

Influência do arrasto aerodinâmico no consumo de combustível no transporte de minério de ferro

Rodrigo Pirola Pestana^{1*}, Jefferson Pereira Amurim², Flaviana Cruz Coelho Vazzoler³, Guilherme Araujo Lima da Silva⁴, Diogo Mendes Pio⁵, Caio Fuzaro Rafael⁶

^{1,2,3} Departamento de Engenharia Ferroviária, Av. Dante Michelini, 5500, 29090-900, Vitória-ES

^{4,5,6} ATSA Engenharia, Estudos e Projetos, Rua Cotoxó, 611, 05021-000, São Paulo-SP

e-mail: rodrigo.pirola@vale.com, jefferson.amurim@vale.com, flaviana.coelho@vale.com, gasilva@ats4i.com.br, dpio@ats4i.com.br, caio@ats4i.com.br

Resumo Com foco na sustentabilidade e na redução de custos, uma das principais contribuições que pode ser dada pelas áreas de Operação Ferroviária é reduzir, ano após ano, o consumo de combustível utilizado em suas operações. Com vista a essa contribuição, o atual trabalho tem como objetivo realizar uma análise quantitativa de como a influência do arrasto aerodinâmico da composição ferroviária contribui com o consumo de combustível e, conseqüentemente, na emissão de gases de efeito estufa.

Assim, o presente trabalho identificou inúmeras referências bibliográficas que mencionam, através de uma melhora na condição aerodinâmica da composição, reduções de 20% a 45% sobre o coeficiente de arrasto, gerando, em consequência, uma economia de 5% a 9% sobre o consumo de combustível.

Buscando identificar o coeficiente de arrasto e, em consequência, a redução no consumo de combustível, especificamente para os modelos de trens de Minério de Ferro da Vale, utilizou-se um software computacional que permite a análise dinâmica dos fluídos (Computational Fluid Dynamics – CFD++), e avaliou-se qual a “influência do arrasto” sobre o consumo de combustível dos trens estudados. Para esse estudo foram estabelecidas três diferentes composições: composição (vagões) descarregada sem cobertura (teste de referência - vazios), composição (vagões) descarregada com cobertura (prova de conceito - vazios) e composição (vagões) carregada (cheia).

Os resultados obtidos diante dos diferentes modelos de trens e dos demais parâmetros refinados demonstram um potencial de redução sobre o consumo de combustível. Além disso, percebe-se diante dos resultados alcançados que o coeficiente de arrasto sobre os vagões vazios é o mais representativo do que os demais modelos estudados.

Palavras-Chaves: Operação Ferroviária; Consumo de Combustível; Arrasto Aerodinâmico; Cobertura de Vagões.

1. INTRODUÇÃO

O mundo encontra-se em constante evolução. Hoje, para o contexto Vale, respeito e equilíbrio são tão fundamentais para o progresso tanto quanto os volumes de

minérios transportados e embarcados. Entende-se, portanto, que o único desenvolvimento viável é aquele que levanta a bandeira da sustentabilidade. Este trecho, extraído do relatório de Sustentabilidade 2012 da Vale, mostra a importância cada vez maior

de trilharmos este caminho e a principal contribuição que pode ser dada pelas áreas de Operação Ferroviária, com este foco, é reduzir o consumo de combustível utilizado em suas operações. Além disso, reduzindo o consumo de combustível estamos atuando em uma forte alavanca de custo da área operacional - o gasto com a aquisição de óleo diesel (Figura 1).



Figura 1: **Alavancas de Custo da Operação Vale.**
Fonte: **Vale, 2014.**

Portanto, o desenvolvimento deste trabalho está totalmente alinhado as diretrizes da Vale, tanto no que tange a redução dos custos quanto no que tange a emissão de gases de efeito estufa (meta interna de carbono).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram encontradas diversas referências bibliográficas durante o desenvolvimento deste trabalho. A proposta é que neste capítulo se possa fornecer um pequeno entendimento dos diversos trabalhos já desenvolvidos com esta mesma linha de pesquisa.

Lindgreen e Sorenson [1] definiram uma metodologia de análise que utiliza como dado quantitativo a força de arrasto e o coeficiente de arrasto. Esta força de arrasto é definida em função da área, velocidade, densidade e coeficiente de arrasto, e pode ser dada por:

$$F_D = \frac{\rho}{2} C_D A_{norm} v^2$$

Onde: F_D é a força arrasto, A_{norm} é área frontal, v é a velocidade trem em relação ao vento, ρ é a densidade do ar e C_D é o coeficiente de arrasto.

Hirsch [2], menciona que com os dados obtidos no CFD pode ser calculada a força de arrasto (F_D), e que através da equação descrita acima pode ser obtido o coeficiente de arrasto. O coeficiente total de arrasto é dado

pela soma entre o coeficiente de arrasto da locomotiva e da soma todos os vagões juntos:

$$C_{D,tot} = C_{D,loc} + \sum C_{D,v}$$

Onde: $C_{D,tot}$ é o coeficiente de arrasto de todo o trem, $C_{D,loc}$ é o coeficiente de arrasto da locomotiva e o $C_{D,v}$ é o coeficiente de arrasto de cada vagão.

Storms, Ross e Dzoan [5] fizeram experimentos onde um trem, em escala reduzida, foi submetido a experimento em túnel de vento. Nesse estudo, chegou-se à conclusão que o vagão carregado (cheio) teve o coeficiente de arrasto de 29% a 41% menor que o vazio, no entanto este vagão carregado (cheio) tinha um arrasto maior que o vagão coberto. Os autores afirmam que a modificação para a geometria de menor arrasto garantiria uma economia de 9% de combustível por viagem, no entanto, não informam em qual velocidade relativa ao vento ou velocidade do trem.

Já no relatório de Stodolsky [3] foi observada uma redução de 25% no arrasto aerodinâmico do trem e 5% de consumo de combustível depois da instalação de carenagens e películas sobre vagões vazios, sendo que esta cobertura não era total. No entanto, eles constataram dificuldades em desenvolver um sistema de cobertura de grande confiabilidade e fácil manutenção que não atrapalhasse o processo de carga e descarga dos vagões.

Já no estudo elaborado por Watkins, Saunders e Kumar [4], foi observado que a implementação da cobertura diminuiu 7% do arrasto em relação ao vagão carregado (cheio) e 30% em relação ao vagão vazio.

Para o caso de propor alguns tipos de melhorias as referencias Stehly [6], Storms, Ross e Dzoan [5] e Watkins, Saunders e Kumar [4], observaram que o tamanho dos espaços entre os vagões presentes na composição ("gaps") pode gerar um aumento considerável de arrasto (Figuras 2). Observe que uma grande parte do arrasto provém da distancia entre os vagões, ao diminuir essas distancias pode-se ter 50% da redução do arrasto.

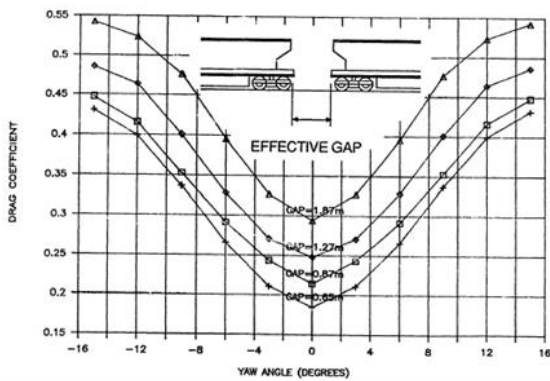


Figura 2: Efeito do espaçamento entre os vagões do trem. Fonte: Watkins, Saunders e Kumar [4].

Outra sugestão pode ser observada no estudo de Storms, Ross e Dzoan [5], os quais propõem colocar divisores dentro das caixas dos vagões vazios. Segundo ele, essa proposta pode reduzir em 21% o arrasto da composição (Figura 3), sendo isso aproximadamente metade do oferecido com um vagão totalmente coberto (43.2%). Os autores ainda fazem uma ressalva que a quantidade de divisórias a ser inserida dentro do vagão também interfere na redução do arrasto aerodinâmico.

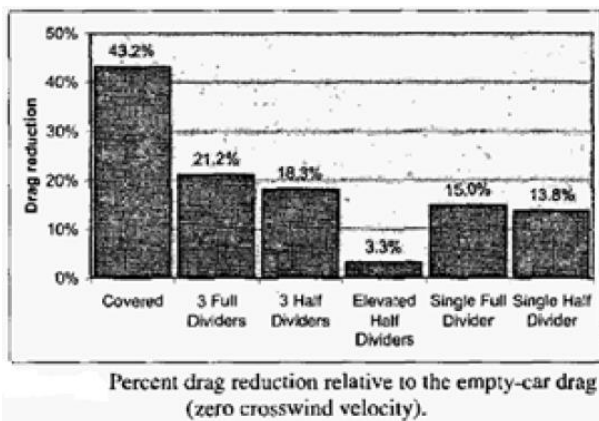


Figura 3: Comparação de arrasto de vagões com divisórias / Fonte: Storms, Ross e Dzoan [5].

Por fim, pode-se citar Stehly [6]. Em seu estudo ele faz uma comparação de um determinado caso em diferentes velocidades e percebeu, que à medida que aumenta a velocidade do trem as perdas que aumentam significativamente são as aerodinâmicas para um mesmo peso. O mesmo autor publicou que as perdas da conversão do Diesel para energia mecânica são de 60% (40% de eficiência) e que na média as perdas aerodinâmicas são de 8% do consumo de Diesel por viagem. O autor

não publicou qual a velocidade relativa ao vento ou do trem para obtenção destes resultados.

Em suma, pode-se perceber que várias ações podem ser tomadas visando reduzir o arraste aerodinâmico que gera influência sobre os trens, tanto carregado (cheio) quanto vazio, e que qualquer uma destas ações, conseqüentemente, possibilita reduções quanto ao consumo de combustível e também na redução da emissão de gases efeito estufa.

3. DESENVOLVIMENTO

Ao longo de tópicos as etapas do desenvolvimento deste trabalho serão apresentadas.

3.1. Ferramentas Utilizadas

Para que fosse reproduzido um "túnel de vento" em ambiente computacional, alguns softwares foram utilizados:

a). Solucionar ("Solver")

O solucionador é o programa que executa a simulação aerodinâmica, no presente trabalho foi utilizado o CFD++.

Ele é uma ferramenta numérica destinada à análise de escoamentos de gases e/ou líquidos, muito utilizada em áreas aeroespacial, automotiva, industrial, biomédica e de vários campos de pesquisa.

A simulação fornece características do escoamento, como velocidades, distribuição de pressões, temperaturas, forças, além de permitir análises térmicas a partir de fluxos e coeficientes de transferência de calor.

b). Gerador de malha

A geração de malha é realizada por outro software chamado MIME (Multipurpose Intelligent Meshing Environment). O MIME é capaz de gerar malhas bi e tri-dimensionais não estruturadas. Este aplicativo permite adensar a malha em regiões volumétricas, criar e/ou isolar domínios e desenvolver camadas de prismas próximas às superfícies das paredes, com a finalidade de capturar a camada limite.

O MIME possui fácil interface gráfica, ferramentas para análise da malha em superfícies e volumes, e trabalha com todos os sistemas CAD que produzem modelos no formato sólido, como ACIS, Parasolid, Granite.

O processo de geração de malha no MIME consiste em desenvolver uma malha sobre as superfícies e após isto gerar uma malha volumétrica a partir de um modelo tridimensional desenvolvido numa plataforma CAD. No presente trabalho também foi utilizado o programa SolidWorks 2009.

Diante da utilização desses softwares os Modelos 3D presentes nas Figura 4 e 5 abaixo foram desenvolvidos.



Figura 4: **Modelo 3D desenvolvido – Trem Vazio /**
Fonte: Vale, 2014.

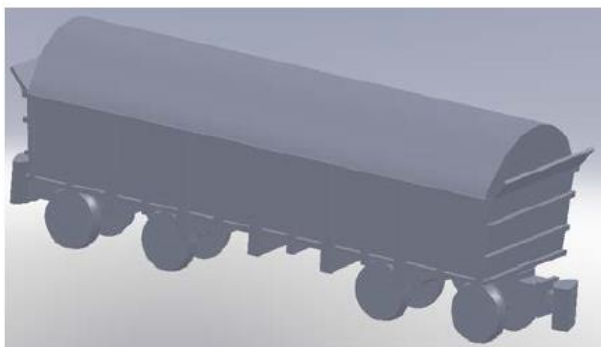


Figura 5: **Modelo 3D desenvolvido – Vagão com Cobertura /**
Fonte: Vale, 2014.

c). Simulador de Trens

Para obtermos os dados referentes ao trem simulado foi utilizado o simulador dinâmico de trens TDS 5000. Com base neste simulador foram extraídos todos as característica necessárias para a realização dos cálculos finais deste trabalho, tais como: perfil planialtimétrico da ferrovia, consumo de combustível, velocidade de circulação e curva de desempenho da locomotiva (consumo).

3.2. Detalhamento

Para uma análise mais detalhada, rês diferentes geometrias de vagões foram contempladas:

- Composição Vazia
- Composição Cheia
- Composição com Cobertura

Sobre estes cenários de vagões foi complementado quatro diferentes condições/avaliações meteorológicas (direção e velocidade de ventos – extraídos de 4 estações meteorológicas – Vitória, Santa Tereza, Fundão e Aimorés) foram especificadas:

- Condição sem vento
- Ventos com intensidade mínima
- Ventos com intensidade média
- Ventos com intensidade máxima

Nas figuras 6, 7 e 8 abaixo pode-se visualizar o ambiente de simulação desenvolvido e o impactos da linha de corrente de ventos e o coeficiente de pressão sobre o modelo 3D construído.

O principal dado extraído deste ambiente de simulação é o *coeficiente de arrasto de todo o trem (C_D)*, sendo:

- **Vazio = 80,80**
- **Cheio = 60,20**
- **Com Cobertura = 50,50**

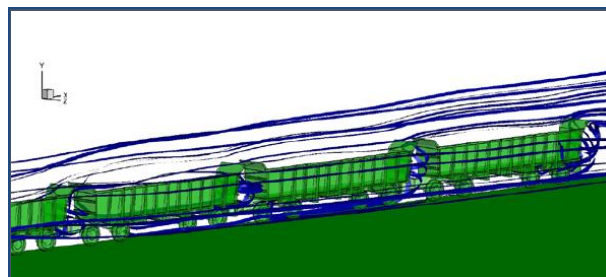


Figura 6: **Linha de corrente de ventos sobre geometria de 5 vagões /**
Fonte: Vale, 2014.

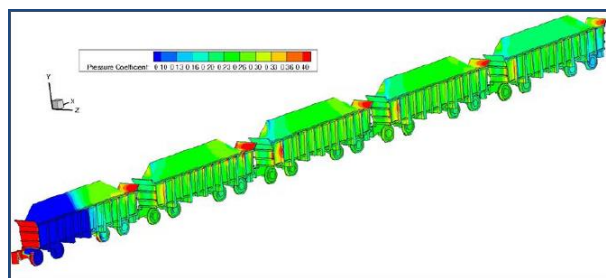


Figura 7: **Coeficiente de pressão sobre o trem cheio /**
Fonte: Vale, 2014.

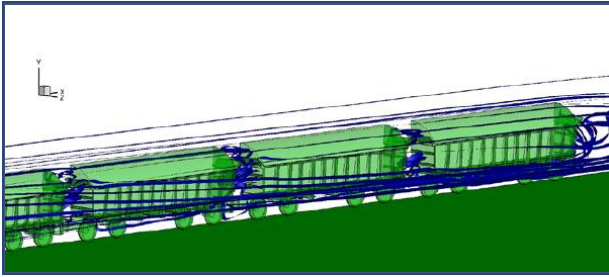


Figura 8: **Coefficiente de pressão sobre o trem com cobertura nos vagões** / Fonte: Vale, 2014.

Vale ressaltar que estes coeficientes de arrasto foram obtidos com uma velocidade média de 54,21 Km/h e ventos com contra de 7,1 m/s (25,56 Km/h).

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos diante do trem definido e dos demais parâmetros refinados demonstram um potencial de redução sobre o consumo de combustível que pode variar entre 0,77% e 1,53%.

Como já demonstrado, o coeficiente de arrasto dos vagões vazios é o mais representativo. Sobre este caso, pode-se visualizar potenciais reduções que variam entre 0,60% e 2,57% (comparado com vagões cobertos). Já sobre os vagões carregados, e também realizando uma comparativo com os vagões cobertos, pode-se visualizar (Tabela 1) uma redução potencial do consumo em torno de 0,94%.

Tabela 1. Resultados Obtidos

Condição do Vento	Subindo (Vazio)	Descendo (Cgdo)	Total (Vz+Cgdo)
Sem Vento	-2,57%	-0,95%	-1,53%
Vento Mínimo	-1,96%	-0,89%	-1,27%
Vento Médio	-1,09%	-0,86%	-0,94%
Vento Máximo	-0,60%	-0,87%	-0,77%

Levando em consideração a Figura 9 de transporte para os próximos 5 anos, pode-se perceber através do gráfico que ocorrerá um aumento da demanda por Óleo Diesel (apesar da melhoria da Eficiência Energética – Litros/KTkb). Com base nos valores alcançados por este trabalho percebe-se a existência de ações que podem gerar reduções

médias no consumo de combustível na ordem de 26,9 Milhões de Litros (com base nos valores obtidos para o nível de ventos médios).

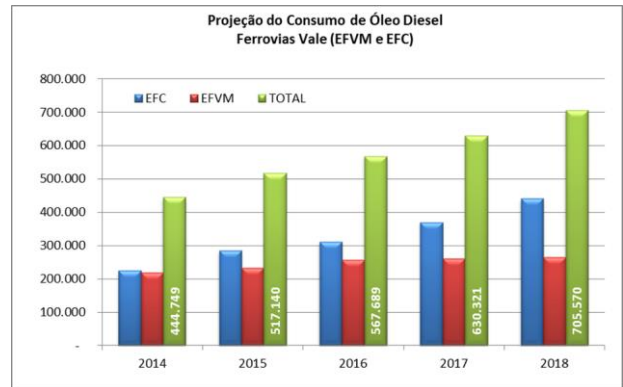


Figura 9: **Projeção de Consumo de Combustível Ferrovias Vale** / Fonte: Vale, 2014.

5. CONCLUSÃO

Pode-se concluir através da revisão da literatura feita e dos resultados obtidos com o estudo da cobertura de vagões que estudar a influência do arrasto aerodinâmico sobre os trens de carga é uma tendência presente no mercado ferroviário.

Especificamente para Estrada de Ferro Carajás (EFC) que irá adquirir novos vagões e locomotivas para sua frota (projeto S11D) e diante de estudos que visam o aumento de velocidade dos trens de minério de ferro, torna-se importante o aprofundamento deste tema, potencializando inclusive, os ganhos aqui projetados.

No mais, pode-se presenciar no contexto externo a tentativa de vários deputados, com foco na preservação do meio ambiente e na saúde da população, em aprovar projetos de Lei que obrigam a utilização de cobertura em vagões que transportam minério de ferro.

Por fim, entende-se diante dos fatos apresentados, que incluir a análise da aerodinâmica sobre os trens de carga, principalmente os trens de minério de ferro, é algo extremamente difícil, porém de extrema importância e, atualmente, pouco explorado no contexto ferroviário nacional.

6. AGRADECIMENTOS

Agradeço a Vale, na figura de seus Gestores e Especialistas, e a empresa *ATS4i Engenharia*,

Estudos e Projetos na união de esforços e conhecimentos para alcançarmos o resultado desejado e aqui apresentado.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Lindgreen, E. B. G.; Sorenson, S. C.; Simulation of Energy Consumption and Emissions from Rail Traffic. Technical University of Denmark. Department of Mechanical Engineering, 2005. 208 p.
- [2] Hirsch, C.; Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics, Second Edition, 2007.
- [3] Stodolsky, F., Railroad and Locomotive Technology Roadmap, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 2002.
- [4] Watkins, S., Saunders, J., and Kumar, H., Aerodynamic Drag Reduction of Goods Trains, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 40, 1992, pp. 147-178.
- [5] Storms, B. L., Ross, J. C., and Dzoan, D., Reducing the Aerodynamic Drag of Empty Coal Cars, RTD 2005-70056, Proceedings of ASME/IEEE Joint Rail Conference, Pueblo, CO, March, 2005.
- [6] Stehly M., Train Resistance and Railroad Emissions and Efficiency, BNSF Internal Article, 2008,