional, especialmente diante de cenários de elevado preço dos derivados de petróleo.

Diante dessa situação, qualquer economia de combustível feita individualmente, contribui para que, no aspecto geral, o somatório dessas reduções gere uma expressiva redução do custo operacional do setor. Além dos custos operacionais, as políticas governamentais para reduzir a poluição do ar e a emissão de Gases de efeito Estufa (GEE), somadas as políticas de eficiência e independência energética, fazem com que a indústria automobilística busque constantemente alternativas para que os veículos produzidos tenham um menor consumo de combustível.

A partir do entendimento do escoamento do ar em volta do automóvel a indústria automotiva tem melhores condições de desenvolver soluções que reduzam o consumo de combustível nos veículos produzidos. Dentre as alternativas adotadas estão as mudanças na estrutura física dos automóveis, o desenvolvimento de dispositivos que modifiquem o escoamento do ar ao redor do veículo e também a alteração da forma das superfícies externas, como por exemplo, o uso de defletores, os quais geram grande influência sobre a esteira turbulenta que se forma atrás dos caminhões.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho foca nas modificações que poderão ser utilizadas no conjunto cavalo e carreta a fim de reduzir o arrasto aerodinâmico e por consequência aumentar a eficiência energética de caminhões. Em linhas gerais, as alterações aerodinâmicas podem ser divididas em alterações feitas no caminhão e no semirreboque.

Por meio de extensa pesquisa, se buscou encontrar os apêndices com estudos e avaliações de acessórios e equipamentos que contribuam para melhoria a aerodinâmica de veículos de grande porte utilizados para transporte de cargas. Assim, as etapas para construção desse trabalho se deram da seguinte forma:

1.Revisão bibliográfica: realização de extenso estudo da literatura pertinente à área acadêmica na qual se situa este projeto (Dinâmica de Fluidos), por meio de consulta a livros referência, artigos e monografias que abordam a análise do escoamento de ar em corpos sólidos e também a redução de consumo de combustível em veículos de carga rodoviários.

2.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 se ter um maior entendimento do consumo energético do setor de transporte do Brasil e também para se ter um panorama do cenário atual no que diz respeito a quais tipos de caminhões e semirreboques que são mais utilizados.

3.Análise de acessórios aerodinâmicos existentes: a fim de se ter um maior entendimento sobre os acessórios já existentes e quais são as possíveis alternativas para redução do arrasto aerodinâmico em caminhões, foram realizadas pesquisas para analisar e comparar os acessórios aerodinâmicos que já foram desenvolvidos. Esta foi a base para o objetivo principal do trabalho que é encontrar quais acessórios são mais eficientes na redução deste do arrasto.

4.Definição dos itens que serão apresentados como solução: a partir do conhecimento adquirido por meio dos itens anteriores, se definiu quais alternativas e componentes promovem melhoria no desempenho aerodinâmicos dos veículos pesados utilizados no transporte de cargas, e também quais características favorecem a melhoria desse desempenho.

3 CONSUMO ENERGÉTICO DO SETOR DE TRANSPORTE DE CARGAS NO BRASIL

O estudo da eficiência energética do setor de transportes cargas, é de extrema importância e gera impacto sobre duas perspectivas: econômica e ambiental. Por meio do aumento da eficiência energética de caminhões é possível reduzir o consumo de combustível, o que diminui os custos operacionais do frete, e além disso, reduz a de emissão Gases de efeito Estufa (GEE), contribuindo com a não poluição do ar, minimizando assim os impactos ambientais.

No início de 2020, a Agência Internacional de Energia (IEA) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), publicaram um estudo, o qual diz que o setor de transportes é responsável pelo consumo final de 33% de energia no Brasil, e o segmento de transporte de cargas é o demandante de aproximadamente 40% desta energia consumida pelo setor, em especial, no modo rodoviário.

De acordo com a CNT – Confederação Nacional do Transporte (2019), o transporte rodoviário é o principal meio de transporte de cargas no Brasil e possui participação maior que 61% em produto de toneladas por quilômetros transportados (TKUs), bem à frente do transporte ferroviário (segundo colocado), responsável por aproximadamente 20,7% de TKUs, e aquaviário (terceiro colocado) com aproximadamente 13,6% de participação.

Ainda de acordo com o estudo realizado pela Agência Internacional de Energia (IEA) e a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no período entre 2005 e 2018, a frota de caminhões cresceu a uma taxa de 3,5% ao ano, o que gerou um aumento no consumo do diesel de 20 milhões para 30 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), o que representou um aumento de 3,2% ao ano.

No Brasil, o consumo de energia do setor de transportes teve uma alta de 219% entre 2000 e 2020, sendo os caminhões pesados são responsáveis diretos por grande parte desse aumento, conforme pode ser visto pela quantidade em bilhões de litros de gasolina equivalente consumidos pela categoria e evidenciados na figura 1.

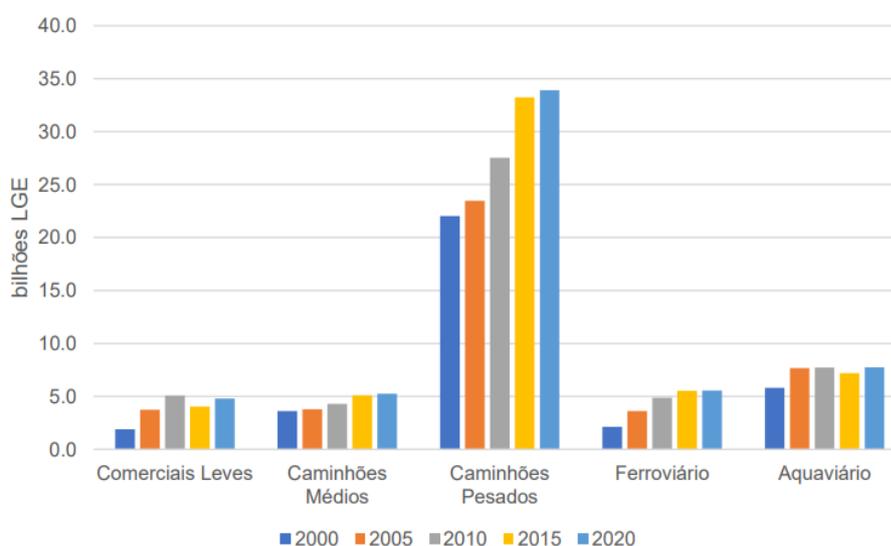


Figura 1 Consumo energético no transporte de cargas, por modo, no Brasil (Fonte: IEA, 2021a)

*Nota: LGE – litros de gasolina equivalente

O aumento no consumo energético de caminhões pesados no Brasil é reflexo direto do crescimento da demanda de commodities, especialmente agrícolas e de mineração, como pode ser visto na figura 2:

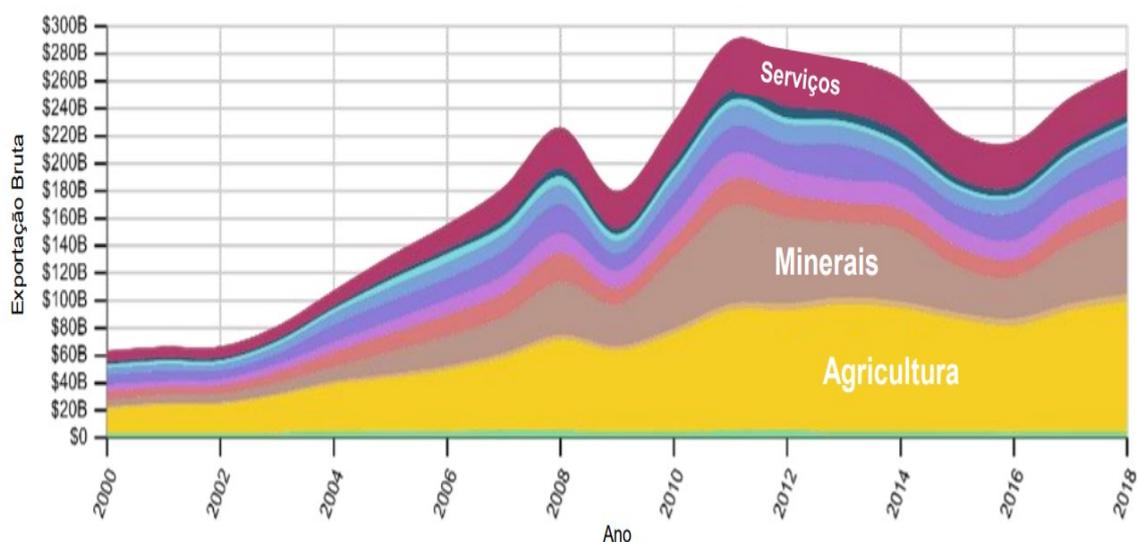


Figura 2 – Exportações do Brasil por setor, entre 2000 e 2018 (Fonte: The Growth Lab at Harvard University)

Como as origens dessas commodities estão espalhadas por diversos estados do Brasil, o transporte para o escoamento desses produtos até os locais de destino acaba resultando em longas distâncias percorridas por caminhões pesados, aqueles com potencial acima de 420 cavalos e capacidade de transporte acima de 36 toneladas.

Por intermédio de caminhões e carretas, regiões se conectam, especialmente quando não há disponibilidade ou viabilidade de outros modais. Além disso, se tem o benefício da flexibilidade no envio de ponta a ponta, com agilidade razoável. Dentre o modal rodoviário, os veículos pesados de carga são mais apropriados para percorrer longas distâncias, uma vez que também são os mais eficientes em termos de consumo energético por tonelada-km transportada, como se pode verificar pela figura 3:

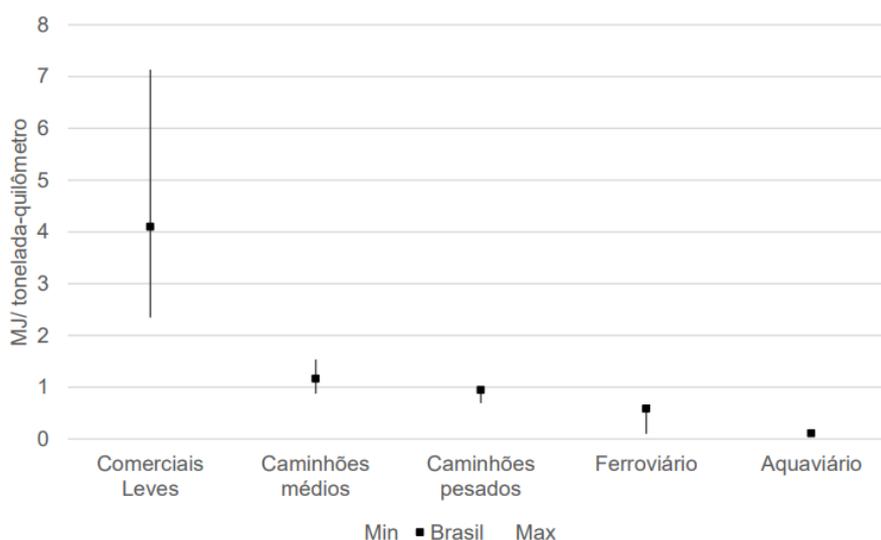


Figura 3 - Dispersão de intensidades energéticas do transporte de cargas para o Brasil (Fonte: IEA, 2021)

Comparando as intensidades energéticas dos diferentes modos de transporte, o Brasil tem a menor diferença entre a eficiência rodoviária e ferroviária. Isto reflete o fato de que, historicamente, os esforços de eficiência energética no país têm se concentrado no transporte rodoviário em detrimento do ferroviário.

A fim de se ter um entendimento mais profundo sobre o consumo energético do setor de transporte de cargas é necessário analisar o consumo de combustível de um veículo, o que será feito no capítulo 5.

4. PASSAGEM PELA HISTÓRIA DO CAMINHÃO

Nos últimos anos, o meio rodoviário foi responsável por ao menos 60% de toda a carga transportada no território nacional, tendo sempre o caminhão como protagonista neste modelo de operação. Considerado então como principal responsável pelo transporte de carga brasileiro, o caminhão apareceu pela primeira vez totalmente diferente do que estamos acostumados a ver no dia a dia.

Utilizando uma caldeira a vapor como força motriz, o “Fardier à Vapeur” (figura 4), como foi denominado, foi o primeiro veículo destinado ao transporte de cargas a não utilizar tração animal que se tem registro. Criado em 1770 pelo francês Joseph Cugnot, este veículo de 2,5 toneladas e 3 rodas tinha como objetivo transportar 1,5

toneladas de carga e se locomover a 7,8 km/h, porém não se tem registros de sucesso para atingir tal velocidade.



Figura 4 "Fardier a Vapeur" (Fonte: Jornal Le Dauphiné, 2021)

Na década de 1890, Karl Benz e Gottlieb Daimler foram responsáveis pela criação dos primeiros veículos de carga que utilizavam um motor de combustão interna (ciclo Otto) a gasolina, com 2 cilindros e entregava 4cv de potência e velocidade máxima de 12 km/h. O modelo nomeado "Motor Lastwagen" (figura 5) criado por Daimler e considerado o primeiro caminhão a utilizar um motor de 4 tempos, pouco se assemelhava a um caminhão e poderia ser considerado uma carroça motorizada, que possuía duas molas helicoidais para proteger o motor e diminuir a vibração, visto que utilizava rodas de ferro sem pneu de borracha.



Figura 5 "Motor Lastwagen" (Fonte: Mercedes Magazine, 2021)

Já em âmbito nacional, o primeiro caminhão montado em série no solo brasileiro foi o Ford Model TT (figura 6) em 1919, que era equipado com motor 4 cilindros de 2,9 litros e 20cv de potência.



Figura 6 Ford Model TT (Fonte: Folha de São Paulo)

Em 1923 então, a Mercedes Benz cria seu primeiro motor a diesel de alta rotação que equipou o Benz 5K3 (figura 7), primeiro caminhão no mundo movido a diesel, com 50cv a 1000 rpm e carga útil de 5,5 toneladas, um passo importantíssimo para o que conhecemos hoje quando se trata de caminhões.



Figura 7 Benz 5K3 (Fonte: Transporte Mundial, 2021)

A partir de então, com a utilização do motor Diesel, o que se viu de maior transformação na década seguinte foi o aprimoramento de rodas e pneus, bem como da estrutura dos caminhões. Abaixo vemos exemplos de caminhões lançados década por década:

1930



Figura 8 - Ford Model BB (Fonte: Park Place LTD, acessado em 05/03/2022), Volvo LV8 e Volvo LV75 (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

Observação: destaque para o LV75 foi o primeiro modelo Volvo a apresentar o motor posicionado sob o motorista, design bastante utilizado na década de 90, e também utilizado por Daimler na sua criação em 1896, mas que não emplacou muitas vendas na sua época.

1940



Figura 9 - Volvo LV15, LV29 e LV11 (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

1950



Figura 10 - Volvo L34, L38 e L42 (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

1960



Figura 11 - Volvo L4951, L4751 e L4851 (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

1970



Figura 12 - Volvo F7, F82 e F89 (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

1980



Figura 13 - Volvo F10, FS10 e NL10 (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

1990



Figura 14 - Volvo ECT, FE e NV (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

2000



Figura 15 - Volvo FH, NH12 e VT800 (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

2010



Figura 16 - Volvo FM, VM e VN (Fonte: Volvo Trucks, acessado em 05/03/2022)

Analisando as imagens vemos que ao longo dos anos, as cabines dos caminhões basicamente se alternaram entre os formatos “bicudo” e achatado (padrão europeu, popularmente chamado de cara-chata em terras brasileiras), cuja alternância ocorre por uma questão de demanda de mercado. Enquanto o primeiro formato acomoda o motor sob o capô frontal, o segundo acomoda o mesmo sob a cabine (o que diminui o tamanho desta, porém facilita manobras pelo motorista em espaços reduzidos).

Quase todos os modelos produzidos no Brasil seguem o padrão europeu com cabine frontal posicionada sob o motor, devido a legislação brasileira que impõe limite de comprimento do veículo de para-choque a para-choque, assim, caso o motor fique posicionado em frente à cabine ele consumirá parte do comprimento limite, reduzindo a capacidade de carga transportada. Por exemplo, um conjunto cavalo-mecânico com semirreboque pode ter até 18,6 metros de comprimento, podendo chegar a 30 metros no caso de rodo-trens (Resolução 210/2006 do Contran).

Diferentemente do Brasil, nos Estados Unidos o cavalo-mecânico é desconsiderado da medida total do conjunto, o que permite o uso de cabines mais longas, fator esse que juntamente com a tradição do mercado estadunidense ter a preferência por caminhões bicudos, promovem a queda de produção e uso de modelos cara-chata ano após ano. Outro fator que diferencia os mercados é o limite de velocidade observado nas estradas brasileiras e norte americanas, onde, em grande maioria das rodovias nacionais a velocidade máxima permitida é de 90 km/h, enquanto no país do hemisfério norte são observados limites que variam entre aproximadamente 105 e 128 km/h (a legislação muda conforme o estado), chegando a incríveis 136 km/h no estado do Texas. Segundo a Associação Brasileira de Transporte e Logística de Produtos Perigosos, em casos de velocidades mais elevadas um caminhão bicudo gasta menos combustível do que um modelo cara-chata com mesmas configurações mecânicas.

Tratando se de velocidade, vemos como os caminhões evoluíram em relação a motorização quando comparamos as máximas propostas nos primeiros modelos (7,8 km/h e 12 km/h nos finais dos séculos XVIII e XIX respectivamente) e os limites de velocidades impostos atualmente nas rodovias Brasil a fora. Ao longo desse aumento de desempenho os estudiosos da área de transportes ficaram também mais curiosos e atenciosos em relação aos fenômenos envolvidos no escoamento do ar em relação a um caminhão em movimento. A seguir veremos neste trabalho a energia desprendida por um caminhão para se locomover, com foco em especial para os esforços aerodinâmicos.

5. CONSUMO ENERGÉTICO DE UM CAMINHÃO

De acordo com o estudo publicado por M.J Bradley & Associates LLC em 2012, a eficiência média do motor diesel é de 33%, ou seja, essa quantidade chega até o eixo de saída do motor, o que significa que 67% é perdido por atrito das peças internas do motor, perdas nos sistemas de refrigeração e escape, além dos limites termodinâmicos do sistema térmico. A partir do eixo de saída uma pequena parte é perdida na transmissão, e o restante de energia que irá movimentar o caminhão para frente deve ser suficiente para superar a inercia, gravidade (em caso de inclinação da

via), arrasto do ar e resistência ao rolamento (devido a aderência dos pneus com o solo). Partindo da eficiência média, podemos analisar então 2 casos mais comuns:

1. Veículo deslocando em velocidade de cruzeiro com estrada nivelada: neste caso observa-se 40% de eficiência na saída o motor, onde 85% desta energia útil é utilizada para superar o arrasto aerodinâmico e a resistência ao rolamento, sendo desprezíveis os gastos para inércia e gravidade conforme figura 17.

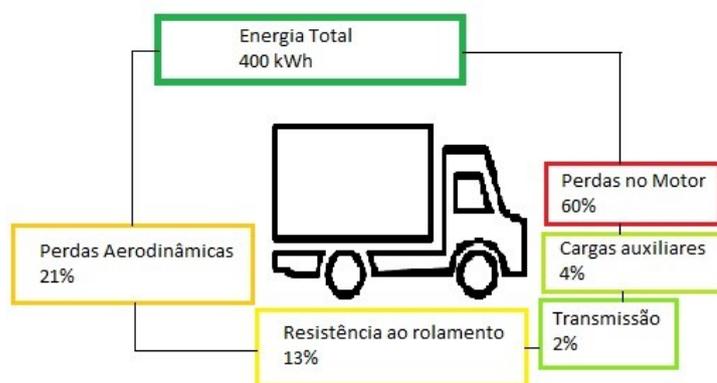


Figura 17 - Perdas energéticas de um caminhão em velocidade constante

2. No segundo caso, observamos o veículo partindo do estado de repouso, onde a eficiência do motor será menor do que a média, e mais da metade da energia útil será gasta para superar a inércia e gravidade, com uma pequena parte sendo destinada as resistências ao rolamento e do ar.

Durante uma viagem pode ser considerado que na maior parte do tempo o caminhão se desloca em velocidade alta e relativamente constante, então as estratégias para aprimoramento do gasto energético se concentram mais em relação ao arrasto aerodinâmico e resistência ao rolamento dos caminhões, visto que juntos, estes são responsáveis por consumir aproximadamente 85% da energia útil gerada.

Oliveira, T. D. et al. (2016) realizaram um trabalho muito interessante a respeito da influência da aerodinâmica veicular sobre o consumo de combustíveis em veículos de transporte de carga. Para isso, eles realizaram uma análise comparativa entre veículos com e sem defletor. O trabalho analisou o consumo de combustível para veículos de carga trafegando a velocidades constantes, utilizando um mesmo arranjo

de transmissão, numa via nivelada (ortogonal à gravidade local) e foram desconsideradas as parcelas de potência utilizadas por acessórios. Desse modo, Oliveira, T. D. et al. pôde-se calcular a redução relativa no consumo, por meio da equação 1, onde que B é o consumo de combustível:

$$\frac{B_s - B_c}{B_s} = 1 - \left(\frac{D_c + R_c}{D_s + R_s} \right)$$

Equação 1: Relação Consumo, Arrasto e Resistência a Rolagem com e sem uso de defletor

O subscrito c foi utilizado para indicar o consumo de combustível para um veículo com defletor e o subscrito s para um veículo sem defletor. Analisando a equação se entende que o consumo de combustível é dependente de D , que é o arrasto aerodinâmico e R , é a resistência à rolagem. Como indicado por Hucho (1998) e Gillespie (1992), o arrasto é uma das resistências a serem vencidas pelo motor de um veículo. Desta forma, sua diminuição acarretará diminuições de consumo de combustível, uma vez que a potência, devido à queima de combustível, deve ser suficiente para, a certa velocidade, igualar ou ultrapassar as forças de resistência.

A resistência ao rolamento é um esforço proporcional ao peso do veículo e agravado pela condição precária da pavimentação de algumas estradas que pode ser reduzido com a utilização de pneus específicos, os quais serão mais eficientes quanto mais pesado for o caminhão. Estes pneus não serão discutidos aqui por não se enquadrarem no tema proposto. Abaixo temos a figura 18 na qual se observa que as perdas geradas pela resistência aerodinâmica, em um veículo automotor pesado, se comportam de forma exponencial com relação à velocidade, enquanto as perdas devido à resistência de rolamento comportam-se de forma linear (Baker et al., 2009).

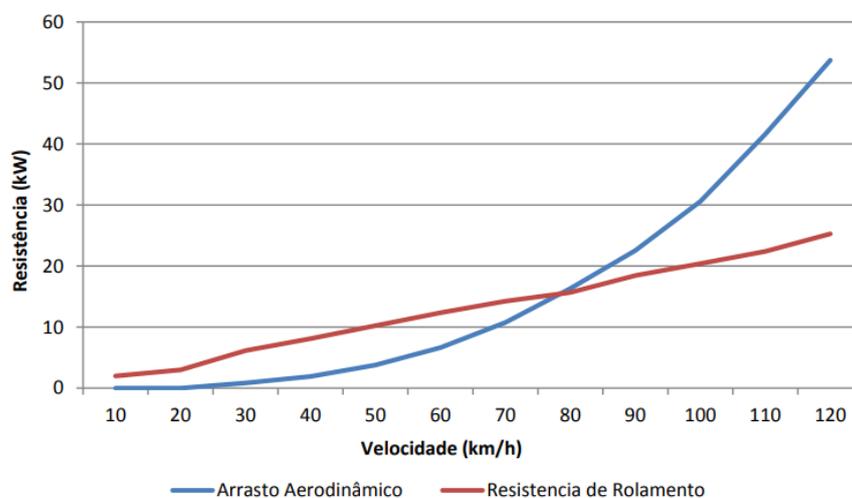


Figura 18 Relação entre velocidade do veículo e as resistências aerodinâmicas e de rolamento (Fonte: Baker et. al., 2009)

Apesar da não abordagem da resistência ao rolamento, um fato curioso é a posição do Brasil no Ranking e Classificação de Qualidade Rodoviária em 2017 mostrado na figura 19 (World Economic Forum, 2017), onde o Brasil ocupa a 103ª posição, com pontuação de qualidade “3,1” em uma escala de 1 a 7 (extremamente ruim a extremamente boa), mesmo tendo o modal rodoviário como principal meio de transporte de cargas e detentor de uma porcentagem maior da participação deste meio em sua matriz de transporte em relação aos mesmo países que fora comparado na figura 19. Já a figura 20 (IEA, 2021) ilustra essa porcentagem do ano de 2020 mostrando o quão seria coerente um foco maior na qualidade das vias, que de certa forma vem acontecendo ao longo dos anos porém a passos aquém do desejável.

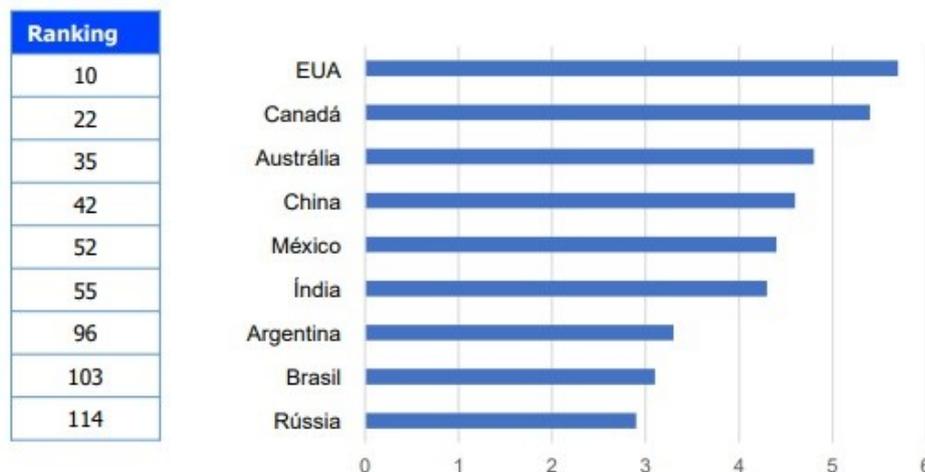


Figura 19 Ranking e Classificação de Qualidade Rodoviária em 2017

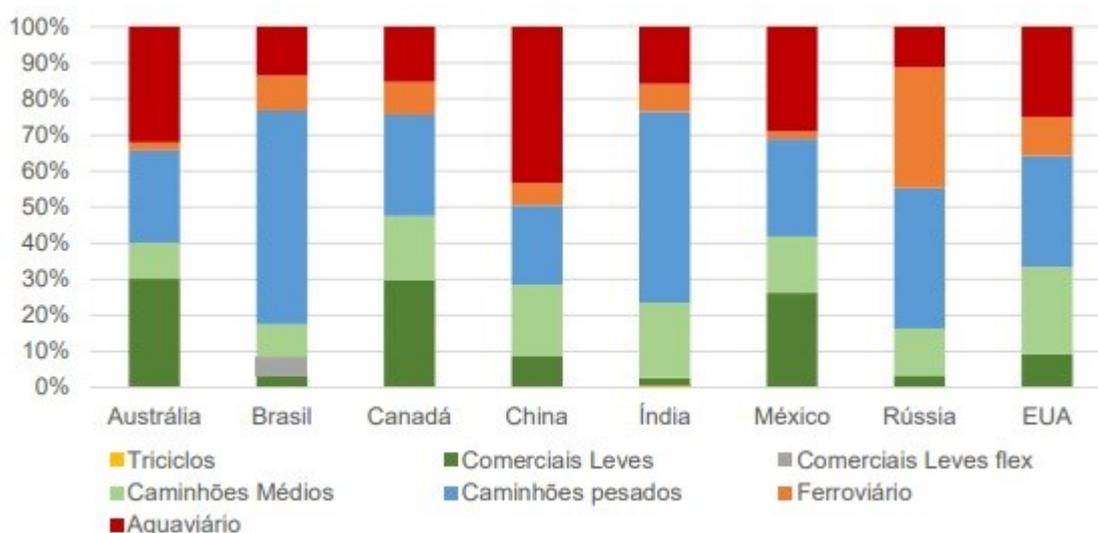


Figura 20 Consumo energético do transporte de carga por modos em 2020

Os estudos do MIT (2018) e Bartholomeu (2006), mostram que o consumo de combustível pode aumentar em margem de 2,5% a 5% dependendo da qualidade da rodovia, sendo necessário o foco na avaliação do impacto de diferentes tipos de cargas na redução da qualidade das vias. Para definir a resistência a rolagem e consequentemente o consumo de combustível de um veículo de transporte de cargas, é necessário avaliar o campo de velocidade em torno desse veículo, o qual é influenciado pelo projeto aerodinâmico do veículo em questão. Dessa maneira, se entende que melhorias na aerodinâmica de um veículo geram um aumento da eficiência energética e consequentemente uma diminuição do consumo de

combustível, o que faz com que se tenha uma redução nas emissões advindas da queima do combustível.

6. ESCOAMENTO, ARRASTO E AERODINÂMICA

Para analisar o comportamento de um veículo em movimento, é necessária a compreensão de como este se relaciona com o ar ao seu redor, assim uma breve e básica passagem pela mecânica dos fluidos se torna primordial para um o entendimento de tais fenômenos.

Segundo Yunus A. Çengel (2007, p. 2), toda substância no estado líquido ou gasoso é denominada fluido. A resistência que um corpo tem em resistir a tensão de cisalhamento (ou tensão tangencial) é o que distingue os estados sólido e fluídico. Enquanto um sólido oferece resistência a tensão de cisalhamento aplicada, o fluido deforma-se continuamente mesmo quando esta força é mínima.

Quando um fluido escoar sobre uma superfície sólida (velocidade relativa entre fluido e corpo não nula), uma camada do fluido fica em contato com a superfície e “gruda” na mesma. Desta forma esta camada assume velocidade nula em relação à superfície (condição de não escorregamento) devido a viscosidade fluídica. A viscosidade é uma medida de aderência interna do fluido causada por forças coesivas entre as moléculas em um líquido e por colisões moleculares nos gases. A partir da camada fluídica que está em contato com a superfície há a existência de camadas fluidas que se movem em relação à anterior, gerando atrito entre camadas, onde a camada mais lenta (e mais próxima da superfície qual o fluido escoar) tende a reduzir a velocidade da mais rápida (e mais afastada da superfície). Este tipo de escoamento é denominado escoamento viscoso, e a diferença entre velocidades das camadas dos fluidos formam um gradiente de velocidade como observado na figura 21.

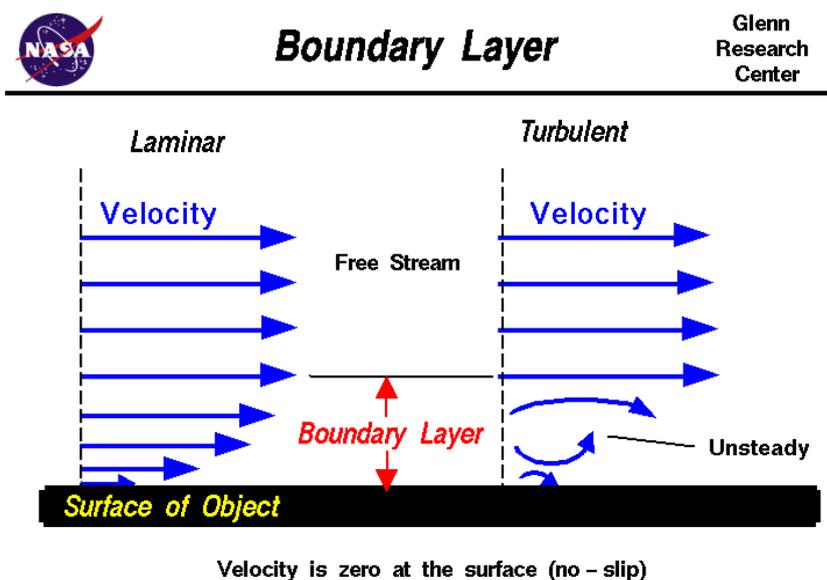


Figura 21 - Perfis de velocidade do fluido em escoamentos laminar e turbulento (site grc.nasa.gov acessado em 10/04/22)

No caso contrário, onde uma superfície se move por um fluido (ar por exemplo), a camada de fluido adjacente a superfície também se coloca na condição de não escorregamento. As consequências da condição de não escorregamento são que todos os perfis de velocidades (como visto na figura 21) possuem valores nulos em relação a superfície nos pontos de contato entre fluido e superfície sólida, e geração de arrasto da superfície, que é a força que fluido exerce sobre a superfície na direção do escoamento (ou contrária ao movimento do corpo).

A região de escoamento adjacente a parede na qual os efeitos viscosos e gradientes de velocidade são significativos é chamada de camada limite. Quando a velocidade relativa entre o ar uma superfície curva (como várias partes de um caminhão) é suficientemente alta, a camada limite não consegue mais se manter presa à superfície e em algum ponto se separa da mesma. Esta separação da camada limite é denominada como separação de escoamento.



Figura 22 - Separação da camada limite (Fonte: Çengel, 2007)

Fora da camada limite (regiões de escoamento não viscoso) as forças viscosas são muito pequenas quando comparadas as forças inerciais e de pressão do fluido, podendo ser desprezada nas análises sem muita perda de precisão (Çengel, 2007). Na figura 23 vemos o desenvolvimento das regiões onde ocorrem escoamento viscoso e não viscoso a partir da introdução de uma placa plana paralela a uma correnteza de um determinado fluido com velocidade uniforme.

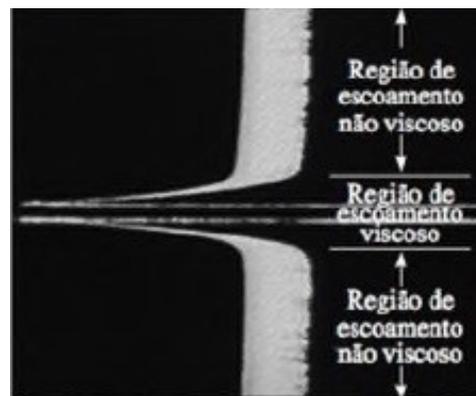


Figura 23 - Regiões de escoamento viscoso e não viscoso (Fonte: Çengel, 2007)

6.1 Escoamento laminar, turbulento e transitório

Na figura 22, vimos como o escoamento progride suavemente sobre a superfície, e após o descolamento se torna um tanto caótico. A primeira parte possui camadas suaves do fluido em um movimento bastante ordenado e é considerada como escoamento laminar pelo fato das partículas do fluido se agruparem em “lâminas”. A parte onde o fluido se move de forma desordenada após o ponto de descolamento é considerada escoamento turbulento, caracterizado por flutuações de velocidades das partículas.

Em algumas situações, o fluido pode oscilar seu comportamento e apresentar algumas flutuações intermitentes do fluido em escoamento laminar, porém insuficientes para tornarem o escoamento turbulento. Nestes casos tem-se a presença de um escoamento transitório que normalmente ocorre na região de transição de um escoamento laminar em turbulento. A seguir, a figura 24 exemplifica os escoamentos laminar, turbulento e transitório.

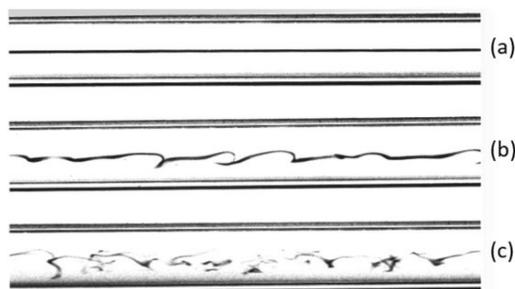


Figura 24 - a) Escoamento Laminar, b) Escoamento de Transição e c) Escoamento Turbulento (Fonte: www.esss.co/blog/escoamento-turbulento/, acessado em 07/03/2022)

6.2 Visualização do escoamento

O estudo da dinâmica dos fluidos exige matemática avançada nos cálculos dos fenômenos envolvidos, porém é possível aprender muito com a visualização do escoamento, que é o exame visual das características do campo de escoamento, processo muito útil tanto em experiências físicas como em soluções numéricas computacionais (visto a capacidade humana em processar rapidamente uma quantidade incrível de informações visuais).

Experimentalmente, a forma mais comum de se estudar o comportamento do ar escoando em torno da superfície de um veículo é analisando as linhas de emissão do escoamento. A linha de emissão é um conjunto das posições das partículas de fluido que passaram sequencialmente através de um ponto prescrito do escoamento, de fácil observação utilizando um fluido sinalizador junto ao escoamento existente (fumaça por exemplo ou colorante em escoamento de um líquido).



Figura 25 - Linhas de emissão provocadas pelo deslocamento de uma bola de beisebol em túnel de vento com uso de fumaça (Fonte: Çengel, 2007)

Aplicando soluções numéricas, o escoamento pode ser também representado por gráficos através da simulação de uma análise dinâmica de fluidos computacional

(CFD). Estes gráficos podem conter indicadores como velocidade, pressão e temperatura, ou ainda as linhas de corrente do fluido que escoam. Na figura 26 por exemplo, temos um gráfico de contorno de pressão, onde as regiões mais claras indicam zonas de maior pressão enquanto as menores pressões ocorrem em nas áreas escuras.

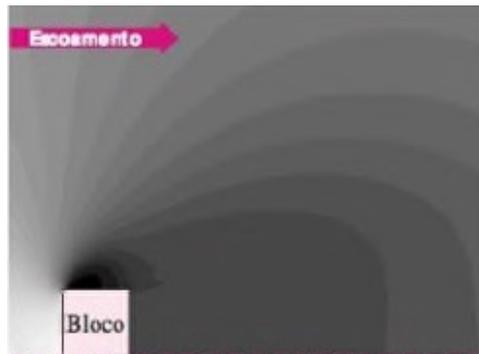


Figura 26 Gráfico de contorno preenchido em tons de cinza (Fonte: Çengel, 2007)

Este tipo de gráfico pode ser representado também através da utilização de linhas contendo o valor numérico indicado entre elas como ocorrem na figura 27.

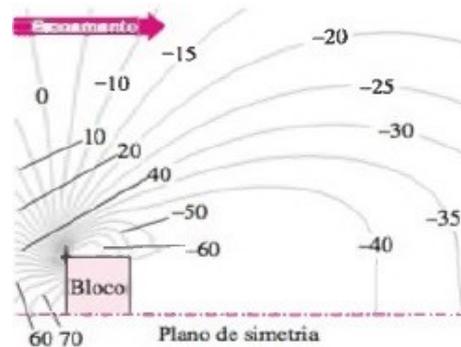


Figura 27 - Gráfico de linhas de contorno com pressões indicadas em Pascal (Fonte: Çengel, 2007)

A figura 28 mostra a visualização da corrente do escoamento, semelhante as linhas observadas em experimentos como na figura 25, por simulação, onde é possível a identificação de turbilhões através das linhas de circuito fechado tanto abaixo como acima do plano de simetria.

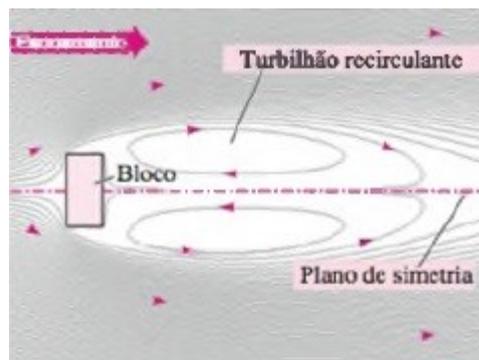


Figura 28 - Linhas de corrente em simulação CFD (Fonte: Çengel, 2007)

6.3 ARRASTO AERODINÂMICO

O arrasto aerodinâmico ou resistência do ar, é uma força oposta ao movimento do veículo, gerada pelo fluido (no caso o ar) em que este se desloca conforme visto anteriormente. Quando um caminhão se desloca através do ar, ele interrompe o fluxo que havia em sua frente, gera uma nova condição de fluxo do ar criando áreas de baixa pressão e turbulentas em pontos específicos do veículo.

O ar de alta pressão em torno desta turbulência então se move para a área de baixa pressão criando uma força que puxa o veículo para trás. Zonas de baixa pressão (turbulentas) criadas no espaço entre cabine e reboque e embaixo do caminhão também contribuem para a força de arrasto.

A energia necessária para superar o arrasto aerodinâmico depende de 3 variáveis:

1. Área da superfície frontal;
2. Formato do veículo;
3. Velocidade que o veículo se move.

A equação basal para o cálculo da força de arrasto gerada por um corpo em movimento é:

$$F_d = \frac{\rho c_d v^2 A}{2}$$

Equação 2: Cálculo do arrasto aerodinâmico

Onde:

F_d = arrasto aerodinâmico

ρ = densidade do fluido

c_d = coeficiente de arrasto do corpo

v = velocidade relativa do fluido

A = área frontal do corpo

Assim, a velocidade de movimento do corpo em relação ao fluido e a área frontal do mesmo em relação ao movimento são diretamente proporcionais a força de arrasto de esse corpo será submetido, logo o incremento dessas grandezas provoca o aumento da força contrária ao movimento (observado que a mudança de velocidade promove uma resposta ao quadrado do mesmo valor no arrasto aerodinâmico).

O coeficiente de arrasto é um parâmetro adimensional, que indica a dificuldade que um corpo tem em “atravessar” o ar, assim, quanto maior o seu valor, maior a força de arrasto gerada pelo ar no corpo, sendo este parâmetro dependente do formato que o corpo em deslocamento possui. Quanto ao formato do veículo, foi observado ao longo da evolução dos estudos fluidodinâmicos, que o uso de formatos formas mais arredondadas com linhas suaves favorecem a redução do arrasto.

Abaixo vemos uma relação de tipos de corpos e seus respectivos coeficientes de arrasto:

| Shape | Drag Coefficient |
|-----------------------|------------------|
| Sphere | 0.47 |
| Half-sphere | 0.42 |
| Cone | 0.50 |
| Cube | 1.05 |
| Angled Cube | 0.80 |
| Long Cylinder | 0.82 |
| Short Cylinder | 1.15 |
| Streamlined Body | 0.04 |
| Streamlined Half-body | 0.09 |

Measured Drag Coefficients

Figura 29 - Coeficientes de arrastos aproximados por geometria do corpo

Conforme a figura 29, vimos que o corpo com menor coeficiente de arrasto se assemelha a uma gota, perfil este utilizado como base hoje para do design de asas

de aeronaves. Tomando o perfil gota e o perfil esférico como comparativo (ambos com a mesma circunferência central), temos uma diferença de quase 10 vezes, o que significa que a força que um corpo em gota faz para superar a resistência do ar é aproximadamente 10 vezes menor que um corpo redondo terá de fazer para vencer o ar de mesma qualidade (considerando iguais as áreas frontais dos corpos).

E sobre os caminhões? Qual seria o coeficiente de arrasto aproximado observado atualmente neste tipo de veículos?

Conforme observado na figura 30, os coeficientes de arrasto de caminhões com reboque normalmente se situam na faixa entre 0,6 a 0,9.

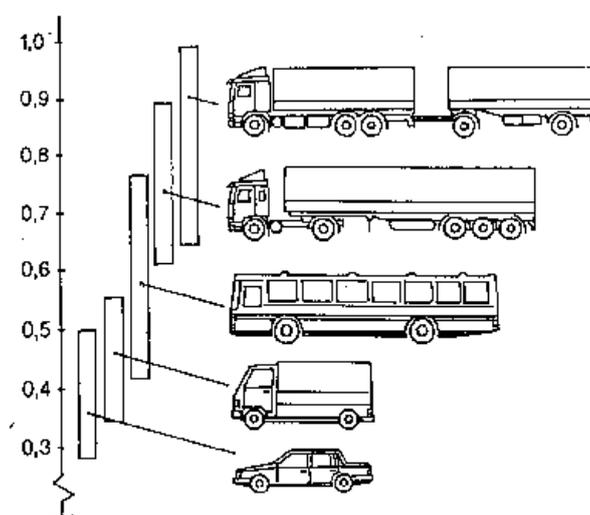


Figura 30 - Coef. Aerodinâmico por tipo de veículo (Fonte: Hucho, WH. 1987,p.300)

A título comparativo, tanto o Hyundai HB20 quanto o Chevrolet Ônix que lideraram as vendas de automóveis no Brasil no primeiro mês deste ano, possuem (declarado por seus fabricantes) de 0,33. Isso mostra o quão mais eficiente são os veículos de passeio, pois, considerando a melhor configuração de um caminhão, o valor de seu coeficiente de arrasto (acima de 0,6) seria quase o dobro de um veículo considerado “popular” há pouco tempo atrás (o que implica em uma necessidade energética de quase o dobro para romper a resistência do ar).

Isso se deve a presença de fatores extras presentes na estrutura de um caminhão, que não são observadas em veículos de passeio, como por exemplo o degrau e vão existentes na transição entre cabine e compartimento de carga, além da

extremidade traseira dos reboques que costumam possuir cantos vivos promovendo um descolamento mais abrupto do fluxo de ar gerando turbulência e conseqüentemente menor eficiência aerodinâmica. Outros fatores que interferem no coeficiente de arrasto são o formato da cabine, bem como a uniformidade do assoalho (a presença de protuberâncias nessa parte do veículo geram turbulências indevidas).

O capítulo seguinte mostrará alternativas para se minimizar os efeitos gerados justamente por tais particularidades de um veículo de carga pesado.

Assim as alternativas para que um caminhão tenha o menor coeficiente aerodinâmico possível são basicamente:

- A cabine com design mais aerodinâmico possível;
- Transição mais suave possível entre topos da cabine e reboque;
- Distância reduzida entre cabine e reboque, através de um posicionamento mais próximo possível ou bloqueando o fluxo de ar entre as partes com a utilização de defletor;
- Fluxo mínimo de ar sob o caminhão (ter o conjunto fabricado com assoalho mais liso e suave possível, ou obstruindo a passagem com saias frontais e laterais);
- Extremidade traseira do reboque ser arredondada ou alongada produzindo um formato mais arredondado.

7. MELHORIAS AERODINÂMICAS PARA AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A partir da execução de medidas que melhorem o processo de conversão de energia é possível melhorar a eficiência da performance dos caminhões pesados. Dessa maneira, o foco na redução de perda de conversão de energia final em energia útil, para esses veículos, faz com que seja possível ter ganhos incrementais de eficiência energética nos caminhões utilizados no transporte de carga.

Os veículos utilizados no transporte de cargas apresentam variadas classificações, geralmente associadas ao seu peso, capacidade de transporte, propósito e funções dos produtos transportados. Conseqüentemente, esses veículos também possuem uma grande quantidade de componentes, sistemas e subsistemas. Diante disso, existe uma variada distribuição das fontes de perdas energéticas

possíveis, e a figura 31 apresenta as principais perdas nos caminhões pesados, durante o transporte de cargas em rodovias.

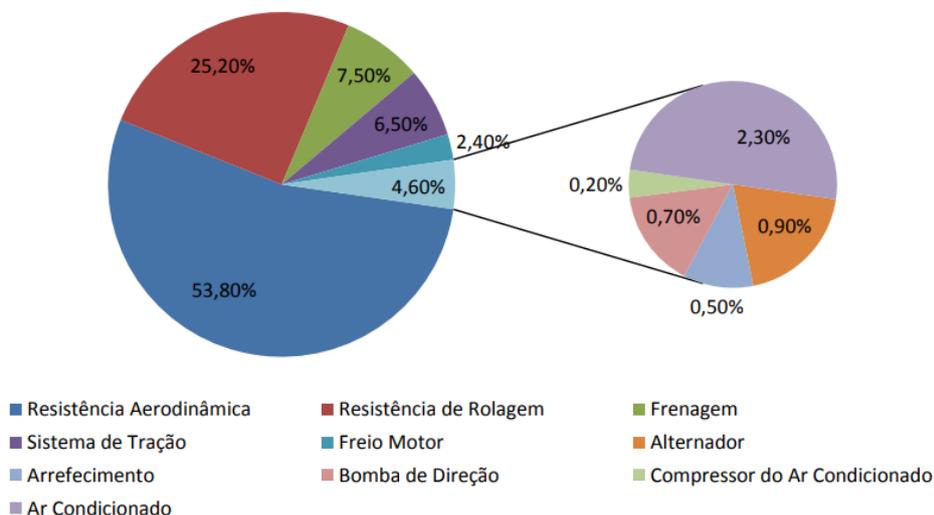


Figura 31 Perda de energia nos veículos pesados (Fonte: UTG, 2012)

A resistência aerodinâmica é a principal fonte de perda de energia nos veículos pesados, sendo responsável por aproximadamente 53,80% dessa perda. Ainda que os caminhões de transporte de carga não desenvolvam grandes velocidades, a resistência aerodinâmica se dá pela área de contato dos veículos com o vento, uma vez que as forças aerodinâmicas são diretamente proporcionais à área de contato e proporcionais ao quadrado da velocidade do veículo.

Assim, o melhoramento aerodinâmico de veículos de carga resulta em uma melhora na eficiência da performance dos caminhões pesados, o que conseqüentemente resulta na redução de consumo de combustível. Dessa maneira, além de reduzir custos operacionais do principal modal de transporte de cargas do país, também reduz as emissões de Gases de efeito Estufa (GEE) advindas da queima do combustível, e também reduz da poluição do ar.

Atualmente existe um grande número de dispositivos e tecnologias de para melhorar a eficiência aerodinâmica de caminhões pesados, tanto já em uso quanto em melhoria e desenvolvimento. Os principais são: defletores de teto, extensões laterais de cabine, saias laterais e painéis de extensão de reboque.

Um relatório da Academia Nacional de Ciências dos EUA, sobre tecnologias atuais e emergentes para redução de combustível de veículos médios e pesados, identificou quatro seguintes áreas críticas para melhoria aerodinâmica de conjuntos cavalo-mecânicos em condições de rodovias:

- Aerodinâmica na cabine;
- Gestão do fluxo de ar ao redor do vão cabine-reboque;
- Gestão do fluxo de ar sob o reboque;
- Gestão do fluxo de ar na traseira do reboque.

Ainda de acordo com o estudo, o melhoramento aerodinâmico para essas áreas-chave pode levar a uma redução no consumo de combustível em condições de rodovia na ordem de 15%.

As tecnologias de redução de arrasto que serão apresentadas podem ser separadas em duas categorias principais: os montados na cabine e os montados no reboque. Como a grande maioria dos dispositivos de redução de arrasto complementares tendem a ser montados em reboques, há uma certa relutância na indústria em adotar esses dispositivos, devido a uma clara distinção entre proprietários ou operadores de cabines e proprietários de reboques.

Como os fabricantes de reboques geralmente não são também operadores, e o custo dos dispositivos montados nas folgas aumenta os custos gerais de aquisição de reboques, há pouca motivação por parte dos fabricantes de reboques para adotar esses dispositivos. Além disso, o tempo de retorno sobre investimento para dispositivos montados em cabine, numa média é menor do que para dispositivos montados em carroceria, o que também afeta a taxa de adoção de tais tecnologias para o setor de transporte. Por isso, os dispositivos e tecnologias para cabines acabam sendo adotados mais cedo. De acordo com Leuschen e Cooper (2006) e outros, existe uma proporção de três a quatro vezes mais reboques em serviço do que cabines. Além disso, os cavalos de hoje podem puxar cargas que consistem em uma variedade de tipos de reboques, que possuem propriedades aerodinâmicas significativamente variáveis.

Os estudos mais recentes voltados para as tecnologias de segunda geração geralmente avaliam a redução de arrasto ou economia de combustível usando um

formato aerodinâmico de cabine de última geração. Porém, os motoristas caminhoneiros culturalmente preferem tratores mais antigos do tipo “boxier” ou “cara achatada”, com muitos apêndices, luzes e sem defletores de ar. Isso faz com que seja necessário avaliar os efeitos de algumas tecnologias que não afetem significativamente a aparência do veículo, nessas cabines de estilo clássico.

A seguir, são descritos os dispositivos e tecnologias para melhorar a eficiência aerodinâmica de caminhões pesados de acordo com cada uma das quatro áreas críticas apresentadas anteriormente.

7.1 AERODINÂMICA DA CABINE

As melhorias aerodinâmicas na cabine tem sido um fator de grande relevância para os fabricantes desses veículos nas últimas três décadas. A crise do combustível da década de 1970, na promoveu um maior desenvolvimento e posteriormente a adoção de cabines com design aerodinâmico, especialmente durante as décadas de 1980 e 1990.

Apesar de culturalmente os motoristas brasileiros terem uma certa preferência por cabines de estilo clássico com capô quadrado, para-choques planos e grandes acessórios externos, como filtros de ar e tubos de escape, todos os fabricantes têm modelos “bicudos” que favorecem aerodinamicamente e são desenvolvidos visando a economia de combustível, chegando a proporcionar uma redução no arrasto aerodinâmico, em relação ao estilo clássico, da ordem de 30% (Cooper, KR, 2004).

A melhoria aerodinâmica se dá principalmente por meio do arredondamento das superfícies dianteiras, do uso de defletores de ar no teto e do uso de carenagens sobre os tanques de combustível entre o eixo de direção e os eixos de tração. Exemplos de um modelo de cabine clássica e um modelo de cabine aerodinâmica são mostrados a seguir.



Figura 32 - Modelos de cabines clássica e aerodinâmica respectivamente (Fonte: Transport Canada, 2015)

Os esforços atuais para a redução incremental do arrasto nas cabines são direcionados para as áreas do para-choque, a parte inferior da carroceria e a região do vão entre o cavalo-reboque. Esses elementos de significativa possibilidade de redução de arrasto aerodinâmico para cabines são identificados a seguir.

7.1.1 Defletores

Os defletores de ar estão entre dispositivos mais utilizados para melhoramento aerodinâmico de um caminhão. Também conhecido como aerofólio, são instalados na parte superior da cabine, e embora possam parecer um componente estético, são peças de extrema importância, que influenciam diretamente na eficiência energética do veículo. Além da influência no consumo de combustível, sua forma e ajuste contribuem para melhor a aerodinâmica do veículo, diminuindo a resistência do ar entre a cabine e a carreta, garantindo maior estabilidade e segurança, além de menor desgaste dos pneus.

Para que todos esses benefícios ocorram é necessário o ajuste correto do dispositivo. A distância entre a cabine e a carreta, bem com a altura dessa última, são fatores que influenciam o posicionamento correto do defletor de ar, por isso sempre que houver troca de carretas, o ajuste de sua posição é primordial.

Nos caminhões sem defletores o ar se choca na parede formada pela parte frontal do baú, o que faz com que o caminhão precise de mais força para romper a resistência e, conseqüentemente, gaste mais combustível. A presença de defletores

faz com que ao passar pela cabine encontre menor resistência e evita o contato direto com a carroceria.

A diferença de nível entre cabine e reboque, evidentes por exemplo na figura 32 (modelo Peterbuilt 389) pode ser suavizada com a utilização de um defletor de ar de teto, que fica sobre a cabine por exemplo o International ProStar, apresentado anteriormente na mesma figura. Este equipamento mantém o fluxo de ar próximo a superfície superior do caminhão, evitando a presença de vórtices como observado na figura 33.

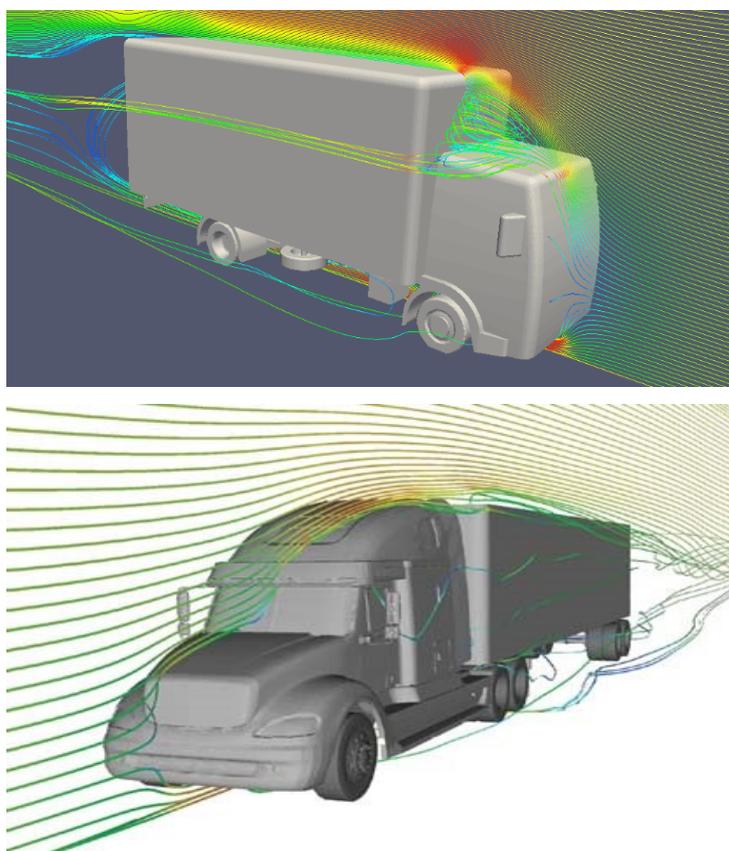


Figura 33 - Linhas de corrente sobre modelos sem e com defletor de ar de teto

De acordo com Oliveira, T. D. et al. (2016), os defletores possuem influência sobre o consumo de combustível variável de acordo com a faixa de velocidade e carga. A Figura 34 mostra a economia percentual de combustível em função da velocidade de tráfego para variadas cargas totais (veículo + carga útil). Nota-se que a economia de combustível é maior para maiores velocidades, e a variação torna-se ainda maior quando o veículo carrega alta carga.

Esse resultado se dá uma vez que para menores cargas o arrasto tem papel mais significativo entre as forças totais de resistência ao movimento. Mesmo para cargas altas, se tem possíveis reduções de consumo de combustível, as quais são bastante significativas e justificam o uso de defletores de ar.

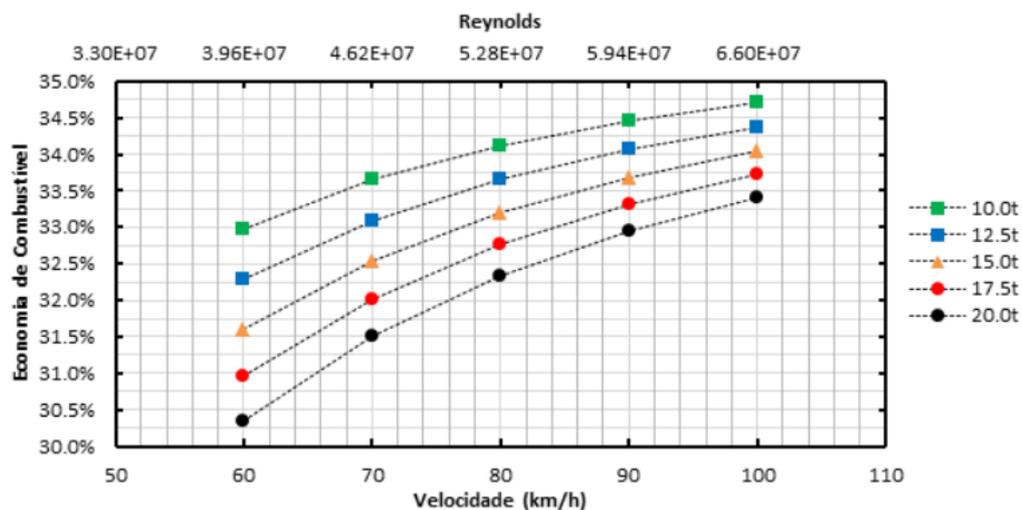


Figura 34 - Gráfico de economia de combustível para diversas velocidades e cargas totais com o uso do Defletor (Fonte: Oliveira, T. D. et al. 2016)

Em seguida na figura 35 temos os modelos simulados em CFD (sem e com a presença de defletor) para a aquisição do gráfico na análise dos autores.

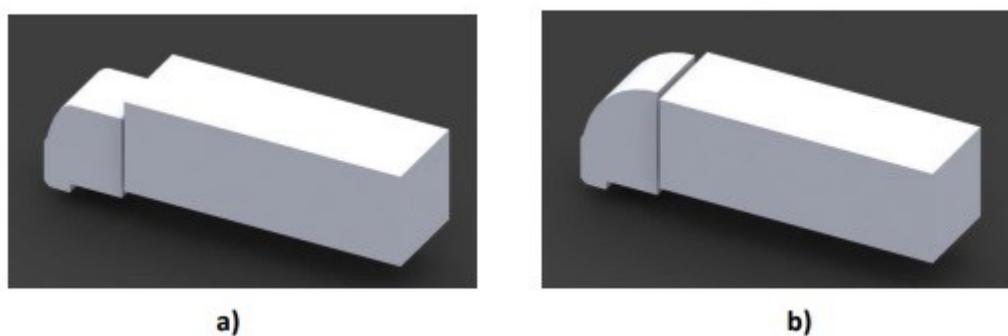


Figura 35 - Modelos simulados por Oliveira: a) sem defletor e b) com defletor

7.1.2 Espelhos

Há um aumento significativo e mensurável no arrasto aerodinâmico do veículo causado pela adição dos espelhos retrovisores obrigatórios. A corrente de ar na área

dos espelhos continua sendo um relevante fator quando se consideram as perdas aerodinâmicas. Por conta disso, os fabricantes de caminhões buscam cada vez mais otimizar aerodinamicamente o design de espelho padrão. Algumas empresas já estão fabricando veículos que usam câmeras traseiras e telas de vídeo na cabine, substituindo os tradicionais espelhos laterais.

Como exemplo, no ano de 2019 a Mercedes-Benz apresentou na Fenatran (ou Salão Internacional do Transporte Rodoviário de Cargas), que é uma feira de exposições, o “Novo Actros”, um caminhão conectado que possui câmeras no lugar dos espelhos retrovisores tradicionais. Segundo a montadora, as primeiras unidades vendidas foram entregues em abril de 2020.



Figura 36 - “Novo Actros”, da Mercedes-Benz, exposto na Fenatran 2019 (Fonte: frotacia.com.br, acessado em 18/04/2022)

A nível de regulamentação, de acordo com a Resolução 703 do Conselho Nacional de Trânsito (Contran), a qual regulamenta a questão dos espelhos retrovisores, esse tipo de tecnologia é permitido e está de acordo com a lei brasileira desde 2017, quando a resolução foi publicada. Lá diz que os chamados dispositivos de visão indireta “podem ser espelhos convencionais, dispositivos do tipo câmera-monitor ou outros dispositivos susceptíveis de mostrar informação sobre o campo de visão indireta ao condutor”.

Com o passar dos anos, a presença de câmeras instaladas em caminhões está começando a se tornar cada vez mais comum, e espera-se que os avanços

tecnológicos, ao longo do tempo, possibilitem a substituição total dos espelhos retrovisores tradicionais por câmeras, reduzindo drasticamente o arrasto aerodinâmico. Porém, é importante levar em consideração que alguns motoristas podem precisar de mais tempo para se adaptarem ao conceito de olhar para a direita em uma tela de vídeo, em vez de olhar para a esquerda e para a direita nos espelhos, principalmente quando necessário no caso de uma mudança de faixa de emergência.

7.1.3 Para-choques

Para amenizar a passagem de ar embaixo do veículo, direcionando o escoamento de ar para a superfície lateral, é possível a utilização de spoilers frontais e laterais (sob o para-choque ou no vão entre eixos respectivamente). A Volvo disponibiliza como opcional para alguns de seus modelos um kit incluindo estes spoilers chamado de FlowBelow.

7.1.4 Outros acessórios

Acessórios como calotas e para-lamas podem fornecer algum benefício aerodinâmico para reduzir o consumo de combustível dos veículos. Leuschen e Cooper, observaram uma pequena diminuição no arrasto de um reboque com calotas lisas, com base em testes em túnel de vento com rodas estacionárias. A diminuição do arrasto ficou dentro da incerteza experimental dos testes, porém com rodas giratórias pode haver vantagem em cobrir as rodas. Se um benefício líquido puder ser obtido com o uso de calotas ou tampas de roda, também será necessário avaliar seu efeito no resfriamento dos freios para garantir que eles não restrinjam o fluxo de ar para os freios.



Figura 37 Uso de calotas para melhorar o fluxo de ar pela roda (Fonte: Trucking efficiency 2017)

Já os para-lamas inibem o levantamento de solo, rochas e lama no ar, bloqueando o movimento do ar na vizinhança direta das rodas a favor do vento. Isso fornece restrição ao fluxo e, portanto, introduz arrasto no veículo como um todo.

7.2 Gestão do fluxo de ar ao redor do vão cabine-reboque

A área imediatamente atrás de uma cabine e imediatamente a frente do reboque acoplado é definida como o espaço entre cabine e reboque.



Figura 37 - Folga típica de conjunto cavalo mecânico e semirreboque (Fonte: Transport Canada, 2015)

O comportamento do fluxo nesta região de folga afeta diretamente as pressões na face traseira da cabine e na face frontal do reboque, ambas grandes superfícies perpendiculares ao movimento do veículo e, portanto, fortes contribuintes para o arrasto geral do veículo.

Quando os ventos predominantes atingem o conjunto cavalo-reboque em ângulos oblíquos mesmo moderados, o fluxo cruzado através da abertura modifica as pressões nas faces da cabine e do reboque, resultando em um aumento no arrasto geral do veículo (P. Castellucci e K. Salari, 2005). Esta é uma região dominante para a qual é necessária uma avaliação do arrasto médio do vento para verificar os benefícios dos dispositivos de redução de arrasto.

Para minimizar o efeito do fluxo de folga no arrasto, vedar completamente a folga eliminaria sua contribuição de arrasto sob condições de vento cruzado. No entanto, devido aos requisitos operacionais, é necessária uma distância mínima de folga para permitir que o trator se articule em relação ao reboque para facilitar as manobras nas instalações de carregamento e depósitos de veículos. As folgas típicas do trator-reboque estão na faixa de cerca de 1,0 metro (40 polegadas).

Foi demonstrado que a folga começa a ter um impacto significativo no arrasto do veículo, uma vez que é superior a cerca de 0,45 m, com o arrasto aumentando cerca de 2% para cada 0,25 m de folga aumentada além de aproximadamente 0,75 m. A pesquisa de Landman et al. (SAE International, 2009) sugeriu que, resolvendo completamente a questão da folga, uma economia de arrasto da ordem de 6% poderia ser alcançada para um reboque de trator típico. Isso equivaleria a uma melhoria de aproximadamente 3% no consumo de combustível a 98 km/h (60 mph), conforme ilustrado abaixo.

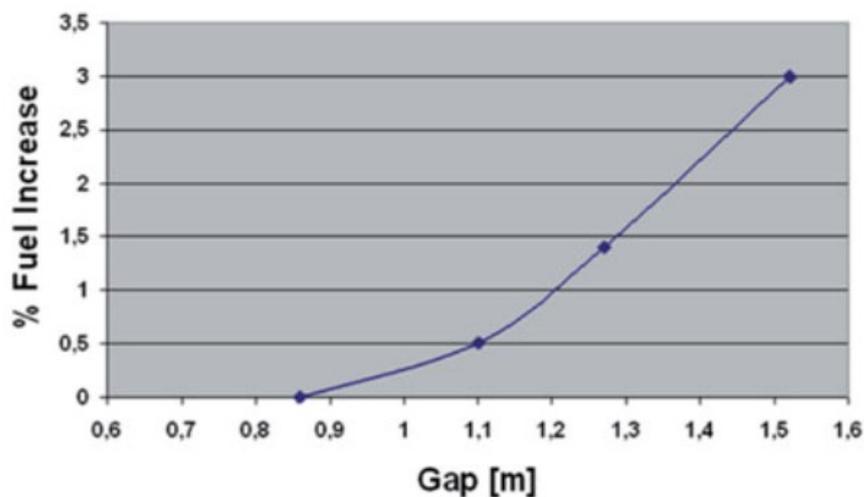


Figura 38 - Aumento da queima de combustível vs gap (Fonte: Landman et al. "Understanding Practical Limits to Heavy Truck Drag Reduction", SAE International, 2009)

Existem dois tipos principais de dispositivos destinados a reduzir o arrasto aerodinâmico no vão do cabine-reboque. São extensões laterais da cabine e dispositivos nas folgas, os quais respectivamente podem estar ser montados na cabine e montados no reboque.

7.2.1 Montados na cabine

Os extensores laterais e também os defletores laterais agem para estender a borda traseira da cabine para inibir o fluxo de ar na região do vão.



Figura 39 - Extensores laterais de cabine (Fonte: Transport Canada, 2015)



Figura 40 - Defletores laterais de cabine (Fonte: autoentusiastas.com.br, acessado em 18/04/2022)

Existe uma oportunidade significativa para melhorias aerodinâmicas no tratamento das superfícies imediatamente atrás da cabine do trator. De acordo com as pesquisas de J. Ortega et al. (2009), ao cobrir a área em uma carenagem horizontal e misturá-la às carenagens das rodas, se tem benefícios aerodinâmicos significativos.

Um divisor de espaço (grande placa vertical) é uma técnica frequentemente promovida para reboques. Cooper demonstrou isso como técnica viável para condições de vento cruzado. Um divisor de espaço montado na cabine se comportaria de maneira semelhante, minimizando o custo de implementação.

Uma técnica final montada na cabine para reduzir o arrasto associado à folga é reduzir a distância entre a parte traseira do trator e a frente do reboque. Este método é limitado pela necessidade do operador de manter um raio de giro suficiente para permitir o carregamento e descarregamento em áreas de docas restritas ou para negociar curvas apertadas à direita.

7.2.2 Montados no reboque

Muitos dos dispositivos destinados a reduzir as perdas aerodinâmicas na região do “gap” entre cabine e reboque são dispositivos montados nos reboques. Conseqüentemente, não houve um alto nível de adoção dos atuais dispositivos de vedação de folga, com exceção das extensões laterais montadas na cabine. “Gap splitters”, carenagens de trailers e “gap fillers” são as principais técnicas aqui

aplicadas ao reboque. Além disso, os divisores de lacunas geralmente vêm em duas variedades: placas de plano central e dispositivos que tentam preencher a lacuna real.

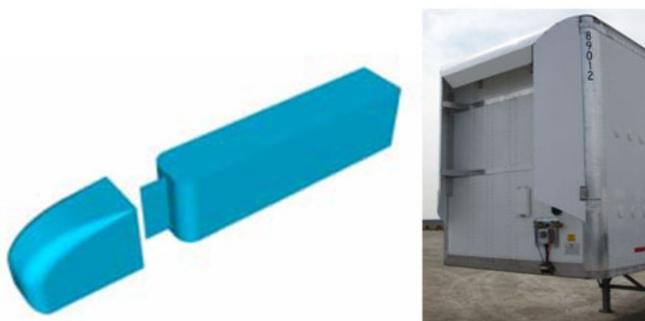


Figura 41 - Dispositivos para a região do vão - divisor de espaço (esquerda), carenagem do reboque (Fonte: Transport Canada, 2015)

Vários fabricantes têm produtos comerciais para as regiões de lacunas no mercado hoje que afirmam economias de combustível na ordem de 2%. As economias percentuais são, no entanto, altamente dependentes do procedimento de teste escolhido, incluindo o tamanho do intervalo inicial e a velocidade do teste.

Alguns dos dispositivos de preenchimento de lacunas são semelhantes a unidades de refrigeração. Pode ser possível otimizar a forma de tais unidades de refrigeração para aproveitar o efeito de redução de folga.

De acordo com o estudo de Landman et al.(2009) o limite superior de melhoria aerodinâmica esperado estava na faixa de uma redução de arrasto de 7%. A uma velocidade típica de 55 mph, isso se traduziria em uma economia de combustível aproximada de 3,5%.

7.3 Gestão do fluxo de ar sob o reboque

De maneira semelhante ao espaço entre o conjunto cavalo-reboque, a área aberta abaixo do reboque proporciona um maior prejuízo de arrasto em condições de vento cruzado. A abordagem geral para minimizar o arrasto associado a esta região é evitar a entrada de ar. Assim, alguns fabricantes desenvolveram um “reboque conceito” que promete fornecer uma redução de 18% no arrasto para uma combinação completa de cabine-reboque europeu.

O trailer faz uso de barragens de ar, painéis de acabamento, saias laterais, carenagens de roda e uma cauda de barco para reduzir o arrasto geral do veículo. O conceito é um pacote completo e não consiste em componentes adicionais individuais. Uma combinação minuciosamente avaliada de dispositivos complementares pode fornecer o mesmo nível de redução de arrasto.

7.3.1 Saias laterais

As saias laterais são usadas para evitar que o fluxo de ar entre na região sob o reboque. Nos últimos anos, elas foram amplamente adotadas e são comumente observados em muitos trailers. Segundo a Academia Nacional de Ciências Canadense, a redução no consumo de combustível foi da ordem de 3 a 7%. Além disso, esses dispositivos têm projetos mecânicos simples, de modo que a manutenção e a confiabilidade não devem ser uma grande preocupação.



Figura 42 - Saia lateral (Fonte: Transport Canada, 2015)

7.3.2 Caixas na parte inferior do reboque

De maneira semelhante às saias laterais, caixas leves sob a carroceria, podem ser uma abordagem para minimizar o arrasto aerodinâmico. Testes em túnel de vento usando modelos em escala de tais configurações apresentaram reduções de arrasto na ordem de 10-15%.

Existem problemas operacionais que precisam ser resolvidos, bem como penalidades de peso significativas que podem surgir e também alterações no ângulo de ruptura do reboque. No entanto, também se tem outros benefícios além da redução do arrasto, uma vez que estas caixas possam ser desenvolvidas para a arrumação de cintas de ligação, correntes, pneus sobresselentes e outros acessórios. Além disso, essas caixas podem oferecer proteção lateral para usuários vulneráveis da estrada.

Qualquer implementação desse tipo teria que ser bem projetada para garantir que não surgissem problemas de operacionalidade da distância do solo.



Figura 43 - Caminhão Mercedes-Benz no túnel de vento mostrando a carenagem lateral diminuindo o vão livre com o solo, o defletor no teto e o baú arredondado (Fonte: autoentusiastas.com.br, acessado em 18/04/2022)

7.4 Gestão do fluxo de ar na traseira do reboque

A base do reboque é uma das maiores fontes de arrasto para reboques de tratores. A baixa pressão na face do reboque devido à esteira aerodinâmica, combinada com a alta pressão na face frontal do veículo, causa um diferencial de pressão líquida que gera uma força na direção do vento. Este diferencial de pressão da frente para trás é a principal fonte de arrasto para a maioria dos veículos pesados.

Aumentar a pressão de base reduzirá esse diferencial e reduzirá o arrasto líquido no veículo. Portanto, muitas tecnologias de redução de arrasto para o reboque visam aumentar essa contrapressão.

7.4.1 Painéis de extensão

Afunilar a extremidade traseira de um veículo longo aumentará sua pressão de base, fornecendo recuperação de pressão do fluxo circundante antes que ele deixe as bordas traseiras afiadas e forme uma esteira. Essa pressão de base aumentada fornece uma diferença de pressão geral reduzida da frente para trás da combinação trator-reboque. A cauda de barco, também conhecida como painéis de extensão, é outra tecnologia que demonstrou ser eficaz para reduzir o arrasto do conjunto cavalo-mecânico.

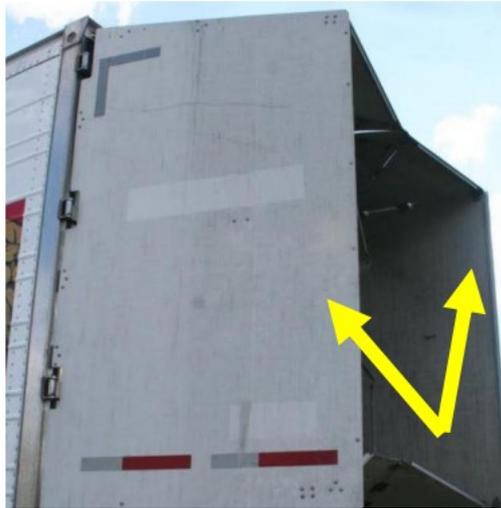


Figura 44 - Flaps utilizados na traseira do baú para reduzir o arrasto (Fonte: Trucking efficiency 2017)

8. EXPERIMENTO COM UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM EM TÚNEL DE VENTO

Um estudo realizado no Instituto Real de Tecnologia de Melbourne (RMIT University), Austrália, por Harun Chowdhury *et al*, com revisão paritária sobre responsabilidade da Sociedade de Engenheiros Mecânicos de Bangladesh, utilizou um protótipo de caminhão em escala 1:10 sobre a ação de um túnel de vento cuja potência confere uma máxima velocidade de 145km/h. A intenção do estudo que era mensurar a interferência de certos tipos de equipamentos aerodinâmicos sobre o modelo de referência, aplicando ventos com intervalo de 40 a 120km/h de magnitude (aumentada em 10km/h a cada rodada de testes), e ainda variando o ângulo de incidência do vento em relação a frente do protótipo de 0 a 15 graus em intervalados

em 5 graus a cada teste. Para a medição das forças sobre o modelo, nele foi conectada uma célula de carga de múltiplos eixos (fabricada pela companhia americana JR3) capaz de mensurar as forças de arrasto, sustentação e forças de través (ou laterais) geradas no veículo, além de mensurar os momentos gerados em torno dos seus 3 eixos quando submetido as ações dos ventos. A figura 45 mostra o posicionamento da célula de carga e o modelo base para o teste.

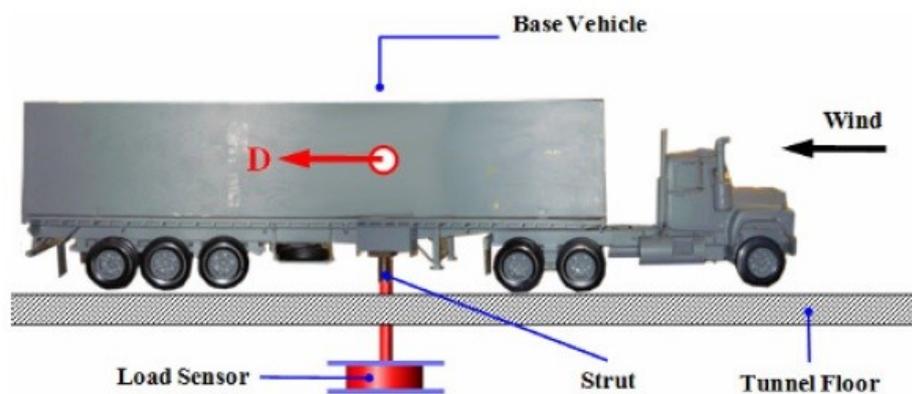


Figura 45 - Modelo utilizado no túnel de vento conectado a uma célula JR3

Conforme citado anteriormente, para a comparação dos efeitos gerados por tipos diferentes de equipamentos aerodinâmicos, foi realizada 6 combinações diferentes de aparelhos, resultando nos modelos da figura 46:

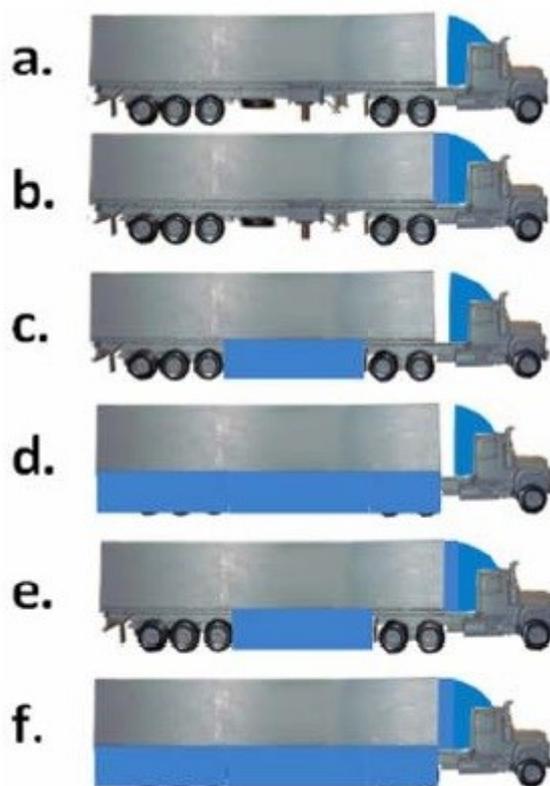


Figura 46 - Variantes de configurações do protótipo

Nos resultados obtidos com a incidência de vento frontal ($\theta = 0$) o modelo padrão apresentou C_d praticamente constante de 0,8, o que está dentro dos padrões para um semirreboque (normalmente entre 0,5 a 0,9) e similar ao encontrado por Watkins et. Al. Dentre todas as configurações o modelo mais equipado foi o que possuiu menor coeficiente de arrasto conforme a figura 47:

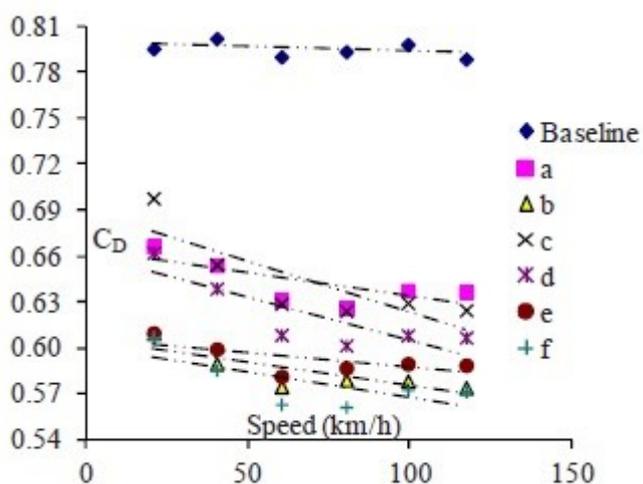


Figura 47 - Coeficientes de arrastos apresentados por cada modelo para cada variação de velocidade

A figura 48 mostra a redução em porcentagem do arrasto que cada configuração do modelo apresentou em relação ao modelo base, para diferentes ângulos de vento cruzado:

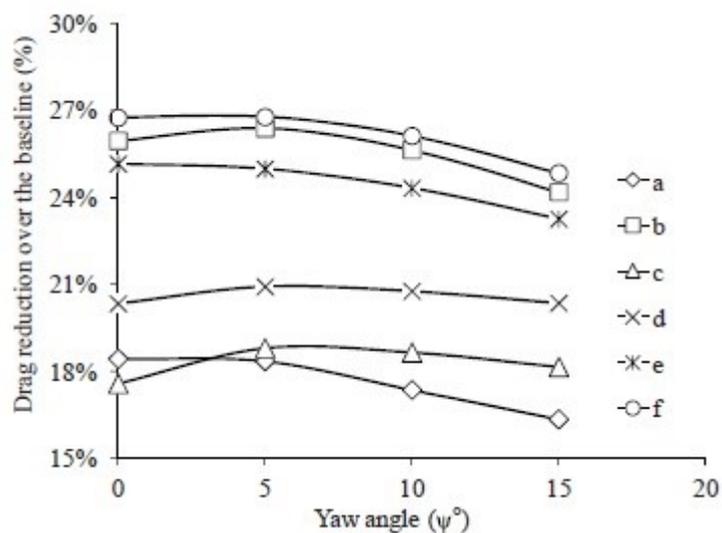


Figura 48 - Redução do Arrasto de cada modelo a partir do modelo inicial para cada angulação de vento

Dela pode se concluir que em algumas situações de vento a redução é menor ou a maior, dependendo de cada configuração, e a partir dela foi feito um tratamento estatístico para a obtenção da redução média de cada configuração do caminhão considerando vento oscilando entre 0 e 15 graus de acordo com a figura 49:

| Configuration | Average drag reduction |
|---------------|------------------------|
| a | 17.6% |
| b | 25.5% |
| c | 18.3% |
| d | 20.6% |
| e | 24.4% |
| f | 26.1% |

Figura 49 - Redução média do arrasto observada em cada tipo de configuração

O estudo conclui que uma melhor performance aerodinâmica para caminhão pode ser obtida não só através do uso de defletores de ar de teto e laterais adicionados a cabine, que reduzem ou eliminam o vão entre cavalo mecânico e a carreta, mas também reduzindo espaços abertos sob a unidade de carga. O melhor desempenho apresentado ocorreu através do modelo mais equipado que possuía menos vãos livres ao longo de sua estrutura, apresentando 26,1% de redução do arrasto, sendo notável influência expressiva do defletor de ar de cabine que sozinho gerou uma redução de 17,6% do arrasto.

9. CONCLUSÃO

A exata quantificação de quanto um defletor de ar ou outro equipamento aerodinâmico irá reduzir no consumo de combustível e emissões de gases para o proprietário de um caminhão é algo praticamente impossível de se prever visto que a eficiência destes dispositivos dependem de variáveis como velocidade, peso do caminhão e rodovia que irá trafegar, além do fator humano, visto de motoristas diferentes conseguem consumos diferentes em veículos iguais justamente por ter práticas e hábitos diferentes na direção. Entretanto é possível dizer que a economia irá sim ocorrer em um caminhão devidamente equipado e o esperado é que se consiga ao menos 10% de economia ao instalar um defletor de ar em um caminhão.

Pesquisando por vários sites de vendas de defletores, foram encontrados defletores de teto e laterais de variados valores, onde especificamente no site Mundo do Caminhão foi encontrado e escolhido um defletor para modelos Scania Series 4 e 5 no valor de R\$3100,00, prometendo uma redução de consumo máxima em até 18%.

A empresa de soluções de transporte e fabricante de semirreboques Randon, estima uma quilometragem média anual de 150000km por ano para um caminhão. Visto os fatores anteriormente citados que interferem no consumo de um veículo de carga, é normal encontrar médias que vão de 1,5km/l até 3km/l ou mais em condições favoráveis. Consideremos 2km/l como média para uma simulação de economia, e considerando que os preços de diesel variam pelo país, consideremos R\$6,89 o valor hoje do litro de diesel S10 (preço comum de se encontrar atualmente na cidade de Uberlândia, MG). O estudo de White (2002) foi o que concluiu a menor melhoria de eficiência entre os observados, sendo então este considerado para um cálculo de

economia considerando um cenário totalmente plausível. Assim, considerando a economia real como a divisão da quilometragem rodada pelo consumo médio (quantidade total de litros no ano) multiplicada pelo valor do litro vezes a porcentagem de economia gerada pelo uso do defletor temos que:

$$E = \frac{150000}{2} \times 6,89 \times 0,10 = 51765$$

Assim sendo, tem-se uma economia de combustível em um ano equivalente a aproximadamente 16 vezes o valor investido. Em entrevista com Daniel Rasé, vendedor de caminhão na Escandinávia (concessionária Scania em Uberlândia), o mesmo afirma que grande parte da troca de frota de empresas ocorre em aproximadamente 4 anos (a idade média da frota nacional em 2020 era de 11,8 anos), o que levaria a uma economia de mais de R\$200.000,00 reais ao longo do tempo que este permaneceria na empresa.

Assim sendo, o uso de defletores é hoje uma excelente realidade por vezes esquecida por proprietários de caminhões, sendo uma ferramenta extremamente útil nos tempos atuais, visto o valor do combustível.

10 BIBLIOGRAFIA:

IPCC (2014). Chapter 8 - Transport. In: Climate Change 2014 - Mitigation for Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III. Cambridge University Press, Cambridge and New York pp.117, .

Disponível em: <http://mitigation2014.org/report/final-draft>.

Hucho, W.-F. 1998. Aerodynamics of Road Vehicles, 4th Ed. Society of Automotive Engineers.

Baker H., R. Cornwell, E. Koehler, e J. Patterson (2009). Review of Low Carbon Technologies for Heavy Goods Vehicles. Ricardo Inc., Califórnia, Estados Unidos. 103 pp.

Disponível em:
<http://www.lowcvp.org.uk/assets/reports/090715%20Review%20of%20low%20carbon%20technologies%20for%20heavy%20goods%20vehicles.pdf>.

Çengel, Yunus A. Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações / Yunus A. Çengel, John M. Cimbala - Porto Alegre, 2007.

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

MUNSON, B. R. Fundamentos da mecânica dos fluidos. 1°. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004

UTG (2012). Reduction and Testing of Greenhouse Gas Emissions from Heavy Duty Vehicles - LOT 2. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, University of Technology Graz. 210 pp. Disponível em
http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/docs/hdv_2011_01_09_en.pdf.

HOLLANDA, J. B. Força de Arrasto e Eficiência Energética. Rio de Janeiro, Brasil: INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética, 2011. Disponível em:
http://www.inee.org.br/downloads/eficiencia/Arrasto_2011_JaymeHollandalINEE.ppt

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). Resolução Nº 703, de 10 de outubro de 2017. Brasília, 2017

EPE (2021a). Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil – Benchmarking Internacional. Empresa de Pesquisa Energética.
Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20\[PT\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20[PT].pdf)

Hollanda J.B. de (2011). Força de Arrasto e Eficiência Energética. INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. Disponível em:
http://www.inee.org.br/downloads/eficiencia/Arrasto_2011_JaymeHollandalINEE.ppt

Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses, “Transport Canada”, 2015.

Reducing Aerodynamic Drag & Rolling Resistance from Heavy-Duty Trucks: Summary of Available Technologies & Applicability to Chinese Trucks, “Thomas Curry, Isaac Liberman, Lily Hoffman-Andrews & Dana Lowell” (M.J. Bradley & Associates LLC, 2012)

Oliveira, T. D.;* Tofaneli, L. A.; Magalhães, T. F.; Santos, A. A. B. Redução de Consumo de Combustível em Veículos de Carga Rodoviários: Uma Abordagem Numérica e Analítica. Rev. Virtual Quim., 2016, 8 (4), 1204-1219. Data de publicação na Web: 9 de agosto de 2016

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.

National Academy of Sciences (NAS). 2010. Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles. Committee to Assess Fuel Economy Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles. The National Academic Press.

Cooper, K. R. 2004. Commercial Vehicle Aerodynamic Drag Reduction: Historical Perspectives as a Guide. In *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains* (McCallen, R., Browand, F., and Ross, J., eds.) pp. 9-28, Springer, New York.

Leuschen, J., Cooper, K. R. 2006. Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers. SAE Paper No. 2006-01-3456.

Leuschen, J., Cooper, K. R. 2006. Summary of Full-Scale Wind Tunnel Tests of Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers. Lake Tahoe.

J. Leuschen and K.R. Cooper, Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers, 06CV-222, SAE International, 2006.

P. Castellucci e K. Salari, Computational Simulation of Tractor-Trailer Gap Flow with Drag-Reducing Aerodynamic Devices , 2005-01-3625, SAE International, 2005.

D. Landman, R. Wood, W. Seay e J. Bledsoe, Understanding Practical Limits to Heavy Truck Drag Reduction , 2009-01-2890, SAE International, 2009.

J. Ortega, K. Salari e B. Storm, Investigation of Tractor Base Bleeding for Heavy Vehicle Aerodynamic Drag Reduction , *The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains*, Volume 41, 2009.

Fluid Dynamics Lesson 6, "Alicia Sutton" (<https://slideplayer.com/slide/6102285/>),
accesso 15/02/2022

An experimental study on of the effect of various deflectors used for light trucks in Indian subcontinent, “Harun Chowdhury et al. (2013)”

<https://www.ilos.com.br/> (INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN), acesso 02/02/2022

<https://www.mercedes-benz.com.br/>, acesso 11/02/2022

<https://www.rodoplast.com.br/>, acesso 15/02/2022

<https://www.frotacia.com.br/novo-actros-mercedes-benz-exibe-oito-modelos-na-fenatran/>, acesso 18/04/2022

<https://www.newtrucks.com.br/>, acesso 13/02/2022

<https://www.dw.com/pt-br> (DEUTSCHE WELLE), acesso 15/02/2022

<https://www.volvotrucks.com/en-en/> (VOLVO), acesso 20/02/2022

<http://www.abtlp.org.br/> (Associação Brasileira de Transporte e Logística de Produtos Perigosos), acesso 09/02/2022

<https://safety.fhwa.dot.gov/> (Federal Highway Administration)/ (us department of transportation), acesso 13/02/2022

<https://www.carrosnaweb.com.br/> (Carros na Web), acesso 22/03/2022

<https://revistacarro.com.br/coeficiente-aerodinamico/#:~:text=Atualmente%2C%20a%20maioria%20dos%20carros,%2C30%20e%200%2C40.> (Revista Carro), acesso 22/03/2022

<http://aerofleet.com.br/>, acesso 20/02/2022

<https://www.transportabrasil.com.br/>, acesso 10/04/2022

<https://setcesp.org.br/> (SETCESP), acesso 20/04/2022

EMPRESAS RANDON

O caminhão Scania R500 tem alta potência e consumo de combustível reduzido. Seu motor tem capacidade de 13 litros e consome cerca de 24,92 litros de diesel a cada 100 quilômetros rodados, com uma velocidade média de 80 km/h.

Tanque de caminhão 300 a 500lt

Medium- and heavy-duty vehicles [account](#) for less than 5% of the vehicles on the road but produce over 20% of the emissions from the transportation sector, which currently accounts for more than one-third of U.S. green-house gas emissions. (DOE, U.S Department of Energy)