UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

IGOR DANIEL MEDEIROS DE LIMA

OS IMPACTOS AMBIENTAIS DO AÇO EM GRANDES FERROVIÁRIAS E AS MANEIRAS DE MINIMIZÁ-LOS

JUIZ DE FORA
2023

IGOR DANIEL MEDEIROS DE LIMA

OS IMPACTOS AMBIENTAIS DO AÇO EM GRANDES FERROVIÁRIAS E AS MANEIRAS DE MINIMIZÁ-LOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Milanez

JUIZ DE FORA
2023

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

de Lima, Igor Daniel Medeiros.
Os impactos ambientais do aço em grandes ferroviárias e as maneiras de minimizá-los / Igor Daniel Medeiros de Lima. -- 2023.
67 f. : il.

Orientador: Bruno Milanez
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2023.

1. Economia Circular. 2. Aço Aplicado em Ferrovias. 3. Soluções sustentáveis para o aço. I. Milanez, Bruno, orient. II. Título.

IGOR DANIEL MEDEIROS DE LIMA

OS IMPACTOS AMBIENTAIS DO AÇO EM GRANDES FERROVIÁRIAS E AS MANEIRAS DE MINIMIZÁ-LOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 13 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

D. Sc., Bruno Milanez (Orientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora

D. Sc., Marcos Martins Borges
Universidade Federal de Juiz de Fora

D. Sc., Marcos Vinícius Rodrigues
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir que eu alcançasse esta conquista, concedendo-me saúde, força e fé, e por permanecer ao meu lado em todos os momentos.

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Cristina e Sebastião, pelo incentivo e apoio que foram fundamentais para que eu buscasse sempre mais, me dando suporte, educação e trabalhando incansavelmente para que este momento chegasse.

À minha querida namorada, Hemmanuelle, agradeço por todo o apoio inabalável, por estar ao meu lado desde antes dos desafios do ENEM, e por toda motivação durante minha graduação e nesse trabalho.

Às minhas irmãs, Elaine e Tatiane, e meus sobrinhos, Kamilly e Kayo, Maicon e Nicole, agradeço por alegrarem meus dias e fazerem companhia ao longo de todos esses anos.

Minhas homenagens e agradecimentos ao Marcos "Formiguinha" (*in memorian*), diretor do CIEP 456, pois mais que ensinar, me fez acreditar que ingressar na faculdade era possível.

Agradeço a todos os amigos que compartilharam comigo esses 5 anos de graduação, por tornarem a faculdade mais leve e tranquila.

Agradeço a toda a equipe da MRS, que além de me darem oportunidade e me desenvolverem como profissional, aumentaram ainda mais a minha paixão pela ferrovia e por essa empresa.

Por fim, agradeço ao professor, orientador, e amigo, Bruno. Por ser um excelente profissional, me ensinar a questionar, a pensar de maneira diferente e a enxergar além de uma visão simplista. Agradeço por suas orientações neste trabalho e por sua constante disposição e paciência em me auxiliar.

Essa não é uma conquista individual, pois só se tornou possível graças ao apoio de cada um, inclusive aos não citados aqui. A todos, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

O aço é fundamental em várias indústrias, porém, junto a ele vem uma série de problemas ambientais, desde a extração da matéria prima, até o sucateamento dos materiais. Este trabalho aborda práticas de Economia Circular aplicadas ao consumo do aço em empresas ferroviárias. O objetivo central deste trabalho é avaliar a adoção de práticas de economia circular por essas empresas, para tornar a operação mais sustentável e reduzir os impactos ambientais. Para alcançar esse objetivo, além de entender os impactos associados ao aço, foram feitas entrevistas com uma grande empresa ferroviária do Sudeste brasileiro, entendendo a situação atual. A partir desse ponto, foi possível elaborar propostas de intervenção para essas empresas.

Palavras-chave: Economia Circular, Aço Aplicado em Ferrovias, Soluções sustentáveis para o aço.

ABSTRACT

Steel is essential in many industries, but along with it comes a series of environmental problems, from the extraction of raw materials to the scrapping of materials. This paper looks at circular economy practices applied to steel consumption in railway companies. The central objective of this paper is to evaluate the adoption of circular economy practices by these companies, in order to make their operations more sustainable and reduce environmental impacts. In order to achieve this objective, in addition to understanding the impacts associated with steel, interviews were conducted with a major railway company in the southeast of Brazil to understand the current situation. From this point, it was possible to draw up intervention proposals for these companies.

Keywords: Circular Economy, Steel Applied to Railways, Sustainable solutions for steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Malha ferroviária do Brasil
Figura 2 - Vagão Gôndola
Figura 3 - Vagão Hopper
Figura 4 - Vagão Plataforma
Figura 5 - Mapa do projeto Ferrogrão
Figura 6 - Mapa das ferrovias na América do Sul
Figura 7 - Truque de vagão
Figura 8 - Composição da via permanente
Figura 9 - Estrutura do trilho ferroviário
Figura 10 - Diagrama da economia linear
Figura 11 - Diagrama da economia circular
Figura 12 - Rolamento ferroviário
Figura 13 - Desguarnecedora total de lastro

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Matrizes de transporte de cargas, países selecionados
Gráfico 2 - Nº de vagões em operação ao final dos anos
Gráfico 3 - Nº de Locomotivas em operação ao final dos anos

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- ANTF - Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres
- CH4 - Metano
- CNT - Confederação Nacional do Transporte
- CO2 - Dióxido de carbono
- EUA - Estados Unidos
- GEE - Gases do efeito estufa
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
- RFFSA - Rede Ferroviária Federal
- TU - Tonelada útil
- UNEP - United Nations Environment Programme

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **10**
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 10
1.2 JUSTIFICATIVA 10
1.3 ESCOPO DO TRABALHO 11
1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS 12
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA 12
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 13
2. SETOR FERROVIÁRIO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS **14**
2.1 SETOR FERROVIÁRIO BRASILEIRO DE CARGA 14
2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DAS FERROVIAS 23
2.2.1 EMISSÕES DE GEEs 23
2.2.2 USO DO SOLO E ATROPELAMENTO DA FAUNA 24
2.2.3 IMPACTOS HÍDRICOS 25
3. IMPACTOS DO AÇO E A ECONOMIA CIRCULAR COMO SOLUÇÃO **26**
3.1 USO DO AÇO EM VAGÕES E NA VIA PERMANENTE 26
3.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DO AÇO 29
3.2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO 29
3.2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DO AÇO 31
3.3 ECONOMIA CIRCULAR 33
4. PRÁTICAS NAS FERROVIAS E ATUAÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR **39**
4.1 PRÁTICAS NAS FERROVIAS 39
4.1.1 MANUTENÇÃO NO CENÁRIO ATUAL 40
4.1.2 DESTINO DADO PARA A SUCATA 43
4.2 PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS DA ECONOMIA CIRCULAR 45
4.2.1 ECONOMIA CIRCULAR E A CADEIA DE SUPRIMENTOS 45
4.2.2 PRÁTICAS CIRCULARES: DA MANUTENÇÃO AO SUCATEAMENTO 50
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS **55**
6. REFERÊNCIAS **57**
ANEXO A - LISTA DE PERGUNTAS DA SOBRE MANUTENÇÃO **64**
ANEXO B - LISTA DE PERGUNTAS DA SOBRE SUCATA **65**
ANEXO C - TERMO DE AUTENTICIDADE **66**

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria ferroviária é uma área crucial no desenvolvimento socioeconômico de um país, oferecendo um meio de transporte eficiente e seguro. O setor é crucial para impulsionar o comércio, conectar regiões distantes e promover a integração nacional (SILVEIRA, M., 2003).

O Brasil tem testemunhado um crescimento significativo na indústria ferroviária, com investimentos e expansão de infraestrutura que visam melhorar a eficiência do transporte. Ainda assim, há grande espaço para expansão desse modal no país (FALCÃO, 2013). Portanto, é de grande importância que esse crescimento seja acompanhado de uma atenção especial aos impactos ambientais. À medida que novas ferrovias são construídas ou antigas são modernizadas, é necessário considerar cuidadosamente os potenciais efeitos sobre o meio ambiente, como a fragmentação de habitats, a poluição do ar, contaminação dos recursos hídricos, e também o uso de recursos finitos, como materiais manufaturados em aço. Um planejamento adequado, estudos ambientais abrangentes, implementação de medidas de mitigação, reuso e reciclagem de materiais são indispensáveis para garantir que o crescimento da indústria ferroviária no Brasil ocorra de maneira sustentável, preservando os ecossistemas e minimizando os impactos negativos na natureza (GONÇALVES et al., 2022).

Ao considerar cuidadosamente os aspectos ambientais, é possível planejar e construir ferrovias de forma responsável, implementando medidas de mitigação e preservando a biodiversidade e os ecossistemas sensíveis. Dessa forma, é essencial equilibrar os benefícios econômicos e sociais das ferrovias com a proteção ambiental, garantindo um desenvolvimento sustentável a longo prazo.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os impactos das ferrovias sobre o meio ambiente são diversos; eles incluem desde o uso intensivo de materiais de aço, até a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), passando por mudança da paisagem e risco de contaminação hídrica.

Do ponto de vista do uso de materiais, as ferrovias fazem uso intensivo de materiais manufaturados em aço, portanto, é necessário pensar na preservação dos recursos naturais. O

aço é produzido principalmente a partir do minério de ferro, um recurso natural não renovável, que sua extração possui um alto custo ambiental. Além disso, a produção de aço é uma fonte significativa de emissões de dióxido de carbono (CO2). A gestão de resíduos também se faz extremamente crucial para a indústria do aço, pois gera grandes quantidades de resíduos (MILANEZ, 2017).

Nesse contexto, a economia circular surge como uma proposta com potencial para minimizar esses impactos ao diminuir o consumo de materiais, bem como promover a reciclagem e a reutilização, reduzindo assim a extração do minério, minimizando também as emissões de CO2 na produção do material, e diminuindo a geração de resíduos provenientes do aço (MACARTHUR, 2013).

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O presente trabalho visa analisar os impactos ambientais de grandes ferroviárias, com o foco em materiais que utilizam aço, respondendo à questão central "como a adoção de práticas de economia circular por grandes companhias ferroviárias pode tornar a empresa mais sustentável e reduzir os impactos ambientais associados ao consumo de produtos de aço?".

Feita esta pergunta, temos como perguntas derivadas as seguintes questões:

- Quais são os principais impactos ambientais causados pelas empresas do setor ferroviário?
- Quais os principais impactos ambientais associados aos produtos de aço consumidos por empresas do setor ferroviário, ao longo de seu ciclo de vida?
- Quais são as principais iniciativas existentes para economia circular?
- Quais iniciativas de gestão baseada em economia circular podem ser adotadas pelas empresas do setor para mitigar tais impactos?

Vale destacar que essa pesquisa visa focar apenas em setores de manutenção, suprimentos e sua logística, assim como também em suas interfaces diretas, como fornecedores. Este trabalho não tem como objetivo propor inovações ou mudanças na forma de produzir materiais derivados de aço, sem foco em engenharia de materiais. A pesquisa foca apenas nas questões ambientais, não tratando de questões sociais, e também se passa no contexto de uma empresa que atua na região Sudeste, com a coleta de informações no período

de agosto a dezembro de 2023. Além disso, os objetos de estudo serão os trens de carga, não se aplicando a trens urbanos e metrôs.

O trabalho se baseia também em entrevistas semiestruturadas. Inicialmente, seria abordado quatro entrevistas, envolvendo também a área de Suprimentos. Porém, por conta de indisponibilidade de agenda, não foi possível a realização dessas entrevistas, limitando a pesquisa a apenas as áreas de manutenção e de vendas de sucata.

1.4 ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

Este trabalho visa como objetivo central analisar as possíveis aplicações de práticas sustentáveis da economia circular em materiais manufaturados em aço em grandes ferroviárias, passando pela cadeia de suprimentos, manutenção e sucateamento desses materiais. Para isso, é necessário atingir alguns objetivos secundários.

São eles:

- Avaliar a indústria ferroviária brasileira e seus principais impactos ambientais;
- Estudar a utilização do aço em vagões e na via permanente, assim como estudar os impactos ambientais associados à mineração de ferro, produção, e ciclo de vida do aço;
- Entender os princípios da economia circular e suas aplicações.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

O trabalho será conduzido por meio de revisão bibliográfica, analisando o setor ferroviário brasileiro e seus impactos ambientais, aprofundando nos impactos do aço, e estudando as características e aplicações da economia circular. Será feito um estudo de caso de uma grande empresa ferroviária do Sudeste brasileiro, com base em entrevistas semiestruturadas com gestores ferroviários. Serão feitas duas entrevistas, sendo uma com um gerente de manutenção de vagões, e uma com um gerente de receitas alternativas, responsável pela comercialização da sucata gerada por essa empresa. As perguntas utilizadas nas entrevistas se encontram nos Anexos 1 e 2 ao final deste trabalho.

Após as entrevistas, serão abordadas as possibilidades e maneiras de aplicação com base nas características e modelos de gestão da economia circular na empresa, sobretudo nos processos de suprimentos, manutenção, e comercialização da sucata.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho contém cinco capítulos, sendo eles, Introdução, Setor ferroviário e seus impactos ambientais, Impactos do aço e a economia circular como solução, Práticas nas ferrovias e atuações da economia circular, e as Considerações finais, respectivamente.

No capítulo 1 foi mostrado o problema de pesquisa, a importância e necessidade do estudo do assunto, os fragmentos do objetivo principal, e a metodologia utilizada.

No capítulo 2 é feita uma contextualização breve da importância de ferrovias para a logística, economia e desenvolvimento, assim como os impactos ambientais associados a ele;

No capítulo 3 é mostrado a utilização do aço na indústria ferroviária, o motivo do uso do aço ser um problema, fazendo ligação com toda cadeia de "refino" do material, desde a mineração até seu sucateamento; tratativa no final do ciclo de vida; conceitos de economia circular que podem mitigar o problema.

No capítulo 4 são analisados os instrumentos de gestão associados à economia circular já praticados pela indústria ferroviária, além de propostas de intervenção na cadeia de suprimentos, manutenção, e logística da sucata, que podem trazer uma solução significativa para os problemas mostrados no capítulo 3, focando nos produtos manufaturados em aço.

Finalmente, no capítulo 5 foram consolidados os resultados e discussões, com sugestões de pesquisa futura, limitações desta pesquisa, e sugestões de áreas que podem atuar para solucionar os problemas.

2. SETOR FERROVIÁRIO E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

O setor ferroviário brasileiro desempenha um papel fundamental na movimentação de mercadorias em larga escala, contribuindo para o desenvolvimento econômico e logístico do país. Este capítulo tem como objetivo analisar especificamente o setor ferroviário brasileiro no transporte de cargas, com ênfase na sua infraestrutura, operação, desafios enfrentados e oportunidades. Não serão abordadas questões relacionadas ao transporte de passageiros, focando-se exclusivamente nas demandas e peculiaridades do transporte de carga por meio das ferrovias. Em particular, serão abordadas duas seções distintas neste referencial teórico: o "Setor Ferroviário Brasileiro de Carga", que abordará o histórico, tipos de vagões e locomotivas, a malha ferroviária, entre outros temas; os "Impactos Ambientais das Ferrovias", que detalhará alguns dos principais problemas ambientais relacionados à instalação e operação de ferrovias, como emissões de GEE, atropelamento de animais, e impactos hídricos.

2.1 SETOR FERROVIÁRIO BRASILEIRO DE CARGA

O setor ferroviário brasileiro tem uma importância estratégica para o país, com essa modalidade de transporte sendo responsável pelo desenvolvimento de diversas regiões, principalmente durante o século XIX e início do século XX, quando a malha ferroviária foi ampliada significativamente. Historicamente, até o início da década de 1990, o setor era operado por uma única empresa estatal, a Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA), que era responsável pela operação de toda a malha ferroviária no território nacional. Nessa década houve o início do processo de privatização no setor, abrindo-o para a entrada da iniciativa privada, através de concessões das malhas regionais para novas empresas. Em 1996 foi iniciado o processo de leilão das operações, em que a iniciativa privada passou a fazer uso da malha, ainda de propriedade do Estado. Essas novas empresas começaram suas operações no mesmo ano, sendo concedido também os ativos da RFFSA, como vagões e locomotivas, sendo obrigadas as mesmas, ao fim das respectivas concessões, a devolver novos ativos. (SOUZA et al., 1997)

Ao fim de 2022, o setor era composto por uma malha ferroviária de 30.662 quilômetros, com uma frota total de 114.426 vagões, e de 3.270 locomotivas (CNT, 2023). Porém, muitas áreas do Brasil não possuem cobertura dessa malha, que é predominante na

região Sul e Sudeste, e em menor escala no Nordeste. As regiões Centro-Oeste e Norte ainda carecem muito de cobertura, como visto na Figura 1. (ANTF, 2023)

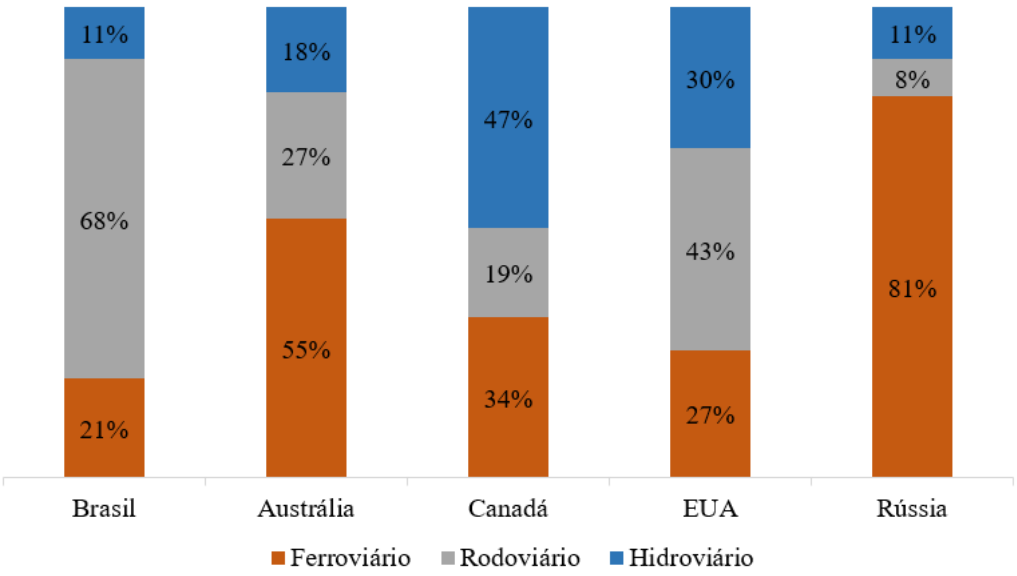
Figura 1 - Malha ferroviária do Brasil

Fonte: OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA (2020).

O setor ferroviário de cargas possui também forte relação com o transporte do minério de ferro, que representou 73,7% de toda carga em 2021, com uma movimentação de 373,6 milhões de toneladas úteis (TU), frente a uma movimentação de 133,2 milhões de toneladas úteis (TU) de carga geral.

Inclusive, na contramão de países de dimensões continentais, como Austrália, Canadá, EUA, e Rússia, o Brasil não faz tanto uso da matriz ferroviária para o transporte de cargas. Isso demonstra o espaço para crescimento que as ferrovias têm no Brasil, exposto pelo Gráfico 1.

Gráfico 1 - Matrizes de transporte de cargas, países selecionados



Fonte: ANTF (2023)

Isso é importante destacar, pois a utilização do transporte ferroviário possui diversas vantagens em relação ao rodoviário, que é o mais utilizado no Brasil. Uma delas é a maior capacidade de transporte de cargas por trem. Enquanto um caminhão pode transportar cerca de 30 toneladas de carga, um trem pode transportar até milhares de toneladas em um único vagão, tornando o transporte ferroviário uma opção mais eficiente e econômica para o transporte de grandes volumes de carga, sobretudo em longas distâncias. Outra vantagem relevante para o tema é a menor emissão de poluentes em comparação com outros modais de transporte. O transporte rodoviário, por exemplo, é responsável por grande parte da poluição atmosférica, gerando gases de efeito estufa e outros poluentes que afetam a saúde e o meio ambiente, enquanto transporte ferroviário emite menos poluentes por tonelada transportada, tornando-se uma opção mais sustentável para o transporte de cargas. (BARRETO et al., 2020)

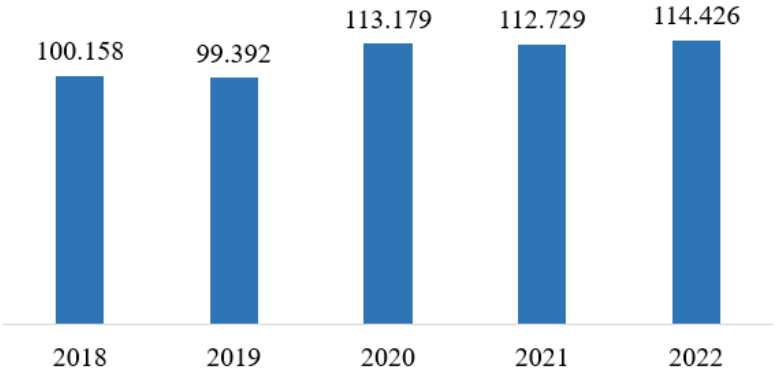
Por outro lado, o setor hidroviário oferece a vantagem de transportar grandes cargas em rios, canais, costas e mares, com menor custo em relação às ferrovias, permitindo a acessibilidade a áreas que não são servidas pelas mesmas. O transporte hidroviário também é considerado econômico e sustentável, uma vez que se aproveita da facilidade de navegação. Ademais, o setor hidroviário de cargas é utilizado para transporte de materiais muitas vezes similares ao de ferrovias, como minerais e produtos agrícolas. No caso específico do Brasil, o setor hidroviário oferece vantagens em termos de acessibilidade a áreas remotas, como interior da região Norte, custos iniciais e de transportes menores, e menores impactos ambientais. Porém, uma grande desvantagem que se destaca é a grande dependência

geográfica para a implementação, pois necessita de rios navegáveis, impedindo acesso a determinadas regiões. Em suma, o setor ferroviário destaca-se pela velocidade e capacidade de transporte, maiores possibilidades de conexões urbanas e industriais, sem necessariamente depender da hidrografia, e não sofrer tanto com secas e enchentes, mas sendo impactado diretamente em períodos chuvosos. (DE SOUZA, D., 2010; CAMPOS NETO et al., 2014)

A ampliação da malha ferroviária no Brasil é uma questão de grande importância para o país, tendo em vista a necessidade de reduzir os custos logísticos, aumentar a eficiência do transporte de cargas, e reduzir a emissão de GEEs. Para tanto, é necessário promover investimentos em infraestrutura, modernização e ampliação da malha existente, bem como a construção de novas linhas ferroviárias. Isso vem ocorrendo nos últimos anos, por meio de iniciativas do governo federal que tem buscado incentivar a ampliação da malha por meio de cláusulas nos programas de concessão, buscando captar o investimento privado. Além disso, o governo tem adotado medidas para simplificar e agilizar investimentos nas ferrovias, como o Marco Legal das Ferrovias, que possibilita às concessionárias uma ampliação menos burocrática da malha (UOL, 2021).

Quanto ao número de vagões, o número em operação vem crescendo de forma regular de 2018 a 2022, conforme o Gráfico 2. Dentre esses vagões, os principais são os do tipo Gôndola, Hopper e Plataforma. [CBFA, 202?]

Gráfico 2 - Nº de vagões em operação ao final dos anos



Fonte: CNT (2023)

O vagão do tipo Gôndola, representado na Figura 2, é utilizado principalmente para transportar grandes cargas, como minérios e carvão, entre outros materiais similares. Ele é caracterizado por sua estrutura aberta, com laterais baixas e uma plataforma alongada que

permite o carregamento e descarregamento dos materiais através de um *rotary car dumper*[1]. Por ter capacidade de transporte de milhares de quilos, são projetados para resistir a esse peso e às demandas do transporte, proporcionando estabilidade durante o percurso. (GBMX, 2023)

Figura 2 - Vagão Gôndola

Fonte: GBMX (2023)

Enquanto isso, o vagão Hopper, representado na Figura 3, é utilizado principalmente no transporte de grãos, farelos, fertilizantes, e outros materiais granulares, sendo fundamental na agricultura e na indústria química. Ele possui uma estrutura especializada com compartimentos em forma de funil na parte inferior que permitem o carregamento e a descarga eficiente dos materiais transportados. (GBMX, 2023)

Figura 3 - Vagão Hopper

Fonte: GBMX (2023)

[1] Equipamento usado para descarregar vagões de carga ao girá-los de cabeça para baixo.

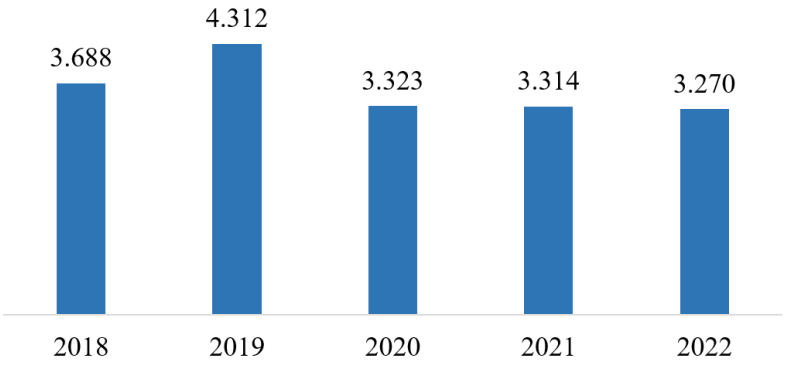
Por fim, vagões Plataforma, representado na Figura 4, são um tipo de vagão com uma estrutura plana e aberta, projetada para transportar variados tipos de materiais, como maquinário industrial, veículos, materiais siderúrgicos, tubos, contêineres, entre outros itens de grandes dimensões que não se encaixam facilmente em outros tipos de vagões. (GBMX, 2023)

Figura 4 - Vagão Plataforma

Fonte: GBMX (2023)

O transporte de cargas por ferrovias é realizado principalmente por dois tipos de locomotivas: as locomotivas diesel-elétricas e as locomotivas elétricas. As locomotivas diesel-elétricas são amplamente utilizadas devido à flexibilidade e adaptabilidade a diferentes condições de operação, permitindo a tração de cargas pesadas em regiões onde a eletrificação não está disponível. Já as locomotivas elétricas são utilizadas em trechos eletrificados, fornecendo maior eficiência energética e reduzindo as emissões de poluentes [EVARISTO, 2018?]. Conforme o Gráfico 3, o número de locomotivas apresentou, nos últimos anos, uma leve queda para estagnação no mesmo período (CNT, 2023).

Gráfico 3 - Nº de Locomotivas em operação ao final dos anos



Fonte: CNT (2023)

Moreira (2019) argumenta que as ferrovias são peças chave no transporte multimodal. “Multimodal” é um termo utilizado para descrever um sistema de transporte que envolve diferentes modais, ou seja, diferentes meios de transporte. No sistema multimodal, a carga é transportada utilizando diferentes modais, como ferroviário, rodoviário, aéreo, hidroviário, entre outros, de forma integrada e coordenada. No Brasil, a participação das ferrovias se dá na integração com o modal rodoviário e hidroviário, com cargas chegando e saindo por rios navegáveis, portos, e pelas rodovias. O transporte ferroviário tem um papel importante na movimentação de cargas de longa distância, especialmente para cargas de maior volume e peso, como minério, grãos, combustíveis e produtos siderúrgicos. No entanto, a participação do setor no multimodal brasileiro enfrenta alguns desafios, como a falta de infraestrutura adequada, a falta de interconexão e terminais entre modais, e a burocracia envolvida na utilização desses diferentes modais.

Um exemplo de projeto em andamento que colabora para o multimodal brasileiro é a construção da Ferrovia de Integração Oeste-Leste, também chamada de Fiol II e III, que ligará a região Centro-Oeste ao litoral da Bahia para escoar grãos; porém ela ainda se encontra em fase de estudo. Outro projeto, mais avançado, é a Ferrogrão, que prevê a construção de uma ferrovia que ligará Sinop, no Mato Grosso, à Miritituba, no Pará, permitindo também o escoamento de grãos do Centro-Oeste, até hidrovias que levam aos portos do norte do Brasil, como demonstrado na Figura 5. A ferrovia, que terá aproximadamente 1.000 quilômetros de extensão, tem potencial para reduzir os custos logísticos e aumentar a competitividade do agronegócio brasileiro (ANTT, 2023).

Figura 5 - Mapa do projeto Ferrogrão

Fonte: ANTF (2023).

Lacerda, S. (2009) destaca que o transporte ferroviário é um aliado fundamental para a integração do Brasil com outros países da América do Sul e para a exportação de produtos brasileiros, visto a eficiência para transporte de cargas em longas distâncias. No mesmo pensamento que Lacerda, S., Silveira, L. (2016) argumenta que um dos grandes problemas para uma melhor conexão entre os países é a geografia do continente, geralmente possuindo importantes centros econômicos separados por grandes barreiras geográficas, como florestas ou montanhas, dificultando o acesso via rodovias ou, mesmo, ferrovias.

Assim, em 2022, segundo relatório do Comex Stat (2023), a exportação do Brasil para os países da América do Sul se deu predominantemente por via rodoviária e marítima. Nesse ano, as exportações por meios ferroviários totalizaram R$186,4 milhões, o que representa apenas 0,42% dos valores totais, enquanto o quilograma líquido exportado foi de somente 0,69%, demonstrando as oportunidades e necessidade de mais exploração do uso desse setor no comércio internacional. A Figura 6 mostra a malha ferroviária da América do Sul em 2016, em que é notável a ausência de conexões entre as costas Leste e Oeste por meio de ferrovias, assim como poucas conexões férreas entre os países.

Figura 6 - Mapa das ferrovias na América do Sul

Fonte: SILVEIRA, L. (2016).

Ainda segundo Lacerda, S., Silveira, L. (2016) diz que uma possível integração ferroviária nos países do Cone Sul pode trazer diversos benefícios econômicos para o Brasil, como a redução dos custos logísticos, com a movimentação de cargas entre os países de forma mais eficiente e com menor custo, favorecendo o comércio regional, estimulando o desenvolvimento econômico desses países envolvidos. Essa integração ferroviária também poderia contribuir para a redução da dependência dos países em relação aos portos marítimos, uma vez que o transporte de cargas por ferrovias poderia permitir, não somente a conexão entre os países por vias terrestres, mas também conexões viáveis entre o Atlântico e o Pacífico, conectando, por exemplo, todo o modal ferroviário brasileiro e o porto de Santos aos portos do Chile, como o porto de Antofagasta, pela ferrovia do Eixo de Capricórnio, facilitando o comércio com a China e a Ásia.

Nesta seção, foi exposto o histórico das ferrovias no Brasil, os principais tipos de vagões e locomotivas, a malha atual e futuras expansões, vantagens e comparação com outros

modais, e oportunidades com o comércio internacional. Dessa forma, a próxima seção abordará um dos pontos críticos desse trabalho, os impactos ambientais do setor ferroviário.

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DAS FERROVIAS

Na seção anterior, foi apresentado que o setor ferroviário desempenha um papel fundamental no transporte de cargas. No entanto, é importante destacar que as ferrovias também causam impactos ambientais significativos. Dito isso, esta seção abordará os principais impactos ambientais associados às ferrovias, destacando três aspectos cruciais: emissões de GEE, uso do solo e atropelamento da fauna, e contaminação hídrica. Compreender esses impactos é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de mitigação de danos ambientais e promoção de práticas sustentáveis que visem minimizar os efeitos negativos das ferrovias no meio ambiente. Além disso, é importante destacar também o dano causado pelo aço. Nesse contexto, o próximo capítulo será dedicado a explorar especificamente esse problema, não sendo abordado nessa seção.

2.2.1 EMISSÕES DE GEEs

Embora as ferrovias sejam conhecidas como uma forma relativamente sustentável de transporte de grandes quantidades de cargas em comparação com outros modos de transporte, como o rodoviário e o aéreo, é importante entender as emissões associadas a esse modal.

Silva et al. (2020) fazem essa demonstração de que o modal ferroviário emite menos GEE que o rodoviário no contexto de cargas, além de ser mais barato. No entanto, é importante considerar que as emissões específicas podem variar dependendo das circunstâncias e do tipo de carga ou veículo utilizado em cada modalidade de transporte. Dito isso, eles demonstram que em um trecho de 735 quilômetros as emissões de CO2 de um trem com 2 locomotivas e 80 vagões chegam a 95 toneladas, com um consumo de 25.500 litros de combustível. Ainda que esse número seja substancialmente menor frente a 142 caminhões emitindo 121 toneladas de CO2 e consumindo 45.500 litros de combustível nesse trecho, os números do ferroviário ainda são altos, e importantes de se estudar.

Para mitigar as emissões de GEE nas ferrovias, medidas como a eletrificação da frota com o uso de fontes renováveis de energia, e a melhoria da eficiência energética podem

desempenhar um papel fundamental na redução do impacto ambiental dessa importante modalidade de transporte.

2.2.2 USO DO SOLO E ATROPELAMENTO DA FAUNA

O uso do solo nas ferrovias e as alterações resultantes têm um impacto significativo na fauna e na flora, representando um risco ambiental. A construção e a manutenção das vias férreas podem exigir a remoção de vegetação nativa e a modificação da região afetada, impactando diretamente os ecossistemas existentes. Além disso, a presença constante de trens e o ruído associado a eles podem causar estresse e distúrbios na vida selvagem, afetando negativamente o comportamento e os padrões de reprodução.

Um dos riscos à vida selvagem que se destaca é o atropelamento de animais. No entanto, o IBAMA não fornece uma orientação padronizada de medidas de mitigação de atropelamento de animais pelas ferrovias. Por conta disso, cada concessionária desenvolve, de forma independente e com base em suas próprias necessidades, iniciativas destinadas a reduzir esse tipo de incidente. Alguns exemplos que vêm sendo desenvolvidos são passagens inferiores de fauna, cercas-guias que são utilizadas como direcionadores para os animais e alertas sonoros que buscam afastar os animais da via férrea, como apitos ultrassônicos que emitem sons agudos e graves para espantar animais da via, e apitos similares a sons de abelhas. Além da importante necessidade de se preservar a fauna ao redor das ferrovias, a mitigação de atropelamento de animais é importante também para a prevenção de descarrilamento, pois animais de grande porte podem provocar acidentes ao serem atropelados (DE FARIA, 2018).

Apesar destes desenvolvimentos, Marques (2022) apresenta como ainda é necessário mais avanços nesse aspecto. Por conta da baixa quantidade de estudos no Brasil sobre atropelamento de animais por trens, é difícil medir de forma global. Porém, estudos localizados apresentam uma estimativa desse impacto. Apenas na Estrada de Ferro Carajás, aproximadamente 10 mil sapos por ano são vítimas de atropelamento por trens, mesmo com a aplicação de passagens para a fauna. Enquanto isso, no Cerrado, estima-se que cerca de 2 mil animais de 1 a 260 quilos são atropelados por ano. Para fins de comparação, é estimado que 475 milhões de vertebrados são atropelados em rodovia por ano, mas, segundo Oliveira (2020), a rede ferroviária por ser consideravelmente menor do que a rede rodoviária, e ter ausência de estimativas confiáveis sobre fatalidades leva a uma percepção errônea de que as

colisões entre trens e animais são um problema insignificante para a conservação, fazendo com que essas fatalidades possam atingir números comparáveis aos observados em estradas, ou até mesmo serem ainda maiores em determinadas situações.

2.2.3 IMPACTOS HÍDRICOS

Por fim, a construção de uma via férrea pode alterar a dinâmica do solo local, causando erosões locais e aumentando a ocorrência de enchentes, afetando a fauna e a flora. O assoreamento dos corpos d'água é uma das consequências mais importantes que ameaçam a integridade ecológica desses ecossistemas, pois, mesmo que a qualidade química da água seja satisfatória, a poluição causada pela suspensão de partículas causadas pelas erosões pode impactar drasticamente nas condições de sobrevivência dos organismos (GONÇALVES et al., 2022).

Além disso, um outro importante aspecto ambiental relacionado à implantação de vias férreas que Gonçalves et al. (2022) apresentam é a contaminação do solo e das águas, superficiais ou subterrâneas. Essa poluição pode ser causada por acidentes envolvendo cargas com produtos perigosos, ou até mesmo com vazamento de óleo, graxa e combustível de locomotivas, seja durante a construção da via, ou mesmo na operação de trens. Esses poluentes têm potencial de ameaçar tanto os ecossistemas aquáticos, quanto a saúde humana, além de reduzir a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos. Outra consequência direta da atividade ferroviária é a alteração do ciclo da vida aquática e um declínio dos habitats, o que afeta a biodiversidade e a dinâmica dos ecossistemas aquáticos.

3. IMPACTOS DO AÇO E A ECONOMIA CIRCULAR COMO SOLUÇÃO

Este capítulo apresenta uma análise da aplicação e dos impactos ambientais associados à produção e utilização do aço, bem como uma discussão sobre a economia circular como uma solução potencial para mitigar esses problemas. A seção inicial aborda a aplicação do aço em vagões e na via permanente. A segunda trata dos impactos ambientais gerados na mineração e produção do aço, e a tratativa a ser tomada no fim do ciclo de vida do aço. Por fim, a terceira seção introduz os princípios e benefícios da economia circular como um modelo alternativo para a indústria do aço, assim como pontos relevantes a se destacar. Discute-se como a economia circular promove a redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais, bem como a maximização do valor econômico e a minimização dos impactos ambientais.

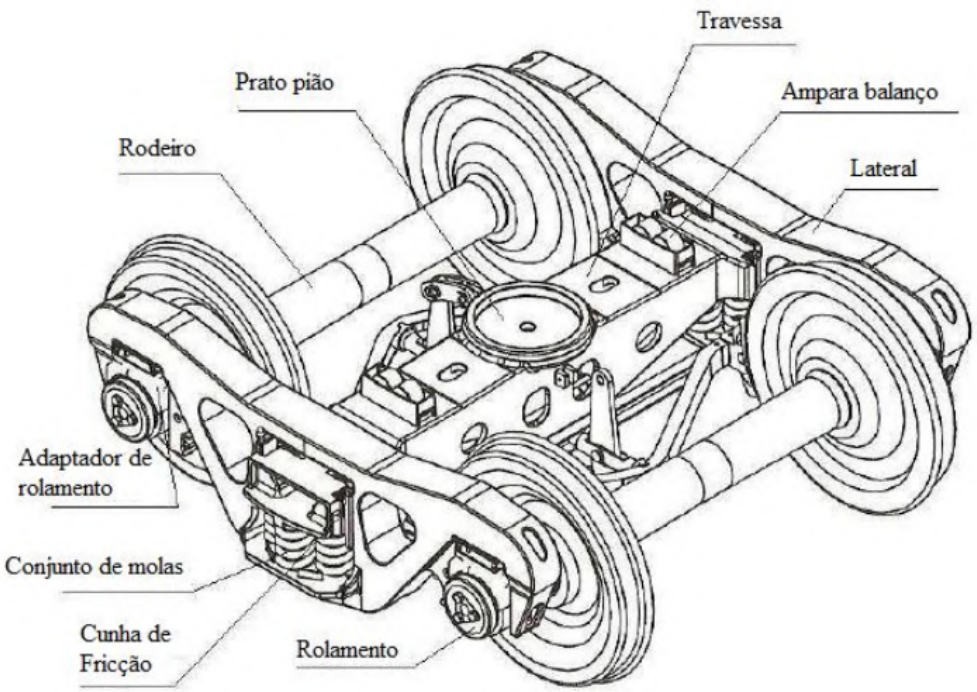
3.1 USO DO AÇO EM VAGÕES E NA VIA PERMANENTE

A aplicação do aço desempenha um papel de extrema importância na construção e manutenção de vagões. Um vagão GDT comum, do tipo gôndola, tem peso de 20 toneladas (GBMX, 2023), e é dividido em várias partes, como a caixa principal do vagão, que é construída com aço de alta resistência, garantindo a durabilidade e segurança necessárias para suportar cargas pesadas e as condições adversas encontradas durante o transporte de materiais a granel. Além disso, no truque ferroviário, o aço é empregado na fabricação dos seus principais componentes, proporcionando resistência e capacidade de suporte de carga, bem como absorção de impactos durante a operação. No sistema de engate, o aço é utilizado para garantir a força e confiabilidade necessárias para a conexão entre os vagões, permitindo acoplamentos e desacoplamentos seguros durante as operações ferroviárias. Dessa forma, o uso do aço nos vagões ferroviários contribui para a construção de estruturas robustas, truques eficientes e engates confiáveis, garantindo um transporte seguro e eficaz de cargas ao longo do sistema ferroviário [EVARISTO, 201?].

O truque ferroviário, como na Figura 7, é uma parte essencial dos vagões, desempenhando um papel fundamental no suporte de carga e na estabilidade durante a operação. Sua principal função é proporcionar um sistema de rodagem confiável e eficiente, permitindo a movimentação suave do vagão sobre os trilhos. Comumente fabricado em aço, o truque ferroviário é composto por diversos componentes, como rodas, rodeiros, rolamentos,

travessas e molas. As rodas são projetadas para suportar as cargas e oferecer resistência ao desgaste, enquanto os rodeiros fazem a conexão entre as rodas, transmitindo a carga e garantindo o alinhamento adequado. Os rolamentos são empregados para reduzir o atrito entre o eixo e a roda, minimizando o desgaste e permitindo uma rotação suave. As travessas, por sua vez, desempenham o papel de suportar e manter a posição correta dos truques ferroviários na via, distribuindo a carga de forma eficiente. Além disso, as molas têm a função de absorver os impactos e as vibrações, proporcionando um deslocamento mais suave. Devido à sua importância estrutural, o truque ferroviário é projetado para suportar cargas consideráveis, com um peso que varia de acordo com o tipo de vagão e sua capacidade. O aço utilizado na fabricação do truque possui propriedades mecânicas específicas, como alta resistência à tração e capacidade de absorção de choque, garantindo a durabilidade e segurança do sistema de rodagem ferroviário (SCHWANKE, 2013; DA SILVA, D., et al., 2020).

Figura 7 - Truque de vagão

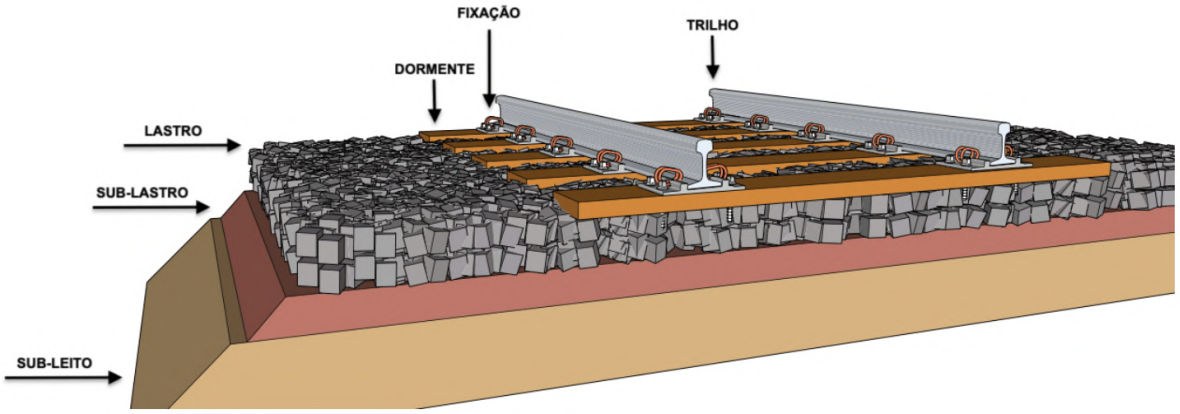


Fonte: SCHWANKE (2013)

Além dos vagões, o aço também é utilizado na via férrea, sobretudo nos trilhos, que desempenham um papel crucial no sistema ferroviário, proporcionando uma superfície de rolamento para as rodas do material rodante. A via permanente é composta por materiais que ficam acima do solo, que são o sub-lastro, lastro, dormente, trilho e fixações, demonstrados na

Figura 8. Tanto o sub-lastro quanto o lastro servem para dar firmeza e sustentabilidade para a via. Os dormentes para transmitir os esforços do trem ao lastro e suportar o trilho, geralmente são feitos de madeira, mas também podem ser feitos de concreto e até mesmo de aço. As fixações prendem o trilho ao dormente, sendo o trilho o elemento central desse sistema, desempenhando duas funções principais: servir como guia para as rodas dos veículos ferroviários e suportar as cargas e esforços provenientes do material rodante. No entanto, o contato entre a roda e o trilho pode levar ao desgaste e ao surgimento de defeitos que afetam a utilização adequada da via. O desgaste prematuro ou defeitos nos trilhos comprometem a operação ferroviária, levando a custos elevados de substituição e podendo representar um risco para a segurança e operação (MACÊDO, 2009; BIANCHI, 2018).

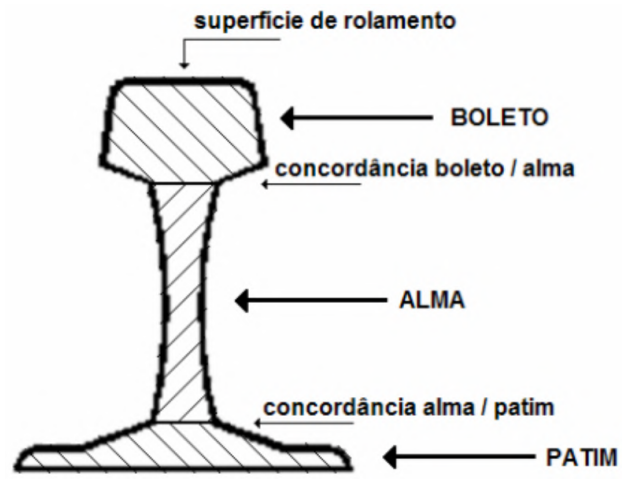
Figura 8 - Composição da via permanente



Fonte: DE SOUZA (2021)

O trilho também tem divisões, sendo composto por três elementos distintos: o boleto, a alma e o patim, conforme Figura 9. O boleto refere-se à região superior do trilho, onde ocorre o contato direto, com a distribuição das cargas e no suporte das rodas do material rodante. A alma, por sua vez, constitui a região de conexão entre o boleto e o patim, fornecendo a estabilidade estrutural necessária para a resistência e a integridade do trilho como um todo. Já o patim corresponde à região inferior do trilho, responsável por se apoiar sobre o dormente e transferir a carga para o lastro e solo, proporcionando uma base sólida para a sustentação e a estabilidade da via férrea. É importante destacar que os trilhos são predominantemente fabricados em aço carbono, devido à sua resistência à abrasão e à corrosão, características essenciais para garantir a durabilidade e o desempenho adequado do sistema ferroviário. O uso do aço na fabricação dos trilhos é essencial para a capacidade de suportar as cargas e os esforços do trem (BIANCHI, 2018).

Figura 9 - Estrutura do trilho ferroviário



Fonte: BIANCHI (2018)

O aço é fundamental na indústria ferroviária devido às suas propriedades mecânicas, como resistência, durabilidade e capacidade de suportar cargas pesadas. Um material difícil de se substituir nessa indústria. Portanto, é necessário entender os impactos ambientais causados por esse material, além das possibilidades de redução, reuso e reciclagem.

3.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DO AÇO

Esta seção aborda os impactos ambientais do aço, desde a mineração da matéria prima, até a transformação da matéria prima e produção do aço nas siderúrgicas.

3.2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO

Para a produção de aço é necessária a extração de algumas matérias primas através da mineração, como o ferro. A mineração apresenta uma série de impactos ambientais significativos. A extração do minério de ferro, principal matéria prima do aço, requer a remoção de grandes quantidades de solo e rocha. Nesse contexto, Farias et al. (2019) apresentam significativos impactos ambientais da mineração. São eles, a degradação da paisagem, ruídos e vibração, tráfego de veículos, gases e poeiras, e contaminação das águas.

A degradação da paisagem é uma consequência direta da abertura de grandes áreas de escavação, a remoção de vegetação e a formação de cavas, pilhas de estéril e barragens de

rejeito. Essas alterações podem resultar na perda de habitats naturais e na fragmentação do ecossistema, afetando a biodiversidade local.

Além disso, as atividades mineradoras frequentemente geram ruídos e vibrações intensas, decorrentes do uso de explosivos e equipamentos pesados, impactando negativamente a fauna e causando desconforto para as comunidades próximas. O tráfego intenso de veículos, principalmente de caminhões ou mesmo de trens para transporte de minério, é outro impacto relevante, causando danos às estradas, aumentando o risco de acidentes e contribuindo para a emissão de gases poluentes. A liberação de gases e poeiras resultantes das operações mineradoras também é uma preocupação ambiental, uma vez que esses poluentes podem afetar a qualidade do ar e a saúde humana.

Por fim, a contaminação das águas é um dos impactos mais graves, podendo ocorrer por meio do carreamento de sedimentos e produtos químicos utilizados na mineração para os corpos hídricos, comprometendo a disponibilidade de água potável e prejudicando os ecossistemas aquáticos (FARIAS et al., 2019).

Ainda no contexto de contaminação, Milanez (2017) chama atenção para um desastre ainda maior, os rompimentos de barragens de rejeitos, que representam um dos impactos mais devastadores associados à mineração. Estes eventos têm consequências amplas e extremamente danosas para o meio ambiente e para as comunidades afetadas. Um exemplo emblemático foi o rompimento da barragem do Fundão, em Mariana, Minas Gerais, em 2015, que resultou em uma tragédia ambiental de proporções catastróficas, causando a morte direta de 19 pessoas. O desastre ocasionou a liberação de uma imensa quantidade de rejeitos minerais, formando uma avalanche de lama tóxica que se espalhou ao longo do vale Rio Doce, destruindo ecossistemas aquáticos, afetando a flora e fauna locais, e comprometendo o abastecimento de água de milhões de pessoas ao longo do curso do rio (MILANEZ, 2017).

Ainda assim, quatro anos depois, um desastre semelhante, porém maior, veio a acontecer em Brumadinho, também em Minas Gerais. O rompimento da barragem de rejeitos da Mina Córrego do Feijão, uma mina de ferro, resultou na liberação de lama tóxica, similar à Mariana. Essa avalanche de lama devastou a região, causando a perda trágica de 270 vidas humanas confirmadas e deixando ainda três pessoas desaparecidas. Além disso, os impactos ambientais foram significativos, com rios e afluentes contaminados, vegetação destruída e graves prejuízos aos ecossistemas locais. A tragédia em Brumadinho evidenciou a urgência de reforçar as medidas de segurança e fiscalização na indústria mineradora, buscando evitar que eventos semelhantes ocorram no futuro e protegendo a vida humana, os ecossistemas e os recursos naturais impactados por essas ocorrências devastadoras (DA SILVA, A., et al., 2021).

Em suma, o ato da instalação de uma mineradora mudará para sempre a região. No sentido ambiental, não para o bem. Foi visto uma série de impactos ambientais, como a contaminação de rios, perda de flora e biodiversidade com desmatamento, e emissão de gases poluentes. Porém, esses impactos já são significativos o suficiente com a mineradora operando em condições normais. Enquanto isso, desastres vindos de rompimento de barragens causam tragédias humanitárias e ambientais ainda maiores. Portanto, é extremamente necessário pesquisas e desenvolvimentos de modelos de mineração sustentável para minimizar possíveis impactos.

3.2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO DO AÇO

A produção de aço envolve uma série de processos que visam transformar o minério de ferro no produto final. Godoy (2014) apresenta cinco processos centrais: beneficiamento do minério de ferro, aglomeração, redução, oxidação e lingotamento. O beneficiamento engloba uma série de operações que têm como objetivo separar o minério sem valor comercial, e concentrar o composto que contém o minério desejado. A aglomeração do minério tem o propósito de melhorar a permeabilidade da carga do alto-forno, reduzir o consumo de carvão e acelerar o processo de redução. Após a aglomeração, ocorre o processo de redução, onde o minério de ferro é quimicamente reduzido para obter o ferro metálico. O método mais comumente utilizado para essa redução é o alto-forno. O resultado é a obtenção do ferro gusa líquido, que contém carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre em diferentes proporções.

Após a obtenção do ferro gusa, é necessário realizar o processo de oxidação na aciaria para obter o aço com a composição desejada. O princípio químico utilizado nesse refinamento do ferro gusa é a oxidação controlada, onde o oxigênio é inserido no metal e reage com os elementos indesejáveis, formando óxidos que são eliminados na forma de gases ou escória. Por fim, o aço líquido passa pelo processo de lingotamento, em que o aço é vazado em um molde refrigerado, onde uma casca sólida começa a se formar e é extraída por um sistema mecânico. À medida que a casca se torna espessa o suficiente, o aço é resfriado por jatos de água até que ocorra a solidificação completa. Esse processo de lingotamento permite a produção de placas, blocos ou tarugos de aço, que são encaminhados para o processo de laminação, em que o material é transformado em diferentes formas, resultando na obtenção de chapas, barras, perfis e outros, sendo esses produtos aplicados nas ferrovias.

Porém, todos esses processos possuem um alto custo ambiental. Nesse sentido, Milanez et al. (2009) trazem impactos sociais e ambientais significativos. Os processos de produção do aço necessitam de uma grande quantidade de energia para transformar o ferro-gusa no aço, e muita das vezes essa fonte de energia não é necessariamente limpa. Outro impacto socioambiental da produção de aço é o uso de carvão mineral pelas siderúrgicas. A extração do carvão mineral entra no mesmo problema ambiental da extração do ferro visto nesta pesquisa, os problemas da mineração, além de que a queima do carvão mineral libera grandes quantidades de GEE. O processo siderúrgico emite uma variedade de poluentes, incluindo dióxido de carbono (CO2) e metano (CH4), que contribuem para as mudanças climáticas. Além desses impactos, a produção de aço em siderúrgicas também afeta os recursos hídricos devido ao seu consumo e geração de efluentes líquidos, e gera também resíduos sólidos que precisam ser gerenciados adequadamente. E gera também preocupações em relação à segurança e saúde dos trabalhadores devido às condições de trabalho e exposição a substâncias perigosas.

Além de evidenciar esses impactos, Milanez et al. (2009) também expõem a tratativa que o setor siderúrgico tem tomado para solucionar esses problemas. Ele apresenta que as siderúrgicas brasileiras buscam reduzir sua dependência energética e melhorar a eficiência energética, mas que os avanços têm sido limitados.

O setor siderúrgico utiliza uma matriz energética suja, baseada principalmente em carvão mineral. Algumas empresas têm buscado substituir o carvão mineral pelo carvão vegetal, que é considerado uma opção mais sustentável, pois é oriundo de fontes renováveis e contribui menos com as mudanças climáticas. A produção de carvão vegetal também apresenta desafios, como a necessidade de evitar o corte ilegal de matas nativas e promover o uso de madeira plantada, que possui seus próprios problemas socioambientais. Além disso, um dos problemas estruturais é que nem todas as empresas fornecem dados objetivos sobre suas emissões, o que dificulta a comparação entre seus desempenhos. Ele apresenta que “essa estratégia somente apresenta ganhos marginais e não parece ser capaz de compensar o crescimento dos impactos sociais e ambientais da siderurgia brasileira em seu atual processo de inserção no mercado global” (Milanez et al., 2009, p.16), evidenciando a necessidade de estudo contínuo em meios de mitigar esses impactos citados.

3.3 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular é uma abordagem que contrasta com o sistema econômico predominante conhecido como economia linear. Enquanto a economia linear segue o padrão de extrair recursos naturais, manufaturar, consumir e descartar, conforme a Figura 10, a economia circular propõe um modelo de desenvolvimento sustentável que busca dissociar o crescimento econômico do consumo crescente de recursos finitos.

Através da implementação de práticas circulares, materiais e produtos são mantidos em ciclos contínuos de uso, evitando desperdício e reduzindo os impactos ambientais. A adoção da economia circular é essencial devido às limitações e problemas da economia linear, como a exaustão de recursos finitos, a geração de resíduos volumosos e potencialmente tóxicos, a degradação ambiental, a dependência de energia não renovável e a ameaça à sustentabilidade econômica e social a longo prazo. Para solucionar esses problemas da economia linear, Macarthur (2013) cita que a economia circular possui três princípios fundamentais: eliminação de resíduos e poluição, produtos e materiais circulares, e regeneração da natureza (MACARTHUR, 2013; ELLEN MACARTUR FOUNDATION, 2018?).

Figura 10 - Diagrama da economia linear

Fonte: IDEIA CIRCULAR [2018?]

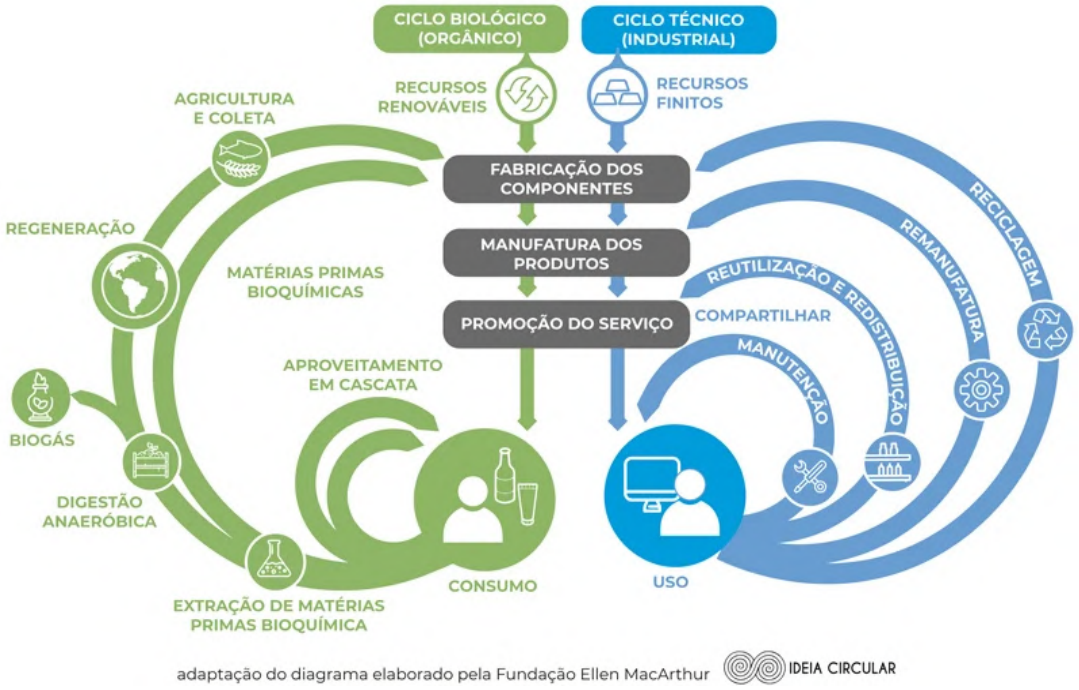
No atual sistema linear, muitos produtos são projetados sem considerar o seu destino após o uso, resultando em um volume significativo de resíduos que são descartados em aterros ou incinerados. Com a eliminação de resíduos e poluição, a economia circular propõe uma nova tratativa em que cada material é projetado levando em consideração seu retorno à economia como um nutriente técnico ou biológico. Materiais e produtos são concebidos de forma a permitir sua reutilização, reparo, atualização ou reintegração em novos ciclos, preservando e transmitindo seu valor intrínseco.

Além da eliminação de resíduos, a economia circular busca circular produtos e materiais em seu mais alto valor. Isso implica em manter os materiais em uso o máximo

possível, seja como produto final, componentes ou matérias-primas. Através do reuso, reparo, remanufatura e reciclagem, os materiais são mantidos em ciclos produtivos, evitando a extração de novos recursos. O terceiro princípio reconhece a importância dos processos naturais e busca emular esses processos em sistemas industriais e produtivos. Em contraste com a economia linear, que causa degradação e esgotamento dos recursos naturais, a economia circular visa restaurar e regenerar os ecossistemas (MACARTHUR, 2013; ELLEN MACARTUR FOUNDATION, 2018?).

Em meios práticos, a economia circular visa cobrir o produto em todo ciclo de vida e fazer seu reuso. Tanto do ponto de vista de recursos para uso ou consumo. Em ambos os casos os produtos passam pelos seus processos de produção normalmente, mas, ao chegarem no consumidor final, os produtos voltam a etapas anteriores para serem retrabalhados e posteriormente reutilizados. Em caso de materiais industriais, como o aço, o ideal é fazer o uso e manutenção enquanto possível, para então fazer a reutilização e redistribuição, remanufatura, e por fim, reciclagem, criando uma cadeia circular e sustentável, que minimize o consumo de matérias primas. Esse diagrama é demonstrado pela Figura 11, que aborda a circularidade dos produtos tanto orgânicos, quanto industriais [IDEIA CIRCULAR, 2018?].

Figura 11 - Diagrama da economia circular



Fonte: IDEIA CIRCULAR [2018?]

Leitão (2015) argumenta que para a implementação da economia circular é fundamental que todos os envolvidos no ciclo de vida de um produto entendam seu papel nesse novo modelo, não apenas as empresas, e havendo um trabalho conjunto de cooperação entre governos, autoridades locais, instituições financeiras e empresas. Isso é essencial para o sucesso da transição para uma economia circular. Somente através do envolvimento de todos os *stakeholders* e da colaboração ativa é possível alcançar uma economia mais sustentável e resiliente. Ele argumenta também que no atual cenário empresarial, caracterizado pela volatilidade, incerteza, complexidade e concorrência, é essencial que os empresários compreendam a urgência e ajam de forma concreta, assim como as organizações não podem se dar ao luxo de negligenciar boas práticas ou deixar de implementá-las, pois o desafio da gestão no século está em liderar as mudanças, aproveitando-as como oportunidades. A transição para uma economia circular representa uma oportunidade para as organizações se tornarem inovadoras, líderes de mudança e buscarem receitas e resultados econômicos positivos.

No entanto, Corvellec et al. (2021) destacam que, embora a economia circular tenha sido amplamente elogiada por formuladores de políticas e empresas como um modelo para ações sustentáveis, também tem sido alvo de críticas em círculos acadêmicos e profissionais. Eles ressaltam que críticas apontam que a economia circular tende a focar exclusivamente na economia, deixando de lado questões sociais e simplificando as consequências ambientais, como a falta de uma abordagem global que considere as realidades e necessidades dos países em desenvolvimento, o que se torna um problema grave, visto que esses países podem não ter tanta capacidade de inovação como países Europeus. Os autores ainda abordam a necessidade de uma tratativa mais coerente na concepção e implementação da economia circular, a fim de evitar que se torne uma utopia, desviando-se dos esforços reais para promover uma organização mais sustentável da produção, consumo e uso de materiais. Eles destacam também que há um perigo no potencial uso do conceito de desenvolvimento sustentável como mero slogan ou instrumento de autopromoção por parte de empresas e políticos, negligenciando as questões essenciais da economia circular. Além disso, é fundamental ter atenção no discurso tranquilizador, transmitindo a impressão de que a simples adoção da economia circular e a tecnologia unicamente serão a solução para todos os problemas ambientais, sendo necessário ter cautela com discursos otimistas.

Diante dos desafios e problemas apresentados pela economia linear, a adoção da economia circular emerge como uma abordagem inovadora e necessária para promover um modelo de desenvolvimento sustentável. Através da eliminação de resíduos e poluição, a

circularidade de produtos e materiais, e a regeneração da natureza, a economia circular propõe soluções para mitigar os impactos ambientais, reduzir a dependência de recursos finitos e preservar a sustentabilidade econômica e social a longo prazo. No entanto, ela não é uma panaceia dos impactos ambientais, por isso, é importante reconhecer as críticas levantadas pela academia e profissionais, que apontam a necessidade de uma abordagem mais abrangente, considerando as realidades dos países em desenvolvimento e evitando simplificações excessivas. Assim, para efetivamente alcançar uma economia circular verdadeiramente sustentável, é fundamental agir com eficácia, buscando uma abordagem coerente que vá além das declarações, e que efetivamente aborde os desafios, impactos sociais, ambientais e econômicos envolvidos na transição para uma economia verdadeiramente sustentável.

Nesse sentido, este trabalho irá abordar apenas o ciclo técnico industrial, não envolvendo o ciclo biológico orgânico.

Primeiramente, a manutenção, no contexto industrial e técnico, representa um conjunto de atividades planejadas e sistemáticas realizadas em equipamentos, máquinas, sistemas e infraestruturas, com o intuito de assegurar sua operacionalidade, prolongar sua vida útil e prevenir falhas. Essa prática abrange ações corretivas, preventivas e preditivas, envolvendo desde inspeções regulares até reparos emergenciais. A eficácia da manutenção é crucial para garantir a confiabilidade e disponibilidade dos ativos, otimizando a produtividade e minimizando custos. Em um cenário onde a tecnologia desempenha um papel cada vez mais central, a gestão eficiente da manutenção torna-se essencial para sustentar operações sustentáveis e eficazes nas mais diversas áreas da indústria e serviços (LEMOS et al., 2011).

Enquanto isso, a reutilização e redistribuição são conceitos de gestão eficiente de recursos. A reutilização refere-se à prática de utilizar um determinado item, material ou recurso novamente, após seu ciclo inicial de uso, promovendo a extensão de sua vida útil. Essa abordagem contribui significativamente para a redução do desperdício e impacto ambiental. Por sua vez, a redistribuição envolve a alocação estratégica de recursos excedentes para locais ou contextos onde podem ser melhor aproveitados, evitando a obsolescência prematura e fomentando um ciclo mais circular na economia. Ambas as práticas são peças-chave na transição para modelos mais sustentáveis, destacando a importância de repensar a maneira como consumimos e gerenciamos recursos em busca de soluções mais resilientes e amigáveis ao meio ambiente (BOTSMAN; ROGERS, 2011).

A remanufatura, conforme definida por Sundin (2004), é um processo industrial que visa restaurar produtos centrais para uma maior vida útil. Esse processo envolve uma série de

etapas, como inspeção, desmontagem, substituição/recondicionamento de peças, limpeza, montagem e testes, garantindo que o núcleo atenda aos padrões desejados do produto final. A remanufatura destaca-se como uma abordagem ambientalmente consciente, incorporando princípios de economia circular ao prolongar a vida útil dos produtos e reduzir o descarte prematuro. Essa prática não apenas contribui para a eficiência econômica, mas também desempenha um papel crucial na mitigação do impacto ambiental, alinhando-se aos esforços globais para promover práticas industriais mais sustentáveis e responsáveis (SUNDIN, 2004).

Finalmente, o aço possui uma elevada reciclabilidade. Esse processo de reciclagem resulta em emissões significativamente inferiores de gases para a atmosfera em comparação com a produção de aço a partir de matéria-prima virgem. Esse ciclo de vida do aço, desde sua fabricação até o consumo e desgaste, seguido pelo sucateamento, permite que o aço seja recolhido, processado e reintroduzido nas siderúrgicas, onde é tratado e comercializado novamente. Essa abordagem de reciclagem reduz significativamente a quantidade de resíduos gerados (LIUBARTAS et al., 2015). Além disso, a reciclagem contribui para questões de eficiência energética, enfrentamento de custos mais altos de matérias-primas, atendimento a legislações rigorosas sobre aterros sanitários e redução de resíduos destinados a esses locais, cumprimento de outras regulamentações, atendimento a requisitos ambientais cada vez mais exigidos pela população e obtenção de vantagem competitiva por meio de produtos ecologicamente corretos. Essas razões destacam a crescente necessidade de um tratamento efetivo do aço no final de sua vida útil, promovendo a reciclagem como parte integrante do ciclo de vida do setor ferroviário (MERKISZ-GURANOWSKA et al., 2014).

Além das características da Economia Circular, são necessários modelos de gestão que possibilitem a aplicação dessas características. Neste trabalho serão abordados, por exemplo, modelos como logística reversa e produto-serviço.

A logística reversa é um componente essencial no ciclo de vida dos produtos, indo além do tradicional fluxo logístico do ponto de aquisição até o ponto de consumo. Este processo dinâmico e multifacetado gerencia o retorno de produtos do ponto de consumo até o ponto de origem, incorporando práticas como a recuperação de embalagens, devoluções de clientes e reaproveitamento de materiais para a produção. Setores diversos, desde fabricantes de bebidas até a indústria automobilística, enfrentam desafios e oportunidades na gestão deste fluxo reverso. A crescente importância da logística reversa reflete-se em motivadores como as questões ambientais, com regulamentações buscando responsabilizar as empresas por todo o ciclo de vida de seus produtos. A conscientização ecológica dos consumidores e a competição por diferenciação de serviço também impulsionam as empresas a adotarem políticas mais

liberais de retorno de produtos. Além disso, as iniciativas relacionadas à logística reversa demonstram retornos econômicos substanciais, seja por meio da utilização de embalagens retornáveis ou do reaproveitamento de materiais, destacando sua relevância na busca por práticas empresariais mais sustentáveis e eficientes (LACERDA, L., 2002).

Enquanto isso, a abordagem de Produto-Serviço redefine a interação tradicional entre empresas e consumidores, deslocando o foco exclusivo da venda de produtos tangíveis para a entrega de soluções completas e experiências. Nesse paradigma, as empresas não apenas oferecem um item físico, mas também incorporam serviços que aprimoram o valor percebido pelo cliente, como por exemplo, um fornecedor vender um componente de vagão, e prestar a manutenção desse mesmo componente. Esse modelo transcende a mera transação comercial, promovendo uma relação mais profunda e contínua entre ambas as partes (UNEP, 2009).

4. PRÁTICAS NAS FERROVIAS E ATUAÇÕES DA ECONOMIA CIRCULAR

Este capítulo, através de entrevistas com gestores de uma empresa ferroviária, apresenta uma visão das práticas já adotadas no setor ferroviário para minimizar o impacto ambiental ao longo da vida útil dos componentes ferroviários. São abordados os processos de como é feita a manutenção, além do foco na gestão da sucata gerada e estratégias de venda para diversos compradores. Assim, busca-se entender como a empresa ferroviária busca equilibrar eficiência operacional e sustentabilidade ambiental.

Além disso, o estudo da economia circular como uma abordagem para promover práticas sustentáveis no setor ferroviário é uma adição significativa. A economia circular implica uma transformação profunda na cadeia de suprimentos, na manutenção e no descarte de materiais, alinhando-se com os princípios da sustentabilidade em todos os aspectos. Ao abordar as práticas da economia circular aplicadas a esses campos, demonstra-se a importância de explorar novas abordagens para tornar o setor ferroviário mais sustentável e eficiente.

4.1 PRÁTICAS NAS FERROVIAS

Nessa seção, serão exploradas as práticas que visam minimizar o impacto ambiental ao longo da vida útil dos componentes ferroviários. Desde a manutenção preventiva até parcerias inovadoras com fornecedores de produto-serviço, examinaremos como as empresas ferroviárias enfrentam desafios para serem sustentáveis em suas operações. Além disso, será abordado o destino para a sucata gerada. Com um foco especial na gestão de diferentes tipos de sucata, desde componentes de vagões até locomotivas e via permanente. Ademais, será abordada as estratégias de venda da sucata para diversos compradores, desde siderúrgicas que utilizam esses materiais como matéria-prima até a exploração de oportunidades no mercado internacional. A escolha criteriosa de compradores, com base em critérios jurídicos, ambientais e econômicos, é abordada como parte fundamental desse processo, garantindo que a sucata seja gerenciada de forma responsável.

Esta seção se baseia em informações obtidas por meio de entrevistas com gerentes das áreas abordadas. O critério de seleção dos entrevistados foi com base na área de atuação, com interfaces diretas ao ciclo do aço. As perguntas utilizadas nas entrevistas se encontram nos Anexos 1 e 2, no qual, a seção 4.1.1 é baseada na entrevista com um gerente de manutenção

de vagões, responsável por toda manutenção desses ativos, com as perguntas presentes no Anexo 1, e a seção 4.1.2 é baseada na entrevista com um gerente de receitas alternativas, responsável pela área que visa ganhos financeiros que não são ligados à operação principal da empresa, como por exemplo, a comercialização da sucata, com as perguntas utilizadas no Anexo 2.

4.1.1 MANUTENÇÃO NO CENÁRIO ATUAL

Como todo processo industrial, a manutenção é fundamental para as operações ferroviárias. Empresas ferroviárias gerenciam uma grande e diversificada frota de vagões que transportam uma variedade de cargas, e a manutenção eficaz desses vagões é essencial para garantir a segurança, eficiência e confiabilidade das operações.

Diante disso, surgem questões muito importantes de se avaliar. Como, os desafios de se implantar práticas sustentáveis à todo o processo de manutenção. Por isso, as empresas definem critérios para essa ação.

A vida útil dos componentes dos vagões é um dos principais pontos de consideração na manutenção. Os componentes, como rodas, rolamentos, eixos e truques, têm suas vidas úteis dimensionadas com base em critérios como quilometragem, desgaste e tempo de uso. Como por exemplo, as rodas dos vagões têm uma vida útil determinada pela quilometragem percorrida e pelo grau de desgaste acumulado, e quando uma roda atinge o fim de sua vida útil, ela precisa ser substituída para manter a segurança e a eficiência das operações. Uma manutenção preventiva nos componentes permite a substituição antes que falhem, o que reduz o desperdício e o impacto ambiental.

Essa manutenção preventiva é crucial, uma vez que esses componentes são retirados de circulação antes que falhem, com base em critérios específicos. A inspeção é uma parte fundamental desse processo, ajudando a determinar o momento apropriado para a substituição de componentes, contribuindo para a sustentabilidade ao evitar falhas imprevistas que possam impactar negativamente o meio ambiente.

Além disso, a qualidade dos componentes fornecidos pelos fornecedores influencia diretamente a eficiência da manutenção e a frequência das substituições necessárias. Componentes de alta qualidade têm uma vida útil mais longa, o que reduz a necessidade de substituições frequentes e, consequentemente, minimiza o desperdício e o impacto ambiental. A escolha de fornecedores de alta qualidade é se faz necessário por conta disso. Porém, ao

avaliar do ponto de vista econômico, há a possibilidade de fornecedores se sentirem desencorajados a fabricarem produtos duráveis, visto que resultariam em uma menor quantidade de vendas. Isso faz necessário sensibilidade por parte dos compradores no momento de seleção dos fornecedores.

Uma saída vantajosa para contratante e contratada, são fornecedores que ofereçam produto-serviço, no qual o fornecedor além de vender o material, ele presta o serviço. Os serviços de manutenção prestados pelos fornecedores no setor ferroviário podem garantir a confiabilidade e a eficiência necessária por toda vida útil dos componentes. Com base na entrevista, ficou evidente que alguns fornecedores desempenham um papel integral ao oferecer não apenas os produtos, mas também os serviços de manutenção associados a esses produtos.

Um exemplo é a parceria estabelecida com uma empresa fornecedora de rolamentos, como aqueles apresentados nas figuras 7 e 12, que são componentes de aço, vitais para o funcionamento dos vagões e locomotivas, permitindo o movimento do trem. No entanto, a colaboração vai além da simples venda de componentes. Essa empresa mantém uma unidade nas instalações da empresa ferroviária, tornando-se parte integrante das operações da empresa. Além de fornecer componentes novos, o fornecedor também realiza a manutenção e a recuperação desses componentes.

Figura 12 - Rolamento ferroviário

Fonte: SCHAEFFLER BRASIL (2018)

Essa abordagem tem benefícios substanciais para ambas empresas. Em primeiro lugar, ela simplifica a gestão de ativos, pois a mesma empresa que fornece os componentes é

responsável por sua manutenção. Isso garante que os componentes sejam mantidos em ótimas condições ao longo de sua vida útil, contribuindo para a confiabilidade operacional.

Além disso, essa parceria ajuda a empresa a otimizar seus custos de manutenção. Recuperar e manter os componentes existentes geralmente é mais econômico do que adquirir novos. A manutenção realizada pelo fornecedor contribui para a sustentabilidade econômica, com uma economia circular que prolonga a vida útil dos componentes e reduz a necessidade de comprar novos materiais regularmente, poupando desperdício de matéria prima, e evitando todo processo visto no capítulo 3, de modo que ao recuperar e reutilizar os componentes, a empresa contribui para a redução do impacto ambiental associado à produção de novos materiais. Enquanto isso, do ponto de vista econômico, é vantajoso para o fornecedor, visto que aumenta a fidelidade da empresa compradora do serviço, além de maiores ganhos financeiros.

Como esse exemplo, existem outros casos uma abordagem semelhante, com outros componentes, como freios, em que uma empresa fabricante do componente não apenas o fornece, mas também realiza manutenção, recuperação, e revisão desses componentes.

É notório que a parceria com fornecedores que oferecem produto- serviço são um destaque significativo na otimização da gestão de ativos ferroviários, na eficiência operacional e na promoção da sustentabilidade, não somente no ganho financeiro. Essa abordagem representa uma prática circular, inovadora e eficaz que pode servir de exemplo para outras empresas do setor ferroviário em busca de soluções sustentáveis e econômicas.

Porém, tirando esses casos em que o fornecedor adota o modelo de o produto-serviço, essa empresa ferroviária realiza grande parte de sua manutenção internamente de forma primária, aproveitando a infraestrutura e o conhecimento técnico que desenvolveu ao longo dos anos. A terceirização é uma prática adotada quando a empresa não possui a capacidade instalada necessária para atender à demanda[2], especialmente em casos de projetos pontuais ou tecnologias especializadas. Além disso, o fato de as equipes de manutenção já colaborarem de perto com as equipes de suprimentos e engenharia resultam em que as decisões de compra levem em consideração aspectos como eficiência e durabilidade, não somente preço.

A manutenção de vagões nas empresas ferroviárias é um processo complexo e multifacetado que envolve a gestão de uma ampla gama de componentes e ativos. Ao final da vida útil de um componente, o sucateamento não se limita apenas ao descarte dos componentes. A empresa ferroviária também gerencia internamente esse processo de forma

[2] Considera-se terceirização sendo a contratação de uma empresa que não é a fabricante do material para executar a manutenção do mesmo. Essa abordagem é diferente de produto-serviço.

apropriada, visando a sustentabilidade e a minimização do impacto ambiental. Nos tipos de manutenção apresentados, primários, terceiros, e produto-serviço, é feito o descarte dos componentes de forma apropriada. A maioria dos materiais sucateados, geralmente metálicos, segue um contrato de receita alternativa para o destino para sucata. Esse processo de descarte é feito de acordo com a natureza do material e de maneira ambientalmente responsável, contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

4.1.2 DESTINO DADO PARA A SUCATA

Após a manutenção, o destino para a sucata produzida é de muita importância. Entre os principais tipos de sucata produzidos pela empresa analisada, destacam-se a sucata de rodeiro, uma composição em maior parte de aço e está ligada aos componentes ferroviários, sendo ele a junção da roda, do eixo, e do rolamento. Esse sucateamento pode não envolver todos os materiais de uma só vez, visto que esses componentes possuem durabilidades e tempos de vida diferentes. A separação e controle desses materiais é fundamental para esse controle da sucata gerada. Além disso, a Sucata de Componentes de Vagões abrange uma série de peças e componentes dos vagões ferroviários, cuja reciclagem pode contribuir para a redução do desperdício de recursos.

O sucateamento também alcança as locomotivas, que são provenientes da desativação ou substituição. As baterias usadas nessas locomotivas diesel-elétricas também fazem parte desse panorama, representando um desafio ambiental significativo. Há um modelo de logística reversa com o fornecedor das baterias, em que ao fim da vida útil do material ele retorna ao fornecedor para ele dar o uso necessário a essa sucata. Isso é muito relevante, pois as baterias possuem em seus componentes materiais tóxicos, como chumbo. As locomotivas também possuem um grande potencial por conta da sucata de materiais nobres, como cobre e alumínio, presentes em muitos subcomponentes. Essa é uma fonte valiosa de metais que podem ser reprocessados, economizando recursos naturais e energia, além de dar valor financeiro à sucata.

Há também sucata da via permanente, com a sucata de trilho, dando também oportunidade não apenas de reciclagem, mas também de potencial renovação das estruturas ferroviárias. E também sucata de dormentes, composta por blocos de madeira ou concreto usados para fixar os trilhos.

A sucata produzida nessa empresa é vendida para diversos tipos de compradores, cada um com diferentes finalidades. A maior parte da sucata é vendida para grandes empresas, como siderúrgicas e um fabricante de vagões, que a utilizam como matéria-prima para produzir novos materiais, como aço e componentes ferroviários. Esse processo promove a reciclagem e a remanufatura de materiais, reduzindo o consumo de recursos naturais e minimizando o desperdício.

Há também alguns compradores que adquirem a sucata para revendê-la a outros setores, como a construção civil. Os dormentes de madeira, por exemplo, são comprados por empresas que os revendem para a construção de obras e outras aplicações.

A empresa abordada possui grandes siderúrgicas como acionistas. Porém, somente uma dessas siderúrgicas têm participação ativa nas compras dessas sucatas. Isso é uma perda de potencial para os demais acionistas, uma vez que essa sucata se torna um tipo de matéria-prima para seus processos de produção de aço. A siderúrgica com participação ativa, por exemplo, sendo uma das principais compradoras da sucata de aço, utiliza como insumo na produção de aço reciclado, contribuindo para a economia circular e a redução da demanda por minério de ferro. A participação ativa dessas siderúrgicas na aquisição de sucata é um compromisso com a sustentabilidade e a eficiência na utilização de recursos.

Por outro lado, a empresa estudada também mantém relações comerciais com uma empresa fabricante de vagões. A venda de sucata metálica para essa empresa fecha o ciclo da sustentabilidade, uma vez que a sucata é reintegrada na produção de novos vagões e componentes ferroviários. Essa prática contribui para a conservação dos recursos, além de reduzir todo o impacto ambiental associado à mineração do minério de ferro. Essa relação entre ferroviária e fabricante de vagões é crucial na remanufatura e na redução do desperdício de materiais.

Com relação às outras empresas que compram essa sucata, a seleção de compradores é um processo criterioso. A empresa avalia critérios jurídicos, ambientais e econômicos ao escolher seus compradores. Eles consideram o histórico jurídico, questões de compliance, alvarás e a capacidade de pagamento. Isso é de grande importância, pois garante que a sucata seja destinada para alguém que tenha capacidade de dar um fim ao material de forma adequada. Caso contrário, seria somente uma forma de “terceirização” da poluição.

Além disso, uma das questões abordadas na entrevista, foi o comércio de sucata com o mercado internacional. Não é um mercado em que essa empresa possui participação, em que a venda de sucata para o exterior seja algo relativamente novo. A empresa tem explorado a

possibilidade de expandir suas operações para o mercado internacional, com conversas com potenciais compradores no exterior.

4.2 PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS DA ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular, como apresentada anteriormente, é uma abordagem crucial para promover práticas sustentáveis em diversos setores industriais, incluindo o ferroviário. A aplicação dos princípios da economia circular nesse contexto implica uma profunda transformação na cadeia de suprimentos das grandes ferrovias, a manutenção como um todo, e o destino final para os materiais usados, visando a sustentabilidade em todos os aspectos.

Com isso, nessa seção será abordada práticas da economia circular aplicadas a todos esses campos em grandes empresas ferroviárias.

4.2.1 ECONOMIA CIRCULAR E A CADEIA DE SUPRIMENTOS

Das práticas da economia circular, pode-se utilizar na cadeia de suprimentos, a logística reversa, abordagens de produto-serviço, desenvolvimento de fornecedores, economia compartilhada.

A logística reversa se concentra no fornecedor fazendo a coleta, recuperação, reciclagem e reintegração de produtos, materiais e componentes usados, criando assim um ciclo contínuo de utilização e minimizando o desperdício. Nesse contexto, a logística reversa se torna uma ferramenta essencial para tornar a indústria ferroviária mais sustentável e eficiente.

Esse processo abrange diversos aspectos, que vão desde a recuperação de vagões e trilhos até a gestão de produtos obsoletos.

Um dos principais aspectos da logística reversa é a recuperação de vagões e trilhos que atingiram o fim de sua vida útil. Em vez de descartá-los como resíduos, esses componentes podem ser coletados, revisados, reparados e, quando necessário, remanufaturados para serem reintegrados à operação ferroviária. Essa prática não apenas prolonga a vida útil dos ativos, mas também reduz a necessidade de fabricar novos componentes, minimizando o consumo de recursos naturais.

Outro aspecto fundamental envolve o reaproveitamento e a reciclagem de materiais, com destaque para o aço, um material amplamente utilizado na indústria ferroviária. A

logística reversa facilita a coleta e o transporte eficiente desses materiais a partir de vagões e trilhos descartados. O aço e outros materiais podem ser processados e reintroduzidos na cadeia de suprimentos ferroviária. A reciclagem de aço, por exemplo, resulta em economia de recursos, redução de emissões de carbono e contribuição significativa para a sustentabilidade.

A gestão de produtos obsoletos e componentes que não podem mais ser utilizados na operação ferroviária é outro ponto importante. A logística reversa permite a coleta desses produtos e sua disposição de maneira ambientalmente responsável. Isso evita o acúmulo de resíduos e a contaminação ambiental, alinhando-se com os princípios da economia circular.

A colaboração é essencial na implementação bem-sucedida da logística reversa. Parcerias estratégicas com fornecedores, prestadores de serviços de logística e parceiros de reciclagem garantem que os produtos e materiais retornados sejam tratados de maneira adequada, além da parceria entre o setor de suprimentos e a área responsável pela comercialização da sucata. Essa abordagem não apenas atende às demandas ambientais, mas também cria oportunidades para um modelo de negócios mais responsável e competitivo.

A abordagem de produto-serviço é outra estratégia importante a ser adotada pelas grandes ferrovias. Os fornecedores podem não apenas fornecer os produtos, como vagões e trilhos, mas também oferecer serviços de manutenção, reparo e atualização desses produtos ao longo de seu ciclo de vida. Isso não apenas prolonga a vida útil dos ativos, mas também cria uma relação mais estreita entre fornecedores e ferrovias, promovendo uma cooperação mais eficaz em direção à práticas sustentáveis.

O conceito de produto-serviço envolve uma transição da abordagem tradicional de fornecimento de produtos para um modelo que não se limita apenas a entregar o produto em si, mas também abrange os serviços associados a ele. Na indústria ferroviária, isso implica em ir além da simples entrega de locomotivas, vagões e trilhos e incluir serviços abrangentes de manutenção, reparo e atualização ao longo do ciclo de vida desses ativos.

A aplicação desse conceito traz inúmeros benefícios que contribuem para a promoção de uma abordagem mais sustentável. Fornecer serviços de manutenção contínua e reparo significa que trens e infraestrutura ferroviária são mantidos em condições ideais, reduzindo a necessidade de substituição prematura, o que, por sua vez, economiza recursos e evita o desperdício relacionado à obsolescência de ativos.

Além disso, a eficiência operacional é aprimorada com a adoção desse modelo. Empresas ferroviárias podem garantir que seus ativos funcionem com máxima eficiência, graças à ação dos fornecedores na manutenção preventiva e à atualização de componentes

desgastados ou obsoletos. Isso resulta em um desempenho otimizado, redução do consumo de energia e menores custos operacionais.

A redução de resíduos e do impacto ambiental também é uma consequência direta da aplicação do conceito de produto-serviço. A manutenção regular e a possibilidade de remanufaturar componentes contribuem para a redução de resíduos, uma vez que menos peças são descartadas. Isso se torna mais fácil neste modelo, devido a maior expertise do fabricante do material, possibilitando melhores diagnósticos dos componentes.

A customização e a inovação são facilitadas pela adoção do modelo produto-serviço. Os fornecedores podem oferecer soluções mais personalizadas às empresas ferroviárias, adaptando os serviços de acordo com necessidades específicas. Isso incentiva a inovação e o desenvolvimento de soluções sob medida. Empresas que adotam o modelo produto-serviço podem ganhar uma vantagem competitiva significativa, destacando-se pela sua abordagem sustentável e pela capacidade de atender às crescentes demandas por soluções ecologicamente corretas.

Para implementar com sucesso o conceito de produto-serviço na indústria ferroviária, é crucial estabelecer parcerias sólidas com fornecedores comprometidos com práticas sustentáveis e eficientes. Isso envolve não apenas a fabricação de ativos ferroviários de alta qualidade, mas também a prestação de serviços de manutenção e suporte de alta qualidade ao longo do ciclo de vida dos produtos.

O desenvolvimento de fornecedores é um potencial investimento que vai ao encontro a esse modelo. Neste caso, o objetivo é não apenas obter materiais e componentes necessários para a operação ferroviária, mas também estabelecer parcerias estratégicas com fornecedores capacitados, sustentáveis e eficientes que compartilhem o compromisso com princípios sustentáveis. A relação entre empresas ferroviárias e seus fornecedores deve ir além da simples transação comercial. Deve ser uma parceria que contribui para o desenvolvimento sustentável, a redução de impactos ambientais e a eficiência operacional.

Em certo nível, empresas ferroviárias devem desenvolver, incentivar, verificar e priorizar fornecedores que adotam práticas sustentáveis em suas operações. Isso inclui a seleção de materiais com baixo impacto ambiental, a minimização de resíduos e o cumprimento de regulamentações ambientais. Os fornecedores sustentáveis também podem demonstrar compromisso com a redução das emissões de carbono e a preservação dos recursos naturais.

A eficiência também é um fator essencial nas operações desses fornecedores. Fornecedores eficientes podem oferecer materiais de alta qualidade, entregas pontuais e

processos simplificados, tudo isso de modo a consumir menos recursos, como matéria prima ou mesmo energia. Isso é particularmente importante em uma indústria que depende da confiabilidade e da operação sem interrupções. Portanto, é vital para a longevidade de uma empresa ferroviária o desenvolvimento e promoção de eficiência em seus parceiros.

Fornecedores que investem em pesquisa e desenvolvimento podem contribuir para a inovação na indústria ferroviária. Isso pode envolver o desenvolvimento de materiais mais leves, duráveis e de baixo impacto ambiental, bem como soluções tecnológicas avançadas para melhorar a segurança e a eficiência das operações ferroviárias. Empresas ferroviárias acompanhando de perto esses fornecedores trazem ganho mútuo a ambos lados.

A economia circular pode ser incorporada ao desenvolvimento de fornecedores, incentivando-os a produzir materiais e componentes que possam ser reutilizados, reparados e reciclados. Isso implica em projetar produtos de forma mais durável e com menor impacto ambiental, promovendo a circularidade ao longo de todo o ciclo de vida do produto.

Finalmente, uma abordagem mais difícil, porém realizável, é a implementação de economias compartilhadas. A economia compartilhada se baseia na ideia de compartilhamento de recursos, ativos e serviços.

Uma das principais áreas em que a economia compartilhada pode ser aplicada nas empresas ferroviárias é a prática de *leasing* de ativos. Nesse contexto, locomotivas e vagões podem ser compartilhados entre diferentes concessionárias. Isso permite uma utilização mais eficiente dos ativos ferroviários, uma vez que muitas vezes esses ativos têm um alto custo de aquisição e manutenção, e por vezes, podem ficar parados sem uso, com a variação da demanda. Com o *leasing* dos ativos, as empresas ferroviárias podem otimizar o uso de suas frotas, evitando subutilização e reduzindo a necessidade de adquirir novos veículos. Isso não apenas economiza recursos financeiros, mas também reduz a pegada de carbono da indústria ferroviária, uma vez que menos recursos são alocados para a produção e manutenção de ativos, além de trazer receitas alternativas com o aluguel dos equipamentos.

Por conta do alto número de vagões, como visto no capítulo 2, isso se torna uma dificuldade. Porém, pode se tornar possível para as locomotivas, que possuem um número menor. Ou ainda, nos grandes equipamentos de manutenção de via, como reguladoras, socadoras, esmerilhadoras ou desguarnecedora, como a da figura 13, que são ativos de menor número e alto valor financeiro, com até mesmo nenhum ou um de cada por concessionária.

Figura 13 - Desguarnecedora total de lastro

Fonte: LOGWEB (2022)

Além da gestão de ativos, a economia compartilhada também pode ser aplicada em áreas como manutenção e reparo. As empresas ferroviárias podem compartilhar instalações de manutenção e equipes técnicas especializadas para realizar reparos e serviços de manutenção em suas frotas. Isso resulta em uma utilização mais eficiente de recursos humanos e técnicos, reduzindo custos operacionais e contribuindo para a sustentabilidade.

A economia compartilhada também se estende ao compartilhamento de informações e dados. As empresas ferroviárias podem colaborar na coleta e análise de dados operacionais, o que pode levar a melhorias significativas na gestão da cadeia de suprimentos. Isso inclui otimizar rotas, reduzir o tempo de espera e aumentar a eficiência geral das operações ferroviárias.

No entanto, a implementação bem-sucedida da economia compartilhada na cadeia de suprimentos das empresas ferroviárias não é isenta de desafios. É essencial estabelecer parcerias eficazes, acordos contratuais claros e sistemas de compartilhamento de ativos e informações seguros. A confiabilidade e a segurança das operações compartilhadas também são prioridades, uma vez que qualquer falha na manutenção ou na gestão de ativos compartilhados pode resultar em impactos negativos na operação ferroviária.

A adoção de práticas da economia circular na cadeia de suprimentos das empresas ferroviárias oferece uma série de ganhos financeiros, de imagem e para os acionistas. A implementação da logística reversa permite a redução do desperdício e o prolongamento da

vida útil dos ativos, resultando em economias de recursos e redução de emissões de carbono. A abordagem de produto-serviço não apenas otimiza a eficiência operacional, mas também promove a inovação e a competitividade das empresas ferroviárias, destacando-se como líderes em práticas sustentáveis. Além disso, o desenvolvimento de fornecedores comprometidos com a sustentabilidade contribui para a eficiência operacional e a inovação na indústria ferroviária. Por fim, a economia compartilhada oferece oportunidades para reduzir custos operacionais, promovendo a colaboração e a eficiência. No entanto, a superação dos desafios relacionados à implementação da economia circular em suprimentos é crucial para garantir o sucesso dessa abordagem.

4.2.2 PRÁTICAS CIRCULARES: DA MANUTENÇÃO AO SUCATEAMENTO

A aplicação da economia circular na manutenção de vagões e produtos manufaturados em aço em uma grande ferroviária deve buscar por práticas sustentáveis e na redução dos impactos ambientais. No capítulo 3 foi demonstrado que a manutenção já é um braço ativo da economia circular, através da figura 11. Ela é quem define o início desse ciclo. Esse é um braço muito bem estabelecido e vital para qualquer indústria hoje. Porém, os braços da reutilização e redistribuição, remanufatura, e reciclagem nem sempre são muito aprofundados.

Não basta somente fazer a manutenção. Precisa ser uma manutenção sustentável e eficiente, como uma manutenção preventiva. Por meio dessa manutenção preventiva, as empresas podem antecipar e evitar problemas potenciais, prolongando a vida útil dos vagões e os produtos de aço. Com inspeções regulares, testes e reparos programados nos materiais, é possível corrigir pequenos problemas antes que se tornem grandes, evitando falhas catastróficas e danos irreparáveis, além de permitir a substituição oportuna de componentes desgastados, garantindo que o desempenho e a segurança dos vagões não sejam comprometidos.

Em termos financeiros, a manutenção preventiva pode resultar em economias substanciais. Ao evitar reparos caros e substituições de última hora, os custos de operação são reduzidos, contribuindo para a eficiência financeira das operações ferroviárias. Além disso, a manutenção preventiva permite programar e orçar os gastos com manutenção de forma mais previsível, eliminando custos imprevistos que podem surgir devido a falhas não planejadas. Essa manutenção preventiva também possibilita o aumento de vida útil desses equipamentos,

diminuindo a necessidade de produtos novos, e consequentemente, trazendo novas economias financeiras.

Dito isso, seguindo com a reutilização e redistribuição, em vez de simplesmente descartar como resíduo os vagões e produtos de aço no final de sua vida útil operacional, esses materiais podem ser submetidos a um processo de recondicionamento e realocação, o que gera uma série de benefícios significativos.

Vagões que já não atendem mais aos padrões de transporte de carga devido a desgaste, obsolescência ou outros fatores, pode-se buscar por oportunidades de reutilização. Esses vagões podem ser adaptados e transformados em novos tipos de vagões para atender a diferentes necessidades de transporte, após passar por uma série de transformações. Além disso, a reutilização pode estender-se além da ferrovia. Vagões e produtos de aço podem ser recondicionados e realocados para diferentes setores ou usos. Vagões desativados podem ser transformados em estruturas para armazenamento, materiais como panelas, ou até mesmo em elementos de construção civil. Isso maximiza o valor intrínseco dos materiais e evita o desperdício, uma vez que eles continuam a desempenhar um papel útil em outras aplicações.

Essa prática não apenas reduz a quantidade de resíduos gerados, mas também contribui para a preservação dos recursos naturais, uma vez que menos novos materiais precisam ser extraídos da natureza. Além disso, o recondicionamento e realocação de vagões e produtos de aço têm implicações econômicas positivas, reduzindo os custos de produção e economizando recursos financeiros para as empresas, além de receitas alternativas para as empresas ferroviárias.

Após isso, a remanufatura envolve um processo cuidadoso no qual os produtos são desmontados e, em seguida, reconstruídos usando componentes atualizados. O objetivo da remanufatura é restaurar os produtos à sua condição original ou até mesmo aprimorá-los, de modo que possam continuar desempenhando sua função por um período adicional de tempo.

Uma das principais vantagens da remanufatura é que ela prolonga significativamente a vida útil dos produtos. Em vez de descartar produtos que já não atendem totalmente às necessidades operacionais, a remanufatura permite que eles sejam restaurados e retornem ao serviço. Isso não apenas economiza recursos, mas também reduz o desperdício, contribuindo para a redução dos resíduos e a minimização dos impactos ambientais.

A remanufatura também causa uma redução da demanda por novos recursos naturais. Ao reutilizar componentes existentes e atualizá-los conforme necessário, a necessidade de extrair novos materiais é significativamente reduzida. Isso é especialmente relevante no caso do aço, um material que requer a exploração de recursos naturais, como minério de ferro,

carvão e calcário, em sua produção. Além disso, a remanufatura pode ser uma estratégia economicamente eficiente. Em muitos casos, o custo de remanufaturar um produto pode ser consideravelmente menor do que adquirir um novo. Isso é benéfico tanto para as ferrovias quanto para as empresas que oferecem serviços de remanufatura, tornando-a uma opção atraente do ponto de vista econômico.

Este ponto em particular, conversa muito com o produto-serviço, abordado na seção anterior. As empresas ferroviárias muitas vezes podem apresentar dificuldades em remanufaturar os componentes, visto que a fabricação não é a função final dessas empresas. Portanto, um trabalho conjunto com suprimentos e com o fornecedor contratado, pode-se criar uma prática de que o fornecedor além de vender o produto e a manutenção, ele também terá a oportunidade de remanufaturar esses materiais, agregando grande valor à toda sua cadeia, economizando em custos, e dando uma imagem positiva a ambas partes.

A economia compartilhada é outro ponto possível de se fazer ligação à seção anterior. Ao compartilhar informações sobre o desempenho dos vagões e produtos de aço, as empresas ferroviárias podem identificar áreas de melhoria e otimização. Isso inclui o monitoramento de padrões de desgaste, eficiência energética e manutenção preventiva. Com dados precisos e em tempo real, é possível tomar medidas proativas para melhorar a eficiência operacional, economizando recursos e reduzindo custos. Esse compartilhamento de dados permite que as empresas aprendam com as melhores práticas e inovações uns dos outros. Isso significa que as tecnologias e métodos mais avançados de manutenção e prolongamento da vida útil dos vagões e produtos de aço podem ser compartilhados e adotados de forma mais ampla. Isso contribui para melhorar a durabilidade desses materiais e reduzir a necessidade de substituição precoce.

Por fim, no último braço, a reciclagem dos produtos manufaturados em aço. Felizmente, o aço é altamente reciclável e oferece inúmeras vantagens ambientais e econômicas quando reintegrado no ciclo de produção.

Ao reciclar produtos manufaturados em aço no final de sua vida útil, evita-se a necessidade de extrair novos recursos naturais. A extração de recursos minerais frequentemente envolve a destruição de habitats naturais e paisagens, causando impactos significativos na biodiversidade e na qualidade do solo, além de atuar na redução das emissões de gases de efeito estufa, como visto no capítulo 3.

A reciclagem de vagões e produtos de aço também tem benefícios econômicos. Ela contribui para a redução dos custos de produção de materiais reciclados em comparação com a produção a partir de matérias-primas virgens. Para ser executada uma reciclagem correta,

primeiramente depende da separação eficaz dos diferentes tipos de aço na sucata. Além disso, a reciclagem pode criar oportunidades de negócios e empregos na cadeia de valor da reciclagem, desde a coleta e transporte até o processamento e a comercialização do aço reciclado.

Para isso, é necessário um destino certo para toda a sucata gerada nos três braços anteriores da economia circular. Aqui, existem três tipos de tratativas, sendo a reciclagem em si, a logística reversa, e possíveis parcerias estratégicas. Abordando primeiramente a reciclagem simples, é como visto na seção 4.1, em que a empresa ferroviária estudada comercializa suas sucatas com empresas especializadas em reciclagem, visto que não é a função primária de empresas ferroviárias.

Portanto, uma abordagem diferente da simples reciclagem, é a aplicação da logística reversa, como exemplo das baterias de locomotivas, também da seção 4.1. Com os materiais voltando para os fornecedores dessa forma, há duas possibilidades, sendo a reciclagem completa, ou a remanufatura. Com a elaboração de contratos com fornecedores no momento das aquisições de materiais e serviços, contratos esses que contemplem esse retorno dos materiais no momento do fim do ciclo de vida, pode-se gerar não só ganhos ambientais, mas também econômicos nos momentos de negociação, além de economias nos momentos da fabricação do material.

Finalmente, outra possibilidade são parcerias estratégicas com siderúrgicas e fabricantes de vagões. Essas parcerias podem envolver a colaboração ativa entre empresas ferroviárias, siderúrgicas e fabricantes de vagões, visando maximizar a reutilização e a reciclagem da sucata de aço.

Ao estabelecer parcerias com siderúrgicas, as empresas ferroviárias podem direcionar a sucata de aço gerada pelo sucateamento de componentes. Isso permite que as siderúrgicas utilizem a sucata como matéria-prima para a produção de aço reciclado, podendo ser usado na fabricação de chapas de aço, que são utilizadas de forma ostensiva na fabricação e manutenção dos vagões.

Por outro lado, a colaboração com fabricantes de vagões é igualmente importante. A venda de sucata de aço para essas empresas fecha o ciclo da sustentabilidade, uma vez que a sucata é reintegrada na produção de novos vagões e componentes ferroviários. A remanufatura de componentes ferroviários a partir da sucata de aço contribui para a redução do desperdício de materiais e ajuda a criar um ambiente mais sustentável.

Além dos benefícios ambientais, essas parcerias estratégicas também podem ser economicamente vantajosas para todas as partes envolvidas. As empresas ferroviárias podem

obter receitas adicionais com a venda de sucata de aço, as siderúrgicas podem reduzir os custos de produção utilizando sucata como matéria-prima e os fabricantes de vagões podem economizar recursos na fabricação de novos produtos.

É importante ressaltar que a gestão da sucata de aço em ferrovias deve ser cuidadosamente regulamentada e controlada para garantir a conformidade com normas ambientais e jurídicas. A seleção criteriosa de compradores, como mencionado na entrevista, é crucial para garantir que a sucata seja tratada de forma responsável.

Além disso, a conscientização de todos os *stakeholders* envolvidos, incluindo empresas, governos, autoridades locais e instituições financeiras, é essencial para o sucesso da transição para uma economia circular na indústria ferroviária. A colaboração ativa entre esses atores é fundamental para criar um ambiente propício à sustentabilidade e à eficiência no uso de recursos.

Esta seção destacou a importância da aplicação da economia circular na manutenção de vagões e produtos manufaturados em aço em ferrovias, assim como no destino final para esses materiais. Fica claro que a manutenção preventiva é crucial na prolongação da vida útil dos materiais e na redução dos impactos ambientais, tanto em termos financeiros quanto em termos de recursos naturais. Além disso, a reutilização, remanufatura, e reciclagem representam abordagens sustentáveis e economicamente vantajosas. A colaboração entre empresas ferroviárias, siderúrgicas e fabricantes de vagões, juntamente com a regulamentação e conscientização, são igualmente importantes na transição para uma economia circular na indústria ferroviária. Essas práticas não apenas contribuem para a preservação do meio ambiente, mas também geram benefícios econômicos e promovem a eficiência no uso de recursos. Portanto, a adoção da economia circular nas ferrovias é uma abordagem valiosa que pode impulsionar a sustentabilidade e a prosperidade na indústria ferroviária.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve o objetivo de estudar práticas de economia circular, possíveis aplicações dessas práticas em grandes ferroviárias, e como essas aplicações podem tornar essas empresas mais sustentáveis, além de reduzir os impactos ambientais associados ao consumo de produtos de aço. Para chegar nesse objetivo foi necessário analisar alguns objetivos específicos, como elaborar quais são os principais impactos ambientais causados por essas empresas, estudar quais são os principais impactos ambientais dos produtos de aço, e como as principais iniciativas da economia circular podem ser adotadas pelas empresas do setor para mitigar tais impactos.

Para isso, foi necessário avaliar a indústria ferroviária brasileira, assim como seus principais impactos ambientais, estudar a utilização do aço em vagões e na via permanente, assim como os impactos ambientais associados à mineração de ferro, produção, e ciclo de vida do aço, para então poder entender os princípios da economia circular e elaborar suas aplicações.

Dito isso, foi realizado um estudo de quais são os principais impactos além do uso e consumo do aço, exposto a aplicação dos materiais manufaturados em aço nas ferrovias, e demonstrado todo o processo de fabricação do aço. Um processo que fica evidente os danos ambientais.

Além disso, foi contextualizada a ideia da economia circular, de como são ideias disruptivas frente ao modelo de economia linear, de extrair, consumir, e descartar. Foi mostrado as principais atuações e pilares da economia circular, para então, ser possível elaborar propostas de intervenção nas ferrovias.

Em seguida, por meio de entrevistas com gestores, foi demonstrado como uma empresa ferroviária lida com quesitos de manutenção e descarte das sucatas. Nisso, foi possível perceber que essas empresas já atuam no primeiro braço da economia circular: a manutenção. Um dos destaques feitos na manutenção, é a prática de produto-serviço nos componentes de freio e rolamento. A sucata produzida nessa empresa também passa por um processo de comercialização com empresas responsáveis pelo destino correto.

A partir desses casos, foi possível elaborar propostas de intervenção viáveis, baseadas nas ideias de economia circular. No início das aquisições dos materiais, em suprimentos, foram abordadas ideias de logística reversa, compras de produto-serviço, desenvolvimento de fornecedores, e economia compartilhada. Isso demonstrou que a adoção de práticas da

economia circular representa um passo significativo em direção a uma cadeia de suprimentos mais eficiente e sustentável na indústria ferroviária.

Foi falado também sobre a aplicação da economia circular na manutenção de vagões e produtos manufaturados em aço, em que a economia circular não se resume apenas ao braço da manutenção, mas engloba também a reutilização e redistribuição, remanufatura e reciclagem de materiais. Foi abordado propostas nesses outros três braços. Além de abordar propostas de manutenção preventiva, compartilhamento de informações com fornecedores. E também, foi falado sobre o destino final, quando não é possível reintegrar o produto de volta à cadeira, levando ao sucateamento, abordando parcerias estratégicas com siderúrgicas e fabricantes de vagões para fazerem a reentrada desses materiais na cadeia.

Essas são ideias disruptivas para a indústria ferroviária, porém, com estudos aprofundados e planejamentos estratégicos que levem em conta as ideias aqui abordadas, com o ideal de sua real aplicação, mesmo que no longo prazo, esses métodos podem se tornar possíveis e causar as mudanças necessárias para os problemas do aço apresentados no trabalho.

Finalmente, em estudos futuros, ficam como sugestões estudos voltados para engenharia de materiais, substituição do aço carbono para aço inox em vagões GDTs, e meios de economia compartilhada integrados com desenvolvimento de fornecedores. Este trabalho focou apenas na cadeia de suprimentos, manutenção, e o fim para a sucata. Não houve foco em demais áreas. Houve foco também apenas em materiais de aço, não abrangendo demais resíduos. Quanto a possíveis continuidades desse trabalho, um possível estudo seria abordar grandes empresas ferroviárias das outras regiões do Brasil, de forma mais aprofundada.

6. REFERÊNCIAS

ANTF. **Mapa ferroviário**, 2023. Disponível em: https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/. Acesso em: 04/05/2023

ANTF. **Informações gerais**, 2023. Disponível em: https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/. Acesso em: 04/05/2023

ANTT. **Novos Projetos Ferroviários**, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/novos-projetos-ferroviarios. Acesso em: 07/05/2023

BARRETO, R.C.P.; RIBEIRO, A.J.M. Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo. **Logística no Brasil: Uma análise do panorama dos modais rodoviários e ferroviários no cenário nacional demonstrando as vantagens e desvantagens das referidas modalidades**, v. 5, n. 3, p. 145-176, mai-jun, 2020. Disponível em: http://relise.eco.br/index.php/relise/article/view/355. Acesso em: 07/05/2023

BIANCHI, DANIEL BARBOSA. **Análise de descarrilamento de vagões através do coeficiente de Nadal**, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: https://www.eng-materiais.bh.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/189/2019/03/TCC-Vers%C3%A3o-Final_Daniel-Bianchi.pdf. Acesso em: 08/06/2023

BOTSMAN, R; ROGERS, R. **O que é meu é seu**: Como o consumo colaborativo vai mudar o (seu) nosso mundo. São Paulo: Saraiva, 2011. Disponível em: O Que É Meu É Seu: Como o Consumo Colaborativo Vai Mudar o Nosso Mundo - Rachel Botsman, Roo Rogers - Google Livros. Acesso em: 23/11/2023

CAMPOS NETO, C.A.S.; DE PAULA, J.M.P.; POMPERMAYER, F.M.. Hidrovias no Brasil: **Perspectiva histórica custos e institucionalidade**, 2014. Disponível em: https://www.econstor.eu/handle/10419/121587. Acesso em: 15/05/2023

CBFA. **Quais são os 5 principais tipos de vagões de carga utilizados no Brasil?** 202?. Disponível em:

https://cbfa.com.br/quais-sao-os-5-principais-tipos-de-vagoes-de-carga-utilizados-no-brasil/. Acesso em: 15/05/2023

CNT. **Boletins**, 2023. Disponível em: https://www.cnt.org.br/boletins. Acesso em: 07/05/2023

COMEX STAT. **Exportação e Importação Geral**, 2023. Disponível em: http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral. Acesso em: 16/05/2023

CORVELLEC, H.; STOWELL, A.F.; JOHANSSON, N. **Critiques of the circular economy**. Journal of Industrial Ecology, 26:421–432. 2022. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13187. Acesso em: 10/06/2023

DA SILVA, A.A.B.; GO, A.; MOREIRA, R.P. **O desastre ambiental de Brumadinho: por uma nova composição de forças para a defesa ambiental**, v. 123, p. 49-83, dez, 2021. Disponível em: https://pos.direito.ufmg.br/rbep/index.php/rbep/article/view/925. Acesso em: 08/06/2023

DA SILVA, D.T.; ANTUNES, L.D.S.; SILVA, G.B.D. **Estudo da redução de desgaste de friso das rodas dos truques de vagões, com o uso de gabaritos de correção na manutenção preventiva da Ferrovia Tereza Cristina**, 2020. Disponível em: https://www.fucap.edu.br/dashboard/biblioteca_repoisitorio/d7f3264a665675beffe78051ab6a08db.pdf. Acesso em: 08/06/2023

DE FARIA, BRUNA GUIMARÃES; **Abalroamento da fauna silvestre e doméstica nas ferrovias brasileiras e principais medidas de mitigação**, 2018. Disponível em: http://seer.uniacademia.edu.br/index.php/biologica/article/download/2237/1465. Acesso em: 21/05/2023

DE SOUZA, ANA FLÁVIA MORAES. **Modelagem da degradação da superestrutura ferroviária: estudo de caso em um trecho da MRS**, Ouro Branco, 2021. Disponível em: https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ccivi/TCC%20-%20Ana%20Fla%CC%81via%20Moraes.pdf. Acesso em: 08/06/2023

DE SOUZA, DREICO ESLI. Hidrovias e ferrovias: **Políticas de caminhos estratégicos no Paraná**, 2010. Disponível em: https://www.academia.edu/41610780/Hidrovias_e_ferrovias_pol%C3%ADticas_de_caminhos_estrat%C3%A9gicos_no_Paran%C3%A1_Autor_Dreico_Esli_de_Souza. Acesso em: 16/05/2023

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **What is a circular economy?** [2018?]. Disponível em: https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview. Acesso em: 09/06/2023

EVARISTO, LUCAS. Brasil Ferroviário. **Locomotivas**, [2018?]. Disponível em: https://www.brasilferroviario.com.br/locomotivas/. Acesso em: 15/05/2023

EVARISTO, LUCAS. Brasil Ferroviário. **Partes do Vagão**, [201?]. Disponível em: https://www.brasilferroviario.com.br/partes-dos-vagoes/. Acesso em: 08/06/2023

FALCÃO, VIVIANE ADRIANO. **A Importância do Transporte Ferroviário de Carga para a Economia Brasileira e suas Reais Perspectivas de Crescimento**, 2013. Disponível em: http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n45/Pag.51-63.pdf. Acesso em: 12/06/2023

FARIAS, A.R.; CASTRO, B.T.P.; FERREIRA, W.S. **Impactos Ambientais Ocasionados Pelos Processos Produtivos do Minério de Ferro**, v. 8, n.1, E20-E33, 2019. Disponível em: https://scientia-amazonia.org/wp-content/uploads/2018/12/v.-8-n.1-E20-E33-2019.pdf. Acesso em: 08/06/2023

GBMX. **Vagão Gôndola GDT**, 2023. Disponível em: https://gbmx.com.br/negocios/vagao-gondola-gdt-mrs/. Acesso em: 08/06/2023

GBMX. **Vagão Gôndola GDU**, 2023. Disponível em: https://gbmx.com.br/negocios/vagao-gondola-gdu/. Acesso em: 15/05/2023

GBMX. **Vagão Hopper HNT**, 2023. Disponível em: https://gbmx.com.br/negocios/vagao-hopper-hnt/. Acesso em: 15/05/2023

GBMX. **Vagão Plataforma PCE**, 2023. Disponível em: https://gbmx.com.br/negocios/vagao-plataforma-pce/. Acesso em: 15/05/2023

GODOY, LINCOLN MARTINS. **Estudo comparativo dos métodos de avaliação do impacto ambiental causado pela produção de aço**, 2014. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/28233. Acesso em: 08/06/2023

GONÇALVES, M. N.; TINOCO, M. S. **A ferrovia e os corpos hídricos: Os potenciais impactos socioambientais no caso da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) no estado da Bahia, Brasil**. Revista Eletrônica Casa de Makunaima, v. 4, n. 1, p. 87–94, 2022. Disponível em: https://periodicos.uerr.edu.br/index.php/casa_de_makunaima/article/view/1097. Acesso em: 22/05/2023

IDEIA CIRCULAR. **O que é Economia Circular?** [2018?]. Disponível em: https://ideiacircular.com/economia-circular/. Acesso em: 09/06/2023

LACERDA, LEONARDO. **Logística Reversa: Uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais**, 2002. Disponível em: http://www.paulorodrigues.pro.br/arquivos/Logistica_Reversa_LGC.pdf. Acesso em: 25/11/2023

LACERDA, SANDER MAGALHÃES. **Ferrovias sul-americanas: a integração possível**, Rio de Janeiro , v. 16, n. 31, p. 185-214, jun, 2009. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/10014. Acesso em: 06/05/2023

LEITÃO, ALEXANDRA. **Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI.** Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting. ISSN 2183-3826. v. 1, n. 2, p. 149-171, 2015. Disponível em: https://repositorio.ucp.pt/handle/10400.14/21110. Acesso em: 10/06/2023

LEMOS, M.; ALBERNAZ, C.; CARVALHO, R. **Qualidade na manutenção**. XXXI encontro nacional de Engenharia de Produção, out, 2011.

LIUBARTAS, D.; E SILVA, E.A.S.B.; DOS SANTOS, E.A.M.; DA SILVA, J.E.; FORMIGONI, A. **A sustentabilidade do aço e das estruturas metálicas**. Journal of Engineering and Technology Innovation, São Paulo, v.3, n.1, p.92-110, abr., 2015. Disponível em: http://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/inovae/article/view/382. Acesso em: 08/06/2023

LOGWEB. **Desguarnecedora total de lastro da MRS chega ao Brasil**, 2022. Disponível em: https://www.logweb.com.br/desguarnecedora-total-de-lastro-da-mrs-chega-ao-brasil/. Acesso em: 02/11/2023

MACARTHUR, ELLEN. **Towards the circular economy**. Journal of Industrial Ecology, v.2, n.1, p.23-44, 2013. Disponível em: https://www.werktrends.nl/app/uploads/2015/06/Rapport_McKinsey-Towards_A_Circular_Economy.pdf. Acesso em: 09/06/2023

MACÊDO, FERNANDA BITTENCOURT. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários**, Juiz de Fora, 2009. Disponível em: https://www2.ufjf.br/ep//files/2009/08/tcc_jul2009_fernandamacedo.pdf. Acesso em: 08/06/2023

MARQUES, DIMAS. *In:* FAUNA NEWS. **Ferrovias: impacto dos atropelamentos de animais ainda é desconhecido no Brasil**, ago, 2022. Disponível em: https://faunanews.com.br/2022/08/23/ferrovias-impacto-dos-atropelamentos-de-animais-ainda-e-desconhecido-no-brasil/. Acesso em: 21/05/2023

MERKISZ-GURANOWSKA, A.; MERKISZ, J.; JACYNA, M.; PYZA, D.; STAWECKA, H. **Rail vehicles recycling**, 2014. Disponível em: https://web.archive.org/web/20170817051231id_/https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/CR14/CR14035FU1.pdf. Acesso em: 09/06/2023

MILANEZ, B.; PORTO, M.F.D.S. **Gestão ambiental e siderurgia: limites e desafios no contexto da globalização**, v.3, nº.1, p.4-21, abr, 2009. Disponível em: https://rgsa.emnuvens.com.br/rgsa/article/view/113/54. Acesso em: 08/06/2023

MILANEZ, BRUNO. *In:* BOLETIM REGIONAL, URBANO E AMBIENTAL. **Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação**, p. 93-101, jan-jun, 2017. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7936. Acesso em: 08/06/2023

MOREIRA, PEDRO FRANCISCO. *In:* REVISTA FERROVIÁRIA. **Ferrovias, caminho para a multimodalidade**, out, 2019. Disponível em: https://revistaferroviaria.com.br/2019/10/ferrovias-caminho-para-a-multimodalidade/. Acesso em: 07/05/2023

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA. **Mapa ferroviário**, 2020. Disponível em: https://ontl.epl.gov.br/wp-content/uploads/2020/09/mapaferroviario.pdf. Acesso em: 16/05/2023

OLIVEIRA, BEBIANA TERRA DASOLER. **Fatalidades de mamíferos em ferrovias : como estimar quantos morrem e planejar mitigação?** 2020. Disponível em: https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/221517. Acesso em: 20/06/2023

SCHAEFFLER BRASIL. **Rolamentos de caixa de eixo para vagões de mercadorias**. 2018. Disponível em: https://www.schaeffler.com.br/pt/products-and-solutions/industrial/solucoes_industria/ferroviario/rolamentos-axlebox-de-eixos-para-vagoes/. Acesso em: 14/10/2023

SCHWANKE, RUI GUSTAVO LIPPERT. **Ferro fundido nodular como alternativa para o aço fundido ARR M-201, utilizado em truques ferroviários de carga**. Caxias do Sul, 2013. Disponível em: https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/1863. Acesso em: 08/06/2023

SILVA, P. B.; RIBEIRO, R. L.; VIEIRA, F. A.; BRASIL, A. C. de M.; RIBEIRO, R. P. **Potencial de redução de emissão de CO2 pelo uso de transporte ferroviário: um estudo de caso no Brasil**. Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 1–17, 2020. Disponível em: https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/26701. Acesso em: 18/05/2023

SILVEIRA, LUARA MAYER. **Desenvolvimento e integração ferroviários no Cone Sul e a atuação da Associação Latinoamericana de Ferrovias**, Florianópolis, 2016. Disponível em: https://www.funag.gov.br/ipri/btd/index.php/10-dissertacoes/4060-desenvolvimento-e-integracao-ferroviarios-no-cone-sul-e-a-atuacao-da-associacao-latinoamericana-de-ferrovias. Acesso em: 06/05/2023

SILVEIRA, MÁRCIO ROGÉRIO. **A importância geoeconômica das estradas de ferro no Brasil**, 2003. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/handle/11449/101439. Acesso em: 12/06/2023.

SOUZA, R.A.; PRATES, H.F. **O Processo de Desestatização da RFFSA**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 8, p. 119-142, dez. 1997. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/13817/2/RB%2008%20O%20processo%20de%20desestatiza%C3%A7%C3%A3o%20da%20RFFSA%20%5B...%5D_P_BD.pdf. Acesso em: 05/05/2023

SUNDIN, ERIK. **Product and Process Design for Successful Remanufacturing**, 2004. Disponível em: https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A20932&dswid=5241. Acesso em: 25/11/2023

UNEP. **Design for Sustainability: A Step-by-Step Approach**, 2009. Disponível em: https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8742?authuser=0. Acesso em: 26/11/2023

UOL. **Marco das ferrovias: O que muda com permissão para ferrovia privada**, 2021. Disponível em: https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2021/12/14/nova-regra-das-ferrovias-deve-ampliar-investimentos-no-setor-em-126.htm. Acesso em: 06/05/2023

ANEXO A - LISTA DE PERGUNTAS DA SOBRE MANUTENÇÃO

1) Os componentes são utilizados até o fim de sua vida útil ou há um ponto de desgaste prévio que é interrompido o uso do material?
2) O que é feito quando não é possível fazer manutenção em um componente? Como é feito o sucateamento?
3) O que é feito com esses materiais sucateados?
4) Os materiais que são usados na manutenção, de alguma forma, foram fabricados com aço reciclado?
5) De modo geral, é feita manutenção corretiva ou preditiva?
6) Em que nível impacta o uso do mesmo componente quando é fabricado por diferentes fornecedores?
7) Existe muita variação de eficiência e durabilidade entre componentes de diferentes fornecedores? Como poderia ser medida essa diferença para facilitar a compra de determinado produto mais caro, mas mais durável?
8) Existe algum produto-serviço na manutenção, de modo que o fornecedor preste o serviço no produto que ele forneceu?
    a) Se sim, mais eficiente comparado aos demais casos?

Perguntas sobre manutenção própria ou terceirizada:

9) Considerando a manutenção, quais atividades são feitas por funcionários da sua empresa, quais dependem de funcionários terceirizados e quais são enviados para manutenção externa?
10) Quais critérios são adotados nessa decisão?
11) Quanto a manutenção é convidada a participar nos processos de compras para ajudar na escolha de fornecedores de componentes ou serviços?

12) Há alguma coisa que não foi perguntada, mas sobre a qual você gostaria de comentar?

ANEXO B - LISTA DE PERGUNTAS DA SOBRE SUCATA

1) Quais tipos de sucata produzida pela sua empresa?
2) Quais os destinos dados a essas sucatas na sua empresa?
3) Há políticas de estímulo à reciclagem dessa sucata?
4) Para quem é vendida a sucata?
5) Quais os critérios de escolha dos compradores?
6) Há venda de sucata para os fornecedores de vagões da sua empresa? E no caso de fornecedores de outros materiais?
    a) Se não, por qual motivo não há essa venda?
    b) Se sim, há informação se a sucata reciclada integra algum vagão novamente?
7) De toda sucata produzida, quantos % são vendidos?
8) Os compradores dessa sucata compram ela com qual finalidade? São para reciclagem e depois para revenda?
9) A sua empresa tem siderúrgicas como seus acionistas. Como eles participam do processo de gestão da sucata?
10) Há alguma coisa que não foi perguntada, mas sobre a qual você gostaria de comentar?

ANEXO C - TERMO DE AUTENTICIDADE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.
Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.
Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral[1] e criminais previstas no Código Penal[2], além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 13 de dezembro de 2023.

Igor Daniel Medeiros de Lima — NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)

201849059 — Matrícula

Igor Medeiros — ASSINATURA

783.577.257-92 — CPF

[1] LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.
[2] Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena - detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.