



OTIMIZAÇÃO DO PESO MÉDIO POR VAGÃO: ESTUDO DE CASO DO TERMINAL DE CARGAS DE SARZEDO

Marcos Paulo Costa Araujo¹; Altair Ferreira Filho²

¹ Instituto Militar de Engenharia — Brasil

² Instituto Militar de Engenharia — Brasil

RESUMO

O transporte ferroviário é essencial na matriz logística global, oferecendo alta capacidade e eficiência energética. Entre os indicadores de produtividade, o peso líquido médio por vagão destaca-se por impactar diretamente a utilização dos ativos e o custo por tonelada transportada. Este trabalho apresenta um estudo de caso realizado no Terminal de Cargas de Sarzedo, que implementou ajustes operacionais e tecnologias para elevar esse indicador. A metodologia envolveu análise do processo de carregamento, calibração das pás carregadeiras e integração de sistemas para comunicação entre operadores e sala de controle. Foram avaliados dados do sistema de balanças da MRS antes e após as melhorias. Os resultados indicaram aumento significativo do peso médio, com redução da variabilidade entre vagões e maior estabilidade mensal. Além disso, o pior resultado após as melhorias superou o melhor resultado anterior, confirmando ganhos consistentes. Conclui-se que a integração tecnológica e o controle rigoroso de processos são estratégias eficazes para otimizar a produtividade ferroviária sem comprometer a segurança operacional. O estudo demonstra potencial de replicação em outros terminais que utilizam pás carregadeiras no embarque ferroviário.

Palavras-chave: Transporte Ferroviário, Peso Médio por Vagão, Minério de Ferro, Otimização Operacional.

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário de cargas é parte fundamental da matriz logística global, permitindo alta capacidade de movimentação com taxas reduzidas de emissões, proporcionando uma eficiência energética competitiva. (TOSTES *et al.*, 2024). Nas operações ferroviárias, conseguir transportar maior volume de carga por composição, sem precisar ampliar a infraestrutura existente ou ocupar mais faixas de circulação na malha é fundamental para aumentar a competitividade do modal. (ROTOLI, MALAVASI e RICCI, 2016).

Nesse contexto, o peso líquido médio por vagão se apresenta como um dos indicadores mais relevantes na análise de produtividade. Elevar o peso médio significa dizer que cada vagão transporta mais produto a cada ciclo e, consequentemente, cada locomotiva traciona mais carga a cada circulação, otimizando o uso dos ativos e reduzindo o custo por tonelada transportada (MARTLAND, 2013).

Sob o ponto de vista de ocupação da malha ferroviária, transportar mais produto por composição significa otimizar o indicador de tonelada quilômetro útil (TKU). Obter esse aumento de volume transportado sem precisar elevar o número de trens em circulação permite manter estabilizada a taxa de ocupação da malha, evitando impactos diretamente relacionados à saturação da ferrovia, como exemplo: maior necessidade de cruzamento de trens e menor disponibilidade de faixas para manutenção da via permanente (ROTOLI, MALAVASI e RICCI, 2016)



Sob perspectiva econômica, aumentar o peso útil transportado por trem intensifica a vantagem característica do modal ferroviário: consumir menos energia e emitir menos poluentes por tonelada transportada. Isso é possível pois, ao movimentar maior volume em cada viagem, tem-se um melhor aproveitamento da tração e dos recursos já alocados, gerando ganhos de escala (TOSTES *et al.*, 2024; MARTLAND, 2013). Em operações *heavy haul*, estudos mostram que é viável e vantajoso tanto técnica quanto economicamente aumentar a carga por eixo e o peso total do trem, desde que haja infraestrutura adequada, material rodante compatível e um plano de manutenção bem estruturado (MARTLAND, 2013; BOSSO, MAGELLI e ZAMPIERI, 2023). Além disso, em alguns corredores, a via permanente e os ativos rodantes já são projetados para receber peso por eixo superior ao praticados no dia a dia. Sendo assim, existe uma margem operacional que pode ser explorada com segurança para aumentar a eficiência do transporte.

Contudo, mesmo ciente de todos os benefícios supracitados, aumentar o peso médio por vagão não é uma tarefa simples do ponto de vista operacional. A variação de densidade dos materiais, o processo de calibração das balanças das pás carregadeiras, os diferentes modelos de vagões gôndola e a necessidade de respeitar limites de peso máximo de cada vagão tornam o desafio ainda maior. Basta que um dos vagões da composição ultrapasse a tolerância normatizada para que toda a composição seja retida até retirada do material excedente. Por essa razão, alcançar um aumento sustentável exige um controle rigoroso.

Diante desse contexto, o objetivo do trabalho é apresentar o estudo de caso do Terminal de Cargas de Sarzedo, que obteve um aumento significativo no peso médio dos carregamentos de minério de ferro por meio de ajustes de processo e implantação de tecnologias. Esse artigo se propõe a apresentar os pesos praticados antes e depois das melhorias, bem como mencionar as etapas realizadas pelo terminal para alcançar os resultados obtidos.

2. DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta o contexto do estudo e as ações que levaram ao aumento de peso médio. Inicialmente, são apresentados os modelos de vagões utilizados no carregamento, a influência da variação de densidade do minério no peso médio final, a importância da calibração das pás carregadeiras, e o papel do acompanhamento em tempo real pelo centro de controle operacional. Ao final, são apresentadas as ações implementadas pelo terminal para alcançar os resultados esperados.

2.1. Modelo de Vagões

O terminal está situado no município de Sarzedo – MG, estando conectado à malha ferroviária regional sudeste, atualmente sob concessão da MRS Logística S.A. Sendo uma malha ferroviária de bitola larga (1.600 mm), o transporte de minério de ferro é feito através de vagões GDT e GDU. Esses modelos são amplamente utilizados para o transporte de granéis sólidos, com a descarga sendo feita por viradores (*Car Dumper*), o que permite maior agilidade nas operações de desembarque do produto.

A capacidade volumétrica varia entre os modelos: os vagões GDU e GDT INOX apresentam capacidade de 50 m³, enquanto os vagões GDT em aço carbono possuem 45 m³. Em situações mais críticas, uma mesma tabela pode conter vagões de diferentes modelos. Devido a essa variação, o operador não pode se basear apenas na percepção



visual para determinar o momento de parar o carregamento daquele veículo, sendo necessário o uso de recursos de medição para evitar sobrecarga ou subutilização. Dentre os possíveis recursos, estão as células de carga integradas às pás carregadeiras, que estão mais bem detalhadas na Seção 2.2.

2.2. Calibração das Pás Carregadeira

O Terminal de Cargas de Sarzedo utiliza pás carregadeiras para embarcar o minério de ferro nos vagões gôndola. Durante o processo de carga, a medição do total de produto carregado em cada vagão é feita através das células de carga integradas às pás. Essa informação é crucial para que o operador do equipamento saiba se ele pode embarcar mais produto naquele vagão, ou se o veículo já atingiu seu limite máximo de peso.

O terminal possui uma balança ferroviária. Após o término do carregamento, a composição completa circula sobre essa balança ferroviária e registra o peso bruto exato de cada vagão. Porém, essa pesagem só é possível no momento em que o trem está realizando a circulação de partida do terminal, já com todo o processo de embarque finalizado. Dessa forma, a única fonte de informação que auxilia os operadores durante a execução do carregamento de cada vagão é a célula de carga integrada às pás carregadeiras. Por essa razão, é de fundamental importância manter a calibração das pás carregadeiras.

Por operarem em pátios de piso irregular, trabalhando em movimentação constante e interferências mecânicas (vibrações, atritos e folgas), mesmo após calibração, o erro percentual pode variar entre 0,5% e 2%, valores observados no cotidiano operacional do terminal. Significa dizer que, em um carregamento líquido de 110 toneladas por vagão, o erro pode chegar a $\pm 2,2$ toneladas por veículo. Para equipamentos sem processo de calibração adequado, esse erro é ainda maior, podendo ultrapassar ± 4 toneladas. Por esses fatores, é de suma importância manter a calibração frequente e monitoramento contínuo para garantir precisão operacional necessária.

2.3. Densidade dos Produtos

O Terminal de Cargas de Sarzedo realiza o processo de embarque de minérios de ferro provenientes de diferentes minas. Cada material contém características mineralógicas únicas. Dessa maneira, a densidade varia entre os produtos em função de suas composições. Além disso, fatores como granulometria e taxa de umidade contribuem diretamente para alterações significativas na densidade aparente, que é a densidade do material considerando os vazios entre partículas, condição típica quando o minério está solto em vagões, pilhas ou silos. Segundo Braga (2019), uma amostra que possui densidade seca de $2,26 \text{ t/m}^3$ pode chegar a $2,46 \text{ t/m}^3$ variando a umidade do material.

Considerando um carregamento de 45 m^3 por vagão e adotando a densidade de $2,26 \text{ t/m}^3$, o peso líquido total do vagão é de 101,7 toneladas.

Considerando o mesmo carregamento de 45 m^3 por vagão, porém com a densidade de $2,46 \text{ t/m}^3$, o peso líquido total do vagão é de 110,7 toneladas.

O mesmo produto, o mesmo vagão e o mesmo volume de material embarcado. A diferença foi apenas a taxa de umidade do material, suficiente para alterar 9 toneladas no peso líquido final do vagão.

Essa simulação fortifica a tese de que um operador não pode se basear apenas na percepção visual para determinar o momento de parar o carregamento e reforça a



necessidade de calibração frequente das pás carregadeiras, conforme apresentado na Seção 2.2.

2.4. Centro de Controle Operacional

O centro de controle é um local de onde o colaborador responsável por controlar as operações de uma planta pode coordenar e monitorar as atividades por ele solicitadas ou autorizadas. Através desse monitoramento centralizado, é possível aumentar os níveis de segurança e eficiência operacional, uma vez que os movimentos, dentro da planta, estão sendo coordenados de maneira integrada, reduzindo riscos e elevando a produtividade.

Em um terminal ferroviário de minério, o centro de controle monitora a localização e a atividade que está sendo executada por cada pá carregadeira; a circulação e basculamento dos caminhões, bem como a formação de pilhas nos locais predeterminados; a autorização de entrada e saída de composições ferroviárias; e o controle do processo de embarque de minério de ferro nos vagões.

A tecnologia tem papel fundamental para garantir o funcionamento adequado dos centros de controle, uma vez que, para controlar remotamente, é imprescindível ter informações de qualidade. Utilização de sensores e a busca por automação se mostram em expansão nesse cenário, com obtenção de dados e monitoramento operacional em tempo real (CONCEIÇÃO, 2025; KIBIRA, 2016).

No processo de embarque de minério de ferro em vagões, algumas informações são essenciais para maximizar o indicador de peso médio líquido, e evitar falhas na operação: saber qual pá carregadeira está carregando cada vagão, ter a informação de quantas toneladas já foram carregadas em cada vagão, de quais pilhas estão sendo retirados os produtos, a localização onde se encontra cada pá carregadeira, dentre outras informações vitais para o processo. Obter e integrar todos esses dados em tempo real é um desafio. A solução encontrada pelo Terminal de Cargas de Sarzedo é apresentada na Seção 2.5. Através dela, o terminal obteve o êxito almejado.

2.5. Implementação de Melhorias

Diante de toda a complexidade mencionada nas seções anteriores, o Terminal de Cargas de Sarzedo adotou uma série de ações para melhorar a eficiência de todos os processos de sua planta, permitindo o aumento de produtividade no indicador de peso líquido médio.

A primeira ação adotada foi o controle de calibração das pás carregadeiras. Nessa ação, todas as pás são aferidas a cada 7 (sete) dias. Caso a diferença entre a massa medida e a massa real seja superior a 1,5%, a pá passa por um processo de calibração. Além disso, durante a circulação de partida do trem carregado, ele passa sobre a balança ferroviária. A informação de pesagem da balança ferroviária é utilizada como retroalimentação no controle de calibração das máquinas. Caso algum dos vagões esteja fora do padrão, seja por excesso ou falta de peso, o terminal verifica qual equipamento realizou o carregamento daquele vagão e investiga se houve desvio humano (do operador) ou se é falha na calibração do equipamento, e age de modo a evitar novas ocorrências. Conforme apresentado nas Seções 2.1, 2.2 e 2.3, o controle de calibração das pás elimina algumas variáveis do problema, como modelo de vagões (com capacidade volumétrica diferente) e densidade dos produtos (variando de acordo com a umidade, tipo e origem do material).



Em seguida, o terminal investiu na construção de uma sala de centro de controle e na instalação de diversas câmeras para monitoramento do pátio de produtos em tempo real. Foi necessário, também, a instalação de fibra ótica em todo o terminal para garantir a transmissão dos dados com qualidade e latência adequadas.

Quando uma composição ferroviária vazia chega ao terminal, ela circula sobre a balança ferroviária. Dessa maneira, a sala de controle sabe exatamente qual o peso de cada vagão vazio (tara). Além disso, a MRS fornece informações sobre o modelo e capacidade de cada vagão. Com esse conjunto de dados, a sala de controle sabe exatamente o total que pode ser embarcado em cada vagão para obter máximo de ocupação.

Através do controle de calibração das pás, o operador tem, com certa exatidão, o quanto de massa ele já colocou em cada vagão. Porém, ele ainda não sabe o máximo que pode ser colocado naquele vagão específico, informação essa que a sala de controle já possui. A sala de controle, por sua vez, não sabe em tempo real o quanto de massa foi colocada em cada vagão, informação essa que o operador de pá carregadeira já possui. Ou seja, ainda faltava um compartilhamento de informações cruciais para a produtividade. Pensando nisso, o terminal investiu no desenvolvimento de um sistema para integrar o centro de controle e a operação de pátio.

A sala de controle, sabendo a massa total que pode ser carregada em cada vagão, disponibiliza essa informação através do sistema. O operador, através de um dispositivo dentro da cabine das pás carregadeiras, digita o número de identificação do vagão antes de iniciar o carregamento. Em seguida, o operador consegue visualizar o total de massa que deve ser carregado naquele vagão específico, e pode iniciar as movimentações de embarque. A cada movimentação, o sistema registra o quanto de massa foi deslocado, gerando um subtotal para aquele vagão, até atingir o valor referência. Como é improvável que o operador consiga acertar o valor exato, o terminal trabalha com uma faixa de referência, inicialmente de 2 (duas) toneladas. Exemplo: se o valor de referência exato de um vagão é 110 toneladas, então a faixa considerada é entre 108 e 110 toneladas. O carregamento de um vagão é considerado encerrado quando aquele veículo está com a massa embarcada dentro dessa faixa.

Como os operadores das pás carregadeiras digitaram os números de identificação de seus respectivos vagões para carregamento, a sala de controle, através do sistema, pode saber qual equipamento e operador carregou cada um dos vagões. Consegue, também, saber o peso embarcado em cada vagão, incluindo os que ainda estão em processo de embarque. Dessa maneira, o centro de controle monitora se algum vagão teve a faixa de peso desrespeitada, seja por excesso ou falta de material. Nessas situações, o controlador aciona o operador que executou o carregamento daquele vagão para entender o ocorrido e solicitar a correção.

As pás carregadeiras possuem, também, sistema de geolocalização. Através do sistema, a sala de controle cria cercas eletrônicas e as vincula a cada máquina do pátio, limitando a área de atuação de cada equipamento. Dessa forma, caso algum dos equipamentos ultrapasse a área delimitada, alertas são enviados para informar da infração. Essas cercas permitem maior segurança. Além disso, em um pátio com diversas pilhas de diferentes materiais e clientes, uma confusão humana pode resultar em embarque do produto errado. Limitando a área de atuação dos equipamentos à região da pilha correta, há menor risco dessa ocorrência.



Por fim, a MRS Logística, em parceria com o terminal, instalou no local um equipamento chamado Formatador de Cargas. Esse equipamento tem por objetivo conformar o minério situado na parte superior dos vagões. Através da formatação, o minério presente na coroa do vagão ganha um formato trapezoidal, eliminando qualquer risco de desbalanceamento do vagão em função de carga descentralizada, otimizando também o processo de aspersão de polímeros. Além disso, os vagões saem do terminal com borda limpa, reduzindo o impacto ambiental causado por queda de material no leito da via durante a circulação dos trens.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo apresenta os resultados de peso líquido médio obtido pelo terminal antes e depois da implantação das ações previamente mencionadas.

Na Figura 1, é possível observar o peso médio praticado pelo terminal mês a mês, desde janeiro de 2024.

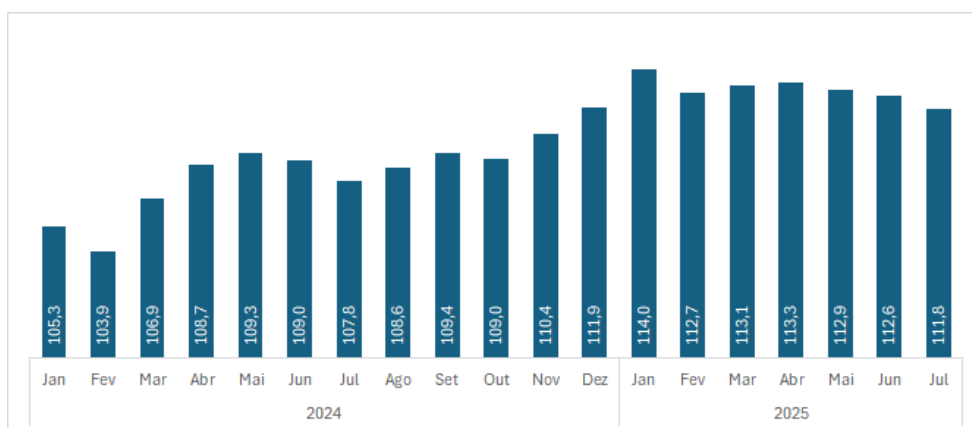


Figura 1. Peso líquido médio mensal – Terminal de Cargas de Sarzedo

Os dados são provenientes do sistema de balanças da MRS, que permite extrair as pesagens de todos os trens que circulam sobre as balanças integradas à rede.

Nota-se que houve um aumento significativo a partir do último trimestre de 2024, momento em que o terminal iniciou todo o trabalho mencionado anteriormente.

Outra observação relevante é notar que, ao longo de 2024, o peso médio variou bastante entre os meses. Em fevereiro, a média foi de 103,9 t. Já em maio, o valor foi de 109,3 t.

Até setembro de 2024, período anterior à implantação das melhorias, o mês com maior resultado foi de 109,4 t. Em 2025, o pior resultado foi de julho, com 111,8 t. Em outras palavras, o pior resultado de 2025 é 2,4 t maior do que o melhor mês do período anterior.

Nota-se, também, uma estabilidade muito maior em 2025, quando comparado com 2024. As variações entre os meses são muito mais suaves do que no período anterior.

Nas Figuras 2 e 3, são apresentados os histogramas de setembro de 2024 e março de 2025. No eixo horizontal, está o peso dos vagões. Já no eixo vertical, a frequência com que aquele peso aparece.

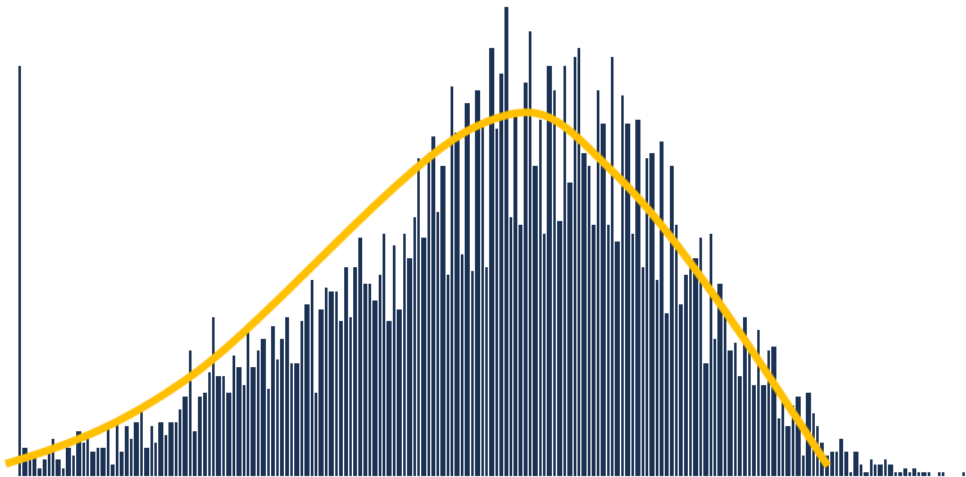


Figura 2. Histograma de peso dos vagões – setembro de 2024

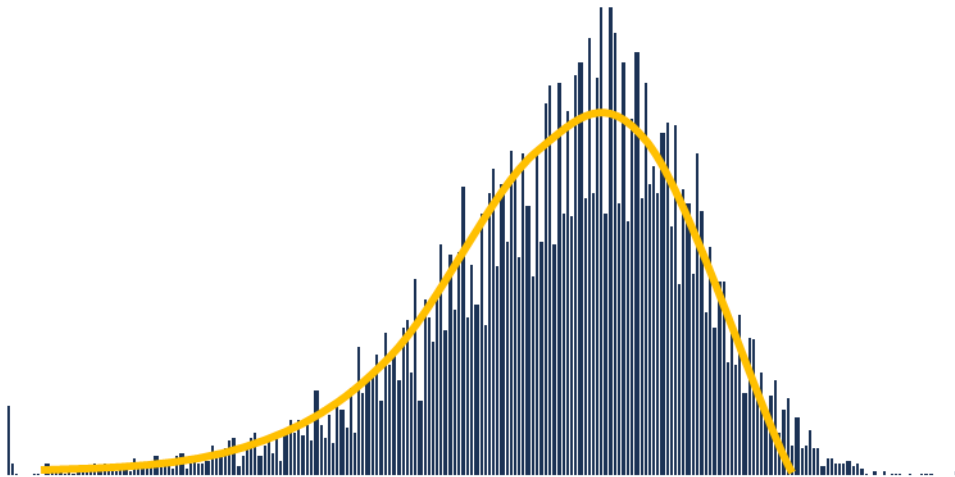


Figura 3. Histograma de peso dos vagões – março de 2025.

Nos gráficos, a região mais à esquerda representa os vagões com peso menor, enquanto a região mais à direita simboliza os vagões mais pesados. Comparando os gráficos, nota-se que, em março de 2025, a frequência de vagões com baixo peso foi reduzida, gerando um achatamento da curva e reduzindo o desvio padrão de 5,03 para 4,13. Dessa maneira, o terminal conseguiu aumentar o peso médio, atacando especialmente os vagões que, antes, eram muito leves.

Em relação aos vagões que já eram muito pesados, o aumento de peso foi mais discreto. Isso é relevante, pois os vagões que já tinham maior peso corriam elevado risco de ultrapassar a capacidade máxima do vagão. O terminal conseguiu alavancar o peso médio sem extrapolar o limite do saudável.

4. CONCLUSÃO

Diante da necessidade de aumentar a produtividade dos ativos, alternativas para transportar mais produto por composição são essenciais para garantir a competitividade do modal ferroviário no setor logístico.



Esse trabalho teve como objetivo apresentar um estudo de caso de um terminal que, a partir de ajustes de processos e implantação de tecnologias, conseguiu alavancar o peso líquido médio das composições ferroviárias sem colocar em risco a segurança operacional, se apresentando como um caso de sucesso.

Apesar de o estudo se restringir a um único terminal, os resultados obtidos e as ações implantadas indicam grande potencial para replicação em outras localidades, especialmente aos terminais que realizam embarque ferroviário através de pás carregadeiras.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à MRS Logística e ao Terminal de Cargas de Sarzedo pelo incentivo e disponibilização das informações necessárias para o estudo. Aos colegas e professores do IME que contribuíram com ideias e com os recursos necessários.

6. REFERÊNCIAS

BOSSO, N.; MAGELLI, M.; ZAMPIERI, N. *Dynamical effects of the increase of the axle load on European freight railway vehicles*. Applied Sciences, v. 13, n. 3, p. 1318, 2023. DOI: 10.3390/app13031318. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/3/1318>>. Acesso em: 22 set. 2025.

BRAGA, D. M. *Técnicas de análises de densidade e porosidade de minério de ferro por cálculo normativo mineralógico, microtomografia computadorizada, permoporosimetria e picnometria clássica: um estudo comparativo entre os métodos*. 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/items/eb1eb39d-5f05-499a-b6e6-ea2e3ab77669>>. Acesso em: 25 set. 2025.

CONCEIÇÃO, C. S. da. *Prototipagem de software para controle em tempo real de escavadeiras em uma mina no sul de Santa Catarina através da geolocalização*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/266462/TCC_CAMILA_CONCEICAO-CORRIGIDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 set. 2025.

KIBIRA, D. et al. *Smart manufacturing: integrating and modeling standards for system interoperability*. Journal of Computing and Information Science in Engineering, v. 16, n. 2, 2016.

MARTLAND, C. D. *Introduction of heavy axle loads by the North American rail industry*. Journal of the Transportation Research Forum, v. 52, n. 2, p. 103-125, 2013. Disponível em: <https://trforum.org/wp-content/uploads/2017/04/2013v52n2_06_HeavyAxleLoads.pdf>. Acesso em: 22 set. 2025.



ROTOLI, F.; MALAVASI, G.; RICCI, S. *Complex railway systems: capacity and utilisation of interconnected networks*. European Transport Research Review, v. 8, art. 29, 2016. Disponível em: <<https://etr.springeropen.com/articles/10.1007/s12544-016-0216-6>>. Acesso em: 22 set. 2025.

TOSTES, B.; HENRIQUES, S. T.; BROCKWAY, P. E.; HEUN, M. K.; DOMINGOS, T.; SOUSA, T. *On the right track? Energy use, carbon emissions, and intensities of world rail transportation, 1840–2020*. Applied Energy, v. 367, 123344, 2024. Disponível em: <<https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/217799/1/Tostes%20et%20al%202024%20world%20rail%20transport%20energy%20use.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2025.



OPTIMIZATION OF AVAREGE WAGON WEIGHT: A CASE STUDY OF TERMINAL DE CARGAS DE SARZEDO

ABSTRACT

Rail transport is essential in the global logistics matrix, offering high capacity and energy efficiency. Among productivity indicators, the average net weight per wagon stands out for its direct impact on asset utilization and cost per ton transported. This paper presents a case study conducted at Terminal de Cargas de Sarzedo, which implemented operational adjustments and technologies to improve this indicator. The methodology involved analyzing the loading process, calibrating wheel loaders, and integrating systems for communication between operators and the control room. Data from the MRS weighing system were evaluated before and after the improvements. The results indicated a significant increase in average weight, with reduced variability among wagons and greater monthly stability. Furthermore, the worst result after the improvements exceeded the best result from the previous period, confirming consistent gains. It is concluded that technological integration and strict process control are effective strategies to optimize rail productivity without compromising operational safety. The study demonstrates potential for replication in other terminals that use wheel loaders for rail loading.

Keywords: *Rail Transport; Average Wagon Weight; Iron Ore; Operational Optimization.*