

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**Katrine Stefânia Couto**

**Investigação ambiental e financeira do uso de agregado  
siderúrgico como lastro em pavimentos ferroviários**

Juiz de Fora  
2025

**ufjf**

**Katrine Stefânia Couto**

**Investigação ambiental e financeira do uso de agregado siderúrgico como lastro em pavimentos ferroviários**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil. Área de concentração: Estrutura e Materiais.

Aprovada em 11 de agosto de 2025

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Júlia Castro Mendes

Coorientador: Prof. D.Sc. Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Juiz de Fora

2025

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

Couto, Katrine Stefânia.

Investigação ambiental e financeira do uso de agregado siderúrgico como lastro em pavimentos ferroviários / Katrine Stefânia Couto. -- 2025.

133 p. : il.

Orientador: Júlia Castro Mendes

Coorientador: Geraldo Luciano de Oliveira Marques

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Agregado siderúrgico. 3. Lastro ferroviário. 4. Escória de aciaria. 5. Economia circular. I. Mendes, Júlia Castro, orient. II. Marques, Geraldo Luciano de Oliveira, coorient. III. Título.

## Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Katrine Stefânia Couto

Título: **Investigação ambiental e financeira do uso de agregado siderúrgico como lastro em pavimentos ferroviários**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e materiais.

Aprovada em 11/08/2025.

## BANCA EXAMINADORA

Prof(a) Dr(a) Júlia Castro Mendes - Orientador(a) e Presidente da Banca  
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Prof(a) Dr(a)Geraldo Luciano de Oliveira Marques - Coorientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)

Prof(a) Dr(a)Guilherme José Cunha Gomes - Membro Titular Externo  
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Prof(a) Dr(a) Ronderson Queiroz Hilário - Membro Titular Externo  
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Prof(a) Dr(a) Gilberto Fernandes - Membro Titular Externo  
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

Juiz de Fora, 11/08/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Júlia Castro Mendes, Professor(a)**, em 12/08/2025, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronderson Queiroz Hilário, Usuário Externo**, em 13/08/2025, às 14:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Luciano de Oliveira Marques, Professor(a)**, em 14/08/2025, às 15:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme José Cunha Gomes, Usuário Externo**, em 22/08/2025, às 14:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Fernandes, Usuário Externo**, em 25/08/2025, às 11:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf ([www2.ufjf.br/SEI](http://www2.ufjf.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2527965** e o código CRC **839C72F5**.

*“Devíamos admitir a natureza como uma imensa multidão de formas, incluindo cada pedaço de nós, que somos parte de tudo: 70% de água e um monte de outros materiais que nos compõem. E nós criamos essa abstração de unidade, o homem como medida das coisas, e saímos por aí atropelando tudo, num convencimento geral até que todos aceitem que existe uma humanidade com a qual se identificam, agindo no mundo à nossa disposição, pegando o que a gente quiser” (Krenak, 2020, p. 69).*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar força e me guiar no caminho da resiliência diante dos desafios desta jornada repleta de obstáculos. E por me conceder oportunidades tão grandiosas como esta.

Aos professores que marcaram minha trajetória, compartilhando conhecimento e abrindo portas para novas possibilidades. Em especial, à minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Júlia Mendes, por todo suporte acadêmico, ensinamentos e confiança depositada em mim na realização desta pesquisa, e ao meu coorientador, Prof. Geraldo Marques, pela parceria e por agregar conhecimentos valiosos a este trabalho.

À minha mãe, Rosemeire, meu maior exemplo de força e coragem. Cada ensinamento seu está gravado em mim, moldando quem eu sou e quem ainda quero ser. Ao meu pai, Rogério (*in memoriam*), pelo apoio incondicional e pelos ensinamentos que continuam a me guiar. Vencemos juntos!

Aos meus irmãos, Heidelberg, Wendel e Wallace, e à minha irmã, Katriane, por acreditarem em mim. Suas palavras de orgulho sempre me deram força para seguir em frente. Essa conquista também carrega um pedacinho de vocês.

Aos amigos de Juiz de Fora, que trilharam esse caminho ao meu lado e tornaram cada etapa mais leve e especial. A amizade de vocês foi um presente que levarei comigo para sempre.

À Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), pelo apoio essencial no fornecimento de informações para a realização desta pesquisa, e à MRS Logística, pelo apoio também financeiro.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFJF e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), cujo suporte financeiro tornou possível o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao projeto de extensão Adapt da UFJF, coordenado pela Prof<sup>a</sup>. Flávia Bastos, à pesquisadora Laura e ao laboratório LabMaker (UFJF) pelas análises realizadas.

Ao Prof. Guimarães e ao Engenheiro João Kohler pelas fotos fornecidas.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, meu profundo agradecimento.

## RESUMO

O agregado siderúrgico, subproduto gerado em larga escala na produção do aço, é frequentemente armazenado em pátios à céu aberto, causando impactos ambientais e riscos à saúde humana. Paralelamente, o setor ferroviário consome milhares de toneladas de rochas naturais britadas para uso como lastro, cuja extração também acarreta impactos socioambientais. Diante da preocupação global com as mudanças climáticas e a escassez de recursos, o reaproveitamento da escória siderúrgica beneficiada como lastro ferroviário é uma alternativa promissora para a economia circular. Esta pesquisa propõe avaliar a viabilidade ambiental e financeira dessa substituição em comparação ao lastro de rocha natural britada. Para isso, utilizou-se a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), aplicada a um estudo de caso, envolvendo uma concessionária ferroviária e uma siderúrgica localizadas na região Sudeste do Brasil. A ACV adotou delimitação do sistema do “berço ao túmulo”, ou seja, a avaliação é feita desde a extração de recursos até o fim da vida útil. A categoria de impacto analisada é o potencial de aquecimento global, medido em emissões de kgCO<sub>2</sub> equivalente, considerando como unidade funcional 1 km de ferrovia. Também são analisados os custos do ciclo de vida, a fim de ampliar o escopo da análise. Os resultados indicam que o lastro siderúrgico apresenta um potencial de aquecimento global de  $-2,45E+05$  kgCO<sub>2</sub>eq (ou seja, ele captura carbono), frente a  $1,30E+04$  kgCO<sub>2</sub>eq do lastro tradicional, mostrando-se ambientalmente mais vantajoso. No levantamento financeiro preliminar, o custo do ciclo de vida para 1 km de ferrovia com lastro siderúrgico é 31,9% inferior ao do lastro tradicional, evidenciando também sua viabilidade econômica. Portanto, os resultados desta pesquisa demonstram que a abordagem comparativa adotada cumpriu o propósito do estudo, confirmando o potencial do agregado siderúrgico como solução sustentável, tanto do ponto de vista ambiental quanto financeiro, para a infraestrutura ferroviária.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida; Agregado siderúrgico; Lastro ferroviário; Escória de aciaria; Economia circular; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Steel slag aggregate, a byproduct generated on a large-scale during steel production, is often stored in open yards, leading to environmental impacts and posing risks to human health. At the same time, the railway sector consumes thousands of tons of crushed natural rock as track ballast, the extraction of which also results in socio-environmental impacts. Given global concerns about climate change and resource scarcity, the reuse of processed steel slag as railway ballast emerges as a promising alternative within the circular economy framework. This research aims to assess the environmental and financial feasibility of replacing traditional crushed rock ballast with steel slag. To achieve this, a Life Cycle Assessment (LCA) methodology was applied to a case study involving a railway operator and a steel plant located in the Southeast region of Brazil. The LCA followed a “cradle-to-grave” system boundary, meaning that the analysis includes all stages from resource extraction to end of life. The impact category considered was global warming potential (GWP), measured in emissions of kgCO<sub>2</sub> equivalent, considering 1 km of railway as the functional unit. Additionally, were analyzed life cycle costs and the perceptions of railway sector professionals, collected through interviews. The results indicate that steel slag ballast has a global warming potential of  $-2.45E+05$  kgCO<sub>2</sub>eq (i.e., it captures carbon), compared to  $1.30E+04$  kgCO<sub>2</sub>eq for traditional ballast, highlighting its superior environmental performance. In the preliminary financial assessment, the life cycle cost for 1 km of railway using steel slag ballast was found to be 31.9% lower than that of traditional ballast, also demonstrating its economic viability. Therefore, the results of this study demonstrate that the comparative approach fulfilled its purpose, confirming the potential of steel slag aggregate as a sustainable solution for railway infrastructure, both environmentally and financially.

Keywords: Life Cycle Assessment; Steel aggregate; Railway ballast; Steel slag; Circular economy; Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Agregado siderúrgico como lastro ferroviário, aplicado em um pátio industrial de uma siderúrgica brasileira .....	18
Figura 2 – Esquema da estrutura ferroviária .....	22
Figura 3 – Propriedades da brita natural como lastro ferroviário .....	23
Figura 4 – Desguarnecedora de lastro ferroviário .....	28
Figura 5 – Malha ferroviária e siderúrgicas do Brasil.....	30
Figura 6 – Geração de coprodutos e resíduos em 2022.....	31
Figura 7 – Escória de aciaria do processo BOF .....	32
Figura 8 – Etapas da produção do aço .....	33
Figura 9 – Destino das escórias siderúrgicas de alto-forno e de aciaria.....	35
Figura 10 – Pilha de escória siderúrgica no pátio de estocagem.....	36
Figura 11 – Morfologia do lastro de agregado siderúrgico.....	40
Figura 12 – Amostras de escória obtidas por MEV antes e depois da carbonatação.....	41
Figura 13 – Blocos para pavimentos: (a) com escória bruta; (b) com escória beneficiada .....	42
Figura 14 – Presença de finos na camada de lastro siderúrgico .....	44
Figura 15 – (a) Esquema de carbonatação a seco; (b) Esquema de carbonatação aquosa.....	47
Figura 16 – (a) Sistema de aquisição de dados de campo; (b) Simulador das seções de teste; (c) Esquema da caixa-teste para avaliação dos efeitos de cura .....	49
Figura 17 – Efeitos de expansão e fragmentação da escória .....	50
Figura 18 – Fluxograma: metodologia adotada .....	62
Figura 19 – Limites do sistema para o lastro siderúrgico e tradicional.....	66
Figura 20 – Amostra de escória no scanner NextEngine.....	69
Figura 21 – Modelos 3D das amostras visualizados no MeshLab .....	69
Figura 22 – Formação gasosa de CO <sub>2</sub> no agregado siderúrgico após aspersão com ácido fosfórico.....	70
Figura 23 – Sistema do ciclo de vida do lastro ferroviário tradicional e siderúrgico, com destaque para os fluxos que foram analisados no presente trabalho. ....	82

Figura 24 – Etapas do ciclo de vida da ferrovia considerando: (I) a produção de lastro siderúrgico, (II) a produção de lastro tradicional e (III) a partir do pátio da concessionária ferroviária .....	83
Figura 25 – Localização e trajetos ferroviários mapeados no Google Earth: do pátio da siderúrgica aos pátios de descarregamento de agregados da concessionária ferroviária.....	89
Figura 26 – Localização e trajetos rodoviários mapeados no Google Earth: das pedreiras aos pátios de descarregamento da concessionária ferroviária .....	95
Figura 27 – Análise de contribuição das substâncias da ferrovia com lastro siderúrgico para o aquecimento global .....	99
Figura 28 – Análise de contribuição das substâncias da ferrovia com lastro tradicional para o aquecimento global .....	101
Figura 29 – Comparação do potencial de aquecimento global entre o lastro siderúrgico e o lastro tradicional por etapa do ciclo de vida.....	102
Figura 30 – Avaliação de sensibilidade no transporte do lastro siderúrgico.....	106
Figura 31 – Siderúrgicas e malha ferroviária brasileira, com um raio de 1.400 km estimado na análise de sensibilidade .....	107
Figura 32 – Análise de sensibilidade do potencial de aquecimento global do lastro siderúrgico em função da variação na captura de CO <sub>2</sub> , considerando diferentes cenários de CaO e MgO .....	108
Figura 33 – Impacto financeiro por etapa do ciclo de vida da ferrovia (1 km) .....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do lastro padrão – NBR 5564 .....	24
Tabela 2 – Distribuição granulométrica do lastro preconizada pela NBR 5564 .....	25
Tabela 3 – Valores limites para material de lastro ferroviário para a AREMA.....	26
Tabela 4 – Produção mundial de aço bruto.....	31
Tabela 5 – Composição química das escórias de aciaria LD ou BOF .....	38
Tabela 6 – Fatores que influenciam a expansão da escória de aciaria .....	43
Tabela 7 – Principais resultados dos lastros siderúrgicos .....	55
Tabela 8 – Consumo de lastros ferroviários relativos à UF durante a vida útil da ferrovia .....	65
Tabela 9 – Valores estimados de captura de CO <sub>2</sub> por tonelada de agregado siderúrgico para cada amostra .....	72
Tabela 10 – Categoria de impacto ambiental, poluentes emitidos durante o ciclo de vida e fatores de caracterização.....	74
Tabela 11 – Emissão de gases associadas ao consumo de diesel em kg de substância/MJ de diesel.....	74
Tabela 12 – Fatores anuais de emissão de CO <sub>2</sub> por ano para energia elétrica brasileira .....	75
Tabela 13 – Aspectos financeiros considerados no CCV da ferrovia .....	79
Tabela 14 – Proporções médias de produção de agregado siderúrgico durante o beneficiamento na siderúrgica estudada em 2024. ....	85
Tabela 15 – Informações de entrada das etapas de beneficiamento do lastro siderúrgico .....	86
Tabela 16 – Capacidade de produção de agregado siderúrgico para lastro.....	87
Tabela 17 – Distâncias entre o pátio de armazenamento da siderúrgica e os pátios de descarregamento da concessionária ferroviária .....	90
Tabela 18 – Informações de entrada da etapa de transporte do lastro siderúrgico até o pátio da concessionária ferroviária .....	90
Tabela 19 – Informações de entrada das etapas de instalação e renovação do lastro ferroviário.....	92
Tabela 20 – Informações de entrada da etapa de processamento do lastro tradicional .....	94

Tabela 21 – Distâncias entre as pedreiras e os pátios de descarregamento da concessionária ferroviária .....	96
Tabela 22 – Informações de entrada da etapa de transporte do lastro de brita natural até a concessionária ferroviária .....	96
Tabela 23 – Resultados de caracterização por etapa do ciclo de vida da ferrovia com lastro siderúrgico.....	98
Tabela 24 – Resultados de caracterização por etapa do ciclo de vida da ferrovia com lastro de brita natural .....	100
Tabela 25 – Custos de transporte dos agregados para lastro para uma unidade funcional (1 km) .....	111
Tabela 26 – Custos de instalação e renovação dos lastros para uma unidade funcional (1 km).....	111
Tabela 27 – Equipamentos e veículos usados no processo de beneficiamento do agregado siderúrgico .....	131
Tabela 28 – Maquinários utilizados na instalação do lastro ferroviário .....	132
Tabela 29 – Equipamentos considerados no processamento da brita natural .....	133

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AREA	American Railway Engineering Association
AREMA	American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
BOF	Blast oxygen furnace
CCV	Custo do ciclo de vida
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAF	Electric arc furnace
EPA	Environmental Protection Agency
GEE	Gases de efeito estufa
GWP	Global Warming Potential
IAB	Instituto Aço Brasil
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPP	Índice de Preços ao Produtor
ISO	Organização Internacional de Normalização
LD	Linz-Donawitz
MEF	Método dos Elementos Finitos
MJ	Megajoule
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SINAPI	Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil
STPT	Single Tie Push Test
UF	Unidade Funcional
VPL	Valor Presente Líquido

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_4AF$	Aluminoferrita tetracálcica
$NH_3$	Amônia
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
$CO_2$	Dióxido de carbono
$N_2O$	Dióxido de nitrogênio
$SiO_2$	Dióxido de silício
eq	Equivalente
$C_2F$	Ferrita dicálcica
kPa	Kilopascal
$\mu$	Massa específica
$n_{CO_2}$	Massa molar do $CO_2$
$n_{CaO}$	Massa molar do CaO
$n_{MgO}$	Massa molar do MgO
MWh	Megawatt-hora
$CH_4$	Metano
$\mu S$	Microsiemens
CO	Monóxido de carbono
$\Omega$	Ohm
$CaO_{livre}$	Óxido de cálcio livre
FeO	Óxido de ferro
MgO	Óxido de magnésio
R	Resistência elétrica
$\rho$	Resistividade
S	Siemens
$C_3S$	Silicato tricálcico
$C_2S$	Silicato dicálcico

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
1.1	Objetivo .....	21
1.2	Objetivos Específicos.....	21
2	Revisão Bibliográfica .....	22
2.1	Lastros de Ferrovias .....	22
2.1.1	Propriedades e especificações técnicas .....	22
2.1.2	Manutenção e recuperação do lastro ferroviário .....	27
2.1.3	Impactos da extração da brita e potencial do lastro siderúrgico .....	29
2.2	Fabricação do Aço, Geração de Escórias e seu Armazenamento .....	30
2.3	Características do Agregado Siderúrgico .....	36
2.3.1	Características químicas, mineralógicas e morfológicas .....	36
2.3.2	Carbonatação do agregado siderúrgico .....	40
2.4	Desafios Associados ao Uso do Agregado Siderúrgico .....	42
2.5	Estado da Arte: Uso do Agregado Siderúrgico como Lastro Ferroviário.....	48
2.6	Análise do Ciclo de Vida e suas Aplicações na Indústria Ferroviária e Siderúrgica .....	57
2.6.1	Principais definições .....	57
2.6.2	Aplicação de ACV a sistemas ferroviários.....	59
2.6.3	Aplicação da ACV ao agregado siderúrgico .....	60
3	Metodologia .....	62
3.1	ACV - Definição de Objetivo e Escopo.....	63
3.1.1	Objetivo da ACV .....	63
3.1.2	Unidade funcional .....	63

3.1.3	Limites do sistema .....	65
3.2	ACV - Inventário do Ciclo de Vida .....	67
3.2.1	Fontes dos dados .....	67
3.2.2	Captura de CO <sub>2</sub> .....	68
3.3	ACV - Método para Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida .....	73
3.4	ACV - Interpretação .....	76
3.5	Levantamento de indicadores financeiros .....	76
4	Resultados.....	81
4.1	Inventário do Ciclo de Vida .....	83
4.1.1	Ferrovia com lastro siderúrgico .....	84
4.1.2	Ferrovia com lastro tradicional .....	93
4.2	Avaliação de impacto do ciclo de vida: quantificação do potencial de aquecimento global.....	97
4.2.1	Contribuição do lastro siderúrgico para o potencial de aquecimento global .....	98
4.2.2	Contribuição do lastro tradicional para o potencial de aquecimento global .....	100
4.2.3	Desempenho ambiental do lastro siderúrgico <i>versus</i> lastro tradicional .....	102
4.3	Interpretação.....	105
4.3.1	Verificação de completeza e de sensibilidade.....	105
4.3.2	Verificação de consistência.....	109
4.4	Levantamento Financeiro.....	110
4.5	Avanços Recentes e Perspectivas Futuras .....	114
5	CONCLUSÃO .....	117

5.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	119
	Referências.....	120
	APÊNDICE A - Dados dos equipamentos e veículos utilizados no beneficiamento do agregado siderúrgico .....	131
	APÊNDICE B - Dados dos maquinários utilizados na instalação do lastro .....	132
	APÊNDICE C - Dados dos equipamentos utilizados no processamento do lastro de brita natural .....	133

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a segunda metade do século passado, a concepção de crescimento sustentável tem tido um papel importante nas interações entre sociedade, economia e recursos naturais. A busca pelo equilíbrio entre esses pilares dá-se em razão da preocupação global com as mudanças climáticas e escassez de recursos, além da progressiva conscientização social que, aliada a medidas regulamentares mais rigorosas, impõem às indústrias a obrigação de encontrar soluções sustentáveis para seus fluxos de produção. Uma forma de alcançar esse objetivo é por meio da economia circular. Esse conceito compreende a reintrodução de subprodutos como matéria-prima na produção de novos materiais, evitando desperdícios, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa e diminuindo a extração de recursos naturais (Li, Ling e Pan, 2022).

Práticas que se alinham ao modelo de economia circular são capazes de proporcionar às indústrias a desejada redução e controle de resíduos. Como exemplo, as siderúrgicas são responsáveis pela geração de milhões de toneladas de resíduos sólidos nos processos de produção de aço e ferro, que variam desde grandes pedras a poeira (Qasrawi, 2014). Comprometidas com os princípios da economia circular, as siderúrgicas têm investido na reciclagem de seus subprodutos, reintroduzindo-os em seu próprio sistema produtivo ou em outros setores, como na construção civil, na produção de misturas asfálticas e até mesmo como fertilizantes (Carvalho, Mesquita e Araújo, 2015; IAB, 2020; IAB, 2023; Motz e Geiseler, 2001).

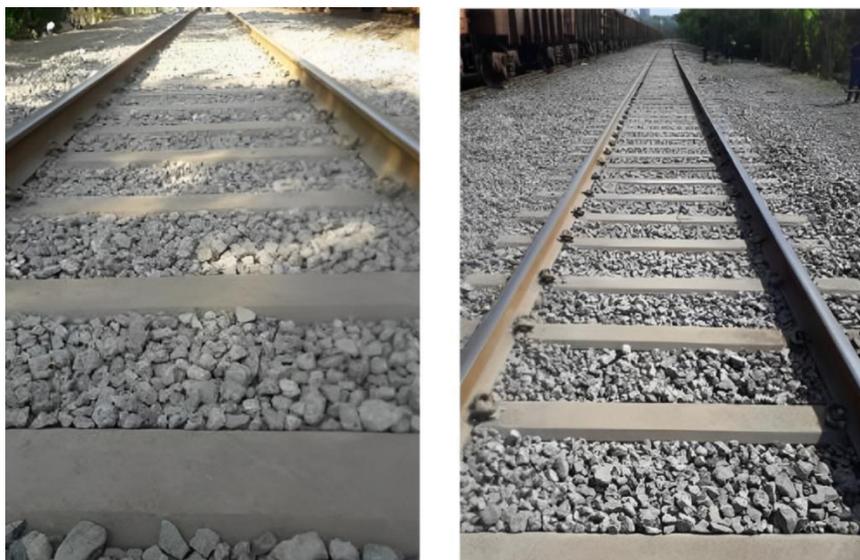
De acordo com o Instituto Aço Brasil (IAB, 2023), a produção do aço bruto chega a gerar 18 milhões de toneladas de resíduos anualmente. Entre os tipos de resíduos gerados, as escórias de alto-forno e de aciaria representam 62% desse montante (IAB, 2023). Embora as escórias de alto-forno tenham um processo de reciclagem bem estabelecido pela indústria do cimento, as escórias de aciaria têm utilização limitada devido ao seu potencial expansivo (Qi, Liu e Liu, 2016). Por isso, a fração não doada (geralmente para pavimentação pública) é comumente armazenada em pátios ou aterros a céu aberto (Tavares, 2012; Beshears e Tutumluer, 2013). Esse acúmulo de pilhas de escória domina uma vasta extensão territorial, modificando a paisagem, provocando poluição visual e impactos ambientais negativos, como a poluição da água e do solo (Qi, Liu e Liu, 2016; Guo, Bao e Wang, 2018). Além disso,

o armazenamento de escória dispersa material particulado proveniente das pilhas, poluindo o ar e podendo causar problemas respiratórios à população residente próxima ao local de estocagem (Guo, Bao e Wang, 2018).

Nesse contexto, há grandes incentivos para a reciclagem da escória de aciaria como agregado siderúrgico, possibilitando seu uso como agregado alternativo. O beneficiamento geralmente inclui os processos de britagem, separação magnética e estabilização química através do tratamento de cura (Song *et al.*, 2021; Hussain e Hussaini, 2022).

Nos últimos anos, os estudos concentraram-se na utilização desse coproduto em misturas asfálticas (Beshears e Tutumluer, 2013; Tavares, 2012), agregado graúdo em estruturas de concreto (Qasrawi, 2014; Li *et al.*, 2024) e como matéria-prima para clínquer na fabricação de cimento (Arrivabene *et al.*, 2012). O agregado siderúrgico também tem mostrado resultados promissores como lastro em pavimentos ferroviários (Hussain e Hussaini, 2022; Fernandes, Cosme e Fernandes, 2020; Chamling, Haldar e Patra, 2020; Koh *et al.*, 2018; Delgado *et al.*, 2021), aqui nomeado como lastro siderúrgico (Figura 1). De modo geral, a utilização do agregado siderúrgico pode ajudar a diminuir os custos e impactos do descarte da escória e reduzir o consumo de agregados naturais cada vez mais escassos (Yildirim e Prezzi, 2015).

Figura 1 – Agregado siderúrgico como lastro ferroviário, aplicado em um pátio industrial de uma siderúrgica brasileira



Fonte: Arquivo particular do Eng. João Kohler (2025).

Os lastros ferroviários são utilizados como base dos dormentes de uma ferrovia, sendo responsáveis por suportar cargas e manter sua estabilidade. Tradicionalmente, eles são originados de rochas naturais como o basalto, granito, quartzito, gnaiss e rochas calcárias extraídas de pedreiras. As rochas são escolhidas de diferentes maneiras dependendo da localidade, da disponibilidade e qualidade, das exigências ambientais e das questões econômicas (Indraratna e Salim, 2005).

Segundo a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2024), o Brasil possui uma extensa malha ferroviária com cerca de 32 mil quilômetros. Essa infraestrutura é responsável pelo transporte eficiente de mercadorias entre grandes cidades, portos e indústrias minerais e agrícolas, podendo também transportar passageiros em redes urbanas movimentadas (Rak *et al.*, 2022). Assumindo um valor nocional de 2m<sup>3</sup> de lastro por metro de ferrovia, cada quilômetro da via requer aproximadamente entre 3 e 3,4 mil toneladas de lastro de rocha britada. Adicionalmente, ao longo da vida útil da linha, esse lastro é parcialmente substituído em ciclos de 2 a 10 anos durante as operações de manutenção (Celauro, Cardella e Guerrieri, 2023; Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020). Com esse elevado consumo de brita, impasses se apresentam à medida que a extração das rochas naturais aumenta e sua disponibilidade se torna escassa.

A exploração de maciços rochosos por meio do uso de explosivos acarreta impactos ambientais inevitáveis, além de gerar desconforto para as populações vizinhas (Ferreira, Daitx e Neto, 2006). Os principais efeitos compreendem a vibração do terreno, a emissão de poeira, poluição sonora, assoreamento de áreas adjacentes à atividade mineradora, alteração de paisagens e escasseamento de jazidas (Ferreira, Daitx e Neto, 2006). Além disso, com o esgotamento das jazidas próximas aos centros urbanos, há a necessidade de se percorrer longas distâncias para obter o material, provocando o aumento de custos e impactos ambientais com movimentação e transporte.

Logo, a introdução de um novo material reciclado, como o lastro siderúrgico, que apresenta características mecânicas semelhantes ou até melhores que o agregado natural, pode ser uma alternativa viável para o desenvolvimento sustentável de ambas as indústrias (Motz e Geiseler, 2001). Através de ensaios físicos, químicos, mecânicos, ambientais e de expansão, alguns autores verificaram que o agregado siderúrgico tem potencial para uso como lastro, desde que passe por algum tratamento, seja na fase

líquida ou sólida, para estabilização dos óxidos reativos que se tornam expansivos em contato com a água (Motz e Geiseler, 2001; Sousa, 2007; Song *et al.*, 2021; Fernandes *et al.*, 2022; Hussain e Hussaini, 2022). A propriedade de resistividade elétrica do lastro siderúrgico, fundamental para vias férreas sinalizadas, também requer atenção e é condicionada à eficiência do tratamento (Sousa, 2007; Guo *et al.*, 2022).

Todas essas pesquisas se concentram nos diferentes processos de tratamento e perspectivas técnicas do agregado siderúrgico para uso como lastro ferroviário, mas carecem de uma abordagem ambiental e financeira holística para essa prática. Portanto, como sequência dos trabalhos já publicados e a fim de ampliar os potenciais desse uso, é necessário também identificar seus possíveis benefícios.

Sabe-se que os resíduos sólidos alcalinos, ricos em minerais de silicato a base de cálcio, como as escórias, são capazes de capturar e fixar quimicamente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na produção de carbonatos (Ghouleha, Guthrie e Shao, 2017; Li *et al.*, 2024; Huijgen, Witkamp e Comans, 2005), deixando a estrutura do material mais densa e estável. Assim, a mineralização de CO<sub>2</sub>, referente à estabilização química do agregado siderúrgico, não apenas mitiga a questão de instabilidade volumétrica causada pela presença de óxido de cálcio livre (CaO<sub>livre</sub>), como também promove um sequestro de carbono (Ghouleha, Guthrie e Shao, 2017). Contudo, no processo de beneficiamento e transporte desse material, muitos equipamentos são utilizados e há um intenso consumo energético. Sendo assim, a validação ambiental do lastro siderúrgico depende de um estudo aprofundado de seu processo de reciclagem. Embora tenham sido encontradas pesquisas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para o agregado siderúrgico em outras aplicações, até o nosso conhecimento, os encargos ambientais do lastro siderúrgico ainda não foram avaliados na literatura.

A ACV dos materiais é uma alternativa segura para embasar decisões em aplicações de resíduos em escala industrial. Essa análise utiliza uma estrutura sistemática a fim de identificar as cargas ambientais de um sistema durante todo o seu ciclo de vida (Li *et al.*, 2024). A avaliação é realizada por completo, desde a extração da matéria-prima, processamento, fabricação, manutenção, até a disposição final (Li *et al.*, 2024). As normas ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a; 2009b) foram publicadas para padronizar os estudos de ACV e determinam as quatro etapas do

método: a definição de objetivo e escopo, o inventário de ciclo de vida, a avaliação de impacto do ciclo de vida e a interpretação dos resultados.

O consumo detalhado de recursos e das saídas de emissões são essenciais para comparar diferentes produtos e processos que serão determinantes nas decisões das indústrias (Li *et al.*, 2021). Dessa forma, a presente pesquisa utiliza-se da ACV para estimar os impactos ambientais associados aos lastros siderúrgicos, em termos de kgCO<sub>2</sub> equivalente. A abordagem adotada considera a delimitação do sistema do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) e inclui uma ACV da rocha natural britada para comparação. A viabilidade financeira do lastro siderúrgico é determinada através do custo do ciclo de vida, utilizando indicadores econômicos disponíveis na literatura. Essas perspectivas objetivam, de maneira simultânea, eliminar os agregados siderúrgicos dos pátios de estocagem, validar sua destinação como lastro ferroviário e avaliar a sustentabilidade ambiental e financeira de seu uso.

## 1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade ambiental e financeira do uso do agregado siderúrgico como lastro ferroviário (lastro siderúrgico) através da metodologia de ACV. As análises são realizadas a partir de um estudo de caso envolvendo uma siderúrgica e uma concessionária ferroviária localizadas na região Sudeste do Brasil.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, o presente trabalho conta com os seguintes objetivos específicos:

- I. Compreender as propriedades físicas, químicas, mecânicas e de resistividade do agregado siderúrgico como lastro ferroviário;
- II. Investigar os impactos ambientais do uso do lastro siderúrgico através da ACV;
- III. Analisar os processos de beneficiamento do agregado siderúrgico;
- IV. Comparar os impactos ambientais e os custos do ciclo de vida entre a ferrovia com lastro siderúrgico e a ferrovia com lastro de rocha natural britada;
- V. Identificar perspectivas futuras e barreiras na adoção do lastro siderúrgico.

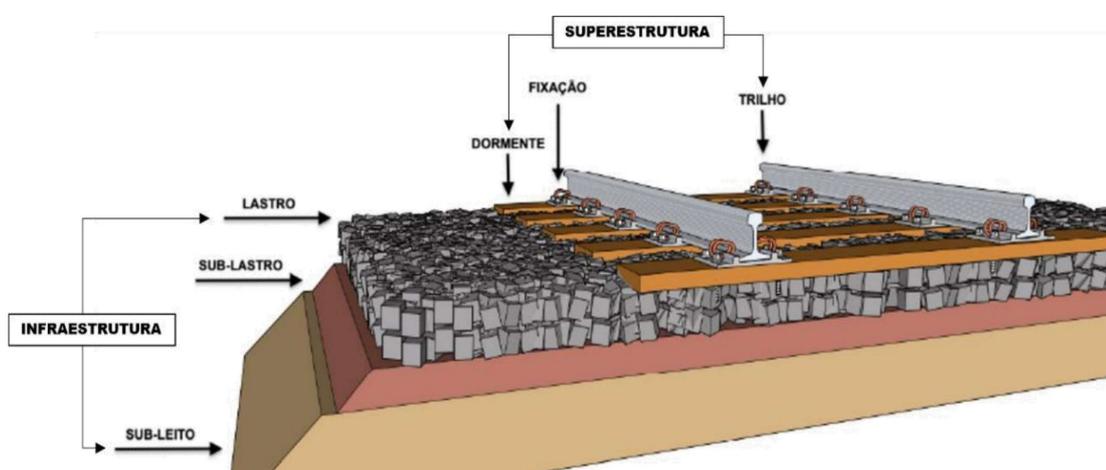
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 LASTROS DE FERROVIAS

#### 2.1.1 Propriedades e especificações técnicas

As vias lastradas têm sido utilizadas mundialmente há mais de 100 anos devido à sua flexibilidade e baixo custo (Kim *et al.*, 2020). A estrutura ferroviária é dividida em infraestrutura - composta pelo subleito, sublastro e o lastro - e superestrutura, onde se localizam os dormentes (que podem ser de madeira, concreto ou aço), o sistema de fixação e os trilhos (Indraratna e Salim, 2005), como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema da estrutura ferroviária



Fonte: Selig e Water (1994) *apud* Fonte (2022).

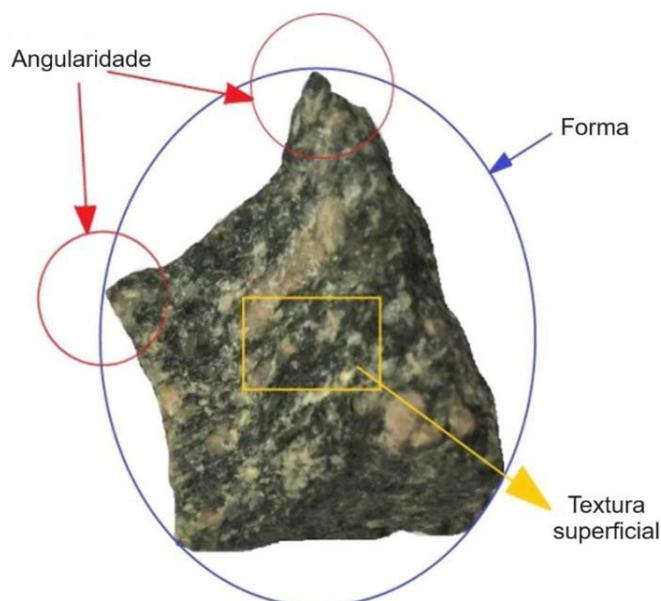
Os trilhos são compostos por barras de aço alinhadas em paralelo que entram em contato direto com as rodas dos trens. Sua principal função, além de guiar os trens, é distribuir o peso entre os dormentes, minimizando o atrito e permitindo segurança. Os elementos de fixação fazem a ligação dos trilhos aos dormentes, resistindo às movimentações dos trilhos e permitindo que permaneçam na posição correta, sem alteração da bitola. Já os dormentes, dispostos sob os trilhos, têm a função de transferir as cargas aplicadas nos trilhos e elementos de fixação para o lastro, proporcionando a estabilidade da superestrutura em relação à camada de lastro, embora a superestrutura ainda esteja sujeita a deflexões em função das cargas dinâmicas.

Na engenharia ferroviária, o termo “lastro” denota aos agregados graúdos colocados acima do sublastro ou subleito sendo capazes de fornecer suporte de carga

para sustentar a superestrutura da via férrea (Indraratna e Salim, 2005). O lastro é tradicionalmente formado por rochas extraídas de pedreiras, que são de origem ígnea ou metamórfica, embora também possam ser de origem sedimentar de rochas de alta qualidade (Guo *et al.*, 2022). As rochas naturais comumente usadas como lastro são o basalto, granito, quartzito, gnaiss e rochas calcárias (Guo *et al.*, 2022).

O lastro ferroviário deve, entre outras funções, transmitir as altas solicitações exercidas sobre os dormentes para a camada de subleito; dar estabilidade aos dormentes contra forças verticais, longitudinais e laterais gerada pela velocidade dos trens; fornecer permeabilidade para drenagem; apresentar boa resistência mecânica ao esmagamento, ao atrito, à degradação química e às intempéries; ser de fácil manutenção; absorver ruídos; e ter desempenho elétrico adequado (Indraratna *et al.*, 2006; AREMA, 2013). Geralmente, o lastro deve ser angular, uniformemente graduado, resistente e durável (Indraratna *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2018). As propriedades de forma da brita natural para lastro ferroviário são exibidas na Figura 3.

Figura 3 – Propriedades da brita natural como lastro ferroviário



Fonte: Guo *et al.* (2018), adaptado.

Embora as rochas usadas como lastro sejam tradicionalmente especificadas como uniformemente graduadas, de forma irregular, dura e de superfície rugosa, os padrões para o lastro variam de país para país (Guo *et al.*, 2022). Essa variação nos requisitos ocorre devido à qualidade das rochas disponíveis, regulamentações

ambientais e fatores econômicos (Guo *et al.*, 2022). Em função de tais fatores, cada órgão ferroviário comumente elaborara as próprias especificações para garantir que o lastro atenda às suas funções e aos requisitos exigidos nos projetos (Indraratna e Salim, 2005).

No Brasil, a NBR 5564, “Via férrea - Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio” (ABNT, 2021), traz as características a serem consideradas e os ensaios que devem ser realizados para o lastro ferroviário de rocha natural britada. A Tabela 1 exibe as características que devem ser atendidas pela norma brasileira.

Tabela 1 – Propriedades do lastro padrão – NBR 5564

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Verificação</b>	<b>Princípio</b>
Forma média das partículas	Cúbica	Anexo A <sup>2</sup>	Método do paquímetro
Massa específica aparente mínima <sup>1</sup>	2500-2700 kg/m <sup>3</sup>	Anexo B <sup>2</sup>	Pesagem da amostra seca e saturada
Porosidade aparente máxima	2%	Anexo B <sup>2</sup>	
Absorção de água máxima <sup>1</sup>	1-2%	Anexo B <sup>2</sup>	
Resistência à intempérie máxima	10%	Anexo C <sup>2</sup>	Imersão em sulfato de sódio e submissão a ciclos de imersão e secagem
Limite mínimo de massa unitária no estado solto	1250kg/m <sup>3</sup>	ABNT NBR 16972	Divisão da massa do agregado pelo volume do recipiente
Material pulverulento máximo	1%	ABNT NBR 16973	Materiais passantes pela peneira de 75µm
Torrões de argila máximo	0,5%	ABNT NBR 7218	Cobrimento da amostra com água destilada e identificação dos torrões de argila
Resistência ao desgaste <sup>1</sup> (abrasão Los Angeles máxima)	30-35%	NM 51	Utilização de máquina Los Angeles
Resistência ao choque <sup>3</sup> (índice de tenacidade treton máximo)	25%	Anexo E <sup>2</sup>	Utilização de aparelho Treton
Teor de fragmentos macios e friáveis máximo <sup>3</sup>	5%	Anexo F <sup>2</sup>	Submissão de partícula ao movimento esclerométrico em aparelho

Notas: <sup>1</sup>Variação de valor dependendo da litologia da rocha; <sup>2</sup>Anexos da NBR 5564 (ABNT, 2021); <sup>3</sup>Ensaio opcional.

Fonte: NBR 5564 (ABNT, 2021), adaptado.

A norma brasileira inclui ainda os ensaios para determinação de resistência à compressão uniaxial no estado saturado, índice de resistência à compressão pontual e amostragem de material de lastro. Todavia, ela não faz referências sobre a resistividade ou condutividade elétrica do lastro, não avalia a utilização de materiais

alternativos, como os agregados siderúrgicos, nem impõe limites para a composição química do lastro. A distribuição granulométrica preconizada pela NBR 5564 (ABNT, 2021) é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição granulométrica do lastro preconizada pela NBR 5564

Malha da peneira (mm) (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Massa acumulada (%)	
	Padrão A	Padrão B
76,2	-	0 - 0
63,5	0 - 0	0 - 10
50,8	0 - 10	-
38,0	30 - 65	45 - 75
25,4	85 - 100	-
19,0	-	90 - 100
12,5	95 - 100	98 - 100

Nota: Padrão A e B referem-se, respectivamente, ao lastro para aplicação em linhas principais ou linhas de pátios.

Fonte: NBR 5564 (ABNT, 2021).

Por sua vez, a norma americana AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association), em seu Manual de Engenharia Ferroviária, considera as escórias siderúrgicas como material para lastro de ferrovia. O Manual da AREMA recomenda limites químicos para esse tipo de lastro, os quais devem apresentar um teor inferior a 45% de óxido de cálcio (CaO); e o teor de óxido de ferro (FeO) e de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) somados não deve ultrapassar os 30% (AREMA, 2013). Quanto à resistência elétrica, a AREMA (2013) traz somente especificações para materiais de juntas de isolamento para trilhos, os quais devem apresentar resistência mínima de 10 megohms. A Tabela 3 exhibe os valores limites da AREMA para o lastro de escória e lastro de rocha natural.

Tabela 3 – Valores limites para material de lastro ferroviário para a AREMA

Propriedade	Valor		Verificação (ASTM)	Princípio
	Escória	Brita natural		
Material passante na peneira nº 200 (máximo)	1%	1%	C 117	Determinação de quantidade de material fino
Massa específica (mínimo)	2,90	2,60	C 127	Razão entre a massa seca e o volume do agregado após imersão em água
Absorção de água (máxima)	2%	2%	C 127	Porcentagem do aumento de massa após imersão em água
Torrões de argila e partículas friáveis (máximo)	0,5%	0,5%	C 142	Separação de materiais indesejáveis
Degradação (máximo)	30%	30%	C 535 / C 131	Teste de abrasão Los Angeles
Solidez do sulfato de sódio (máximo)	5%	5%	C 88	Imersão em sulfato de sódio e submissão a ciclos de imersão e secagem
Partículas planas e/ou alongadas (máximo)	5%	5%	D 4791	Medição das três dimensões do agregado

Fonte: AREMA (2013), adaptado.

A equipe de monitoramento da linha férrea operada pela concessionária ferroviária estudada nesta pesquisa utiliza um limite mínimo de resistência elétrica para o lastro da via sinalizada de  $7\Omega$ , sendo o valor ideal de  $10\Omega$ . Essa propriedade é medida entre os trilhos e os valores podem variar a depender do tipo do dormente.

A resistência elétrica (R) é obtida a partir da razão entre a tensão (V) e o fluxo de corrente (I) (Equação 1.1). Já a resistividade ( $\rho$ ), medida em  $\text{ohm}\cdot\text{m}$  ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) e inversamente relacionada à condutividade, é uma medida que descreve a capacidade de um material de resistir ao fluxo de corrente elétrica, que depende da sua natureza e características. A resistividade ( $\rho$ ) é calculada a partir de resistência (R), da área da seção (S) e do comprimento do condutor (L). A Equação 1.2 relaciona essas grandezas. Em campo, a resistência elétrica é comumente medida com um ohmímetro.

$$R (\Omega) = V \times I \quad (1.1)$$

$$\rho (\Omega \cdot \text{m}) = \frac{R \times S}{L} \quad (1.2)$$

Materiais com elevada resistividade elétrica são considerados maus condutores, pois dificultam o fluxo de corrente elétrica (Parsons *et al.*, 2014). No entanto, na presença de água, a resistividade tende a diminuir e o material se torna um condutor (Parsons *et al.*, 2014). Fatores como umidade, composição química dos sais dissolvidos na água, temperatura e distribuição granulométrica podem influenciar a resistividade ou condutividade do lastro (Parsons *et al.*, 2014).

### **2.1.2 Manutenção e recuperação do lastro ferroviário**

Para garantir a segurança no transporte e a operação eficiente das linhas ferroviárias, é necessário realizar inspeções e modernizações, assegurando que a via se mantenha em boas condições técnicas (Rak *et al.*, 2022). A recomendação para recuperação ferroviária é feita quando a grade está no final de sua vida útil, quando o lastro está colmatado, ou seja, com excesso de partículas finas, e com altura abaixo de 35cm (Sgavioli *et al.*, 2015). A fragmentação e o desgaste do lastro são os principais fatores que influenciam na vida útil de uma via férrea (Olagunju *et al.*, 2023; Sadeghi *et al.*, 2018). Devido ao atrito entre as partículas, causado pelo transporte, e aos efeitos da intemperização, o desgaste e a fragmentação do lastro são inevitáveis, resultando em colmatação (ou incrustação), que compromete a estabilidade da via, reduz a resistência do lastro e prejudica a drenagem (Olagunju *et al.*, 2023; Bassey *et al.*, 2020). Nesse sentido, a periodicidade de manutenção da ferrovia depende da qualidade do lastro e da quantidade de materiais incrustantes gerados (Olagunju *et al.*, 2023), além das condições de geometria da via (Sadeghi *et al.*, 2018).

A quantidade de material pulverulento, passante na peneira número 200 (0,075mm), não deve ultrapassar 1% da massa de agregado utilizado como lastro ferroviário (AREMA, 2013; ABNT, 2021). A concessionária ferroviária estudada neste trabalho adota os materiais finos contaminantes do lastro como àqueles passantes na peneira de  $\frac{3}{4}$ " (19mm), sendo aceitável até 5% de material retido na peneira de  $\frac{1}{2}$ " (12,5mm).

A manutenção inclui a recuperação da geometria da via e do lastro ferroviário, bem como a substituição de dormentes, trilhos e acessórios de fixação (Sgavioli *et al.*, 2015). A frequência dessas operações varia conforme a tipologia da ferrovia, a

intensidade do tráfego, a geometria da linha e o tipo de lastro utilizado (Dolci, Rigamonti e Grosso, 2020).

A recuperação do lastro degradado pode ser feita através de um processo mecanizado conhecido como desguarnecimento, no qual utiliza-se uma desguarnecedora (Figura 4). Este equipamento substitui o lastro desgastado por um novo através de um sistema de dispositivo de arado com correntes e correias transportadoras que coletam o lastro e os conduzem a peneiras vibratórias para uma seleção granulométrica (Sgavioli *et al.*, 2015; Pires *et al.*, 2017).

Figura 4 – Desguarnecedora de lastro ferroviário



Fonte: (MATISA, [s.d.]).

Na recuperação parcial, parte do material (~50%) retorna à via misturado com uma quantidade de lastro novo, tendo um consumo médio de 900m<sup>3</sup> de brita por km de via (Pires *et al.*, 2017; Sgavioli *et al.*, 2015). Já na recuperação total (100%), o consumo médio é de 2100m<sup>3</sup> por km (Sgavioli *et al.*, 2015). O desguarnecimento parcial ocorre comumente a cada 4 anos, já o desguarnecimento total geralmente ocorre a cada 8 a 12 anos. Sgavioli *et al.* (2015), salienta que o volume do

rejeito gerado desse processo, considerando uma seção transversal normal da Estrada de Ferro Vitória Minas, varia de 700 a 2000m<sup>3</sup> por km de linha recuperada, podendo ser depositado na lateral, acumulado em um vagão ou disposto em um vagão específico para rejeito. Essa estratégia de renovação de 50% do lastro na metade da vida útil é considerada a mais econômica (Sgavioli *et al.*, 2015).

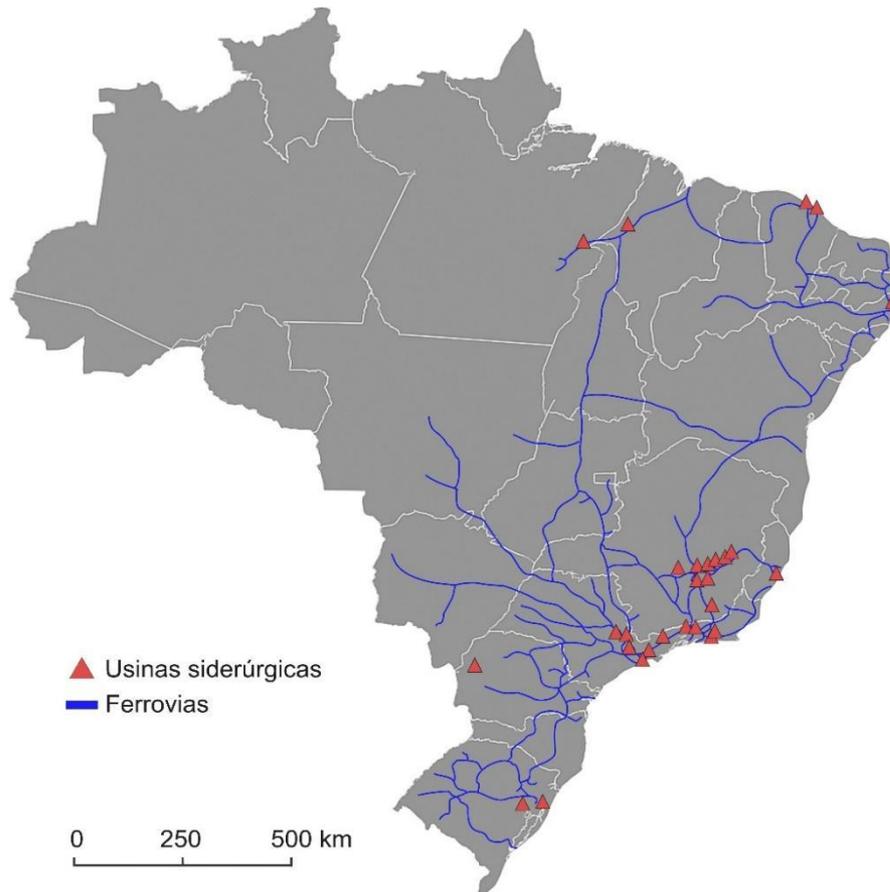
### **2.1.3 Impactos da extração da brita e potencial do lastro siderúrgico**

Ainda que seja uma peça fundamental para o bom funcionamento das vias férreas, a exploração do material rochoso usado como lastro ferroviário provoca impactos socioambientais significativos. O desmonte da rocha através do uso de explosivos causa a vibração do terreno, emissão de poeira, poluição sonora, assoreamento de áreas adjacentes à atividade mineradora, alteração de paisagens e escasseamento de jazidas (Ferreira, Daitx e Neto, 2006). Além disso, com o esgotamento dos recursos naturais de qualidade nas proximidades do local de construção, há a necessidade de percorrer longas distâncias para obter o material desejado, gerando um aumento dos encargos ambientais com a movimentação e transporte (Bressi *et al.*, 2018). Os problemas do lastro também incluem questões econômicas devido ao elevado gasto financeiro das operadoras ferroviárias na aquisição da brita para manutenção e construção das vias (Hussain e Hussaini, 2022).

Assim, com a ampliação de ferrovias já existentes e a construção de novos trechos prevista para os próximos anos (Brasil, 2024), o uso do lastro siderúrgico pode oferecer vantagens em relação à brita natural e minimizar os problemas associados à extração da rocha para lastro. Essas vantagens abrangem: a preservação ambiental, poupando a exploração de pedreiras; resistência à abrasão superior; uma estrutura vesicular que favorece a drenagem da água; e peso próprio superior, requerendo menor quantidade de material para proporcionar a estabilidade da via (Fernandes, 2010). Ademais, o lastro siderúrgico pode potencialmente contribuir para redução dos gastos na construção de ferrovias, considerando que materiais reciclados são mais acessíveis (a se verificar no presente trabalho).

Além disso, a proximidade dos centros siderúrgicos com as ferrovias facilita a logística de transporte. A Figura 5 apresenta as conexões entre as usinas siderúrgicas e a malha ferroviária brasileira.

Figura 5 – Malha ferroviária e siderúrgicas do Brasil



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

## 2.2 FABRICAÇÃO DO AÇO, GERAÇÃO DE ESCÓRIAS E SEU ARMAZENAMENTO

A indústria siderúrgica se destaca pelo fornecimento de insumos para diversas indústrias e para a construção civil. O aço é caracterizado por uma liga metálica que apresenta 98% de ferro e até 2% de carbono, entre outros componentes (Carvalho, Mesquita e Araújo, 2015). Segundo o Instituto Aço Brasil (IAB, 2023), o Brasil se apresenta na nona posição do ranking mundial de produção de aço bruto, alcançando quase 24 milhões de toneladas de aço em 2023 (Tabela 4). Ainda, o país se destaca como o maior produtor de aço bruto da América Latina (IAB, 2023). O alto teor de ferro

presente no minério de ferro do país é um dos motivos que justifica a relevância do Brasil no cenário mundial (IAB, 2023).

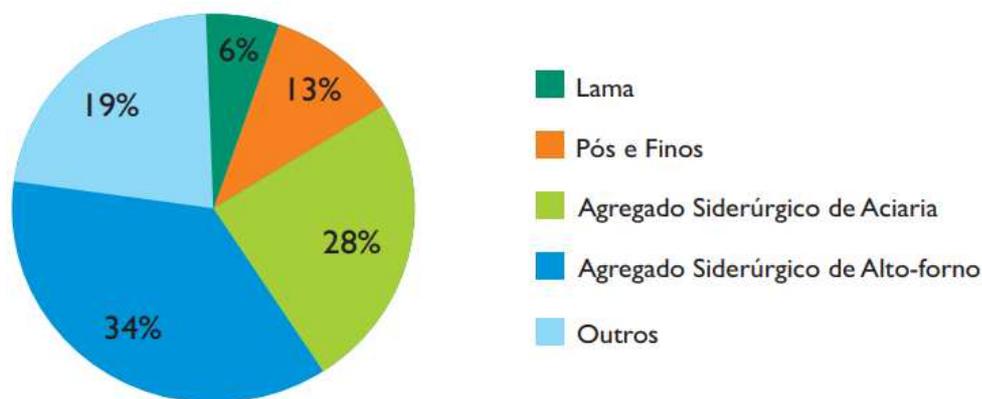
Tabela 4 – Produção mundial de aço bruto

Posição	País	Acumulado do ano (10 <sup>3</sup> t)		Participação em 2023 (%)
		2023	2022	
1	China	797.620	783.466	56,6
2	Índia	104.090	93.279	7,4
3	Japão	65.387	67.817	4,6
4	Estados Unidos	60.566	61.400	4,3
5	Rússia	57.148	54.554	4,1
6	Coréia do Sul	50.430	50.655	3,6
7	Alemanha	27.231	28.246	1,9
8	Turquia	24.489	27.244	1,7
<b>9</b>	<b>Brasil</b>	<b>23.948</b>	<b>26.046</b>	<b>1,7</b>
10	Irã	22.069	22.203	1,6

Fonte: IAB (2023), adaptado.

Apesar da sua importância, a siderurgia enfrenta um impasse em virtude da alta geração de resíduos em seu processo produtivo. A transformação do minério de ferro em aço laminado envolve as etapas de coqueificação, sinterização, redução e refino, resultando na produção de grandes volumes de emissões gasosas, efluentes líquidos e resíduos sólidos (Carvalho, Mesquita e Araújo, 2015). Entre os resíduos sólidos estão as lamas, pós, finos e escórias siderúrgicas. A Figura 6 mostra a proporção da geração desses coprodutos em 2022.

Figura 6 – Geração de coprodutos e resíduos em 2022



Fonte: IAB (2023).

Desde 1880, as escórias siderúrgicas têm sido empregadas como fertilizante fosfatado para uso agrônomo (Motz e Geiseler, 2001). A partir de então, a indústria siderúrgica tem feito esforços constantes na pesquisa sobre esses materiais, a fim de garantir o processamento adequado e, quando necessário, ajustar os processos de produção do ferro e do aço para se obter escórias que atendam às exigências normativas e regulamentações específicas de uso (Motz e Geiseler, 2001).

As escórias de alto-forno e de aciaria, resultantes da fabricação de ferro e de aço, somam a maior parcela de resíduos gerados nas siderúrgicas (Shi, 2004; Hussain e Hussaini, 2022). A escória de alto-forno é gerada durante o processo de fusão dos minérios para a obtenção do ferro-gusa em um alto-forno (Carvalho *et al.*, 2017). Já a escória de aço é um subproduto da conversão do ferro-gusa em aço em um forno de oxigênio básico (BOF) ou da fusão de sucata para produzir aço em um forno elétrico a arco (EAF) (Shi, 2004). A escória BOF, também conhecida como *Linz-Donawitz* (LD), é composta, em geral, por óxidos e silicatos (Hussain e Hussaini, 2022; Carvalho, Mesquita e Araújo, 2015) (Figura 7).

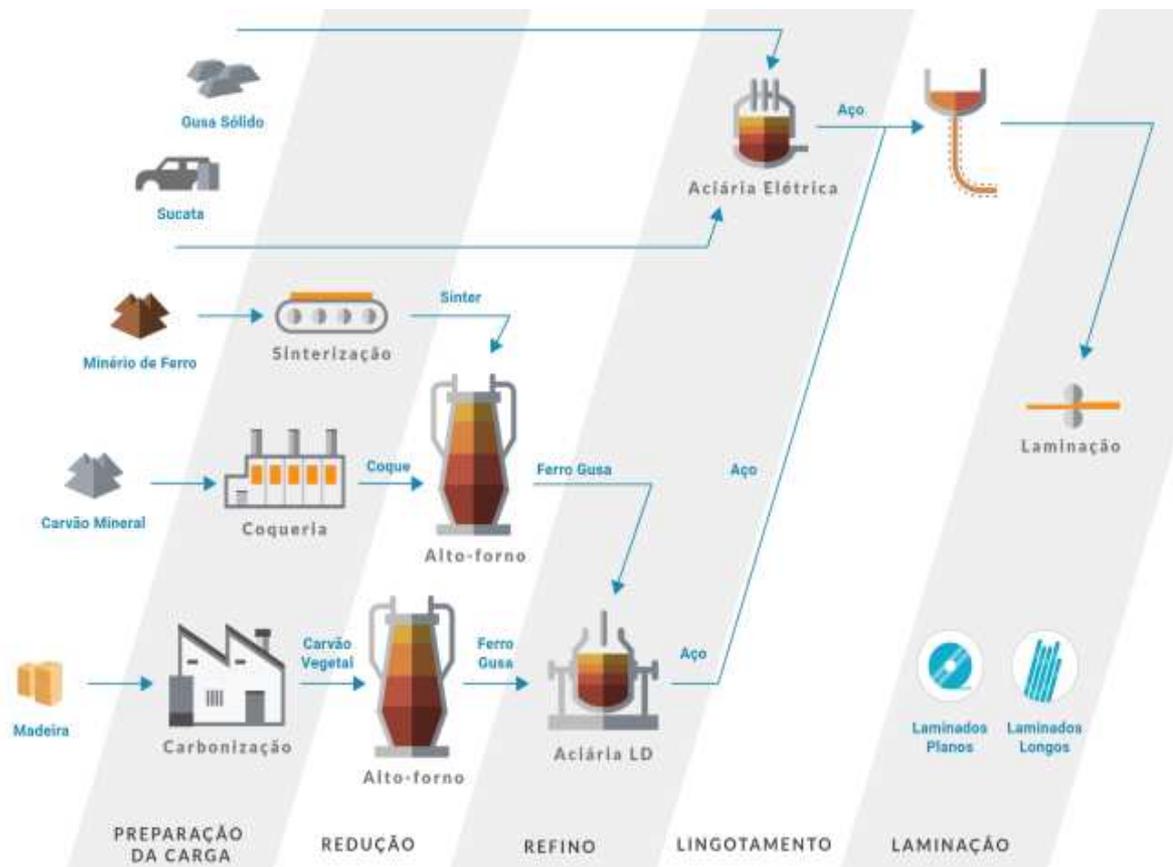
Figura 7 – Escória de aciaria do processo BOF



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A escória BOF é gerada quando são adicionadas cal e dolomita dentro do conversor, para absorver as impurezas do aço e proteger o revestimento do refratário, e oxigênio é soprado no ferro-gusa proveniente do alto-forno, formando o aço bruto e a escória líquida (Shi, 2004; Yildirim e Prezzi, 2011; Guo, Bao e Wang, 2018). O aço separa-se da escória de aciaria devido à diferença de densidade entre os dois materiais. O processo de fabricação do aço e a geração de escória siderúrgica estão ilustrados na Figura 8.

Figura 8 – Etapas da produção do aço



Fonte: IAB (2020).

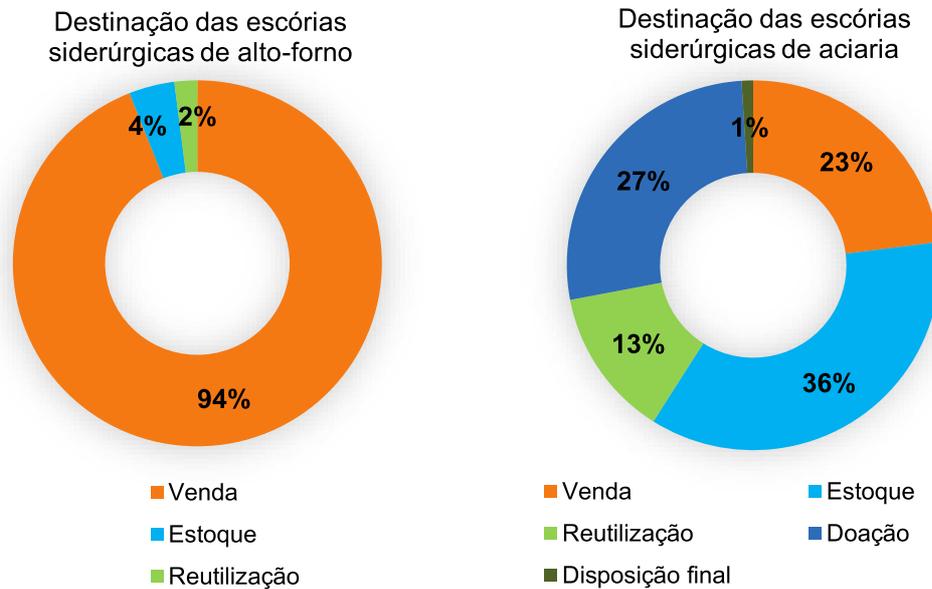
A escória é então transportada para baias, resfriadas e solidificadas. Em seguida, são moídas e peneiradas para alcançar a granulometria desejada. Como parte do ferro metálico é inevitavelmente deixado no conversor, ele é transportado junto com a escória que, depois de solidificada, apresentará frações metálicas (Kumar *et al.*, 2019). Portanto, no seu processo de beneficiamento, na maioria das siderúrgicas integradas, a escória passa por um processo de recuperação do ferro metálico através da separação magnética (Kumar *et al.*, 2019; Shen e Forssberg,

2003). A separação magnética consiste em separar o material metálico (magnético) do não metálico (não magnético) (Kumar *et al.*, 2019; Shen e Forssberg, 2003). A escória com material metálico, conhecida como sucata de aço, retorna à siderúrgica e é utilizada como matéria-prima secundária para sinterização, alto-forno e fabricação do aço (Shen e Forssberg, 2003). A escória não recuperada corresponde ao resíduo siderúrgico armazenado. Todas as etapas do processo de beneficiamento (britagem, separação magnética e peneiramento) são fundamentais e determinam a quantidade de escória a ser armazenada ou reutilizada na siderúrgica.

Destaca-se que quando se é atribuído valor ao resíduo siderúrgico, ele é classificado como coproduto. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2020) estabelece que os materiais derivados dos processos siderúrgicos sejam categorizados como coprodutos quando têm uso e mercado definidos. Também recebem essa nomenclatura quando são aplicados como substitutos de outras matérias-primas, evitando a utilização de recursos naturais (CONAMA, 2020).

A escória de alto-forno possui maior valor de mercado e elevada porcentagem de venda para reaproveitamento, sendo amplamente utilizada na produção de cimento Portland composto (CP II-E) e de alto forno (CP III) (IAB, 2020; Pacheco, 2006; Kumar *et al.*, 2019). A escória de aciaria, por sua vez, tem seu uso limitado devido à presença de substâncias instáveis (Qi, Liu e Liu, 2016; Kumar *et al.*, 2019). Eventualmente, ela pode ser empregada como agregado em pavimentação rodoviária - como revestimento primário, bases e sub-bases - brita, nivelamento de terreno ou para uso agrônomo na estabilização de solos (Motz e Geiseler, 2001; Hussain e Hussaini, 2022; IAB, 2020). A Figura 9 traz as principais finalidades dada às escórias siderúrgicas.

Figura 9 – Destino das escórias siderúrgicas de alto-forno e de aciaria



Fonte: IAB (2020), adaptado.

Com o aumento progressivo da geração de escória, somado ao fluxo de entrada do resíduo em pátios de disposição superior ao de saída, formam-se enormes montanhas que continuam a crescer, como ilustrado na Figura 10. Por situar-se em área extensas e frequentemente próximas a aglomerados urbanos, o acúmulo do material pode impactar gravemente o meio ambiente, alterando paisagens e afetando a saúde humana com a grande quantidade de partículas dispersas no ar (Qi, Liu e Liu, 2016; Guo, Bao e Wang, 2018).

Figura 10 – Pilha de escória siderúrgica no pátio de estocagem



Fonte: Magnavita (2023).

Em virtude desses impactos, tornou-se constante a busca por soluções técnicas, econômicas e sustentáveis capazes de valorizar esses resíduos, permitindo sua comercialização. Devido aos diferentes métodos adotados durante a produção do aço nas siderúrgicas, as escórias normalmente apresentam características distintas e ampla variabilidade (Li *et al.*, 2024). Portanto, para que seja aplicada como lastro ferroviário é necessário entender a sua composição química e mineral, bem como mitigar o seu comportamento expansivo. Ressalta-se que independentemente de onde estão sendo empregadas, deve-se avaliar a eficiência ambiental e econômica do agregado siderúrgico como matéria-prima na produção de materiais (Saade *et al.*, 2011).

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO SIDERÚRGICO

### 2.3.1 Características químicas, mineralógicas e morfológicas

A correta categorização dos resíduos industriais, considerando suas propriedades físicas e químicas, é fundamental para que sua disposição ou finalidade não apresente risco à saúde pública ou ao meio ambiente (Dayrell, 2013). A NBR

10004 “Resíduos sólidos: Classificação” (ABNT, 2004) divide os resíduos sólidos industriais em perigosos (classe I) e não perigosos (classe II), sendo esta última classe subdividida em não inertes (IIA) e inertes (IIB). No Brasil, as escórias são geralmente classificadas como não perigosas e se inserem na subdivisão IIA, não inertes, devido às concentrações de alumínio que excedem a quantidade estabelecida pela norma (ABNT, 2004; Fernandes, 2016). A atenção com o alumínio surge devido ao seu potencial de lixiviação ou solubilização em águas subterrâneas ou pluviais, podendo ser uma fonte de contaminação de mananciais próximos ao seu local de disposição (Fernandes, 2016). Entretanto, mediante à ensaios de lixiviação e solubilização, foi verificado que, apesar de serem classificadas como não inertes, as escórias depositadas em solos não apresentam risco significativo de contaminação, uma vez que os componentes químicos são liberados em pequenas quantidades e pouco comprometeriam a qualidade das águas subterrâneas (Pena, 2004) *apud* (Dayrell, 2013; Chamling, Haldar e Patra, 2020).

Conhecer as características químicas, mineralógicas e morfológicas das escórias siderúrgicas é fundamental para o seu reaproveitamento, já que seu desempenho técnico e durabilidade estão diretamente relacionadas a tais propriedades (Yildirim e Prezzi, 2011) e pela metodologia empregada no seu resfriamento (Shi, 2004). As escórias de aciaria são compostas quimicamente por óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro (FeO), óxido de sílica (SiO<sub>2</sub>) e óxido de magnésio (MgO) (Yildirim e Prezzi, 2015; Shi, 2004; Wang, Chang e Ansari, 2019). A quantidade de elementos presente pode variar influenciada pela matéria-prima, pela tecnologia empregada na produção do aço e pelo tipo de aço fabricado (Tavares, 2012; Shi, 2004; Li *et al.*, 2024). A Tabela 5 apresenta a composição química típica das escórias de aciaria em algumas das principais siderúrgicas brasileiras.

Tabela 5 – Composição química das escórias de aciaria LD ou BOF

Usinas	Composição química de escórias de aciaria LD (%)							
	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	Fe (total)	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
CST	45,20	5,50	0,80	12,20	7,10	18,80	0,07	2,75
Acesita	44,81	7,32	2,42	15,47	2,09	14,06	0,06	1,18
Belgo Mineira	47,00	8,00	1,50	15,00	3,00	19,00	-	-
USIMINAS	41,40	6,20	1,40	11,00	6,30	22,00	-	1,80
AÇOMINAS	45,58	9,48	0,75	12,01	6,59	16,71	-	2,23
Gerdau (Cocais)	36,20	12,50	0,93	15,40	5,80	21,00	0,04	1,01
Mannesmann	43,00	7,00	0,8	15,00	3,00	22,00	0,20	1,60
CSN	35,00	6,00	4,00	15,00	3,50	19,70	0,34	0,70
COSIPA	38,69	9,76	1,29	11,17	6,42	22,29	0,06	1,44

CST: ArcelorMittal (Tubarão); Acesita: Aperam South América (Timóteo); Belgo Mineira: ArcelorMittal (Monlevade); Açominas: Gerdau (Ouro Branco); Mannesmann: Vallourec (MG); Cosipa: Usiminas (Cubatão).

Fonte: IBS (1999) *apud* Oliveira (2006), adaptado.

A presença de ferro é resultado do processo de conversão do ferro fundido em aço. Nesta etapa, uma quantidade de ferro da matéria-prima não é absorvida pelo aço durante a sua produção. Já a alta concentração de CaO<sub>livre</sub> é consequência das quantidades de cal virgem adicionadas para reduzir as impurezas presentes no ferro gusa e na sucata metálica (Shi, 2004; Guo, Bao e Wang, 2018). O MgO, por sua vez, se manifesta a partir da dolomita usada como fundente para proteger o desgaste do revestimento refratário do forno de aço (Shi, 2004; Guo, Bao e Wang, 2018). A expansão da escória de aciaria, causada principalmente pela presença desses dois óxidos, será detalhada na próxima seção.

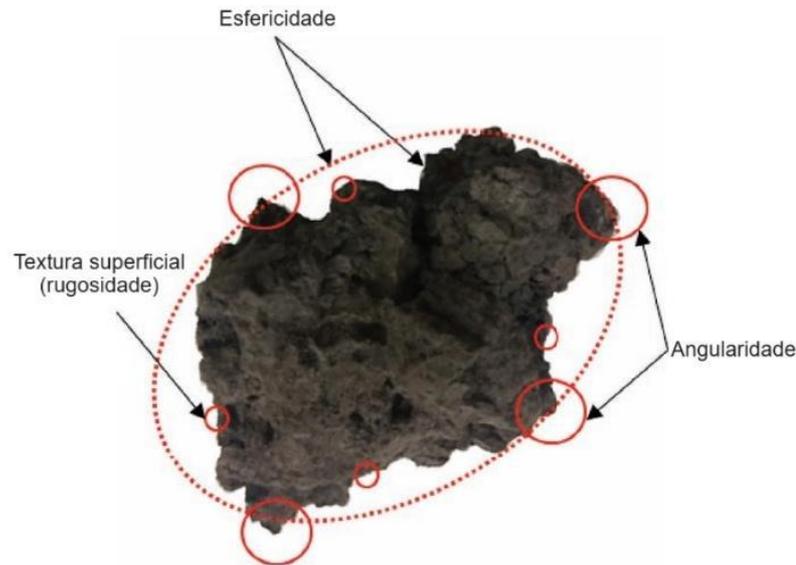
Devido à variação na composição química das escórias de aciaria, seus elementos minerais também podem se diferenciar (Shi, 2004). Entretanto, esses materiais apresentam algumas fases minerais em comum, como o silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), silicato dicálcico ( $\beta$ -C<sub>2</sub>S,  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S), ferrita dicálcica (C<sub>2</sub>F) e fase RO (solução sólida de CaO – FeO – MnO – MgO) (Shi, 2004; Yildirim e Prezzi, 2011; Li, Ling e Pan, 2022). Além desses minerais base, as escórias podem apresentar olivina (3CaO.MgO.2SiO<sub>2</sub>), merwinita (Ca<sub>3</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>), bredigita (Ca<sub>7</sub>Mg(SiO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>), periclásio (MgO), entre outros (Shi, 2004; Yildirim e Prezzi, 2011).

Por possuir capacidade de hidratação, a presença de  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_2F$  e  $C_4AF$  (aluminoferrita tetracálcica) confere às escórias de aciaria propriedades cimentícias (Shi, 2004; Kourounis *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2024; Song *et al.*, 2021), apresentando potencial para a produção de cimento (Guo, Bao e Wang, 2018; Carvalho *et al.*, 2017). Todavia, o teor de  $C_3S$  é bastante inferior ao encontrado no cimento Portland e, portanto, a reatividade de hidratação da escória de aciaria é muito menor que a do cimento (Shi, 2004; Li, Ling e Pan, 2022; Song *et al.*, 2021). Desse modo, a escória de aciaria pode ser considerada um material hidráulico de baixa resistência (Kourounis *et al.*, 2007; Shi, 2004).

No que tange às propriedades físicas das escórias de aciaria, Motz e Geiseler (2001) apontam que a massa específica aparente delas é superior à das rochas naturais utilizadas como agregado. Alguns autores observaram valores entre 3,19 e 3,3g/cm<sup>3</sup> (Motz e Geiseler, 2001; Qasrawi, 2014; Chamling, Haldar e Patra, 2020). Quando utilizada como lastro, essa elevada densidade pode conferir maior resistência lateral da via, exigindo maiores forças motrizes para deslocar esse agregado em comparação aos agregados convencionais que são mais leves (Hussain e Hussaini, 2022).

As escórias de aciaria também apresentam uma textura rugosa e elevado nível de resistência mecânica, evidenciado pelos valores de resistência ao choque e à abrasão (Motz e Geiseler, 2001). Além disso, podem apresentar uma estrutura porosa heterogênea em sua superfície (Yildirim e Prezzi, 2011). Possuem coloração escura acinzentada e apresentam formato de rocha com superfície angular (Motz e Geiseler, 2001; Yildirim e Prezzi, 2011; Delgado *et al.*, 2022). As propriedades de forma da escória siderúrgica são exibidas na Figura 11.

Figura 11 – Morfologia do lastro de agregado siderúrgico



Fonte: Delgado *et al.* (2022), adaptado.

### 2.3.2 Carbonatação do agregado siderúrgico

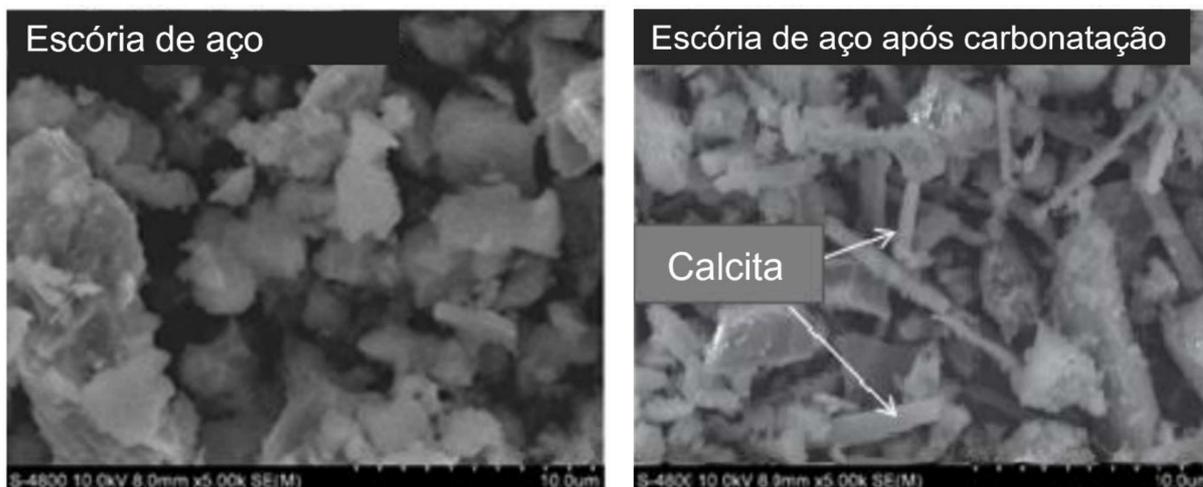
O coproduto siderúrgico também é um resíduo que demonstra reatividade de carbonatação durante a sua estabilização química. Caso seja feito de forma deliberada e sistemática, esse processo de tratamento é chamado de “cura”. A reação envolve o sequestro mineral de CO<sub>2</sub>, onde o teor de CaO<sub>livre</sub> presente é consumido e convertido em carbonatos de cálcio estáveis, conforme apresentado pela Equação 2 (Huijgen, Witkamp e Comans, 2005; Humbert e Gomes, 2019). Através da reação, há um ganho de resistência e melhoria da característica expansiva do agregado siderúrgico, resolvendo o problema causado pela presença de CaO e MgO livres (Wang, Chang e Ansari, 2019; Li, Ling e Pan, 2022; Xian *et al.*, 2023). Entretanto, a carbonatação de maneira natural é lenta, devido à concentração de CO<sub>2</sub> relativamente baixa na atmosfera (Song *et al.*, 2021). A estabilização química gerada pela reação também é capaz de reduzir o pH e a lixiviação de metais pesados desse material (Wang, Chang e Ansari, 2019).



A Figura 12 mostra imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostras de escórias de aço antes e após o processo de carbonatação.

Observa-se uma mudança significativa na microestrutura da amostra após a reação, com destaque, na imagem à direita, para a formação abundante de cristais de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), atribuída à reação de carbonatação (Tu *et al.*, 2019).

Figura 12 – Amostras de escória obtidas por MEV antes e depois da carbonatação



Fonte: Tu *et al.* (2019), adaptado.

A capacidade de absorção de  $\text{CO}_2$  dos resíduos sólidos industriais alcalinos, como a escória, pode ser calculada através de fórmulas teóricas (Humbert e Gomes, 2019; Huntzinger *et al.*, 2009; Li, Ling e Pan, 2022). O máximo de sequestro de  $\text{CO}_2$  pode ser previsto pela composição química do material, conforme a fórmula de Huntzinger da Equação 3.1 (Huntzinger *et al.*, 2009) ou pela fórmula de Steinour da Equação 3.2, onde o  $\text{CaO}$  e o  $\text{SO}_3$  são as frações em peso medido por fluorescência de raios-X e o  $\text{CaCO}_3$  é a fração em peso investigada por análise térmica (Steinour, 1959; Pan *et al.*, 2020). Outro método de cálculo, no caso de câmaras de carbonatação, envolve a queda de pressão e elevação de temperatura na câmara, expressa pela Equação 3.3 (Ukwattage, Ranjith e Li, 2017).

$$\text{Sequestro de CO}_2(\%) = 0,785(\text{CaO} - 0,56\text{CaCO}_3 - 0,7\text{SO}_3) + 1,091\text{MgO} + 0,71\text{Na}_2\text{O} + 0,468\text{K}_2\text{O} \quad (3.1)$$

$$\text{Sequestro de CO}_2(\%) = 0,785(\text{CaO} - 0,56\text{CaCO}_3 - 0,7\text{SO}_3) \quad (3.2)$$

$$\text{Sequestro de CO}_2(\%) = \frac{\text{queda de pressão} \times \text{volume da câmara}}{\text{constante universal dos gases} \times \text{temperatura}} \quad (3.3)$$

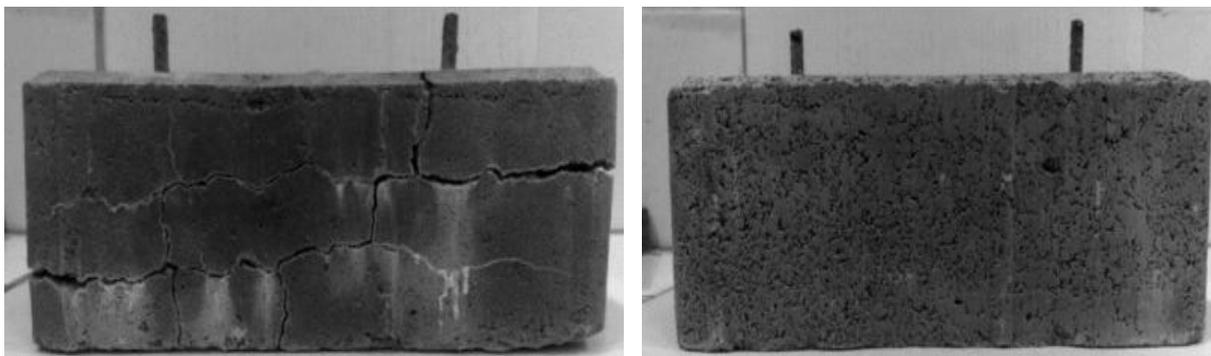
Renforth *et al.* (2011) afirmam que, devido à variação na composição química e mineralógica das escórias siderúrgicas, especialmente o  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ , o seu

potencial teórico de captura de carbono pode variar entre 99 e 135 kg por tonelada. Tian *et al.* (2013) encontrou um potencial teórico ligeiramente superior, de até 159,4kgCO<sub>2</sub>/t, e, em experimentos de carbonatação direta gás-sólido a 600°C com 5% de concentração de CO<sub>2</sub>, alcançou um sequestro de 73,1kgCO<sub>2</sub>/t, resultado promissor para aplicações *in situ* em siderúrgicas, cuja concentração de CO<sub>2</sub> está entre 5 e 15%. Wang *et al.* (2022), com base na quantidade de Ca lábil teórico disponível da escória de aço (em torno de 80% do Ca total), estimaram uma capacidade média 250kgCO<sub>2</sub>/t em condições ambientes. Outros estudos como Sun *et al.* (2016) e Bonenfant *et al.* (2008), relataram valores de 126kgCO<sub>2</sub>/t e 174kgCO<sub>2</sub>/t, respectivamente, em diferentes condições experimentais. É importante destacar que a capacidade experimental de absorção de CO<sub>2</sub>, que é geralmente menor que o valor teórico, dependerá do tamanho da escória, das condições de temperatura, duração e tipo de tratamento empregado (Humbert e Gomes, 2019; Li, Ling e Pan, 2022).

#### 2.4 DESAFIOS ASSOCIADOS AO USO DO AGREGADO SIDERÚRGICO

As boas propriedades dos agregados siderúrgicos incentivaram a indústria a buscar métodos para sua aplicação. Entretanto, o uso em seu estado natural apresenta desafios, principalmente devido à sua expansividade. Os óxidos de cálcio e magnésio livres, quando em contato com a umidade, hidratam-se e geram tensões internas, causando o aumento de volume, trincas e na fragmentação da escória (Motz e Geiseler, 2001). A Figura 13 exibe a expansão causada em blocos de concreto para pavimentação fabricados com escória siderúrgica bruta e beneficiada.

Figura 13 – Blocos para pavimentos: (a) com escória bruta; (b) com escória beneficiada



Fonte: Silva *et al.* (2016).

Essa instabilidade volumétrica pode comprometer a resistência e durabilidade do agregado siderúrgico, diminuindo sua vida útil e limitando aplicações (Beshears e Tutumluer, 2013). É possível observar variações de volume de até 10% com a hidratação dos óxidos (Beshears e Tutumluer, 2013). O quanto o material irá se expandir é influenciado por diferentes fatores, como a origem, tamanho dos cristais, teor de cal e magnésio, níveis de umidade e idade da escória (Beshears e Tutumluer, 2013; Sousa, 2007). As reações responsáveis pela expansão são expressas pelas seguintes equações:



Somada as hidratações do CaO e MgO livres das Equações 4.1 e 4.2, há a reação de carbonatação da Equação 4.3. As reações de oxidação e corrosão do ferro metálico presente na escória de aciaria também podem contribuir para o seu comportamento expansivo (Fernandes, 2016). Os principais fatores que influenciam a expansão e controlam a estabilização desse material estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Fatores que influenciam a expansão da escória de aciaria

<b>Espécies Químicas</b>	<b>Fatores que influenciam na expansão</b>	<b>Mecanismo</b>
CaO e MgO	Teor da espécie no estado livre; Umidade; Temperatura; Teor de CO <sub>2</sub> ; Tamanho dos grãos da escória.	Hidratação
Fe <sup>0</sup> (ferro metálico)	Teor de Fe <sup>0</sup> ; Umidade; Tempo de exposição ao ar; Teor de oxigênio no resfriamento; Tamanho dos grãos da escória.	Oxidação
C <sub>2</sub> S	Velocidade de resfriamento; Impurezas iônicas; Temperatura de resfriamento; Basicidade das escórias.	Transformação Alotrópica

Fonte: Fernandes (2016).

De acordo com as normas 406 e 407 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2017a; 2017b), o valor relativo à expansão do agregado siderúrgico deve ser inferior a 3% para que estejam aptos a serem utilizados em base ou sub-base de pavimentos rodoviários. No entanto, a presença de CaO e MgO livres geralmente acarreta expansões superiores ao recomendado.

Adicionalmente, a fratura do agregado siderúrgico, tanto devido à própria expansão quanto às solicitações de uso, gera uma quantidade elevada de material fino (Figura 14). Essas partículas finas, na presença de água, apresentam potencial cimentante (Sousa, 2007; Song *et al.*, 2021; Li, Ling e Pan, 2022; Li *et al.*, 2024). Embora a atividade aglomerante seja benéfica para usos de construção civil, como lastro ferroviário ela pode dificultar o processo de desguarnecimento. O excesso de finos também pode promover a colmatação da camada de lastro, prejudicando a funcionalidade e a capacidade de drenagem do pavimento ferroviário. No entanto, há menções entre profissionais da área de que o potencial cimentante desses finos também atua criando uma espécie de “camada impermeável”, protegendo as camadas de sublastro e subleito da infiltração da água, e contribuindo para a estabilidade da estrutura ferroviária. Ainda não há registro desse fenômeno na literatura, por isso recomenda-se que estudos experimentais sejam realizados.

Figura 14 – Presença de finos na camada de lastro siderúrgico



Fonte: Arquivo particular do Eng. Antônio Carlos Rodrigues Guimarães (2025).

O agregado siderúrgico como lastro também apresenta desafios devido à sua capacidade de condução elétrica, o que pode prejudicar o desempenho dos sistemas de sinalização das vias férreas. Esses sistemas, de natureza elétrica e eletrônica, são responsáveis por controlar a circulação dos trens, permitindo o cruzamento seguro entre eles, evitando colisões, garantindo o espaçamento adequado, além de contribuir para a rapidez e segurança da operação ferroviária (Sousa, 2007). O seu funcionamento envolve o bloqueio de trechos da via por meio de sinais luminosos, que são acionados quando as rodas do trem fecham o circuito elétrico dos trilhos, sinalizando sua presença e impedindo que outros trens sigam nos trechos ocupados (Sousa, 2007). Contudo, materiais com baixa resistividade podem provocar a dispersão da corrente elétrica, simulando a presença de um trem no trecho e interferindo na correta sinalização da via.

Portanto, devido à sua alta condutividade, o agregado siderúrgico pode levar ao fechamento do circuito de sinalização entre os trilhos, causando uma queda de tensão que, em períodos chuvosos, chega a valores abaixo de 0,9V (Sousa, 2007). A queda de tensão é comumente interpretada como falsas ocupações ou “ocupação fantasma”, o que pode levar à paralização do tráfego para o acionamento de manutenção da via (Sousa, 2007). Esse problema está relacionado à presença ferro metálico no interior do material e ao  $\text{CaO}_{\text{livre}}$ , caso não esteja adequadamente hidratado (Sousa, 2007; Pasetto e Giacomello, 2023). A geração de finos, causada pela quebra do material após sua expansão, também pode favorecer a condutividade devido à sua tendência de reter água por tensão superficial (Sousa, 2007).

Em resumo, os quatro principais desafios do lastro siderúrgico são:

- Expansibilidade;
- Alta condutividade elétrica;
- Liberação de finos e ação cimentante;
- Liberação de finos e promoção da retenção de água no lastro colmatado.

Não obstante aos problemas associados ao agregado siderúrgico, não se deve minimizar seu potencial de utilização como lastro. Essa aplicação reduz a demanda de agregados extraídos de jazidas naturais, além de promover o controle de agregado siderúrgico disposto em pátios. Para tal, é fundamental garantir a resistência e a

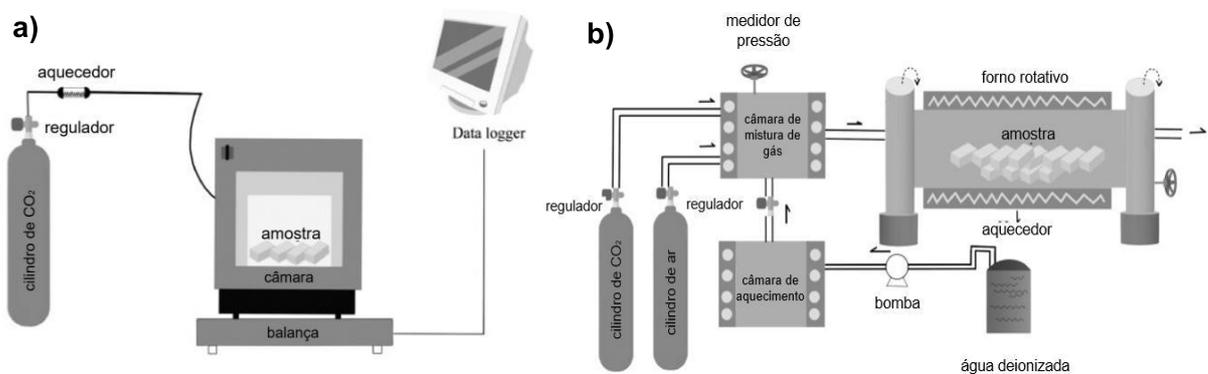
durabilidade do material, pois são propriedades importantes para os lastros em ferrovias.

Para este fim, vários métodos de tratamento foram desenvolvidos. Os agregados siderúrgicos podem ser submetidos ao tratamento de cura, também chamado de envelhecimento, no qual são expostos às intempéries e, em alguns casos, aspergidos com água para promover a estabilização química dos óxidos livres. Quando submetidos apenas às intempéries, o tempo de cura pode variar de 3 a 18 meses (Hussain e Hussaini, 2022), sendo 6 meses o período mais frequentemente utilizado nas pesquisas (Fernandes *et al.*, 2022; Fernandes, Cosme e Fernandes, 2020; Koh *et al.*, 2018). Quando há aspersão de água, esse tempo pode ser reduzido para 45 dias (Fernandes, Cosme e Fernandes, 2020). Após o tratamento, o material precisa ser analisado quanto à sua expansibilidade, dependendo da área de emprego (Fernandes, 2016). Se apresentar desconformidade com este critério, ele deve retornar ao pátio de estocagem para continuar o processo de estabilização por mais alguns meses (Fernandes, 2016). Passado o período adicional, deve ser amostrado e ensaiado novamente (Fernandes, 2016). Para melhor eficiência do tratamento, as pilhas de escória devem ter uma altura de 1,5 a 2 metros (Sousa, 2007). Além do tratamento de cura, outros métodos como o envelhecimento em água quente (imersão da escória em água a 80°C) e envelhecimento a vapor (exposição a 100°C à pressão ambiente) também podem melhorar a estabilidade do volume do agregado siderúrgico em poucos dias (Moon, Yoo e Kim, 2002; Motz e Geiseler, 2001; Hussain e Hussaini, 2022).

Outro método de tratamento recente e amplamente estudado na China são os processos de carbonatação acelerada. Esses processos ocorrem sob temperatura adequada, umidade e alta concentração e pressão de CO<sub>2</sub> (Song *et al.*, 2021; Wang, Chang e Ansari, 2019). Existem dois processos de carbonatação da escória: a carbonatação a seco e a carbonatação aquosa (Song *et al.*, 2021). Na carbonatação a seco, a escória siderúrgica sólida é colocada em uma câmara e entra em contato com elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> em alta temperatura (Song *et al.*, 2021). Na carbonatação aquosa, os elementos alcalinos presentes primeiro são dissolvidos e depois reagem com o CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> em baixa temperatura (Song *et al.*, 2021). Ambos os métodos proporcionam ao agregado siderúrgico a captura de CO<sub>2</sub>, geram compósitos

carbonáticos que aumentam a resistência à compressão do material, reduzem os teores de CaO e MgO livres, minimizam a lixiviação de metais e melhoram a durabilidade e estabilidade do coproduto (Song *et al.*, 2021). A Figura 15 ilustra o esquema dos processos. Atualmente, essa tecnologia é somente adotada em escala laboratorial, mas, com a otimização dos processos e equipamentos, é uma grande aposta para o futuro.

Figura 15 – (a) Esquema de carbonatação a seco; (b) Esquema de carbonatação aquosa



Fonte: Song *et al.* (2021), adaptado.

Motz e Geiseler (2001) citam um tratamento desenvolvido pela companhia Thyssen Krupp Stahl AG em parceria com a FEhS que envolve a injeção de oxigênio e areia seca na escória líquida. A adição de material silicoso à escória de aciaria pode inibir seu potencial expansivo (Dayrell, 2013). Nesse tratamento, o CaO<sub>livre</sub> é dissolvido e quimicamente ligado com a sílica, formando novos compostos mais estáveis (Motz e Geiseler, 2001). O MgO<sub>livre</sub> também pode reagir da mesma forma (Motz e Geiseler, 2001). O equipamento desenvolvido durante a pesquisa, instalado na década de 90 na siderúrgica em Duisburg, na Alemanha, tem funcionado com sucesso (Motz e Geiseler, 2001).

Para tratar a escória de aciaria em sua fase líquida, Fernandes *et al.* (2022) utilizaram o mesmo princípio de estabilização, adicionando à escória um material com elevado índice de SiO<sub>2</sub>. Os autores utilizaram o refratário de coqueria, também um resíduo siderúrgico, e observaram a redução de CaO<sub>livre</sub> e, conseqüentemente, a diminuição da instabilidade volumétrica do agregado siderúrgico.

## 2.5 ESTADO DA ARTE: USO DO AGREGADO SIDERÚRGICO COMO LASTRO FERROVIÁRIO

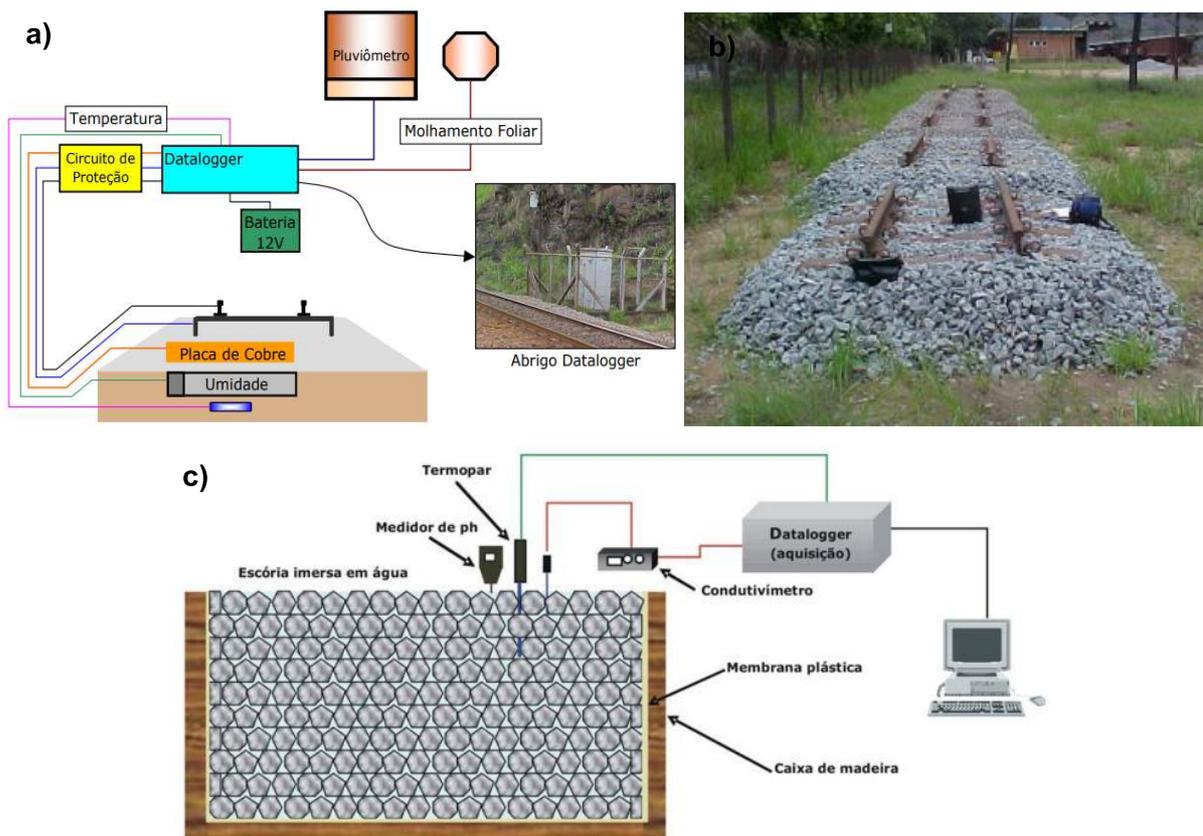
Devido às boas características dos agregados siderúrgicos, eles se tornaram atraentes para uso como lastro no mercado ferroviário, denominado nesta pesquisa como “lastro siderúrgico”. No Brasil e no mundo, diversos trabalhos foram conduzidos nessa área, destacando o potencial do lastro siderúrgico e encorajando a colaboração entre os setores, que promove o avanço das pesquisas e o aprimoramento do material.

Pacheco (2006), um dos pioneiros na área no Brasil, realizou ensaios físicos, químicos, microestruturais, ambientais e de expansibilidade em amostras de escórias de aciaria coletadas em 15 siderúrgicas do sul e sudeste do Brasil. O objetivo do autor foi estabelecer normas e padrões que viabilizassem o uso da escória de aciaria como lastro. As amostras foram coletadas em condições virgem, envelhecida (estocado por mais de seis meses) e comercial, correspondendo ao produto final comercializado como solicitado pelo cliente. Os resultados mostraram que as principais características físicas da escória ficaram em conformidade com os requisitos para lastro padrão de ferrovias. Quanto à expansibilidade, observou-se que o tempo de estocagem do coproduto influencia na sua variação de volume. Nas amostras envelhecidas, a expansão não foi significativa, mantendo-se abaixo dos 3% recomendados pelo DER-MG. Os resultados quantitativos deste estudo e de outros trabalhos conduzidos nessa área, serão discutidos a seguir neste mesmo tópico.

Sousa (2007) investigou não apenas as características químicas, físicas, mecânicas e ambientais, mas também as propriedades de resistividade e condutividade elétrica das escórias de aciaria para analisar o desempenho operacional das vias férreas sinalizadas, uma vez que essas características podem gerar falsas ocupações na via, especialmente em períodos de chuva. O monitoramento da fuga da corrente do circuito para o lastro de escória de aciaria foi realizado em campo, onde o material já havia sido lançado em trechos protótipo há três anos. A investigação foi feita por um sistema de coleta de dados com sensores de medição de tensão instalados nos trilhos, dormentes e placas de cobre; e instrumentados com medidores de molhamento foliar, umidade e temperatura das camadas (Figura 16a). Os índices de precipitação também foram registrados durante

seis meses. Para determinar a resistividade elétrica, duas amostras foram coletadas das siderúrgicas: a primeira estava armazenada durante seis meses, submetida à ação de intempéries; e a segunda, estocada por um período de 9 a 12 meses. A resistividade elétrica de ambas as amostras foi determinada em seis simuladores com seções teste de 2m de comprimento, usando um megôhmetro. As medidas foram feitas entre trilhos e eletrodos, com dormentes de madeira e aço, com lastro seco e molhado (Figura 16b). Para investigação do efeito da cura sobre a condutividade, foi montada uma caixa-teste onde a escória foi adicionada e imersa em água até que esta cobrisse seu nível acima. A condutividade elétrica do meio foi medida durante 90 dias utilizando um condutímetro. O pH e a temperatura durante o teste também foram monitorados (Figura 16c).

Figura 16 – (a) Sistema de aquisição de dados de campo; (b) Simulador das seções de teste; (c) Esquema da caixa-teste para avaliação dos efeitos de cura



Fonte: Sousa (2007).

Os resultados de caracterização de Sousa (2007) indicaram a necessidade de estabelecer faixas de referência para a escória de aciaria para melhor garantir o

desempenho possível do material como lastro. O teste de monitoramento da corrente do circuito em campo mostrou que, em períodos de chuvas intensas, há queda significativa de tensão entre os trilhos, ficando abaixo de 0,9V na recepção do circuito, causando o fechamento do relé e provável falsa ocupação.

Para os simuladores de resistividade montados por Sousa (2007), em condição de clima seco, a resistividade do lastro siderúrgico, para uma tensão de 500V, esteve acima dos  $300\Omega\text{m}$ , conforme recomendado pela AREA (American Railway Engineering Association). Entretanto, em condições úmidas, quase todas as simulações estiveram abaixo do limite mínimo. Este resultado evidencia que as propriedades das escórias são susceptíveis à água. A resistividade entre trilhos mostrou que os dormentes de madeira são condutores de corrente elétrica independente da natureza do lastro e do teor de umidade. Isso ocorre devido ao contato do dormente com os trilhos, diferentemente dos dormentes de aço que ficam isolados; as perfurações nos dormentes de madeira pelos elementos de fixação podem favorecer o fluxo elétrico; o tratamento químico com produtos de base ácida dado a estes dormentes pode aumentar os efeitos da umidade absorvida; e a madeira pode se tornar condutora se tiver uma elevada absorção de água (Sousa, 2007). Na investigação da cura sobre a condutividade, o autor observou que a escória teve a condutividade reduzida ao longo de 90 dias, chegando a valores próximos de  $150\mu\text{S}/\text{cm}$ . Neste ensaio, também foi notado uma significativa expansão e fragmentação do material (Figura 17).

Figura 17 – Efeitos de expansão e fragmentação da escória



Fonte: Sousa (2007).

Sousa (2007) conclui, portanto, que a escória siderúrgica tem resistividade três vezes menor quando comparada com as rochas naturais. Para que o problema de paralização do tráfego seja reduzido, o autor sugere que as escórias de aciaria empregadas como lastro devem estar devidamente curadas em um período adequado, com pilhas de tamanho reduzido e aspersão constante de água.

Fernandes, Cosme e Fernandes (2020), desenvolveram uma metodologia para estabilizar a escória de aciaria LD com o uso de aspersores em um pátio de beneficiamento. A proposta buscou promover a cura do material recém-produzido por meio de hidratação temporizada e carbonatação em pilhas de 2 m de altura. As pilhas foram equipadas com sensores de molhamento foliar, temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e teor de dióxido de carbono. Elas foram analisadas durante 180 dias para monitorar o teor de  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  e verificar a possível expansibilidade do material tratado, utilizando o ensaio de PTM-130. Também foram realizados ensaios de caracterização química, mecânica, física e ambiental nas escórias tratadas e nas de controle. No que tange à caracterização química, os resultados indicaram que a metodologia de carbonatação e hidratação foi eficaz, uma vez que o teor  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$  foram reduzidos. O teor de  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  teve uma queda significativa para menos de 3%, estando de acordo com o recomendado pela AREMA. Essa redução é resultado da sua transformação em hidróxido de cálcio pela reação da cal com a água. Com a redução de  $\text{CaO}_{\text{livre}}$ , a expansibilidade da escória também diminuiu significativamente, apresentando valores abaixo de 3% após 75 dias de tratamento. Além disso, a escória estabilizada tornou-se um resíduo classe IIB, não perigoso e inerte, a melhor classificação possível.

Dayrell (2013) estudou a estabilização química da escória de aciaria LD em sua fase líquida em escala laboratorial, a fim de melhorar seu desempenho ambiental e geotécnico para credenciamento como lastro ferroviário. Para isso, foi realizada a caracterização da escória recém-produzida e na sua posterior redução a pó, homogeneização e fusão separadamente com areia, argila, bentonita e dois tipos de lamas residuais. Os argilominerais, em especial, foram selecionados devido à similaridade com a composição química da escória, facilidade de obtenção e custo acessível. O tratamento da escória com a adição de sílica busca a neutralização do  $\text{CaO}_{\text{livre}}$ , o qual se combina com a sílica. Os novos materiais resultantes das fusões

passaram por ensaios em escala microestrutural que abrangem as análises química, física, mineralógica, morfológica e ambiental. Os resultados evidenciaram que a adição controlada dos aditivos foi essencial para alterar as características do agregado siderúrgico e atender a finalidade proposta. Observou-se que a influência dos argilominerais na escória melhorou sua estabilização química, gerando misturas não expansivas e não condutoras de eletricidade, características fundamentais para evitar a quebra e formação de finos na ferrovia.

A pesquisa conduzida por Fernandes *et al.* (2022) é um dos estudos relevantes que realizam o tratamento da escória de aciaria LD em escala real. Os autores desenvolveram um método de estabilização química dos óxidos instáveis da escória por meio da sua fusão, ainda em seu estado líquido, com refratário de coqueria. Esse resíduo, também gerado nas siderúrgicas, consiste em uma mistura entre frações sílica aluminosa e cerâmica, e apresenta alto teor de SiO<sub>2</sub> que é capaz de equilibrar o índice de basicidade da escória e estabilizar os óxidos livres. A mistura, após fundida e resfriada, foi triturada até a granulometria padrão para lastro ferroviário, e suas propriedades físicas, mecânicas, químicas, ambientais, elétricas e de campo (ensaios de módulo de resiliência e de rigidez) foram avaliadas. Os resultados demonstraram conformidade com os padrões normativos brasileiros e melhorias consistentes. Houve uma redução expressiva dos óxidos livres presentes na composição química da escória, resultando em melhorias nas suas funções mecânicas. A resistividade elétrica da mistura também obteve um ótimo desempenho (>300Ω.m), mesmo com a amostra molhada, indicando, segundo os autores, que não ocorreriam eventos de falsa ocupação nas vias férreas sinalizadas.

Em âmbito internacional, Chamling, Haldar e Patra (2020) realizaram uma série de ensaios para investigar as características mecânicas, físicas, químicas e ambientais das escórias siderúrgicas na Índia. Em relação à lixiviação de metais pesados, os resultados mostraram que a escória não apresentava nenhum risco ambiental. O módulo de resiliência da escória, característica fundamental para o planejamento e análise de infraestruturas ferroviárias, foi testado sob ciclos de carregamento para duas pressões confinantes (40 e 60 kPa), e mostrou-se maior do que o do agregado natural, o que permitiria a redução da espessura da camada de lastro da ferrovia (embora os autores não tenham mencionado o quanto seria

potencialmente possível reduzir). Outras propriedades ensaiadas nas escórias siderúrgicas, como a resistência à abrasão Los Angeles (16%), resistência ao choque (18%) e ação de esmagamento (21%), estiveram dentro dos limites especificados pelas normas dos Estados Unidos, Reino Unido, Austrália e Índia. A escória também foi categorizada como inerte, de acordo com a *Environmental Protection Agency* (EPA) dos EUA.

Um estudo chinês desenvolvido por Jing *et al.* (2020) investigou cinco combinações de lastro de brita e escória siderúrgica (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) para estudar o comportamento dinâmico de uma pista teste de 50 metros utilizando um modelo do método de elementos finitos (MEF). Primeiramente, foram obtidos o módulo de elasticidade e os parâmetros Mohr-Coulomb para cada combinação. Depois, a investigação numérica avaliou o deslocamento do trilho, a aceleração do dormente, as taxas de amortecimento e a frequência dominante da via para os cinco modelos MEF. Os resultados mostraram que a adição de escória siderúrgica ao lastro de brita eleva o módulo de elasticidade em até 12% do que a amostra sem escória, melhorando o comportamento mecânico da via. Comparando com a camada sem escória, os deslocamentos dos trilhos diminuíram em 24%, 30%, 30% e 51% para as combinações, resultando em menos abrasão e deflexão da via. A escória siderúrgica também diminuiu a aceleração dos dormentes em até 86%, prolongando a vida útil dos elementos que compõem a estrutura ferroviária. Além disso, foi capaz de aumentar as taxas de amortecimento, mitigando a vibração causada pela passagem do trem. Para as camadas com 25% e 50% de escória siderúrgica, a frequência dominante aumentou em 26% e 40%, respectivamente.

Esmaeili, Nouri e Yousefian (2015), através da metodologia *Single Tie Push Test* (STPT), investigaram o efeito do lastro siderúrgico na resistência lateral das vias férreas, uma propriedade essencial para o seu bom desempenho e segurança. O estudo foi conduzido utilizando pistas de testes com lastros de escória siderúrgica e calcário. Foram comparadas as camadas de lastros sob as mesmas condições geométricas, em várias profundidades (30, 40 e 50cm), larguras (30 e 40cm) e alturas de ombro (0 e 10cm). Os resultados confirmaram um aumento de 27% na resistência lateral da via com lastro de escória siderúrgica em relação ao lastro de calcário.

Hussain e Hussaini (2022) realizaram uma revisão crítica da literatura, abordando as principais vantagens e desafios do uso da escória de aciaria como lastro ferroviário. Foram analisadas propriedades fundamentais para o bom desempenho operacional das vias férreas, como resistência ao cisalhamento, quebra de partículas, recalque, taxa de amortecimento, resistência lateral e módulo resiliente. A pesquisa revelou que a escória de aciaria apresenta maior densidade, resistência à abrasão e ângulo de atrito entre partículas em comparação com o lastro tradicional. Essas características conferem às escórias uma menor quebra de partículas, maior módulo resiliente e menor deformação permanente sob carga cíclica, o que pode melhorar a estabilidade e longevidade da via. Além disso, o uso da escória de aciaria como lastro resulta em menor tensão vertical e maior módulo do trilho.

Os autores supracitados também observaram que a utilização da escória de aciaria pode reduzir os custos de construção das vias lastradas, uma vez que o subproduto pode ser obtido gratuitamente nas siderúrgicas. Entretanto, eles destacam desafios, como a instabilidade volumétrica do material e a lixiviação de metais pesados - cromo, zinco, níquel, chumbo, entre outros -, que podem afetar a saúde humana. Contudo, os tratamentos da escória podem mitigar esses problemas. Outro desafio citado é o maior peso e dureza da escória, que pode aumentar os custos de transporte e manutenção. No geral, Hussain e Hussaini (2022) concluem que o lastro de escória de aciaria pode ser uma opção ambiental e economicamente viável.

Em suma, os estudos representam um avanço notável no desenvolvimento do agregado siderúrgico como uma alternativa de elevado potencial de aplicação como lastro. Os resultados das principais propriedades do lastro siderúrgico, incluindo os tratamentos realizados, estão apresentados na Tabela 7. Os valores destacados em vermelho indicam aqueles incompatíveis com as regulamentações exigidas.

Tabela 7 – Principais resultados dos lastros siderúrgicos

Propriedade	Valores		Pacheco (2006)	Sousa (2007)	Fernandes (2010)	Dayrell (2013)	Fernandes (2016)
	NBR 5564 (ABNT, 2021)	Manual (AREMA, 2013)	Envelhecida por mais de 6 meses	Após 6 meses de estocagem	Hidratação temporizada e carbonatação por 6 meses	Recém- produzida	Fusão com refratário de coqueria
	Brita natural	Escória	Gerdau (RJ)	Usiminas (MG)	Usiminas (MG)	Usiminas (MG)	Arcelor Mittal Tubarão (ES)
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Massa específica aparente (mínima)	2500kg/m <sup>3</sup>	2900kg/m <sup>3</sup>	3520kg/m <sup>3</sup>	3580kg/m <sup>3</sup>	3342kg/m <sup>3</sup>	3600kg/m <sup>3</sup>	3750kg/m <sup>3</sup>
Porosidade aparente (máxima)	2%	-	5,69%	2,66%	3,2%	1,5%	0,39%
Absorção de água (máxima)	2%	2%	2,23%	0,99%	1,29%	0,59%	0,14%
Resistência à intempérie (máxima)	10%	5%	<10%	1,07%	1,31%	4,23%	0,53%
Material pulverulento (máximo)	1%	1%	isento	0,3%	6,4%	0,25%	0,4%
Torrões de argila (máximo)	0,5%	0,5%	isento	0,23%	0,17%	0,17%	0,08%
Abrasão Los Angeles (máxima)	30%	30%	25,24%	11,2%	13,77%	15,3%	11,1%
Resistência ao choque - Tretón (máximo)	25%	-	3,54%	10,2%	7,74%	8,9%	9,4%
Teor de fragmentos macios e friáveis (máx.)	5%	-	isento	20,2%	4,77%	6,4%	3,9%
Expansão (máximo) (DNIT, 2017a; 2017b)	3%	-	<3%	*	<3% aos 45 dias	5,89%	*
Condutividade ou condutância (aos 90 dias de ensaio)	-	-	*	≈140μS/cm	50μS	9,6μS/cm**	≈125μS
Teor de CaO <sub>livre</sub>	-	-	0,22%	4,55%	0,61%	5,97%	2,42%

Notas: (\*) Ensaio não realizado pelo autor; (\*\*) Valor aos 25 dias de ensaio.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Salienta-se que os ensaios de resistência ao choque e teor de fragmentos macios e friáveis não possuem obrigatoriedade segundo a NBR 5564 (ABNT, 2021). Em relação à porosidade aparente, os estudos de Pacheco (2006), Sousa (2007) e Fernandes (2010) apresentaram resultados acima do limite máximo recomendado pela norma brasileira, que preconiza valores para materiais pétreos. O mesmo ocorreu com o ensaio de absorção de água na pesquisa de Pacheco (2006). Ambas as características podem indicar o comportamento do lastro siderúrgico em campo, possibilitando prever possíveis problemas e implementar correções. A porosidade do agregado siderúrgico ocorre devido às matérias-primas que o originam e de seu processo de produção, que é diferente da brita natural. Apesar do coproduto siderúrgico apresentar porosidade aparente e absorção de água superiores ao limite máximo preconizado (2%), esse material continua mostrando resistência à compressão equivalente à da brita natural (Barreto *et al.*, 2018). Nesse sentido, Barreto *et al.* (2018) citam que o limite estabelecido pela norma brasileira não deve ser aplicado para este material quando utilizado como lastro ferroviário. Além disso, o valor recomendado pela AREMA para absorção está relacionado não apenas a ciclos de molhagem e secagem, mas também à preocupação com a rápida deterioração do lastro durante os ciclos de congelamento e descongelamento, um fenômeno comum em países norte-americanos, mas que não se aplica ao clima do Brasil.

Outros dois estudos, Sousa (2007) e Dayrell (2013), tiveram resultados em desconformidade com a norma para o teor de fragmentos macios e friáveis. Essa propriedade é importante para identificar se o agregado siderúrgico é suscetível à degradação sob ação de intempéries ou carga repetidas, o que pode resultar em um lastro menos durável e estável, prejudicando o alinhamento da via e aumentando a necessidade de manutenção. No entanto, este ensaio é facultativo e, portanto, a norma brasileira não limita o uso de materiais que apresentem porcentagem superior ao máximo recomendado. Além dessa propriedade, a elevada quantidade de partículas pulverulentas, observada no estudo de Fernandes (2010), também pode contribuir para colmatação e redução da resistividade elétrica do lastro.

A expansão volumétrica observada no estudo de Dayrell (2013) excede os 3% admitidos pelo DNIT para agregado aplicados em pavimentos rodoviários. Por se

tratar de um ensaio com escória de aciaria recém-produzida e não submetida a nenhum tipo de tratamento, naturalmente a expansão será considerável, já que o  $\text{CaO}_{\text{livre}}$  e  $\text{MgO}$  não estarão quimicamente estabilizados. Esse resultado reforça a importância dos tratamentos aplicados aos agregados siderúrgicos antes de sua utilização como material ferroviário.

Concluindo essa seção, ainda que os estudos habilitem a utilização do agregado siderúrgico como lastro de ferrovias, existem lacunas que devem ser verificadas para embasar decisões sobre sua aplicação em escala industrial. Mesmo que pesquisas enfatizem o efeito das partículas finas (como de areia, carvão e argila) no comportamento do lastro, desempenho e manutenção dos trilhos (Bassey *et al.*, 2020; Ebrahimi, Tinjum e Edil, 2015), é necessário compreender em que medida o teor de partículas finas do lastro de agregado siderúrgico afeta o desempenho de sinalização das vias férreas e como sua ação cimentante pode influenciar na manutenção da via. Além disso, embora as pesquisas tenham analisado a expansibilidade do agregado siderúrgico em laboratório, é fundamental entender como a expansão pode, de fato, prejudicar o alinhamento dos trilhos em condições reais de campo considerando as condições brasileiras de tráfego. Ademais, para avaliar os impactos ambientais, o estudo da análise do ciclo de vida para o lastro siderúrgico surge como uma abordagem ambiental holística, pois se relaciona diretamente com as empresas na aplicação de um novo material.

## 2.6 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA E SUAS APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA FERROVIÁRIA E SIDERÚRGICA

### 2.6.1 Principais definições

A Análise do Ciclo de Vida (ACV), ou em inglês, "*Life Cycle Assessment*" não é recente, tendo sido utilizada desde a década de 1970 (Bressi *et al.*, 2018). Para entender a ACV é fundamental compreender a ideia de ciclo de vida de um produto. Conforme com Silva *et al.* (2015), esse ciclo consiste em uma série de estágios sucessivos e encadeados de um sistema de um produto, que se inicia na aquisição da matéria-prima ou na geração de seus recursos naturais e se estende até a

disposição final. A ACV é um método estabelecido que quantifica a carga ambiental dos processos e serviços de um produto ao longo de sua vida, ou seja, da extração das matérias-primas da natureza, fabricação, transporte, manutenção até a disposição final (Silva *et al.*, 2015; Bressi *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2024).

A estimativa das cargas ambientais associadas ao ciclo de vida de um produto ou serviço é realizada através da mensuração do consumo de fontes de energia, água e matérias-primas, conhecidas como “entradas”, e de todas as emissões gasosas, líquidas e sólidas, resíduos e outros, nomeados de “saídas” (Vignali, 2024). Essa metodologia possibilita avaliar as poupanças ambientais com a reutilização ou reciclagem de um produto, evitando a produção de materiais e energia (Vignali, 2024). A análise da ACV permite comparar diferentes produtos que apresentam funções semelhantes, identificar oportunidades mais ambientalmente vantajosas e promover o uso sustentável de recursos naturais (Bressi *et al.*, 2018; Vignali, 2024).

A metodologia para conduzir a ACV segue as recomendações da ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a; 2009b), que padronizam os estudos em quatro etapas: (1) definição de objetivo e escopo; (2) análise de inventário do ciclo de vida; (3) avaliação de impacto do ciclo de vida; e (4) interpretação. Na primeira etapa da ACV, são definidos o objetivo e escopo do estudo, incluindo a determinação do limite do sistema, ou seja, a abrangência da análise. Esse limite determina os fluxos de entrada e saída de materiais e energia incluídos na estrutura do sistema e que serão posteriormente quantificados. Comumente, os limites do sistema adotados são do “berço ao portão”, “berço ao local” ou “berço ao túmulo”. No escopo também é definida a Unidade Funcional (UF), que quantifica o material analisado e serve como referência à qual as entradas e saídas são associadas (ABNT, 2009a).

Na segunda fase, a análise de inventário do ciclo de vida, realiza-se a coleta de dados de entradas e saídas, que deve ser feito em todos os processos incluídos no limite do sistema estabelecido (Václavík *et al.*, 2020). Com base nos dados obtidos, a terceira fase, avaliação de impacto do ciclo de vida, quantifica os potenciais impactos ambientais através de categorias de impacto e indicadores de categoria selecionados (ABNT, 2009a), destacando as mudanças ambientais geradas pelas emissões e pelo consumo de recursos (Vignali, 2024). O agrupamento dessas informações permite a

interpretação do ciclo de vida, que é a última etapa da ACV, onde os resultados são verificados e avaliados criticamente, permitindo a tomada de decisão conforme o objetivo e o escopo definido no estudo. Diferentes softwares estão disponíveis para facilitar a coleta, organização e análise de dados, como SimaPro, Umberto, Gabi e OpenLCA (Li, Ling e Pan, 2022).

### **2.6.2 Aplicação de ACV a sistemas ferroviários**

A aplicação da ACV às estruturas ferroviárias, especialmente para a camada de lastro ou sublastro, é relativamente nova. As análises se concentram na avaliação comparativa do desempenho ambiental entre o lastro convencional e de diferentes tecnologias aplicadas a essa camada. Por exemplo, utilizando a ACV, Bressi *et al.* (2018) compararam uma seção ferroviária com camada de lastro tradicional a uma seção composta por lastros estabilizados com betume. A estabilização de lastro com betume, resina ou polímeros visa prolongar a vida útil do lastro e reduzir os encargos de manutenção da via devido à degradação do lastro e desalinhamento dos trilhos. Os autores concluíram que, em relação à fixação somente na camada de lastro, a utilização de betume reduz as cargas na maioria das categorias de impacto, como na eutrofização da água doce (24,55%) e marinha (16,33%), ecotoxicidade terrestre (14,09%) e esgotamento hídrico (12,91%). Esse resultado está relacionado à maior durabilidade e qualidade da via, diminuindo a frequência de renovação. Considerando todos os elementos, a seção com lastro de betume permitiu reduzir todas as categorias de impacto analisadas.

Vignali (2024) comparou uma via férrea tradicional lastrada com um sistema de via sem lastro, denominado lajes, para buscar a melhor opção relativa à durabilidade, manutenção e impacto ambiental. O autor concluiu que a via sem lastro é a melhor solução, uma vez que pode durar três vezes mais que a via férrea lastrada e apresenta metade do impacto nas alterações climáticas ( $3,33E+06\text{kgCO}_2\text{eq}$ ) em comparação com o sistema com lastro ( $1,75E+06\text{kgCO}_2\text{eq}$ ).

Pons *et al.* (2020) analisaram os potenciais impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de três sistemas ferroviários: trilho com lastro, trilho sobre dormentes

fundidos e trilho embutido. O estudo indicou que a ferrovia com lastro é a opção com menores emissões de CO<sub>2</sub> para uma vida útil de 50 e 75 anos, totalizando 1,5E+07kgCO<sub>2</sub> e 2,0E+07kgCO<sub>2</sub>, respectivamente. O sistema de trilhos embutidos foi considerado a pior alternativa, independente da vida útil, devido ao elevado consumo de concreto e aço.

### 2.6.3 Aplicação da ACV ao agregado siderúrgico

Por sua vez, o uso da metodologia de ACV para o agregado siderúrgico tem sido amplamente aplicado. As pesquisas fazem a comparação dos encargos ambientais entre materiais tradicionais e materiais produzidos com o agregado siderúrgico. Václavík *et al.* (2020) utilizaram a ACV para analisar e comparar os impactos ambientais do concreto com escória de aciaria como substituto ao agregado natural, e observaram uma redução dos impactos ambientais gerais do concreto de agregado siderúrgico (destruição da camada de ozônio, mudanças climáticas, uso da terra, ecotoxicidade, entre outros) em 7%, confirmando os benefícios sustentáveis da escória de aciaria na indústria da construção.

Mladenovič *et al.* (2015) fizeram a comparação entre as camadas de desgaste asfáltica com o uso de escória siderúrgica e com agregado silicoso. Os resultados indicaram que o uso da escória siderúrgica gera uma redução de aproximadamente 80% nas categorias de impacto de acidificação, eutrofização, criação de ozônio fotoquímico e toxicidade humana, mesmo considerando longas distâncias de transporte para a escória e distâncias mínimas para o agregado silicoso.

Xie *et al.* (2021) compararam o potencial de aquecimento global e o consumo de energia na construção de pavimentos asfálticos com e sem agregado BOF. Os autores concluíram que os pavimentos com agregado BOF reduziram em até 12% das emissões quando comparados ao pavimento comum. Além disso, a energia necessária para a produção do agregado BOF (0,024MJ/kg) foi de, aproximadamente, metade da energia necessária para a brita (0,044MJ/kg).

Faleschini, De Marzi e Pellegrino (2014) utilizaram a estrutura da ACV para comparar os impactos ambientais de dois tipos de concretos: o tradicional, produzido

com agregado natural, e o concreto reciclado, que utiliza a escória EAF como substituto do agregado graúdo. O estudo considerou os impactos gerados pelo processamento das matérias-primas e pela fabricação dos materiais, excluindo os efeitos do transporte e da produção final do concreto. Ao comparar a mesma UF para os agregados graúdos, os autores observaram que a escória EAF (3,09kgCO<sub>2</sub>/t) gera emissões significativamente menores para mudanças climáticas em relação ao agregado natural (8,47kgCO<sub>2</sub>/t). Conseqüentemente, o concreto reciclado produz menor emissão de CO<sub>2</sub> em comparação ao concreto tradicional.

Além de ser usada como agregado, as escórias também podem ser reduzidas a pó para compor os materiais. Palod, Deo e Ramtekkar (2019) utilizaram a escória de aciaria e a escória granulada moída de alto-forno como substitutos do cimento em diferentes proporções na fabricação de argamassas. Através da metodologia ACV, os autores encontraram uma queda significativa para o potencial de acidificação (36,55%), potencial de aquecimento global (38,9%), risco para a saúde humana (39,24%) e energia primária (38,15%) para as argamassas com as escórias quando comparadas com a argamassa convencional.

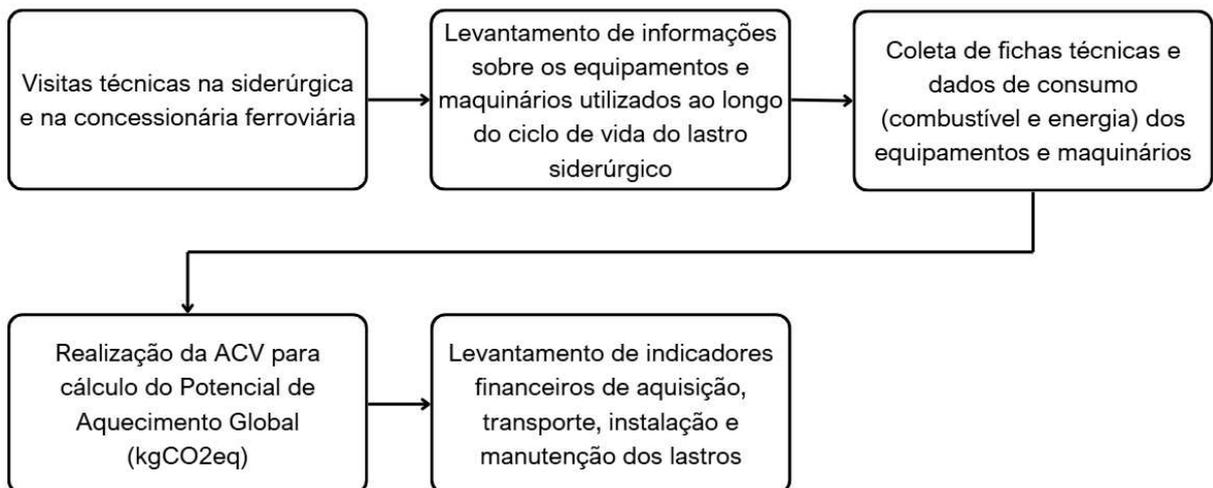
Devido à falta de dados para completar o inventário do ciclo de vida do agregado siderúrgico, ou por considerar que os impactos são mínimos ou semelhantes entre os materiais comparados (com e sem escória), a maioria dos estudos adotam o limite do sistema do “berço ao portão” (*cradle-to-gate*) (Li, Ling e Pan, 2022). Essa abordagem considera apenas a produção dos materiais estudados, omitindo as fases de uso, manutenção e fim de vida. Com isso, destaca-se a importância de obter e disponibilizar dados para o ciclo de vida completo do uso do agregado siderúrgico como material alternativo, com dados específicos locais, a fim de tornar as pesquisas futuras mais precisas e com dados atualizados. Além disso, embora diversos trabalhos já tenham aplicado a ACV ao uso de agregado siderúrgico em compósitos cimentícios, outra lacuna encontrada foi a avaliação desse material como lastro ferroviário.

### 3 METODOLOGIA

Para avaliar a viabilidade ambiental do uso do lastro siderúrgico, foi realizado o estudo de ACV de acordo com os princípios e diretrizes das normas ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). Este estudo visa calcular e comparar os potenciais impactos ambientais da via lastrada, que abrange quatro fases: (1) definição de objetivo e escopo; (2) inventário do ciclo de vida; (3) avaliação de impacto do ciclo de vida; e (4) interpretação. Além da ACV, foi conduzida uma análise de indicadores financeiros para determinar o custo total do ciclo de vida das ferrovias com os diferentes tipos de agregados para lastro, complementada por entrevistas com profissionais do setor ferroviário para ampliar o escopo da pesquisa.

Foram feitas visitas técnicas em uma indústria siderúrgica e em uma concessionária ferroviária, ambas situadas na região Sudeste do Brasil, para coletar dados para o estudo. Com a apuração de informações, foi possível iniciar o estudo e proceder a análise do inventário do ciclo de vida do lastro siderúrgico. A metodologia empregada está exemplificada no fluxograma da Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma: metodologia adotada



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

### 3.1 ACV - DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

#### 3.1.1 Objetivo da ACV

Esta ACV tem como objetivo principal comparar e identificar as etapas do ciclo de vida que mais contribuem para o potencial de aquecimento global, com base nas emissões de CO<sub>2</sub> equivalente, e avaliar os impactos econômicos de um sistema ferroviário de cargas do Sudeste do Brasil, considerando o uso de lastro de agregado siderúrgico em comparação com o lastro tradicional (brita natural). Os resultados dessa ACV visam orientar profissionais de Engenharia e empresas na escolha de um agregado tecnicamente viável e ambientalmente preferível para a construção da estrutura ferroviária ao longo do tempo, alavancando práticas sustentáveis para o setor.

Os lastros em questão devem resistir às cargas impostas pela passagem dos trens e são destinados a um trecho de tráfego comercial operado por uma concessionária ferroviária, responsável pelo transporte de cargas minerais e produtos agrícolas. Esses materiais de lastro estão sujeitos à degradação e, portanto, exigem manutenção.

#### 3.1.2 Unidade funcional

A Unidade Funcional (UF) é definida como a referência utilizada para estimar a quantidade de lastro siderúrgico e de brita natural para a ferrovia analisada. Ela serve como base para a coleta e análise dos dados de inventário, apresentação dos resultados da avaliação de impacto e comparação do desempenho ambiental dos dois tipos de lastro. Para a ferrovia em questão, a UF corresponde a 1 km da via férrea, que apresenta espessura da camada de lastro de 35cm, base do lastro de 510cm, ombro de 30cm e bitola de 1600mm. A linha é destinada ao transporte de cargas de até 32,5 toneladas por eixo, sendo que cada metro de via consome aproximadamente 2m<sup>3</sup> de material para ambas as situações (brita natural e agregado siderúrgico). Apesar de alguns autores indicarem que seria potencialmente possível usar um volume menor de lastro siderúrgico do que de lastro tradicional (Chamling, Haldar e Patra, 2020; Esmaeili, Nouri e Yousefian, 2015; Alavijeh, Mokhtari e Araei, 2024),

devido à falta de estudos quantitativos para essa potencial redução, foi adotado o mesmo volume para ambos.

O limite de tempo considerado para a vida útil dos lastros ferroviários abrange as fases de descarte e instalação inicial, e manutenção, definidas pelo período durante o qual eles são funcionalmente viáveis para a finalidade proposta. Para a concessionária ferroviária parceira desta pesquisa, o lastro de brita natural costuma ser totalmente substituído entre um intervalo de 8 a 12 anos, enquanto as operações de manutenção acontecem a cada 4 anos após sua instalação na ferrovia, de acordo com o tráfego da via e a quantidade de finos gerados. No caso do lastro siderúrgico, não foram encontrados dados na literatura que estabeleçam um período específico para sua substituição. Portanto, assumiu-se que o uso do agregado siderúrgico não causa diferenças significativas na vida útil da camada lastrada em relação ao lastro tradicional e que os intervalos de manutenção não diferem de forma expressiva entre os dois tipos lastro. Essas suposições foram baseadas nos resultados de ensaios de laboratório e em testes de campo relatadas na revisão. Assim, adotou-se um período de manutenção de 4 anos após a instalação inicial para ambos os tipos de lastro. Recomenda-se que mais estudos sejam realizados para comparar quantitativamente o desgaste do agregado siderúrgico em relação à brita natural ao longo do tempo.

Para 1 km de via férrea, a quantidade inicial de lastro siderúrgico necessária é de 3.344 toneladas. Considerando as operações de renovação do lastro, é necessário adicionar 1.672 toneladas (50% do volume inicial). Assim, o consumo total de lastro siderúrgico ao longo de sua vida útil é de 5.016 toneladas. Já para o lastro de brita natural, o consumo inicial é de 2.836 toneladas. Nas operações de renovação, adiciona-se 1.418 toneladas (50%), resultando em um consumo total de 4.254 toneladas. Esses valores refletem as etapas de instalação inicial e manutenção parcial do lastro. O desguarnecimento total ocorre com a substituição completa do material de lastro e o início de um novo ciclo de vida. No entanto, essa etapa final não é contabilizada para evitar a duplicação do processo, já que o desguarnecimento total é a operação realizada para a instalação do novo lastro no início da análise. A Tabela 8 apresenta as quantidades de lastros ferroviários utilizadas em cada etapa do ciclo de vida.

Tabela 8 – Consumo de lastros ferroviários relativos à UF durante a vida útil da ferrovia

Informações	Tipo de lastro	
	Agregado siderúrgico	Agregado natural
Massa unitária <sup>a</sup>	1672 kg/m <sup>3</sup>	1418 kg/m <sup>3</sup>
<b>Tamanho da ferrovia (UF)</b>	<b>1 km</b>	<b>1 km</b>
Intervalo de renovação	4 anos <sup>b</sup>	4 anos
Consumo de lastro na instalação (2 m <sup>3</sup> )	3.344 t	2.836 t
Número de atividades de renovação	1	1
Adição de lastro na renovação	1.672 t	1418 t
Consumo total	5.016 t	4.254 t

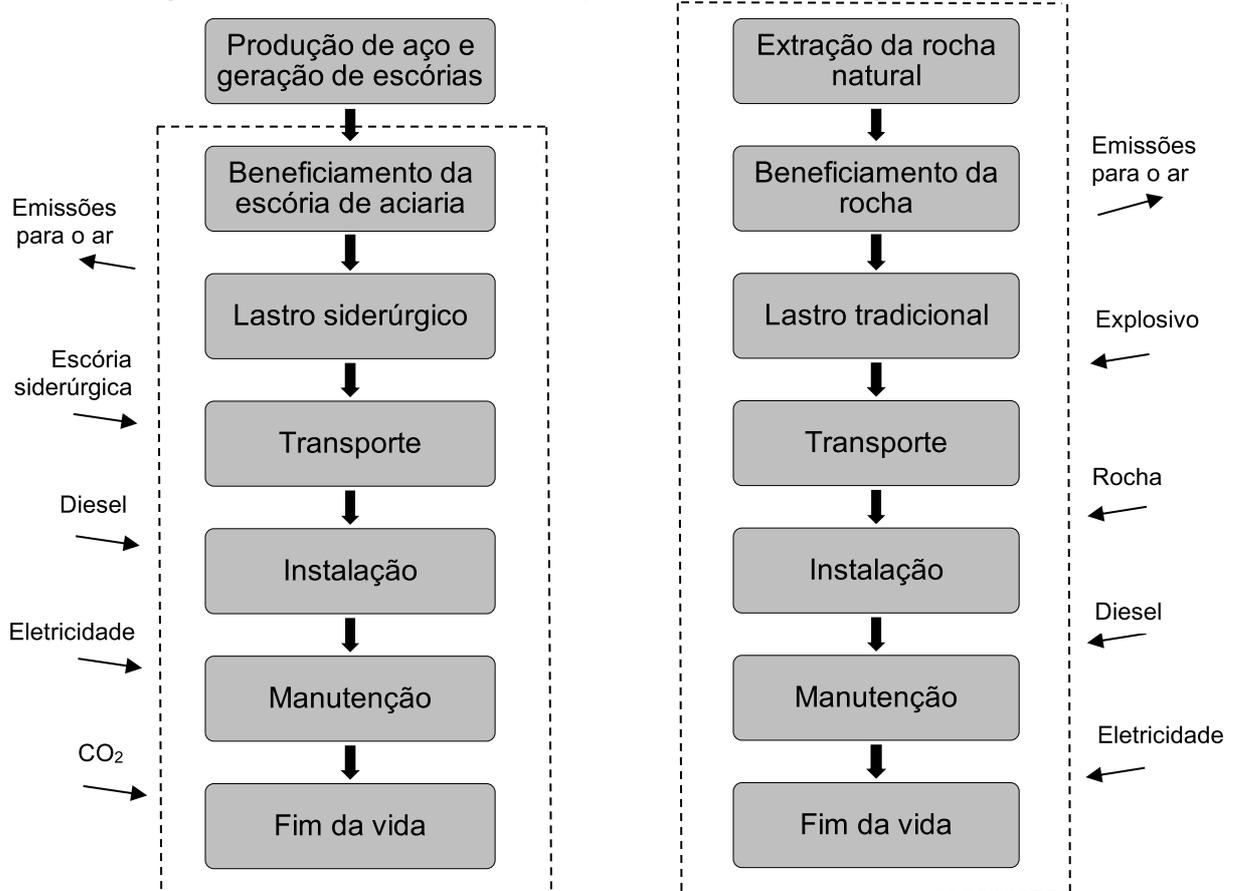
Nota: <sup>a</sup>Valor proveniente de ensaios realizados por um laboratório terceirizado nas amostras de agregado siderúrgico estocado no pátio da siderúrgica e em amostras de lastros de agregado natural da concessionária ferroviária; <sup>b</sup>Valor adotado conforme o praticado para o agregado natural, dada a falta de ensaios de desgaste a longo prazo do agregado siderúrgico.

Fonte: Elaborado pela autora (2025), com informações da concessionária ferroviária parceira.

### 3.1.3 Limites do sistema

A ACV foi feita com o limite do sistema do berço ao túmulo, incluindo a extração de recursos, movimentações e transportes, operação de equipamentos para processamento dos agregados e atividades de remoção, instalação e renovação dos lastros até o fim da vida útil, a fim de quantificar as principais diferenças ambientais da utilização do lastro tradicional e do lastro siderúrgico. Os encargos ambientais das etapas de produção do aço e geração de escórias, bem como o seu resfriamento não foram analisados, pois consideramos como parte intrínseca do processo produtivo do aço. Os limites do sistema das fases do ciclo de vida do lastro siderúrgico e lastro de brita natural estão ilustrados na Figura 19.

Figura 19 – Limites do sistema para o lastro siderúrgico e tradicional



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O processo de beneficiamento consiste nas etapas de britagem, peneiramento, separação magnética e estabilização química (cura) para o agregado siderúrgico; e britagem e peneiramento para o agregado natural. O transporte de cada material foi calculado com base nas distâncias reais entre os locais de beneficiamento dos agregados (siderúrgico e natural) e o pátio de descarregamento da concessionária ferroviária. A instalação dos lastros na ferrovia envolve as operações de remoção do lastro antigo que chegou no fim da vida útil, espalhamento do lastro novo, assentamento de trilhos e dormentes, correção geométrica e perfilagem, realizadas com o auxílio de equipamentos e maquinários, como a desguarnecedora, renovadora e socadora.

A etapa de manutenção refere-se às atividades de limpeza e renovação do lastro. Estudos anteriores que exploraram o uso do agregado siderúrgico como lastro ferroviário mostraram que, devido à sua maior resistência à abrasão, ao cisalhamento

e à dureza, menor quebra de partículas e menor deformação permanente de longo prazo sob carregamento cíclico (simulando a passagem repetida de trens), o lastro siderúrgico pode exigir menos operações de manutenção em comparação ao lastro de agregado natural durante sua vida útil (Olagunju *et al.*, 2023; Alavijeh, Mokhtari e Araei, 2024; Hussain e Hussaini, 2022; Delgado *et al.*, 2021; Chamling, Haldar e Patra, 2020). Entretanto, não foram encontrados estudos que traduzam essa menor frequência de manutenção em anos. Assim, foi adotada a periodicidade de renovação do lastro siderúrgico de 4 anos, com base no ciclo típico de manutenção do lastro tradicional.

Na etapa de fim de vida útil de ambos os tipos lastros, ocorre a remoção total do material e a substituição completa por novos lastros, sem a desmontagem de outros elementos da estrutura ferroviária, dando início a um novo ciclo de vida. Após essa etapa, propõe-se a destinação dos agregados removidos como material alternativo para a construção civil. Entretanto, os impactos ambientais associados à sua reutilização (como transporte, britagem e separação magnética) não são considerados nesta análise, pois atribuímos os impactos ao ciclo de vida do próximo produto. Os detalhes de cada fase do ciclo de vida dos dois tipos de lastro estão reunidos nos resultados.

## 3.2 ACV - INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

### 3.2.1 Fontes dos dados

A análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) corresponde à quantificação das entradas e saídas dos processos incluídos nos limites do sistema, como matérias-primas, energia, produtos, resíduos renováveis e emissões de poluentes, conforme a unidade funcional (Li *et al.*, 2024). Para este estudo, foram utilizados dados de inventário disponíveis na literatura para suporte adicional, enquanto os dados primários coletados referem-se ao ano de 2024. Todos os dados de correlação à unidade funcional foram realizados com o auxílio do software Microsoft Excel.

Para compor o ICV do lastro siderúrgico, foram coletados dados primários através de visitas técnicas às instalações da indústria siderúrgica e da concessionária

ferroviária, além de relatórios técnicos fornecidos pelas empresas envolvidas. As informações incluíram o consumo de diesel dos veículos, equipamentos e maquinários utilizados, permitindo o cálculo dos encargos diretos associados a esses consumos para modelagem dos dados do inventário. A maior parte das informações foi obtida da cooperação das empresas envolvidas neste estudo.

Para o ICV da produção de lastro de brita natural, foram utilizados os dados primários coletados por Rosado *et al.* (2017), uma vez que as representatividades geográficas e tecnológicas são semelhantes. O estudo em questão avalia os impactos ambientais de uma pedreira de basalto localizada no Sudeste do Brasil, destinada à base e sub-base de pavimentação de estradas, com capacidade de produção de 1500t/dia. Apesar da concessionária ferroviária estudada utilizar as rochas gnaisse e granito como lastro, os processos de britagem das rochas são semelhantes. Foram feitas as adaptações necessárias para adequar os dados à situação local.

### **3.2.2 Captura de CO<sub>2</sub>**

Foram encontrados diversos estudos sobre o potencial teórico de captura de CO<sub>2</sub> pelo agregado siderúrgico. Para este trabalho, foi desenvolvida uma metodologia própria adaptada às condições reais de campo do lastro siderúrgico. Essa quantificação foi determinada com base na análise da área superficial de amostras reais, uma vez que essa é a área efetivamente exposta ao CO<sub>2</sub> e, portanto, potencialmente reativa.

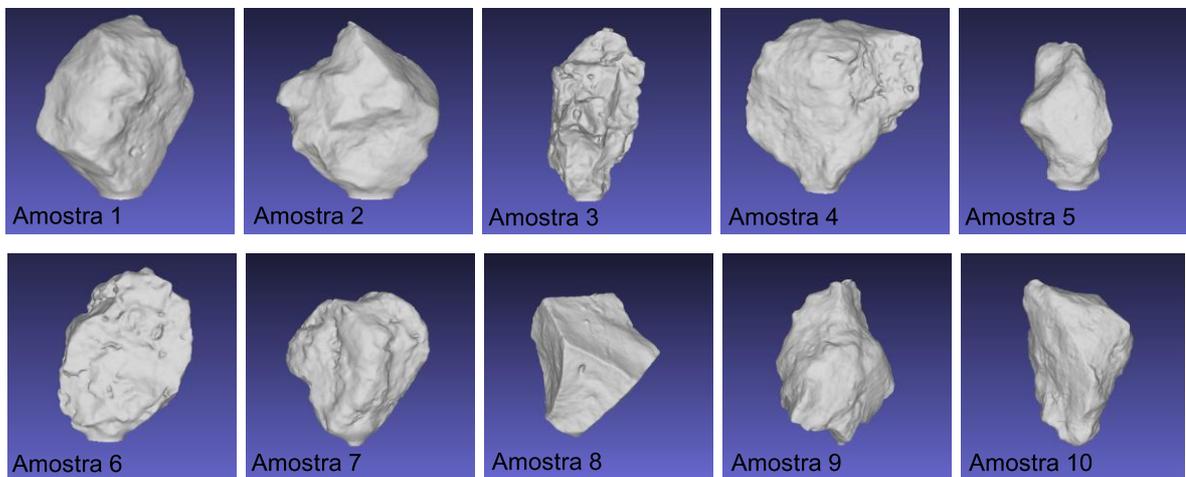
Para essa análise, foi realizada a digitalização de 10 amostras, fornecidas pela siderúrgica já em granulometria apropriada para lastro, por meio de um scanner 3D NextEngine em conjunto com o software ScanStudio (Figura 20). A determinação da área superficial foi feita por meio do programa MeshLab, que processou as amostras escaneadas (Figura 21).

Figura 20 – Amostra de escória no scanner NextEngine



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 21 – Modelos 3D das amostras visualizados no MeshLab



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para cálculo do volume reativo, foi considerado que apenas 1 mm de espessura a partir da superfície da escória participa da reação de carbonatação. Essa estimativa foi obtida a partir de um teste experimental com ácido fosfórico 85% PA. O ácido fosfórico é um reagente químico que promove reações ácido-base com minerais

carbonatados, como a calcita e a dolomita, resultando na decomposição dos carbonatos e na liberação de dióxido de carbono em forma gasosa (Burman *et al.*, 2005). Ao aspergir o ácido na amostra de agregado siderúrgico, observou-se a formação de bolhas na sua superfície externa, evidência da liberação de CO<sub>2</sub>, como mostrado na Figura 22. Esse CO<sub>2</sub> indica a presença de carbonatos formados anteriormente por meio da captura de CO<sub>2</sub> atmosférico pelo material.

Figura 22 – Formação gasosa de CO<sub>2</sub> no agregado siderúrgico após aspensão com ácido fosfórico



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

É importante destacar que a análise da profundidade de carbonatação não foi realizada por técnicas de microcaracterização avançada (como TGA/DTG, DSC, FTIR e DRX), uma vez que tais métodos exigem comumente procedimentos de corte ou cominuição que alterariam a morfologia e a integridade da amostra, impedindo a avaliação precisa da profundidade carbonatada. Ademais, a análise por MEV-EDS é pouco sensível a detecção de elementos leves, como o carbono e o oxigênio, devido

ao seu baixo número atômico, além da possibilidade de contaminações superficiais, o que dificultariam a confiabilidade da análise.

Dessa forma, a espessura de 1 mm foi considerada como limite reativo da escória. Esse valor está alinhado com estudos anteriores (Bonenfant *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2022), que indicam que a formação de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e de magnésio (MgCO<sub>3</sub>) na superfície do agregado siderúrgico leva a formação de uma camada passivadora que dificulta a penetração de CO<sub>2</sub> no interior do material. Embora não tenha sido considerado no presente trabalho, em amostras de maiores dimensões, a maior porosidade e a presença de canais podem favorecer a difusão de CO<sub>2</sub> e permitir a formação de carbonatos em áreas mais internas (Tian *et al.*, 2013).

Além disso, ao se levar em conta somente a granulometria inicial do lastro siderúrgico, desconsidera-se o aumento de área exposta à carbonatação ao longo do tempo, sendo que, com as operações ferroviárias e a consequente quebra de partículas, a área superficial se expande ampliando a capacidade de captura de CO<sub>2</sub>. Ainda assim, para fins de estimativa conservadora do volume carbonatado, considerou-se apenas essa fina camada externa como efetivamente ativa na reação com o dióxido de carbono durante a estabilização química do material.

O volume carbonatado ( $V_c$ ) do agregado siderúrgico calculado foi utilizado para estimar a massa teórica de CO<sub>2</sub> capturado (expressa em kgCO<sub>2</sub>/t). Esse cálculo baseou-se nos teores médios típicos de CaO e MgO presentes nas escórias de aciaria (observados na Tabela 5 da seção 2.3) e das suas respectivas massas molares ( $n_{CaO}$  e  $n_{MgO}$ ), como mostrado na Equação 5.

$$CO_2cap = V_c \times \mu \left[ \left( CaO\% \times \frac{n_{CO_2}}{n_{CaO}} \right) + \left( MgO\% \times \frac{n_{CO_2}}{n_{MgO}} \right) \right] \times \frac{1000}{m} \quad (5)$$

Onde:

$CO_2cap$ : massa de CO<sub>2</sub> capturado (em kgCO<sub>2</sub>/t);

$V_c$ : volume carbonatado da escória (cm<sup>3</sup>);

$\mu$ : massa específica da escória (2,918g/cm<sup>3</sup>);

CaO%: percentual médio de CaO na escória (42%, conforme a Tabela 5);

MgO%: percentual médio de MgO na escória (8%, conforme a Tabela 5);

$n_{CO_2}$ : massa molar do CO<sub>2</sub> (44,01g/mol);

$n_{CaO}$ : massa molar do CaO (56,8g/mol);

$n_{MgO}$ : massa molar do MgO (40,3g/mol);

$m$ : massa da amostra de escória (g).

A Tabela 9 apresenta os valores de captura de CO<sub>2</sub> encontrados individualmente para cada uma das amostras de agregado siderúrgico analisadas. Para a avaliação no inventário do ciclo de vida do lastro siderúrgico, adotou-se como valor a média aritmética entre as amostras, resultando em 56,93 kgCO<sub>2</sub>/t. Como esperado, esse valor é significativamente inferior ao obtido pela literatura, que varia entre 99 e 250 kgCO<sub>2</sub>/t. Entretanto, ele reflete condições mais realistas de carbonatação natural da escória em granulometria apropriada para lastro ferroviário.

Tabela 9 – Valores estimados de captura de CO<sub>2</sub> por tonelada de agregado siderúrgico para cada amostra

Amostra	Massa (g)	Área superficial no MeshLab (mm <sup>2</sup> )	Volume carbonatado com 1mm de espessura (cm <sup>3</sup> )	Volume x Massa específica (g)	CaO reativo (g)	MgO reativo (g)	Total (mol)	Capacidade teórica de captura (kgCO <sub>2</sub> /t)
1	157,9	7434,63	7,43	21,69	9,08	1,73	0,20	56,54
2	254,5	9769,99	9,77	28,51	11,94	2,27	0,27	46,10
3	184,4	9405,07	9,41	27,44	11,49	2,19	0,26	61,25
4	168,9	9201,36	9,20	26,85	11,24	2,14	0,25	65,42
5	244,1	10565,33	10,57	30,83	12,91	2,46	0,29	51,98
6	118,5	6966,84	6,97	20,33	8,51	1,62	0,19	70,60
7	88,4	6649,91	6,65	19,40	8,13	1,55	0,18	90,33
8	419	14080,80	14,08	41,09	17,21	3,28	0,38	40,36
9	328,6	12914,69	12,91	37,69	15,78	3,00	0,35	47,20
10	517,6	17032,94	17,03	49,70	20,81	3,96	0,46	39,52
								Média: 56,93

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

### 3.3 ACV - MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

A fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) relaciona os dados do inventário do ciclo de vida com as categorias de impacto especificadas, além de fornecer as informações para interpretação dos resultados (ABNT, 2009a; 2009b). De acordo com a ISO 14044 (ABNT, 2009b), essa etapa inclui obrigatoriamente a seleção das categorias de impacto, dos indicadores de categoria e do modelo de caracterização. Além disso, deve abranger a classificação, que associa os resultados do ICV às categorias de impacto, e a caracterização, que corresponde ao cálculo dos resultados por meio dos indicadores de categoria (ABNT, 2009b). Opcionalmente, a AICV pode incluir os processos de normalização, agrupamento, ponderação e análise da qualidade dos dados (ABNT, 2009b).

Essa análise foi conduzida na abordagem *midpoint*, utilizando um modelo de caracterização orientado a problemas específicos (Rosado *et al.*, 2017). Nesta pesquisa, a categoria de impacto selecionada foi o Potencial de Aquecimento Global (conhecido como pegada de carbono), considerada suficiente para atender ao objetivo e escopo desta ACV. A escolha está alinhada com a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a tendência global de descarbonização da indústria.

O aquecimento global está associado aos impactos climáticos globais, como o aumento da temperatura média da Terra, provocada pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de nitrogênio (N<sub>2</sub>O), clorofluorcarbonos (CFCs), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) e bromometano (CH<sub>3</sub>Br) (Rosado *et al.*, 2017). A quantificação desse impacto é expressa em equivalentes de dióxido de carbono (kgCO<sub>2</sub>eq). A Tabela 10 apresenta a categoria de impacto e os poluentes a ela associados considerados nesta ACV.

Tabela 10 – Categoria de impacto ambiental, poluentes emitidos durante o ciclo de vida e fatores de caracterização

<b>Categoria de Impacto Ambiental</b>	<b>Substâncias</b>	<b>Fator de caracterização</b>
Potencial de Aquecimento Global (kgCO <sub>2</sub> eq/kg) (100 anos)	Dióxido de Carbono	1,00E+00
	Monóxido de Carbono	1,90E+00
	Metano	2,80E+01
	Dióxido de Nitrogênio	2,65E+02

Fonte: IPCC (2013; 2007), adaptado.

O modelo de caracterização adotado baseou-se no Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential – GWP*), desenvolvido e publicado nos Relatórios de Avaliação do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013; 2007). Os fatores de caracterização expressam a contribuição relativa de cada poluente para a categoria de impacto. Ao multiplicar esses fatores pela quantidade de substância emitida, obtém-se o potencial de contribuição para a categoria de impacto ambiental, expressa em CO<sub>2</sub>eq. Para esta pesquisa, foram utilizados os fatores de caracterização para um horizonte de 100 anos, conforme apresentados na Tabela 10.

Com base no consumo de diesel dos equipamentos, veículos e maquinários utilizados ao longo do ciclo de vida dos lastros, foram estimadas as emissões de carbono equivalente, considerando as substâncias liberadas na queima do combustível (Tabela 11). O consumo de diesel foi calculado pelas horas de operação dos equipamentos, conforme a quantidade necessária de cada tipo de lastro para atender à UF, que está apresentado na seção 4.1.

Tabela 11 – Emissão de gases associadas ao consumo de diesel em kg de substância/MJ de diesel

<b>Substância</b>	<b>Fator de emissão (kg/MJ)</b>
CO <sub>2</sub>	7,41E-02
CO	1,30E-04
CH <sub>4</sub>	4,00E-06
N <sub>2</sub> O	6,00E-07

Fonte: MCTI (2020).

A avaliação dos impactos ambientais decorrentes do consumo de eletricidade foi baseada na composição da matriz energética brasileira. Em 2023, a geração de

eletricidade no Brasil foi composta por 58,9% de usinas hidrelétricas, 13,2% de energia eólica, 7% de energia solar, 2% de energia nuclear, 8% de outras fontes renováveis e 10,8% de outras fontes não-renováveis (EPE, 2023). O fator de emissão de CO<sub>2</sub> para a geração de eletricidade no país, calculado com base na média dos últimos 3 anos, foi de 69,17kgCO<sub>2</sub> por MWh, conforme dados do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2024) (Tabela 12).

Tabela 12 – Fatores anuais de emissão de CO<sub>2</sub> por ano para energia elétrica brasileira

<b>Ano</b>	<b>Fator médio (kgCO<sub>2</sub>/MWh)</b>
2021	126,4
2022	42,6
2023	38,5
<b>Média</b>	<b>69,17</b>

Fonte: MCTI (2024).

Segundo o IPCC (2014), as emissões diretas para veículos rodoviários pesados abastecidos por combustíveis fósseis variam entre 70gCO<sub>2</sub>/t.km e 190gCO<sub>2</sub>/t.km. Esse intervalo não inclui as emissões indiretas, como as associadas à fabricação do veículo, por exemplo. Para este estudo, foi adotado o valor médio de emissão de 130gCO<sub>2</sub>/t.km.

No caso do transporte ferroviário com trens de carga movido a diesel, as emissões variam entre 25gCO<sub>2</sub>/t.km a 60gCO<sub>2</sub>/t.km (IPCC, 2014). Para esta pesquisa, foi utilizado o valor médio de 42,5gCO<sub>2</sub>/t.km. As emissões de CO<sub>2</sub> referentes ao transporte, tanto por caminhão quanto por trem, foram calculadas com base na seguinte equação:

$$CO_2T = FET \times Q \times D \quad (6)$$

Onde CO<sub>2</sub>T é a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pelo transporte, em kgCO<sub>2</sub>; FET é o fator de emissão do transporte, em kgCO<sub>2</sub>/t.km; Q é a quantidade de agregado para lastro transportado, em toneladas (t); e D é a distância percorrida pelo veículo, em quilômetros (km).

### 3.4 ACV - INTERPRETAÇÃO

A fase de interpretação da ACV é responsável por fornecer análises críticas associadas ao objetivo e escopo da pesquisa, apresentando conclusões, recomendações e limitações para os tomadores de decisão (ABNT, 2009a; 2009b). Essa etapa inclui as verificações de completeza, sensibilidade e consistência (ABNT, 2009b) e foi conduzida durante todas as fases da pesquisa para facilitar a compreensão dos resultados.

A verificação de completeza é recomendada para garantir que todas as informações relevantes estejam completas e disponíveis. Neste estudo, essa verificação foi assegurada por meio dos dados do ICV.

A verificação de sensibilidade tem como objetivo avaliar a confiabilidade dos resultados, identificando as variáveis que possuem maior impacto sobre eles. Para isso, foi feita uma simulação com variações na distância de transporte do lastro siderúrgico, a fim de observar como essa mudança influencia os resultados. Além disso, para a captura de CO<sub>2</sub> do lastro siderúrgico, foi feita uma análise de sensibilidade utilizando os valores mínimos e máximos de teor de CaO e MgO presentes nas escórias de aciaria. Essa análise visa estimar e comparar os efeitos do sequestro de CO<sub>2</sub> sobre o potencial de aquecimento global, assegurando que os benefícios ambientais atribuídos à carbonatação não sejam minimizados ou superestimados.

Por fim, a verificação de consistência garante que os dados estejam alinhados com o objetivo e escopo da ACV. Essa análise considera se aspectos como a qualidade dos dados, diferenças regionais e temporais, fronteira do sistema e se o elemento de avaliação de impacto foi aplicado de maneira consistente. No presente estudo, essa verificação foi realizada durante as etapas de ICV e AICV.

### 3.5 LEVANTAMENTO DE INDICADORES FINANCEIROS

Assim como a avaliação das questões ambientais, a validação econômica é igualmente um fator importante a ser considerado em pavimentos ferroviários. O

levantamento financeiro dos agregados para lastro durante sua vida útil foi realizado junto com a análise ambiental, utilizando ferramentas complementares, a fim de ampliar o escopo da avaliação do ciclo de vida da ferrovia com os agregados para lastro. Essa análise visa mensurar as vantagens econômicas que a escolha do material pode proporcionar em relação ao custo total do seu ciclo de vida.

Na análise do custo de ciclo de vida, três categorias principais de custos podem ser contabilizadas: (I) custos de agência, que englobam as despesas com construção, manutenção e renovação; (II) custos de usuário, que estão relacionados aos atrasos no serviço devido às atividades de manutenção e renovação do lastro; e (III) custos de externalidade, associados aos impactos ambientais gerados durante o ciclo de vida do lastro (Giunta, Bressi e D'Angelo, 2018). Os custos de externalidade são chamados “custos virtuais”, já que não são incorporados no preço final do material (Giunta, Bressi e D'Angelo, 2018).

Neste estudo, para restringir a análise unicamente aos gastos que seriam gerados dentro dos limites do sistema determinado para o ciclo de vida dos lastros, foram considerados somente os custos de agência. Os custos de usuário não foram incluídos, uma vez que estão sujeitos à fatores externos relacionados a variáveis específicas da ferrovia, como as incertezas associadas ao tempo de interrupção. Já os custos de externalidade poderão ser incluídos em análises futuras para refletir o impacto ambiental dos lastros.

Para estimar os custos do ciclo de vida (CCV) dos agregados para lastro, considerando os custos de agência, foi calculado um custo total levando em conta as seguintes fases do ciclo de vida para cada tipo de lastro: aquisição do agregado, transporte, instalação na ferrovia, e renovação do lastro. A Equação 7.1 foi utilizada para o levantamento financeiro da ferrovia com os dos dois tipos de lastro.

$$CCV = C_A + C_T + C_C + C_M \quad (7.1)$$

Onde:

- CCV: custo total do ciclo de vida (em R\$);
- $C_A$ : custo de aquisição dos agregados para lastro (em R\$);
- $C_T$ : custo de transporte dos agregados (em R\$);

- $C_C$ : custo de instalação do lastro na ferrovia (em R\$);
- $C_M$ : custo de renovação do lastro (em R\$).

Os custos de aquisição dependem do valor inicial de compra dos agregados para lastro, considerando a quantidade necessária para atender à UF. Conforme Fernandes (2016), os custos iniciais de aquisição do lastro siderúrgico podem apresentar vantagens econômicas, sendo até 50% inferiores aos da brita natural. Na presente pesquisa, com base nos valores praticados em 2024 pela siderúrgica e pelos fornecedores da concessionária ferroviária, o valor por tonelada do agregado siderúrgico beneficiado corresponde a 8% do valor da tonelada da brita para lastro. Foi realizada uma simulação de variação no custo de aquisição do agregado siderúrgico para determinar até que ponto ele permanece competitivo.

Os custos vinculados à etapa de transporte dos agregados para lastro variam conforme o meio de transporte utilizado, a distância percorrida e a quantidade de lastro transportado. A estimativa de custo de transporte por caminhão foi baseada no caderno técnico de composição de custos do Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil (SINAPI), de fevereiro de 2025. O caderno apresenta um valor referencial de 1,30 R\$/t.km para o transporte de materiais por caminhão em distâncias médias de até 30 km (SINAPI, 2025). Assim, o custo total do transporte rodoviário foi calculado multiplicando esse valor pela massa total de lastro transportada e pela distância percorrida.

Já para o transporte ferroviário, o custo foi estimado com base nas tarifas referenciais da ANTT, que estabelecem o valor máximo permitido para a prestação do serviço. Essas tarifas variam de acordo com o tipo de carga transportada e a distância ferroviária. Para a escória siderúrgica, a tarifa máxima é composta por uma parcela fixa de 9,91 R\$/t e uma parcela variável de 0,2003 R\$/t.km (Tarifas de Referências ANTT, 2025). O custo total do transporte por ferrovia foi calculado multiplicando a distância percorrida pela parcela variável e somando-se o resultado à parcela fixa. O valor encontrado, expresso em R\$/t, corresponde a tarifa máxima aplicável pelo serviço e foi multiplicado pela massa total transportada, em toneladas, para obter o custo total. É importante destacar que esse custo representa uma estimativa

conservadora, já que a concessionária ferroviária responsável pela aquisição do lastro siderúrgico pode realizar o transporte internamente, o que eliminaria ou reduziria significativamente esse custo. Ressalta-se ainda que o total de toneladas-quilômetro transportadas, tanto por trem quanto por caminhão, está diretamente relacionado à quantidade de cada tipo de lastro necessária para atender à UF, correspondente a um trecho de 1 km de ferrovia.

Os custos de instalação dos lastros dependem principalmente das despesas com o consumo energético dos equipamentos e maquinários, variando conforme o consumo por hora de operação e o preço do óleo diesel na região. Em fevereiro de 2025, o preço do diesel era de 6,42 R\$/l (Petrobras, 2025). Já os custos associados à renovação dos lastros incluem o valor da aquisição de novos agregados. A Tabela 13 apresenta os custos considerados para o levantamento financeiro dos lastros siderúrgico e de brita natural por etapa do ciclo de vida.

Tabela 13 – Aspectos financeiros considerados no CCV da ferrovia

<b>Etapa</b>	<b>Lastro tradicional</b>	<b>Lastro siderúrgico</b>
Aquisição	• Custo da brita natural	• Custo do agregado siderúrgico tratado
Transporte	• Custo de transporte por caminhão (das pedreiras ao pátio de descarregamento da concessionária ferroviária)	• Custo de transporte por trem (do pátio de armazenamento da siderúrgica ao pátio de descarregamento da concessionária ferroviária)
Instalação	• Custo de consumo de combustível dos maquinários	• Custo de consumo de combustível dos maquinários
Manutenção	• Custo da brita natural	• Custo do agregado siderúrgico tratado

Fonte: Elaborado pela autora, com informações da concessionária ferroviária e da siderúrgica parceira (2025).

Como o objetivo da análise financeira é obter um valor do ciclo de vida do pavimento ferroviário, as saídas financeiras de aquisição futura do lastro com a manutenção também são analisadas. Para esse cálculo, inicialmente, foi calculado a aquisição dos agregados com os valores atuais. Posteriormente, os custos futuros foram estimados usando a matemática dos juros compostos, considerando o fator de inflação.

A inflação, que representa a perda do poder de compra do dinheiro, é monitorada e divulgada por meio de relatórios periódicos emitidos por órgãos de estatística. A fim de retratar o contexto brasileiro, utilizou-se o Índice de Preços ao Produtor (IPP), disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024). Considerou-se a variação correspondente ao mês de dezembro de 2024 para a categoria “indústria geral”, que foi de 9,28% (IBGE, 2024). A Equação 7.2 apresenta o cálculo para o valor futuro.

$$V_f = V(1 + i)^n \quad (7.2)$$

Onde:

- $V_f$ : Valor futuro (em R\$);
- $V$ : valor no ano base (em R\$);
- $i$ : taxa de inflação (9,28%);
- $n$ : período após a instalação (ano).

Um fator importante para análises de CCV é o Valor Presente Líquido (VPL) ou “*Net Present Value*”, um indicador econômico capaz de determinar o valor presente de gastos futuros, considerando a variação do valor do dinheiro ao longo do tempo. Isso significa que, em vez de somar todos os gastos previstos para um período de 10 anos, por exemplo, aplica-se uma taxa de desconto para trazer os custos futuros para o valor monetário atual, refletindo o que seria necessário hoje para suprir as necessidades do futuro. A estimativa de custos em VPL diminui as incertezas relacionadas à previsão da inflação. Neste estudo, foi considerada uma taxa de desconto de 4% (Giunta, Bressi e D'Angelo, 2018; Azadgoleh *et al.*, 2024). O valor presente para a etapa do ciclo de vida de renovação dos lastros foi calculado utilizando a equação 7.3.

$$VP = \frac{V_f}{(1 + i)^t} \quad (7.3)$$

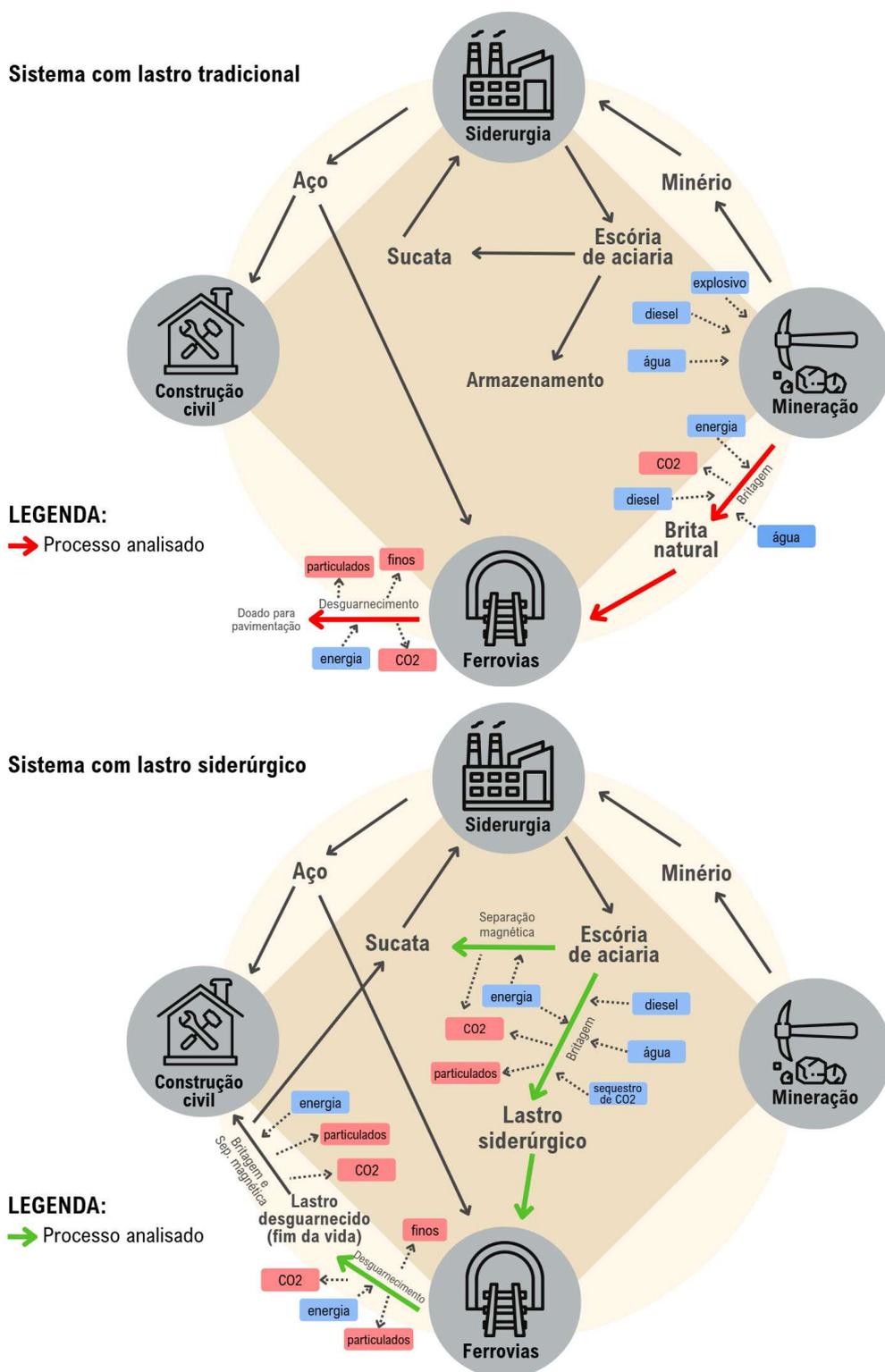
Onde:

- $VP$ : valor presente da etapa do ciclo de vida analisada;
- $V_f$ : Valor futuro da etapa do ciclo de vida (manutenção);
- $i$ : taxa de desconto (4%);
- $t$ : período após a instalação (ano).

## 4 RESULTADOS

Esta pesquisa teve como objetivo realizar um estudo ambiental, através da ACV, e uma avaliação financeira do uso do lastro siderúrgico em comparação ao lastro de rocha natural britada na ferrovia. Essa abordagem é importante para o setor ferroviário ao poupar o consumo de recursos naturais e quantificar os impactos ambientais atribuídos ao uso do agregado siderúrgico como material alternativo para lastro. Adicionalmente, ao final da vida útil, propõe-se o reaproveitamento do lastro desqualificado como material alternativo para a construção civil, com o beneficiamento para produção de agregado siderúrgico. Tal análise pode fortalecer a economia circular ao promover a parceria entre os setores siderúrgico, ferroviário e da construção civil. As interconexões entre esses setores, incluindo as principais entradas e saídas dos processos de beneficiamento dos agregados, estão esquematizadas na Figura 23.

Figura 23 – Sistema do ciclo de vida do lastro ferroviário tradicional e siderúrgico, com destaque para os fluxos que foram analisados no presente trabalho.

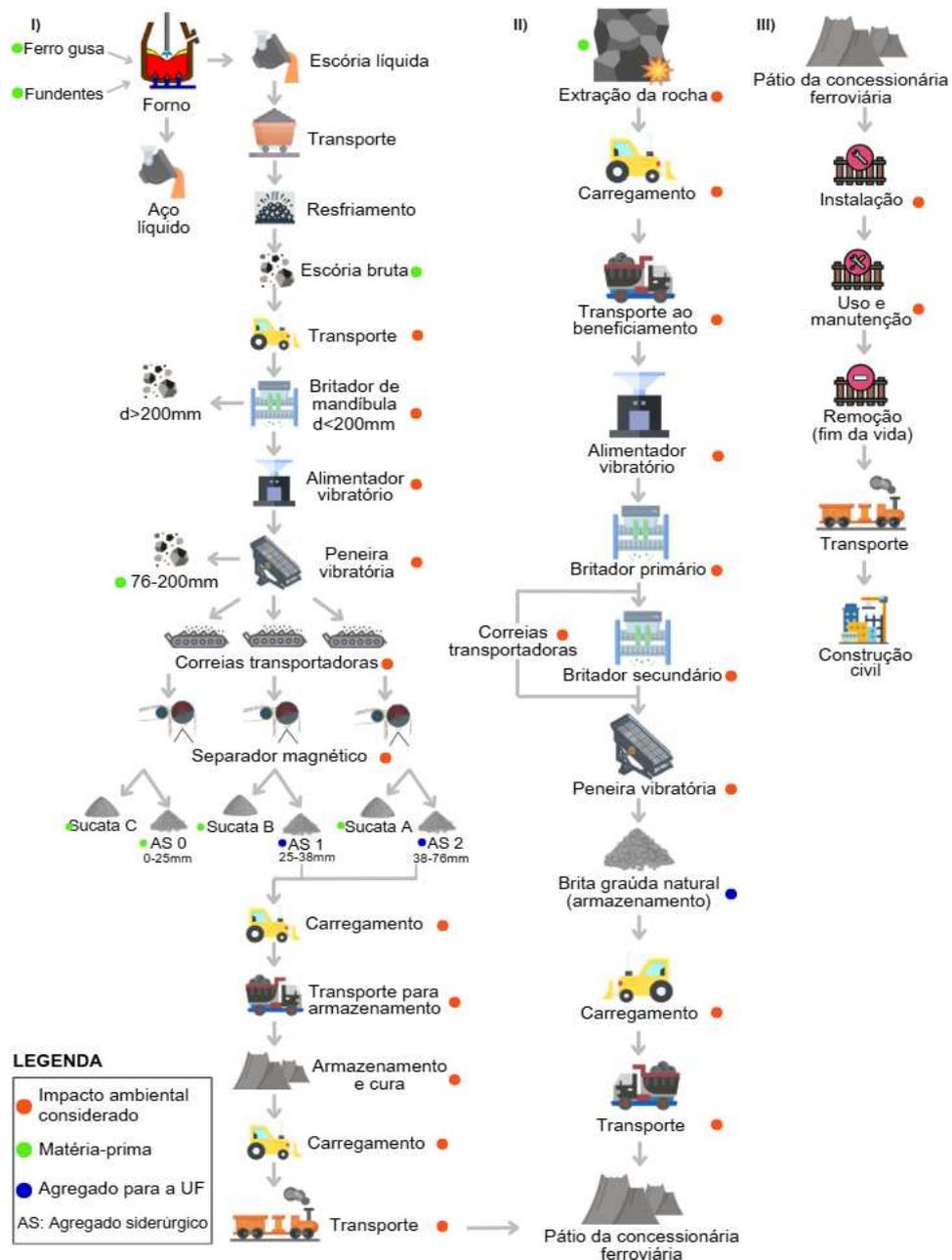


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

#### 4.1 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A Figura 24 ilustra as etapas do ciclo de vida cujos impactos ambientais foram considerados nesta ACV, tanto para o lastro siderúrgico quanto para o lastro tradicional, as quais são detalhadas ao longo desta seção.

Figura 24 – Etapas do ciclo de vida da ferrovia considerando: (I) a produção de lastro siderúrgico, (II) a produção de lastro tradicional e (III) a partir do pátio da concessionária ferroviária



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

#### **4.1.1 Ferrovia com lastro siderúrgico**

Conforme as informações fornecidas pela siderúrgica parceira deste trabalho, o processo de beneficiamento do agregado siderúrgico se inicia com o transporte da escória líquida até o pátio de beneficiamento, utilizando vagões. No pátio, a escória é cambada dos vagões em uma rampa de recebimento e, em seguida, resfriada. Os encargos das etapas de geração e resfriamento da escória não foram considerados neste estudo. Após o resfriamento, a escória bruta é coletada por uma pá carregadeira com capacidade de caçamba de 5,2m<sup>3</sup> e consumo médio de diesel de 19,1l/h. A pá carregadeira transporta o material por uma distância de 0,2 km até a planta de processamento. Por mês, cerca de 65 mil toneladas do resíduo são processadas.

Na planta de processamento, a escória de aciaria bruta, de diferentes tamanhos, é inicialmente submetida a um britador de mandíbula móvel de alta resistência. Esse equipamento possui capacidade de britagem de até 300t/h e consome, em média, 71,9l/h de diesel. O britador reduz as escórias de até 1000mm para granulometrias inferiores a 200mm (cerca de 6% do total processado). Materiais de elevada dimensão (superiores a 1000mm), conhecidos como sucata traseiro de planta (cerca de 5%), são reprocessados.

Após a britagem, a escória é conduzida para a planta móvel de recuperação de metais, equipada com um alimentador vibratório, uma peneira vibratória, correias transportadoras e três separadores magnéticos. Essa planta móvel possui capacidade de processamento de até 300t/h, com um consumo médio de diesel de 32,9l/h. O processo se inicia com a alimentação da escória no alimentador vibratório, que direciona o material para a peneira vibratória. Essa peneira separa o material em quatro faixas granulométricas: 76-200mm, 38-76mm, 25-38mm e 0-25mm. As escórias das três menores faixas são transportadas pelas correias até os separadores magnéticos, que recuperam o ferro metálico (sucata) correspondente a, aproximadamente, 24% do total processado. A sucata metálica recuperada é classificada em sucata A (38 - 76mm), sucata B (25 - 38mm) e sucata C (0 – 25mm). Elas são devolvidas à usina ou vendidas para a produção de aços longos, planos ou

para uso como sinter. O transporte de retorno à usina é realizado por vagões ferroviários.

O material não metálico (agregado siderúrgico) é classificado nas seguintes proporções médias: agregado siderúrgico 0 (0 – 25mm); agregado siderúrgico 1 (25 – 38mm); e agregado siderúrgico 2 (38 – 76mm), sendo mantidos no pátio. O material de 76 a 200mm, separado pela peneira, passa por um extrator metálico, e a sucata extraída é enviada para a aciaria de planos. Os agregados siderúrgicos 1 (25 – 38mm) e 2 (38 – 76mm), que apresentam granulometria adequada, são destinados ao uso como lastro ferroviário. A Tabela 14 apresenta a classificação detalhada dos agregados siderúrgicos e sucatas metálicas, bem como seus percentuais após o beneficiamento.

Tabela 14 – Proporções médias de produção de agregado siderúrgico durante o beneficiamento na siderúrgica estudada em 2024.

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>
Escória bruta > 1000mm <sup>a</sup>	11%
Agregado siderúrgico 0 (0 – 25mm)	25%
Agregado siderúrgico 1 (25 – 38mm)	25%
Agregado siderúrgico 2 (38 – 76mm)	15%
Sucatas A, B e C	24%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

Nota: <sup>a</sup>Dessa parcela, 55% é escória de aciaria e 45% é sucata traseiro de planta.

Fonte: Elaborado pela autora, com informações da siderúrgica parceira (2025).

A recuperação de metais no processo de beneficiamento da escória siderúrgica é amplamente reconhecida como um impacto positivo na pegada ambiental do aço. Isso ocorre porque a sucata metálica recuperada reduz a necessidade de ferro-gusa na fabricação do aço, diminuindo a extração de minério de ferro e o consumo de energia, o que evita emissões adicionais que impactam o meio ambiente. Por esse motivo, a recuperação de metais é contabilizada como um crédito ambiental. Estudos de ACV conduzidos por Evangelista, Rosado e Penteado (2018) e Turk *et al.* (2015) sobre o uso de agregado siderúrgico como material alternativo - como em blocos de concreto para pavimentação e concreto verde - identificaram benefícios ambientais

atribuídos à recuperação de sucata metálica. No entanto, esses benefícios não foram considerados neste estudo, uma vez que o crédito ambiental da recuperação da sucata já é comumente incorporado na análise ambiental do aço pelas próprias siderúrgicas. Isso evita a duplicação desses valores.

Após ser separado e classificado de acordo com a sua granulometria, o agregado siderúrgico é recolhido por uma pá carregadeira e carregado em um caminhão fora-de-estrada com capacidade de carga de 30t. O caminhão transporta o material por uma distância de 0,4 km até a área de estocagem. Na área de estocagem, o agregado é disposto em pilhas cônicas organizadas por granulometria e tempo estimado de armazenamento, criando lotes de controle. Informações detalhadas dos equipamentos e veículos utilizados no processo de beneficiamento e transporte interno do agregado siderúrgico estão disponíveis no Apêndice A. A Tabela 15 mostra os dados de entrada do processo de beneficiamento do agregado siderúrgico para lastro e os seus consumos relativos à unidade funcional (1 km de ferrovia).

Tabela 15 – Informações de entrada das etapas de beneficiamento do lastro siderúrgico

Etapa do ciclo de vida	Entrada	Dados	Quantidade <sup>a</sup>	Consumo	Fonte de dados
Britagem	Pá carregadeira	Consumo de diesel 19,1l/h	29,39l	1,04E+03MJ	Dados primários da empresa
	Britador de mandíbula	Consumo de diesel 71,9l/h	110,63l	3,93E+03MJ	Dados primários da empresa
Peneiramento	Planta móvel de recuperação de metais	Consumo de diesel 32,9l/h	50,62l	1,80E+03MJ	Dados primários da empresa
Transporte interno e armazenamento	Pá carregadeira	Consumo de diesel 19,1l/h	29,39l	1,04E+03MJ	Dados primários da empresa
	Caminhão fora-de-estrada 30t	Transporte do lastro siderúrgico até o local de estoque	-	2006,4t.km	Dados primários da empresa
	Pátio de armazenamento	Aterro industrial	-	5016t	Dados primários da empresa

Notas: <sup>a</sup> Quantidade referente à produção de 5016t de agregado siderúrgico para lastro.

Fonte: Elaborado pela autora, com informações da siderúrgica parceira (2025).

A quantidade de agregado siderúrgico não recuperado e armazenado é de cerca de 45.500t/mês. A planta de beneficiamento funciona 24 horas por dia, durante 7 dias por semana. As quantidades foram calculadas com base na capacidade de produção de agregado siderúrgico da siderúrgica (Tabela 16), permitindo a determinação do consumo energético por toneladas de agregado siderúrgico necessárias para a UF. Para o cálculo de consumo, foi considerada a densidade do diesel de 0,84kg/l e que o combustível possui 35,5MJ/l (MME, 2022).

Em outubro de 2024, o pátio de armazenamento da siderúrgica ocupava uma área de 260 mil m<sup>2</sup>, onde já estavam presentes 600 mil toneladas de agregado siderúrgico na granulometria para lastro ferroviário. Salienta-se que, com o beneficiamento, esse material deixa de ser um resíduo industrial e passa a ser considerado como um coproduto.

Tabela 16 – Capacidade de produção de agregado siderúrgico para lastro

Capacidade de produção	Unidade	Observação
45.500	t/mês	Quantidade de agregado siderúrgico beneficiado e armazenado
1.517	t/dia	A planta de beneficiamento funciona durante todo o mês (30 dias)
90,3	t/h	Beneficiamento total de agregado siderúrgico, considerando que 16,8h por dia são realmente trabalhadas <sup>a</sup>
36,1	t/h	Produção total de agregado siderúrgico para lastro (1 e 2) conforme a Tabela 14

Nota: <sup>a</sup> A planta de beneficiamento opera em regime contínuo. No entanto, de acordo com Coelho e Brito (2013), o processo inclui paradas para carga, descarga e manutenção dos equipamentos. Por essa razão, apenas 70% do período total trabalhado deve ser considerado.

Fonte: Elaborado pela autora, com informações da siderúrgica parceira (2025).

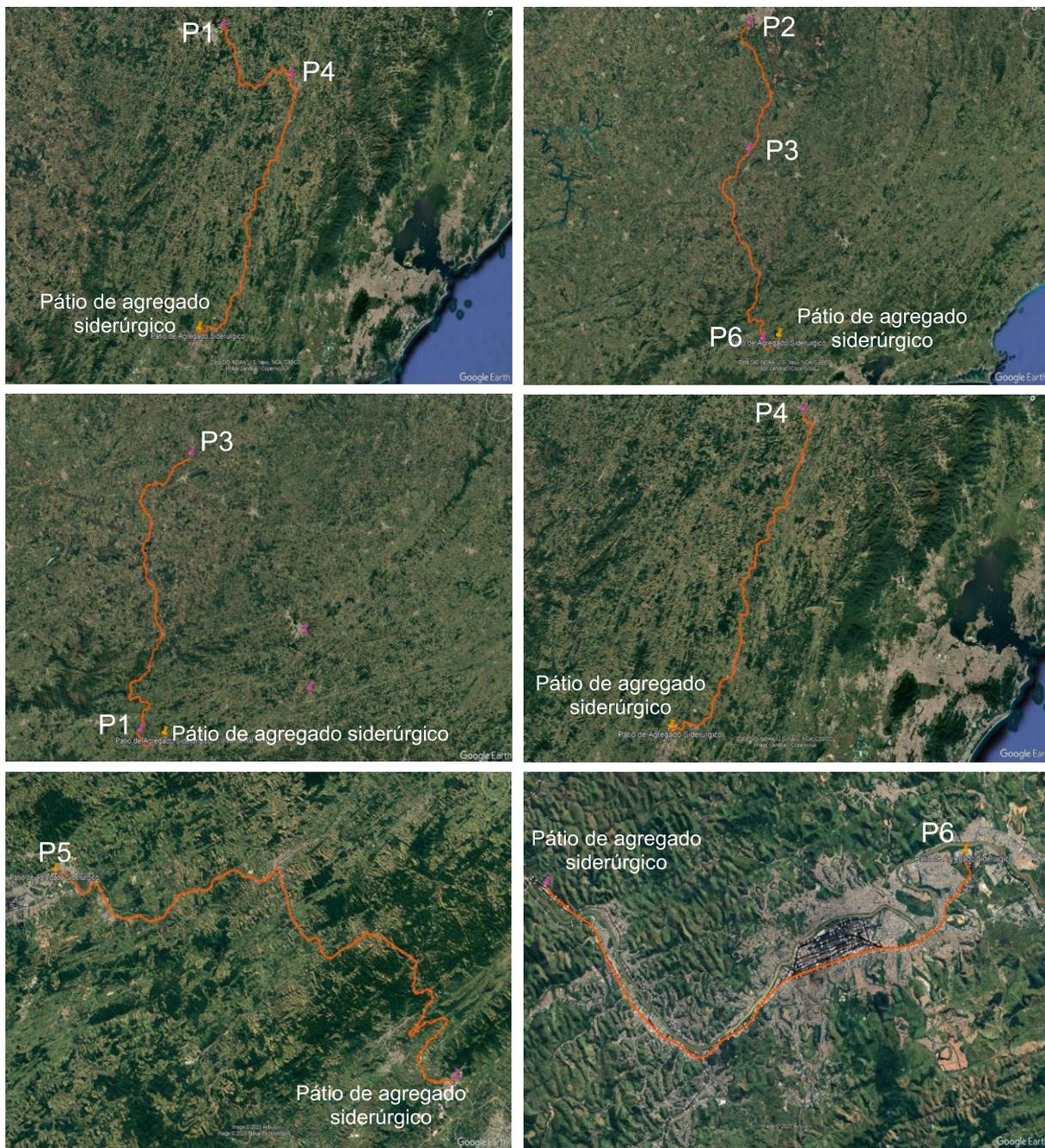
Enquanto armazenado no pátio ao ar livre, o agregado siderúrgico é submetido aos processos de cura (estabilização química), durante os quais é capaz de capturar CO<sub>2</sub>. Para essa captura, foi adotado o valor de 56,93 kgCO<sub>2</sub>/t, estimado a partir do cálculo da massa teórica de CO<sub>2</sub> capturado. Esse armazenamento foi contabilizado como um crédito ambiental, representado por valores negativos que podem ser subtraídos do impacto total.

Após o período adequado de cura, o material é recolhido por uma pá carregadeira e transportado até o pátio de descarregamento da concessionária ferroviária. Presume-se que esse transporte seja realizado integralmente por via

férrea, pois o pátio da siderúrgica possui conexão direta com os pátios de descarregamento da concessionária ferroviária. A capacidade total de carga para cada vagão é de 50m<sup>3</sup> ou 72,5 toneladas. Os pátios da concessionária são localizados adjacentes ao trecho ferroviário, não sendo necessário longos deslocamentos.

A concessionária ferroviária possui seis pátios de descarregamento distribuídos ao longo da malha férrea sob sua operação. Para determinar a distância de transporte do lastro siderúrgico, foram traçados os percursos ferroviários utilizando a ferramenta de “caminho” do Google Earth Pro, garantindo a maior precisão possível (Figura 25). A Tabela 17 apresenta as distâncias calculadas entre o pátio de armazenamento da siderúrgica e os pátios de descarregamento da concessionária. Nota-se que os pátios de descarregamento da brita foram determinados com base na proximidade das pedreiras que atualmente fornecem a brita para o lastro tradicional. Potencialmente, em um cenário futuro em que a rocha britada é parcial ou completamente substituída pelo lastro siderúrgico, pátios em localizações mais estratégicas poderiam ser implantados. Dessa forma, as distâncias de transporte adotadas neste estudo podem ser consideradas conservadoras.

Figura 25 – Localização e trajetos ferroviários mapeados no Google Earth: do pátio da siderúrgica aos pátios de descarregamento de agregados da concessionária ferroviária



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Tabela 17 – Distâncias entre o pátio de armazenamento da siderúrgica e os pátios de descarregamento da concessionária ferroviária

<b>Pátio de armazenamento</b>	<b>Pátios de descarregamento</b>	<b>Distância (km)</b>
Pátio de agregado siderúrgico	P1	193,0
	P2	419,6
	P3	251,6
	P4	128,0
	P5	79,4
	P6	21,6
	Média:	182,2

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para a presente análise, todos esses trechos foram considerados em bom estado para o transporte do lastro siderúrgico, pois representam o percurso mais acessível. Para quantificar os dados de entrada dessa etapa do ciclo de vida do lastro siderúrgico, a distância de transporte foi considerada como a média aritmética entre as distâncias do pátio de agregado siderúrgico aos pátios de descarregamento, correspondendo a 182,2 km. A média ponderada não foi aplicada devido indisponibilidade de informações sobre o volume médio de material destinado a cada pátio de descarregamento. A Tabela 18 apresenta os dados de entrada para o transporte do lastro siderúrgico até o pátio de descarregamento da concessionária ferroviária e os seus consumos relativos à unidade funcional (1 km de ferrovia).

Tabela 18 – Informações de entrada da etapa de transporte do lastro siderúrgico até o pátio da concessionária ferroviária

<b>Etapa do ciclo de vida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Dados</b>	<b>Quantidade <sup>a</sup></b>	<b>Consumo</b>	<b>Fonte de dados</b>
Transporte	Pá carregadeira	Consumo de diesel 19,1l/h	29,39l	1,04E+03MJ	Dados primários da empresa
	Trem de carga	Transporte do lastro siderúrgico	-	9,14E+05t.km	Dados primários

Nota: <sup>a</sup> Quantidade referente à 5016t de lastro siderúrgico.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A etapa de instalação do novo lastro na ferrovia envolve as seguintes atividades:

- Remoção do lastro antigo contaminado: realizada com o uso da desguarnecedora que consome, em média, 24l/h de diesel;
- Troca de dormentes e substituição dos trilhos: feita com o auxílio da renovadora, demandando um consumo médio de 6,05l/h de diesel. O espalhamento do lastro é realizado manualmente a partir das comportas dos vagões;
- Socaria mecanizada e correção geométrica: alinhamento e nivelamento dos trilhos utilizando a socadora, cujo consumo de diesel é de 63,8l/h;
- Regulagem e perfilagem do lastro: realizada após a ação da socadora, utilizando a reguladora, com um consumo de 60l/h. A socadora e a reguladora trabalham em conjunto.

Segundo a concessionária ferroviária envolvida nesta pesquisa, os mesmos equipamentos usados para o lastro tradicional podem ser empregados para o lastro siderúrgico. Dentre as estratégias adotadas para a manutenção, muitas são realizadas manualmente, consistindo em uma limpeza de 10cm de lastro abaixo dos dormentes com o uso de enxadas. Por esse motivo, considerou-se que 50% do lastro ferroviário é renovado ao longo do seu ciclo de vida. Durante essa renovação, nenhum outro elemento da estrutura ferroviária é removido ou desmontado, somente o lastro é substituído, o que elimina a necessidade do uso de equipamentos como a renovadora.

A Tabela 19 apresenta os dados de entrada para as atividades de instalação e manutenção do lastro ferroviário e seus respectivos consumos para 1 km de ferrovia. Detalhes sobre os maquinários utilizados no processo de instalação estão disponíveis no Apêndice B.

Tabela 19 – Informações de entrada das etapas de instalação e renovação do lastro ferroviário

<b>Etapa do ciclo de vida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Dados</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Consumo</b>	<b>Fonte de dados</b>
Instalação	Desguarnecedora C-75	Consumo de diesel 24l/h	190,48l	6,76E+03MJ	Dados primários da empresa
	Renovadora P-190	Consumo de diesel 6,05l/h	35,17l	1,25E+03MJ	Dados primários da empresa
	Socadora 09-3X	Consumo de diesel 63,8l/h	42,53l	1,51E+03MJ	Dados primários da empresa
	Reguladora SSP 110	Consumo de diesel 60l/h	60l	2,13E+03MJ	Dados primários da empresa
Renovação do lastro	Trabalho manual			0,00E+0MJ	Dados primários da empresa

Fonte: Elaborado pela autora, com informações da concessionária ferroviária parceira (2025).

Em relação ao cenário de fim de vida, o lastro siderúrgico, após ser desguarnecido, pode desempenhar novas funções em outras aplicações industriais. Entretanto, para determinadas destinações finais, como o uso na manutenção de estradas ou como agregado para concreto, seria necessário reprocessá-lo para remover eventuais frações metálicas antes de sua reutilização e ajustar a granulometria. Os benefícios associados a possível reutilização e reciclagem do lastro siderúrgico não foram incluídos no limite do sistema analisado, tampouco os impactos relacionados ao transporte para locais de reaproveitamento. Além disso, a geração de pulverulentos em todo o processo e, ocasionalmente, o consumo de água para aspergir os agregados siderúrgicos e acelerar a cura, também não foram considerados neste estudo. O foco permaneceu nos encargos associados exclusivamente ao fim da vida útil do agregado siderúrgico como lastro ferroviário, em termos de potencial de aquecimento global (kgCO<sub>2</sub>eq).

#### 4.1.2 Ferrovia com lastro tradicional

Os encargos associados ao lastro tradicional foram obtidos a partir dos dados primários disponibilizados por Rosado *et al.* (2017). De acordo com os autores, o processo de britagem dos agregados naturais na pedreira inicia-se com a perfuração da rocha, realizada por uma sonda equipada com um compressor, que consome aproximadamente 32,5l/h de diesel. Após a perfuração, são inseridos explosivos para fragmentar e extrair a rocha. Durante toda a operação, água é consumida para diminuir as emissões de poeira, sendo utilizados 150l/dia.

A rocha extraída é carregada por uma escavadeira hidráulica equipada com uma caçamba de 3m<sup>3</sup>, que consome, em média, 26,5l/h de diesel até um caminhão fora-de-estrada, com capacidade de 28 toneladas (13l/h) (Rosado *et al.*, 2017). O caminhão transporta o material por aproximadamente 1 km até a unidade de processamento (Rosado *et al.*, 2017). Nesse local, a rocha passa por etapas de processamento que incluem o uso de alimentadores vibratórios, britadores de mandíbula, correias transportadoras e peneiras vibratórias, responsáveis pela separação do material em diferentes faixas granulométricas (Rosado *et al.*, 2017).

Para esta pesquisa, foram considerados apenas os consumos dos equipamentos necessários para a produção de brita na granulometria específica para lastro (12,5 - 50,8mm), evitando a inclusão de encargos adicionais. Conforme Rosado *et al.* (2017), a rocha extraída segue para um alimentador vibratório e, em seguida, para um britador primário, que gera a bica corrida (0-50mm). Posteriormente, o material passa por um britador secundário, composto por dois britadores cônicos e uma peneira vibratória, que classifica os agregados de acordo com a demanda do cliente. Durante esse processamento, são utilizadas correias transportadoras e alimentadores vibratórios (Rosado *et al.*, 2017).

A fonte energética de todos os equipamentos utilizados é a elétrica e alguns motores consomem óleos lubrificantes (Rosado *et al.*, 2017). A pedreira opera por 9 horas diárias, 6 dias por semana, com uma produção de 167 toneladas de brita natural por hora (Rosado *et al.*, 2017). Os dados dos equipamentos considerados no processamento da brita natural para lastro estão disponíveis no Apêndice C. A Tabela

20 apresenta os dados de entrada referentes a essa etapa do ciclo de vida, bem como os seus respectivos consumos relacionados à unidade funcional (1 km de ferrovia).

Tabela 20 – Informações de entrada da etapa de processamento do lastro tradicional

Etapa do ciclo de vida	Entrada	Dados	Quantidade <sup>a</sup>	Consumo	Fonte de dados
Extração da rocha	Explosão	Explosivo Tovex 145g/t	-	6,17E+02kg	Rosado <i>et al.</i> (2017)
	Equipamento de perfuração com compressor	Consumo de diesel 32,5l/h	4,98l	1,77E+02MJ	Rosado <i>et al.</i> (2017)
Carregamento do caminhão	Escavadeira hidráulica	Consumo de diesel 26,5l/h	4,06l	1,44E+02MJ	Rosado <i>et al.</i> (2017)
Movimentação	Caminhão fora-de-estrada 28t	Transporte da rocha extraída até o britador por caminhão	-	4254t.km	Rosado <i>et al.</i> (2017)
Britagem e peneiramento	Equipamentos	Potência total dos equipamentos	-	9,78E+03kWh	Rosado <i>et al.</i> (2017)
Armazenamento	Pátio de estocagem	Armazenamento temporário	-	4254t	Rosado <i>et al.</i> (2017)

Nota: <sup>a</sup> Quantidade referente à 4254t de lastro tradicional.

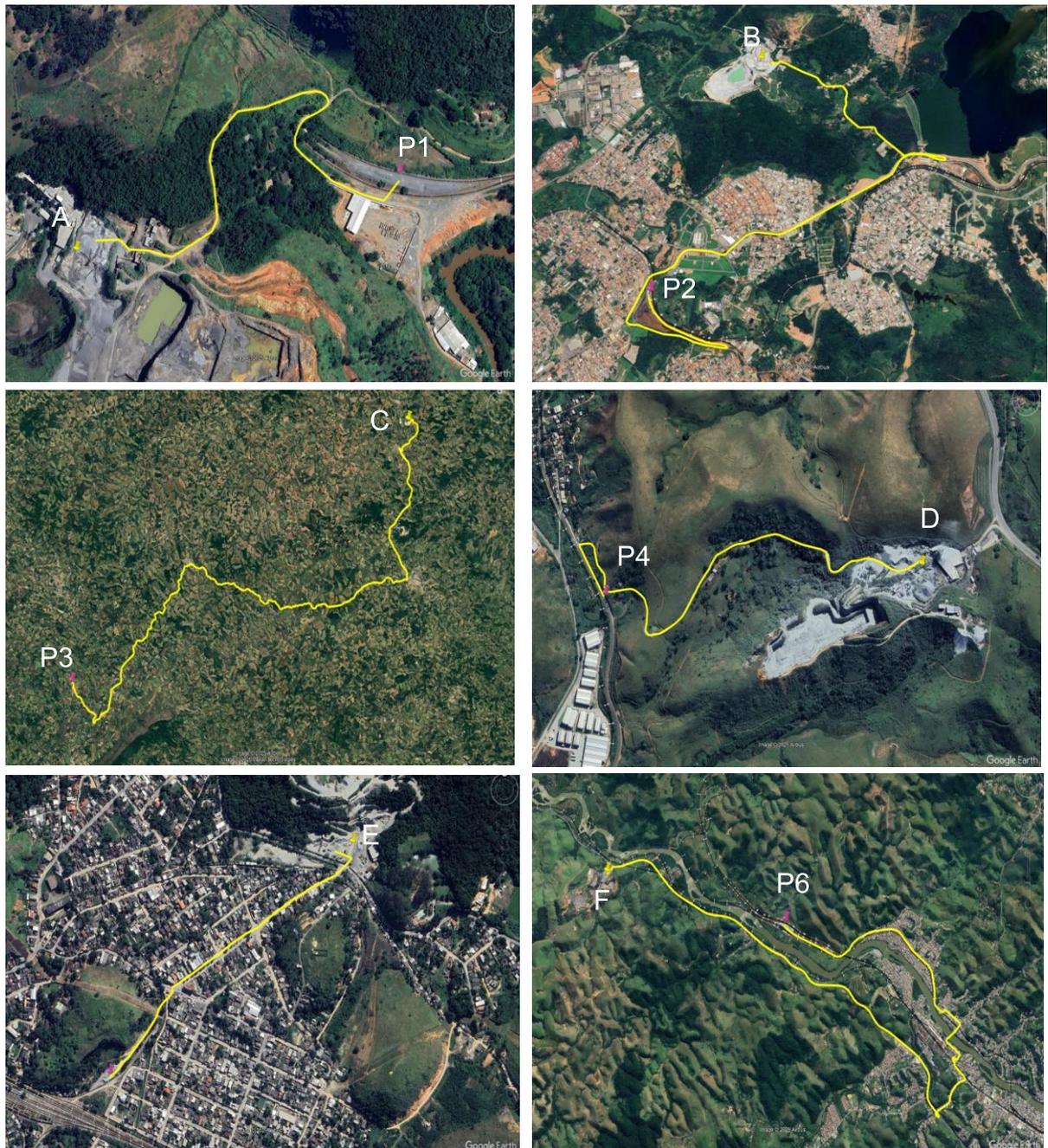
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Para o transporte do lastro de brita natural até o pátio de descarregamento da concessionária ferroviária, foi considerado que a brita é recolhida por uma pá carregadeira e transportada em caminhões. A realização desse transporte é terceirizada, permitindo o uso de diferentes tipos de caminhões. Neste estudo, foi considerado o uso de caminhões tipo carreta, com capacidade de 25t. Ressalta-se que o volume transportado varia entre os tipos de lastros, uma vez que o agregado siderúrgico possui massa específica aparente maior que o agregado natural.

A concessionária ferroviária recebe brita para lastro de 13 pedreiras, que abastecem 6 pátios de descarregamento distribuídos ao longo da malha férrea operada. Para determinar a distância de transporte da brita natural para lastro, foram identificados, através da localização de marcadores no Google Earth Pro, as pedreiras mais próximas a cada pátio, ou seja, aquelas que permitiriam um menor percurso dos

caminhões, alinhando-se a uma possível estratégia logística da concessionária. Após essa identificação, as distâncias de transporte rodoviário foram traçadas e estimadas usando a ferramenta de “caminho” do Google Earth Pro, garantindo maior precisão possível (Figura 26).

Figura 26 – Localização e trajetos rodoviários mapeados no Google Earth: das pedreiras aos pátios de descarregamento da concessionária ferroviária



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Tabela 21 apresenta o resultado das distâncias entre as pedreiras e os pátios de descarregamento. Os pátios de descarregamento são localizados adjacentes ao trecho ferroviário, não sendo necessário longos deslocamentos.

Tabela 21 – Distâncias entre as pedreiras e os pátios de descarregamento da concessionária ferroviária

<b>Pedreiras</b>	<b>Pátios de descarregamento</b>	<b>Distância (km)</b>
A	P1	1,0
B	P2	8,86
C	P3	87,5
D	P4	2,22
E	P5	0,98
F	P6	17,0
<b>Média:</b>		<b>19,6</b>

Fonte: Elaborado pela autora, com informações da concessionária ferroviária parceira (2025).

Para determinação dos dados de entrada dessa etapa do ciclo de vida da ferrovia com lastro tradicional, a distância de transporte foi considerada como a média aritmética entre as distâncias das pedreiras até os pátios de descarregamento, correspondendo a 19,6 km. A média ponderada não foi aplicada devido indisponibilidade de informações sobre o volume médio de material destinado a cada pátio de descarregamento. A Tabela 22 apresenta os dados de entrada para o transporte do lastro tradicional até o pátio de descarregamento da concessionária ferroviária e os seus consumos relativos a uma unidade funcional.

Tabela 22 – Informações de entrada da etapa de transporte do lastro de brita natural até a concessionária ferroviária

<b>Etapa do ciclo de vida</b>	<b>Entrada</b>	<b>Dados</b>	<b>Quantidade <sup>a</sup></b>	<b>Consumo</b>	<b>Fonte de dados</b>
Transporte	Pá carregadeira	Consumo de diesel 19,1l/h	2,93l	1,04E+02MJ	Dados primários da empresa
	Caminhão carreta 25t	Transporte do agregado natural para lastro	-	8,34E+04t.km	Dados primários

Nota: <sup>a</sup> Quantidade referente à 4254t de lastro tradicional.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A partir do pátio de descarregamento da concessionária ferroviária, a ferrovia com o lastro tradicional e o siderúrgico passa pelos mesmos processos. Embora o consumo de lastro tradicional seja menor devido à sua menor massa unitária, os encargos associados às fases de remoção, instalação e renovação lastro permanecem inalterados. Isso ocorre porque a produtividade dos equipamentos é medida em m/h com base nas dimensões da camada de lastro da ferrovia, que permanecem as mesmas independentemente do tipo de lastro utilizado. Nesse sentido, as entradas e consumos dos equipamentos e maquinários usados nessas etapas do ciclo de vida para o lastro tradicional são os mesmos apresentados na Tabela 19 da subseção anterior.

Em relação ao cenário de fim de vida, os lastros tradicionais, após o desguarnecimento, são geralmente doados para prefeituras para uso em construções e manutenções de estradas, sem desempenhar qualquer função estrutural. Outra alternativa é serem reutilizados na reconstrução de ferrovias ou outras construções, passando ou não por tratamentos adicionais, contribuindo para economia circular (Rak *et al.*, 2022). Os benefícios associados à reutilização e reciclagem desses lastros não foram considerados, tampouco os impactos relacionados ao transporte para possíveis locais de reaproveitamento. Os limites do sistema foram definidos como os encargos ambientais associados exclusivamente ao fim da vida útil da ferrovia com o lastro tradicional.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA: QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL

Com a realização dos inventários do ciclo de vida para os dois cenários apresentados, foi possível quantificar os fluxos de saída de cada tipo de lastro, considerando a UF de 1 km de ferrovia. Na fase de AICV, a quantidade de CO<sub>2</sub>eq emitida foi calculada com base nos fatores de caracterização para a categoria de impacto analisada, extraídos do IPCC (2013; 2007). O objetivo foi identificar e comparar as principais fontes de contribuição para o potencial de aquecimento global associado à infraestrutura de transporte ferroviário de cargas no Sudeste do Brasil.

#### 4.2.1 Contribuição do lastro siderúrgico para o potencial de aquecimento global

A Tabela 23 apresenta os resultados de caracterização por etapa do ciclo de vida da ferrovia com lastro siderúrgico, expressos em kgCO<sub>2</sub>eq/UF, representando o potencial de aquecimento global. A etapa do ciclo de vida que mais contribui para esse impacto é o transporte dos lastros (3,89E+04kgCO<sub>2</sub>eq), devido às emissões de CO<sub>2</sub>eq associadas ao consumo de combustível pelo trem. Como esse cálculo considera, além da massa transportada, a distância média entre o pátio de armazenamento da siderúrgica e os pátios de descarregamento da concessionária, distribuídos em diferentes locais da região, as emissões de CO<sub>2</sub>eq é uma variável relativa, podendo diminuir ou aumentar conforme a distância percorrida pelo trem. Nos estudos de ACV com escória, a distância de transporte deve ser cuidadosamente analisada, especialmente porque os agregados siderúrgicos possuem maior massa em comparação os agregados naturais. Já o potencial de aquecimento global associado à etapa de instalação está relacionado à liberação de gases da combustão do diesel consumido pelos maquinários utilizados nesse processo.

Tabela 23 – Resultados de caracterização por etapa do ciclo de vida da ferrovia com lastro siderúrgico

<b>Etapa do ciclo de vida do lastro siderúrgico</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq/UF</b>	<b>Proporção<sup>a</sup> (%)</b>
Britagem	3,71E+02	0,91
Peneiramento	1,34E+02	0,33
Transporte interno	3,39E+02	0,83
Armazenamento	-2,86E+05	-
Transporte	3,89E+04	95,78
Instalação	8,69E+02	2,14
Manutenção	0,00E+00	0

Nota: <sup>a</sup> Proporção calculada desconsiderando-se a captura de CO<sub>2</sub> durante a etapa de armazenamento.

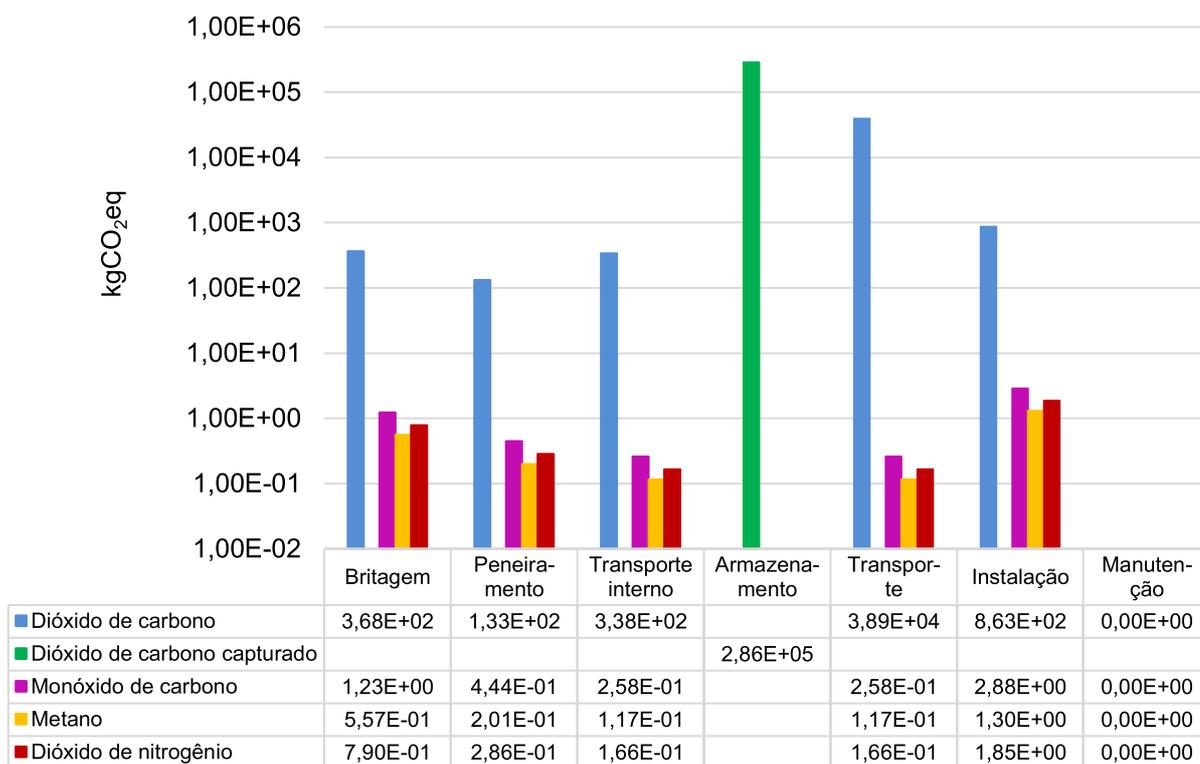
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A etapa de armazenamento exerceu um impacto positivo na redução do potencial de aquecimento global, resultando em -2,86E+05kgCO<sub>2</sub>eq. Isso ocorre porque, durante a estabilização química por cura, os agregados siderúrgicos

armazenados são capazes de capturar CO<sub>2</sub>. Dessa forma, o armazenamento foi contabilizado como um crédito ambiental, representado por valores negativos que podem ser subtraídos do impacto total.

A Figura 27 ilustra a análise de contribuição das substâncias para o aquecimento global em cada etapa do ciclo de vida da ferrovia com o lastro siderúrgico. As emissões dos gases estão relacionadas ao consumo de óleo diesel nos processos de britagem, peneiramento, transporte interno e instalação, além das emissões de CO<sub>2</sub> geradas pelo transporte ferroviário do lastro, calculadas conforme os parâmetros do IPCC (2014).

Figura 27 – Análise de contribuição das substâncias da ferrovia com lastro siderúrgico para o aquecimento global



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

De acordo com o IPCC (2014), o dióxido de carbono é o principal gás de efeito estufa emitido pelo transporte ferroviário. Neste estudo, considerando as emissões de GEE sem o crédito de carbono do armazenamento, o CO<sub>2</sub> corresponde a 99,97% das emissões totais, enquanto os demais gases (CO, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) somam apenas 0,03%.

#### 4.2.2 Contribuição do lastro tradicional para o potencial de aquecimento global

A Tabela 24 apresenta os resultados de caracterização por etapa do ciclo de vida da ferrovia com lastro de brita natural, expressos em kgCO<sub>2</sub>eq/UF, evidenciando seu potencial de aquecimento global. Os resultados indicam que a etapa de transporte dos lastros por caminhão é a principal responsável para a categoria de impacto analisada, com um valor de 1,08E+04kgCO<sub>2</sub>eq/km, representando 83,6% das emissões totais. Esse impacto está diretamente relacionado ao consumo de óleo diesel pela pá carregadeira e pelo caminhão, responsável pelo transporte do lastro da pedreira até o pátio de descarregamento da concessionária ferroviária.

Tabela 24 – Resultados de caracterização por etapa do ciclo de vida da ferrovia com lastro de brita natural

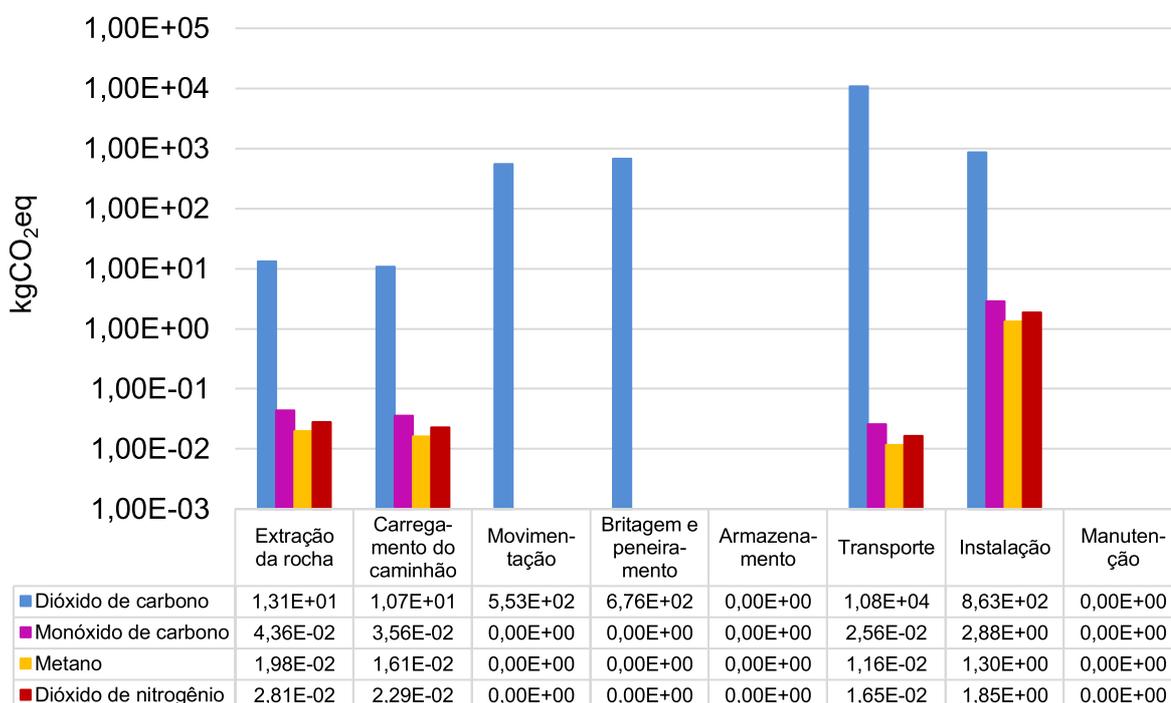
<b>Etapa do ciclo de vida do lastro de brita</b>	<b>kgCO<sub>2</sub>eq/UF</b>	<b>Proporção (%)</b>
Extração da rocha	1,32E+01	0,10
Carregamento do caminhão	1,08E+01	0,08
Movimentação	5,53E+02	4,27
Britagem e peneiramento	6,76E+02	5,22
Armazenamento	0,00E+00	0
Transporte	1,08E+04	83,63
Instalação	8,69E+02	6,70
Manutenção	0,00E+00	0

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

As etapas iniciais de extração da rocha e carregamento do caminhão apresentam menor impacto para essa categoria. Durante a extração, o uso de explosivos gera emissões de NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> e material particulado, além de impactos associados à extração de alumínio para a fabricação dos explosivos (Rosado *et al.*, 2017). Esses fatores contribuem para as categorias de “inorgânicos respiratórios” e “ecotoxicidade terrestre” (Rosado *et al.*, 2017), que não foram analisadas nesta pesquisa. Portanto, a principal contribuição para o aquecimento global nesta etapa do ciclo de vida ocorre devido ao consumo de diesel pela sonda de perfuração, resultando em 1,32E+01kgCO<sub>2</sub>eq.

A Figura 28 apresenta uma análise de contribuição das substâncias para o aquecimento global em cada etapa do ciclo de vida da ferrovia com lastro tradicional. Os impactos estão relacionados ao consumo de diesel durante a extração da rocha, carregamento, movimentação e instalação do lastro; ao consumo de eletricidade nas etapas de britagem e peneiramento; além das emissões de CO<sub>2</sub> geradas pelo transporte do lastro por caminhão.

Figura 28 – Análise de contribuição das substâncias da ferrovia com lastro tradicional para o aquecimento global



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

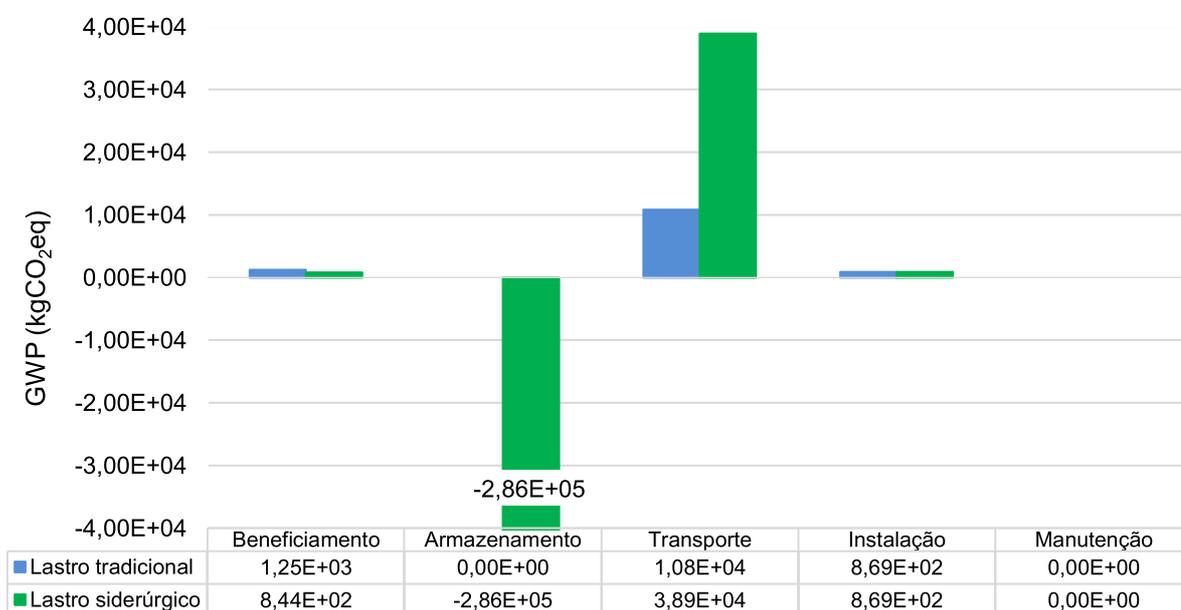
Dentre os processos realizados ainda na pedreira, a etapa de britagem e peneiramento se destaca como a maior contribuinte para as emissões de CO<sub>2</sub>eq devido ao consumo de eletricidade, representando aproximadamente 5,22% do total. Embora a matriz energética brasileira seja predominantemente composta pelo uso de energia hidrelétrica (58,9%) (EPE, 2023), o uso de combustíveis fósseis ainda é o principal responsável para as emissões de CO<sub>2</sub>, causando o impacto no aquecimento global (Rosado *et al.*, 2017).

No ciclo de vida do lastro tradicional, o CO<sub>2</sub> representa 99,95% das emissões totais, enquanto os demais gases somam apenas 0,05%. Esses resultados confirmam que o CO<sub>2</sub> é o principal responsável para o potencial de aquecimento global ao longo do ciclo de vida da ferrovia.

#### 4.2.3 Desempenho ambiental do lastro siderúrgico *versus* lastro tradicional

A Figura 29 compara os dois tipos de lastro, considerando as emissões em kgCO<sub>2</sub>eq/km calculada na ACV. Na fase de beneficiamento, que inclui os processos de extração, movimentação interna, britagem e peneiramento para o lastro tradicional; e britagem, peneiramento, separação magnética e transporte interno para o lastro siderúrgico, observa-se que o potencial de aquecimento global do lastro siderúrgico é menor. Os valores obtidos foram 1,25E+03kgCO<sub>2</sub>eq para o lastro tradicional contra 8,44E+02kgCO<sub>2</sub>eq para o lastro siderúrgico, evidenciando um benefício expressivo.

Figura 29 – Comparação do potencial de aquecimento global entre o lastro siderúrgico e o lastro tradicional por etapa do ciclo de vida



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

No transporte dos lastros até o pátio da concessionária ferroviária, embora o trem de carga apresente menor emissão de CO<sub>2</sub> por tonelada-quilômetro

(0,0425kgCO<sub>2</sub>/t.km) em comparação ao caminhão (0,13kgCO<sub>2</sub>/t.km), o potencial de aquecimento global do transporte do lastro siderúrgico (3,89E+04kgCO<sub>2</sub>eq) é maior do que o do lastro tradicional (1,08E+04kgCO<sub>2</sub>eq). Isso ocorre porque a quantidade de lastro siderúrgico transportado e a distância percorrida pelo trem são relativamente maiores do que no caso da brita, na configuração atual dos pátios da concessionária. Esse resultado reforça a influência da massa unitária dos agregados e a distância de transporte nas emissões de carbono. Todavia, em um cenário futuro no qual o lastro tradicional venha a ser parcial ou totalmente substituído pelo lastro siderúrgico, pátios de descarregamento mais estrategicamente localizados poderiam ser implantados, a fim de otimizar a logística de transporte do agregado siderúrgico.

Para que a economia circular seja eficiente, é importante evitar longas distâncias de transporte de materiais, já que o uso de materiais alternativos pode apresentar desvantagens ambientais caso envolva grandes deslocamentos, afetando negativamente os resultados finais da ACV. Adicionalmente, se o transporte do lastro siderúrgico fosse feito por caminhões, o impacto seria 3 vezes maior do que pelo trem e suas vantagens ambientais seriam minimizadas, mesmo considerando-se seu potencial de captura de CO<sub>2</sub>.

No que tange à etapa de instalação dos lastros na ferrovia, a análise individual indica que tanto o lastro siderúrgico quanto o lastro tradicional apresentam impactos semelhantes no potencial de aquecimento global (8,69E+02kgCO<sub>2</sub>eq). Isso se deve ao fato de que os maquinários utilizados em ambas as alternativas de lastro possuem o mesmo consumo de diesel, independentemente do volume de lastro utilizado. Entretanto, é importante destacar que esse cenário depende da suposição de que ambos os lastros exigem a mesma periodicidade de desguarnecimento total. Caso o lastro siderúrgico apresente menor durabilidade e demande intervenções mais frequentes, essa fase do ciclo de vida poderá gerar emissões adicionais de CO<sub>2</sub>eq, comprometendo sua vantagem ambiental. Embora não tenham sido encontrados trabalhos com esse tipo de análise a longo prazo, observa-se que a escória tratada possui valores de resistência a abrasão Los Angeles e valor de impacto similares ou até superiores aos das rochas britadas em alguns casos (Chamling, Haldar e Patra, 2020; Esmaili, Yousefian e Ghahroudi, 2017; Hussain e Hussaini, 2022). Essas

propriedades indicam que o lastro siderúrgico teria um desempenho ao menos equivalente ao lastro convencional, do ponto de vista mecânico. Recomenda-se, contudo, a realização de estudos complementares para avaliação de outros fatores, como colmatação e condutividade elétrica associadas à geração de finos.

Considerando as emissões dos gases poluentes ao longo do ciclo de vida completo dos dois cenários, observa-se que a etapa de instalação do lastro tradicional apresenta uma maior contribuição para o aquecimento global (6,7%) em comparação à ferrovia com lastro siderúrgico (2,1%). Essas emissões estão relacionadas ao consumo de óleo diesel pelos maquinários usados durante a instalação. Já a etapa de manutenção, por envolver atividades manuais sem o uso de equipamentos específicos, não gera emissões de GEE em nenhum dos dois cenários, não impactando a categoria de potencial de aquecimento global analisada.

De modo geral, o benefício ambiental do uso do lastro siderúrgico ( $-2,45E+05\text{kgCO}_2\text{eq}$ ) é significativamente menor em comparação com o impacto do lastro de brita natural ( $1,30E+04\text{kgCO}_2\text{eq}$ ). Essa vantagem se mantém superior mesmo com a longa distância de transporte do agregado siderúrgico até o pátio da concessionária ferroviária e ao maior volume necessário para atender o 1 km de ferrovia determinado na UF. A principal vantagem ambiental desse lastro alternativo está na captura de  $\text{CO}_2$  durante o armazenamento do agregado siderúrgico. Nesse sentido, a utilização do agregado siderúrgico como material alternativo não só pode ajudar a fomentar o reaproveitamento de coprodutos, como também contribuir para o avanço de metas de desenvolvimento sustentável.

Além disso, estudos indicam que pode ser necessária uma menor quantidade de lastro siderúrgico para desempenhar as mesmas funções do lastro de agregado natural na via férrea (Chamling, Haldar e Patra, 2020; Alavijeh, Mokhtari e Araei, 2024; Esmaeili, Nouri e Yousefian, 2015), tornando o seu uso ainda mais vantajoso. Ademais, o potencial de captura de  $\text{CO}_2$  utilizado ( $56,93\text{kgCO}_2/\text{t}$ ) foi conservador, considerando o agregado siderúrgico íntegro e sem poros, dado que estudos indicam que a escória pode sequestrar até  $250\text{kgCO}_2/\text{t}$  a depender dos compostos formados (Li *et al.*, 2024).

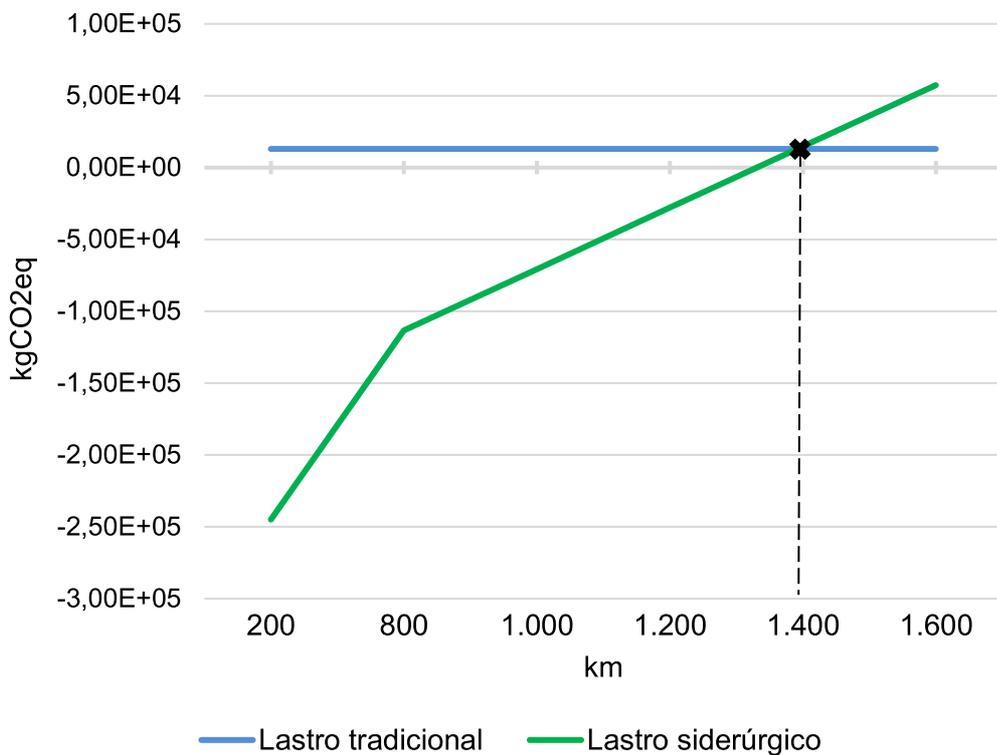
### 4.3 INTERPRETAÇÃO

#### 4.3.1 Verificação de completeza e de sensibilidade

A verificação de completeza pode ser observada na fase do ICV, uma vez que a maioria dos dados utilizados foram primários, coletados diretamente das empresas parceiras do estudo e representativos da região analisada.

A análise de sensibilidade teve como objetivo avaliar a influência do transporte dos lastros até os pátios de descarregamento da concessionária ferroviária. Buscou-se identificar em que cenário a ferrovia com lastro siderúrgico apresentaria impactos ambientais superiores aos da ferrovia com lastro tradicional. Para isso, foi simulada uma variação na distância de transporte entre pátio de armazenamento da siderúrgica e o pátio de descarregamento da concessionária ferroviária, enquanto o impacto para o aquecimento global do lastro tradicional foi mantido fixo, com a distância das pedreiras que o fornecem em 19,6 km, valor médio calculado para o caso base (Figura 30).

Figura 30 – Avaliação de sensibilidade no transporte do lastro siderúrgico

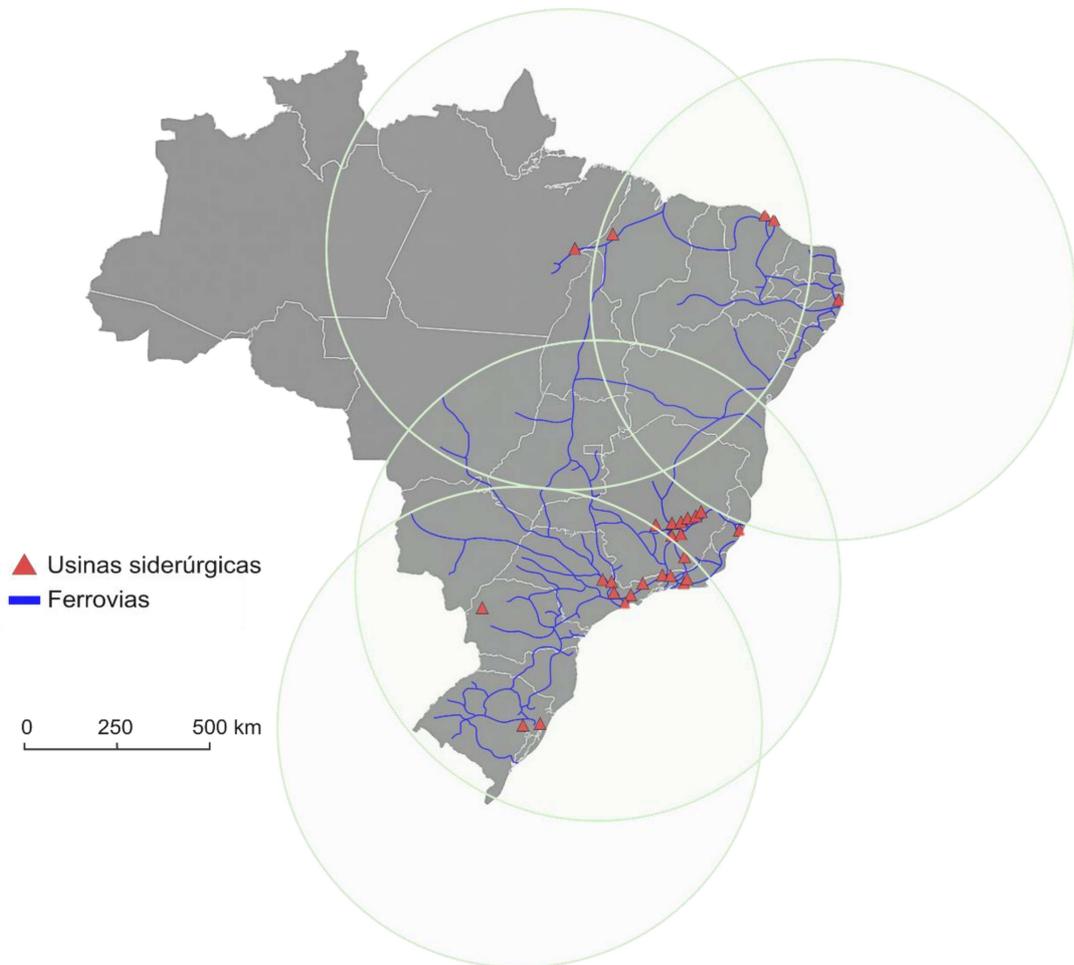


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Mesmo considerando um cenário de transporte de longa distância, os benefícios ambientais promovidos pela captura de CO<sub>2</sub> do lastro siderúrgico não seriam superados, uma vez que as distâncias reais de entrega (com um máximo de 419,6 km) são significativamente menores do que o limite de equilíbrio identificado na análise, estimado em, aproximadamente, 1.400 km. Dessa forma, os resultados indicam que essa ampla distância de equilíbrio permite que a siderúrgica em questão atenda a outras concessionárias ferroviárias brasileiras, ainda com benefícios ambientais em termos de emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, ao aplicar um raio equivalente à distância máxima identificada na análise às siderúrgicas das regiões Sul, Sudeste, Norte e Nordeste (Figura 31), verifica-se que seria possível atender toda a malha ferroviária brasileira. Esse resultado reforça o potencial de aplicação do lastro siderúrgico e seus benefícios ambientais.

Figura 31 – Siderúrgicas e malha ferroviária brasileira, com um raio de 1.400 km estimado na análise de sensibilidade



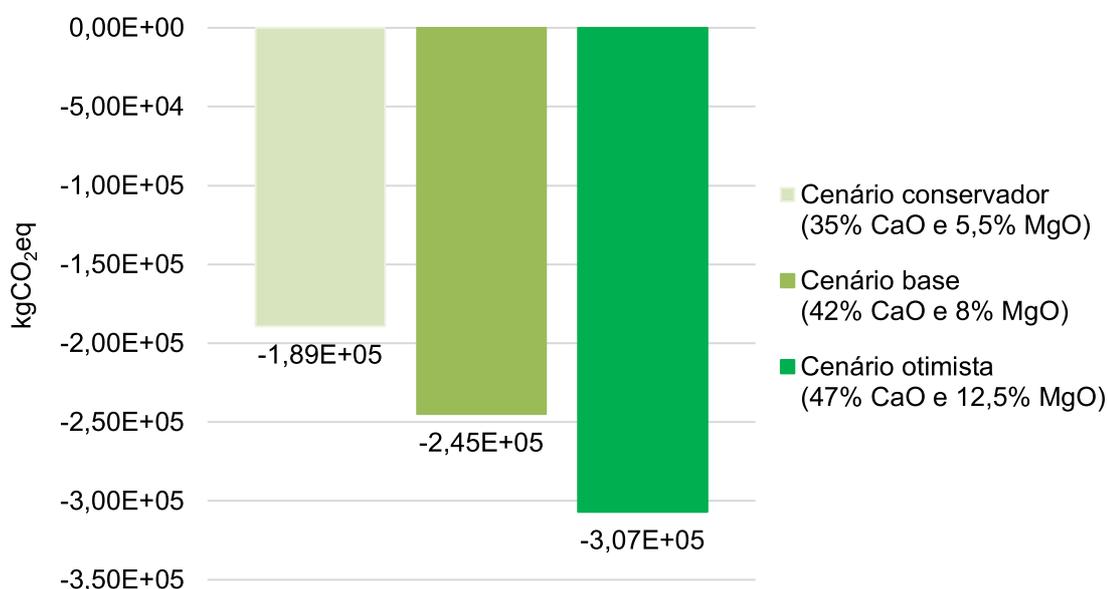
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Também foi realizada uma análise de sensibilidade com o objetivo de estimar e comparar os efeitos da captura de CO<sub>2</sub> pelo agregado siderúrgico sobre o potencial de aquecimento global, considerando condições menos e mais favoráveis à reação de carbonatação. Para isso, foram adotados dois cenários com base na composição química das escórias de aciaria apresentada na Tabela 5 da seção 2.3.1: um cenário conservador, com teores de 35% de CaO e 5,5% de MgO; e outro otimista, com teores de 47% de CaO e 12,5% de MgO. Utilizando a Equação 5, foram calculadas as taxas de captura de CO<sub>2</sub> para cada cenário, resultando em 45,82kgCO<sub>2</sub>/t no conservador e 69,26kgCO<sub>2</sub>/t no otimista - uma variação de 51,2% entre os dois extremos. Para fins de comparação, também foi adicionado o GWP do lastro siderúrgico calculado no caso

base, estimado em  $-2,45E+05\text{kgCO}_2\text{eq}$ , cujo valor de captura foi de  $56,93\text{kgCO}_2/\text{t}$ , servindo como referência intermediária.

A Figura 32 apresenta os resultados comparativos do potencial de aquecimento global para os três cenários (conservador, base e otimista), mostrando o efeito da composição química da escória sobre o desempenho ambiental do lastro siderúrgico. Mesmo no cenário mais conservador, o lastro siderúrgico apresentou um impacto ambiental negativo de  $-1,89E+05\text{kgCO}_2\text{eq}$ , indicando um saldo favorável frente ao lastro tradicional. Esse resultado reforça que, mesmo sob uma menor capacidade de sequestro de  $\text{CO}_2$ , o lastro siderúrgico ainda proporciona benefícios ambientais relevantes. Além disso, o valor de captura estimado no cenário conservador ( $45,82\text{kgCO}_2/\text{t}$ ) representa uma redução de aproximadamente 54% em relação ao menor valor teórico encontrado na literatura ( $99\text{kgCO}_2/\text{t}$ ), evidenciando o caráter prudente da metodologia adotada.

Figura 32 – Análise de sensibilidade do potencial de aquecimento global do lastro siderúrgico em função da variação na captura de  $\text{CO}_2$ , considerando diferentes cenários de CaO e MgO



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Em uma amostra com altos teores de CaO e MgO, assumindo que todos os compostos reagiriam com o passar do tempo, o potencial de aquecimento global do

lastro siderúrgico poderia atingir  $-3,07E+05\text{kgCO}_2\text{eq}$ . Esse resultado mostra o potencial significativo da escória para contribuir positivamente no desempenho ambiental da infraestrutura ferroviária com o lastro siderúrgico. Destaca-se que, na ausência total da captura de  $\text{CO}_2$ , o lastro siderúrgico apresentaria um impacto negativo superior ao do lastro tradicional, reforçando o papel determinante da carbonatação como mecanismo de compensação ambiental neste estudo de caso.

#### **4.3.2 Verificação de consistência**

Para a análise de consistência, as principais forças deste estudo de ACV envolvem:

- Qualidade dos dados: a maior parte dos dados de inventário foi coletada de fontes primárias, diretamente de empresas reais, o que contribui para a robustez da análise;
- Completude: foram encontrados dados para todas as etapas consideradas nos limites sistema, tanto para o lastro tradicional quanto para o siderúrgico;
- Escala da coleta: os dados foram obtidos em escala real, sem superestimções, refletindo a representatividade das práticas operacionais ferroviárias atuais;
- Captura de  $\text{CO}_2$ : a estimativa de captura de  $\text{CO}_2$  foi baseada na área superficial real das amostras de escória, tratando-se de dados empíricos específicos do material estudado;
- Homogeneidade regional: os dados secundários utilizados no inventário pertencem à mesma região geográfica (Sudeste);
- Apoio técnico: o estudo contou com a colaboração de profissionais experientes das áreas ferroviária e siderúrgica, que colaboraram para a validação dos dados e consolidação metodológica.

Por outro lado, as limitações identificadas abrangem:

- Estimativa volumétrica: o volume de agregado siderúrgico considerado por metro de ferrovia foi igual ao do agregado natural ( $2\text{m}^3/\text{m}$ ), devido à falta de estudos quantitativos sobre uma possível redução de material, o que pode levar à superestimação dos impactos associados ao agregado siderúrgico;
- Vida útil e manutenção: considerou-se o mesmo tempo de vida útil e intervalo entre manutenções para ambos os tipos de lastro, em função da falta de dados específicos sobre o desgaste do agregado siderúrgico a longo prazo;
- Captura de  $\text{CO}_2$ : o cálculo foi realizado com base em uma profundidade de carbonatação estimada e sem considerar a ocorrência de fraturas futuras;
- Distribuição nos pátios: assumiu-se uma igual distribuição dos lastros nos pátios de descarregamento da concessionária. Também, foram mantidas as localizações atuais dos pátios de brita, que favorecem logisticamente o lastro tradicional;
- Diferença temporal: os dados secundários utilizados sobre o processamento da brita natural são referentes ao ano de 2017. Contudo, considerando os processos industriais analisados, essa defasagem não compromete a representatividade dos dados, especialmente por apresentarem pouca variação ao longo dos anos.

Apesar das limitações identificadas, a vasta maioria das premissas adotadas foram baseadas em critérios conservadores, o que confere uma maior consistência e credibilidade dos resultados obtidos.

#### 4.4 LEVANTAMENTO FINANCEIRO

Os custos do ciclo de vida dos agregados para lastro foram analisados e discutidos em todas as suas fases. As Tabela 25 e Tabela 26 apresentam os custos por unidade funcional relacionados às etapas de transporte, instalação na ferrovia e renovação do lastro. Os custos de transporte contemplam as despesas operacionais dos veículos utilizados. Na etapa de instalação, os custos consideram o consumo de diesel pelos equipamentos e maquinários, de acordo com a produtividade de cada um.

Já os custos de manutenção incluem a substituição de 50% do material de lastro, considerando a aquisição de novos agregados.

Tabela 25 – Custos de transporte dos agregados para lastro para uma unidade funcional (1 km)

<b>Material</b>	<b>Veículo</b>	<b>Valor</b>	<b>Custo total de transporte</b>
Lastro siderúrgico <sup>1</sup>	Locomotiva a diesel	46,40 R\$/t	R\$ 232.756,77
Lastro de brita natural <sup>2</sup>	Caminhão	1,30 R\$/t.km	R\$ 108.391,92

Notas: <sup>1</sup>Valor extraído da ANTT (2024); <sup>2</sup>Valor retirado do SINAPI (2025).

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

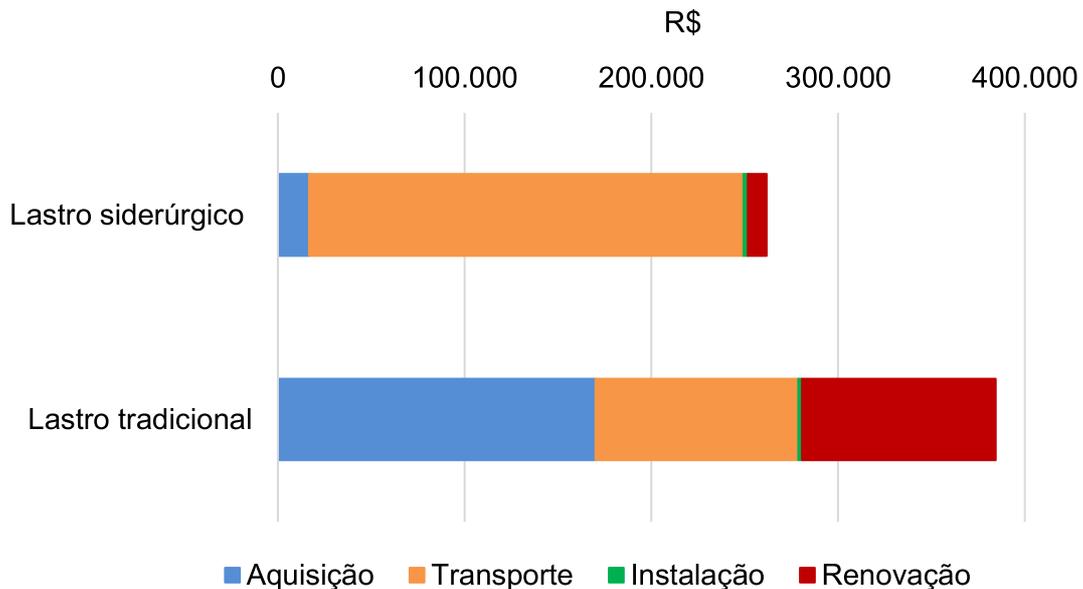
Tabela 26 – Custos de instalação e renovação dos lastros para uma unidade funcional (1 km)

<b>Etapa do ciclo de vida</b>	<b>Lastro siderúrgico</b>	<b>Lastro de brita natural</b>
Instalação	R\$ 2.106,94	R\$ 2.106,94
Renovação	R\$ 10.191,44	R\$ 103.718,65

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Figura 33 apresenta os custos de cada etapa do ciclo de vida do lastro tradicional e siderúrgico. De modo geral, os custos dos agregados são um dos mais impactantes na análise, uma vez que influenciam os gastos de aquisição (100% do material novo) e da renovação (50% do material novo).

Figura 33 – Impacto financeiro por etapa do ciclo de vida da ferrovia (1 km)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A etapa de transporte apresentou o maior custo no ciclo de vida do lastro siderúrgico, devido à maior distância percorrida pelo trem e ao maior volume de material transportado em comparação ao lastro tradicional. O custo de transporte do lastro tradicional equivale a aproximadamente metade do custo de transporte do lastro siderúrgico. Especificamente, essa etapa representou 89% do custo total de agência do ciclo de vida do lastro siderúrgico, enquanto para o lastro tradicional esse percentual foi de 28%. Vale destacar que o custo de transporte do lastro siderúrgico é uma estimativa conservadora, considerando o valor de frete comercial de 46,40R\$/t. Esse valor representa um cenário em que o transporte seria terceirizado, no entanto, caso a própria concessionária ferroviária realize esse transporte internamente, o custo total dessa etapa pode ser drasticamente reduzido.

Os custos de instalação dos lastros na ferrovia são equivalentes para ambos os lastros (R\$2.106,94), pois são utilizados os mesmos maquinários, que apresentam produtividade semelhante. Este valor está relacionado apenas ao consumo de combustível dos maquinários para a execução do serviço, desconsiderando a aquisição do equipamento (desguarnecedora) ou a sua manutenção. Nota-se que o

desgaste da desguarnecedora pode variar conforme o material utilizado, mas não foram encontrados estudos avaliando este aspecto.

Em relação às operações de renovação, apesar de ocorrerem no mesmo período de 4 anos tanto para o lastro siderúrgico quanto para o tradicional, o custo dessa etapa do ciclo de vida será sempre maior para o lastro tradicional, devido ao maior valor de aquisição da brita. Todavia, caso o lastro siderúrgico exija um número maior ou menor de atividades de renovação durante o seu ciclo de vida, esse benefício financeiro pode variar. Nesse sentido, a previsão adequada do momento ideal para a renovação torna-se essencial, podendo gerar economia ou prejuízos para a concessionária ferroviária.

Ao considerar os custos totais da ferrovia, os dados financeiros analisados indicam que o CCV da ferrovia com lastro siderúrgico (R\$261.784,16) é 31,9% menor do que o CCV da ferrovia com lastro tradicional (R\$384.377,51). O menor custo do agregado siderúrgico é o principal fator responsável por essa vantagem financeira. Resultados semelhantes foram observados por Zhong *et al.* (2024), que identificaram uma redução de 14,4% a 19,8% no custo total da construção de pavimentos com a introdução da escória de aço em misturas asfálticas. Da mesma forma, Liu, Yu e Wang (2020) apontaram que, devido ao preço inferior da escória de aciaria, o custo total da mistura de escória de aço na fabricação de macadame estabilizado com cimento foi economizado em cerca de 25,3%.

Buscou-se identificar em que cenário a ferrovia com lastro siderúrgico apresentaria custos superiores aos da ferrovia com lastro tradicional, considerando os dados financeiros obtidos neste estudo de caso. Para isso, simulou-se uma variação no valor de aquisição do agregado siderúrgico, enquanto o CCV da ferrovia com o lastro tradicional foi mantido em R\$384.377,51. Essa análise foi estruturada a fim de determinar o valor máximo de venda do agregado siderúrgico que garantiria um custo competitivo em relação ao lastro tradicional, incentivando sua adoção no setor ferroviário. Os resultados indicaram que o valor de aquisição do agregado siderúrgico pode aumentar de 8% até 47% do valor atual pago pela brita natural. As vantagens econômicas do uso do lastro siderúrgico seriam ainda mais significativas caso se confirme a necessidade de menor volume de material em comparação ao agregado

natural, menor necessidade de manutenções, ou se houver redução na distância de transporte. Dessa forma, considerando as condições financeiras analisadas neste estudo de caso, o uso do agregado siderúrgico como lastro ferroviário se mostra financeiramente viável, desde que o seu valor de aquisição permaneça dentro desse limite estabelecido.

#### 4.5 AVANÇOS RECENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Diferentes estudos nacionais e internacionais têm demonstrado o potencial do agregado siderúrgico como lastro ferroviário, destacando suas vantagens em relação ao lastro tradicional. Esta seção apresenta os avanços recentes, lacunas identificadas na literatura e caminhos futuros de pesquisa, destacando barreiras já superadas e aquelas que ainda exigem investigação, diante das incertezas que ainda limitam a aplicação efetiva do lastro siderúrgico nas vias férreas.

Hussain e Hussaini (2022) e Koh *et al.* (2018) destacam que o agregado siderúrgico apresenta maior resistência e menor desgaste em comparação à brita natural, além de menor quebra de partículas, o que implica em uma vida útil mais longa. Assim, prevê-se que a necessidade de manutenção seja reduzida, desde que haja acompanhamento técnico adequado, o que levaria a menores custos operacionais de manutenção (Hussain e Hussaini, 2022; Koh *et al.*, 2018). Entretanto, essas propriedades dizem respeito apenas ao desempenho mecânico e não foram encontrados trabalhos que quantifiquem o potencial aumento de durabilidade do lastro siderúrgico frente à rocha britada.

Em relação à segurança na operação, segundo estudos anteriores realizados em laboratório, o lastro de agregado siderúrgico pode proporcionar maior conforto de pilotagem e maior estabilidade às vias férreas, devido ao seu maior módulo de resiliência (Hussain e Hussaini, 2022; Delgado *et al.*, 2021), o que contribui para a segurança do maquinista.

Quanto à drenagem da via férrea, que é influenciada pela quantidade de finos presentes no lastro, acredita-se que, com o acompanhamento adequado de manutenções, esse fator não comprometerá o desempenho da infraestrutura

ferroviária. O mesmo se aplica ao processo de cimentação, que pode ser facilitado pela presença de finos e umidade, cujo impacto pode ser mitigado por medidas de controle. No entanto, as questões relacionadas ao potencial de cimentação dos finos do lastro siderúrgico, bem como o nivelamento e geometria da via em condições brasileiras, ainda não foram investigadas na literatura com maior profundidade.

No que diz respeito às questões financeiras, os resultados deste estudo mostraram que os investimentos financeiros para a ferrovia com lastro siderúrgico são menores, e o valor de aquisição desse agregado não supera o do lastro tradicional, mesmo com todo o seu processo de beneficiamento. Esmaeili, Nouri e Yousefian (2015) também reforçam que a reutilização do agregado siderúrgico como um material alternativo pode gerar benefícios econômicos significativos.

Em relação aos possíveis danos aos equipamentos e maquinário ferroviários, Esmaeili, Yousefian e Ghahroudi (2017) analisaram as propriedades de desgaste do agregado siderúrgico e do lastro de brita natural em ferramentas de manutenção ferroviária. Os autores observaram que, devido à maior abrasão do agregado siderúrgico, o desgaste de equipamentos como as máquinas de socaria e dedos de correntes pode ser maior, inicialmente, para o lastro siderúrgico. Contudo, com a mudança da superfície do material ao longo do tempo, a taxa de desgaste tende a diminuir. Não foram encontrados estudos quantitativos ou a longo prazo que avaliem esse aspecto em condições reais de tráfego ferroviário.

Em relação à saúde humana e aspecto ambiental, a liberação de metais do agregado siderúrgico pode ocorrer por lixiviação em contato com a água, representando possíveis riscos à saúde (Hussain e Hussaini, 2022). O comportamento de lixiviação depende dos tipos e da origem da escória, tornando necessário um estudo caso a caso (Hussain e Hussaini, 2022). Todavia, essa liberação de metais por lixiviação pode ser minimizada por meio de tratamentos, como o envelhecimento por intemperismo já tradicionalmente realizada (Song *et al.*, 2021; Wang, Chang e Ansari, 2019) ou por cura, com aspersão de água. Ademais, estudos que analisaram a presença de metais lixiviáveis na escória siderúrgica demonstraram que o material não apresenta risco ambiental para uso como lastro ferroviário (Chamling, Haldar e Patra,

2020), sendo classificado, conforme a norma brasileira, como resíduo classe IIA - não perigoso e não Inerte (Fernandes *et al.*, 2022).

No que se refere ao descarte final do lastro siderúrgico, ele possui potencial comprovado de reuso como agregado para pavimentação e construção civil (Qasrawi, 2014; Li *et al.*, 2024). No entanto, essa reutilização deve ser bem planejada para evitar problemas estruturais e ambientais no local de reuso, estando sempre em conformidade com as normas técnicas e ambientais vigentes.

Em relação aos ensaios e normas técnicas específicas - apesar da norma americana AREMA (AREMA, 2013), referência mundial, já contemplar o lastro siderúrgico - a atual NBR 5564 (ABNT, 2021) não contempla. No Brasil, os ensaios atualmente seguem os padrões estabelecidos para o lastro de brita natural. Diante disso, é importante que órgãos regulamentadores considerem revisões normativas para viabilizar e incentivar o uso desse material, haja vista que a falta de regulamentação pode dificultar a implementação de inovações no transporte ferroviário.

Adicionalmente, o agregado siderúrgico apresenta disponibilidade contínua, compatibilidade com os métodos e equipamentos já utilizados na instalação e manutenção do lastro tradicional, custos competitivos e os benefícios logísticos associados. Nesse sentido, o potencial do lastro siderúrgico é evidenciado em diversos estudos nacionais e internacionais. Ainda assim, desmistificar a ideia de que o agregado siderúrgico não é material para lastro é fundamental para viabilizar sua adoção efetiva no setor ferroviário.

## 5 CONCLUSÃO

O armazenamento de agregados siderúrgicos em pátios a céu aberto, aliado à contínua extração de rochas naturais para uso como lastro ferroviário, apresentam consequências ambientais negativas e riscos para a saúde humana. Nesse contexto, com base na literatura revisada sobre as características físicas, químicas e mecânicas do agregado siderúrgico, infere-se o seu potencial de aplicação como lastro ferroviário. Todavia, a adoção do lastro siderúrgico requer uma análise detalhada dos impactos ambientais e dos custos envolvidos. Esta pesquisa demonstrou avaliar a viabilidade ambiental e financeira do uso do agregado siderúrgico como lastro em pavimentos ferroviários, comparando-o com o lastro tradicional de brita natural. A análise ambiental foi conduzida a partir da Avaliação do Ciclo de Vida, utilizando a abordagem do “berço ao túmulo”, aliada a uma análise de custos, permitindo uma compreensão abrangente dos efeitos associados a ambas as alternativas.

Na análise do potencial de aquecimento global, os resultados demonstraram que a ferrovia com o lastro siderúrgico é ambientalmente preferível em comparação a com lastro de brita natural. O impacto associado ao lastro siderúrgico foi calculado em  $-2,45E+05\text{kgCO}_2\text{eq}$ , enquanto o lastro tradicional apresentou um impacto de  $1,30E+04\text{kgCO}_2\text{eq}$ . O menor impacto ambiental do lastro siderúrgico está relacionado à captura de  $\text{CO}_2$ , que acontece durante a etapa de armazenamento. Essa vantagem se mantém mesmo com a maior massa de agregado siderúrgico necessária para a construção de 1 km de ferrovia e da maior distância média de transporte até o pátio de descarregamento da concessionária ferroviária. Esses valores poderiam ser potencialmente melhores otimizando-se os pátios de descarregamento de lastro para beneficiar a nova fonte – o pátio de escória. E ainda existem incertezas relacionadas à manutenção a longo prazo do lastro siderúrgico em relação ao tradicional, com fatores positivos (maior resistência mecânica da escória) e negativos (capacidade cimentante dos finos da escória ainda pouco investigada).

Sob a perspectiva econômica, a pesquisa revelou que o uso do lastro siderúrgico é uma alternativa financeiramente vantajosa. O custo total de agência do ciclo de vida de 1 km de ferrovia utilizando esse agregado foi de R\$ 261.784, gerando uma economia de 31,9% em relação ao custo da ferrovia com lastro tradicional,

calculado em R\$ 384.377. O menor custo de aquisição do agregado siderúrgico, aliado à possibilidade de reduzir a dependência da exploração de rochas naturais, reforça o seu potencial, embora os custos com transporte, caso considerado o frete comercial, sejam um atual entrave. Para uma avaliação financeira mais precisa, recomenda-se a coleta de dados adicionais sobre o comportamento da ferrovia operando *in situ* ao longo do tempo.

Não obstante as vantagens identificadas neste estudo e na literatura, o emprego do lastro siderúrgico ainda enfrenta barreiras de aceitação, agravadas por incertezas no seu comportamento a longo prazo e pela ausência de especificações padronizadas na norma brasileira para esse material. Desmistificar a percepção de que o agregado siderúrgico não é adequado para uso como lastro ferroviário representa um grande desafio. Nesse contexto, incentivar a inovação e fortalecer o diálogo dentro das organizações, aproximando a divulgação científica das empresas, pode contribuir para superar essa barreira. A construção de pistas-teste em trechos estratégicos seria um primeiro passo importante nessa direção.

Por fim, os resultados desta pesquisa demonstram que a abordagem comparativa adotada permitiu cumprir o propósito do estudo. Espera-se que este trabalho contribua para ampliar a discussão sobre soluções sustentáveis para a infraestrutura ferroviária e para um destino mais eficiente do agregado siderúrgico. Além disso, a promoção de parcerias entre empresas para o desenvolvimento e aplicação de materiais alternativos pode fortalecer essa adoção. O avanço desse tipo de pesquisa pode consolidar o lastro siderúrgico como uma alternativa viável e estratégica, reduzindo o consumo de recursos naturais pela indústria ferroviária e alinhando-se aos princípios da economia circular, às demandas por sustentabilidade e aos esforços globais de mitigação das mudanças climáticas.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para pesquisas futuras, propõe-se:

- Quantificar e avaliar outros indicadores ambientais, como a influência de particulados, consumo de água e qualidade do solo no ciclo de vida do lastro siderúrgico, utilizando outros métodos de AICV;
- Verificar, em condições reais de campo, a periodicidade de manutenção do lastro siderúrgico, sua expectativa de vida e impacto na ACV;
- Realizar uma ACV considerando toda a estrutura ferroviária com lastro siderúrgico, incluindo dormentes, elementos de fixação e trilhos;
- Avaliar a viabilidade de reduzir a espessura da camada de lastro siderúrgico;
- Investigar o potencial de reaproveitamento do lastro siderúrgico na ACV, expandindo o sistema para do “berço ao berço”, analisando os impactos evitados;
- Realizar uma avaliação financeira com base no desempenho da ferrovia com lastro siderúrgico em operação *in situ*, verificando se o menor custo do agregado siderúrgico mantém a competitividade econômica da ferrovia.

## REFERÊNCIAS

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro, p. 71. 2004.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR ISO14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, p. 21. 2009a.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR ISO 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, p. 46. 2009b.

ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 5564: Via férrea — Lastro ferroviário — Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 54. 2021.

ALAVIJEH, B. E.; MOKHTARI, M.; ARAEI, A. A. Behavior of fresh and recycled slag ballast under cyclic and post-cyclic monotonic loadings using large-scale triaxial tests. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 182, Julho 2024. 108720.

ANTT, A. N. D. T. T. Concessões Ferroviárias, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/concessoes-ferroviarias>>. Acesso em: Fevereiro 2025.

AREMA. **Manual for Railway Engineering - Chapter 1: Roadway and Ballast**. Laham: American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association, v. I, 2013.

ARRIVABENE, L. F. et al. Viabilidade técnica da fabricação de cimento com mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito. **Revista Escola De Minas**, 65, Junho 2012. 241–246.

AZADGOLEH, M. A. et al. A comparative life cycle assessment (LCA), life cycle cost analysis (LCCA), mechanical and long-term leaching evaluation of road pavement structures containing multiple secondary materials. **Journal of Cleaner Production**, 458, 15 Junho 2024. 142484.

BARRETO, R. A. et al. Determinação da resistência a partir da porosidade e absorção da brita de Gnaisse e da escória de Aciaria LD. **Engevista**, 20, Dezembro 2018. 623-636.

BASSEY, D. et al. Ballast Contamination Mechanisms: A Critical Review of Characterisation and Performance Indicators. **Infrastructures**, 5, Novembro 2020. 94.

BASSEY, D. et al. Ballast Contamination Mechanisms: A Critical Review of Characterisation and Performance Indicators. **Infrastructures**, 11, Novembro 2020. 1-24.

BESHEARS, S. A.; TUTUMLUER, E. Reclaimed Asphalt Pavement with Steel Slag Aggregate: Successful Use in Illinois Pavements. **TR News**, Set-Out 2013. 46-47.

BONENFANT, D. et al. CO<sub>2</sub> Sequestration Potential of Steel Slags at Ambient Pressure and Temperature. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 47, 26 Setembro 2008. 7610-7616.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Balanço 2023: Novo PAC garante recursos para o transporte ferroviário e acelera retomada do setor no Brasil. **Ministério dos Transportes**, 4 Janeiro 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2024/01/novo-pac-garante-recursos-para-o-transporte-ferroviario-e-acelera-retomada-do-setor-no-brasil>>. Acesso em: 27 Junho 2024.

BRESSI, S. et al. Environmental performance analysis of bitumen stabilized ballast for railway track-bed using life-cycle assessment. **Construction and Building Materials**, 188, 10 Novembro 2018. 1050-1064.

BURMAN, J. et al. A simplified method of preparing phosphoric acid for stable isotope analyses of carbonates. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, 19, Outubro 2005. 3086-3088.

CARVALHO, P. S. L. D.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. D. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, Março 2015. 181-236. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4287>>.

CARVALHO, S. Z. et al. The recycling effect of BOF slag in the portland cement properties. **Resources, Conservation and Recycling**, 127, Dezembro 2017. 216-220.

CELAURO, C.; CARDELLA, A.; GUERRIERI, M. LCA of Different Construction Choices for a Double-Track Railway Line for Sustainability Evaluations. **Sustainability**, 15, Março 2023. 5066.

CHAMLING, P. K.; HALDAR, S.; PATRA, S. Physico-Chemical and Mechanical Characterization of Steel Slag as Railway Ballast. **Indian Geotechnical Journal**, 50, Fevereiro 2020. 267–275.

COELHO, A.; BRITO, J. D. Environmental analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – Part I: Energy consumption and CO2 emissions. **Waste Management**, 33, Maio 2013. 1258-1267.

CONAMA, C. N. D. M. A. **Proposta de Resolução nº XX de 21 de agosto de 2020**. Estabelece critérios para valorizar e promover o uso de coprodutos siderúrgicos como matéria-prima ou insumo em processos ou atividades, e dá outras providências. Brasília/DF: [s.n.]. 2020.

DAYRELL, F. D. O. **Metodologia geotécnica sustentável para credenciamento da escória de aciaria como lastro ferroviário**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 117. 2013.

DELGADO, B. G. et al. Geomechanical assessment of an inert steel slag aggregate as an alternative ballast material for heavy haul rail tracks. **Construction and Building Materials**, 279, Abril 2021. 122438.

DELGADO, B. G. et al. Particle morphology's influence on the rail ballast behaviour of a steel slag aggregate. **Environmental Geotechnics**, 9, Setembro 2022. 373-382.

DNIT. **DNIT 406/2017-ES: Pavimentação rodoviária - Base estabilizada granulometricamente com Açobrita - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, p. 10. 2017a.

DNIT. **DNIT 407/2017-ES: Pavimentação rodoviária - Sub-base estabilizada granulometricamente com Açobrita - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro. [S.l.], p. 10. 2017b.

DOLCI, G.; RIGAMONTI, L.; GROSSO, M. Potential for improving the environmental performance of railway sleepers with an outer shell made of recycled materials. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, 6, July 2020. 100160.

EBRAHIMI, A.; TINJUM, J. M.; EDIL, T. B. Deformational behavior of fouled railway ballast. **Canadian Geotechnical Journal**, 52, Março 2015. 344-355.

EPE, E. D. P. E. Matriz Energética e Elétrica, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 15 Janeiro 2025.

ESMAEILI, M.; NOURI, R.; YOUSEFIAN, K. Experimental comparison of the lateral resistance of tracks with steel slag ballast and limestone ballast materials. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, 32, Dezembro 2015. 175-184.

ESMAEILI, M.; YOUSEFIAN, K.; GHAHROUDI, P. A. An investigation of abrasion and wear characteristics of steel slag and granite ballasts. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, 173, 17 Novembro 2017. 41-52.

EVANGELISTA, B. L.; ROSADO, L. P.; PENTEADO, S. G. Life cycle assessment of concrete paving blocks using electric arc furnace slag as natural coarse aggregate substitute. **Journal of Cleaner Production**, 178, 20 Março 2018. 176-185.

FALESCHINI, F.; DE MARZI, P.; PELLEGRINO, C. Recycled concrete containing EAF slag: environmental assessment through LCA. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 18, 3 Junho 2014. 1009-1024.

FERNANDES, D. P. **Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 142. 2010.

FERNANDES, D. P. **Metodologia para estabilização química do agregado siderúrgico para aplicação como lastro ferroviário**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 218. 2016.

FERNANDES, D. P. et al. Chemical Stabilization of Bof Slag for Reuse in Railway Pavement: Physical-Chemical Characterization, Mechanical and Leaching Tests. **The Journal of Solid Waste Technology and Management**, 48, Agosto 2022. 389-400.

FERNANDES, D. P.; COSME, J.; FERNANDES, G. Analysis of carbonation and hydration of BOF steel slag for application as railway ballast. **REM - International Engineering Journal**, Ouro Preto, 73, Dezembro 2020. 477-485.

FERREIRA, G. C.; DAITX, E. C.; NETO, C. D. Impactos ambientais associados a desmonte de rocha com o uso de explosivos. **Geociências**, São Paulo, 25, 2006. 467-473. Disponível em: <[https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/25\\_4/8.pdf](https://www.revistageociencias.com.br/geociencias-arquivos/25_4/8.pdf)>.

FONTE, F. D. S. M. **Influência da umidade sobre o comportamento mecânico de solos tropicais característicos de subleitos ferroviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 129. 2022.

GHOULEHA, Z.; GUTHRIE, R. I. L.; SHAO, Y. Production of carbonate aggregates using steel slag and carbon dioxide for carbon-negative concrete. **Journal of CO2 Utilization**, Montreal, Canadá, 18, Março 2017. 125-138.

GIUNTA, M.; BRESSI, S.; D'ANGELO, G. Life cycle cost assessment of bitumen stabilised ballast: A novel maintenance strategy for railway track-bed. **Construction and Building Materials**, 172, Maio 2018. 751-759.

GUO, J.; BAO, Y.; WANG, M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. **Waste Management**, 78, Agosto 2018. 318-330.

GUO, Y. et al. Ballast degradation: Effect of particle size and shape using Los Angeles Abrasion test and image analysis. **Construction and Building Materials**, 169, Abril 2018. 414-424.

GUO, Y. et al. Railway ballast material selection and evaluation: A review. **Construction and Building Materials**, 344, 15 Agosto 2022. 128218.

HUIJGEN, W. J. J.; WITKAMP, G.-J.; COMANS, R. N. J. Mineral CO<sub>2</sub> Sequestration by Steel Slag Carbonation. **Environmental Science & Technology**, Wageningen, Holanda, 39, 15 Novembro 2005. 9676-9682.

HUMBERT, P. S.; GOMES, J. C. CO<sub>2</sub> activated steel slag-based materials: A review. **Journal of Cleaner Production**, 208, 20 Janeiro 2019. 448-457.

HUNTZINGER, D. N. et al. Carbon Dioxide Sequestration in Cement Kiln Dust through Mineral Carbonation. **Environmental Science & Technology**, 43, Fevereiro 2009. 1986-1992.

HUSSAIN, A.; HUSSAINI, S. K. K. Use of steel slag as railway ballast: A review. **Transportation Geotechnics**, 35, Julho 2022. 100779.

IAB. Instituto Aço Brasil. Aço e Sustentabilidade, 2023. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>>. Acesso em: 29 Janeiro 2024.

IAB. Instituto Aço Brasil. Estatísticas da Siderurgia, 2023. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/publicacoes/>>. Acesso em: 29 Janeiro 2024.

IAB. Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade, 2020. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br/relatoriodesustentabilidade/>>. Acesso em: 29 Janeiro 2024.

IBGE, I. B. D. G. E. E. IPP - Índice de Preços ao Produtor - Indústrias Extrativas e de Transformação, Dezembro 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9282-indice-de-precos-ao-produtor-industrias-extrativas-e-de-transformacao.html?edicao=42549&t=resultados>>. Acesso em: Março 2025.

IBS. Instituto Brasileiro de Siderurgia. Estudo sobre aplicações de escórias siderúrgicas, Relatório final, 1999. 104.

INDRARATNA, B. et al. Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation. **Ground Improvement**, 10, 2006. 91-101.

INDRARATNA, B.; SALIM, W. **Mechanics of ballasted rail tracks: a geotechnical perspective**. [S.l.]: [s.n.], 2005. 248 p.

IPCC. **Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and Radiative Forcing - Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment**. Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA, p. 996. 2007.

IPCC. **Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing - Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1535. 2013.

IPCC. **Chapter 8: Transport - Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment**. Cambridge University Press, Cambridge. United Kingdom and New York, NY, USA. 2014.

JING, G. et al. Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel slag in ballasted railway track. **Construction and Building Materials**, 262, Novembro 2020. 120015.

KIM, J. et al. Evaluation of ballasted-track condition based on aggregate-shape characterization. **Construction and Building Materials**, 232, 30 Janeiro 2020. 117082.

KOH, T. et al. A Feasibility Study on the Application of Basic Oxygen Furnace (BOF) Steel Slag for Railway Ballast Material. **Sustainability**, 10, Janeiro 2018. 284.

KOUROUNIS, S. et al. Properties and hydration of blended cements with steelmaking slag. **Cement and Concrete Research**, 37, Junho 2007. 815-822.

KRENAK, A. **Ideias para adiar o fim do mundo**. 2a. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2020.

KUMAR, D. S. et al. Measurement of metallic iron in steel making slags. **Measurement**, 131, Janeiro 2019. 156-161.

LI, L. et al. Comparative life cycle assessment to maximize CO2 sequestration of steel slag products. **Construction and Building Materials**, Hunan, China, 298, 6 Setembro 2021. 123876.

LI, L.; LING, T.-C.; PAN, S.-Y. Environmental benefit assessment of steel slag utilization and carbonation: A systematic review. **Science of The Total Environment**, 806, 1 Fevereiro 2022. 150280.

LI, Y. et al. A review of the application of steel slag in concrete. **Structures**, 63, Maio 2024. 106352.

LI, Z. et al. Towards the co-benefits of carbon capture, utilization and sequestration: A life cycle assessment study for steel slag disposal. **Journal of Cleaner Production**, 443, 1 Março 2024. 141166.

LIU, J.; YU, B.; WANG, Q. Application of steel slag in cement treated aggregate base course. **Journal of Cleaner Production**, 269, Outubro 2020. 121733.

MAGNAVITA, C. Coluna Magnavita: CSN na mira do MPF que exige solução para a escória anexa ao Paraíba do Sul. **Correio da Manhã**, 19 Junho 2023. Disponível em: <<https://www.correiodamanha.com.br/colunistas/magnavita/2023/06/69271-coluna-magnavita-csn-na-mira-do-mpf-que-exige-solucao-para-a-escoria-anexa-ao-paraiba-do-sul.html>>. Acesso em: 18 Abril 2024.

MATISA. MATISA Matériel Industriel S.A.: BETTUNGSREINIGUNGSMASCHINEN, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.matisa.ch/de/matisa-bettungsreinigungsmaschinen.php>>. Acesso em: 8 Maio 2025.

MCTI, M. D. C. T. E. I. Relatório de Referência: Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.mcti.gov.br/>>. Acesso em: 15 Janeiro 2025.

MCTI, M. D. C. T. E. I. Fator médio - Inventários corporativos, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/fator-medio-inventarios-corporativos>>. Acesso em: 15 Janeiro 2025.

MLADENOVIČ, A. et al. Environmental evaluation of two scenarios for the selection of materials for asphalt wearing courses. **Journal of Cleaner Production**, 87, 15 Janeiro 2015. 683-691.

MME, M. D. M. E. E. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário Estatístico Brasileiro 2022 - Fatores de Conversão**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2022>>.

MOON, H. Y.; YOO, J. H.; KIM, S. S. A Fundamental Study on the Steel Slag Aggregate for Concrete. **Geosystem Engineering**, 5, Julho 2002. 38-45.

MOTZ, H.; GEISELER, J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources. **Waste Management**, Duisburg, Alemanha, 21, Junho 2001. 285-293.

OLAGUNJU, S. O. et al. Physical, mechanical, chemical, and environmental characterization of stockpiled BOF slag as railway ballast material. **Construction and Building Materials**, 408, 8 Dezembro 2023. 133613.

OLIVEIRA, F. U. D. **Avaliação de três métodos de ensaio para determinação do potencial de expansão de escória de aciaria para uso em pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, p. 141. 2006.

PACHECO, L. C. D. **O estudo da escória de aciaria como agregado siderúrgico para uso em lastro ferroviário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense. Niterói, Rio de Janeiro, p. 133. 2006.

PALOD, R.; DEO, S. V.; RAMTEKKAR, G. D. Utilization of waste from steel and iron industry as replacement of cement in mortars. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 21, 5 Julho 2019. 1361-1375.

PAN, S.-Y. et al. CO<sub>2</sub> mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction. **Nature Sustainability**, 3, 2 Março 2020. 399-405.

PARSONS, R. L. et al. Track Ballast Fouling and Permeability Characterization by Using Resistivity. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2448, 2014. 133-141.

PASETTO, M.; GIACOMELLO, G. Railway ballast aggregate characterization through a new strength index: Preliminary suitability evaluation of an industrial by-product for a railway application. **Materials Today: Proceedings**, 11 Julho 2023.

PENA, D. C. **Avaliação da expansibilidade da escória de aciaria curada a vapor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2004.

PETROBRAS. Seleção de Estados - Diesel - Preços dos Combustíveis, 2025. Disponível em: <<https://precos.petrobras.com.br/sele%C3%A7%C3%A3o-de-estados-diesel>>. Acesso em: Fevereiro 2025.

PIRES, J. et al. Avaliação estrutural in situ de uma via férrea reforçada com geogrelha. **XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET**, p. 1098-1109, Out/Nov 2017.

PONS, J. J. et al. Life cycle assessment of a railway tracks substructures: Comparison of ballast and ballastless rail tracks. **Environmental Impact Assessment Review**, 85, Novembro 2020. 106444.

QASRAWI, H. The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 298-304, 15 Março 2014.

QI, L.; LIU, J.; LIU, Q. Compound Effect of  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  on the Strength of Steel Slag - Cement Binding Materials. **Materials Research**, 19, Março 2016. 269-275.

RAK, A. et al. Analysis of railway ballast contamination in terms of its potential reuse. **Journal of Cleaner Production**, 378, 2022. 134440.

RENFORTH, P. et al. Silicate Production and Availability for Mineral Carbonation. **Environmental Science Technology**, 45, 2011. 2035-2041.

ROSADO, L. P. et al. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 151, 10 Maio 2017. 634-642.

SAADE, M. R. M. et al. Aplicação da Análise do Ciclo de Vida na construção civil: discussão sobre alocação de impactos entre o aço e suas escórias. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, 1, 31 Julho 2011. 97-114.

SADEGHI, J. et al. Improvement of railway ballast maintenance approach, incorporating ballast geometry and fouling conditions. **Journal of Applied Geophysics**, 151, Abril 2018. 263-273.

SGAVIOLI, F. et al. Análise do custo do ciclo de vida do lastro ferroviário na estrada de ferro Vitória Minas. **Transportes**, 23, Outubro 2015. 5-12.

SHEN, H.; FORSSBERG, E. An overview of recovery of metals from slags. **Waste Management**, 23, Fevereiro 2003. 933-949.

SHI, C. Steel Slag - Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. **Journal of Materials in Civil**, 16, 2004. 230-236.

SILVA, G. A. et al. **Avaliação do ciclo de vida: Ontologia Terminológica**. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - Ibict. Brasília, p. 72. 2015.

SILVA, M. J. D. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI Materials Journal**, 113, Agosto 2016. 439-446.

SINAPI, S. N. D. P. D. C. E. Í. D. C. C. Sumário de Publicações, Fevereiro 2025. Disponível em: <<https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: Março 2025.

SONG, Q. et al. Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment. **Resources, Conservation and Recycling**, 173, Outubro 2021. 105740.

SOUSA, G. M. D. **Estudo experimental de escória de aciaria para fins de caracterização tecnológica como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 124. 2007.

STEINOUR, H. H. Some effects of carbon dioxide on mortars and concrete – discussion. **American Concrete Institute**, 30, 1959. 905–907.

SUN, Y. et al. CO<sub>2</sub> mineralization using basic oxygen furnace slag: process optimization by response surface methodology. **Environmental Earth Sciences**, 75, 2016. 1335.

TARIFAS de Referências ANTT, 2024. Disponível em: <<https://www.mrs.com.br/clientes/tarifas-referencia/>>. Acesso em: Março 2025.

TARIFAS de Referências ANTT, 2025. Disponível em: <<https://www.mrs.com.br/clientes/tarifas-referencia/>>. Acesso em: Março 2025.

TAVARES, D. S. **Avaliação Laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 138. 2012.

TIAN, S. et al. Direct Gas–Solid Carbonation Kinetics of Steel Slag and the Contribution to In situ Sequestration of Flue Gas CO<sub>2</sub> in Steel-Making Plants. **ChemSusChem**, 6, 2013. 2348-2355.

TU, T. A. et al. Characterization of carbonated steelmaking slag and its potential application in construction. **Vietnam Journal of Science and Technology**, 57, Outubro 2019. 61-68.

TURK, J. et al. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. **Waste Management**, 45, Novembro 2015. 194-205.

UKWATTAGE, N. L.; RANJITH, P. G.; LI, X. Steel-making slag for mineral sequestration of carbon dioxide by accelerated carbonation. **Measurement**, 97, Fevereiro 2017. 15-22.

VÁCLAVÍK, V. et al. Sustainability Potential Evaluation of Concrete with Steel Slag Aggregates by the LCA Method. **Sustainability**, 23, 25 Novembro 2020. 9873.

VIGNALI, G. Ballasted or ballastless for a railway infrastructure? A comparative environmental impact assessment of two solutions. **Cleaner Environmental Systems**, 12, Março 2024. 100158.

WANG, D.; CHANG, J.; ANSARI, W. S. The effects of carbonation and hydration on the mineralogy and microstructure of basic oxygen furnace slag products. **Journal of CO2 Utilization**, 34, Dezembro 2019. 87-98.

WANG, X. et al. Evaluation of the carbon sequestration potential of steel slag in China based on theoretical and experimental labile Ca. **Resources, Conservation and Recycling**, 186, Novembro 2022. 106590.

XIAN, X. et al. Converting industrial waste into a value-added cement material through ambient pressure carbonation. **Journal of Environmental Management**, 325, parte B, 1 Janeiro 2023. 116603.

XIE, J. et al. The Life Cycle Energy Consumption and Emissions of Asphalt Pavement Incorporating Basic Oxygen Furnace Slag by Comparative Study. **Sustainability**, 13, 19 Abril 2021. 4540.

YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. **Advances in Civil Engineering**, 26 Outubro 2011.

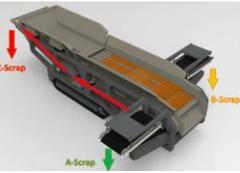
YILDIRIM, Z.; PREZZI, M. Geotechnical Properties of Fresh and Aged Basic Oxygen Furnace Steel Slag. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 27, 16 Abril 2015. 04015046.

ZHONG, T. et al. Utilization of steel slag as coarse aggregate and filler in stone mastic asphalt (SMA) mixture: Engineering performance, environmental impact and economic benefits analysis. **Journal of Cleaner Production**, 450, 15 Abril 2024. 141891.

## APÊNDICE A - Dados dos equipamentos e veículos utilizados no beneficiamento do agregado siderúrgico

A Tabela 27 reúne as informações técnicas e de consumo energético dos equipamentos e veículos usados nas etapas de beneficiamento e transporte interno do agregado siderúrgico.

Tabela 27 – Equipamentos e veículos usados no processo de beneficiamento do agregado siderúrgico

Equipamento	Modelo	Capacidade	Potência	Fonte de energia	Consumo médio energético	Imagem
Britador de mandíbula	ST01BB	300t/h	CAT-C9.3 282kW	Diesel	71,9l/h	
Planta móvel de recuperação de metais	MRP 40300	300t/h	129kW	Diesel	32,9l/h	
Pá carregadeira	Liebherr L580	5,2m <sup>3</sup>	224kW	Diesel	19,1l/h	
Caminhão fora-de-estrada	Randon RK 430B	30t	311CV	Diesel	-	

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

## APÊNDICE B - Dados dos maquinários utilizados na instalação do lastro

A Tabela 28 apresenta as especificações técnicas, produtividade e consumo energético dos maquinários utilizados nas operações de instalação do lastro na ferrovia.

Tabela 28 – Maquinários utilizados na instalação do lastro ferroviário

Equipamento	Modelo	Potência	Produtividade	Fonte de energia	Consumo médio energético
Socadora <sup>a</sup>	09-3X	520kW	1500m/h	Diesel	≈63,8l/h
Reguladora	SSP 110 SW	235kW	1000m/h	Diesel	≈60l/h
Renovadora	P-190	403kW	172m/h	Diesel S500	6,05l/h
Desguarnecedora	C-75	708kW	126m/h	Diesel S500	24l/h

Nota: <sup>a</sup> A produtividade varia entre 1200m/h e 1800m/h. Foi considerada a média.

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

## APÊNDICE C - Dados dos equipamentos utilizados no processamento do lastro de brita natural

A Tabela 29 reúne as informações dos equipamentos considerados no processamento da brita natural destinada ao uso como lastro, incluindo o consumo total para o volume de lastro processado.

Tabela 29 – Equipamentos considerados no processamento da brita natural

Equipamento	Quantidade	Potência total (kWh)	Consumo total para 4254t (kWh)
Alimentador vibratório	1	29,42	7,51E+02
Britador de mandíbula	1	110,32	2,82E+03
Esteira	3	44,13	1,13E+03
Alimentador vibratório	1	5,52	1,41E+02
Alimentador vibratório	1	14,71	3,75E+02
Esteira	5	27,58	7,04E+02
Britador cônico	1	147,1	3,75E+03
Esteira	3	22,06	5,63E+02
Britador cônico	1	110,32	2,82E+03
Esteira	1	11,03	2,82E+02
Peneira vibratória	1	22,06	5,63E+02
Esteira	1	2,94	7,50E+01
<b>Total</b>	<b>20</b>	<b>547,19</b>	<b>1,40E+04</b>
Conforme Coelho e Brito (2013), os equipamentos não trabalham de forma contínua; ocorrem paradas para carga, descarga e manutenção, que podem ocupar 30% de todo o período de produção.			<b>9,78E+03</b>

Fonte: Rosado *et al.* (2017), adaptado.