



CONTRIBUIÇÃO PARA UM MÉTODO DE ANÁLISE DO DESEMPENHO  
AMBIENTAL DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO, BASEADO NA AVALIAÇÃO  
DO CICLO DE VIDA

Filipe Batista Ribeiro

Tese de doutorado submetido ao corpo docente do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de doutor em ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro  
Novembro de 2023

CONTRIBUIÇÃO PARA UM MÉTODO DE ANÁLISE DO DESEMPENHO  
AMBIENTAL DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO, BASEADO NA AVALIAÇÃO  
DO CICLO DE VIDA

Filipe Batista Ribeiro

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva, D.Sc.

Examinado por: Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva, D.Sc.

Profª. Michéle Dal Toé Casagrande, D.Sc

Prof. João Miguel Oliveira dos Santos, Ph.D.

Prof. Filipe Almeida Corrêa do Nascimento, D.Sc.

Prof. Márcio de Almeida D'Agosto, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Novembro de 2023

Ribeiro, Filipe Batista

Contribuição para um método de análise do desempenho ambiental do pavimento ferroviário, baseado na avaliação do ciclo de vida/ Filipe Batista Ribeiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XIII, 262 p: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 200-226

1. Desempenho ambiental do pavimento ferroviário. 2. Análise do ciclo de vida. I. Silva, Marcelino Aurelio Vieira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*Dedicado à minha família e amigos.*

*“If you cannot measure it, you cannot improve it.”*  
Kelvin, 1889

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciência (D.Sc.)

CONTRIBUIÇÃO PARA UM MÉTODO DE ANÁLISE DO DESEMPENHO  
AMBIENTAL DO PAVIMENTO FERROVIÁRIO, BASEADO NA AVALIAÇÃO  
DO CICLO DE VIDA

Filipe Batista Ribeiro

Novembro/2023

Orientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Programa: Engenharia de Transportes

Em resposta à crescente demanda por crédito para financiar projetos ferroviários, carteiras de opções de crédito com critérios alinhados a fatores ambientais têm se mostrado uma solução interessante. Portanto, o objetivo deste estudo é apresentar uma contribuição a um método abrangente para analisar os projetos ferroviários a partir do seu desempenho ambiental, baseado na avaliação do ciclo de vida, focado na realidade brasileira, visando expandir a abrangência dos parâmetros tradicionalmente avaliados nos estudos e relatório de impacto ambiental. Para isso, o presente trabalho detalha o método proposto seguido de estudo de caso. Diante disso, o proposto método limitou o objetivo à comparação de diferentes seções de pavimento, a nível de projeto, usando as categorias de impacto inerentes aos métodos globais. Além disso, o escopo compreendeu um quilômetro de via férrea, excluindo-se os demais elementos da infraestrutura, o qual empregou a quantidade de passagens de veículos como unidade funcional. Já para o sistema de produto, foram adotados os processos desde a extração da matéria-prima, passando pelo beneficiamento e fabricação, assim como a construção e manutenção, incluso todo o transporte. Adiante, sobre a análise estrutural, foram adotados os critérios de variação da condição estrutural do subleito e de materiais empregados, baseado em modelagem computacional, para estimativa de vida útil. Em seguida, para o levantamento de insumos de construção e manutenção, sugeriu-se o uso de bases nacionais de custos, e para a caracterização dos impactos ambientais, a seleção das categorias presentes em método global. E, por fim, a interpretação baseada na comparação de cenários. Finalmente, o estudo de caso, ao avaliar

o impacto de potencial de aquecimento global, durante uso da via por 100 anos, comparou quatro seções de pavimento com variação de materiais no sublastro, e admitindo o comportamento mecânico do subleito sob duas condições distintas de umidade (ótima e ótima+2%), resultando em oito cenários. Portanto, ao comparar com os valores de referência da revisão da literatura (13,40 – 22,37 tCO<sub>2</sub>e/km/ano), os resultados indicam que o sublastro, sem o uso de materiais aglutinantes, especificamente 8,27 tCO<sub>2</sub>eq/km/ano, é a melhor escolha, considerando o teor de umidade ótimo, mesmo. Em relação ao subleito com teor de umidade acima do ideal, o uso da mistura solo-cimento, representando 8,99 tCO<sub>2</sub>eq/km/ano, é a melhor escolha. Finalmente, o asfalto misturado à quente é a opção que apresenta a maior contribuição – 30,60 tCO<sub>2</sub>eq/km/ano. No entanto, vale ressaltar que esta última solução de engenharia é utilizada para impermeabilizar o subleito, o que pode ser uma opção interessante em situações em que o teor de umidade seja superior ao utilizado neste estudo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CONTRIBUTION TO A METHOD FOR ANALYZING THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF RAILROAD PAVEMENT BASED ON LIFE CYCLE ASSESSMENT

Filipe Batista Ribeiro

November/2023

Advisor: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Department: Engenharia de Transportes

Portfolios of credit options with criteria matched with environmental issues have proven to be an intriguing response to the rising demand for credit to finance railway improvements. So, the purpose of this study is to contribute to a thorough method for evaluating the environmental performance of railroad projects based on life cycle assessment, with a focus on Brazilian reality, broadening the range of the parameters that are typically evaluated in studies and environmental impact reports. The current work describes the proposed method, followed by a case study. The purpose was thus restricted to comparing various pavement sections, at the project level, using the impact categories inherent to the global methods. In addition, the scope included one kilometer of railway track, excluding other infrastructure elements, which used the number of vehicle passages as a functional unit. As for the product system, processes were adopted from the extraction of raw materials, through processing and manufacturing, as well as construction and maintenance, including all transport. Further on, regarding the structural analysis, the criteria for varying the structural condition of the subgrade and the materials used were adopted, based on computational modeling, to estimate the service life. Then, for the survey of construction and maintenance inputs, the use of national cost bases was suggested, and for the characterization of environmental impacts, the selection of categories present in a global method. And, finally, the interpretation based on the comparison of scenarios. Finally, the case study, when evaluating the impact of the global warming potential, during the use of the railroad for 100 years, compared four sections of

pavement with variations in materials in the subballast, and assumed the mechanical behavior of the subgrade under two different conditions of moisture content (optimum and optimum+2%), resulting in eight scenarios. Therefore, when comparing with the reference values of the literature review (13.40 – 22.37 tCO<sub>2</sub>e/km/year), the results indicate that the subballast, without the use of binding materials, specifically 8.27 tCO<sub>2</sub>eq/km/ year, it is the best choice, considering the optimum moisture content. Regarding the subgrade with a moisture content higher than ideal, the use of the soil-cement mixture, representing 8.99 tCO<sub>2</sub>eq/km/year, is the best choice. Finally, hot-mixed asphalt is the option with the highest contribution – 30.60 tCO<sub>2</sub>eq/km/year. However, it is worth mentioning that this last engineering solution is used to waterproof the subgrade, which can be an interesting option in situations where the moisture content is higher than that used in this study.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
1.1	Considerações iniciais.....	01
1.2	Formulação do problema .....	06
1.3	Justificativa .....	10
1.4	Premissa e hipóteses .....	14
1.5	Objetivos da pesquisa .....	15
1.6	Delimitação do trabalho.....	17
1.6.1	Quanto ao Objetivo e Escopo .....	17
1.6.2	Quanto à Análise Estrutural do pavimento.....	18
1.6.3	Quanto à mensuração dos insumos e caracterização dos impactos .....	20
1.6.4	Quanto ao estudo de caso proposto .....	21
1.7	Estrutura do trabalho.....	23
<b>2</b>	<b>AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA INFRAESTRUTURA</b>	
	<b>FERROVIÁRIA .....</b>	<b>24</b>
2.1	Avaliação do Ciclo de Vida.....	24
2.1.1	Objetivo de ACV.....	27
2.1.2	Escopo de ACV .....	28
2.1.3	Método de Avaliação do Impacto.....	33
2.1.4	Inventário de Ciclo de Vida e <i>Software</i> de ACV.....	36
2.1.5	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida.....	41
2.1.6	Interpretação da ACV e análise de incertezas .....	44
2.2	ACV em infraestrutura ferroviária de cargas.....	46
2.2.1	Contextualização da temática com base em revisão bibliométrica .....	52
2.3	Relevância do Subleito na infraestrutura Ferroviária .....	58
2.3.1	Análise de tensão .....	63
2.3.2	Análise de deformação .....	65
2.3.3	<i>Software</i> para análise estrutural.....	67
2.3.4	Estimativa de vida útil, a partir do desempenho do subleito .....	67
2.4	Estimativa de insumos em projetos de infraestrutura .....	70
2.5	Conclusão.....	73
<b>3</b>	<b>MÉTODO PARA SELEÇÃO DE PROJETOS DE PAVIMENTO</b>	
	<b>FERROVIÁRIO, BASEADO NO DESEMPENHO AMBIENTAL.....</b>	<b>75</b>
3.1	Objetivo e Escopo.....	77

3.2	Análise de Inventário e Método de Avaliação.....	84
3.3	Avaliação de impactos do Ciclo de Vida.....	85
3.4	Interpretação .....	85
3.5	Análise estrutural do pavimento ferroviário .....	86
3.6	Levantamento de insumos para o sistema de produto da via permanente .....	94
3.7	Levantamento dos impactos ambientais para a via permanente .....	94
3.8	Análise de cenários .....	95
3.9	Conclusão.....	96
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO NA FERROVIA FERROGRÃO.....</b>	<b>98</b>
4.1	Definição do Objetivo e Escopo .....	99
4.1.1	Detalhamento do Escopo .....	102
4.2	Análise Estrutural e Estimativa de vida do Pavimento Ferroviário .....	108
4.2.1	Definição das características técnicas de engenharia .....	108
4.2.2	Coleta e obtenção de dados .....	108
4.2.3	Resultado da Análise Estrutural .....	111
4.3	Levantamento de insumos para Construção e Manutenção .....	120
4.3.1	Quantidade de insumos para Construção de 01km de via.....	120
4.3.2	Quantidade de insumos para Manutenção de 01 km de via .....	125
4.4	Caracterização do Impacto de Potencial de Aquecimento Global.....	132
4.4.1	<i>Input</i> de dados no software de ACV.....	137
4.4.2	Caracterização para Construção e Manutenção.....	141
4.4.3	Considerações sobre a matriz energética brasileira na ACV.....	159
4.5	Interpretação da ACV para as etapas de Construção e Manutenção .....	161
4.5.1	Sumário executivo do Estudo de Caso .....	171
4.5.2	Análise de Incertezas .....	173
4.6	Conclusões do Estudo de Caso .....	176
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS .....</b>	<b>179</b>
5.1	Considerações finais e limitações .....	179
5.2	Proposições para novos estudos.....	184
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>185</b>
	<b>GLOSSÁRIO .....</b>	<b>212</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>216</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Movimentação histórica de passageiros no Brasil Fonte: EPL (2023).....	01
Figura 2	Movimentação de carga por modo ferroviário no Brasil – Fonte: EPL (2023) .....	02
Figura 3	Transporte por trilhos do Brasil no cenário internacional. Fonte: CNT (2015).....	02
Figura 4	Composição dos modos de transporte internacional. Fonte: Dantas & Fraga (2021)...	03
Figura 5	Mapa das ferrovias de carga no Brasil – Fonte: ANTF (2023).....	04
Figura 6	Emissões de CO2 por setores da economia no Brasil. Fonte: EPL (2023).....	05
Figura 7	Emissão de CO2 por modo de transporte no Brasil. Fonte: EPL (2023).....	05
Figura 8	Emissão de gases por setor. Fonte: Climate Watch the World Institute, 2020 .....	11
Figura 9	Objetivos Geral e Específicos.....	16
Figura 10:	Estrutura de Avaliação do Ciclo de Vida. Adaptado de Loijos (2011).....	25
Figura 11:	Etapas da AICV. Adaptado ABNT (2009).....	42
Figura 12	Esquemático do caminho do impacto. Adaptado de ILCD (2010).....	42
Figura 13	Etapas obrigatórias e opcionais para ACV. Fonte: ABNT, 2009 (Adaptado). .....	43
Figura 14	Elementos de interpretação em ACV. Adaptado de ILCD (2010) .....	45
Figura 15	Localização e tipos de casos de estudos. Adaptado de Olugbenga et al. (2019) .....	48
Figura 16	Evolução histórica das publicações dos últimos dez anos (2013 – 2023).....	53
Figura 17	Autores relevantes dos últimos dez anos (2013 – 2023).....	54
Figura 18	Rede de autores e sua relevância .....	55
Figura 19	Principais palavras-chave dos estudos .....	55
Figura 20	Rede de palavras-chave e sua relevância .....	56
Figura 21	Principais periódicos dos últimos dez anos .....	58
Figura 22:	Falha do subleito devido às condições não-ideais de umidade. Adaptado de Usman <i>et al.</i> (2015).....	60
Figura 23	Métodos de estabilização do subleito. Adaptado de Roshan <i>et. al</i> (2022).....	62
Figura 24:	Exemplo de resultados da modelagem com <i>software</i> de elementos finitos.....	67
Figura 25	Exemplo de Composição usada no estudo. Fonte: DNIT (2021).....	72
Figura 26	Processo de identificação de insumos no SICRO para <i>input</i> do SimaPro. ....	72
Figura 27	Fluxograma do procedimento metodológico proposto .....	76
Figura 28	Principais elementos ferroviários para ACV da via permanente .....	82
Figura 29:	Método baseado em tensão e deformação. Adaptado de Li <i>et al.</i> (2015). .....	88
Figura 30:	Estimativa de $N_{efetivo}$ utilizando análise por tensão .....	91
Figura 31:	Estimativa de $N_{efetivo}$ utilizando análise por deformação plástica .....	93
Figura 32	Fluxograma da aplicação do procedimento metodológico proposto .....	100
Figura 33:	Seção de pavimento adotada como Unidade Funcional (sem escala) .....	102
Figura 34:	Variabilidade dos materiais no sublastro. Adaptado de Sol-Sánchez <i>et al.</i> (2016). ..	103
Figura 35	Principais componentes de ACV do estudo de caso.....	107
Figura 36	Comparativo dos resultados da Tensão Desvio efetiva no topo do subleito.....	112
Figura 37	Comparativo dos resultados do Módulo Resiliente da camada de subleito .....	113
Figura 38	Comparativo entre tensão desvio efetiva e tensão admissível. ....	115
Figura 39	Comparativo entre os valores de $N_{efetivo}$ calculados e o $N_{projeto}$ . ....	116
Figura 40	Estimativa de vida útil do subleito para os diferentes cenários analisados.....	117
Figura 41	Consolidação dos dados de $N_{admissivel}$ de Castro et al. (2022).....	118
Figura 42	Resultados de vida útil estimada por Castro et al. (2022).....	119
Figura 43	Impacto de Potencial de Aquecimento Global para estágio de Construção.....	142
Figura 44	Impacto de Potencial de Aquecimento Global para estágio de Manutenção .....	142
Figura 45	Potencial de Aquecimento Global para estágio de Reconstrução.....	143
Figura 46	Potencial de Aquecimento Global por insumo – Construção – Cenários 01 e 02 ....	144
Figura 47	Potencial de Aquecimento Global por insumo – Construção – Cenários 03 e 04 ....	145
Figura 48	Potencial de Aquecimento Global por insumo – Construção – Cenários 05 e 06 ....	146

Figura 49	Potencial de Aquecimento Global por insumo – Construção – Cenários 07 e 08 ....	147
Figura 50	Comparativo de impacto por insumo – Construção – Cenários 01 a 06.....	148
Figura 51	Comparativo de impacto por insumo – Construção – Cenários 01 a 08.....	149
Figura 52	Impacto por insumo – Manutenção – Cenários 01 a 08.....	150
Figura 53	Impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 01 e 02.....	151
Figura 54	Impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 03 e 04.....	152
Figura 55	Impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 05 e 06.....	153
Figura 56	Impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 07 e 08.....	154
Figura 57	Comparativo de impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 01 a 06 .....	155
Figura 58	Comparativo de impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 01 a 08 .....	156
Figura 59	Resultado de impacto por elementos da infraestrutura - Construção.....	157
Figura 60	Resultado de impacto por elementos da infraestrutura - Manutenção .....	158
Figura 61	Resultado de impacto por elementos da infraestrutura - Reconstrução .....	158
Figura 62	Comparativo de categorias, baseado na variação das matrizes energéticas.....	160
Figura 63	Comparativo entre frequências de reconstrução - Cenários 01 e 02.....	163
Figura 64	Comparativo entre frequências de reconstrução - Cenários 03 e 04.....	163
Figura 65	Comparativo entre frequências de reconstrução - Cenários 05 e 06.....	164
Figura 66	Comparativo entre frequências de reconstrução - Cenários 07 e 08.....	164
Figura 67	Impacto gerado no período de 100 anos - Construção.....	165
Figura 68	Impacto gerado para o período de 100 anos - Manutenção .....	165
Figura 69	Impacto gerado para o período de 100 anos - Reconstrução .....	166
Figura 70	Total de caracterização de impacto, considerando o período de 100 anos. ....	167
Figura 71	Comparativo de índices de impacto do presente estudo com a literatura .....	168
Figura 72	Análise de Incertezas - Cenários 01 e 02 .....	174
Figura 73	Análise de Incertezas - Cenários 03 e 04 .....	174
Figura 74	Análise de Incertezas - Cenários 05 e 06.....	174
Figura 75	Análise de Incertezas - Cenários 07 e 08 .....	174
Figura 76	Comparativo da variação dos cenários para a Análise de Incertezas.....	175

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Índices de emissão e impacto por carga transportada para diferentes modos de transporte. Adaptado de Umweltbundesamt (2013).....	11
Tabela 2: Principais Objetivos adotados em estudos sobre ACV em infraestrutura ferroviária. Adaptado de Olugbenga <i>et al.</i> (2019) .....	27
Tabela 3: Estudos de caso segregados pelos elementos de Avaliação do Ciclo de Vida. Adaptado de Olugbenga, Kalyviotis & Saxe (2019) .....	30
Tabela 4: Fronteira de sistemas na Avaliação do Ciclo de Vida em transporte ferroviário. Adaptado de Kapetanović <i>et al.</i> (2019).....	32
Tabela 5: Categorias de impacto e modelos de caracterização. Fonte: Piekarski, 2015 .....	34
Tabela 6: Recomendação de métodos de ACV para o Brasil. Fonte: Ugaya <i>et al.</i> , 2019. ....	35
Tabela 7: Métricas de indicadores por categoria e método. Fonte: Mendes <i>et al.</i> (2016).....	35
Tabela 8: Inventários de Ciclo de Vida aplicados em Transporte Ferroviário. Adaptado de Bortoli <i>et al.</i> , (2020).....	39
Tabela 9: Sumário não-exaustivo de ferramentas para Cálculo de Carbono e Avaliação do Ciclo de Vida em Infraestrutura de Transporte Ferroviário.....	40
Tabela 10: Estudos sobre ACV aplicada em infraestrutura do transporte de carga ferroviário ..	47
Tabela 11: Indicadores de avaliação adotados nos estudos de ACV em transporte ferroviário..	49
Tabela 12: Parâmetros da Revisão Bibliométrica .....	52
Tabela 13: Estudos sobre camadas específicas do pavimento da Etapa 01 .....	57
Tabela 14: Modelos matemáticos de módulo resiliente - Adaptado Medina e Motta (2015) .....	64
Tabela 15: Modelos de deformação permanente para solos.....	66
Tabela 16: Tipos de estudos de ACV para o procedimento proposto (adaptado ILCD, 2010)....	80
Tabela 17: Resumo da estruturação dos cenários quanto aos critérios adotados .....	105
Tabela 18: Premissas das atividades de manutenção .....	106
Tabela 19: Fontes de dados obtidos na literatura para modelagem computacional .....	109
Tabela 20: Dados de laboratório para modelagem do subleito .....	109
Tabela 21: Resultados da modelagem estrutural do subleito ferroviário .....	111
Tabela 22: Resultados da modelagem realizada por Castro <i>et al.</i> (2022) .....	117
Tabela 23: Parâmetros para estimativa de quantitativo.....	121
Tabela 24: Lista de atividades para construção dos Cenários 01 e 02 .....	121
Tabela 25: Lista de atividades para construção dos Cenários 03 e 04 .....	121
Tabela 26: Lista de atividades para construção dos Cenários 05 e 06 .....	122
Tabela 27: Lista de atividades para construção dos Cenários 07 e 08 .....	123
Tabela 28: Consolidação dos insumos, por cenários, para a etapa de Construção.....	123
Tabela 29: Frequência das atividades e % de reaproveitamento de materiais .....	126
Tabela 30: Lista de atividades para manutenção dos Cenários 01 a 08 .....	126
Tabela 31: Lista de atividades para reconstrução dos Cenários 01 e 02 .....	127
Tabela 32: Lista de atividades para reconstrução dos Cenários 03 e 04 .....	127
Tabela 33: Lista de atividades para reconstrução dos Cenários 05 e 06 .....	128
Tabela 34: Lista de atividades para reconstrução dos Cenários 07 e 08 .....	129

Tabela 35: Consolidação dos insumos, por atividades, para a etapa de Manutenção .....	130
Tabela 36: Consolidação dos insumos, por cenários, para a Reconstrução .....	130
Tabela 37: Inventários de ciclo de vida utilizadas na etapa de Construção .....	134
Tabela 38: Inventários de ciclo de vida utilizadas na etapa de Manutenção.....	136
Tabela 39: Consolidação dos quantitativos dos inventários de ciclo de vida, segregados pelos cenários, para a etapa de Construção.....	138
Tabela 40: Consolidação dos quantitativos dos inventários de ciclo de vida para a etapa de Manutenção .....	139
Tabela 41: Consolidação dos quantitativos dos inventários de ciclo de vida, segregados pelos cenários, para a etapa de Manutenção - Reconstrução.....	140
Tabela 42 Inventário com maior contribuição - Cenários 01 e 02 na Construção .....	160
Tabela 43 Consolidação dos resultados da Análise de Incertezas.....	175
Tabela 44 Inventários atualizados para a matriz energética do Brasil .....	245

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo fundamenta as propostas desta tese, evidenciando os principais elementos que norteiam a necessidade de uma contribuição a um método para análise do desempenho ambiental da infraestrutura ferroviária do Brasil, baseado na avaliação do ciclo de vida (ACV). Diante disso, essa seção apresenta o problema de pesquisa, os objetivos, a justificativa, a delimitação da pesquisa e, por fim, a estrutura deste trabalho.

## 1.1 Considerações iniciais

A matriz de transporte brasileira é caracterizada principal e historicamente pelo modo rodoviário, estabelecida devido aos robustos investimentos na década de 1970, gerados pelos objetivos macroeconômicos de expansão do emprego e renda nacional. É nesse momento que foram lançadas as bases para a consolidação de uma estrutura logística pouco adequada para as reais necessidades do país, segundo Pasin (2002).

Todavia, o uso do transporte ferroviário, tanto de cargas quanto passageiros, vem se expandindo, conforme pode ser visto na Figura 1 e Figura 2. No tocante ao transporte de passageiros, é possível notar que o metrô e o trem metropolitano têm se mostrado como principais meios de transporte quando a preferência é o veículo por trilhos. De toda forma, nota-se também a presença de tecnologias mais aderentes ao mobiliário urbano, sendo empregados no país, como o veículo leve sobre trilhos - VLT e o Aeromóvel. A queda abrupta na demanda, a partir de 2020, pode ser atribuída à pandemia de Covid-19 (FGV, 2022).



Figura 1 Movimentação histórica de passageiros no Brasil Fonte: EPL (2023)

Já tratando em relação ao transporte de cargas, observa-se que, até 2018, o país mostrou uma crescente constante na movimentação por trilhos. A partir de 2019, é possível inferir que a queda de aproximadamente 13% se deve, entre outros fatores, também aos impactos gerados pela pandemia de Covid-19 (Santos, 2022), conforme demonstrado de modo similar no transporte de passageiros, na Figura 1.

Movimentação de Tonelada Útil (TU)

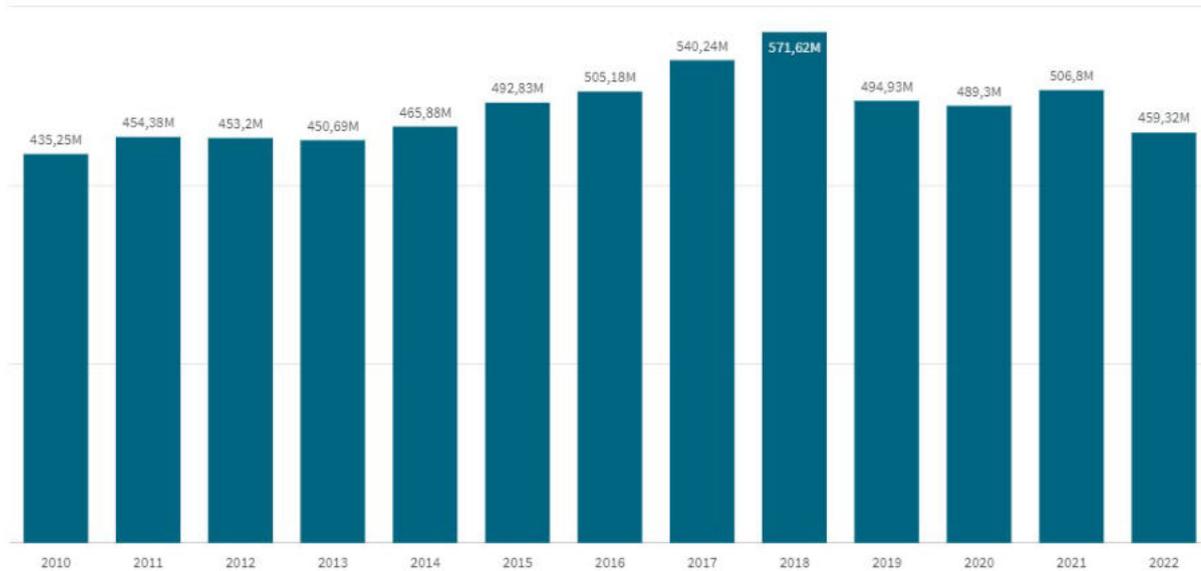


Figura 2 Movimentação de carga por modo ferroviário no Brasil – Fonte: EPL (2023)

Para contextualizar o modo ferroviário frente ao mundo, a Figura 3 situa o Brasil em uma posição modesta quando comparado à densidade da malha com outros países.

Densidade do transporte ferroviário  
(km de infraestrutura por 1.000 km de área)

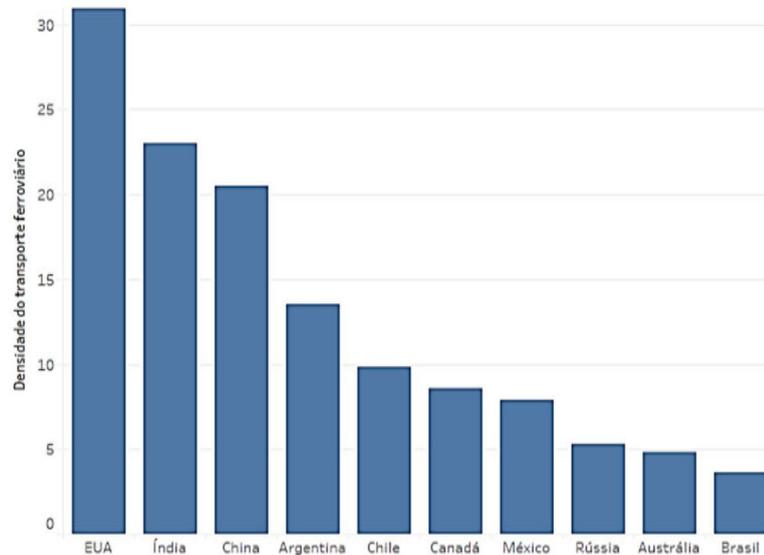


Figura 3 Transporte por trilhos do Brasil no cenário internacional. Fonte: CNT (2015)

Ainda quanto ao transporte de cargas, o modo ferroviário nacional é basicamente caracterizado por concessões a operadores concentrados nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, conforme Figura 5. Tais empresas são responsáveis pela operação do transporte e a manutenção das linhas férreas.

Segundo Cerbino *et al.* (2019), um dos principais gargalos para a expansão da malha é a política de construção de novas ferrovias e a crise fiscal enfrentada pelo país. Assim sendo, para sanar essa questão, o foco da estratégia de gestão do transporte ferroviário nacional se deslocou para a retomada do investimento tendo como base a prorrogação antecipada dos contratos vigentes, assim como o modelo de negociação chamado Investimentos Cruzados, estabelecidos pela Resolução PPI 42/2018. Em resumo, a renovação antecipada dos contratos de concessão trará obrigações de investimentos de expansão da malha ferroviária nacional, principalmente por meio da transferência dos recursos advindos das autorgas. Paralelo a esse fato, foi criado o Programa de Autorizações Ferroviárias, Pro Trilhos, por meio da Medida Provisória nº 1.065/21, que instaura o instituto da outorga por autorização para o setor ferroviário, permitindo a livre iniciativa no mercado ferroviário. Com isso, o setor privado terá a permissão para construir e operar ferrovias, ramais, pátios e terminais ferroviários. O objetivo do programa é aumentar a atratividade do setor privado para realizar investimentos em ferrovias, sejam elas *greenfields* (novos empreendimentos – ferrovias executadas a partir do “zero”) ou *brownfields* (empreendimento que utilizará ferrovia já existente, pelo menos em parte da extensão desejada), abrindo um campo para a verticalização da cadeia de suprimentos e aumento da malha ferroviária brasileira.

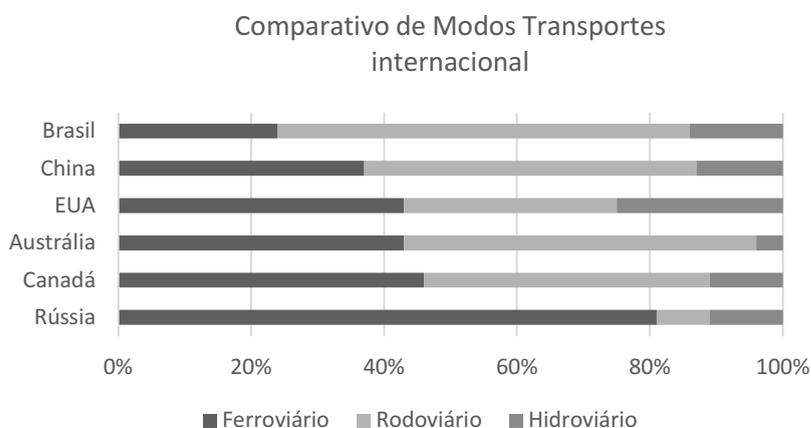


Figura 4 Composição dos modos de transporte internacional. Fonte: Dantas & Fraga (2021)

A Figura 4 evidencia a necessidade de tais mudanças na política de investimento em infraestrutura ferroviária, quando mostra o Brasil com percentual do transporte por trilho em patamares bem inferiores a países com grandes extensões territoriais.

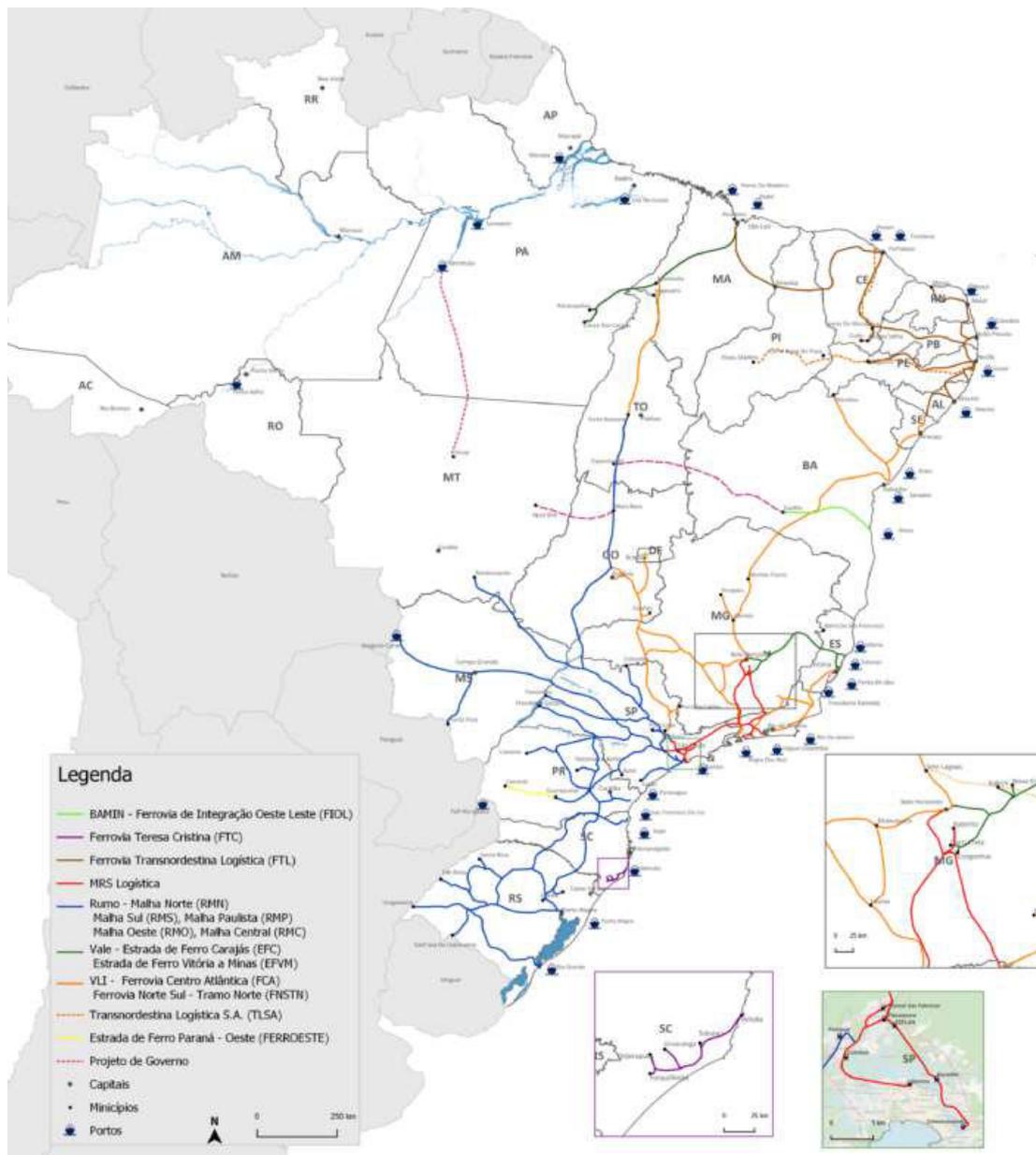


Figura 5 Mapa das ferrovias de carga no Brasil – Fonte: ANTF (2023)

Logo, contextualizando o transporte no tocante às questões do impacto ambiental, perante os demais setores da economia, e ao avaliar sua representatividade nas emissões mostradas na Figura 6, fica evidente a demanda por esforços para mudar esse cenário.

### Emissões de dióxido de carbono (2010-2021)

mil t. CO2

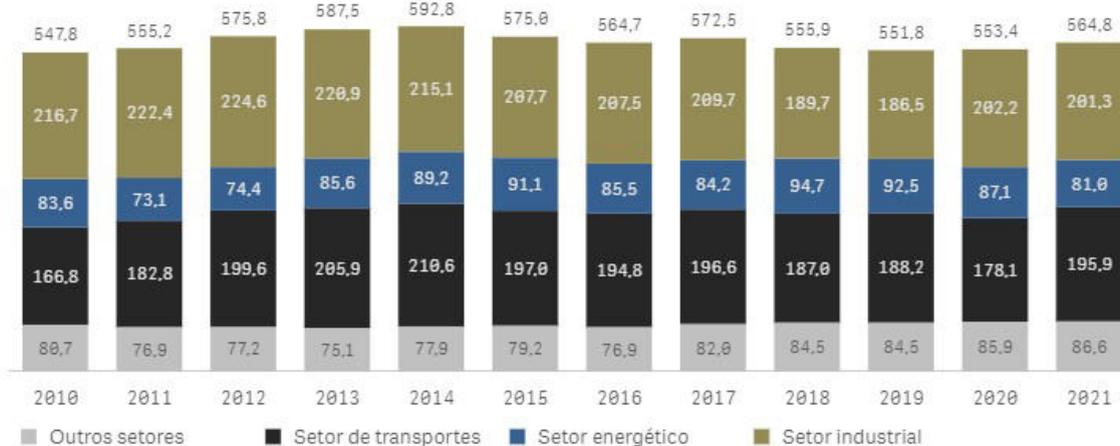


Figura 6 Emissões de CO2 por setores da economia no Brasil. Fonte: EPL (2023)

Portanto, ao se avaliar a Figura 7, entende-se que três pilares sejam imperativos para essa mudança: *i.* maior uso e expansão da malha ferroviária, em detrimento às rodovias; *ii.* emprego de locomotivas elétricas; *iii.* uso de infraestrutura aderente às políticas de baixa emissão e impactos ambientais.

### Emissão de dióxido de carbono - setor de transporte

% participação

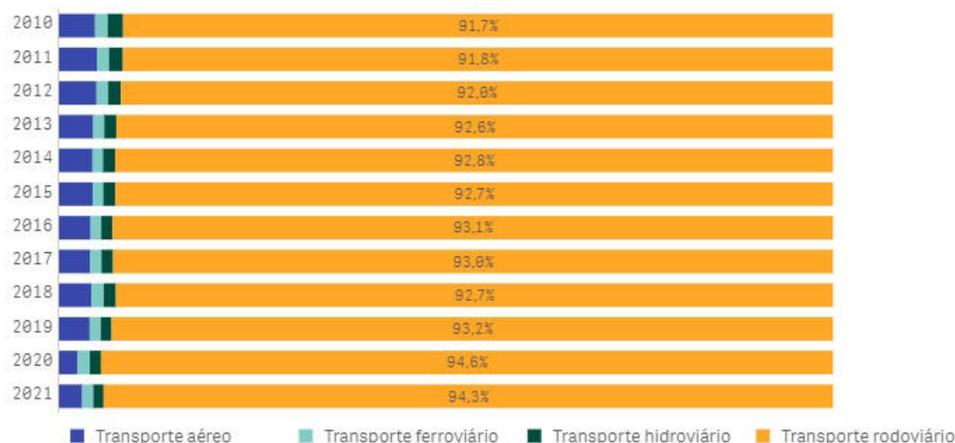


Figura 7 Emissão de CO2 por modo de transporte no Brasil. Fonte: EPL (2023)

Assumindo que o primeiro aspecto já foi abordado, ao se tratar da política de investimento nacional no setor de transportes, é interessante salientar que, no que se refere à mudança de matriz energética, visando atender o segundo critério, as empresas têm realizado esforços embrionários para encontrar soluções que reutilizem a energia

(Brockveld, 2022), reduzam o consumo de combustível (MRS, 2022) ou mesmo suprimam o uso de diesel em suas locomotivas (Gabriel, 2021).

Por fim, no que diz respeito ao emprego de infraestrutura alinhada às demandas de mitigação dos impactos (Ribeiro *et al.*, 2022) e adaptação às mudanças climáticas (Blackwood *et al.*, 2022), a comunidade científica tem se debruçado sobre o assunto para identificar as soluções de engenharia que permitam o planejamento de intervenções a longo prazo, considerando não apenas os critérios de custos e durabilidade, mas a transversalidade da sustentabilidade.

Isto posto, durante os últimos anos, trabalhos como o desenvolvido por Landgraf & Horvath (2021), Bortoli *et. al* (2020), Pons *et al.* (2020), Rempelos *et. al.* (2020), Chang & Kendall (2011) e Stripple and Uppenberg (2010) têm se dedicado à aplicação de ACV em infraestrutura ferroviária nos países do hemisfério norte, tratando do desempenho ambiental como critério de avaliação. No Brasil, estudos acerca da temática, como Gouveia *et al.* (2021), Andrade e D’Agosto (2016) e Salles (2009), trataram de analisar a infraestrutura pela perspectiva ambiental, mostrando a realidade nacional quanto à temática.

Por fim, o problema de pesquisa do presente trabalho, descrito a seguir, tem a pretensão de focar neste último tópico, ou seja, como estruturar as demandas de infraestrutura do transporte ferroviário, o conhecimento técnico de engenharia civil e as melhores práticas da avaliação do ciclo de vida, para permitir o mapeamento de soluções alinhadas às necessidades do setor, no contexto da mitigação dos impactos ambientais.

## **1.2 Formulação do problema**

A integridade de nossas comunidades e economias é diretamente afetada pela relação entre o meio ambiente e as intervenções humanas, para promover o desenvolvimento. Seja para esforços direcionados à garantia de infraestrutura (fornecimento de água, energia, saneamento ou transporte) ou mesmo pelas ações de implementação de novos negócios. De toda forma, seja qual for o objetivo final, recentemente tais empreendimentos têm sido desafiados a encarar seu papel, tanto no que diz respeito aos impactos que eles potencialmente irão ocasionar no meio ambiente, ou seja, as ações de mitigação (Fisch-Romito, 2021; Bilgili *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2018; IPCC, 2014), assim como avaliar e tomar providências, quanto aos choques e tensões

cada vez mais severos e frequentes das ameaças físicas do clima em seus negócios, pelas medidas de adaptação (Blackwood *et al.*, 2022; Palin, *et al.*, 2021; Rossetti, 2021; Liu *et al.*, 2021; UIC, 2017).

Fato é que uma solução possível trata de direcionar os esforços a nível global, com ações focadas na redução de desastres baseados em ecossistema (Sudmeier-Rieux *et al.*, 2021). Segundo estimativas de Koks *et al.* (2019), aproximadamente 27% de todos os ativos rodoviários e ferroviários globais estão expostos a pelo menos uma ameaça e aproximadamente 7,5% de todos os ativos estão expostos a um evento de inundação com tempo de recorrência de 100 anos. Além disso, Hjort *et al.* (2018) apontam o alto risco potencial para as ferrovias de Qinghai-Tibet (470 km, China) e Obskaya-Bovanenkovo (280 km, Rússia) com o descongelamento do *permafrost*.

De toda forma, a transição para uma economia de baixo carbono e a construção de uma sociedade sustentável do século XXI significarão refazer a infraestrutura de nossas comunidades, setor industrial, sistema de energia e redes de transporte - o que exigirá grandes quantidades de capital. Diante disso, segundo NG (2018), nos últimos anos, pôde se perceber o fenômeno da adoção da contabilidade da sustentabilidade, financiamento sustentável e medidas regulatórias relevantes para o desenvolvimento de um sistema de financiamento verde em um centro financeiro global emergente sob a influência do desenvolvimento global sustentável.

Alinhado a este conceito, como apresentado por Vogel (2005), diferentes estratégias têm sido realizadas no sentido de melhorar a performance de investimento de longo prazo durante as últimas décadas. Iniciando na década de 70 pela ideia do “Investimento Sustentável Responsável” (SRI), passando pelos esforços iniciais de mitigação das empresas após o acidente da Exxon Mobil em 1989 e, finalmente, com a criação de índices socialmente responsáveis no período de 1990 - 2000 (como o índice Social Domini 400, Dow Jones Sustainability Indexes e o FTSE4Good). Por fim, ocorreu a transição para os critérios chamados ESG (Environmental, Social and Governance) em 2004, depois da publicação “*Who Cares Wins*” (World Bank, 2004).

Já tratando com relação ao Brasil, para avaliação de impactos ambientais (AIA) de projetos, tradicionalmente é aplicado o instrumento da Política Nacional de Meio Ambiente, Lei Federal nº 6.938/1981 (Brasil, 1981), ora denominado Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto ao Meio Ambiente, cuja fronteira de análise se limita às áreas de influência em torno do escopo do estudo. Logo, no que tange aos investimentos nacionais, segundo Climate Bonds Initiative (2018), este país tem um

potencial de investimento verde estimado em US\$ 1,3 trilhão nos diferentes setores de infraestrutura, inclusive transportes. O estudo ainda reforça que integrar critérios de mitigação e resiliência climática ao planejamento convencional de infraestrutura proporcionará ao Brasil a oportunidade de acessar novos fluxos de capital que buscam pelo fator verde, especialmente no mercado internacional. Aliado a esse fator, o anuário estatístico da Empresa de Planejamento e Logística S/A (EPL, 2023) mostra a redução dos investimentos do setor público, e o aumento da participação do setor privado, evidenciando a migração da origem dos recursos para o setor.

Segundo o Ministério da Infraestrutura (2021), Títulos Verdes (ou *green bonds*) utilizam KPI's (*key performance indicators*) para mensurar os valores agregados referentes aos benefícios ambientais propostos. Um desses indicadores trata justamente do potencial de impacto climático referente ao aquecimento global, ou seja, a quantidade de gás carbônico equivalente emitida. Em se tratando do setor de transporte de carga, é possível assumir o indicador de gCO<sub>2</sub>/tkm, ou mesmo gCO<sub>2</sub>/TKU, exemplificado nos esforços que têm sido empreendidos pelo Ministério da Infraestrutura do Brasil para utilização de *green bonds* para o financiamento da Ferrovia de Integração Leste-Oeste – FIOLO e Ferrovia de Integração Centro-Oeste – FICO, visando aliviar, assim, a pressão nos cofres públicos (Angarten *et al.*, 2020). Pode-se mencionar, também, o uso da ecoeficiência como indicador de avaliação da infraestrutura ferroviária, como proposto por Ribeiro *et al.* (2021a), dado pela razão entre o potencial de aquecimento global e o número de eixos-padrão que passam sobre a via permanente durante determinado período.

De toda forma, recentemente uma das concessionárias ferroviárias atuantes no mercado brasileiro fez a captação de US\$500 mi em *green bonds*, (Revista Ferroviária, 2020). Os recursos deverão ser aplicados na modernização da frota e em obras de infraestrutura. Para obter a certificação, o principal requisito é a emissão de menos de 21 gramas de CO<sub>2</sub> por tonelada-quilômetro transportado (Climate Bonds Initiative, 2020).

Segundo Climate Bonds Initiative (2020), um dos dois pilares de estratégias sustentáveis para atingir as metas de emissão específica, trata de

Melhorar a qualidade das matérias-primas, proporcionando maior durabilidade e menos manutenção. Ex.: substituição de dormentes de madeira (que duram 6 anos) por dormentes de concreto ou aço (que duram 30 anos). (Climate Bonds Initiative, 2020, p.3)

As medidas se mostram coerentes ao considerar os diferentes elementos que constituem tanto a infraestrutura quanto a operação ferroviária. De todo modo, entende-

se que aspectos referentes à avaliação de todo o ciclo de vida das soluções a serem adotadas sejam analisadas, como discutido por Bortoli *et al.* (2020). Isto é reforçado pela avaliação do uso de diferentes tipos de dormentes por Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e.V. (2009), e Rempelos *et al.* (2020). Em resumo, quando se considera os dormentes de madeira, concreto e aço pela avaliação de todo o ciclo de vida do elemento de construção, nota-se que o aço apresenta a maior emissão de gás de efeito estufa nos trabalhos de Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau e.V. (2009) e Rempelos *et. al* (2020). Finalmente, no tocante à comparação entre madeira (macia e rígida) e concreto, o recente estudo de Rempelos *et. al* (2020) mostra que, considerando todo o ciclo de vida, a emissão de CO<sub>2</sub> equivalente para uso de dormente em vias com tráfego leve é menor quando se utiliza madeira macia, mas em vias com tráfego pesado o ideal é o uso de dormente de concreto com USP (*under-sleeper rubber pads*). Esta última solução é validada por Ngo & Indraratna (2020), os quais mostram que o uso de USP auxilia na mitigação da degradação do lastro e redução da vibração (Veit & Vonbun, 2018), elevando, conseqüentemente, a vida útil dos componentes da via. Assim sendo, entende-se que, para uma atingir o segundo pilar de estratégia de sustentabilidade, é preciso que os elementos sob análise sejam avaliados mediante todo o ciclo de vida, desde a construção, operação, manutenção e final da sua vida útil. Dessa forma, é possível uma avaliação pelo carbono incorporado, o que trata da soma do impacto de todas as emissões de gases de efeito estufa atribuídas a um material ao longo de seu ciclo de vida, conforme realizado por Mao *et. al* (2021).

Finalmente, para a elaboração deste estudo, foi identificada a oportunidade de aplicação da ACV para permitir a expansão das fronteiras de análise não compreendidas pelo EIA/RIMA. Baseado nessa premissa, e considerando os estudos sobre ACV aplicados ao setor ferroviário, foi possível notar que há trabalhos realizados em países que não o Brasil, cujo foco está na quantificação ou, também denominado, caracterização dos impactos ambientais na infraestrutura da via férrea, mas sem detalhamento específico proposto para as variações dos materiais aqui estudados, sendo poucos os que tratam do desempenho ambiental como critério de avaliação de projetos de pavimento. Além disso, tais estudos não utilizam análise mecânica-empírica para estimativa da vida útil da via, com base no desempenho mecânico do subleito, assim como não abordam o funcionamento da estrutura em condições adversas, quanto às condições de saturação do solo, e as avaliações das soluções de melhoria da resistência das camadas da plataforma têm foco distinto do presente trabalho (Landgraf & Horvath, 2021; Landgraf *et al.*, 2021;

Bortoli *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020; Pons *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2019; Bressi *et al.*, 2018a; Krezo, *et al.*, 2016; Mathieu *et al.*, 2013; Umweltbundesamt, 2013; , Chang & Kendall, 2011; Strippel & Uppenber., 2010; Spielmann & Scholz, 2005; von Rozycki *et al.*, 2003). Assim, este estudo baseia-se na seguinte pergunta para o problema de pesquisa: Baseado na ausência de trabalhos sobre a temática, identificada durante a revisão da literatura, é possível desenvolver um método para selecionar projetos de pavimentação ferroviária, a nível de projeto e baseado na realidade do Brasil que, a partir da agregação dos conhecimentos da Mecânica dos Pavimentos à Avaliação do ciclo de vida, com a obtenção de insumos a partir dos processos de orçamentação de obras, possa ser utilizado para tomadas de decisão em investimentos, tendo como critério de seleção o desempenho ambiental?

Tal questionamento demonstra o potencial em suprir a demanda de obtenção de critério objetivo, quanto ao desempenho de impacto ambiental, para a seleção de projetos ferroviários nacionais, além dos tradicionais parâmetros de custos, e aqueles empregados nos estudos e relatórios de impacto ambiental.

### **1.3 Justificativa**

O sexto relatório de avaliação (AR6) do *IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change*, dentre suas diversas abordagens, trata justamente das áreas de engenharia do clima, estratégias de remoção dos gases de aquecimento global e da avaliação dos impactos com foco regional e setorial (IPCC, 2021). Tais definições permitem contextualizar as contribuições dos diversos agentes da indústria, gerando *insights* para as tomadas de decisão quanto às medidas de mitigação a serem executadas. Logo, considerando o setor de transportes, este se posiciona como a segundo maior fonte de contribuição para as emissões, conforme a Figura 8, a qual apresenta a emissão de gases de aquecimento global por setor representando a emissão do ano de 2016, quando o total emitido foi de 49,4 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. Alinhado com a informação de que o setor de transporte ferroviário é um dos que menos contribui para a emissão de gases de efeito estufa, cerca de 0,4%, conforme a Figura 8, Umweltbundesamt (2013) utiliza os critérios de ACV para comparar quatro diferentes modos de transporte, como mostrado na Tabela 1. Desse modo, considerando o setor de cargas, excluindo o transporte aéreo, cuja finalidade trata da logística para cargas de alto valor agregado, e não se mostra como um competidor entre os demais apresentados (Ballou, 2005), nota-se que o estágio de operação é o que mais contribui para a emissão dos modos analisados.



primária, destruição da camada de ozônio, ecotoxicidade marinha, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, eutrofização, mudanças climáticas, resíduos a granel, acidificação e recursos abióticos, de acordo com os trabalhos realizados por Bortoli *et al.*, (2020) e Pons *et al.* (2020). De qualquer forma, alguns estudos, como os de Landgraf & Horvath (2021) e Rempelos *et al.*, (2020), nos quais avaliaram as emissões de gases de efeito estufa, concentraram seus esforços em avaliar apenas uma categoria de impacto, diante da relevante questão do aquecimento global.

Portanto, com o objetivo de aplicar os conhecimentos de ACV e caracterização de impactos e emissões ambientais, pesquisadores têm realizado diversos trabalhos na área de infraestrutura ferroviária (Landgraf *et al.*, 2022; Azzouz & Jack, 2020; Huang & Wang, 2020; Kaewunruen & Liao, 2020; Li & Zhang, 2020; Senaratne *et al.*, 2020; Sol-Sánchez *et al.*, 2020; To *et al.*, 2020).

Adiante, sobre a abrangência da abordagem de estudos em pavimentação, como sugerido pelo Manual de Gerência de Pavimentos (DNIT, 2011) adotado no Brasil, é possível que o escopo de tais estudos seja classificado como *a nível de projeto* ou *de rede*. Em resumo, enquanto o primeiro envolve as atividades detalhadas em uma seção específica da estrutura (projeto) e da execução de obras em um curto trecho delimitado da malha, com foco operacional e tático, o estudo a nível de rede trata do trabalho de uma grande área ou malha viária, sendo ideal para análise logística do transporte, com visão estratégica. Diante disso, pode-se classificar os estudos de Landgraf *et al.* (2022), Huang & Wang (2020), Li & Zhang (2020) e To *et al.* (2020) como a nível de rede, enquanto Kaewunruen & Liao (2020), Senaratne *et al.* (2020) e Sol-Sánchez *et al.* (2020) se caracterizam como a nível de projeto, sendo estes últimos alinhados com o presente trabalho.

Ainda quanto à análise da abrangência do escopo, é interessante reforçar que, enquanto estudos a nível de rede, como Umweltbundesamt (2013) no qual os impactos ambientais de diferentes modos de transporte são comparados, permitem uma visão estratégica para tomada de decisão com foco no planejamento logístico, as pesquisas a nível de rede, como Bortoli *et al.*, (2020), em que o desempenho ambiental de seções transversais distintas de pavimento ferroviário são confrontados, objetivam identificar os elementos de construção mais aderentes às necessidades pontuais da infraestrutura.

Além disso, outro ponto interessante acerca da ACV no âmbito da infraestrutura ferroviária é que, tradicionalmente, utiliza-se critérios empíricos, como tonelada acumulada sobre a via, ou seja, adota-se os valores de volume de carga transportada (em

toneladas por quilômetro útil –TKU) sobre o pavimento para realizar a predição do fim da vida útil dos elementos que compõem a plataforma ferroviária, ou mesmo para início das intervenções de manutenção (Comité Européen de Normalisation, 2005). Alinhado a esse conceito, o estudo de revisão de Liljenström *et al.* (2022) mostra que a vida de serviço da estrutura foi usada como critério em 37% dos 92 trabalhos selecionados para análise. Em sua maioria, os valores foram baseados em vida estimada de projeto e apenas 2% em desempenho preditivo, ou seja, usando modelagem computacional ou ensaios de laboratório, como proposto no presente estudo.

Considerando a heterogeneidade dos materiais que compõem a via permanente, Gouveia *et al.* (2021) evidencia a escassez de estudos voltados acerca da ACV relacionada à fundação da plataforma, apesar da relevância do comportamento mecânico da fundação da via permanente ser enfatizada por Thevakumar *et al.* (2021), Lazorenko *et al.* (2019), Indraratna & Ngo (2018), Li *et al.* (2015) e Selig & Li (1994) na previsão da vida útil da via permanente. Mesmo estudos como Bortoli *et al.*, (2020) e Merchan *et al.* (2020) utilizaram valores de vida útil estimada empíricos com base na literatura. Diante disso, nenhum estudo revisado apresentou um modelo de ACV utilizando o subleito como peça-chave nas investigações.

Diante do exposto, é possível concluir que a caracterização dos impactos ambientais da infraestrutura ferroviária, pela ACV, se encontra intrinsecamente atrelada às temáticas de mudança climática tratadas, por exemplo, no estudo de Usman *et al.* (2015), o qual mostra a cadeia de relação causa-efeito dos eventos relacionados com o excesso de umidade na fundação do pavimento ferroviário, indicando que isso pode levar esse elemento à falha. Corroborando com essa afirmação, Costa *et al.* (2017), ao avaliar o solo laterítico do subleito de uma ferrovia de carga no norte do Brasil, identificaram a perda de capacidade de carga (módulo resiliente) em cerca de 50%, quando variou a umidade da amostra no laboratório em aproximadamente 2%.

Além disso, outro aspecto relevante apresentado por Castro *et al.* (2021), em seu trabalho sobre o real impacto do clima nas camadas inferiores do pavimento ferroviário, trata justamente da influência da precipitação e evaporação nas propriedades do solo (como a sucção e umidade) características da via, evidenciando que a alteração desses parâmetros tem impacto direto na resistência, representado pela variação do módulo de resiliência. De forma complementar, podendo ser consideradas como medidas de adaptação, Lazorenko *et al.* (2019) trata justamente das soluções técnicas de engenharia

para a melhoria da resistência das camadas do pavimento ferroviário, com foco da predição no desempenho da fundação da via férrea.

Do ponto de vista do negócio de transporte ferroviário, a priorização do escoamento da produção se mostra um dos fatores preponderantes do *core business*. Todavia, a justificativa do estudo se baseia no *trade-off* entre o parâmetro anterior e o tempo de paralisação da operação diante da confiabilidade do ativo de infraestrutura.

Finalmente, constatou-se na literatura, a escassez de trabalhos desenvolvidos para o Brasil, que mensurem as emissões e impactos ambientais a partir da perspectiva da ACV, para os estágios de construção e manutenção da infraestrutura ferroviária para vias lastreadas, mais especificamente, que empreguem o método de análise de desempenho mecanístico-empírico da camada do subleito, caracterizado como fundação da via férrea, e que utilize as bases de serviços nacionais como referência na quantificação dos insumos.

#### **1.4 Premissa e hipóteses**

O desenvolvimento desse trabalho adotou como como premissa os seguintes pressupostos:

- Diante das necessidades de mitigação dos impactos ambientais gerados pelas ações antrópicas, assim como o deslocamento da fonte de recursos de investimento para o setor de infraestrutura ferroviária, migrando do público para o privado, e a oferta de fundos verdes para tais projetos, o uso de um critério ambiental objetivo se mostra uma interessante ferramenta para identificação de oportunidades aderentes às demandas ambientais pretendidas;
- Mesmo diante da ausência de um método de avaliação de ciclo de vida desenvolvido para o Brasil, os conceitos e as ferramentas de ACV são aplicáveis para a caracterização dos impactos ambientais a serem estudados, empregando-se métodos de ACV aplicáveis à nível global;
- É possível empregar as ferramentas e conhecimentos da Mecânica dos pavimentos para estimar a vida útil do pavimento ferroviário, considerando o desempenho mecânico do subleito;
- Existe compatibilidade entre os insumos das bases de dados de serviços de engenharia, e os inventários de ciclo de vida.

Diante das premissas expostas, apresentam-se a seguinte hipótese para este trabalho:

- Para as circunstâncias aplicáveis (anteprojeto de pavimento ferroviário no Brasil), é possível alinhar os conhecimentos de engenharia civil, para estimar a vida útil baseada no desempenho mecânico do subleito, os conceitos de orçamentação de obras, para quantificação de insumos, e as ferramentas de ACV, para a caracterização dos impactos ambientais, visando a geração de resultados significativamente distintos, a fim de permitir a seleção entre cenários que admitem os critérios de variação de materiais (no sublastro), e desempenho mecânico (condição de saturação do subleito);

### **1.5 Objetivos da pesquisa**

O objetivo geral desta pesquisa é propor um procedimento para hierarquizar anteprojetos de pavimento ferroviário com base no desempenho ambiental obtido na ACV, tendo por premissa o uso das informações, bases de dados e ferramentas brasileiras, aplicadas na avaliação estrutural da via permanente, a nível de projeto, conforme apresentado na Figura 9.

Os objetivos específicos são:

- Identificar os elementos de ACV para a aplicação pretendida, no que diz respeito à seleção de anteprojetos de pavimento ferroviário, principalmente em relação ao Objetivo e Escopo;
- Identificar e estruturar as informações, bases de dados, métodos e ferramentas para avaliação estrutural do pavimento ferroviário, assim como definir critério para estimativa de vida útil da estrutura a partir do desempenho da camada de subleito;
- Definir procedimento para correlação entre os insumos extraídos de base de dados de serviços de engenharia para a infraestrutura ferroviária brasileira e os inventários de ciclo de vida disponíveis, para permitir a ACV de seções de pavimento ferroviário distintas;
- Definir procedimento comparativo de análise do desempenho ambiental entre os cenários escolhidos, focado na interpretação da ACV.

## OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

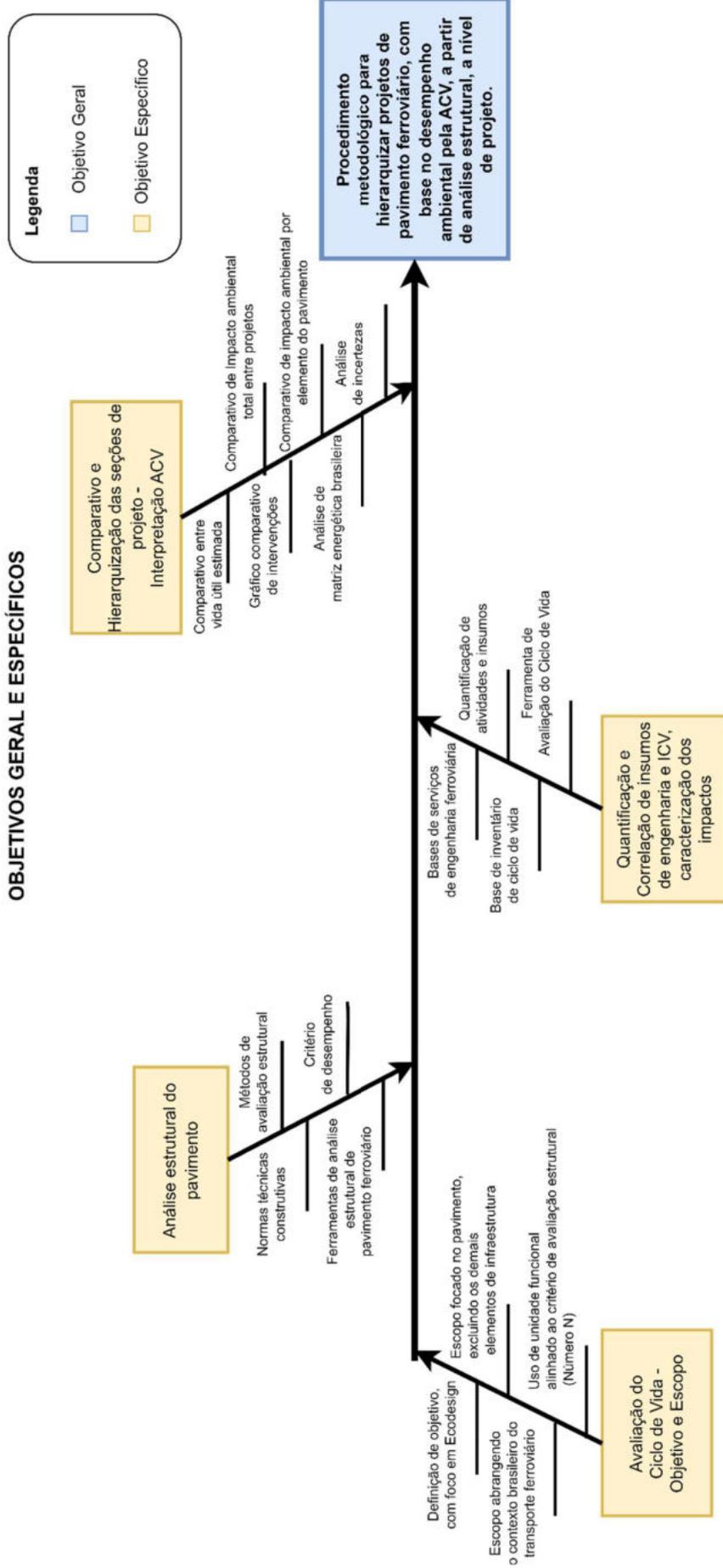


Figura 9 Objetivos Geral e Específicos

## 1.6 Delimitação do trabalho

Este estudo tem como objetivo propor um procedimento para hierarquizar seções de pavimento ferroviário no Brasil, com base no desempenho ambiental empregando a ACV, a nível de projeto, tendo por premissa o uso de informações, bases de dados e ferramentas nacionais, aplicadas na avaliação estrutural da via permanente, admitindo o desempenho mecânico do subleito como critério de perquisição.

Sobre a estruturação das etapas constituintes da ACV, foram empregadas as orientações das normas ISO 14040 e 14044, assim como as diretrizes do *International Reference Life Cycle Data System (ILCD)*, visto que este último provê suporte para permitir diagnósticos tanto governamentais quanto de mercado para estudos de ACV. De toda forma, também foram identificados trabalhos na área de infraestrutura de transportes, como o relatório do *Pavement Life Cycle Assessment Workshop* (Harvey *et al.*, 2010), os quais serviram de referência para a elaboração do procedimento metodológico proposto.

### 1.6.1 Quanto ao Objetivo e Escopo

Tendo como premissa que o presente estudo visa ser aplicado na avaliação de seções de pavimentos, com base no desempenho ambiental da estrutura, é preciso destacar que este trabalho não tem como objetivo, primordialmente, gerar informações para serem aplicadas no planejamento estratégico da malha logística ferroviária, mas sim de direcionar esforços na investigação a nível de projeto, com foco tático-operacional, visando uma avaliação detalhada de um trecho específico (quilômetro unitário), para a realidade brasileira.

Diante disso, exclui-se os demais elementos que compõem a infraestrutura ferroviária, tais como túneis, dispositivos de drenagem, estações, aparelhos de mudança de via, pontes, viadutos, sinalização e quaisquer outros componentes que não compreendam a seção do pavimento da via férrea.

Em relação à unidade funcional, buscou-se adotar um parâmetro operacional que estivesse em linha tanto com o preconizado pela ACV, assim como pelo método estrutural de avaliação, ou seja, a mecânica dos pavimentos. Dessa forma, em contraste com grande parte dos estudos de ACV em infraestrutura ferroviária, que emprega a carga acumulada sobre a via (tonelada-quilômetro), o trabalho proposto adotou o número N, que trata da quantidade de passagens de determinado eixo-padrão sobre a plataforma, para a extensão de 01(um) quilômetro de via.

Por conseguinte, no que diz respeito à fronteira de sistema, o presente estudo se mostra alinhado com a premissa de permitir sua aplicação ao conceito de berço ao túmulo, próprio da ACV. De toda forma, o estudo de caso desenvolvido direcionou esforços para abranger principalmente as fases de construção e manutenção.

Já tratando da fase de operação, com relação à aplicação da ACV em infraestrutura de transporte, o estudo de Jiang *et. al* (2020) mostra que o consumo de combustível relacionado à deterioração da rodovia, na fase de operação, contribui significativamente na geração de impactos ambientais. Para isso, os autores utilizam dados medidos em campo que permitem correlação direta com a predição de vida útil da estrutura. Já para ferrovia, durante a fase de revisão da literatura no presente estudo, não foi encontrado parâmetro que permita tal crivo, e que seja possível de modelar nas ferramentas disponíveis. Logo, a fase de operação não foi avaliada no estudo de caso.

#### 1.6.2 Quanto à Análise Estrutural do pavimento

Como premissa inicial, o estudo utilizou as normas técnicas de engenharia do Brasil, conforme preconizado pelos órgãos competentes, como o Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes – DNIT, quanto às características de geometria e especificação de materiais. Informações complementares foram obtidas da extinta Rede Ferroviária Federal S.A - RFFSA, como a estimativa de vida útil, representado pelo N de projeto, cuja ordem de grandeza é expressa na ordem de  $10^6$ . Todavia, adotando os dados de rede da ferrovia de Carajás em 2020, conforme ANTT (2023), é possível verificar que, considerando a capacidade de vagões/dia do trecho de Açailândia (QAL, EFC), com composições de 330 vagões (4 eixos cada), sendo tracionados por 3 locomotivas (6 eixos), pelo período de 10 (dez) anos, com frequência diária de 14 pares de veículos, o valor estimado do número de passagens sobre a via atinge o patamar de  $N=10^7$ . Ou seja, o parâmetro de projeto da RFFSA necessita de atualização diante das novas demandas do mercado nacional. Portanto, entende-se que há certa limitação nos valores referenciados, mas, apesar disso, o dado utilizado não prejudica as análises, visto que o procedimento proposto tem como foco estruturação de processos, cujos critérios podem ser atualizados durante o seu emprego.

Outro ponto relevante a ser destacado trata do critério utilizado para definir a estimativa de vida útil da via permanente. O pavimento ferroviário é caracterizado por elementos com diferentes características tanto geométricas, quanto de composição dos

materiais e comportamento mecânico, como o aço do trilho, o concreto do dormente, o lastro em brita e a fundação da via permanente formada por solos. Assim sendo, espera-se que haja diferente durabilidade para cada componente, mediante a condição de campo e aplicação de cargas sobre a via. Entretanto, ao se comparar com os demais, o fim da vida útil do subleito pode ser entendido como o mais crítico, visto que a manutenção/reparo dessa camada se caracteriza praticamente pela reconstrução do pavimento, uma vez que se localiza na fundação da estrutura.

De toda forma, é preciso reforçar que o método proposto usado no dimensionamento do pavimento possui diversas limitações, assim como os métodos clássicos, que não consideram a quebra de grãos do lastro, nem colmatação, bombeamento de finos (*pumping*), ou mesmo o aumento de rigidez que pode ser gerado por esses efeitos.

Adiante, no tocante aos critérios de desempenho da via permanente, foram aplicados os conceitos da Mecânica dos Pavimentos, pela análise das tensões e deformações das camadas, tendo como parâmetro a ruptura pela aplicação repetida de cargas sobre a estrutura. Nesse método, a resistência é representada pela rigidez do pavimento, mensurado pelo módulo de resiliência. Já em relação ao método de avaliação, adotou-se o critério de fadiga da camada de fundação da ferrovia, conforme o procedimento desenvolvido por Li *et. al* (2015), visto que este também emprega o parâmetro de rigidez em sua avaliação, ou seja, se mostra alinhado com os dados disponíveis. Originalmente desenvolvido para dimensionamento da camada de lastro, o autor do referido trabalho adaptou o método para permitir a estimativa de vida útil pelo critério de retroanálise. Tratando do modelo usado para a avaliação das tensões, foi empregada a equação de Heukelom & Klomp (1962), desenvolvida para ser empregada com base no critério da tensão vertical no topo do subleito rodoviário, no qual o eixo-padrão é de 8,2 t. Com isso, mesmo tendo sido empregado em outros estudos como Lichtberger (2005), faz-se a ressalva de que o uso deste modelo na avaliação estrutural de pavimento ferroviário, cujo o eixo-padrão adotado no presente estudo é de 25 t, pode apresentar resultados distintos quando comparado com outros modelos. Outra limitação trata dos diferentes modelos possíveis aplicáveis para estimativa de módulo resiliente e deformação permanente, a depender, por exemplo, do tipo de solo em questão, o que pode gerar resultados distintos durante as análises.

Quanto à modelagem computacional, foi utilizado *software* de análise tensão-deformação desenvolvido por pesquisadores no Brasil, Systrain, no qual são obtidos resultados no que se refere aos valores máximos e mínimos de tensão e deformação diante das condições de contorno definidos no *input*. A origem dos dados tratou de ensaios de laboratório e revisão da literatura técnica. Todavia, é interessante reforçar que o sistema possui limitações, como o não acúmulo incremental de deformação permanente a cada nova aplicação de carga durante as simulações. Mesmo assim, tal limitação não torna seu uso impeditivo. Além disso, a modelagem computacional possui a restrição de não considerar a sazonalidade de campo, ou seja, as variações de umidade, sucção, evaporação e demais aspectos das externalidades não são representados.

Finalmente, a estimativa de vida útil foi realizada com base na comparação entre a quantidade de passagens do material rodante sobre a via, definido em projeto, e a quantidade do mesmo critério estimado como efetivo no campo, baseado no desempenho mecânico do subleito. Isto tem como premissa, assim como mencionado na modelagem computacional, admitir que o comportamento da estrutura é uniforme durante toda a fase de operação, o que não representa a realidade. De toda forma, ainda diante desse fato, entende-se que o procedimento metodológico proposto pode ser aplicado para o principal fim a que se destina, ou seja, para aplicar os conhecimentos de ACV na seleção de projetos de pavimentos ferroviários, com base no desempenho ambiental.

### 1.6.3 Quanto à mensuração dos insumos e caracterização dos impactos

Dentre os diversos desafios encontrados no desenvolvimento do presente procedimento metodológico, é possível resumir que um dos principais trata justamente da quantificação dos parâmetros de análise, os quais podem ser agrupados, na estimativa de vida útil, os insumos dos materiais e energia consumidos na fronteira de sistema escolhida, bem como a caracterização dos impactos das categorias selecionadas. Entendido que o tópico de análise estrutural já endereçou as limitações quanto à estimativa de vida útil, a seguir serão detalhadas as questões referentes aos insumos e impactos.

As atividades de implantação e intervenções na via férrea possuem suas especificidades, tais como possibilidade de maior uso de mão-de-obra ou priorização no emprego de máquinas e equipamentos, variabilidade na produtividade de ambos os recursos mencionados, assim como método de execução e uso de materiais distintos para

os serviços, para a mesma finalidade construtiva. Tais variações vão desde aspectos geográficos, como países e regiões, a até mesmo institucionais, ou seja, entre empresas. Logo, como forma de padronizar os critérios anteriormente mencionados, como os métodos executivos de construção, o presente estudo sugere uma base de dados que contempla serviços ferroviários a nível nacional no Brasil.

Adiante, quanto ao método de ACV, é preciso mencionar que, baseado em trabalhos realizados sobre o tema no país, durante a revisão bibliográfica, não foi encontrado método específico desenvolvido para o Brasil, inclusive que possa abranger as principais categorias de impacto, como mudança climática, e que esteja presente na ferramenta de ACV adotada no estudo. Logo, como solução, foi empregado um método de abrangência global.

Além disso, quanto aos inventários de ciclo de vida, mesmo diante do desenvolvimento da base de dados de entidades dedicadas ao assunto, como o Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida – SICV, é preciso evidenciar que os documentos sobre a temática da infraestrutura ferroviária ainda são escassos, sendo refletido na ferramenta de ACV escolhida para o estudo. Finalmente, para o desenvolvimento deste trabalho, foram priorizados os inventários elaborados em informações nacionais. Em face da inexistência destes, em seguida, foram empregados inventários com abrangência global e, por fim, aqueles identificados como resto do mundo.

Finalmente, para a fase de interpretação da ACV, foram empregados gráficos e tabelas, utilizando como referência a identificação dos elementos com maior contribuição, baseado em Pareto, assim como a análise de incertezas, para compreensão da variabilidade.

#### 1.6.4 Quanto ao estudo de caso proposto

Como aplicação do procedimento metodológico proposto, foi desenvolvido o estudo de caso com foco na avaliação do desempenho ambiental de um projeto de pavimento ferroviário, com base na categoria de impacto de potencial de aquecimento global. Sobre o uso da terminologia do impacto selecionado, é reconhecido que, recentemente, os estudos nacionais têm empregado a descrição *mudanças climáticas* na tradução para o português (Mendes *et al.*, 2016), ou mesmo no termo originalmente em inglês (Chen *et al.*, 2021b). Todavia, entende-se que a manutenção do primeiro termo permite uma interpretação mais clara. Isto porque, conforme Lacerda e Nobre (2010),

enquanto o aquecimento global trata do aumento da temperatura terrestre, causado pela intensificação do efeito estufa, a mudança climática se refere à consequência do aumento da concentração desses gases. Tal distinção permite uma visão mais clara quando é preciso avaliar posições contrárias acerca da real contribuição antropogênica para o aquecimento global e as mudanças climáticas, como proposto por Felício (2014). Além disso, estudos internacionalmente reconhecidos têm mantido o uso do termo *Global Warming Potential – GWP* (Pacañot, 2022; Dodd *et al.*, 2020). Outrossim, os métodos de avaliação de ciclo de vida, existentes no *software* utilizado nesse estudo, utilizam a nomenclatura de *GWP*. Portanto, permaneceu o uso do termo ‘potencial de aquecimento global’ no presente estudo: *i.* para permitir a distinção clara dos conceitos; *ii.* baseado no uso ainda corrente por parte de trabalhos internacionais, tanto acadêmicos quanto de instituições especializadas; *iii.* por estar alinhado com a descrição das ferramentas utilizadas para as análises no estudo de caso.

Adiante, para o desenvolvimento do estudo, buscou-se avaliar a variação das *condições intrínsecas* da via permanente, representada na variação dos materiais constituintes da camada de sublastro, e pelas *condições externas*, representado nas condições ideais (ótima) e não-ideais (ótima+2%) quanto à umidade camada de fundação. É preciso reforçar que o uso da variação de 2% na umidade do subleito teve como referência o trabalho de Costa *et al.* (2017), desenvolvido para uma Ferrovia *Heavy Haul* no Brasil, no qual é apresentada uma perda significativa da resistência do solo, diante do emprego do referido critério.

Assim sendo, com relação ao escopo do estudo de caso, construído a partir do item 5.2.1.2 da NBR 14040, está sendo considerada a unidade funcional caracterizada por um quilômetro de via singela de um pavimento ferroviário lastreado, projetada para suportar um eixo-padrão de 25 toneladas (Medina & Motta, 2015), considerando as especificações técnicas de engenharia brasileiras e mensuração de desempenho operacional a partir da quantidade de passagens desse eixo sobre a via, representado pelo número *N*. Além disso, a seção de projeto está localizada em trecho de tangente e possui bitola larga, com trilho TR-68 e dormente de concreto. Quanto a seção de sublastro, esta é composta por materiais distintos, cuja variação trata justamente do objeto do estudo, enquanto o subleito arenoso encontra-se em duas condições distintas de umidade. Já quanto ao tempo de avaliação, foi considerado o período de 100 anos para todos os cenários estudados, para normalização da análise.

Além do exposto anteriormente, reconhece-se que a fase operação é o período de maior contribuição na geração de impactos ambientais, especificamente pelo consumo de combustível do material rodante, conforme Tabela 1. Todavia, para o presente estudo, foi admitido o uso do mesmo veículo nas seções avaliadas e, assim, tornando-o uma constante. Apesar disso, tendo como referência o estudo de Noshadravan *et al.* (2013), é conhecido o efeito de variação de consumo de diesel na operação diante de uma via com desempenho estrutural degradado. Entretanto, até o presente momento, não foi possível realizar a modelagem ou mesmo viabilizar outra forma de predição desse comportamento com critério que correlacione tais parâmetros diretamente no modo ferroviário.

Vale reforçar que, considerando a unidade funcional o pavimento ferroviário, os elementos seguintes não compõem o escopo do estudo: sistema de sinalização, dispositivos de drenagem, contenções, túneis e viadutos, material rodante e edificações.

## **1.7 Estrutura do trabalho**

Esta seção apresenta a estrutura deste estudo. O capítulo 1 está dividido em contextualização do transporte ferroviário no Brasil, problema de pesquisa, hipóteses, objetivo geral e específicos, justificativas e delimitação do trabalho.

Adiante, o capítulo 2, ao tratar da Avaliação do Ciclo de Vida na infraestrutura ferroviária, apresenta a Revisão Bibliográfica, com o objetivo de detalhar os componentes da ACV, tais como objetivo, escopo, método de avaliação, inventários e métodos de avaliação de impacto, a partir de estudos que tratam da infraestrutura ferroviária, com destaque para seu emprego no transporte de cargas. Em seguida, tratou-se da relevância da camada de subleito no desempenho da via permanente e algumas ferramentas que tratam da estimativa de vida útil do pavimento ferroviário com base nesse elemento.

Já no capítulo 3, o estudo aborda a estruturação e detalhamento do método proposto no desenvolvimento do estudo, cuja finalidade é detalhar as etapas necessárias para atingir o objetivo principal do trabalho.

Feito isto, o capítulo 4 apresenta o estudo de caso, com a aplicação do procedimento metodológico proposto, ou seja, a ACV para uma seção de pavimento ferroviária, considerando diferentes cenários, com base na categoria de impacto de potencial de aquecimento global.

Em seguida, o capítulo 5 trata das considerações finais e limitações do método proposto. Além disso, discorre a respeito das possibilidades de desenvolvimento de trabalhos futuros, que podem ser realizados a partir de desdobramentos do presente estudo.

## **2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA INFRAESTRUTURA FERROVIÁRIA**

A revisão bibliográfica foi realizada em três etapas, consistindo inicialmente na contextualização da avaliação do ciclo de vida, seguida da relação entre a ACV e a infraestrutura ferroviária e, por fim, da importância do subleito neste mesmo campo.

### **2.1 Avaliação do Ciclo de Vida**

A ACV é um método que pertence à área da ecologia industrial e que, geralmente, pode ser aplicado a sistemas industriais, como construção e transportes. A ACV quantifica e avalia de forma abrangente os fluxos de material e energia desses sistemas, sendo inventariados ao longo de períodos definidos dentro do “ciclo de vida” do produto e/ou serviço que compõe o sistema, incluindo desde o *upstream* (extração da matéria-prima, processamento, transporte e construção), uso (reutilização e reciclagem) e *downstream* (desmontagem e disposição final). Subsequentemente, o inventário de fluxos tem seus impactos locais, regionais ou globais, em sistemas ecológicos como ar, solo, água e organismos estimados com base em uma variedade de categorias de impacto e emissões, como aquecimento global, acidificação, entre outras. Por fim, os impactos ao longo das fases do ciclo de vida são interpretados para se obter as conclusões e orientar a tomada de decisões (Loijos, 2011).

Sendo um processo industrial que permite padronização, a *International Organization for Standardization (ISO)* fornece diretrizes amplas para o procedimento pelo qual uma ACV é conduzida, que são sucintamente descritas na ISO 14040, os Princípios e Estrutura da ACV, conforme descrito por Loijos *et al.* (2013). Os quatro estágios primários especificados pela ISO 14040 são iterativos à medida que novos conhecimentos surgem e as prioridades da avaliação mudam, os quais são: 1) definição de objetivo e escopo, 2) análise de inventário, 3) avaliação de impacto e 4) interpretação (Nascimento *et al.*, 2020). A Figura 10 mostra a estrutura da ACV e a relação entre os estágios e os resultados esperados.

Diante do exposto anteriormente e assumindo que a ACV fornece uma metodologia com base científica para selecionar, quantificar, ponderar e normalizar critérios ambientais, entende-se que este seja um método preferencial para avaliar o desempenho de elementos de infraestrutura (Stripple & Uppenberg, 2010). Isto porque seus critérios possibilitam a inclusão de múltiplos impactos ambientais e emissões, consistindo, então, o “ciclo de vida” em uma abordagem com foco sistêmico.

De toda forma, vale ressaltar o relevante trabalho do ILCD (2010), no qual são estruturadas as possíveis aplicações de ACV, com o detalhamento de cada etapa e orientações para o uso da ferramenta, de modo a permitir uma padronização dos resultados. Neste mesmo sentido, ainda tratando no que concerne à ACV para infraestrutura de transportes, Harvey *et al.* (2010) apresentam uma estruturação da temática para aplicação em pavimentação.

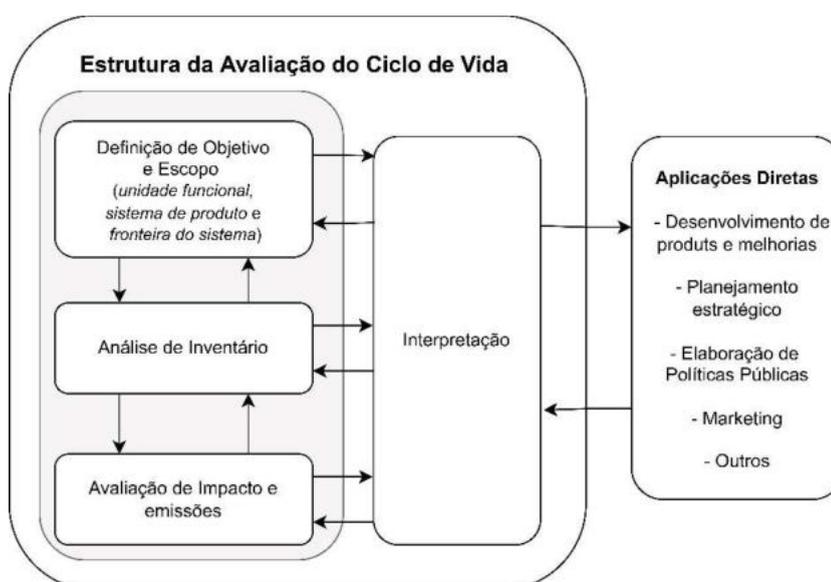


Figura 10: Estrutura de Avaliação do Ciclo de Vida. Adaptado de Loijos (2011).

A definição do objetivo define o contexto e determina o propósito do estudo de ACV. Em seguida, o escopo do estudo de ACV considera a unidade funcional, cujas atividades e processos pertencem ao ciclo de vida do produto/serviço em contexto (inclusive o sistema de transporte), selecionando os parâmetros de avaliação, ou seja, impactos a serem avaliados, estabelecendo os territoriais e temporais, assim como escolha da perspectiva relevante a ser aplicada no estudo (Muthu, 2021).

Já a segunda fase, que trata da análise de inventário, Muthu (2021) descreve como a compilação das informações em torno do fluxo físico em termos de entrada de recursos

materiais, semiprodutos e produtos e a saída de emissões, resíduos e produtos significativos para o sistema de produtos. O resultado da análise de estoque é o inventário do ciclo de vida (ICV), uma lista de fluxos elementares físicos quantificados para o sistema do produto que está associado à função descrita pela unidade funcional.

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), terceira fase da ACV, visa avaliar o peso de cada fluxo elementar (emissões ou uso de recursos de um sistema de produto) em termos de impacto ambiental. Para isso, a ISO 14044 (ABNT, 2009) afirma que é necessário atingir pelo menos os três primeiros elementos dos cinco definidos na norma, a saber:

- 1) Definir a categoria de impacto alinhada com objetivo e escopo;
- 2) Classificar fluxos elementares, relacionando-os com as categorias de impacto;
- 3) Selecionar categorias de impacto, caracterizadas com base em modelos ambientais, atribuindo valores ou quantidades mensuráveis;
- 4) Normalizar as pontuações das categorias de impacto para identificar sua magnitude relativa (expressa na mesma unidade de medida); e
- 5) Agrupar ou atribuir peso para comparação entre as categorias de impacto e possivelmente classificá-las de acordo com sua gravidade percebida.

O sistema de produtos é avaliado do ponto de vista ambiental com os indicadores das categorias de impacto e com os resultados da análise de inventário. Portanto, isso fornece informações significativas para a fase de interpretação. Finalmente, a interpretação visa responder às questões colocadas na fase de objetivo e escopo. A interpretação baseia-se no objetivo e no alcance, dadas as restrições definidas, como os pressupostos geográficos, temporais ou tecnológicos.

De encontro ao esforço de aplicar os conhecimentos de ACV na área de infraestrutura de transportes, com foco em pavimentação, Harvey *et al.* (2010) apresenta um método para esse fim, trazendo inclusive um *checklist* estruturado contendo os principais *inputs* que devem ser considerados para avaliação, assim como as questões norteadoras para as análises. Dessa forma, permitindo uma estruturação de processos para os diferentes usos de ACV na área de infraestrutura do transporte terrestre.

Por fim, recentemente, diferentes estudos têm direcionado esforços para uma análise mais ampla dos processos e produtos, utilizando a Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida, suportado por três pilares: Ambiental, Econômico e Social (Wahrlich *et al.*, 2020). Como exemplo da aplicação desse conceito no transporte ferroviário, é possível citar o estudo de Gulcimen *et al.* (2021), tendo como principais resultados: para

o impacto de potencial de aquecimento global, o valor de 2,4E-02 kg CO<sub>2</sub>/passageiro.km; quanto ao custo total do ciclo de vida, a energia contribui com 92% (2,88E+08USD) desse parâmetro; e quanto ao desempenho social, o estudo conclui que a indústria do transporte ferroviário performa bem para a sociedade, a comunidade local e para os trabalhadores.

### 2.1.1 Objetivo de ACV

O objetivo na ACV, de acordo com ISO 14044 (ABNT, 2009), deve abordar de forma não ambígua a aplicação pretendida, as razões para a realização do estudo, o público-alvo a quem se pretende comunicar os resultados e se existe a intenção de utilizar tais dados em afirmações comparativas. Alinhada com esse conceito, a norma ISO 21.929-1 trata dos indicadores de sustentabilidade a serem empregados na indústria da construção.

A respeito da aplicação de ACV no transporte por trilhos, conforme NORD-LCA (2017), durante os estudos de viabilidade, ela pode fornecer suporte à decisão na seleção de soluções de transporte.

Um estudo de ACV realizado nesta fase de planejamento poderá estimar o impacto ambiental de cada opção disponível. Nesse ponto, entende-se também ser viável avaliar o impacto da não realização de um projeto de infraestrutura.

Por fim, na Tabela 2, são apresentados objetivos que podem ser adotados no uso da ACV em ferrovia.

Tabela 2: Principais Objetivos adotados em estudos sobre ACV em infraestrutura ferroviária. Adaptado de Olugbenga *et al.* (2019)

<b>Objetivos da Pesquisa</b>	<b>Publicação</b>
<i>Identificar impacto ambiental da construção da infraestrutura ferroviária</i>	(von Rozycki <i>et al.</i> 2003, Åkerman 2011, Chang and Kendall 2011, Infraestructuras 2015, Yue <i>et al.</i> 2015, Hanson <i>et al.</i> 2016)
<i>Identificar o impacto Ambiental relativo aos diferentes estágios da infraestrutura de transporte</i>	(Morita <i>et al.</i> 2012, Miyoshi and Givoni 2014, Chester and Cano 2016, Bueno <i>et al.</i> 2017, Jones <i>et al.</i> 2017, Saxe <i>et al.</i> 2017, Shinde <i>et al.</i> 2018)
<i>Comparar a infraestrutura ferroviária com outras infraestruturas de transporte.</i>	(Chester and Horvath 2010, Åkerman 2011, Chester <i>et al.</i> 2012, Westin and Kågeson 2012, Morita <i>et al.</i> 2012, Chester and Cano 2016, Dimoula <i>et al.</i> 2016, International Union of Railways 2016, Lederer <i>et al.</i> 2016, Li <i>et al.</i> 2016)
<i>Entender o período de payback Ambiental da infraestrutura de transporte ferroviário</i>	(Lave 1978, Chester and Horvath 2010, Chang and Kendall 2011, Chester <i>et al.</i> 2012, 2013, International Union of Railways 2016, Saxe <i>et al.</i> 2017)

### 2.1.2 Escopo de ACV

A definição do escopo, juntamente com o objetivo, é a primeira etapa de um estudo de ACV. Nesse momento, são definidos os parâmetros principais que nortearão todo o estudo. Com isso, fazem parte dessa etapa a definição do Sistema de Produto, a Unidade Funcional e os Fronteira do sistema da ISO 14044 (ABNT, 2009).

O Sistema de Produto trata do conjunto de processos elementares e de produtos, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto (ABNT, 2009). Ou seja, trata de uma explicação detalhada das etapas que compõem o ciclo de vida de um determinado produto, por exemplo, desde a extração da matéria-prima, até etapas de processamento, produção/manufatura do produto, uso do produto, disposição e transportes necessários entre as etapas (Hauschild *et al.*, 2018). Como exemplo de diferentes sistemas de produtos adotados em estudos do transporte ferroviário, a Tabela 3 aborda também o escopo para os diversos elementos da infraestrutura. No tocante ao maior detalhamento dessas etapas, o Anexo I mostra os estágios padronizados para o sistema de produto que vêm sendo adotados à ACV aplicada à construção civil, conforme o Centro Europeu de Normalização (CEN/TC 350), os quais entende-se ser viável a aplicação para a infraestrutura.

A Unidade Funcional (UF) é definida como uma unidade de referência para normalização de um desempenho quantificado de um determinado produto, visando garantir a comparabilidade dos resultados de ACV (ABNT, 2009). Ainda de acordo com esta norma, a UF deve fornecer uma referência em relação à qual dados de entrada e saída são normalizados (no sentido matemático), ou seja, deve ser claramente definida e mensurável. Com isso em vista, unidades funcionais podem ser utilizadas, dependendo da questão que está sendo abordada. Alguns estudos, como Kapetanović *et al.* (2019), tratam das UF's utilizando parâmetros de desempenho operacional, como veículo-quilômetro (vkm) ou passageiro-quilômetro (pkm) percorrido. Já Olugbenga *et al.* (2019), além de mencionarem os critérios operacionais anteriores, também tratam das características geométricas da via como metro de ponte (mdp) e quilômetro de via construída (qc). Além disso, também mencionam como critérios o sistema de infraestrutura ferroviária e sistema de metrô, em uma abordagem mais ampla do contexto do objeto da análise, como feito por Bortoli *et al.*, (2020), em que é mencionado não apenas o tempo de vida útil avaliado, mas também as características geométricas, extensão da via e a localização da estrutura, em linha com Landgraf and Horvath (2021)

e Chang and Kendall (2011). Logo, diante das diferentes características do transporte ferroviário, entende-se que estes últimos trabalhos refletem melhor o conceito de UF, visto que apenas o critério operacional não permitiria uma comparação mais fidedigna com outros estudos similares.

Quanto à Fronteira do Sistema, a ISO 14044 (ABNT, 2009) preconiza que esta determina quais os processos elementares devem ser incluídos na ACV. Assim sendo, a seleção da fronteira do sistema deve ser consistente com o objetivo do estudo. No que se refere à exclusão de estágios do ciclo de vida, assim como processos, entradas ou saídas, só é permitida se isso não provocar uma mudança significativa nas conclusões gerais do estudo.

Tabela 3: Estudos de caso segregados pelos elementos de Avaliação do Ciclo de Vida. Adaptado de Olugbenga, Kalyvotiis & Saxe (2019)

Autor	Tipo	Software ACV	Base de dados			Escopo da Infra-estrutura					Sistema de produto		
			Impactos/emissões <sup>b</sup>	Via Permanente	Estações	Pontes	Túneis	Construção	Operação	Manutenção	Disposição Final		
Lave (1978)	Trem convencional de passageiros	SimaPro	x					X	x	x			
Network Rail (2009)	Intermunicipal	SimaPro	x	x	X			X	x	x			x
Chester and Horvath (2010)	3*Trem de Alta Velocidade, 3*Trem convencional de passageiros	SimaPro	x	x	X			X	x	x			x
Chang and Kendall (2011)	Trem de Alta Velocidade	Outros <sup>a</sup>		x				X					
Paris and de Silva (2010)	Metro	GaBi / Outros	x	x	X			X	x	x			x
Westin and Kägeson (2012)	Trem de Alta Velocidade	Outros		x	X			X	x	x			x
Chester <i>et al.</i> (2012)	2*Veículo Leve sobre trilhos	SimaPro	x	x	X			X	x	x			x
Chester <i>et al.</i> (2013)	2* Veículo Leve sobre trilhos	SimaPro	x	x	X			X	x	x			x
Morita <i>et al.</i> (2013)	Veículo Leve sobre trilhos	Outros		x	X			X	x	x			x
Hanson <i>et al.</i> (2016)	5*Trem suburbano	Outros	x	x	X			X	x	x			x
Lederer <i>et al.</i> (2016)	Veículo Leve sobre trilhos	Outros		x	X			X	x	x			x
Miyoshi and Givoni (2014)	Trem de Alta Velocidade	Outros		x	X			X	x	x			x
Yue <i>et al.</i> (2015)	Trem de Alta Velocidade	SimaPro	x	x	X			X	x	x			x
Infraestructuras (2015)	Trem de Alta Velocidade	GaBi	x	x				X					
Jones <i>et al.</i> (2017)	Trem de Alta Velocidade	SimaPro	x	x	X			X	x	x			x
Li <i>et al.</i> (2016)	Metro	Outros		x	X			X	x	x			x
Chester and Cano (2016)	Veículo Leve sobre trilhos	SimaPro	x	x	X			X	x	x			x
Intern. Union Railways (2016)	Trem de Alta Velocidade	Outros	x	x	X			X	x	x			x
Intern. Union Railways (2016)	Intermunicipal	Outros	x	x	X			X	x	x			x
Intern. Union Railways (2016)	Carga	Outros	x	x	X			X	x	x			x
Dimoula <i>et al.</i> (2016)	Trem suburbano	Outros		x	X			X	x	x			x
Bueno <i>et al.</i> (2017)	Trem de Alta Velocidade	Outros	x	x	X			X	x	x			x
Saxe <i>et al.</i> (2017)	Metro	Outros		x	X			X	x	x			x
Shinde <i>et al.</i> (2018)	Trem suburbano	Outros		x	X			X	x	x			x

<sup>a</sup>Outros softwares incluem Planilha eletrônica, PALATE, GREET, AggRain CO<sub>2</sub> Tool, Simulações estatísticas

<sup>b</sup>Bases de dados incluem Ecolinvent, GEMIS, Base de dados de Ciclo de Vida do Ministério Chinês, e PE Database

Como ferramenta para melhor compreensão das fronteiras, convém que o sistema seja representado utilizando-se um fluxograma de processo, evidenciando os processos elementares e suas inter-relações. Tratando dos critérios de corte, esses podem ser distintos, tais como massa, energia e significância ambiental, definindo assim de forma clara o não-escopo do estudo. Por fim, a Tabela 4 evidencia as diferentes fronteiras de sistema adotadas nos estudos sobre a aplicação da ACV no transporte ferroviário.

Tabela 4: Fronteira de sistemas na Avaliação do Ciclo de Vida em transporte ferroviário. Adaptado de Kapetanović et al. (2019)

Publicação	País	Modo de Transporte / Área	Fronteira de sistema
von Rozycki <i>et al.</i> (2003)	Alemanha	Trem de Alta Velocidade	Construção e operação de infraestrutura (incluindo edificações); fabricação, tração e manutenção de veículos
Castella <i>et al.</i> (2009)	Coreia do Sul	Trem de Alta Velocidade	Produção, fabricação, uso e fim de vida de matérias-primas de vagões ferroviários
Stripple & Uppenber (2010)	Suécia	Transporte ferroviário (passageiro e carga)	Construção e manutenção de infraestrutura (incluindo túneis, pontes, via permanente, estações, terminais de carga, sistema de sinalização); fabricação e operação de vagões de trem
Åkerman (2011)	Suécia	Trem de Alta Velocidade	Construção, manutenção e operação de infraestrutura; veículo, fabricação, manutenção e uso
Chang and Kendall (2011)	EUA	Trem de Alta Velocidade	Construção de infraestrutura (edifícios e estações excluídos, bem como operação de infraestrutura e veículos)
Chester and Horvath (2012)	EUA	Transporte de passageiros (trem de alta velocidade, automóveis emergentes e tecnologia aeroviária)	Construção, operação, manutenção da infraestrutura; fabricação, operação, manutenção e seguro de veículos
Chan <i>et al.</i> (2013)	Canadá	Sistema de trem suburbano	Operação de veículos; produção de combustível/geração de eletricidade
Banar and Özdemir (2015)	Turquia	Transporte ferroviário de passageiros (trem de alta velocidade, trem convencional)	Infraestrutura (produção e distribuição de energia elétrica, extração e produção de matérias-primas, construção, manutenção e operação de linhas e disposição de resíduos); operação ferroviária (produção e distribuição de energia elétrica, extração e produção de matérias-primas, produção, manutenção e operação de veículos ferroviários); e disposição final.
Del Pero <i>et al.</i> (2015)	Itália	Trem metropolitano	Aquisição, fabricação, uso e fim de vida de material rodante
Andrade and D'Agosto (2016)	Brasil	Linha de metrô	Construção e operação de infraestrutura; fabricação, operação e manutenção de trens
Dimuola <i>et al.</i> (2016)	Grécia	Transporte rodoviário e ferroviário (passageiro e carga)	Construção de infraestrutura (rodoviária e ferroviária); operação (rodoviária e ferroviária)
Jones <i>et al.</i> (2017)	Portugal	Trem de Alta Velocidade	Construção, operação e manutenção da via e descarte; fabricação, operação, manutenção e descarte de trens
Shinde <i>et al.</i> (2018)	Índia	Trem suburbano	Construção e manutenção de infraestrutura; fabricação, manutenção e operação de veículos

### 2.1.3 Método de Avaliação do Impacto

A ISO 14044 (ABNT, 2009) preconiza que, para a seleção da metodologia, deve-se levar em consideração as categorias de impacto, indicadores das categorias e modelos de caracterização. Olugbenga *et al.* (2019) propuseram a agregação dos métodos aplicados em transporte ferroviário em 05 grupos: Paramétrico, Simplificado, Pseudo, Híbrido e Baseado em Processos.

Tratando do método Paramétrico, este é usado quando os dados do sistema não estão prontamente disponíveis, como no estudo de Westin & Kågeson (2012). Ou seja, na ACV paramétrica, critérios específicos do sistema são modelados estatisticamente para calcular as emissões associadas ao sistema.

Assim como no paramétrico, o Simplificado é um método utilizado quando não é possível acessar os dados do sistema. Nessa linha, no estudo de Bueno *et al.* (2017), a ACV simplificada foi realizada comparando o impacto ambiental da infraestrutura ferroviária e nenhuma condição de infraestrutura ferroviária dentro de uma área.

O método Pseudo-ACV trata de uma combinação de dados primários e dados da literatura para calcular as emissões de gases de efeito estufa. Diante disso, ele usa referências cruzadas para estimar as emissões com a incerteza associada de aplicar fatores desenvolvidos em um estudo de caso para outro, muitas vezes em condições diferentes, como em Hanson *et al.* (2016).

Conforme Kapetanović *et al.* (2019), a análise baseada em Entrada-Saída Econômica, também denominada como Híbrida por Olugbenga *et al.* (2019), combina um modelo econômico de entrada-saída (Input-Output, I-O), com dados ambientais para que a carga ambiental da produção das *commodities* seja determinada.

Já a metodologia baseada em Processos é realizada mapeando todos os processos associados a todas as fases do ciclo de vida do projeto, em que são incluídas entradas (por exemplo, eletricidade, aço) e saídas (por exemplo, emissões atmosféricas, descargas de água) associadas a cada processo, o que permite a carga ambiental total a ser calculada. Ele fornece uma análise muito detalhada, mas pode exigir uma grande quantidade de dados para incluir processos *upstream* (Kapetanović *et al.*, 2019).

Por fim, apesar da existência dos métodos mencionados, Olugbenga *et al.* (2019), em seus estudos de revisão, concluíram que a ACV baseada em processos é a análise mais frequente, embora alguns pesquisadores tenham empregado as abordagens simplificadas, pseudo-ACV, híbrida e paramétricas.

De toda forma, é preciso ressaltar que os métodos de avaliação de impactos consistem em modelos matemáticos utilizados para calcular fatores de caracterização de substâncias específicas, as quais expressam o impacto potencial de cada fluxo elementar em termos da unidade comum do indicador de categoria. Ou seja, tal impacto permite agregar diferentes substâncias com base em uma unidade padrão para permitir a caracterização de determinado impacto (Roy *et al.*, 2014).

Assim sendo, de modo tradicional, os procedimentos de caracterização são obtidos a partir de um modelo padrão, representado pela Equação ( 1):

$$IR_c = \sum_s FC_{cs} \times m_s \quad (1)$$

Onde:

$IR_c$  = Indicador de Resultado para categoria de impacto  $c$ ;

$FC$  = Fator de Caracterização que conecta a intervenção  $s$  com a categoria de impacto  $c$ ;

$m_s$  = Quantificação da intervenção  $s$  (por exemplo, a massa da substância  $s$  emitida)

Diante disso, destaca-se que cada método de avaliação de impacto realiza a caracterização específica de cada substância do inventário com as categorias de impactos, as quais são classificadas com base no método. Diante disso, a Tabela 5 mostra alguns métodos largamente utilizados em ACV, assim como as categorias de impactos abordadas.

Tabela 5 Categorias de impacto e modelos de caracterização. Fonte: Piekarski, 2015

MÉTODOS (Modelos de caracterização)	CATEGORIAS DE IMPACTOS											
	Mudança Climática	Depleção da camada de Ozônio	Efeitos respiratórios (inorgânicos)	Toxicidade humana	Radiação iônica	Ecotoxicidade	Formação de Ozônio Troposférico	Acidificação	Eutrofização Terrestre	Eutrofização Aquática	Ocupação / Uso da terra	Consumo de recursos abióticos
IMPACT 2002+	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
CML 2002	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
EDIP 2003/ EDIP976	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
IPCC	X											
ReCiPe	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TRACI	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X

No que concerne à realidade brasileira, Saviotto (2017), em seu trabalho acerca da ACV aplicada à infraestrutura de transportes, e baseado em Mendes *et al.* (2016), mostrou a inexistência de um método sul-americano e, portanto, avaliou o uso de métodos de

abrangência global como *EDIP*, *TRACI* e *CML*. Estes métodos são possíveis de serem encontrados na base de dados do *software* Simapro. Finalmente, a Tabela 6 apresenta a recomendação de métodos para avaliação de impacto para o Brasil, sendo apenas aqueles referente à acidificação terrestre possíveis de se encontrar na ferramenta de ACV mencionada anteriormente.

Tabela 6 Recomendação de métodos de ACV para o Brasil. Fonte: Ugaya et al, 2019.

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Métodos de avaliação recomendados para o Brasil</b>
<i>Acidificação terrestre</i>	IMPACT World+; LC-Impact; ReCiPe 2016
<i>Eutrofização em água doce</i>	Azevedo et al. (2013)
<i>Modelos de contabilização de recursos (RAM)</i>	CEENE (Dewulf et al., 2007)
<i>Depleção dos recursos abióticos</i>	ReCiPe – endpoint (Goedkoop et al. 2009); EPS 2000 (Steen, 1999)
<i>Escassez hídrica</i>	<i>Midpoint</i> : Boulay et al. (2011); Pfister & Bayer (2013); Boulay et al. (2016) <i>Endpoint</i> : Boulay et al. (2011); Motoshita et al. (2016)
<i>Depleção dos recursos bióticos</i>	Langlois et al (2014)
<i>Serviços ecossistêmicos decorrentes do uso da terra</i>	Brandão e Milà i Canals (2013)

No que diz respeito aos métodos da Tabela 5, estes abrangem uma ampla gama de categorias de impactos, cujas algumas métricas de indicadores são apresentadas na Tabela 7. Tendo como premissa a compatibilidade da maioria dos indicadores entre os métodos recomendados para uso no Brasil (*EDIP* e *CML*), conclui-se que é possível o emprego de análise de sensibilidade entre métodos de ACV, caso os estudos sejam realizados a partir do presente procedimento metodológico proposto.

Tabela 7 Métricas de indicadores por categoria e método. Fonte: Mendes *et al.* (2016)

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Indicadores</b>				
	<i>EDIP 97/2003</i>	<i>CML 2001</i>	<i>Impact 2002+</i>	<i>ReCiPe</i>	<i>ILCD</i>
<i>Aquecimento Global/ Mudança climática</i>	Kg CO <sub>2</sub> eq	Kg CO <sub>2</sub> eq	Kg CO <sub>2</sub> eq	Kg CO <sub>2</sub> eq	Kg CO <sub>2</sub> eq
<i>Depleção da camada de ozônio</i>	Kg R <sub>11</sub> eq	Kg R <sub>11</sub> eq	Kg CFC <sub>11</sub> eq	Kg CFC <sub>11</sub> eq	Kg CFC <sub>11</sub> eq
<i>Acidificação</i>	Kg SO <sub>2</sub> eq	Kg SO <sub>2</sub> eq	Kg SO <sub>2</sub> eq	Kg SO <sub>2</sub> eq	AE
<i>Eutrofização</i>	Kg NO <sub>3</sub> eq	Kg PO <sub>4</sub> eq	Kg PO <sub>4</sub> eq	Kg P eq	Kg P eq
<i>Oxidação fotoquímica</i>	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	Kg NMVOC <sub>eq</sub>	Kg NMVOC <sub>eq</sub>
<i>Toxicidade humana</i>	m <sup>3</sup>	Kg 1,4 DCB eq	-	Kg 1,4 DCB eq	casos
<i>Eco toxicidade</i>	m <sup>3</sup>	Kg 1,4 DCB eq	Kg TEG eq	Kg 1,4 DCB eq	-
<i>Depleção de água</i>	-	-	-	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>

Finalmente, como forma de prover um método nacional, a Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida no Brasil tem direcionado esforços nesse sentido, como o estudo de Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro (Ugaya *et al.*, 2019). Todavia, neste trabalho, a conclusão mostra que ainda é necessário o aprimoramento da sofisticação dos modelos, com foco na obtenção de fatores de caracterização regionalizados e a inclusão de informações acerca das incertezas, alinhado com Mendes (2013).

#### 2.1.4 Inventário de Ciclo de Vida e *Software* de ACV

O inventário do ciclo de vida (ICV) trata de um documento com a estruturação dos dados, contendo os fluxos de entrada e saída para um sistema de produto. Esses fluxos incluem entradas de água, energia e matérias-primas e liberações para o ar, terra e água. O inventário pode ser baseado na análise da literatura ou na simulação do processo (Spielmann & Scholz, 2005). Para o emprego dos ICV's, a ISO 14044 (ABNT, 2009) traz as recomendações para que os dados utilizados, assim como o resultado do inventário, mantenham correlação com a unidade funcional e a fronteira do sistema do objeto de estudo.

Diante da diversidade de variáveis para elaboração desses inventários, muitas são as fontes de ICV's disponíveis que podem ser aplicadas durante a elaboração de uma ACV, tais como EcoInvent, ELCD, dentre outros, sendo que alguns podem ser encontrados na plataforma da *Greenhouse Gas Protocol* (2022). De toda forma, contextualizando com o objeto do presente estudo, a Tabela 8 mostra as diferentes fontes de ICV nos trabalhos que discorrem sobre o transporte ferroviário.

Diante disso, o estudo de Bortoli *et al.*, (2020), ao avaliar diferentes inventários para a infraestrutura ferroviária, procurou determinar os *hotspots* ambientais de boas práticas ao propor um modelo abrangente de ACV para componente de infraestrutura ferroviária de alta velocidade. Ainda nesse trabalho, as autoras concluem que, apesar das referências bibliográficas consultadas avaliarem escopos similares, os inventários empregados se mostraram muito distintos, como Deutsche Bahn Railway *experts*, Rozycki *et al.* (2003), entre outros, por não retratarem a realidade da França, local onde o estudo foi realizado.

Assim sendo, tendo por referência o estudo de Wernet *et al.* (2016), além da natureza dos materiais constituintes dos insumos, é possível identificar três critérios para a escolha do inventário:

- i. *Localização geográfica*: apresenta inventários cujas atividades incluem dados sobre o volume anual de produção e, nos bancos de dados do modelo do sistema, os conjuntos de dados globais são utilizados para aproximar as atividades em regiões não cobertas por dados locais. Assim sendo, há inventários com abrangência global (GLO), regiões específicas da Europa (RER) e por países como China (CN), Brasil (BR), entre outros. Além disso, no intuito de aproximar as atividades dos inventários em regiões não cobertas pelos dados locais, a base conta com a classificação denominada Resto do Mundo (*RoW – Rest of the World*). Os conjuntos de dados para RoW foram gerados utilizando uma média ponderada pelo volume de produção de todos os conjuntos de dados locais e calculando um conjunto de dados de diferença em relação à média global disponível no conjunto de dados global. É preciso lembrar que a base do EcoInvent conta com limitada quantidade de inventários que representam a realidade brasileira, especialmente sua matriz energética. Logo, um dos principais desafios no desenvolvimento de estudos de ACV é alocar, de modo mais apropriado, as possibilidades existentes na base de dados ao contexto nacional.
- ii. *Tipo de Mercado*: os inventários podem ser segregados entre *produção e mercado*. Em resumo, enquanto o primeiro grupo trata das atividades específicas de beneficiamento e construção do produto, o segundo agrega também outras atividades da cadeia logística, como o transporte. Todavia, recomenda-se que, ao se realizar a ACV, seja utilizado inventário diretamente proveniente de atividades de produção, sempre que houver conhecimento mais específico acerca da origem do produto, perdas e distâncias de transporte.
- iii. *Modelo de Sistema*: dependendo da abordagem da ACV, é possível adotar uma análise mais complexa que avalie as opções de substituição dos subprodutos, ou seja, quando se pretende fazer uma análise mais profunda considerando o fim da vida útil dos materiais ou um estudo mais direto, quando se literalmente corta a etapa de reciclagem dos materiais dos processos em análise. Portanto, para o primeiro modelo, tem-se o nome de

alocação no ponto de substituição (APOS, sigla em inglês), enquanto para a forma mais objetiva, é sugerido aplicar os inventários denominados com corte (*cut-off*). Como conclusão, é possível afirmar que, enquanto o modelo de corte aloca o processo de produção apenas aos seus subprodutos alocáveis, o modelo APOS expande o sistema de alocação para incluir tanto os processos de produção quanto de tratamento.

Vale ressaltar que essa incompatibilidade trata de uma das principais dificuldades encontradas para o presente estudo, uma vez que a maior parte dos inventários das bases de dados disponíveis foi desenvolvida no hemisfério norte, ou seja, para a realidade dos países cuja matriz energética difere da brasileira, que utiliza primordialmente energia proveniente de hidrelétricas. Por isso, o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida do Brasil (SICV Brasil) vem sendo desenvolvido, pois trata de um repositório de dados criado para abrigar Inventários de Ciclo de Vida (ICV's) nacionais, com foco na implantação de um sistema reconhecido em âmbito internacional (IBICT, 2022). Um desses esforços pode ser exemplificado pelo trabalho de D'Agosto & Ribeiro (2009), com foco na elaboração do inventário do ciclo de vida de combustível para a matriz nacional. Além disso, na área do transporte ferroviário, tem-se o estudo desenvolvido por Salles (2009), com foco no comparativo de inventário de ciclo de vida para dormente de madeira natural e madeira plástica.

Ainda na direção dos estudos em ferrovia no Brasil, Andradre (2016) dedicou-se em seu trabalho a avaliar a emissão de dióxido de carbono e do uso de energia no ciclo de vida de sistemas metro ferroviários de passageiros, concluindo que a nova linha de transporte metroviário (Linha 4) contribuiria para a redução das emissões totais no setor de transporte na cidade do Rio de Janeiro. Por fim, é possível concluir que ferramentas para mensuração de emissões e impactos vêm sendo usadas largamente em diferentes países, com desenvolvimento financiado por entidades públicas e privadas, e também utilizadas para medir desempenho ambiental da infraestrutura, como pavimentos. Caracterizados desde planilhas eletrônicas até *softwares* sofisticados ou mesmo plataformas *on-line*, alguns desses instrumentos, tais como Calculadoras de Carbono, têm dado espaço a ferramentas para processamento dos dados de inventários e análise para ACV (Loijos, 2011). Além disso, *softwares* como o SimaPro permitem a manipulação dos ICV's de forma intuitiva e, por isso, a Tabela 9 apresenta alguns estudos, em que essas ferramentas foram empregadas no âmbito do transporte por trilhos.

Tabela 8: Inventários de Ciclo de Vida aplicados em Transporte Ferroviário. Adaptado de Bortoli *et al.*, (2020)

<b>Tipo de Ferrovia</b>	<b>País</b>	<b>Ano de Publicação</b>	<b>Primeiro Autor</b>	<b>Fontes de Inventário Ciclo de Vida</b>	<b>Linha</b>
Trem de Alta Velocidade	Alemanha	2003	Rozycki	Especialistas ferroviários, Deutsche Bahn	Hanover-Wuerzburg
Convencional	Europa – Suíça	2004	Spielmann	Literatura	Nacional
Convencional-HSR	Suécia	2006	Svensson	Literatura	Nacional
Convencional	EUA	2006	Horvath	Híbrido, literatura	EUA
Convencional	Suécia	2010	Stripple	Literatura, dados de fabricação	Nyland-Umea (Bothnia Line)
Trem de Alta Velocidade	Califórnia- EUA	2010	Chester	Híbrido, literatura	São Francisco-Anaheim
Trem de Alta Velocidade	Califórnia- EUA	2011	Chang	Literatura	São Francisco-Anaheim
Trem de Alta Velocidade	Suécia	2011	Åkerman	Stripple 2010	Estocolo- Gutembergue / Kinkoping- Malmo / Copenhagem
Trem de Alta Velocidade	Noruega	2011	Asplan Viak AS	Projeto, bases de dados do Simapro	Oslo-Ski
Trem de Alta Velocidade	Reino Unido	2012	Miyoshi	Literatura (Chester, Von Rozycki)	Londres-Manchester
Convencional	Suíça	2014	Fries	Ecolnvent v2.2, informações do fornecedor	Diferentes linhas
Trem de Alta Velocidade	China	2015	Yue	Base de dados de Ciclo de Vida do Ministério Chinês	Pequim - Xangai
Trem de Alta Velocidade	Turquia	2015	Banar and Ozdemir	Literatura, Ecolnvent	Nacional
Trem de Alta Velocidade	Portugal	2016	Jones	Literatura, Ecolnvent v3	Lisboa-Porto
Trem de Alta Velocidade	Espanha	2017	Bueno	Literatura	Linha em formato estrela "Y Basco"
Trem de Alta Velocidade	França	2020	Bortoli	Ecolnvent	Linha Tours-Bourdeaux
Convencional	Brasil	2009	Salles	GaBi	Linha metropolitana do RJ
Convencional	Austrália	2021	Government of Western Australia	AusLCI	Linha Armadale-Byford
Transporte passageiro e carga	Alemanha	2020	Umwelt Bundesamt	Umberto	Malha ferroviária nacional alemã

Tabela 9: Sumário não-exaustivo de ferramentas para Cálculo de Carbono e Avaliação do Ciclo de Vida em Infraestrutura de Transporte Ferroviário

<b>Ferramenta</b>	<b>Desenvolvedor</b>	<b>Repositório</b>	<b>Publicação</b>
<i>Brain-Trains</i>	University of Antwerp	<a href="https://www.uantwerpen.be/en/projects/brain-trains/project-results/deliverables/">https://www.uantwerpen.be/en/projects/brain-trains/project-results/deliverables/</a>	Merchan, Belboom & Leonard (2017)
<i>SimaPro</i>	PRé Sustainability B.V.	<a href="https://acvbrasil.com.br/software/simapro">https://acvbrasil.com.br/software/simapro</a>	Asplan Viak AS (2011)
<i>GaBi</i>	Sphera	<a href="https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/">https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/</a>	Landgraf <i>et al.</i> (2022)
<i>LCA-Tool</i>	University of Twente	-	Haanstra <i>et al.</i> (2020)
<i>Klimatkalkyler</i>	Swedish Transport Administration	<a href="https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/energi-och-klimat/Klimatkalkyl/">https://www.trafikverket.se/for-dig-i-branschen/miljo---for-dig-i-branschen/energi-och-klimat/Klimatkalkyl/</a> <a href="https://klimatkalkyl-pub.ea.trafikverket.se/Klimatkalkyl/Klimatkalkyler">https://klimatkalkyl-pub.ea.trafikverket.se/Klimatkalkyl/Klimatkalkyler</a>	Swedish Transport Administration (2020)
<i>VegLCA</i>	Norwegian Public Roads Administration	-	Norwegian Public Roads Administration (2021)
<i>One Click LCA Infrastructure</i>	Bentley Systems	<a href="https://www.oneclicklca.com/construction/infrastructure-life-cycle-assessment">https://www.oneclicklca.com/construction/infrastructure-life-cycle-assessment</a>	Lausselet, Lund & Brattebø (2021)
<i>Ecorce</i>	IFSTTAR Institut Français	<a href="https://www.seve-tp.com/#/login">https://www.seve-tp.com/#/login</a>	Vandanjon <i>et al.</i> (2012)
<i>EFFEKT 6.6</i>	Norwegian Public Road Administration	<a href="https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/2659569">https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/handle/11250/2659569</a>	Statens Vegvesen Vegdirektoratet (2018)
<i>Geokalkyl</i>	Swedish Transport Administration	<a href="https://www.sgi.se/geokalkyl/">https://www.sgi.se/geokalkyl/</a> <a href="https://gis.swedgeo.se/geokalkyl/verktyget/">https://gis.swedgeo.se/geokalkyl/verktyget/</a>	Trafikverket (2021)
<i>InfraLCA</i>	Danish Road Administration	<a href="https://api.vejdirektoratet.dk/sites/default/files/2021-12/InfraLCA_V202_2021_12_17_0848.xlsm">https://api.vejdirektoratet.dk/sites/default/files/2021-12/InfraLCA_V202_2021_12_17_0848.xlsm</a>	Danske Transportministeriet (2022)
<i>Mainline</i>	European Commission – Cordis	<a href="http://www.mainline-project.eu/Results,7">http://www.mainline-project.eu/Results,7</a>	Lee (2016)
<i>Life Huellas</i>	European Commission – Trimis	<a href="https://www.life-huellas.eu/calc/index_en.php">https://www.life-huellas.eu/calc/index_en.php</a>	Barrientos <i>et al.</i> (2016)
<i>Dataset for LCA of Rail Network in Spain</i>	EKOPOL Research Group	<a href="https://data.mendeley.com/datasets/5f2szm73s7/2">https://data.mendeley.com/datasets/5f2szm73s7/2</a>	Kortazar <i>et al.</i> , (2021)
<i>ERIC - Carbon planning tool</i>	United Kingdom Environment Agency	<a href="https://majorprojects.org/sus-resource/environment-agency-carbon-planning-tool/">https://majorprojects.org/sus-resource/environment-agency-carbon-planning-tool/</a>	Jackson & Brander (2019)
<i>Rail Carbon Tool</i>	RSSB - Rail Safety and Standards Board	<a href="https://www.railindustrycarbon.com/Account/LogOn?ReturnUrl=%2f">https://www.railindustrycarbon.com/Account/LogOn?ReturnUrl=%2f</a>	Rempelos <i>et al.</i> , (2020)
<i>eTool LCD</i>	eTool Global	<a href="https://etoologlobal.com/software/subscriptions/">https://etoologlobal.com/software/subscriptions/</a>	eTool (2022)
<i>BM 1.0</i>	IVL Svenska Miljöinstitutet	<a href="https://www.miljoberakning.org/InstallTool">https://www.miljoberakning.org/InstallTool</a>	Linder, E. (2020)

### 2.1.5 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) identifica os impactos ambientais dos resultados do ICV associando os dados do inventário a possíveis categorias de impacto ambiental, ou seja, a AICV transforma fluxos de ICV em impactos ambientais para ACV. A ISO 14044 (ABNT, 2009) contrasta a AICV com outras técnicas, como quantificação do desempenho ambiental, avaliação de impacto ambiental e avaliação de risco, uma vez que se trata de uma abordagem relativa baseada em uma unidade funcional. Além disso, determina como obrigatórios os componentes representados na Figura 11.

Vários métodos foram desenvolvidos para essa análise, sendo alguns deles detalhados no estudo de Chen *et al.* (2021a), ao analisar as incertezas causadas no uso de diferentes métodos considerando o impacto de aquecimento global em ICV's baseados em processos. Como exemplos desses métodos, é possível citar o IPCC100a, ReCiPe 2016 Midpoint (H), IMPACT 2002+, ILCD2011 Midpoint+, Greenhouse Gas Protocol e CML-IA, sendo este último usado em infraestrutura ferroviária por Landgraf *et al.* (2022) e Bortoli *et al.*, (2020).

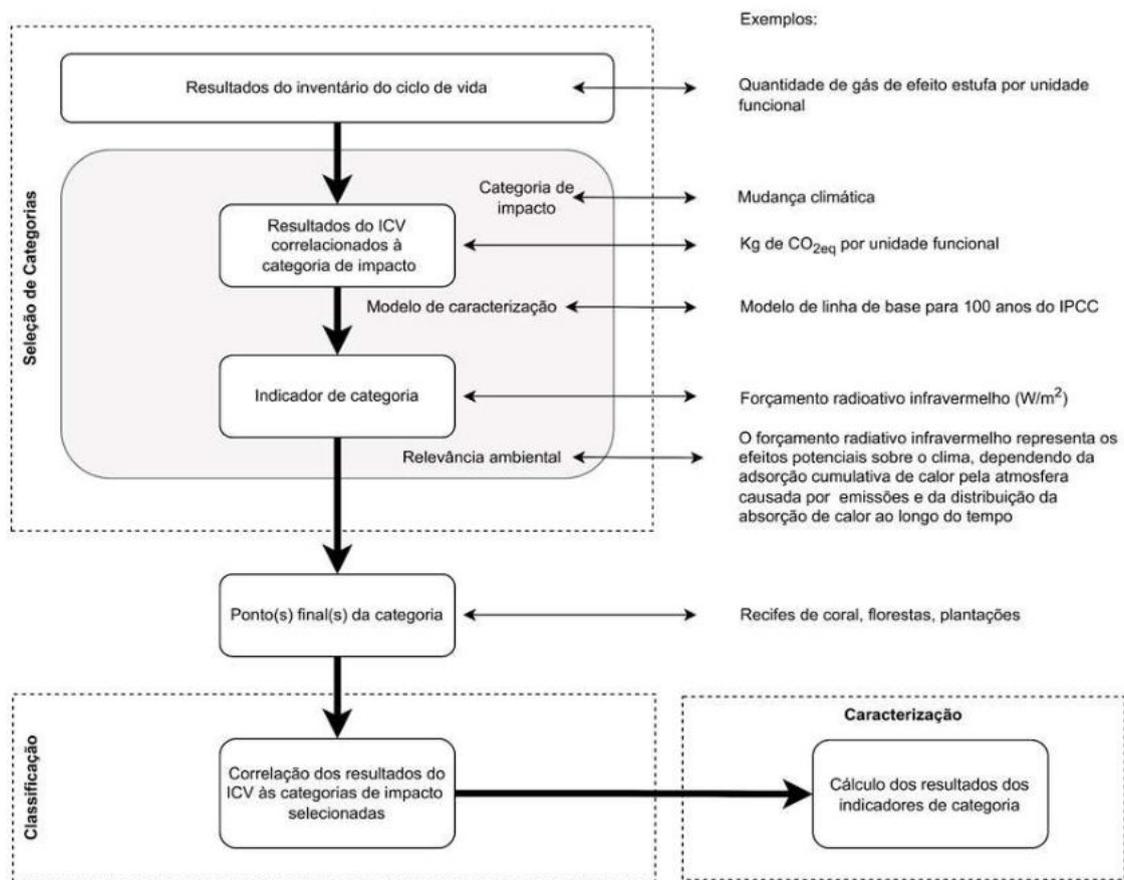


Figura 11: Etapas da AICV. Adaptado ABNT (2009)

Diante disso, é possível afirmar que a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida compreende a etapa de agregação dos elementos detalhados anteriormente, se mostrando como a fase mais relevante do estudo, visto que é nesse momento em que os dados inventariados são traduzidos em impactos potenciais para a saúde humana e o meio ambiente, conforme mostrado na Figura 12.

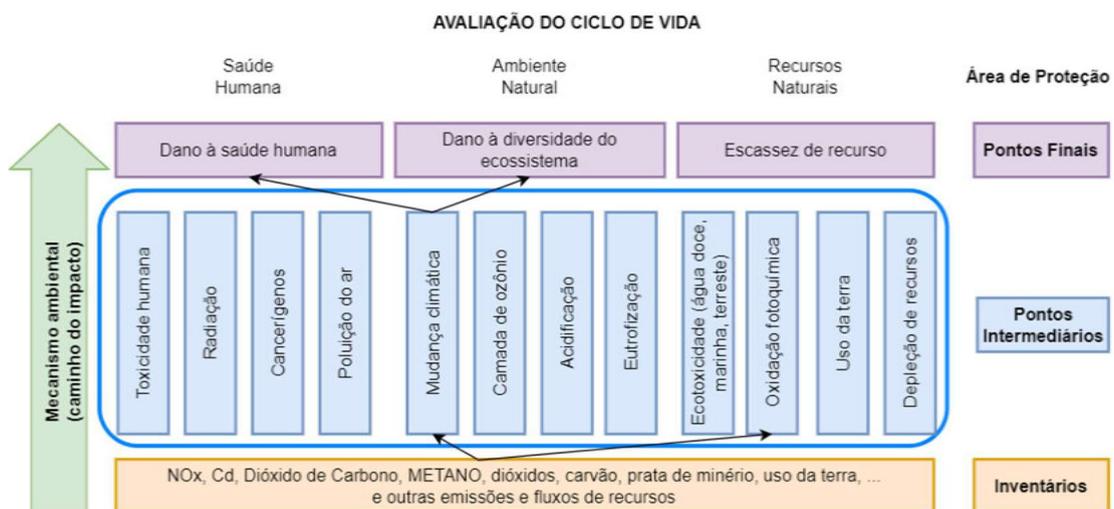


Figura 12 Esquemático do caminho do impacto. Adaptado de ILCD (2010)

Com as questões ambientais balizadas pelo objetivo e escopo declarados na ACV, sendo limitadas pelo sistema de produto e suas fronteiras, a realização da análise ocorre pela correlação entre os dados inventariados com as categorias de impacto selecionadas para estudo, devendo abranger obrigatoriamente três etapas: *seleção*, *classificação* e *caracterização*. Além disso, como estágios opcionais, podem ser realizadas a *normalização*, *agrupamento* e a *ponderação*. Desse modo, a Figura 13 resume os processos mandatórios e opcionais durante ACV, com adaptação para o procedimento metodológico proposto.

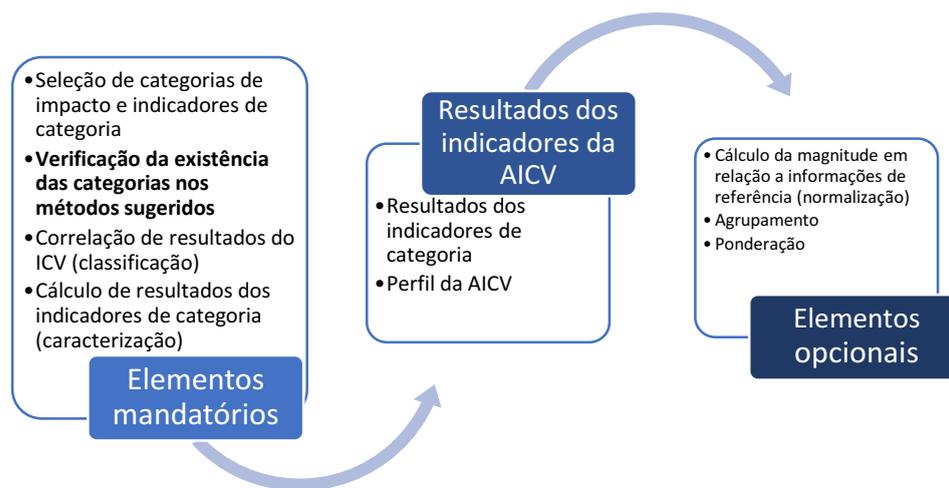


Figura 13 Etapas obrigatórias e opcionais para ACV. Fonte: ABNT, 2009 (Adaptado).

Para o presente estudo, é preciso reforçar que a seleção de categorias, classificação e caracterização está intimamente ligada à disponibilidade de métodos disponíveis para o Brasil, conforme demonstrado no tópico anterior. Dessa forma, é interessante que, durante a aplicação do procedimento metodológico proposto, se verifique a existência das categorias de impacto almeçadas nos métodos de avaliação de impactos sugeridos (CML, EDIP ou TRACI). Assim sendo, a partir desse momento, é possível avançar para a etapa final de ACV, a qual trata da interpretação.

Todavia, de modo a tornar a ACV mais robusta, é possível incluir as seguintes etapas durante a execução do estudo:

- i. *Normalização*: utilizada para comparar os resultados da AICV de diferentes sistemas analisados, considerando um valor de referência de um sistema de base. O objetivo desse procedimento é entender a magnitude relativa para cada resultado de indicador do sistema de produto em avaliação (ABNT, 2009). Essa etapa ainda permite a verificação de inconsistências dos resultados de AICV, assim como preparação para outras etapas opcionais, como agrupamento e

ponderação. Apesar do *software* de ACV sugerido no presente estudo conter referências para comparação, como World (1997), Europe (1995) e Netherlands (1997), o presente procedimento metodológico não abordará aplicação dessa etapa.

- ii. *Agrupamento*: trata da agregação dos impactos em um ou mais categorias para alcançar os resultados definidos no objetivo e escopo. Realizado quando há uma grande variedade de categorias de impacto, o agrupamento pode se dar por critério quantitativo (triagem) ou qualitativo (classificação) (Piekarski, 2015). Assim como a normalização, o agrupamento não será detalhado no presente estudo.
- iii. *Ponderação*: trata do processo de conversão dos indicadores de diferentes categorias de impacto pela utilização de fatores numéricos baseados em escolha de valores (ABNT, 2009). Também não compõe o escopo de abordagem do presente estudo.

#### 2.1.6 Interpretação da ACV e análise de incertezas

De acordo com ILCD (2010), com vistas ao objetivo do presente estudo, a interpretação tem o propósito fundamental de entregar conclusões robustas e recomendações. À vista disto, essa é fase da ACV, em que os resultados de outras etapas são considerados coletivamente e analisadas à luz da precisão obtida, integridade, acurácia dos dados aplicados e as premissas empregadas. Por fim, a Figura 14 contextualiza a fase de interpretação na estrutura da ACV, assim como evidencia seus principais elementos.

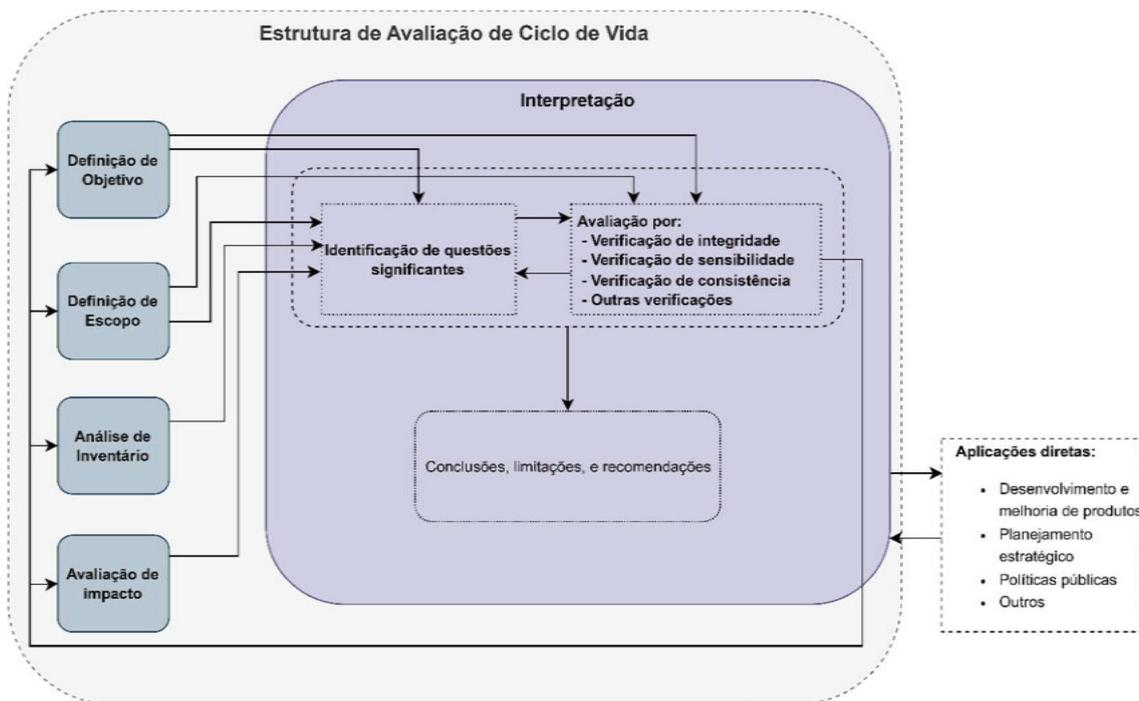


Figura 14 Elementos de interpretação em ACV. Adaptado de ILCD (2010)

Novamente, tratando sobre o objetivo do presente estudo, ou seja, realização da análise do desempenho ambiental da infraestrutura ferroviária com base no *ecodesign*, a interpretação trata justamente da fase em que é evidenciado o direcionamento de esforços, a partir da identificação dos processos e fluxos individuais com contribuição de impacto mais relevante. Dessa forma, é possível a criação de um processo de decisão para a escolha dos cenários mais interessantes a serem executados. Além disso, permite o desenvolvimento de um processo iterativo, no qual o resultado da ACV inicial possibilita retroalimentar o sistema com os ajustes necessários e, desta forma, realizar adequações para a especificar uma estrutura mais aderente às demandas do projeto.

Adiante, no que diz respeito ao caráter comparativo dos trabalhos a serem desenvolvidos com base no presente estudo, entende-se que se faz relevante a identificação de potenciais fontes de incertezas, uma vez que o escopo envolve a construção e análise de sistemas. Acerca dessa questão, Liljenström *et al.* (2022), em seu trabalho de revisão sobre as atividades de manutenção em ACV para infraestrutura de transporte, destaca diferentes fontes de incertezas. De acordo com os autores, estas podem ser referentes aos dados, aos métodos de avaliação, ao período de análise da unidade funcional, à frequência de manutenção, ao clima, às características dos materiais e ao tráfego futuro. Todavia, o presente estudo irá se ater às incertezas relativas aos dados dos inventários, as quais se encontram mensuradas na base de dados avaliada.

Portanto, visando determinar se as aparentes diferenças entre as alternativas são reais, ou seja, estatisticamente significante, é necessária a estimativa das incertezas acompanhando os resultados. Com isso em vista, ILCD (2010) informa três principais fontes de incertezas que podem ser abordadas: *i.* incerteza estocástica; *ii.* incerteza de escolha; *iii.* falta de conhecimento do sistema estudado.

Logo, para o presente estudo, serão abordadas as incertezas estocásticas, as quais são adequadamente descritas em termos de critérios tradicionais de estatística, tais como média, coeficiente de variação e tipo de distribuição dos dados. Assim, para as incertezas dos dados dos inventários e dos métodos de AICV, avaliados conjuntamente, a simulação de Monte-Carlo se mostra uma importante ferramenta para permitir o cálculo que visa quantificar os parâmetros em análise.

## **2.2 ACV em infraestrutura ferroviária de cargas**

O transporte ferroviário, a partir da perspectiva da ACV, e tendo por base o estudo de Olugbenga *et al.* (2019) e Bortoli *et al.*, (2020), pode ser segregado em: *i. finalidade do transporte:* carga ou passageiro; *ii. gestão de ativos:* infraestrutura ou operação; *iii. fronteira de sistema:* elementos que compõe os ativos, seja de infraestrutura (como o pavimento, pontes, dispositivos de drenagem, sistema de sinalização) ou de operação (material rodante). Logo, tratando da gestão de ativos, a infraestrutura pode ser entendida como o conjunto dos elementos correspondentes às construções, sistemas e ambiente físico no qual o transporte é realizado. Já a operação, baseado em Umweltbundesamt (2013), pode ser entendido como o escoamento da produção e/ou pessoas pelo material rodante, assim como os serviços e equipamentos ligados a essa finalidade. Por fim, a Tabela 10 mostra que, pela perspectiva da infraestrutura do transporte ferroviário, os estudos realizados recentemente têm adotado diferentes fronteiras de sistema, seja de forma ampla ao considerar desde o pavimento ferroviário, túneis, pontes, movimento de terra (aterros e cortes), estações e subestações, assim como análise específica para o aparelho de mudança de via. Assim sendo, para o presente estudo, é possível contextualizá-lo na finalidade de transporte de carga, com foco na infraestrutura, cuja fronteira de sistema se restringe ao pavimento.

Tabela 10: Estudos sobre ACV aplicada em infraestrutura do transporte de carga ferroviário

<b>Autor</b>	<b>Estágio</b>	<b>Fronteira do Sistema</b>	<b>Região</b>	<b>Unidade Funcional</b>	<b>Categoria de Impacto / Emissão</b>
Schmied & Mottschall., 2013	Construção, Operação e Manutenção	Pavimento ferroviário, Túneis, Pontes, Movimento de terra (aterros e cortes), Estações subestações e Manutenção das estações	Alemanha	tkm	Gases de Efeito Estufa
Mottschall and Bergmann, 2013	Construção, Operação e Manutenção	Pavimento ferroviário, Túneis, Pontes, Movimento de terra (aterros e cortes), Estações subestações e Manutenção das estações	Alemanha	tkm	Gases de Efeito Estufa
International Union of Railways UIC, 2016	Construção, Operação e Manutenção	Pavimento ferroviário, Túneis, Pontes, Movimento de terra (aterros e cortes), Estações subestações e Manutenção das estações	Suécia	tkm	CO <sub>2</sub>
Merchan <i>et al.</i> , 2017	Construção, Operação e Manutenção	Túneis, Pontes, Movimento de terra (aterros e cortes) and crossings Catenárias	Bélgica	tkm	-
Fridell <i>et al.</i> , 2019	Construção, Operação e Manutenção	Pavimento ferroviário, Túneis, Ponte, Movimento de terra (aterros e cortes)	Europa	tkm	Potencial de aquecimento global, entre outros
Landgraf <i>et al.</i> , 2022	Manufatura, Construção, Operação e Manutenção	Aparelho de mudança de via	Áustria	t/dia	Potencial de eutrofização, potencial de aquecimento global, Potencial de depleção da camada de ozônio, e Potencial de oxidação fotoquímica

Representado claramente no estudo realizado por de Olugbenga *et al.* (2019), a respeito do transporte ferroviário, muitos são os trabalhos disponíveis na literatura que vão de encontro à aplicação da ACV para locomoção de passageiros, ao contrário dos materiais já produzidos para o transporte de carga, conforme apresentado na Figura 15, quando apenas um trabalho é mencionado dentre mais de 40 estudos avaliados. Outro ponto interessante de ser reforçado é que os trabalhos se encontram concentrados no hemisfério Norte, ou seja, em locais que não o Brasil.

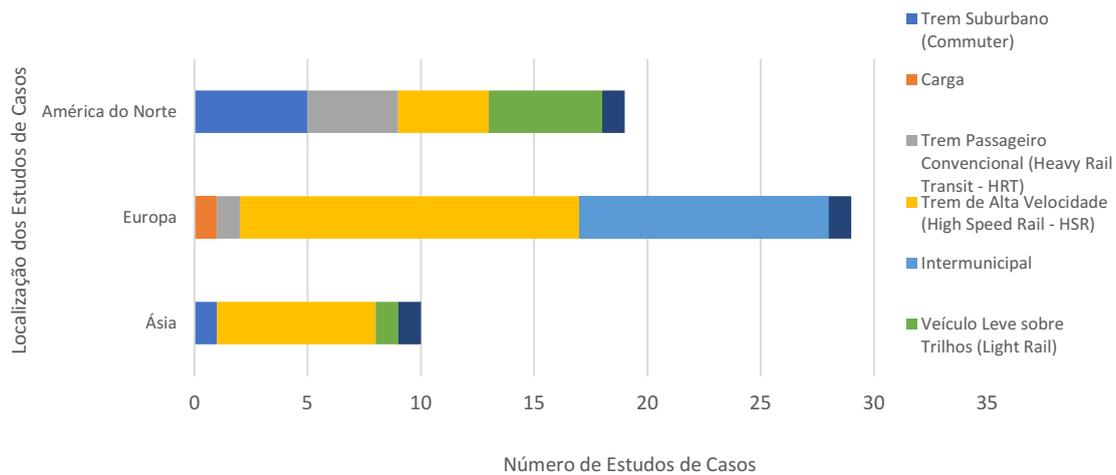


Figura 15 Localização e tipos de casos de estudos. Adaptado de Olugbenga et al. (2019)

Assim sendo, mesmo com trabalhos que tratam da infraestrutura do transporte por trilhos no Brasil como Andrade & D’Agosto (2016), é possível inferir a existência de uma demanda significativa para que estudos no setor de cargas ferroviárias sejam realizados. De toda forma, a Tabela 11 compara diferentes estudos sobre essa temática, visando identificar elementos comuns na ACV. Como resultado, é possível notar que a maior parte dos estudos foca nos estágios de construção, operação e manutenção dos ativos da infraestrutura ferroviária, nos países europeus, tendo como unidade funcional o transporte de tonelada por quilômetro, e aborda justamente o impacto relacionado à emissão de carbono.

Tabela 11: Indicadores de avaliação adotados nos estudos de ACV em transporte ferroviário

Fonte	Exclusão de escopo	Escopo	Indicador de Avaliação		Sistema de Produto	
			Avaliação	(gCO <sub>2</sub> /tkm)	Construção	Manutenção
<i>Chang &amp; Kendall (2011)</i>		Via permanente (Quantidade de emissão por km: 733,1 toneladas) Túnel, Sistema de Eletrificação, Estruturas aéreas e movimento de terra.	X		X	
<i>Umweltbundesamt (2013)</i>		Considera também os elementos de operação		(gCO <sub>2</sub> eq/tkm)	X	X
<i>Lee et al. (2020)</i>		Ferrovia Osong-Iksan e Ferrovia Iksan-Gwangju (Pavimento em concreto com trilho -High Speed Rail), Fundação da via permanente, Viadutos e pontes, Túnel (maior parte em NATM)	X			
<i>Krezo et al. (2016)</i>		Equipamentos para manutenção (atividades sem consumo de material), Camadas de suporte (sublastro e subleito), Lastro, Dormente de concreto, Trilho de aço, Rail pad, Elementos de fixação	X		X	X
<i>Mathieu et al., (2013)</i>	Excluindo as estruturas de construção civil (obras auxiliares, ligações externas às linhas existentes e estações)	Quantidade de impacto por km: 730 toneladas	X			
	Considerado 60 anos de vida útil. Não inclui os dormentes, trilhos, energia, sistemas de sinalização de energia.	Infraestrutura da via (subleito, sublastro e lastro) CONSTRUÇÃO	X			
	Considerado 60 anos de vida útil. Não inclui a fundação (subleito, sublastro e lastro), energia, sistemas de sinalização de energia.	Infraestrutura da via (subleito, sublastro e lastro) MANUTENÇÃO	X	(gCO <sub>2</sub> eq/km)	X	X
	Considerado 60 anos de vida útil (grade: trilho + dormente) CONSTRUÇÃO	Superestrutura da via (grade: trilho + dormente) CONSTRUÇÃO	X			
	Considerado 60 anos de vida útil (grade: trilho + dormente) MANUTENÇÃO	Superestrutura da via (grade: trilho + dormente) MANUTENÇÃO	X		X	X
<i>Stripple &amp; Uppenberg (2010)</i>		Infraestrutura da via - Limpeza do terreno, bueiros e demais dispositivos de drenagem, Energia elétrica, Cercas e proteção acústica, Desflorestamento, Canteiro de obras, Estabilização do subleito, Construção da fundação, Escavação de solos, Corte de rochas, Caminho de serviço	X		X	
	Considerado 60 anos de vida útil (grade: trilho + dormente). Não inclui a fundação (subleito, sublastro e lastro), energia, sistemas de sinalização de energia.	Superestrutura da via - Fresagem dos trilhos, Produção dos dormentes, Produção dos trilhos e aparelhos de mudança de via, Operação da superestrutura, Produção energia elétrica, Colocação dos trilhos	X		X	
<i>Bortoli et al., (2020)</i>		Sublastro, Equipamentos de construção, Lastro, Dormente de concreto, Trilho, Elementos de fixação, Sistema de energia, Viadutos, Transporte de materiais	X	[(g CO <sub>2</sub> eq) / (km.ano)]	X	X

No tocante à infraestrutura de transporte ferroviário, é possível citar estudos realizados: Pons *et al.* (2020) mostra que, ao avaliar seções distintas (*ballasted* e *ballastless*), a seção com emprego de lastro gera menor impacto, assim como constatou que a etapa de manutenção, ao considerar todo o ciclo de vida, é a que mais contribui para o impacto de potencial de aquecimento global; Santos *et al.* (2019), em seu Sistema de Tomada de Decisão para Pavimentos e Ferrovias Sustentáveis (SUP&R DSS), mostram que a mistura asfáltica com teor de 50% de asfalto reciclado é o mais sustentável dentre diversas soluções para uso de misturas asfálticas em ferrovias e rodovias; Bressi *et al.* (2018a), tratando acerca da ACV para avaliar o uso de misturas alternativas betuminosas (borracha triturada e pavimento asfáltico reciclado) na camada de sublastro, mostram que, em comparação com um sublastro betuminoso tradicional, as misturas *Crumb Rubber Modified (CRM)* apresentaram maiores impactos devido ao tratamento da borracha, assim como a redução dos impactos é maior quando se assume a mistura total entre o ligante envelhecido e o virgem, pois permite reduzir a quantidade de betume virgem empregado; Chang & Kendall (2011), ao avaliar o ciclo de vida dos gases de efeito estufa da construção da infraestrutura do sistema de trens de alta velocidade da Califórnia, estima que o *breakeven*, para a recuperação das emissões geradas na construção, ocorra sete anos após o início de operação da via; Stripple & Uppenberg (2010), ao detalhar sua análise sobre a contribuição dos elementos da infraestrutura ferroviária no impacto de potencial de aquecimento global, mostram que a maior contribuição provém do aço do *track* (proveniente do trilho e dormente), que corresponde a 29% do impacto total gerado, sendo o cimento consumido no túnel o segundo maior (10%), destacando-se que tais contribuições são resultado da produção dos materiais e não de sua aplicação no campo; Spielmann & Scholz (2005), ao tratar dos inventários de ciclo de vida para os serviços de transporte ferroviário, os quais compõem as bases de dados do Ecoinvent, corrobora com o conceito de que a operação do material rodante é que mais gera impacto de mudança climática, quando comparado com a infraestrutura, mostrando conformidade com o descrito por Umweltbundesamt (2013); Rozycki *et al.* (2003), ao analisar o sistema de transporte de passageiros por trens de alta velocidade na Alemanha, constatou que o aço – constituinte do trilho, dormente, túneis e pontes – gera o maior volume de emissões de CO<sub>2</sub> (0.390 kg/100 pkm), seguido do concreto (0.362 kg/100p.km).

Assim sendo, é possível notar que diferentes indicadores são utilizados nos estudos de ACV para avaliar o desempenho do transporte de carga em relação ao impacto gerado, sendo consolidado também na Tabela 11 alguns desses trabalhos.

Quanto aos avanços na área de ACV em infraestrutura ferroviária, outras ferramentas, como *Building Information Modeling – BIM*, têm sido empregadas, como mostra o estudo de Ciccone *et al.* (2022). No que concerne ao seu resultado, é apresentada a solução que permitiu o uso de modelos digitais como chaves de acesso à informação de levantamento e manutenção (plataformas ERP utilizadas pelos operadores ferroviários) que se tornaram disponíveis em tempo real. Nesse mesmo sentido, Soust-Verdaguer *et al.* (2022), tratando de um método de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) baseado em tecnologia BIM, concluíram que é possível estimar mais de 60% dos indicadores de inventário Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida durante a fase inicial de projeto e os resultados totais durante a fase de projeto detalhado. Já tratando sobre a interface dessa ferramenta com a ACV, Akponeware *et al.* (2020) e Kaewunruen & Lian (2019) mostram que a integração dos dois métodos de avaliação se mostra interessante e viável tanto para a tomada de decisão a nível de projeto quanto de rede. Por fim, Costin *et al.* (2018), em seu trabalho de revisão da literatura, concluíram que, apesar do aumento do uso da tecnologia BIM nos últimos anos na infraestrutura de transporte, o foco persiste ainda em estradas, rodovias e pontes, evidenciando a oportunidade para o desenvolvimento de estudos desse tópico em ferrovia.

Finalmente, acerca da ACV em ferrovia, é recorrente o uso de critérios empíricos, como a carga (tonelada) acumulada sobre a via, ou seja, adota-se os valores de volume de carga transportada (em toneladas por quilômetro útil – TKU) sobre a plataforma para realizar a predição do fim da vida útil dos elementos que compõem a via permanente ou mesmo para início das intervenções de manutenção (*Comité Européen de Normalisation*, 2005).

Portanto, esse critério se baseia no histórico de dados dos operadores do transporte ferroviário (Sgavioli, 2017). Como exemplo, e ainda tendo os estudos anteriores como referência, é possível citar: Bortoli *et al.*, (2020), que consideram os dados fornecidos por especialistas franceses; Rempelos *et al.*, (2020), ao utilizarem o tráfego da carga anual (em milhões de toneladas brutas equivalentes por ano) para estimar a degradação; Sgavioli (2017), no emprego do parâmetro de milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT); Krezo *et al.* (2016), ao apresentarem os valores paramétricos adotados com base em dois diferentes estudos, mas sem citar o critério para a degradação da via, e com a vida útil adotada para uma via lastreada de 120 anos. Assim sendo, é possível identificar uma lacuna que pode ser preenchida com aplicação de técnicas de engenharia para mensuração de estimativa de vida útil para ser aplicada na ACV.

## 2.2.1 Contextualização da temática com base em revisão bibliométrica

Assim como Da Fonseca-Soares *et al.* (2022), em seu trabalho acerca da análise bibliométrica para identificar as tendências e características das pesquisas a respeito do sistema ferroviário, o objetivo dessa revisão, com base em dados da bibliografia especializada, é contextualizar a temática proposta para o presente estudo diante dos recentes trabalhos publicados pela comunidade científica mundial.

Para o desenvolvimento da revisão, foram consultados os dados existentes na plataforma de estudos científicos da *Science Direct*, devido à abrangência e magnitude da fonte. Segundo consulta feita na plataforma durante a elaboração deste estudo (*Science Direct*, 2023), a base comportava 4.746 *journals* e 33.807 livros, o que se pode entender como uma fonte robusta de dados. Além disso, no estudo de Figueiredo *et al.* (2017), com relação à comparação entre diferentes plataformas de documentos técnicos, a base utilizada no presente estudo retornou à maior proporção de quantidade de artigos relevantes por artigos retornados. Portanto, entende-se que não houve necessidade de expandir a consulta para outras bases. Assim sendo, utilizando as palavras-chave relativas ao objeto do estudo, foram obtidos dados bibliométricos dos documentos referentes a artigos técnicos de pesquisa e revisão, sendo os mesmos consolidados e tratados nas ferramentas EndNote X7.8 e, posteriormente, empregados no Tableau® v.2022.4, e Vosviewer® 1.6.10 para a produção de elementos gráficos.

A Tabela 12 apresenta a estrutura dos critérios utilizada para a coleta dos dados e os resultados iniciais.

Tabela 12 Parâmetros da Revisão Bibliométrica

Base de dados	Etapa	Tema	Palavras-chave	Tipos de documentos	Período	Resultados
Science Direct	1	Life Cycle Railway Railroad Pavement Permanent way	" (life cycle assessment OR LCA OR life-cycle) AND (railway OR railroad) AND pavement AND permanent way"	Artigos Técnicos (Pesquisa e Revisão)	2013 - 2023	197
	2	Life Cycle Railway Railroad subgrade	" (life cycle assessment OR LCA OR life-cycle) AND (railway OR railroad) AND subgrade AND moisture content"			183
	3	Compilação das Etapas 01 e 02	Após remoção de duplicados			314

Vale reforçar que a pesquisa da etapa 1 teve como objetivo identificar os trabalhos de ACV que tratavam da infraestrutura ferroviária, especificamente no tocante à via permanente/pavimento. Adiante, a etapa 2 consistiu no esforço de aprofundar ainda mais a pesquisa, visando captar os estudos que tratavam da relação entre ACV e o subleito.

Finalmente, a etapa 3 realizou a compilação dos resultados obtidos nas etapas anteriores, com supressão das informações duplicadas. É interessante notar que, ao comparar o número de trabalhos após a agregação, foram encontrados cerca de 83% de trabalhos únicos, podendo inferir que, mesmo tratando de ACV em infraestrutura ferroviária, as pesquisas em pavimento/via permanente têm focos distintos/complementares à análise específica do subleito, tratando por exemplo, das camadas de lastro e sublastro.

No tocante à evolução histórica, apresentada na Figura 16, é clara a crescente produção de estudos sobre a temática da ACV aplicada à infraestrutura ferroviária, o que permite inferir que o esforço para a realização do presente trabalho está alinhado com as atuais demandas de pesquisas no contexto científico. É possível notar que, no ano de 2021, houve um crescimento relevante de publicações, tendo em vista a tendência da curva frente aos anos anteriores. Para justificar tal fato, considerando o estudo de Casey *et al.* (2021), cujo estudo mostrou aumento de 12,6% na produção de estudos acadêmicos de diferentes áreas durante a pandemia, é possível inferir que o efeito do *lockdown* possa ser atribuído como motivo para essa variação abrupta. De toda forma, mesmo com leve diminuição em 2022, a curva parece manter a tendência de crescimento anterior ao período da Covid-19.

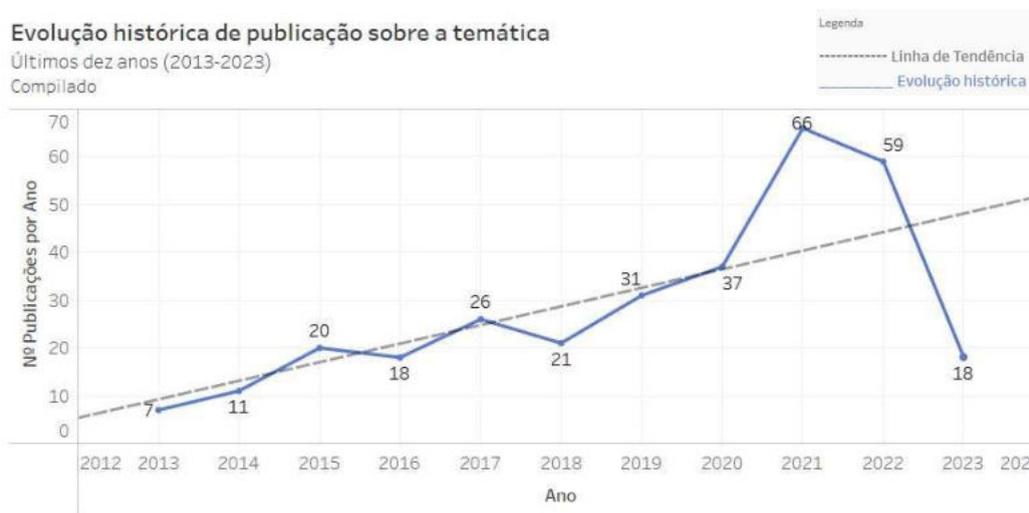


Figura 16 Evolução histórica das publicações dos últimos dez anos (2013 – 2023)

Com relação aos autores relevantes dos últimos dez anos, a Figura 17 apresenta os detalhes. Inicialmente, o grupo formado por Feipeng, Degou, Liangwei, Xin e Jin trata principalmente do uso de materiais asfálticos em infraestrutura ferroviária, aderente à proposta do estudo de caso deste trabalho. Já os estudos desenvolvidos em conjunto por Buddhima e Cholachat tratam das análises mecânicas do subleito, utilizando também

ensaios de laboratório para avaliar o pavimento ferroviário. Por fim, Jiankun e Tengfei tratam de assuntos acerca do impacto climático na via permanente, como o congelamento das camadas, assim como a análise da infraestrutura para veículos de alta velocidade.



Figura 17 Autores relevantes dos últimos dez anos (2013 – 2023)

A Figura 18 possui o intento de apresentar a relação entre os autores, mostrando outros nomes além dos mencionados anteriormente. Em resumo, é possível concluir que, pela inexistência de conexões entre os grupos, estes atuam de forma independente. Além disso, é possível ver que os trabalhos de Feipeng e seu grupo apresentam o maior número de documentos, assim como faz parte das publicações mais recentes. Fato interessante a ser destacado trata do grupo representado por Castro, cujos estudos foram realizados no Brasil e estão dentre os artigos publicados entre 2021 e 2022.

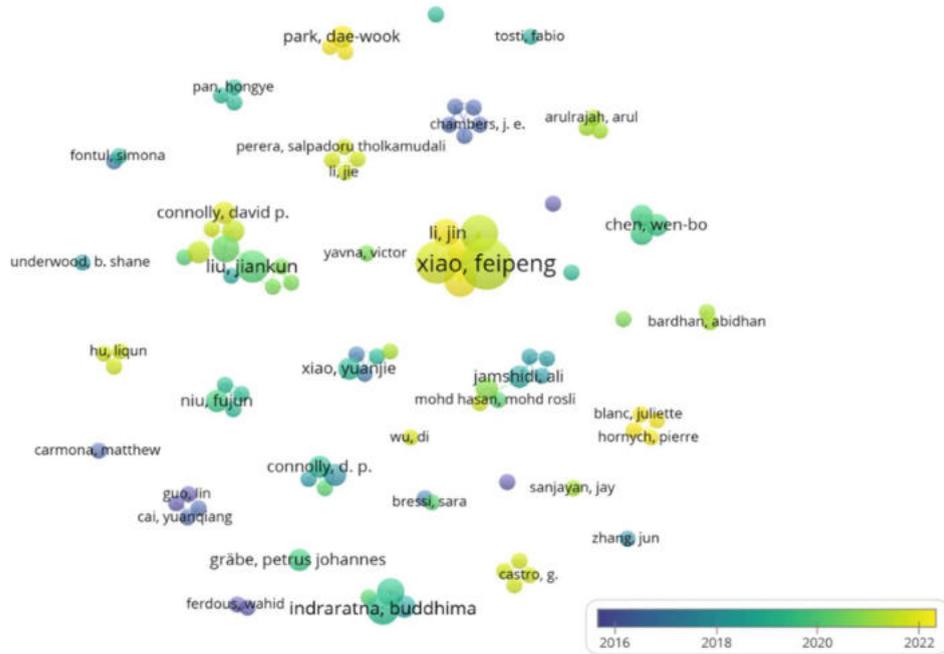


Figura 18 Rede de autores e sua relevância

Buscando analisar os temas abordados nos estudos encontrados, a Figura 19 evidencia as principais palavras-chave indicadas pelos autores. É possível ver que os estudos encontrados tratam da sustentabilidade aplicada à infraestrutura ferroviária, estando compatível com os princípios da ACV. Interessante destacar que os termos relevantes (tais como *soil stabilization*, *cyclic loading*, *resilient modulus*, *structural performance*, *fatigue*, *permanente strain*) estão também no presente estudo, o que leva a inferir o alinhamento deste com a prática da comunidade científica.

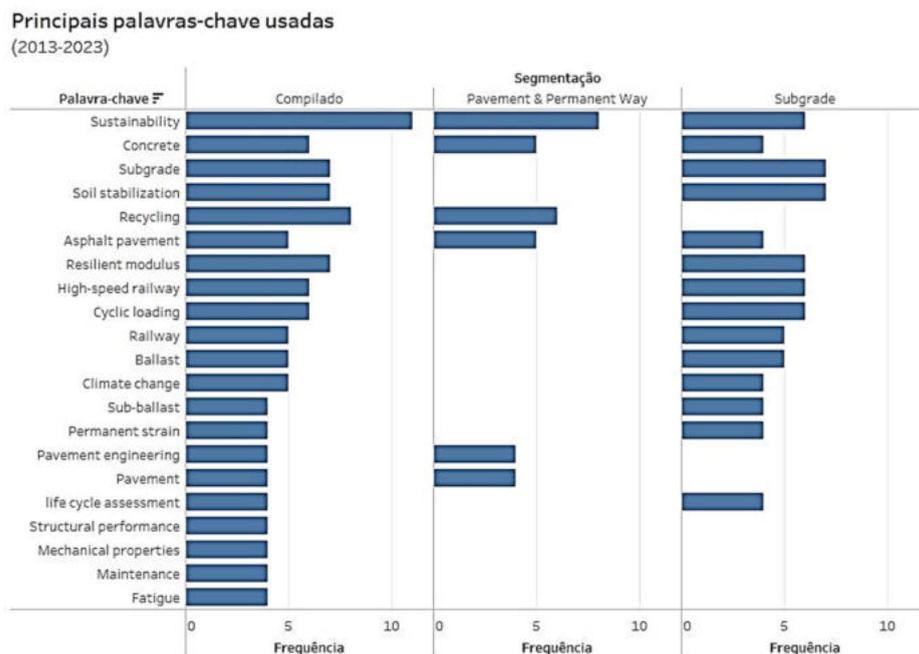


Figura 19 Principais palavras-chave dos estudos

Já a Figura 20 tem o objetivo de elucidar a relação entre os termos empregados nos estudos, mostrando quais são os mais recentes, assim como a sua frequência. De forma sucinta, é possível notar a existência de dois grandes polos: o da *sustentabilidade* e o do *subleito*. Com isso, é possível assumir certo distanciamento entre os trabalhos focados em avaliar a questão ambiental (como uso de materiais recicláveis) e aqueles desenvolvidos para analisar a estrutura do pavimento ferroviário com base no desempenho mecânico das camadas, ao tratar do módulo resiliente e da engenharia de pavimentos. Assim sendo, o presente estudo pode ser posicionado entre os dois polos, visto que trata tanto do foco de sustentabilidade, devido ao enfoque da ACV, com uso dos conhecimentos técnicos da engenharia, pela análise estrutural do pavimento. Por fim, a questão das mudanças climáticas parece ser apresentada como subgrupo do polo da fundação da via férrea, uma vez que está aderente aos estudos que vão de encontro à temática do congelamento das camadas do pavimento e as medidas de adaptação às mudanças do clima.

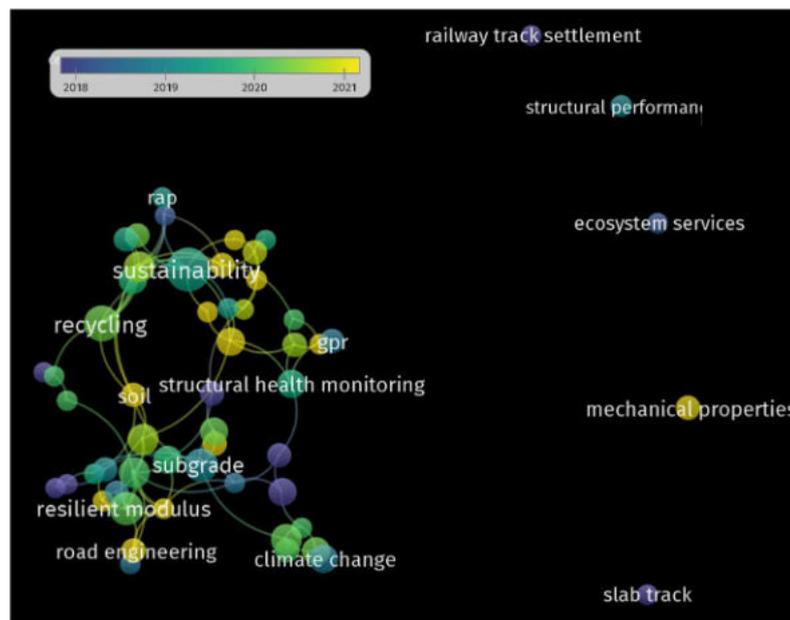


Figura 20 Rede de palavras-chave e sua relevância

Tratando da contribuição do presente estudo, é preciso lembrar que ela está calcada também no uso do desempenho mecânico da camada de subleito com o estudo de caso, utilizando a variação de materiais na camada de sublastro. Logo, ao realizar a consulta na base, onde os dados tratam de modo geral sobre o pavimento, ou seja, da Etapa 01, é possível ver que a quantidade de estudos acerca da fundação da via é 50% inferior quando comparada com aqueles que tratam do lastro, sendo que o mesmo ocorre

para o sublastro, conforme mostrado na Tabela 13. Além disso, mesmo utilizando três variações para ACV, durante a pesquisa em 197 registros não foram localizados documentos cujo título trouxesse a expressão explícita. Portanto, é plausível assumir que a escassez de estudos que tratam da fundação da via, aliada à interdisciplinaridade com a ACV, tende a evidenciar a contribuição desta pesquisa.

Tabela 13 Estudos sobre camadas específicas do pavimento da Etapa 01

Tema	Quantidade	Título do Artigo	Ano
Subgrade	4	Sustainable pavement drainage systems: Subgrade moisture	2023
		A bibliometric review on stability and reinforcement of special soil subgrade based on CiteSpace	2022
		An improved thermo-parameters method for dynamic shakedown analysis of railway subgrade	2022
		A novel evaluation method for accumulative plastic deformation of granular materials subjected to cyclic loading: Taking frozen subgrade soil as an example	2020
Sub-ballast	4	Evaluating environmental effects on the structural behavior of the railroad track subgrade considering different sub-ballast design solutions	2022
		Rail Trackbed and Performance Testing of Stabilised Sub-ballast in Normal and High-speed Environments	2017
		Real scale evaluation of vibration mitigation of sub-ballast layers with added tyre-derived aggregate	2018
		Advanced characterisation of bituminous sub-ballast for its application in railway tracks: The influence of temperature	2015
Ballast	8	Experimental and numerical testing of prototypical under ballast mats (UBMs) produced from deconstructed tires – The effect of mat thickness	2023
		Evaluating environmental effects on the structural behavior of the railroad track subgrade considering different sub-ballast design solutions	2022
		Use of steel slag as railway ballast: A review	2022
		Experimental investigation of a ballastless asphalt track mockup under vertical loads	2020
		Improved performance of ballasted tracks at transition zones: A review of experimental and modelling approaches	2019
		Photogrammetry for digital reconstruction of railway ballast particles – A cost-efficient method	2018
		Full - Scale Study of Stress-strain State of Ballastless Upper Structure Construction of Railway in Terms of Train Dynamic Load	2017
Review of the design and maintenance technologies used to decelerate the deterioration of ballasted railway tracks	2017		

Adiante, foram identificados os principais periódicos que tratam da temática, conforme a Figura 21. Como conclusão, é possível notar que os principais resultados se referem às revistas da área de Engenharia Civil (construção e transportes) e de Produção. Dessa forma, pode-se inferir o caráter interdisciplinar da temática, pois, mesmo a ACV tratando das emissões e impactos ambientais, a comunidade científica tem direcionado esforços para contextualizar a infraestrutura ferroviária no debate climático.

### Principais periódicos sobre a temática (2013-2023)

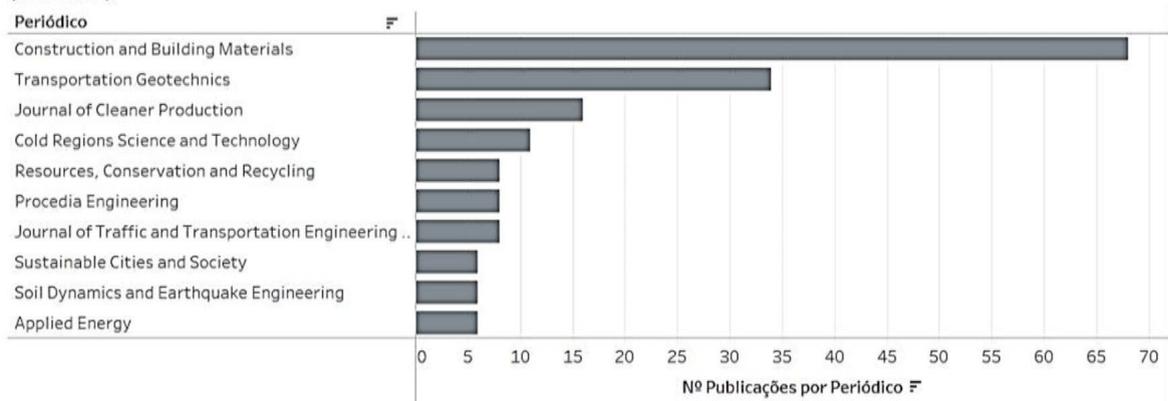


Figura 21 Principais periódicos dos últimos dez anos

Finalmente, é possível concluir que a temática se mostra relevante durante os últimos dez anos, com expressivo aumento no ano de 2021. Quanto às palavras-chave, é possível inferir que as pesquisas dos últimos anos têm tratado da análise da infraestrutura ferroviária com base nas propriedades mecânicas do pavimento, a partir do cálculo do módulo resiliente, e, no que diz respeito à ACV, têm também tratado da temática do impacto das mudanças climáticas. Em relação aos autores, o grupo de Feipeng tem desenvolvido trabalhos que tratam do uso de material asfáltico na via permanente, enquanto Indraratna tem se dedicado a realizar análises mecânicas do subleito, com emprego de ensaios de laboratório. Vale ressaltar que, no presente estudo foram usados os trabalhos de Indraratna como parâmetro para os *inputs* da modelagem estrutural, assim como as recentes publicações de Castro, as quais foram realizadas no Brasil, avaliando o desempenho mecânico dos solos da fundação do pavimento a partir da variação da umidade. Reforça-se que o ano de 2023 não aparece na Figura 18 e Figura 20, devido ao filtro aplicado para a quantidade de documentos.

### 2.3 Relevância do Subleito na infraestrutura Ferroviária

O esforço de avaliar a infraestrutura, a partir de critérios ambientais, reside no fato da necessidade de, por exemplo, mitigar os efeitos das mudanças climáticas tidas como realidade, conforme Landgraf & Horvath (2021). Do outro lado, permite também prospectar medidas de adaptação que possam ser empregadas diante dos eventos extremos, mas que também levem em consideração o desempenho ambiental das soluções de engenharia existentes atualmente, como sugerido por Blackwood *et al.* (2022). À vista

disso, sendo o subleito caracterizado como fundação da via permanente, é possível assumir que os esforços para analisar tal elemento possui significativa relevância.

Interessante mencionar que os trabalhos consultados durante a elaboração do estudo não mencionaram sob quais as condições de operação quanto à saturação do solo da infraestrutura ferroviária os estudos de ACV foram realizados. Assim sendo, uma avaliação do ciclo de vida dos elementos que compõem o pavimento de forma mais detalhada, com foco nas condições ideais e não-ideais quanto à saturação do subleito, se mostra como uma interessante contribuição para as pesquisas nessa área.

Tendo em mente a heterogeneidade dos elementos constituintes da via permanente, a decisão de escolha da análise da camada de fundação se deve à importância dessa camada explicitada pelos estudos consolidados na Mecânica dos Pavimentos e geotecnia, como em Indraratna & Ngo (2018), Li *et al.* (2015), Lichtberger (2005), Li & Selig (1998), Selig & Li (1994), Hanna & Meyerhof (1980) e Selig *et al.* (1979), nos quais são utilizados parâmetros técnicos para estimativa de vida útil desse elemento. Vale reforçar que o desempenho de cada elemento da infraestrutura possui sua contribuição para o bom funcionamento da operação. De toda forma, é preciso lembrar que, uma vez que o subleito entra em falha, as intervenções para a recuperação são igualmente custosas, tanto no que diz respeito às atividades de manutenção quanto à interrupção do tráfego (Lazorenko *et al.*, 2019).

Como apresentado por Abreu *et al.* (2021), a infraestrutura se mostra suscetível às mudanças climáticas. Logo, é possível mencionar que um dos principais problemas que causam falha na fundação da via trata justamente das condições de umidade distintas daquelas entendidas como ótimas (Yvna *et al.*, 2023). Com isso em vista, Usman *et al.* (2015) apresentam os mecanismos de falha desta camada do pavimento ferroviário conforme a Figura 22, sob a perspectiva das mudanças climáticas.

Ainda no que compete aos efeitos da variação da umidade no subleito, Castro *et al.* (2022), ao avaliar os efeitos ambientais no comportamento estrutural desta camada no Brasil, concluiu que a variação de sucção e o efeito de histerese na caracterização hidráulica deste elemento da via afetam significativamente o módulo de resiliência, assim como o desempenho da estrutura. Logo, é possível concluir que há perda de resistência da via e, conseqüente, redução da vida útil do pavimento em condições ambientais adversas no que diz respeito à elevada umidade, como precipitações intensas e/ou prolongadas, alinhado ao estudo de Costa *et al.* (2017).

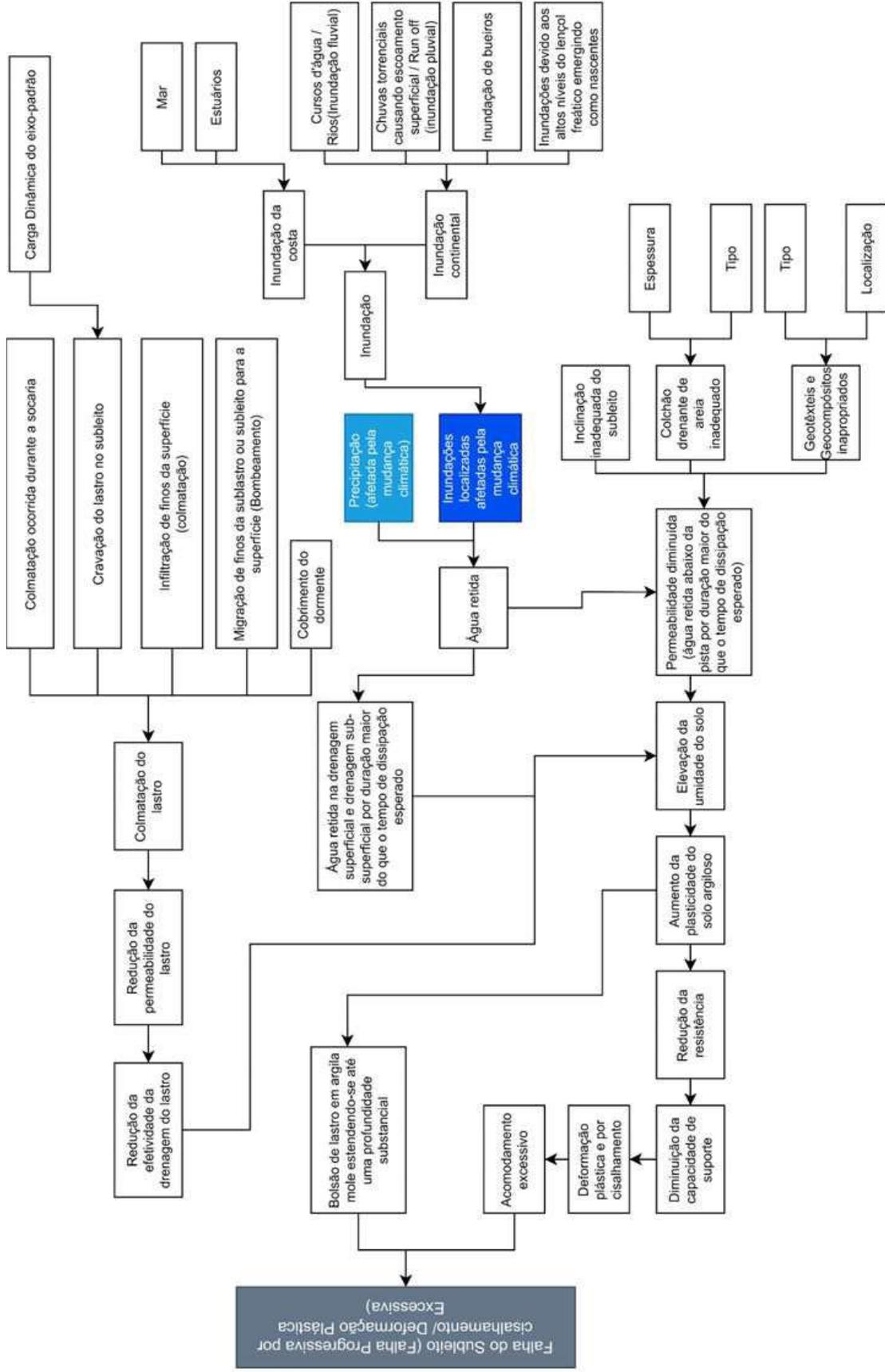


Figura 22: Falha do subleito devido às condições não-ideais de umidade. Adaptado de Usman *et al.* (2015)

No sentido de promover a resistência da fundação da ferrovia, Roshan *et al.* (2022), em seu trabalho de revisão sobre os métodos de melhoria para prevenir as falhas de aterro e subleito, consolidam diferentes soluções técnicas para elevar a estabilidade do aterro e do pavimento para garantir o contínuo uso da via permanente, conforme Figura 23, a seguir.

Por isso, Lazorenko *et al.* (2019) propõem soluções para promover a estabilidade da fundação da via permanente sob trens de carga. Considerando os três grandes grupos de soluções mencionados no estudo (Camadas protetivas, Melhoramento do solo e Soluções estruturais), temos como exemplos: o uso de camada de reforço pelo emprego de concreto betuminoso usinado a quente – CBUQ e as misturas de solo-cimento e solo-emulsão asfáltica. Ainda a respeito do uso de materiais asfálticos em ferrovia, Xiao *et al.* (2021) avaliaram seis soluções comumente adotadas e, como sugestão de estudos futuros, recomendam o uso da ACV para no momento de seleção das técnicas. Outras soluções também são destacadas por Li (2018), como o uso de injeção de *grout*.

Diante do exposto, estudos, como o desenvolvido por Ding *et al.* (2021), Thevakumar *et al.* (2021), Lazorenko *et al.* (2019) e D'Angelo *et al.* (2018), apresentam soluções de engenharia com foco no uso de materiais para estabilização ou mesmo melhoramento das camadas de compõem o pavimento ferroviário, cuja maioria se caracteriza pelo emprego de produtos “artificiais”, ou seja, possui extensa cadeia de manufatura/fabricação. Portanto, o julgamento dessas soluções, com foco na mitigação dos impactos, tendo como critério o comparativo entre o ganho de vida útil estimada em relação à quantidade de impactos produzidos, se mostra uma análise interessante.

Isto posto, assim como Chang & Kendall (2011), considerando a demanda por medidas de adaptação da melhoria do comportamento mecânico do pavimento ferroviário, frente aos impactos das mudanças climáticas na infraestrutura de transporte terrestre, alinhado às necessidades de mitigação do potencial de emissão de gás de efeito estufa, é imperativo que sejam empreendidos estudos direcionados neste sentido, mesmo que iniciais, para que, futuramente, eles lancem os fundamentos para se atingir uma Rede Zero de emissão (Karlsson *et al.*, 2020). Além disso, medidas de adaptação com soluções baseadas na natureza (SbN) para a infraestrutura ferroviária detalhadas por Blackwood *et al.* (2022) podem ser desenvolvidas a partir de reflexões do uso apropriado das técnicas e recursos como proposto no presente estudo.

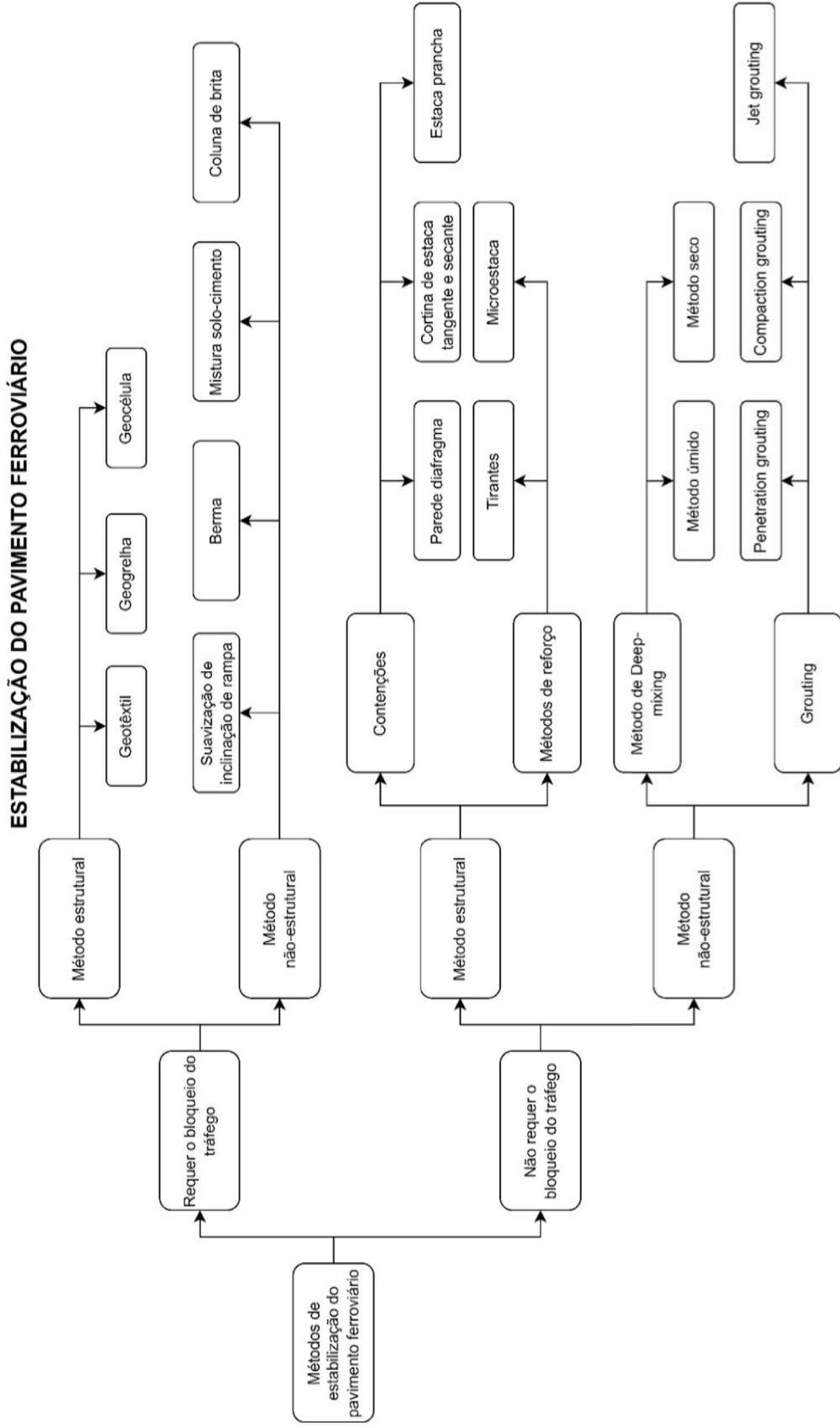


Figura 23 Métodos de estabilização do subleito. Adaptado de Roshan *et. al* (2022)

Portanto, a partir do exposto, é possível concluir que a análise estrutural da via permanente se mostra um desafio diante da diversidade de elementos, seja no que diz respeito à composição dos materiais tanto quanto pela sua geometria. Isto porque cada parte desempenha um papel fundamental na resistência e funcionamento adequado da via férrea. Os trilhos são responsáveis por guiar o material rodante de forma segura e eficiente, enquanto os dormentes fornecem suporte estrutural e absorvem as cargas aplicadas pelos veículos, transmitindo-as para as estruturas inferiores. Por conseguinte, o lastro, além de sua função drenante, atua como uma camada de suporte, distribuindo as cargas para evitar a deformação permanente e fadiga do subleito.

Diante disso, o presente procedimento metodológico optou por aplicar os conceitos e ferramentas da Mecânica dos Pavimentos, disciplina que trata a estrutura como um sistema de camada, sob carregamento repetido e de curta duração. Suas análises são realizadas com base em cálculo de tensões e de deformações em função do tráfego e clima, pela utilização de modelos numéricos, e parâmetros obtidos em ensaios dinâmicos, com natureza probabilística. Finalmente, os métodos utilizados estabelecem critérios de ruptura e modelos de previsão de desempenho, com os quais se entende ser possível estimar o fim da vida útil da estrutura, seja por análise de tensão ou deformação, os quais podem ser avaliados com auxílio de *software*.

Por fim, a seguir é apresentada a revisão acerca dos critérios de tensão e deformação, *softwares* de análise estrutural e métodos de dimensionamento para pavimento ferroviário.

### 2.3.1 Análise de tensão

Para a análise da estrutura do desempenho mecânico da via permanente, foram desenvolvidos diferentes modelos, dentre os quais pode-se citar:

- *Winkler (1867)*: considera a via como uma viga continuamente apoiada sobre base elástica, fazendo associação com sistema de molas;

- *Boussinesq (1885)*: admite um carregamento pontual para a distribuição da carga no subleito;

- *Zimmermann (1888)*: baseado no modelo de Winkler, trata dos esforços na via a partir da análise dos momentos fletores no trilho;

- *Talbot (AREA, 1918)*: admite a estrutura como uma viga sobre apoios elásticos discretos, equidistantes e não deslocáveis.

- *Love (1928)*: considera o carregamento a partir de uma área circular;

- *Newmark (1943)*: define que o carregamento na estrutura ocorre a partir de uma área retangular.

De toda forma, considerando os estudos tradicionalmente empregados e tendo por base o critério de tensões admissíveis no pavimento, é possível mencionar as correlações baseadas no desempenho mecânicos dos materiais, tanto pelo parâmetro de resistência (como o ISC - Índice de Suporte Califórnia, também conhecido como CBR – California Bearing Ratio) quanto de rigidez (Módulo de Resiliência), cujos alguns modelos são apresentados a seguir:

- *AREMA (Rosa & Ribeiro, 2016)* e *Yoder & Witczak (1975)* utilizam correlações com o CBR;

- *Heukelom & Klomp (1962)* se baseiam no módulo de resiliência para definir a tensão admissível no topo do subleito.

À vista disso, considerando o estudo de Heukelom & Klomp (1962), os modelos matemáticos de comportamento resiliente, aplicados para a caracterização mecânicas dos materiais, podem ser categorizados em função do estado de tensões, conforme apresentado na Tabela 14, a seguir.

Tabela 14 Modelos matemáticos de módulo resiliente - Adaptado Medina e Motta (2015)

Classe	Modelo	Material
0	$M_R = f(T \text{ } ^\circ\text{C})$	Betuminoso
1	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2}$	Arenoso (granular), em $f(\sigma_3)$
2	$M_R = k_2 + (k_1 - \sigma_d)k_3, \quad \sigma_d \leq k_1$ $M_R = k_2 + (\sigma_d - k_1)k_4, \quad \sigma_d \geq k_1$	Argiloso (coesivo)
3	$M_R = \text{constante}$	Elástico linear, Misturas asfálticas, solo cimentado de módulo elevado e solo siltooso de módulo baixo
4	$M_R = k_2 + (k_1 - \sigma_d)k_3 \sigma_3^{k_5}, \quad \sigma_d \leq k_1$ $M_R = k_2 + (\sigma_d - k_1)k_4 \sigma_3^{k_5}, \quad \sigma_d \geq k_1$	Combinado, solos lateríticos finos
5	$M_R = k_1 \theta^{k_2}, \quad \theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$	Granular, em $f(\theta)$
6	$M_R = k_1 \sigma_d^{k_2}$	Argiloso, dependente da tensão desvio
7	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$	Composto, todos os solos e britas (geral)

Diante do exposto, é possível notar que os modelos tratam da caracterização do comportamento mecânico para materiais geotécnicos (areia, argila, silte e britas), assim como materiais asfálticos. Os parâmetros  $k_1, k_2, k_3, k_4$  e  $k_5$  tratam de valores obtidos durante o ensaio triaxial em laboratório, enquanto  $\sigma_3$  representa a tensão confinante a que o corpo de prova está submetido, o  $\sigma_d$  corresponde à tensão desvio, obtida pela diferença entre a tensão principal vertical ( $\sigma_1$ ) e a tensão confinante.

### 2.3.2 Análise de deformação

O dimensionamento do pavimento ferroviário é, tradicionalmente, realizado mediante a verificação das tensões (atuantes e admissíveis), assim como a deflexão vertical elástica máxima para a via, definida em 6,35 mm pela AREMA (2006). Para esse fim, podem ser aplicados os métodos de Zimmermann (1988), com modificações de Timoshenko (1915), ou mesmo Talbot (1918). Nos estudos mais recentes, como demonstrado por Ramos (2020), a deformação permanente tem se mostrado uma robusta proposta de análise para analisar a integridade da via.

Diante disso, no que diz respeito à deformação permanente em solos, diversos são os modelos existentes para sua predição. Com isso em vista, Tutumluer (2013) consolida uma revisão robusta desenvolvida por especialistas ao longo dos anos. Todavia, tratando especificamente da fundação ferroviária, Chen *et al.* (2014) abordam o modelo para conformação cumulativa da fundação da via sob a condição de variação do nível d'água.

Também nesse sentido, Guimarães (2009) propõe um método mecanístico-empírico para a previsão de deformação permanente em solos tropicais, típicos no Brasil, para uso em estruturas de pavimento. Baseado no referido trabalho, Silva Filho (2018) desenvolveu sua contribuição para um método mecanístico-empírico de pavimentos ferroviários com foco nos solos tropicais.

Para a finalidade de determinar a deformação permanente admissível em um pavimento, um dos procedimentos mais comuns trata justamente de controlar a tensão vertical atuante no topo do subleito, como proposto por Heukelom & Klomp (1962). Neste trabalho, os autores, além de considerarem um valor médio de módulo resiliente, julgam que o modelo proposto concentra todo o problema da deformação permanente nesta camada do pavimento, excluindo a contribuição das demais camadas. De toda forma, apesar das limitações da equação proposta por esses autores, tal expressão tem se

mostrado largamente usada no Brasil por projetistas de pavimentos, quando adotada uma abordagem mecânica.

Desse modo, diante da variedade de modelos desenvolvidos para essa finalidade, os quais alguns também adotam a deformação do subleito como critério, a Tabela 15 apresentada as principais equações, usadas no desenvolvimento de ferramentas para a análise estrutural de pavimentos, como Ayma (Ayres,1998) e Sispav (Franco, 2007).

Como resultado, é possível notar que, mesmo utilizando diferentes parâmetros, o critério do número N, ou seja, da quantidade de aplicação de cargas, é comum a todos os modelos apresentados. Assim sendo, retomando o conceito na definição da unidade funcional em ACV para a aplicação do presente procedimento metodológico, é possível selecionar o modelo de deformação permanente mais apropriado para a execução do trabalho, visando a estimativa de vida útil, de modo também a permitir a comparação entre os trabalhos desenvolvidos baseados no procedimento proposto.

Tabela 15 Modelos de deformação permanente para solos

Classe	Modelo	Fonte e Critério de Análise
0	$\varepsilon_p = A \cdot N^B$	Monismith <i>et al.</i> (1975) deformação específica plástica
1	$\frac{\varepsilon_p(N)}{\varepsilon_r} = \mu \cdot N^{-a}$	Uzan (1982) deformação permanente total
2	$\delta_a(N) = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \cdot e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \cdot \varepsilon_v \cdot h$	Tseng & Lytton (1989) deslocamento permanente da camada
3	$\varepsilon_{1,p} = a + b \cdot \log(N)$	Barksdale (1972) deformação permanente axial acumulada
4	$\varepsilon_v = A \cdot N^B$ $N = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)^{k_2}$	Franco (2007) deformação vertical limite do topo do subleito
5	$\varepsilon_z = 28000 \cdot 10^{-6} N^{-0,25}$	Método Shell – Claessen <i>et al.</i> (1997) deformação elástica do subleito
6	$\varepsilon_{cv5} = 0,0085 N^{-0,14}$	Austroads (1992) deformação específica vertical de compressão no topo do subleito
7	$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} N^{\psi_4}$	Guimarães (2009) deformação permanente específica

### 2.3.3 *Software* para análise estrutural

Visando otimizar os cálculos para análise da estrutura do pavimento ferroviário, foram desenvolvidos diferentes *softwares* para a mensuração das tensões e deformações da via permanente, baseados no método de elementos finitos, como Illi-Track (Tayabji & Thompson, 1976), Geotrack (Li & Selig, 1998; Spada, 2003), Kentrack (Esmaeili, Amiri & Jadidi, 2012), Ansys (Prakoso, 2012) Abaqus (Xu *et al.*, 2018) e Ferrovia (Vizcarra, 2022). Tais sistemas permitem a análise do desempenho mecânico da via férrea.

Além disso, é possível mencionar o *software* de análise de tensão-deformação Sysstrain, o qual tem sido empregado no cenário brasileiro para elaboração de trabalhos voltados para análise do comportamento mecânico da plataforma ferroviária, tendo como principais resultados os intervalos de tensão e deformação calculados na modelagem (Silva Filho, Skwarok & Witiuk, 2022; Ribeiro & Silva, 2021; Rosa *et al.*, 2019).

Por fim, a Figura 24 apresenta um exemplo de visualização da modelagem de tensão do subleito (à esquerda) e outro da deformação da seção de todos os elementos que compõe a via permanente (à direita), ambos resultados obtidos durante as análises. No tocante aos dados utilizados como *input* no *software*, esses se encontram no Anexo II deste trabalho.

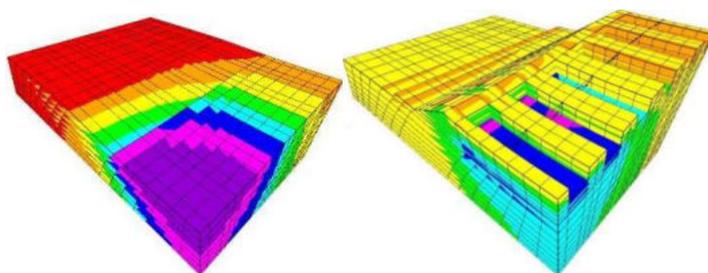


Figura 24: Exemplo de resultados da modelagem com *software* de elementos finitos.

### 2.3.4 Estimativa de vida útil, a partir do desempenho do subleito

O processo de dimensionamento do pavimento ferroviário, diante das práticas tradicionais, pode ser resumido nas seguintes etapas: *i.* estimativa de carga efetiva, com base na carga do eixo-padrão; *ii.* majoração carga estática, a partir de modelos matemáticos que utilizam, por exemplo, o diâmetro da roda e a velocidade do material

rodante, para estimativa da carga dinâmica; *iii.* validação do tipo de trilho inicialmente escolhido, com base na geometria e carga aplicada; *iv.* validação do dormente selecionado, com base no momento fletor; finalmente, *v.* especificação das camadas geotécnicas (lastro e sublastro), tendo por critérios a verificação do limite máximo da deflexão elástica e as tensões máximas admissíveis, no topo do sublastro e subleito.

Sobre esta última camada, de acordo com Lazorenko *et al.* (2019), a fundação da via permanente é o componente mais deformável e heterogêneo na infraestrutura ferroviária, cuja qualidade de seu estado é o principal fator para determinar a eficiência da via permanente. Essa camada também é a principal causa na degradação prematura dos componentes do pavimento ferroviário.

Diante disso, estimar o tempo no qual o pavimento ferroviário entrará em falha é um desafio que, mesmo com a existência de alguns modelos tradicionalmente conhecidos – como descrito por Selig & Waters (1994) e Hanna & Meyerhof (1980) –, diversos estudos ainda têm sido realizados com esse propósito. Alguns desses abordam a criação de modelos de predição da degradação da via permanente, tendo o subleito como um dos principais critérios de análise (Bilodeau & Gonzalez, 2021; Ding *et al.*, 2021; Singh, Indraratna & Nguyen, 2021; Guo & Zhai, 2018; Nielsen & Li, 2018). Por fim, tais modelos muitas vezes servem de *input* também no dimensionamento das espessuras e materiais que compõem a via permanente.

Portanto, considerando que o presente estudo fará uso dos conceitos da Mecânica dos Pavimentos para a análise estrutural, a seguir serão abordados os critérios de tensão e deformação tradicionalmente usados para a estimativa do desempenho da estrutura, a partir do comportamento da fundação. Com base nessa premissa, o estudo de Burrow *et al.* (2006) compara diferentes métodos de dimensionamento da fundação ferroviária, com base na falha do subleito causada pela repetição de cargas, como o método da International Union of Railway, British Rail Network Rail, West Japan Railways e Li *et al.* (1996). Além disso, o uso do número N, ou seja, do número de passagens do veículo sobre a via, como unidade funcional, critério no dimensionamento e análise de desempenho de pavimentos, permite a comparação entre os estudos desenvolvidos a partir do procedimento metodológico proposto.

Acerca deste último autor e tratando a respeito da estimativa de vida útil com uso da análise estrutural do pavimento ferroviário, é possível mencionar o método de dimensionamento apresentado em Li & Selig (1998) e Li *et al.* (2015), no qual são utilizados os critérios de prevenção de falha progressiva por cisalhamento e prevenção de

deformação plástica excessiva, para especificar as espessuras das camadas superiores, visando um bom desempenho da estrutura. Para isso, cada critério considera um tipo distinto de insumo: no primeiro critério, é usada a tensão desvio máxima admissível no subleito, tendo por base as características mecânicas desta camada, a área de influência, a carga por eixo e o número N, ou seja, a quantidade de passagens de um determinado eixo de trem-tipo sobre a via; já para o segundo critério, é utilizada a deformação plástica total admissível para a fundação da via, a qual utiliza os mesmos elementos citados para o primeiro critério, incluindo o fator de comprimento. Tendo por base o método citado, Indraratna & Ngo (2018) incluíram outros fatores no estudo do lastro ferroviário, como os efeitos de predição de quebra de lastro, quantificação de colmatação (*fouling*), uso de geogrelhas, entre outros.

Isto posto, em relação aos métodos de dimensionamento do pavimento ferroviário que utilizam a tensão admissível da fundação como entrada, Lichtberger (2005), em sua explanação acerca da especificação de espessuras das camadas da via permanente, aplicada também por Prakoso (2017), sugere o uso do modelo proposto por Heukelom & Klomp (1962), que trata do estado último limite por fadiga, em função da variação do número N e das propriedades mecânicas do solo. Da mesma forma, Esveld (2001) aplica o conceito expresso pelo modelo de Heukelom & Klomp (1962), como critério para dimensionamento do pavimento ferroviário. Ainda neste sentido, Prakoso (2017), em seu trabalho na direção do dimensionamento das espessuras das camadas da via permanente e interação dinâmica da plataforma com o subleito, também utiliza, dentre outros modelos, o critério de fadiga definido por Heukelom & Klomp (1962) em suas análises. Por fim, no Brasil, Stopatto (1987) e Spada (2003) apresentam o mesmo conceito.

O motivo do uso da camada de fundação da via férrea para a análise neste estudo reside no fato de que, conforme Selig e Li (1994) e Lazorenko *et. al* (2019), o fim da sua vida útil pode ser considerado o estágio final da plataforma ferroviária, visto que se faz necessária praticamente a reconstrução da via. Neste estudo, essa reconstrução foi considerada como demolição da estrutura seguida das atividades de manutenção, considerando o reaproveitamento de parte dos materiais, conforme os critérios de Caetano & Teixeira (2016). Para os demais elementos, como lastro, dormente e trilho, foram consideradas atividades de manutenção ao longo da vida útil de acordo com as premissas de Bortoli *et al.*, (2020) e Krezo *et al.* (2016).

Finalmente, no que concerne à aplicação das ferramentas de ACV em infraestrutura ferroviária, diversos estudos têm sido desenvolvidos, cuja aplicação foca

no transporte de passageiros, em sua maior parte por veículos de alta-velocidade (Landgraf & Horvath, 2021; Bortoli *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020), com destaque para o uso de via *ballastless*. Além disso, em relação aos que abordam a via permanente lastreada, como Caetano & Teixeira (2016) e Krezo *et al.* (2016), alguns tendem a focar em apenas um estágio do ciclo de vida – como a manutenção – enquanto outros, como Stripple & Uppenberg (2010), abordam todo o ciclo de vida. Já outros estudos como Bressi *et al.* (2018a) e Bressi *et al.* (2018b), quando também abordam o uso de materiais alternativos no sublastro, tratam da comparação de solução de engenharia com origem similar, como o uso de materiais asfálticos ou polímeros. Em estudos como Rempelos *et al.* (2020) e Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau (2009), o foco da variação é direcionado para elementos específicos, como os diferentes tipos de dormentes existentes. Além disso, os estudos analisados trataram do desempenho do pavimento ferroviário sem mencionar a condição de umidade do subleito a que a estrutura estava submetida. E, por fim, quanto à estimativa de vida útil, os estudos consultados utilizaram como referência dados empíricos de carga transportada ou informação disponível em literatura técnica especializada.

Portanto, a contribuição do presente estudo trata do emprego da ACV na infraestrutura de transporte ferroviário de carga com uso de via permanente lastreada, considerando uma seção de referência frente a três soluções de engenharia para melhoria do desempenho mecânico do pavimento, as quais são tradicionalmente utilizadas pela variação de materiais aplicados no sublastro, abrangendo duas condições distintas do subleito, e com a estimativa de vida útil realizada por critério técnico de engenharia civil, pela análise do desempenho mecanístico-empírico da estrutura.

#### **2.4 Estimativa de insumos em projetos de infraestrutura**

A fase de levantamento de insumos consiste na identificação dos recursos (materiais e equipamentos) necessários para a execução das atividades alinhadas com o sistema de produto adotado para a ACV. Tais *inputs* serão usados para selecionar os inventários de ciclo de vida na etapa seguinte.

Dessa forma, considerando o contexto da infraestrutura, o procedimento metodológico proposto utilizou as práticas para orçamentação de serviços de engenharia e execução de obras. Em resumo, o método de levantamento de custos consiste, assim como uma EAP- Estrutura Analítica de Projetos, na segregação do escopo principal em

partes menores, para que sejam analisadas separadamente e, posteriormente, agrupadas para comporem o objeto de estudo.

Dessarte, é estabelecida uma lista com os serviços principais, também chamada de Planilha de Quantidades, a qual contém as quantidades de cada item, estimadas com base em um projeto de engenharia. Em seguida, são atreladas composições de custos, que tratam de tabelas contendo índices padronizados de consumo de materiais, mão-de-obra e equipamentos, para que seja quantificada a demanda total desses insumos. Ela é obtida com base no produto resultante da quantidade de projeto e dos índices das composições.

No Brasil, para elaboração de custos de infraestrutura de transporte, tradicionalmente são empregadas bases de dados padronizadas e validadas nacionalmente por entidades públicas, como o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (Barros *et al.* 2018). De modo geral, tais documentos consistem em tabelas com índices de produtividade, consumo de materiais, horas de equipamentos e mão-de-obra, os quais são empregados para a execução dos serviços recorrentes de construção e manutenção.

Visto as dimensões continentais do país, diferentes bases de dados, com estrutura similar, foram desenvolvidas ao longo dos anos, em diferentes esferas, tanto pública quando privada. A seguir são apresentados alguns exemplos de bases de dados, segregados pela esfera de origem:

- *Federal*: SICRO – Sistema de Custos Referenciais de Obras, baseado no Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2023); SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (Caixa Econômica Federal, 2023);
- *Estadual*: Catálogos EMOP-RJ – Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro (EMOP-RJ, 2023); referencial de Preços Rodovias do DER-ES – Depto. Estradas Rodagem do Espírito Santo (DER-ES, 2023);
- *Municipal*: Caderno de Encargos da SUDECAP - Superintendência de Desenvolvimento da Capital, de Belo Horizonte - MG (Sudicap, 2023); tabela de Custos de infraestrutura urbana e Obras, da Prefeitura da Cidade de São Paulo - SP (Prefeitura São Paulo, 2023).

Além das bases públicas, é possível mencionar também algumas tabelas e índices de custos oferecidos por empresas privadas, como o TCPO – Tabela de Composições e Preços para Orçamentos (PINI Consultoria, 2023).

Adiante, considerando o contexto da engenharia ferroviária, a ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres, desde 2019, tem publicado os custos referenciais específicos para ferrovia, denominado SICFER – Sistema de Custos Referenciais

Ferrovários (ANTT, 2023). De todo modo, para o presente procedimento metodológico, foi utilizado o SICRO, escolha baseada na tradição e constante validação da base pelos profissionais da área de infraestrutura de transportes, desde 1946 (DNIT, 2017). Além da facilidade de manuseio das informações, o SICRO contém os tipos e produtividades dos equipamentos do Brasil, assim como as técnicas construtivas nacionais tradicionalmente usadas, o que confere maior aderência à unidade funcional proposta.

A seguir, a Figura 25 ilustra uma Composições de Preço Unitários - CPU, correspondente à agregação de insumos para a execução unitária de determinado serviço de engenharia.

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO				FIC		
Custo Unitário de Referência		jul/20	Produção da equipe		841,00 m <sup>2</sup>	
4011209 Regularização do subleito		Valores em reais (R\$)				
		Utilização		Custo Horário	Custo	
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Horário Total	
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>						
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,76	0,24		
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	1,00	0,00		
E9577	Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,52	0,48		
		Custo horário total de equipamentos				
<b>B - MÃO DE OBRA</b>						
P9824	Servente	1,00000	h			
				Custo horário total de mão de obra	-	
				Custo horário total de execução	-	
				Custo unitário de execução	-	
				Custo do FIC	0,0196	
				Custo do FIT	-	
<b>C - MATERIAL</b>						
		Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário	
		Custo unitário total de material				
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>						
		Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
		Custo total de atividades auxiliares				
		Subtotal				
<b>E - TEMPO FIXO</b>						
		Código	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário
		Custo unitário total de tempo fixo				
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>						
		Quantidade	Unidade	DMT	Custo Unitário	
				LN		
				RP		
				P		
				Custo unitário total de transporte	-	
				Custo unitário direto total	-	

Figura 25 Exemplo de Composição usada no estudo. Fonte: DNIT (2021)

A CPU contém os elementos que posteriormente serão utilizados como *input* no SimaPro, conforme a Figura 26. Além da facilidade de manuseio das informações, o SICRO contém os tipos e produtividades dos equipamentos do Brasil, assim como as técnicas construtivas nacionais tradicionalmente usadas, o que confere maior aderência à unidade funcional proposta.

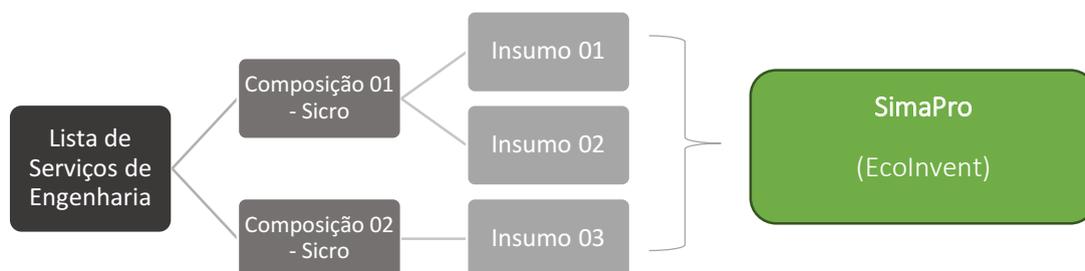


Figura 26 Processo de identificação de insumos no SICRO para *input* do SimaPro.

## 2.5 Conclusão

Este capítulo cumpriu seu objetivo ao trazer uma revisão bibliográfica no que diz respeito à conceituação do método da ACV e sua aplicação no transporte ferroviário, focado na infraestrutura, mais especificamente no pavimento da via férrea. Como conclusão, foi possível assumir que, apesar do esforço para a realização dos trabalhos no setor de ferrovias, elementos essenciais que compõem a ACV se mostram distintos do proposto no presente estudo, evidenciando a relevância deste.

Apesar do objetivo de identificar o impacto ambiental relativo aos diferentes estágios ser similar a outros trabalhos, vale ressaltar que, quanto ao escopo, a maior parte dos estudos encontrados tratam do transporte de passageiros nos países do hemisfério Norte, diferentemente do que está sendo proposto, ou seja, transporte ferroviário de carga no Brasil. De toda forma, o sistema de produto adotado na maior parte dos artigos, teses, dissertações e relatórios de consultoria pesquisados manteve a abrangência similar ao presente estudo, ou seja, desde a extração da matéria-prima, manufatura, construção e manutenção, considerando o transporte entre as etapas. Entretanto, reforça-se que o presente estudo não considera a fase de operação, admitido o uso do mesmo veículo nas seções avaliadas e, assim, tornando-o uma constante.

Tratando das fronteiras do sistema, é interessante reforçar que os produtos e processos avaliados durante os estudos consultados, acerca da ACV em infraestrutura ferroviária, compreenderam avaliações de modo macro de outros elementos além de apenas o pavimento, ou seja, foram contemplados a via permanente, túneis, pontes entre outros, assim como na avaliação de elementos específicos como dormentes, aparelho de mudança de via e tipos de superestrutura (*ballast* e *ballastless*). Sendo assim, o presente encontra embasamento para a unidade funcional selecionada para análise, cuja comparação poderá ocorrer pelos materiais constituintes, geometria, extensão e tempo de vida útil estimada da via. De todo modo, após a revisão da literatura, pode-se inferir que o presente estudo inova e amplia a comparabilidade ao empregar o critério operacional da quantidade de passagens de eixos sobre a via (número N) em ferrovia, possibilitando que estruturas projetadas com base na mecânica dos pavimentos possam ser avaliadas também a partir do seu desempenho ambiental baseado em ACV. Além disso, tratando do estudo de caso, foi possível localizar, em outros estudos, direta ou indiretamente, o emprego do indicador de desempenho usado para avaliar os cenários (tCO<sub>2</sub>/km.ano).

Quanto às demais etapas da ACV, o presente estudo se encontra em linha com grande parte dos trabalhos avaliados, principalmente aqueles que tratam do impacto

gerado a partir da emissão de gás carbono e demais gases que contribuem para o potencial de aquecimento global motivado pela evidência das mudanças climáticas. Além disso, empregou-se o método de avaliação de impacto baseado em processos, com uso dos métodos disponíveis no *software* SimaPro, para processar os dados e realizar as análises dos ICVs no EcoInvent 3.6, representado pelo método CML-IA, conforme recomendação de pesquisadores brasileiros, em seu trabalho de revisão de métodos de avaliação de impacto para este país. Entende-se que os modelos de impacto são baseados em diferentes critérios, tais como região de referência dos fatores de caracterização e substâncias abordadas, sendo interessante então o uso de um método global que possa permitir a redução das inconsistências pela falta de aderência à realidade do Brasil.

Desta maneira, foi possível evidenciar a contribuição deste estudo ao propor o cálculo da estimativa da vida útil do pavimento ferroviário a partir de análise mecanística-empírica da fundação ferroviária, advindos da Mecânica dos Pavimentos na Engenharia Civil, frente ao tradicional critério operacional de carga total transportada.

Adiante, para a estimativa de quantidades de serviços e seus respectivos insumos, o Brasil conta com bases de dados padronizadas nacionalmente, caracterizadas por catálogos elaborados por entidades das diferentes esferas, compreendendo as principais atividades de construção e manutenção para infraestrutura de transporte.

Finalmente, durante a etapa de revisão do presente estudo, foram identificados diversos elementos que podem ser aplicados ao procedimento metodológico proposto, tais como: *i.* a estruturação para ACV, como o proposto pelo *International Reference Life Cycle Data System (ILCD)*, o qual orienta quanto às diferentes possibilidades de aplicação do conhecimento dessa temática; *ii.* os modelos de tensão e deformação da camada de subleito; *iii.* *softwares* de análise estrutural; *iv.* métodos de dimensionamento e predição de vida útil do pavimento. Portanto, o capítulo 03, ao tratar especificamente do procedimento metodológico proposto, irá apresentar a seleção e o detalhamento dos elementos que se mostram mais aderente à finalidade da aplicação pretendida.

### **3 MÉTODO PARA SELEÇÃO DE PROJETOS DE PAVIMENTO FERROVIÁRIO, BASEADO NO DESEMPENHO AMBIENTAL**

O presente capítulo visa evidenciar o detalhamento do procedimento proposto. Dessarte, é preciso lembrar que o estudo consiste em empregar os conceitos de ACV para estruturar processos, com vistas a formar um *pipeline* replicável, focado em *ecodesign*, ou seja, baseado no desempenho ambiental, de soluções técnicas de engenharia para pavimento ferroviário, empregando análise estrutural, para avaliação a nível de projeto. Isto com base nos serviços de construção, manutenção e reconstrução tradicionalmente empregados no Brasil, cujos processos executivos e insumos se encontram devidamente padronizados e quantificados nos catálogos de custos reconhecidos nacionalmente. Assim como uso prioritário para inventários de ciclo de vida elaborados para o Brasil e método de avaliação mais aderente a essa região.

Para esse fim, os elementos que compõem esse trabalho foram segregados na caracterização dos parâmetros de ACV e estimativa de vida útil do subleito pelo desempenho mecânico. De toda forma, o processo metodológico desenvolvido como contribuição ao método de ACV aplicado à infraestrutura ferroviária, conforme Figura 27, pode ser sintetizado nas 05 (cinco) etapas seguintes: (1) definição de objetivo e escopo; (2) análise estrutural do pavimento ferroviário, considerando a variabilidade dos materiais, elemento estrutural avaliado e desempenho mecânico; (3) levantamento de insumos para os serviços de engenharia; (4) levantamento dos impactos ambientais, representado pela caracterização; (5) análise dos cenários escolhidos para avaliação.

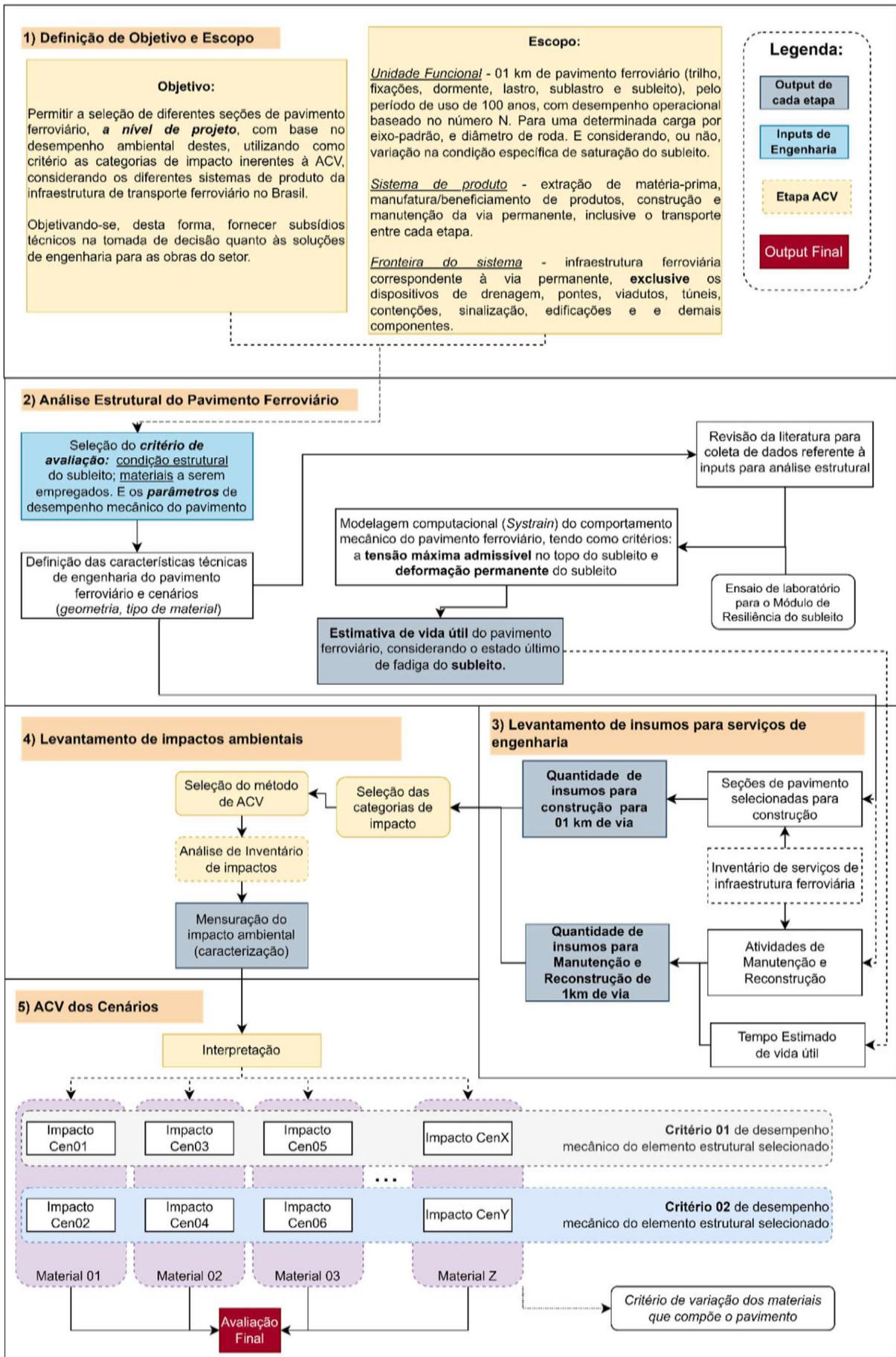


Figura 27 Fluxograma do procedimento metodológico proposto

### 3.1 Objetivo e Escopo

Para uma empresa privada ou entidade pública, cuja estratégia está alinhada com a meta de redução de seus impactos ambientais, a primeira etapa é rever todos os processos que intervêm no projeto de um produto, ou serviço, e encontrar soluções para reduzir os impactos no ciclo de vida. Várias estratégias podem ser adotadas. Tratando sobre a fase de escolha de materiais, é possível escolher aqueles com menor impacto; reduzir as quantidades dos mesmos; melhorar as técnicas de processo, transporte e fase de uso; e racionalizar o fim de vida dos produtos e serviços (Maris *et al.* 2014).

Em vista disso, o presente estudo tem como objetivo auxiliar na tomada de decisão quanto aos investimentos em infraestrutura ferroviária, no Brasil, a nível de projeto (não de rede), tendo como critério o desempenho quanto ao impacto ambiental gerado na construção, manutenção e reconstrução da via permanente, e cujo escopo trata, exclusivamente, do pavimento, com principal foco no comparativo de seções transversais. Ou seja, não serão tratados os demais elementos da infraestrutura, tais como pontes, estações, viadutos, túneis e dispositivos de drenagem e sinalização.

De toda forma, considerando o estudo de Sárik (2018), ao tratar das diferentes tipologias do pavimento, como lastreada e não-lastreada, é possível aplicar o estudo em ambos os casos, desde que alinhado à ferramenta de análise estrutural e seus *inputs*, assim como finalidade do transporte, no seu emprego para passageiros ou carga.

#### 3.1.1 Objetivo

Considerando as orientações de ILCD (2010), foram selecionados os elementos relevantes do referido guia de ACV para a estruturação dos processos empregados no estudo. Dessarte, para a definição do objetivo, foram definidos seis aspectos:

- i. Aplicações pretendidas dos entregáveis e resultados
- ii. Limitações devido à abrangência do método, premissas e impactos
- iii. Razões para a execução do estudo e contexto da decisão
- iv. Público-alvo dos entregáveis
- v. Estudos comparativos a serem divulgados para público
- iv. Responsável pelo estudo e outros atores influentes

No que diz respeito às aplicações, tendo por objetivo manter a precisão e dirimir possíveis ambiguidades, e ponderando sobre as modalidades mais frequentes, o presente estudo tem a finalidade de ser usado em processos detalhados de *Ecodesign*. Segundo

Cobut *et al.* (2015), o *Ecodesign*, também conhecido como *Design for Environment* (DfE), *Green Design* (GD) ou *Environmentally Conscious Design* (ECD), pode ser definido como a interpretação do desenvolvimento sustentável no contexto de processos industriais e *design* de produtos. Ou seja, leva-se em consideração os fatores ambientais no planejamento e desenvolvimento das soluções de engenharia na fase de projeto (especificação de materiais e dimensionamento). Além disso, de posse dos resultados, é possível realizar a identificação de Indicadores-Chave de Desempenho Ambientais (KEPI – *Key Environmental Performance Indicator*) para aplicação de *Ecodesign* nas soluções de projetos em estudo. Além disso, é possível que seja usado em processos de *Design for Recycling*, uma subdivisão do *Ecodesign*, com foco no reuso e reciclagem de materiais que estejam no fim de seu ciclo de vida, mas que possam compor o pavimento. Desta maneira, o objetivo está alinhado com os estudos da revisão bibliográfica, representado no primeiro e segundo tópico da Tabela 2, ou seja, *identificar o impacto ambiental da construção da infraestrutura ferroviária e identificar o impacto ambiental relativo aos diferentes estágios da infraestrutura de transporte*.

Finalmente, o entregável esperado trata da caracterização dos impactos ambientais, baseado nas categorias de impacto disponíveis no método de impacto escolhido.

Diante disso, entende-se que o objetivo presente está alinhado com as seguintes possibilidades, não-exaustivas, de avaliação na fase de definição de premissas do projeto de pavimento: *i.* variação dos tipos de materiais empregados; *ii.* variação da geometria da via, como a taxa de dormentação e espessuras de camadas; *iii.* variação nas condições estruturais do pavimento, como saturação do subleito; *iv.* uso de soluções de reforço, como geotêxtil e geossintéticos.

Quanto às limitações do método, é preciso destacar a falta de um método de ACV exclusivo para o Brasil. Consequentemente, para o presente estudo, foi utilizada uma solução aplicável a nível global, o CML-IA. Aliado a esse fato, a disponibilidade deste método de modo nativo no *software* Simapro e seu acesso viável foram fatores que também contribuíram para a escolha. Tal decisão também foi tomada com a intenção de manter os resultados comparáveis com a maioria dos estudos disponíveis na literatura, como apresenta o estudo de revisão de Olugbenga *et al.* (2019), que conclui que predomina entre os estudos de ACV aqueles que utilizam métodos baseados em processos, conforme detalhado no tópico 2.1.3 da revisão bibliográfica.

Tratando das razões para sua realização, o presente estudo visa suportar as decisões tanto do Poder Público quanto de entidades privadas, as quais são responsáveis pelos investimentos em implantação, manutenção e expansão da malha ferroviária nacional. Isto no sentido de orientar a escolha de soluções de projeto de engenharia, especificamente de pavimentação, mais aderentes às medidas de mitigação dos impactos ambientais, no setor de infraestrutura de transportes. Já tratando do contexto de decisão, o procedimento metodológico visa suportar situações de nível micro de decisão (operacional), ou seja, no momento de concepção/desenvolvimento das soluções de engenharia a serem empregadas, sendo o projeto executado como consequência baseada pelo estudo de ACV. Assim como instituições acadêmicas, no desenvolvimento de pesquisas sobre a temática.

Assim, objetiva-se que o presente estudo seja aplicado em *Ecodesign, design-for-recycling* ou desenvolvimento de estudo de pegada de carbono. De toda forma, é possível que os resultados, obtidos durante as análises realizadas com o procedimento metodológico proposto, possam embasar decisões de nível médio (tático) ou macro (estratégico). Além disso, como tratado durante a fase de revisão bibliográfica, considerando o exposto na Tabela 2, é possível assumir que seja viável o uso das informações, geradas a partir do presente procedimento metodológico, para entender não apenas o impacto ambiental da construção da infraestrutura ferroviária e seus demais estágios, mas também a comparação com outros modos de transporte, assim como compreender o período de *payback* ambiental.

Referente ao público-alvo, além daqueles mencionados no parágrafo anterior, o procedimento metodológico aqui proposto pode ser aplicado por entidades acadêmicas para o desenvolvimento de pesquisas na área, assim como potenciais investidores no setor de infraestrutura, que utilizam, por exemplo, títulos verdes para estruturar seus negócios.

Adiante, no tocante à comparação a ser divulgada para o público, o presente método tem como foco permitir o julgamento entre sistemas similares (seções de pavimento ferroviário) com padronização de unidade funcional e demais elementos presentes na ISO 14040. Entende-se que, a menos que não sejam desenvolvidas para políticas públicas ou fins acadêmicos, suas aplicações não têm motivos para se tornarem públicas. Ou seja, a decisão de publicidade fica a cargo do executor da análise.

Finalmente, quanto aos interesses da instituição executora, o presente estudo é realizado por uma entidade acadêmica, cuja finalidade é produzir conhecimento técnico

para a sociedade, a qual conta com recursos públicos federais brasileiros para sua manutenção.

### 3.1.2 Escopo

O escopo do procedimento metodológico se encontra alinhado com o objetivo, visto que seu objeto trata de atividades ligadas à construção e manutenção dos componentes do pavimento ferroviário, à nível de projeto, para tomada de decisão operacional no Brasil, tanto para o transporte de passageiros quanto de carga. De toda forma, entende-se ser possível adaptar o presente estudo para aplicação na fase de operação. Também com base em ILCD (2010), foram levados em conta diferentes critérios para definir o escopo, os quais são descritos a seguir.

Quanto aos tipos de entregáveis, o presente procedimento tem como escopo a estruturação de processos que permitam a realização de estudo de Avaliação do Ciclo de Vida comparativo, em que a superioridade, inferioridade ou igualdade de quaisquer alternativas comparadas são explicitamente concluídas.

É relevante reforçar que o referido estudo comparativo de ACV de que trata o escopo tem como objeto de análise o pavimento ferroviário e seus componentes, no contexto brasileiro do transporte de cargas, e podendo ser aplicado a passageiros. Logo, excluíram-se os demais elementos da infraestrutura, tais como pontes, viadutos, dispositivos de drenagem, sinalização, ou quaisquer elementos que não a via permanente.

Isto posto, o escopo do presente estudo compreende as áreas de melhoria e comparativo de produtos, assim como comunicação e suporte de decisão estratégica, com aplicações de ACV alinhadas a diferentes demandas de negócio e pesquisa. Por fim, a Tabela 16 explicita o tipo de entregável em função da área de aplicação para o procedimento metodológico proposto.

Tabela 16 Tipos de estudos de ACV para o procedimento proposto (adaptado ILCD, 2010)

Área de aplicação	Aplicações de ACV	Tipo de entregável	Situação de Objetivo aplicável (Nível de Decisão)
<b>Melhoria de produto</b>	Ecodesign detalhado / Design-for-recycling		
<b>Comparativo de produtos</b>	Comparação de bens ou serviços	Estudo comparativo de ACV	Micro
<b>Comunicação</b>	Desenvolvimento de pegada de carbono, Consumo primário de energia ou indicador similar		
<b>Suporte decisão estratégica</b>	Previsão e análise do impacto ambiental de tecnologias difundidas, estratégias de matérias-primas etc. e desenvolvimento de políticas relacionadas		Médio/macro

Finalmente, a seguir, serão detalhadas a função e unidade funcional, assim como o sistema de produto e fronteira de sistema.

### 3.1.3 Função e Unidade Funcional

Considerando que o objeto do presente estudo versa acerca do pavimento ferroviário para transporte no Brasil, a função deste trata de suportar as cargas e guiar o material rodante viabilizando o escoamento da produção e deslocamento de pessoas. Tal estrutura pode ser avaliada por seu desempenho mecânico, diante de diferentes parâmetros, tais como os tipos de materiais constituintes e dos efeitos relacionados ao clima, denominados como *fatores ambientais* por Motta (1991), exemplificados pela condição de saturação da fundação. Isto com base na aplicação dos conhecimentos da Mecânica de Pavimentos, provenientes da Engenharia Civil.

Dessa forma, a unidade funcional utilizada reflete o critério operacional da via, baseado no método mecanístico-empírico, para estimar a vida útil da estrutura, sendo representado pelo número de aplicação de cargas sobre o pavimento, conhecido como Número N, pelo período de 100 anos, para 01 (um) quilômetro de via. Logo, a partir dessas premissas, entende-se que seja possível padronizar a medida de desempenho do objeto de estudo, tornando viável a comparabilidade dos resultados de ACV.

De toda forma, aliado ao critério citado anteriormente, é preciso que, ao se aplicar o método proposto, sejam explicitados pelo avaliador na Unidade Funcional o eixo-padrão adotado (carga por eixo) e o diâmetro da roda do material rodante, assim como as características da seção geométrica, os materiais constituintes do pavimento e se há especificidades quanto ao critério mecânico em avaliação, como, por exemplo, na condição de saturação do solo de fundação.

Finalmente, diante da vasta gama de possibilidades de aplicação, a Figura 28 consolida, de modo não exaustivo, os principais elementos a serem empregados no procedimento metodológico proposto. Como ponto de atenção, destaca-se a característica do uso ou não lastro, como discutido por Sárik (2018), visto que o uso dos materiais é claramente distinto, com o emprego predominante de aço e concreto nas soluções sem lastro (Matias & Ferreira, 2020).

**ESTRUTURA, NÃO EXAUSTIVA, DOS ELEMENTOS POSSÍVEIS PARA APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO METODOLÓGICO PROPOSTO**

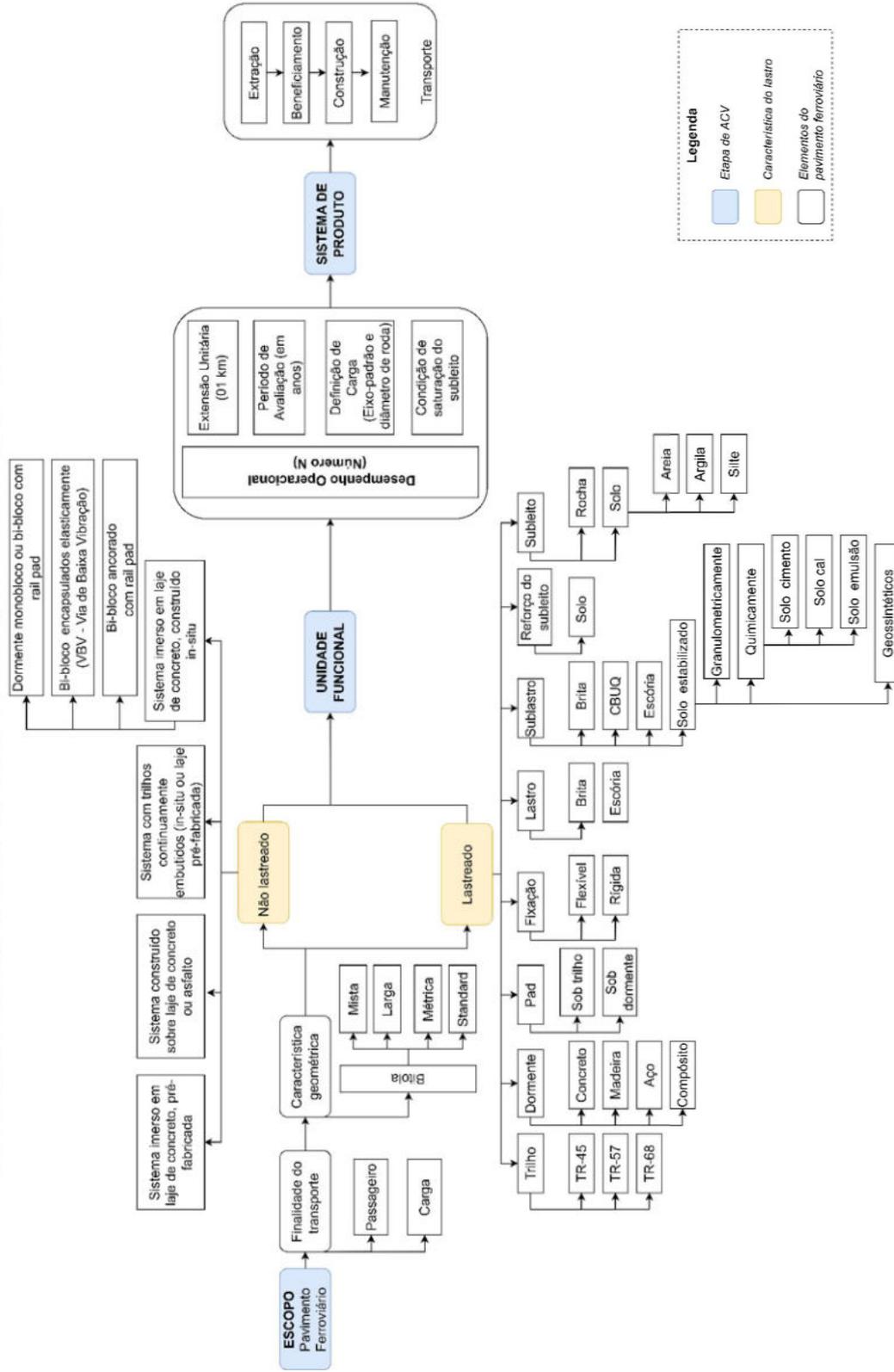


Figura 28 Principais elementos ferroviários para ACV da via permanente

### 3.1.4 Sistema de Produto e Fronteira de Sistema

No tocante ao sistema de produto, para o procedimento metodológico em proposição, é possível a aplicação dos diferentes estágios da ACV, ou seja, desde a extração e processamento da matéria-prima, como a fabricação e transporte dos componentes, passando pela construção da via permanente, assim como a operação e manutenção e, por fim, o reuso e descarte.

Idealmente, considerando o exposto por ILCD (2010), o sistema de produto utilizado durante uma ACV deve abordar todos os estágios (berço ao túmulo) de todos os processos utilizados durante a análise do produto em questão. Entretanto, é preciso lembrar que diversas são as limitações durante a execução do estudo, seja pela compatibilização de processos e produtos com inventários disponíveis, assim como inventários com distintas fronteiras de sistema. Portanto, durante a aplicação do procedimento proposto, é interessante que sejam explicitadas as premissas adotadas, visando manter a clareza para comparação com estudos similares.

Todavia, visando o alinhamento com o objetivo pretendido, o foco será dado para as fases de construção e manutenção, agregando-se aquelas que são necessárias para a análise, tais como extração, beneficiamento e transporte. Dessa forma, visando manter o escopo suscinto para aplicação, a etapa do fim da vida útil da estrutura não foi avaliada.

Adiante, considerando os aspectos acerca das perspectivas primárias e secundárias, na prática, ainda conforme ILCD (2010), todos os fluxos de produtos, de resíduos e de elementares sem referência não relevantes podem ser ignorados sem prejuízo das análises, sendo chamados “*cut-off*”. Essa premissa fica a cargo do executor do estudo na seleção dos inventários.

Em vista disso, no que diz respeito ao sistema de produtos, uma vez que o objetivo está alinhado com a execução de estudos comparativos, é relevante que sejam empregados inventários iguais ou similares durante a análise. Além disso, quando possível, sejam explicitados quais os inventários foram utilizados, a fim de garantir a comparabilidade com outros trabalhos.

No que concerne à fronteira de sistema, a escolha foi baseada na unidade funcional do sistema. Portanto, por essa premissa, definiu-se a fronteira de sistema orientada ao objetivo, uma vez que essa estratégia se encontra alinhada ao emprego de avaliações comparativas, ou seja, permitir avaliar 01 quilômetro de via de duas, ou mais, seções distintas de pavimento ferroviário. Logo, excluíram-se os dispositivos de

drenagem, sinalização, pontes, túneis, edificações, catenárias e quaisquer outros elementos que não constituam o pavimento. Além disso, considerando a relevância do transporte na ACV, para elaboração dos estudos deve ser explicitada uma distância média de transporte (DMT) entre a obra e o local de recebimento dos materiais.

## **3.2 Análise de Inventário e Método de Avaliação**

### **3.2.1 Análise de Inventário**

Considerando o objetivo e escopo definidos, o foco da análise dos ICV's neste estudo será dado na tomada de decisão para a escolha dos inventários existentes na base de dados nativa (*EcoInvent 3.6*) do *software* de ACV escolhido (Simapro 9.3), os quais representarão os insumos e fluxos empregados no pavimento ferroviário. Ou seja, trata da etapa de realizar o “de-para” entre os *outputs* da etapa de mensuração da quantidade de matéria-prima e horas de equipamento (consumo de diesel) e a estimativa de impacto (caracterização).

Portanto, para o presente trabalho, são priorizados os inventários desenvolvidos para o Brasil e, na ausência destes, aqueles que consideram a abrangência global e, por último, os desenvolvidos para o resto do mundo. Além disso, quanto ao tipo de mercado, recomenda-se o uso do “*market*” a fim de evidenciar a aplicação dos materiais na obra, ou seja, compreendendo tanto a produção do material (e os processos desde sua extração) como também o transporte até a frente de serviço. Por fim, caso a aplicação do procedimento metodológico não compreenda a análise do fim da vida útil, é interessante a aplicação do modelo de sistema *cut-off*.

### **3.2.2. Método de Avaliação**

O estudo de Ugaya *et al.* (2019), sobre a recomendação de métodos de ACV para o contexto brasileiro, traz algumas sugestões conforme detalhado na Tabela 6. Todavia, a maioria desses modelos não é encontrada na base de dados do *software* sugerido para a aplicação do procedimento metodológico proposto. Além disso, é possível notar a ausência das categorias de impacto comumente empregadas, como mudança climática e potencial de aquecimento global. Sendo assim, para o desenvolvimento do presente estudo, foi utilizado o método CML, de abrangência global, presente na base de dados do *software* de ACV sugerido, e devido ao fato da ausência de um método de ACV para a realidade nacional que permita a análise das principais categorias de impacto.

Neste ponto, torna-se factível estimar os impactos ambientais realizando a associação entre as categorias de impacto e os ICV's. Esse processo ocorre na etapa a seguir da ACV, conhecida como Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV).

### **3.3 Avaliação de impactos do Ciclo de Vida**

Para o presente estudo, baseado na ABNT (2009), foram empregados os elementos mandatórios, como a seleção de categorias de impacto, escolha do método de avaliação e caracterização, conforme seção 2.1.5.

Logo, tendo por norte o objetivo de aplicar a ACV na infraestrutura de transporte brasileira, e diante das restrições já explicitadas anteriormente, a seleção de categoria de impacto se mostrou vinculada ao uso dos métodos de impacto identificado na seção 2.1.3, e detalhadas na Tabela 5, cuja caracterização se faz pelo uso dos inventários presentes na base de dados do *software* indicado e, como *input*, os insumos gerados na quantificação dos serviços de engenharia.

Finalmente, a normalização, agrupamento e ponderação não serão abordados neste trabalho, compondo o escopo para trabalhos futuros.

### **3.4 Interpretação**

Para o procedimento metodológico proposto, a estruturação da interpretação foi baseada nos trabalhos de Bortoli *et. al* (2020) e Stripple & Uppenberg (2010), nos quais é possível segregar a análise em diferentes níveis: mais granular, como a partir dos materiais que constituem o pavimento (concreto, aço, asfalto), a energia consumida pelos equipamentos (combustível); ou nível intermediário, como o elemento estrutural (camadas do pavimento). Por fim, a análise macro, com base em diferentes seções de via permanente, como Landgraf & Horvath (2021).

Para tanto, sugere-se o uso de elementos visuais e tabelas que permitam identificar, baseados em Pareto, as principais contribuições para determinada categoria de impacto e seu fluxo originário, como em Pons *et al.* (2020), como histogramas e gráficos de barra.

Além disso, baseado na premissa de que o escopo do estudo compreende a análise da via permanente, é plausível empregar as ferramentas da gerência de pavimentos. Logo, entende-se que seja possível o uso de gráficos de linhas, como o estudo de Vale & Simões

(2022), para comparar diferentes frequências de manutenção e reconstrução durante o ciclo de vida da estrutura.

Ainda nesta etapa, para a abordagem das incertezas, para o presente estudo, recomenda-se a análise estocástica, com base nos critérios tradicionais de estatística, tais como média, coeficiente de variação e tipo de distribuição dos dados. Para tanto, faz-se o uso da ferramenta nativa do Simapro, baseada na simulação de Monte-Carlo, para permitir o cálculo que visa quantificar os parâmetros em estudo.

Finalmente, é nessa etapa em que são feitas as conclusões, explicitação das limitações e empreendidas as recomendações para o público-alvo que irá consumir os resultados das análises, bem como a avaliação das incertezas. Para tanto, estudos comparativos, com sistemas de produtos similares, podem auxiliar na análise e tomada de decisão.

### **3.5 Análise estrutural do pavimento ferroviário**

Como um dos principais desafios na ACV, é possível citar a estimativa do fim da vida útil do elemento analisado, como no presente estudo, do pavimento ferroviário. Composto por materiais de origem heterogênea, como aço, madeira e rocha, diferentes modelos foram desenvolvidos para prever a degradação dessa estrutura como demonstrado por Elkhoury *et al.* (2018), considerando métodos desde mecanístico, mecanístico-empírico, até o uso de inteligência artificial. Finalmente, como referência para o procedimento metodológico desenvolvido neste estudo, foi considerado o grupo dos modelos mecanísticos-empíricos, base da Mecânica dos Pavimentos (Medina & Motta, 2015), a partir do desempenho mecânico do subleito.

Finalmente, diante da revisão dos parâmetros destacados no tópico 2.3, neste tópico, serão apresentados os critérios selecionados para serem aplicados no presente procedimento metodológico.

#### **3.2.1 Análise de tensão**

Tendo em vista as limitações dos ensaios estáticos convencionais, como o CBR, quando comparado com a característica do carregamento repetido e da análise probabilística mais robusta proporcionada pelos métodos mecanístico e mecanístico-empírico, o presente procedimento metodológico optou por empregar o modelo de Heukelom & Klomp (1962). Isto porque este utiliza o módulo resiliente, obtido em ensaio

de laboratório, para a análise do desempenho mecânico do pavimento ferroviário, pelo critério de tensão.

De toda forma, é possível assumir que a aplicação dos modelos é passível de restrição diante do uso dessas equações no *software* de análise estrutural. Logo, conforme apresentado no tópico 2.3.1, para o presente estudo, foram empregados os modelos das classes 1, 6 e 7 para os materiais geotécnicos (argiloso, arenoso e composto) e classe 3 (elástico linear) para o material asfáltico. A respeito dos demais elementos, como trilho e dormente, foi empregado o modelo elástico linear do módulo de elasticidade ( $E = \sigma/\varepsilon$ , tensão sobre deformação) como dado de entrada no *software* de análise.

### 3.2.2 Análise de deformação

Considerando os diferentes modelos apresentados na seção 2.3.2, e visando priorizar os elementos que representam a realidade brasileira, o presente estudo utilizou o modelo de deformação permanente de Guimarães (2009). Além disso, a disponibilidade de dados no referido estudo, e a possibilidade do uso dos resultados obtidos na modelagem estrutural também contribuíram para a escolha.

### 3.2.3 *Software* para análise estrutural

Para o presente estudo, foi escolhido o Systrain v. 1.84. A decisão de uso da ferramenta ocorreu devido à disponibilidade dos dados na literatura e resultados de ensaios de laboratório realizados que são *inputs* diretos do *software*, além do acesso gratuito fornecido pelo desenvolvedor, praticidade no uso e interface amigável. Outro fator importante é a coerência dos resultados obtidos quando comparados com a literatura, como os valores de tensão-desvio no topo do subleito, similares aos de Indraratna & Ngo (2018).

Todavia, é preciso mencionar que, como limitação, a modelagem admitiu como uniforme as condições do pavimento durante toda a vida de serviço avaliada, o que se sabe não representa de forma fidedigna a realidade. Isto porque existem variações desde as condições do clima (Castro *et al.*, 2022), da integridade dos grãos do lastro, rigidez da via, assim como da geometria (Shi *et al.*, 2023). Outro ponto importante não representado trata do efeito da colmatação do lastro, como apresentado por Kumara & Hayano (2016).

### 3.2.4 Estimativa de vida útil

Para a análise estrutural, o presente método teve como fundamentação a proposta de dimensionamento de lastro desenvolvida por Selig e Li (1994) e Li *et al.* (2015), com o emprego de modelagem computacional multicamada. Sendo também aplicado por Indraratna & Ngo (2018) no desenvolvimento de seu estudo.

Em resumo, a proposta de dimensionamento de Li *et al.* (2015) considera os seguintes parâmetros: (1) *para o tráfego*, considera a aplicação de cargas com múltiplas rodas e o peso bruto total; (2) *para as propriedades do subleito*, leva em consideração o módulo resiliente e a tensão de compressão; (3) *sobre as propriedades do lastro*, considera o módulo resiliente; (4) *já para o critério de dimensionamento*, o método aborda a falha por cisalhamento progressiva e a deformação cumulativa; e, por fim, (5) *para o modelo de tensão*, utiliza o método Li-Selig (1998).

Finalizando é possível notar que o método de Li *et al.* (2015), utilizando as variáveis de tráfego, espessura do lastro e qualidade do subleito, visa definir uma dimensão ideal de lastro para que se proteja a fundação da via, pela atenuação das tensões, a fim de que esta não atinja o estado último de fadiga, conforme Figura 29.

Dentre os parâmetros empregados no trabalho mencionado, a variável “tempo” pode ser associada com o *input* de número equivalente (N) de eixos-padrão que passam sobre a via permanente.

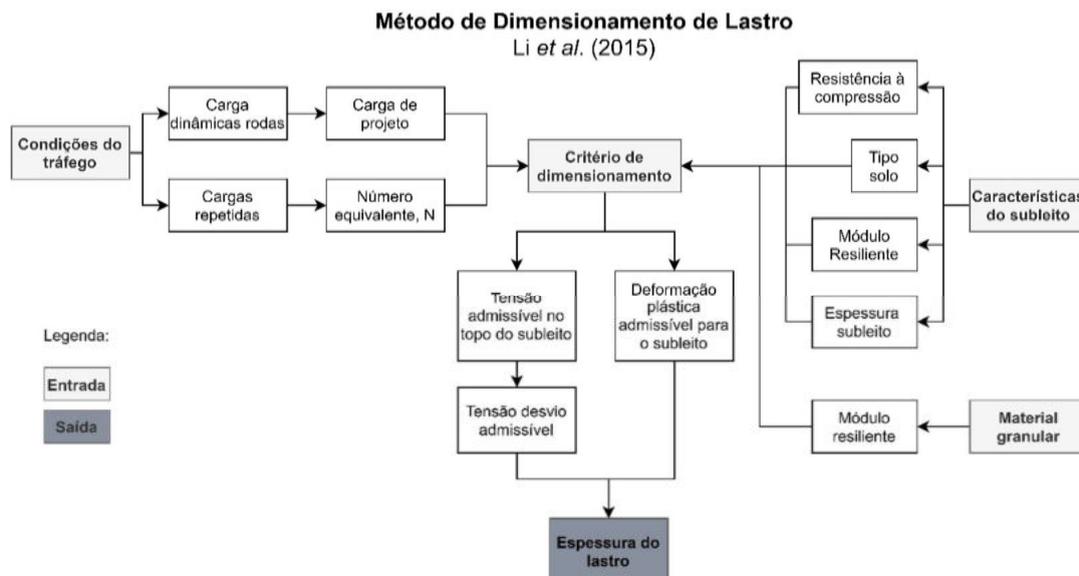


Figura 29: Método baseado em tensão e deformação. Adaptado de Li *et al.* (2015).

Com isso em vista, ainda no mesmo estudo, objetivando validar o dimensionamento proposto e avaliar o desempenho dos projetos desenvolvidos, Li *et al.* (2015) utilizam o mesmo modelo empregado para estimativa da deformação admissível

da fundação da via. Todavia, faz isso em função da vida útil estimada da estrutura calculada pelo número de ciclos de carga (N), considerando a espessura e propriedades do lastro e do subleito, assim como a carga por eixo de projeto. Diante disso tem-se a Equação 2:

$$N = b \sqrt{\frac{\rho_a}{a \left( \frac{P_d}{\sigma_s A} \right)^m I_p}} \quad (2)$$

onde:

*N* = é o número de aplicações repetidas de carga durante o período do projeto

*b* = é uma constante obtida em ensaio de laboratório

*ρ<sub>a</sub>* = é a deformação plástica total admissível do subleito para o período do projeto

*L* = é o comprimento da influência da carga de um eixo ou cargas de eixo adjacentes para uma dada espessura do lastro ou subleito.

*P<sub>d</sub>* = é a carga dinâmica de roda do projeto

*σ<sub>s</sub>* = resistência à compressão do solo

*A* = é o fator de área

*a, b, m* = são parâmetros de correlação solo

*I<sub>p</sub>* = é o fator de influência da deformação

Por conseguinte, utilizando o mesmo conceito para estimativa de vida útil, a estratégia adotada foi manter fixas as características do lastro e subleito e avaliar qual o tráfego N (pela repetição cíclica da carga) que leva a camada de fundação da plataforma ao estado último. De toda forma, é preciso reforçar que os modelos de análise para tensão e deformação aplicados no presente estudo são distintos dos propostos por Li *et al.* (2015).

Para isso, o modelo para determinação de estado último de fadiga da fundação utilizado no presente estudo trata do proposto por Heukelom & Klomp (1962), conforme a Equação 3:

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 \times MR_{subleito}}{1 + 0,7 \times \log N} \quad (3)$$

onde:

- *σ<sub>adm</sub>*: tensão admissível

- *MR<sub>subleito</sub>*: módulo de resiliência do subleito

- *N*: número de aplicação de cargas sobre a via (passagens de eixo de trem-tipo)

Já para a determinação da deformação permanente do subleito, foi utilizado o modelo proposto por Guimarães (2009), como mostra a Equação 04:

$$\varepsilon_p(\%) = \psi_1 \cdot \left( \frac{\sigma_3}{\rho_0} \right)^{\psi_2} \cdot \left( \frac{\sigma_d}{\rho_0} \right)^{\psi_3} N^{\psi_4} \quad (4)$$

onde:

- *ε<sub>p</sub> (%)* = Deformação permanente específica (*ε<sub>p</sub><sup>i</sup>*)

- *ψ<sub>1</sub>, ψ<sub>2</sub>, ψ<sub>3</sub>, ψ<sub>4</sub>* = parâmetros de regressão

- *σ<sub>3</sub>* = Tensão confinante

- *σ<sub>d</sub>* = Tensão desvio

- $\rho_0$  = Tensão de referência (tensão atmosférica)
- $N$  = Número de ciclos de aplicação de carga

Portanto, para a estimativa de vida útil, foi utilizada a relação entre a quantidade efetiva de passagens de eixos-padrão sobre a via permanente ( $N_{efetivo}$ ) e a quantidade estimada de projeto ( $N_{projeto}$ ), sendo usado como referência para  $N_{projeto}$  o valor do Grupo 1, preconizado pela Rede Ferroviária Federal (RFFSA), ou seja,  $N = 2,2 \times 10^6$  (Stopatto, 1987). É interessante mencionar que o mesmo valor foi usado por Spada (2003) em sua abordagem mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. Por fim, baseado no fator de dano da lei de Miner (Norouzi *et al.*, 2015), foi estimado o tempo de 10 anos para que se possa atingir o valor de  $N$  adotado como projeto. Assim, tem-se a relação representada na Equação 05:

$$\text{Tempo estimado de vida} = \frac{N_{efetivo}}{N_{projeto}} \times 10 \text{ anos} \quad (5)$$

Diante disso, os procedimentos de cálculos detalhados a seguir tratam justamente da determinação do  $N_{efetivo}$  pelo emprego dos modelos de tensão e deformação explicitados anteriormente, utilizando um *software* de modelagem de elementos finitos para determinar os valores de tensão-desvio efetivos ( $\sigma_{def}$ ) e tensão confinante efetiva ( $\sigma_{3ef}$ ). Vale ressaltar que, apesar de usar os dois modelos para análise (tensão e deformação), para determinação da vida útil aplicada no estudo, a continuidade dos cálculos ocorreu com o menor valor obtido entre os dois, visando ser conservador.

Relativamente ao processo de obtenção do  $N_{efetivo}$ , na Figura 30 e Figura 31 são apresentados os fluxogramas com a representação dos procedimentos de cálculo. Em resumo, foram realizados os *inputs* dos dados no *software* de análise para obtenção de tensões efetivas que pudessem ser incorporadas aos modelos de tensão e deformação selecionados e, por fim, estimado o  $N$  que se espera que ocorra em campo.

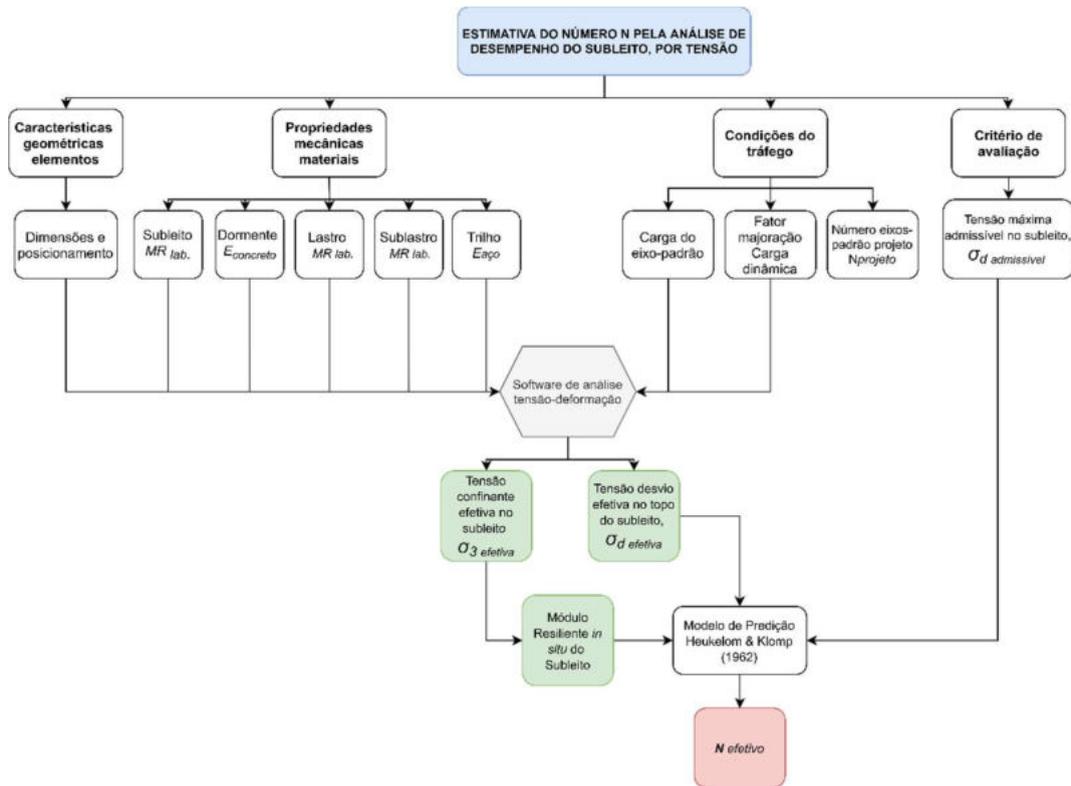


Figura 30: Estimativa de  $N_{efetivo}$  utilizando análise por tensão

Para a determinação do  $N_{efetivo}$  pelo modelo de tensão, após o *input* dos dados no *software* de modelagem e obtenção das tensões desvio e confinante efetivas, procedeu-se o cálculo do Módulo Resiliente (MR), utilizando os modelos sugeridos na seção 3.2.1.

Assim como na análise por tensão, a etapa inicial da análise por deformação trata da modelagem computacional, com o objetivo de obter as tensões desvio e confinante efetivas, para que possam ser usadas nos passos seguintes. Feito isso, a análise consistiu, primeiramente, no cálculo da deformação específica do solo analisado (dada em %), ou seja, tratou-se de definir a característica intrínseca do material, destacada no *box* laranja na Figura 31. Entende-se que, uma vez definido o comportamento de deformação do solo diante das condições de projeto, é possível extrapolar essa condição para o período de uso da via permanente, com os dados obtidos no *software* de elementos finitos, como explicitado nos modelos desenvolvidos por Wang & Zhuang (2021). Portanto, para isso, utilizou-se o modelo de Guimarães (2009). Definidos o modelo e os coeficientes, os outros *inputs* trataram do  $N_{projeto}$ , a tensão confinante efetiva ( $\sigma_{3ef}$ ) a que o solo estará submetido e a tensão máxima admissível ( $\sigma_{d máx}$ ).

Em relação ao  $N_{projeto}$ , este já foi dado no início do estudo e, quanto à  $\sigma_{3ef}$ , esta foi obtida com uso do Systrain. Logo, para a tensão máxima admissível ( $\sigma_{d\ máx}$ ), utilizou-se o modelo Heukelom & Klomp (1962). Para tanto, primeiramente foi calculado o módulo resiliente ( $MR_{subleito}$ ), com base nos modelos indicados na seção 2.3.1. Em seguida, com o  $N_{projeto}$  e  $MR_{subleito}$ , foi possível calcular a  $\sigma_{d\ máx}$  no subleito e, por fim, determinar a deformação específica do material. Finalmente, adequando o modelo de Guimarães (2009) para que estivesse em função de  $N$ , foram utilizados os dados obtidos anteriormente para determinar  $N_{efetivo}$ .

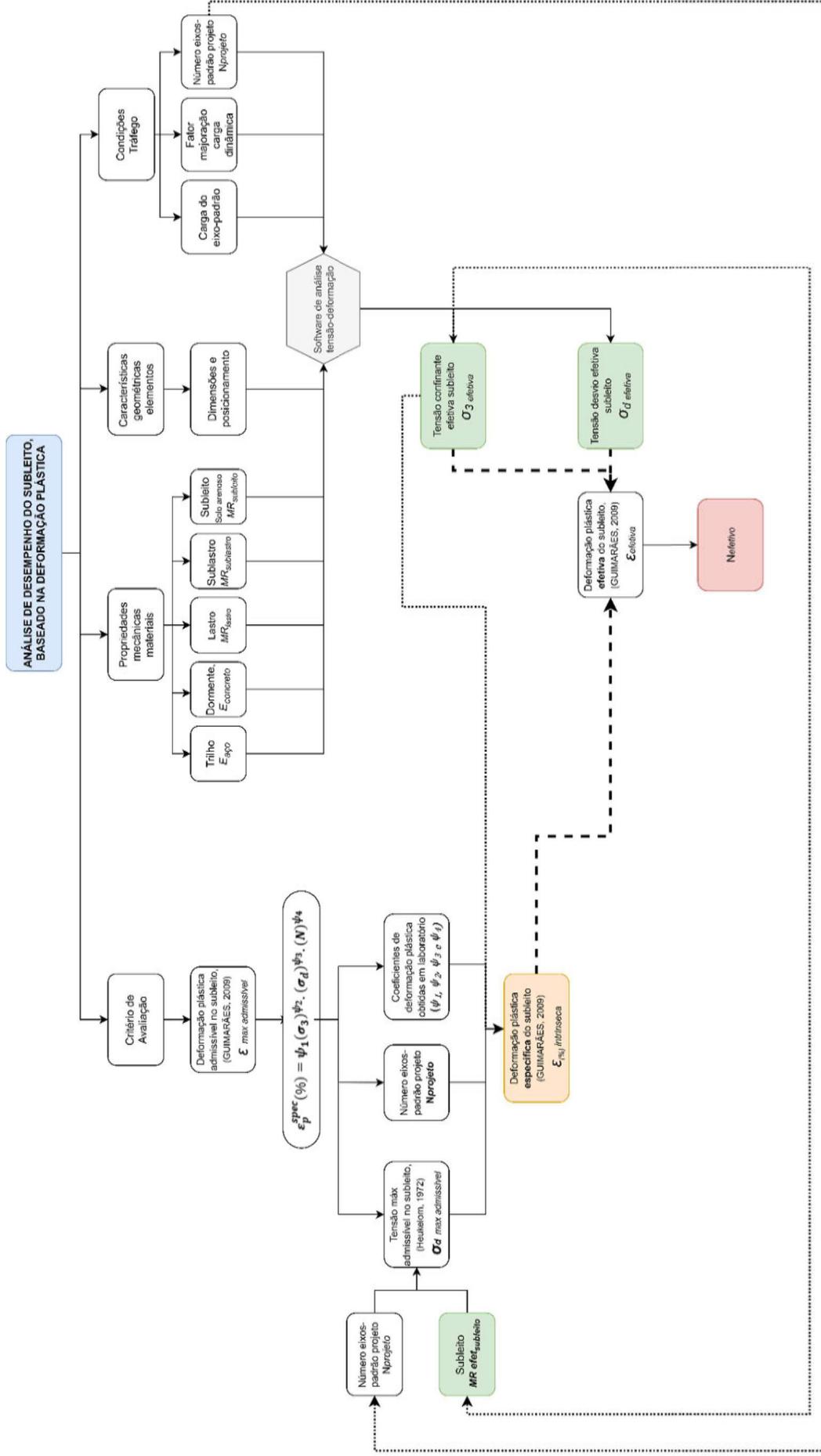


Figura 31: Estimativa de  $N_{efetivo}$  utilizando análise por deformação plástica

### **3.6 Levantamento de insumos para o sistema de produto da via permanente**

Para a fase de levantamento de insumos, como materiais, equipamentos e consumo de combustível, as etapas empregadas são as seguintes:

- Levantamento de quantitativos, com base no projeto de engenharia da seção de pavimento ferroviário, para o Sistema de produto escolhido;
- Identificação dos serviços a serem empregados (execução de lastro, assentamento de trilho, etc.) e consolidação da planilha de serviços;
- Compatibilização entre os serviços identificados e as composições de preço unitário da base de dados de serviços (SICRO), ou seja, o *de-para*;
- Quantidade parcial de insumos, por serviço, com base no produto entre quantidades e composição unitária;
- Consolidação dos insumos para obtenção de quantidade total de materiais e horas de equipamentos, podendo ser utilizado *software* específico de orçamentação de obras ou planilha eletrônica.

Finalmente, de posse dos insumos obtidos nessa etapa, é possível identificar os inventários de ciclo de vida na base do *EcoInvent 3.6* para que, também utilizando o *de-para*, seja feita a ACV no Simapro 9.3, o que será detalhado no tópico a seguir.

### **3.7 Levantamento dos impactos ambientais para a via permanente**

Na etapa de levantamento dos impactos ambientais, são retomados os conceitos de ACV, ou seja, com base nas categorias de impacto selecionadas, são definidos os métodos e, principalmente, inventários a serem empregados na análise. Para o presente procedimento metodológico, foram utilizados os inventários presentes na base de dados do *EcoInvent 3.6*, nativa no *software* Simapro 9.3.

De toda forma, durante a aplicação do presente estudo, o processo de escolha das categorias de impacto e método de impacto ocorrem de forma iterativa, visto a restrição do objetivo de aplicação da ACV no Brasil. Portanto, ao aplicar o procedimento metodológico proposto, o executor deve se atentar ao fato de a categoria de impacto pretendida estar presente no método aplicável para a realidade brasileira.

Adiante, considerando a sistematização proposta dos processos deste estudo, o levantamento dos impactos ambientais pode ser entendido como a etapa de compatibilização entre os insumos quantificados na fase anterior e a caracterização. Logo,

tal esforço consiste na análise da base de dados de inventário para a identificação da opção mais aderente às características dos materiais, equipamentos e combustível mapeados, sendo listados a seguir alguns dos principais desafios:

- Disponibilidade de poucos inventários desenvolvidos para a realidade brasileira na base escolhida para o estudo. Apesar das informações encontradas no Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida do Brasil (IBICT, 2022), a versão empregada para o estudo não abriga dados sobre materiais de construção brasileiro, por exemplo, o aço. De toda forma, diante desse fato, sugere-se o uso de inventários que empreguem a abordagem global (GLO);

- Falta de equipamentos específicos para a construção e manutenção de infraestrutura de transporte. Portanto, como solução adotada, sugere-se a agregação dos equipamentos por capacidade do motor e conseguinte compatibilização com inventário similar;

- Ausência de insumos característicos, como trilho. Logo, sugere-se o emprego do inventário que considere, por exemplo, a produção e transporte do aço;

Ainda acerca da compatibilização das bases de dados, sugere-se que, durante o processo de *'de-para'* entre insumos e inventários, seja empregada uma planilha eletrônica como memória de cálculo para verificações de coerências e consultas futuras. Sobre esse processo, é possível ainda citar o uso de *softwares* de orçamentação de obra, que podem auxiliar na consolidação dos insumos para análise.

Finalmente, os dados compatibilizados são inseridos no *software* de ACV escolhido para o estudo e gerados os relatórios para a análise dos cenários propostos.

### **3.8 Análise de cenários**

Retomando as possibilidades de aplicação no que diz respeito ao escopo, detalhadas na seção 3.1.2, é possível notar que o uso de comparação de cenários para *Ecodesign*, ou seja, análise da estrutura com base em seu desempenho ambiental, se apresenta como um uso interessante da ACV em infraestrutura ferroviária.

Diante disso, para definição de critérios na seleção dos cenários a serem avaliados, foram utilizados três parâmetros que se entende serem relevantes para análise com emprego da ACV, sendo eles: o elemento estrutural a ser avaliado, a variação dos materiais de construção e, por fim, a vida de serviço estimada, baseada no desempenho

mecânico do pavimento. Tais parâmetros estão em linha com o estudo de Landgraf & Horvath (2021), Pons *et al.* (2020) e Rempelos *et al.*, (2020), em que a variação dos tipos de materiais, que também leva à variação da vida de serviço, foi usada como critério para representar a sensibilidade para ACV.

Portanto, para o presente estudo, propõe-se o uso da ACV para análises comparativas de cenários, com vistas à mensuração do desempenho ambiental das seções pavimento selecionadas, com base no comportamento mecânico do subleito, a partir da variação dos materiais de construção e da vida útil estimada com base nas premissas da mecânica dos pavimentos.

### 3.9 Conclusão

O presente capítulo teve como objetivo apresentar os elementos que constituem o procedimento metodológico proposto. Sua premissa principal está baseada no uso de análise de cenários para a comparação de seções de pavimento ferroviário, visando a mensuração do desempenho ambiental das estruturas, conforme o objetivo de ACV definido como *ecodesign*. Isto, impulsionado pela necessidade de suportar as decisões de entidades do Poder Público e de entidades privadas no que diz respeito aos investimentos em infraestrutura ferroviária, assim como estudos acadêmicos do setor. Dessarte, a motivação do estudo trata de uma visão a *nível de projeto*, ou seja, de modo a atuar pontualmente em um determinado trecho ou via específica. Entretanto, assumindo que haja uniformidade dos elementos que constituem a malha, entende-se o potencial emprego a *nível de rede*.

Considerando como escopo as atividades de construção e manutenção da via permanente, os estudos comparativos realizados a partir do procedimento proposto têm como unidade funcional a extensão de 01 (um) quilômetro de via, avaliado a partir do critério operacional da quantidade de passagens do material rodante sobre a via, denominado número N, pelo período sugerido de uso de 100 anos. Além disso, atrelado a esses critérios, os estudos realizados a partir do procedimento proposto devem explicitar a carga por eixo-padrão, o diâmetro de roda, assim como as características geométricas da via e as especificidades de saturação do subleito.

Adiante, tratando do desempenho estrutural, foram empregados os métodos de análise de tensão, baseado em Heukelom & Klomp (1962), e deformação permanente, conforme Guimarães (2009). Para a modelagem, foi usado o *software* de análise tensão-

deformação Systrain, assim como empregado o método de estimativa de vida útil adaptado de Li *et al.* (2015).

Quanto ao sistema de produto, o foco do estudo trata da construção e manutenção da via permanente, cuja fronteira de sistema exclui os demais elementos que constituem a super e a infraestrutura, tais como dispositivos de drenagem, sinalização, túneis, edificações e quaisquer outros elementos que não sejam o pavimento ferroviário.

Tratando da quantificação de insumos para os serviços de construção e manutenção, foi empregada uma base de dados de composições, padronizada nacionalmente.

Para esse fim, foram utilizados os inventários do *EcoInvent 3.6*, nativos no Simapro 9.3, baseados no sistema de produto *cut-off*. Além disso, foram priorizados os inventários desenvolvidos para a realidade brasileira e, na inexistência destes, foram empregados aqueles desenvolvidos para o uso global e, por último, para o resto do mundo. Adiante, aliada a essa premissa, e diante da ausência de um método desenvolvido para o Brasil, foi utilizado o método de avaliação CML, de abrangência global.

Por conseguinte, na avaliação dos impactos de ciclo de vida, foram realizadas as atividades obrigatórias, ou seja, seleção de categorias, escolha do método e caracterização. Como conclusão, para a interpretação, foram utilizados gráficos e tabelas baseados em Pareto, para identificação dos elementos com maior relevância na ACV, e as incertezas avaliadas com base nos dados das simulações de Monte-Carlo obtidos no Simapro.

#### **4 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO NA FERROVIA FERROGRÃO**

O presente capítulo tem como objetivo aplicar o procedimento metodológico proposto, evidenciando os principais elementos da ACV na infraestrutura de transporte ferroviária do Brasil. Logo, a seguir é apresentado o panorama do estudo de caso.

Tratando da ACV, o objetivo é realizar a comparação entre diferentes projetos de pavimento, tendo, como parâmetro de avaliação, o desempenho ambiental. O escopo trata de quatro seções tipo, baseadas nas especificações técnicas brasileiras de engenharia, considerando geometria uniforme, as quais são avaliadas nas fases de construção, manutenção e reconstrução. Para tais seções, foram admitidas quatro variações dos materiais na camada de sublastro, assim como duas condições de saturação do subleito, resultando em oito cenários avaliados. Quanto à quantificação de insumos, foi utilizada a base de dados do SICRO.

Por conseguinte, quanto à análise estrutural, foram empregados dados da literatura técnica e ensaios de laboratório, usados como *input* do *software* de tensão-deformação escolhido para a modelagem computacional. Em seguida, os resultados de tensão efetiva foram utilizados nos modelos matemáticos para avaliação do desempenho estrutural e estimativa de vida útil da estrutura.

Adiante, foi selecionada a categoria de impacto de potencial de aquecimento global, que consta no método de avaliação do CML-IA, com priorização dos inventários desenvolvidos para o Brasil.

Por fim, foram avaliados os 08 (oito) cenários, com base nas premissas de interpretação da ACV, comparando os resultados, e evidenciando as principais fontes de impacto, desde o nível micro, pelos insumos de construção, até o macro, pelas seções escolhidas para análise.

Finalmente, as seções a seguir apresentam detalhadamente a aplicação do procedimento metodológico proposto.

#### **4.1 Definição do Objetivo e Escopo**

No estudo comparativo, foram empregados os critérios de variação dos materiais na camada de sublastro e a condição de saturação do subleito. Com isso, adotou-se uma seção tipo de referência (*baseline*), sem uso de aglomerante na camada de sublastro, e condições ideais de saturação, comparando ao emprego de solo-cimento, solo-emulsão e CBUQ, resultando em 08 (oito) cenários. Como estudo de caso para o procedimento proposto, a Figura 32 detalha os processos e componentes para a ACV.

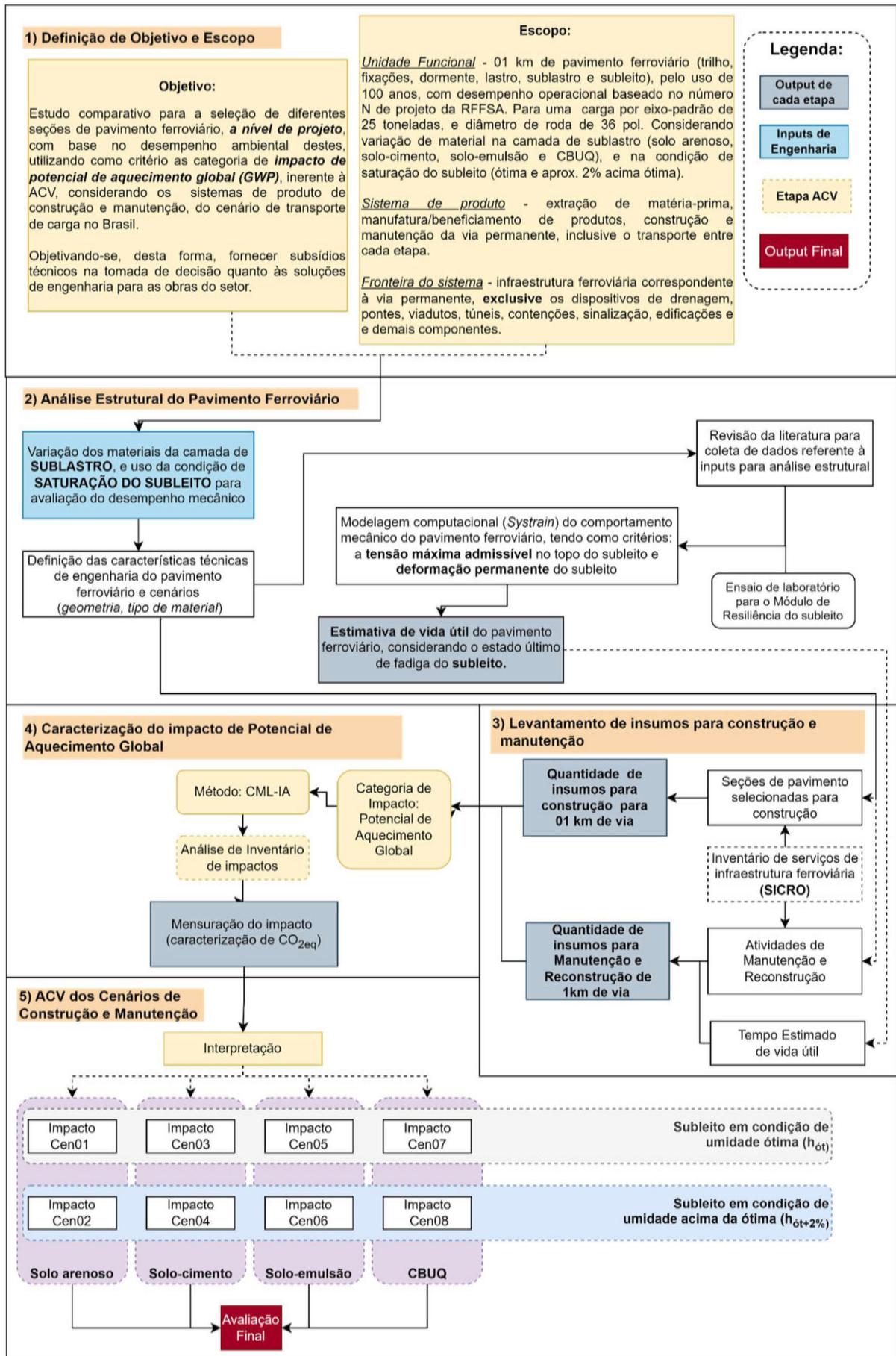


Figura 32 Fluxograma da aplicação do procedimento metodológico proposto

Desse modo, alinhado aos trabalhos de Shinde *et al* (2018) e Saxe *et al* (2017), o objetivo deste estudo de caso é comparar 08 (oito) seções de pavimento ferroviário, a nível de projeto, com base no desempenho ambiental, utilizando como critério a categoria de impacto de potencial de aquecimento global (GWP), empregando as ferramentas de ACV e considerando as etapas de construção e manutenção, para o transporte ferroviário de cargas no Brasil. Por fim, o intuito da execução do estudo é fornecer subsídios técnicos para a tomada de decisão, quanto às soluções de engenharia para os investimentos no setor.

Adiante, no que diz respeito ao escopo, para a unidade funcional do estudo de caso foi escolhido um trecho de 01 (um) quilômetro de pavimento ferroviário (incluindo trilhos, elementos de fixação, dormente de concreto, lastro em brita, sublastro, e subleito arenoso), com tempo de uso de 100 (cem) anos, cujo desempenho operacional se baseia na quantidade de passagens sobre a via especificado pela RFFSA, denominando número N de projeto. Além disso, quanto à padronização do material rodante, foi adotado um eixo-padrão de 25 toneladas, cujo diâmetro da roda é de 36 polegadas. Por fim, como critério de análise estrutural, foram adotados dois parâmetros: *i.* variabilidade de material, pelo emprego de solo arenoso, mistura solo-cimento, mistura solo-emulsão e CBUQ no sublastro; *ii.* variabilidade da saturação do subleito, pela adoção de saturação ótima e, de aproximadamente, 2% acima da ótima.

Ainda tratando do escopo, o sistema de produto compreende desde a extração de matéria-prima, a manufatura e beneficiamento dos produtos, assim como a construção, manutenção e atividade de reconstrução da via permanente, inclusive todo o transporte realizado entre essas etapas. De toda forma, vale ressaltar que a fase de operação foi omitida da análise, visto que foi admitida como uniforme entre todos os cenários, não considerando diferença no caso de variação da condição estrutural da via.

Diante da relevância do transporte na ACV, quanto à extração e beneficiamento dos insumos, foram admitidas as premissas presentes nos inventários. Já para a construção e manutenção, foi admitida uma distância média de transporte (DMT) de 10 km, entre a obra e os locais de recebimento dos materiais, inserida na composições de custo (SICRO).

Finalmente, a fronteira de sistema adotada para o estudo trata especificamente do pavimento ferroviário, excluindo-se os demais elementos, como material rodante (fase de operação), dispositivos de drenagem, sinalização, pontes, viadutos, estações, sistemas de energia e quaisquer outros componentes que não trate da via permanente.

#### 4.1.1 Detalhamento do Escopo

Os elementos que dizem respeito ao escopo se encontram alinhados com o especificado no item 5.2.1 da NBR ISO 14040. Logo, o objeto de estudo trata do pavimento ferroviário lastreado de uma via singela para transporte de cargas no Brasil. Além disso, para a carga, foi considerado o exposto por Medina & Motta (2015), que informam que as ferrovias de transporte pesado (*heavy haul*) no setor brasileiro têm cargas por eixo igual ou superior a 25 toneladas. Para as características de geometria, foram consideradas as recomendações de projeto brasileiras, com abrangência a nível de projeto, e o desempenho operacional avaliado pelo critério da quantidade de passagens desse eixo sobre a via, representado pelo número  $N$ , preconizado pela RFFSA para a Categoria I, ou seja,  $N= 2,20 \times 10^6$ . A seção estudada compreende 01 (um) quilômetro de via permanente com bitola larga em tangente, uso de trilho TR-68, dormente de concreto, sublastro composto de material variável e subleito arenoso, cujas dimensões estão mostradas na Figura 33 e com base no projeto da Ferrogrão (Ministério da Infraestrutura, 2016). Tanto o material rodante quanto sua operação não estão incluídos no escopo do estudo. O período de análise dos elementos é de 100 anos, considerando as etapas de construção e manutenção, sendo a reconstrução compreendida como integrante dessa última. Finalmente, visando viabilizar a comparação com estudos similares, a unidade funcional trata da quantidade de passagens desse eixo sobre a via, representado pelo número  $N$ .

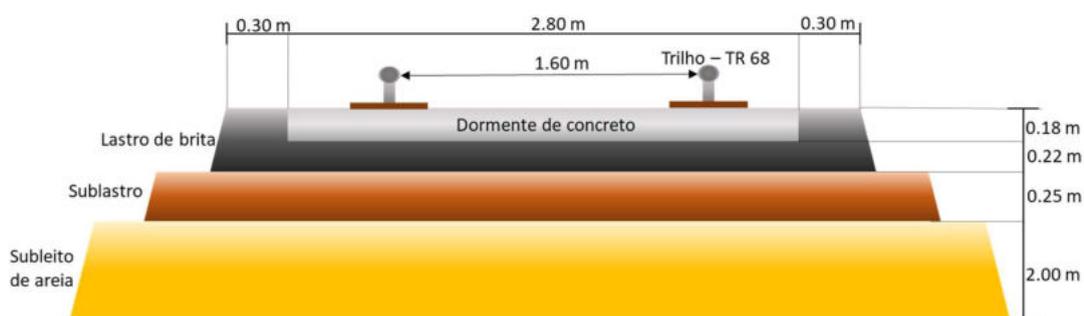


Figura 33: Seção de pavimento adotada como Unidade Funcional (sem escala)

Assim sendo, visando empregar parâmetros que permitissem analisar a sensibilidade quanto ao aspecto estrutural e ambiental, concomitantemente, o estudo de caso se dedicou a realizar a avaliação da estimativa de vida útil da via permanente, a partir da variação dos materiais da camada de sublastro e da condição de saturação do subleito,

a partir do desempenho mecânico da fundação. Isto foi justificado nos conceitos de Lazorenko *et al.* (2019), Li (2018), Profillidis (2014) e Landgraf (2011), os quais sugerem que o mau funcionamento desta camada é a principal causa na degradação prematura dos componentes do pavimento ferroviário, estando alinhada com as proposições de Selig & Li (1994), no qual afirma que o fator dominante no módulo de via trata justamente dessa camada, que influencia diretamente o desempenho mecânico da plataforma.

Nesse sentido, tais variações também estão baseadas no trabalho de Veit & Holzfeind (2009), ao tratar do gerenciamento do custo do ciclo de vida da infraestrutura ferroviária. Neste estudo, os autores reforçam que “*uma boa via se comporta bem, uma via pobre se deteriora mais rápido*”. Por fim, o estudo demonstra em seu modelo proposto que a deterioração da via é dependente do nível de qualidade atual ( $Q = Q_0 \times e^{bt}$ , onde  $Q$  é a qualidade da via,  $Q_0$  é o investimento inicial,  $b$  é uma constante baseada em análise de dados de campo, e  $t$  é o tempo), similar ao modelo proposto por Lichtberger (2005).

Logo, quanto à variabilidade do sublastro mencionada, e alinhados com as soluções de estabilização da Figura 23, os materiais adotados na seção do pavimento são mostrados a seguir, para compor os diferentes cenários, conforme a Figura 34:

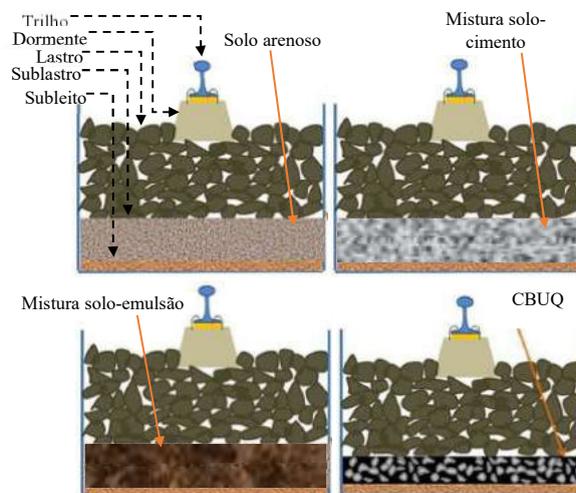


Figura 34: Variabilidade dos materiais no sublastro. Adaptado de Sol-Sánchez *et al.* (2016)

Ainda tratando acerca da variação dos materiais, foram empregadas soluções tradicionalmente reconhecidas e mencionadas por Roshan *et al.* (2022), Lazorenko *et al.* (2019), Li (2018). Logo, para este estudo de caso, foram selecionadas quatro seções de projeto do pavimento ferroviário, nos quais a variação ocorre basicamente no tipo de material aplicado no sublastro, com uso de materiais como solo granular arenoso (Cenários 01 e 02), mistura de solo-cimento (Cenários 03 e 04), mistura de solo-emulsão (Cenários 05 e 06) e concreto betuminoso usinado à quente – CBUQ (Cenários 07 e 08).

Para as misturas solo-cimento e solo-emulsão, foi empregada adição de 4% de cada tipo de aditivo para melhoria do desempenho mecânico. Já para a camada de CBUQ, foi adotada a espessura de 12,5cm, em substituição aos 25 cm adotados nos demais.

Adiante, para avaliar o tempo de uso da via permanente com relação à variação da saturação do subleito, baseado no seu desempenho mecânico, foram usados como referência os estudos de Castro *et al.* (2022), Guo & Zhai (2018) e Li *et al.* (2015), cujo resultado demonstra que uma condição não ideal de saturação leva a uma degradação mais rápida da via.

Portanto, reforçando o conceito do segundo critério, este tratou da variação da condição de umidade do subleito, visto que, segundo Selig & Li (1994), este elemento tem relevante impacto no módulo de via e, conseqüentemente, na vida de serviço da estrutura. Para tanto, foram selecionadas duas condições de umidade desta camada: ótima (Cenários 02, 04, 06 e 08) e aproximadamente 2% acima da ótima (Cenários 01, 03, 05 e 07). Logo, para fins de comparação, é possível estabelecer o Cenário 02 como *baseline* para os demais, tanto no que diz respeito ao tipo de material quanto à condição de umidade. A escolha do valor de 2% está baseada no estudo de Costa *et al.* (2017), que, ao avaliar o solo laterítico da fundação de uma ferrovia de carga no norte do Brasil, identificou a perda de capacidade de carga (módulo resiliente) em cerca de 50%, utilizando o mesmo critério.

Com isso, evidencia-se que o estudo é composto de 08 (oito) cenários, obtidos a partir dos critérios de variação dos materiais do sublastro e da saturação do subleito, ambos com impacto na vida estimada do pavimento. O primeiro critério foi selecionado pelo comparativo de 03 (três) soluções técnicas empregadas na camada de sublastro – representadas pelos Cenários 04, 06 e 08 – para a melhoria do comportamento mecânico do pavimento, em relação a uma seção de referência sem uso de material aglomerante, ou seja, uma *baseline*, a qual é representada pelo Cenário 02, em que o sublastro é composto apenas por solo arenoso e com a fundação em condições ideais de umidade. Vale ressaltar que o emprego dos materiais selecionados para variação tenderá a elevar a resistência da via, gerando diferentes vidas de serviço para cada cenário. De toda forma, o que será avaliado nesse estudo é justamente o *trade-off* entre a melhoria de desempenho versus o impacto de potencial de aquecimento global gerado. Já os cenários 03, 05 e 07 possuem as mesmas soluções de engenharia adotadas anteriormente, mas agora foram comparadas com a referência do cenário 01, no qual o subleito opera em condições não ideais de umidade.

Finalmente, como consolidação do exposto acima, a seguir a Tabela 17 detalha a estruturação dos cenários elaborados.

Tabela 17: Resumo da estruturação dos cenários quanto aos critérios adotados

Cenários analisados no estudo		Material do Sublastro			
		<i>Solo arenoso</i>	<i>Solo-cimento</i>	<i>Solo-emulsão</i>	<i>CBUQ</i>
Condição de umidade do sublastro	<i>Acima da ótima</i>	1	3	5	7
	<i>Ótima</i>	2	4	6	8

Como resultado esperado, em relação ao primeiro critério, é possível assumir que os Cenários 01 e 02, que não utilizam materiais para melhoria do desempenho no sublastro, tenderão a ter o menor impacto de potencial de aquecimento global, enquanto o uso de CBUQ, nos Cenários 07 e 08, devido à sua origem e cadeia de produção, sugere que será o maior contribuinte diante dos demais. Quanto ao critério de vida de serviço, a expectativa é que os cenários com condição de umidade do subleito próximo à ótima tenderão a gerar menor contribuição no impacto de potencial de aquecimento global, pois, considerando os conceitos da mecânica dos pavimentos (Medina & Motta, 2015), a condição acima da umidade ótima tende a reduzir o desempenho da estrutura, conduzindo a uma vida de serviço menor. É preciso ressaltar que, devido às limitações do *software* empregado, as condições de comportamento mecânico da estrutura para a análise foram consideradas fixas durante toda a vida da via permanente, o que se sabe não representar a realidade de campo, além de não considerar as demais limitações explicitadas na delimitação do estudo (seção 1.6).

Os dados para a elaboração do estudo foram coletados de diferentes fontes, tendo como referência as especificações de projeto preconizadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes do Brasil, tanto para definição das dimensões dos elementos quanto para a escolha dos materiais. Ainda nesse sentido, a seção do pavimento deste estudo foi baseada no projeto da ferrovia Ferrogrão (ANTT, 2016), importante via para transporte de cargas que ligará o Centro-Oeste ao Norte brasileiro. Isto feito, foi utilizada a base de dados que contém os serviços de infraestrutura comumente executados nas obras, denominada Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO, cujas atividades são caracterizadas como agregações de insumos, como materiais, equipamentos e mão-de-obra.

Quanto ao sistema de produto, foram consideradas as etapas desde a extração do material, manufatura e beneficiamento dos materiais (como trilho, dormente, cimento, emulsão asfáltica e Concreto betuminoso usinado à quente – CBUQ), a construção da via

permanente e as atividades de manutenção, sendo a reconstrução considerada como parte dessa última etapa. Por fim, foram considerados os transportes entre as respectivas etapas.

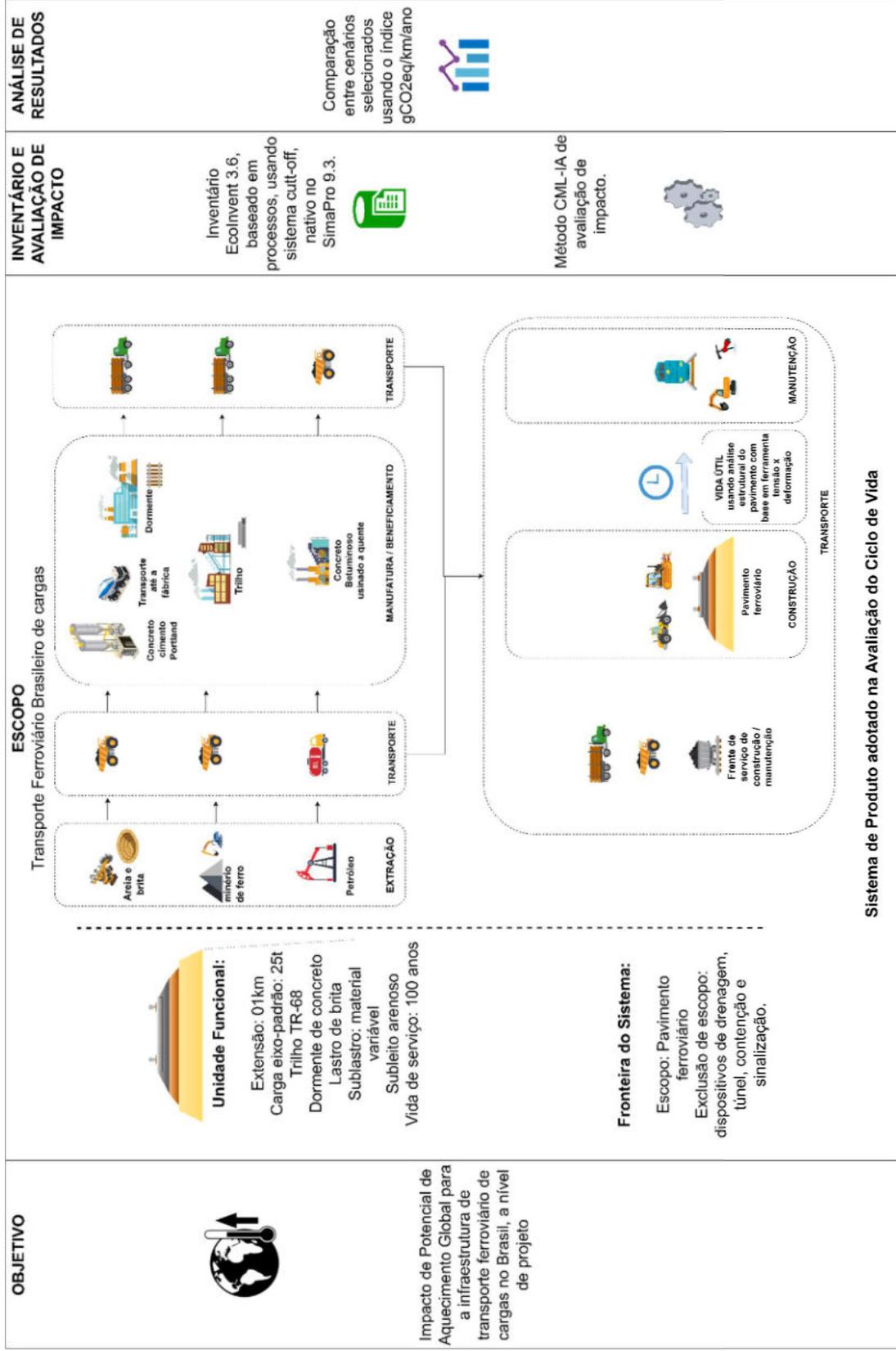
Por fim, quanto à fronteira do sistema, para este estudo, os esforços foram direcionados para a via permanente composta por: regularização do terreno, execução do subleito, construção do lastro e sublastro, instalação dos dormentes de concreto, elementos de fixação e trilhos. Os seguintes elementos estão excluídos do escopo deste estudo, visto que não são considerados como *input* para a análise estrutural: sistema de sinalização, dispositivos de drenagem, contenções, túneis, viadutos e pontes. Além disso, reforça-se a exclusão do material rodante, na fase de operação, no escopo da análise.

No tocante às atividades de manutenção, estas podem ser agrupadas em intervenções anuais (trilho, lastro e inspeção da geometria) e reconstrução ao longo do período analisado, conforme a Tabela 18 a seguir.

Tabela 18: Premissas das atividades de manutenção

<b>Componente da Infraestrutura</b>	<b>Atividade</b>	<b>Frequência (anos)</b>	<b>Segmento tratado</b>	<b>Período analisado (anos)</b>
Todos os componentes	Reconstrução	10	100%	
Trilho	Fresagem	1	100%	
Lastro	Socaria	1	85%	100
	Recomposição	1	15cm	
Geometria da via	Aferição automática	1	100%	

Finalmente, a Figura 35 ilustra o sistema de produto adotado e demais elementos de ACV do estudo, tais como objetivo, escopo, base de dados de inventários e processo de análise de resultados pela interpretação.



Sistema de Produto adotado na Avaliação do Ciclo de Vida

Figura 35 Principais componentes de ACV do estudo de caso

## 4.2 Análise Estrutural e Estimativa de vida do Pavimento Ferroviário

A etapa de análise estrutural consistiu no emprego dos conhecimentos e ferramentas da Mecânica dos Pavimentos, considerando os critérios de variação dos *materiais*, na camada de sublastro, e da *saturação*, no subleito. Isto é para obter a *estimativa de vida útil* da via permanente, baseada no N efetivo, pelos modelos de tensão e deformação. As seções a seguir detalham os processos realizados, com base no fluxograma da Figura 32.

### 4.2.1 Definição das características técnicas de engenharia

Como referência para a definição da seção da plataforma, foi utilizado o estudo da ferrovia Ferrogrão (Ministério de Infraestrutura, 2016), projeto do governo federal com 933 km para ligação entre o Centro-Oeste e o Pará, assim como o preconizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura (DNIT, 2007) em seu manual de custos ferroviários. Vale ressaltar que, apesar da análise ser realizada no topo do subleito, sua espessura foi considerada nas dimensões de 2,00m, como sugerido no *default* do *software Sytrain*, com a tela de input exemplificada no Anexo III. Desta forma, a consolidação desses critérios é representada na unidade funcional, conforme Figura 33 e Figura 34.

### 4.2.2 Coleta e obtenção de dados

Como estratégia para coleta de dados, primeiramente foram identificados os parâmetros necessários para a modelagem computacional, ou seja, procedeu-se o levantamento de requisitos do projeto. Diante disso, foi possível definir três principais categorias de dados: *geometria* dos elementos, que compõe a via; *constituição* dos materiais; e as *características mecânicas* desses elementos. Para a *geometria*, foram usadas as informações apresentadas na Figura 33, enquanto para a *constituição* considerou-se os materiais identificados na Figura 34. Por fim, para as *características mecânicas*, foram consultadas as literaturas técnicas disponíveis em estudos de entidades reconhecidas nacional e internacionalmente, e em ensaios de laboratório realizados nas dependências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, conforme Tabela 19 e Tabela 20, e detalhadas no Anexo II. Quanto aos materiais empregados no sublastro, reforça-se que apesar de serem provenientes de trabalhos distintos, os solos desta camada foram caracterizados em suas fontes como arenosos. Tal escolha visou manter a coerência o mais próximo possível do comportamento mecânico esperado da estrutura.

Tabela 19: Fontes de dados obtidos na literatura para modelagem computacional

Cenários	Trilho (TR-68)		Dormente (concreto)		Lastro (brita)			Sublastro			Fonte sublastro
	Mód. Elast. (GPa)	Fonte Trilho	Mód. Elast. (GPa)	Fonte Dormente	Mód. Resil. (MPa)		Fonte Lastro	Material	Mód. Resil. (MPa)		
					k1	k2			k1	k2	
1 e 2								Solo arenoso	2182	0,687	SELIG <i>et al.</i> (1979)
3 e 4	210	Default do Sysstrain	32	Default do Sysstrain	2466,8	0,7803	Delgado (2019)	Solo-cimento	6.680,80	0,429	MACÉDO (2004)
5 e 6								Solo-emulsão	1.300	0,29	MICELI JR (2006)
7 e 8								CBUQ	4.000	-	ALVES (2018)

A variação de umidade no subleito é um tema de relevância significativa, como demonstrado por Spada (2003), ao destacar as origens dos principais problemas na via permanente devido à condição de saturação desfavorável nesta camada. No referido estudo, o autor utilizou procedimento similar ao proposto no trabalho em desenvolvimento, ao avaliar o comportamento mecânico (pela tensão e deformação) da plataforma ferroviária, empregando os *softwares* Geotrack e Ferrovia, para comparar as tensões verticais atuantes e admissíveis da fundação, em duas condições distintas de umidade, ou seja, “*in situ*” e umidade ótima.

Desta maneira, para o presente trabalho, no que diz respeito aos ensaios de laboratório, esses trataram da caracterização do módulo resiliente para esta camada, considerando duas condições distintas de umidade: condição ótima e condição aproximadamente 2% acima da ótima. Isto porque, com base em estudos como Costa *et al.* (2017), existe significativa perda da resistência da estrutura quando o solo constituinte se encontra em situação desfavorável em relação a esse critério.

Em vista disso, a seguir, na Tabela 20, são apresentados os parâmetros utilizados para o subleito como *input* no *software* de análise tensão-deformação.

Tabela 20: Dados de laboratório para modelagem do subleito

Caracterização solo	Umidade acima da ótima			Umidade ótima		
	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	k1	k2	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	k1	k2
Areia siltosa: (A-2-4); MCT - NA'	1907	23,202	-0,187	1935	115,287	-0,242

Logo, tendo em vista que o solo do subleito utilizado se trata de um solo arenoso, foi empregado o modelo arenoso, ou seja, em função da tensão de confinamento (Seed *et al.*, 1967), conforme a Equação 06. De posse deste dado, ele foi aplicado juntamente com

a tensão desvio efetiva (obtida no cálculo computacional) no modelo de Heukelom & Klomp (1962).

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (\text{modelo arenoso}) \quad (6)$$

Onde:

$k_1, k_2$ : coeficientes obtidos em laboratório, detalhados na Tabela 20.  
 $\sigma_3$ : tensão confinante efetiva, obtida na modelagem computacional

Diante disso, é interessante lembrar que o módulo de resiliência do subleito é baseado no seu estado de tensões (Bernucci *et al.*, 2006; Balbo, 2007), ou seja, a magnitude do comportamento resiliente do solo, representado pela sua rigidez, é caracterizado pela relação entre a tensão principal (vertical,  $\sigma_1$ ) e pela tensão confinante (horizontal,  $\sigma_3$ ). Com base nisso, e considerando que: *i.* o subleito se posiciona como último elemento a receber a solicitação de carga no pavimento; *ii.* foram adotados cenários onde a camada de sublastro, imediatamente superior à fundação, apresenta diferentes magnitudes de rigidez; *iii.* quanto maior a rigidez de uma camada, maior a responsabilidade de absorção de carga (Bernucci *et al.*, 2006); *iv.* o módulo de resiliência da fundação foi calculado em função das tensões no topo do subleito. É possível inferir que os cenários sem uso de aglomerante no sublastro apresentarão maiores tensões no subleito e, por conseguinte, maiores valores de módulo resiliente. Em contrapartida, aqueles cuja rigidez do sublastro for mais elevada tendem a demonstrar menores valores de tensões no topo do subleito e, conseqüentemente, menores solicitações desta camada, gerando MR's com menor magnitude.

Adiante, mantendo-se a coerência de uso de solo arenoso, utilizou-se o modelo de Guimarães (2009), sendo também empregados os coeficientes ( $\psi_1 = 0,244$ ,  $\psi_2 = 0,419$ ,  $\psi_3 = 1,309$ ,  $\psi_4 = 0,069$ ) determinados em ensaios de laboratório nesse mesmo estudo para uma areia siltosa (Solo Papucaia).

Com relação à carga aplicada, o valor adotado trata da carga dinâmica, baseada na força estática de 25 t, o diâmetro da roda de 914,4 mm e velocidade de 60 km, conforme a norma NBR 7189 – Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias.

#### 4.2.3 Resultado da Análise Estrutural

A respeito da análise estrutural do pavimento ferroviário, a Tabela 21, a seguir, apresenta os resultados obtidos durante o processo de modelagem estrutural. Considerando o critério de fadiga, baseado na tensão efetiva e na deformação permanente no topo do subleito, como a condição final de uso da estrutura, foi adotada uma perspectiva conservadora, considerando o menor valor de  $N_{efetivo}$  entre os valores calculados.

Tabela 21: Resultados da modelagem estrutural do subleito ferroviário

Cenário	Tensão	Tensão	MR	N projeto (RFFSA)	Tensão	Tensão desvio	N efetivo (por tensão)	N efetivo (por deformação)	Tempo até condição final (anos)
	Desvio (kPa)	Confinante (kPa)	Camada Subleito (Mpa)		Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> )	atuante no subleito (kgf/cm <sup>2</sup> )			
1	44,80	56,10	39,76	2,22E+06	0,438	0,448	1,51E+06	1,47E+06	7
2	61,50	52,30	235,45	2,22E+06	2,60	0,62	2,44E+31	1,62E+18	100
3	38,10	66,90	38,47	2,22E+06	0,42	0,38	1,69E+07	1,70E+07	76
4	60,20	57,60	230,02	2,22E+06	2,54	0,60	2,10E+31	1,56E+18	100
5	43,70	61,30	39,11	2,22E+06	0,43	0,44	1,75E+06	1,72E+06	8
6	61,20	53,30	234,38	2,22E+06	2,58	0,61	2,50E+31	1,63E+18	100
7	37,70	71,00	38,05	2,22E+06	0,42	0,38	1,67E+07	1,68E+07	76
8	47,80	67,30	221,51	2,22E+06	2,44	0,48	1,96E+38	6,08E+19	100

É preciso ressaltar que os modelos de tensão e deformação permanente que usamos nesta análise foram desenvolvidos para uma ordem de magnitude N abaixo da obtida neste trabalho. Por isso, utilizamos um período de 100 anos como limite para os cenários estudados. De qualquer forma, vale destacar que os valores de tensão desvio no topo do subleito da Tabela 21 são consistentes com os recomendados por Indraratna e Ngo (2018) – ou seja, da ordem de 50 kPa –, assim como a coerência na variação do módulo de resiliência obtido para esta camada.

Adiante, conforme Figura 36, é possível observar que os valores de tensão desvio e confinante no subleito estão coerentes com o esperado, visto que os cenários, cuja rigidez da camada do sublastro é menor, resultaram em magnitudes de tensões mais elevadas que as demais. Ou seja, houve uma maior solicitação de resistência por parte da fundação quando se empregou o solo arenoso no sublastro, enquanto o uso de CBUQ nesta camada mitigou o impacto do material rodante sobre o topo do subleito durante a distribuição das tensões.

### Tensão desvio no topo do subleito por cenário

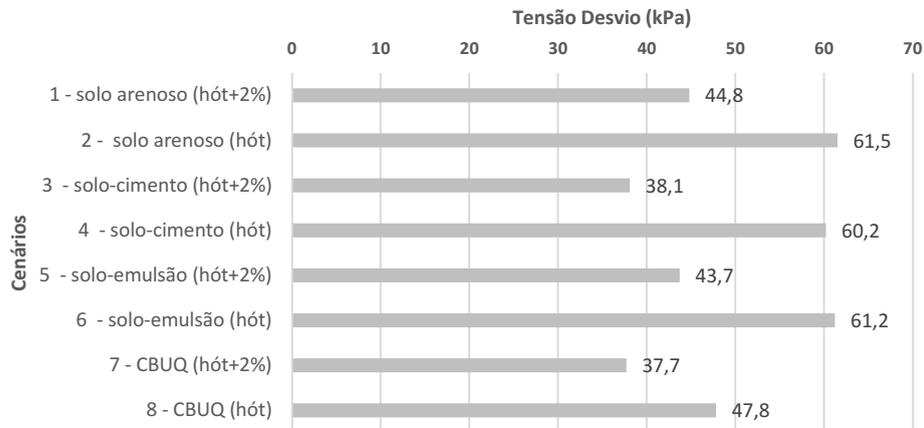


Figura 36 Comparativo dos resultados da Tensão Desvio efetiva no topo do subleito

Neste sentido, e de modo similar, no que diz respeito ao desempenho dos materiais, Li (2018) comparou uma seção de pavimento de lastro com material granular (46cm) frente a outra seção com reforço de 20 cm de CBUQ, e uma carga estática de 178 kN. Em resumo, seu objetivo tratou de elevar a rigidez da camada de sublastro ao empregar o material asfáltico e, assim, reduzir a solicitação de carga sobre a fundação. Como resultado, Li (2018) mostra que há uma redução de aproximadamente 30 kPa na tensão desvio sobre a camada de fundação da via permanente, estando em concordância com o representado na Figura 36.

Já tratando da variação de umidade, Costa *et al.* (2017), ao avaliar os solos tropicais para uso na pavimentação ferroviária, baseado em ensaios de campo e laboratório, concluíram que a perda da resistência é significativa em condições desfavoráveis, mostrando perda de cerca de 50% do critério de rigidez adotado. Aliado a esse fato, Medina & Motta (2015) mostram que a redução da resistência de determinada camada do pavimento promove a redistribuição da carga para as demais, uma vez que esse elemento não consegue chamar para si a responsabilidade de uma carga igual àquela em condições ideais. Assim, é possível notar que os cenários onde foi empregada a condição acima de umidade ótima apresenta uma tensão desvio menor que os cenários com condição de umidade ótima.

Em seguida, alinhado ao conceito que o módulo resiliente é definido em função do estado de tensões do solo, os cenários com maiores pares de tensões resultaram nos

valores superiores para MR. Dessa forma, ao se comparar o cenário do sublastro com solo arenoso em contraposição àquele com uso de CBUQ, é preciso recordar que devido à maior rigidez da mistura asfáltica, e a respectiva absorção de tensão por ela, o subleito dos cenários 01 e 02 sofrerão maior sollicitação de resistência, representado pelos maiores valores de tensão desvio no topo do subleito e, conseqüentemente, maiores resultados de módulos resiliente, visto que o MR é calculado com base nos pares de tensões. Por fim, considerando que o MR tem como finalidade permitir o cálculo da tensão-desvio admissível, para se comparar com a tensão atuante, fica evidente a coerência dos resultados obtidos, conforme Figura 37. Baseado nestes valores, aliado ao  $N_{projeto}$  da RFFA, foi definida a tensão admissível, cujo comportamento de variação entre os cenários se fundamenta nos conceitos explicitados anteriormente.

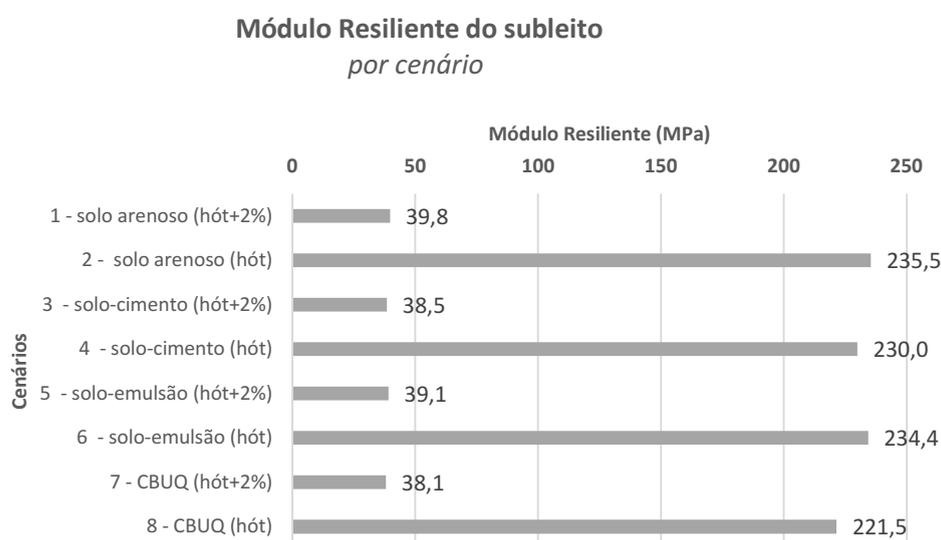


Figura 37 Comparativo dos resultados do Módulo Resiliente da camada de subleito

Ainda no tocante ao MR, se observa o alinhamento entre os cenários quanto ao teor de umidade, podendo realizar a agregação dos oito grupos em 2 subgrupos de 04 elementos, evidenciando a ordem de grandeza dos valores. Ou seja, é razoável inferir uma análise que conclua que os cenários onde foi empregada a umidade ótima possuem um melhor desempenho, pois se mostram com MR acima de 200 MPa, enquanto nos demais este critério se encontra abaixo de 40 MPa. Além disso, após análise de sensibilidade para esse critério, no qual foi empregada o modelo composto de módulo resiliente, pôde se verificar que o comportamento dos resultados se manteve, conforme Anexo IV.

De modo comparativo, sobre a redução da resistência do subleito, em função da variação do módulo resiliente, este trabalho se mostra em conformidade com os resultados

obtidos por Castro *et al.* (2021) e Costa *et al.* (2017). Primeiramente, Castro *et al.* (2021), em seu trabalho sobre o comportamento do pavimento ferroviário, considerando dados climáticos de solos não saturados, mostram que os fatores relacionados ao comportamento hidromecânico do solo da fundação têm elevada influência no módulo de resiliência (MR) dessa camada e, conseqüentemente, na resiliência da via permanente. Considerando ainda o critério de MR, assim como teor de umidade e sucção, a perda pode ser estimada em cerca de até 5 vezes, entre a umidade ótima (18%) e a condição acima da ótima (22%), para uma mesma tensão desvio.

Dessarte, considerando tanto o parâmetro de tensão desvio quanto o de módulo resiliente, este estudo se mostra alinhado com o resultado de Castro *et al.* (2022), ao comparar uma seção de pavimento ferroviário com sublastro granular e outra com CBUQ, considerando condições climáticas distintas de intensidade pluviométrica, assim como os critérios hidromecânicos do subleito. Por fim, o referido estudo concluiu que o uso dessa última solução tende a melhorar o desempenho mecânico da estrutura.

Além disso, os resultados de Castro *et al.* (2022) mostram que os períodos secos do ano são justamente os momentos quando o pavimento tem o melhor comportamento mecânico. Tal afirmação valida o comparativo do presente trabalho entre a tensão desvio efetiva e a tensão admissível, ou seja, a tensão que ocorre no campo e aquela que a estrutura é capaz de suportar, detalhando na Figura 38. Isto porque é possível perceber que os cenários com condição de umidade ótima são justamente aqueles com maiores valores de tensão admissível, quando a fundação pode oferecer a melhor resistência para a operação da via. De toda forma, é preciso lembrar que a tensão admissível é baseada no  $MR_{subleito}$  e  $N_{projeto}$ , enquanto a tensão efetiva mostra o alívio de tensões promovido pelas camadas superiores.

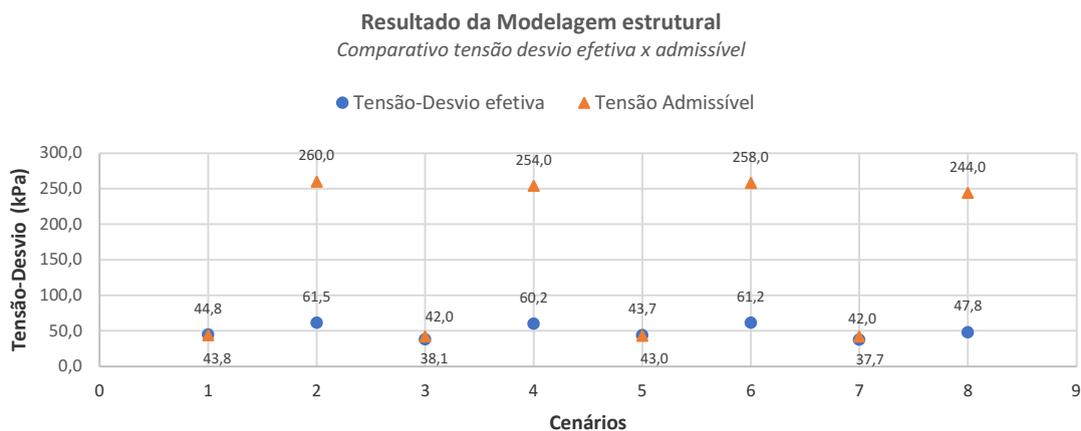


Figura 38 Comparativo entre tensão desvio efetiva e tensão admissível.

Finalmente, quanto ao  $N_{efetivo}$ , calculado com base nos valores de tensão admissível,  $MR_{subleito}$  e o modelo de Heukelom & Klomp (1962), é possível depreender a coerência no comportamento esperado, ou seja, os valores dos cenários com menor proteção da camada de subleito. No que diz respeito às tensões efetivas aplicadas, levam a uma degradação antecipada da via, quando comparados com os demais cenários. Ou seja, o  $N_{efetivo}$  incorpora a variação do alívio de tensões geradas pelas diferentes magnitudes de rigidez das soluções empregadas na camada de sublastro.

Ainda tratando sobre a estimativa do  $N_{efetivo}$ , a Figura 39 compara os resultados obtidos a partir dos cálculos baseados nos modelos de tensão e deformação, com o  $N_{projeto}$  definido inicialmente. É preciso lembrar que os modelos de predição de tensão e deformação permanente, empregados neste estudo, foram desenvolvidos para ordens de grandeza inferiores aos valores encontrados. De toda forma, o comportamento dos materiais está aderente com o apresentado em outros estudos, como Castro *et al.* (2022), na Tabela 22. Como resultado, é possível inferir que os cenários com a condição de umidade do subleito acima da ótima atingiram um patamar de  $N_{efetivo}$  consideravelmente inferior àqueles com a condição de umidade ótima. Além disso, baseado na condição desfavorável desta camada, se nota que apenas as soluções de projeto que utilizaram a mistura de solo-cimento e CBUQ no sublastro atingiram pelo menos o  $N_{projeto}$ . Quanto ao desempenho dos materiais empregados, indiferente da condição de umidade e do modelo de cálculo adotado, fica evidente que a solução com emprego de CBUQ se mostra acima de todos os outros cenários analisados.

Por fim, os valores calculados de  $N_{efetivo}$  permitiram estimar a vida útil do pavimento ferroviário com base na fundação, sendo conservador ao utilizar o menor valor entre os dois modelos empregados. Reforça-se que os cenários com  $N_{efetivo}$  menor que o  $N_{projeto}$  demonstra justamente a degradação antecipada da via.

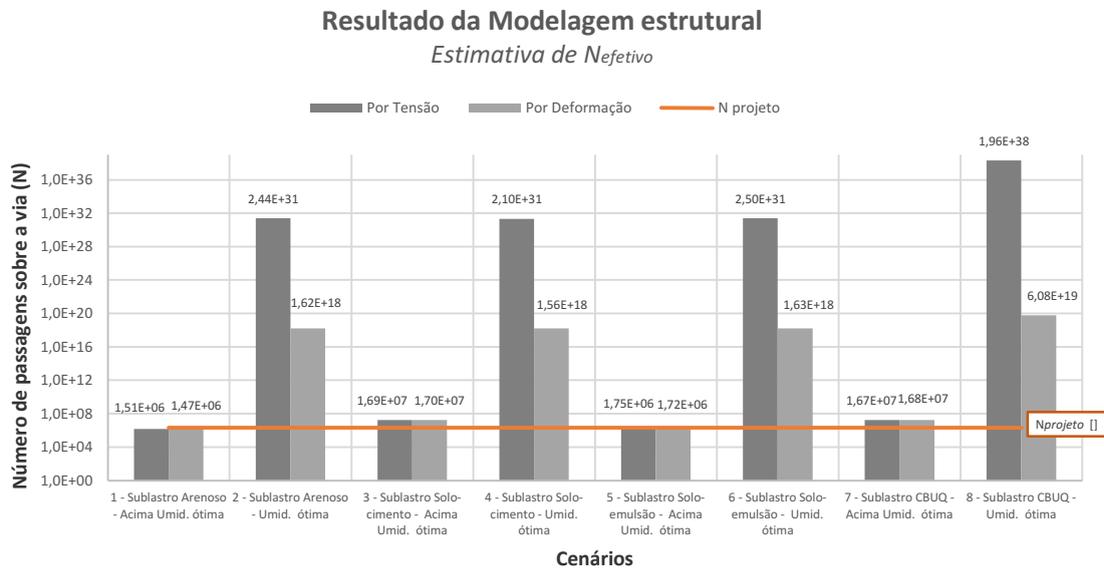


Figura 39 Comparativo entre os valores de  $N_{efetivo}$  calculados e o  $N_{projeto}$ .

#### 4.2.4 Estimativa de útil do pavimento

A respeito da estimativa de vida útil, a Figura 40 apresenta os resultados evidenciando o impacto de cada solução de engenharia adotada e a condição de umidade do subleito. Como conclusão, é possível verificar que as soluções de sublastro arenoso sem aglomerante e a solução com uso de mistura solo-emulsão, sob condição estrutural desfavorável da fundação, possuem o pior desempenho no quesito de estimativa de vida útil. Já nos cenários onde o subleito se encontra em condições favoráveis, as quatro soluções apresentam ordem de grandeza similar.

## Resultado da Modelagem Estrutural

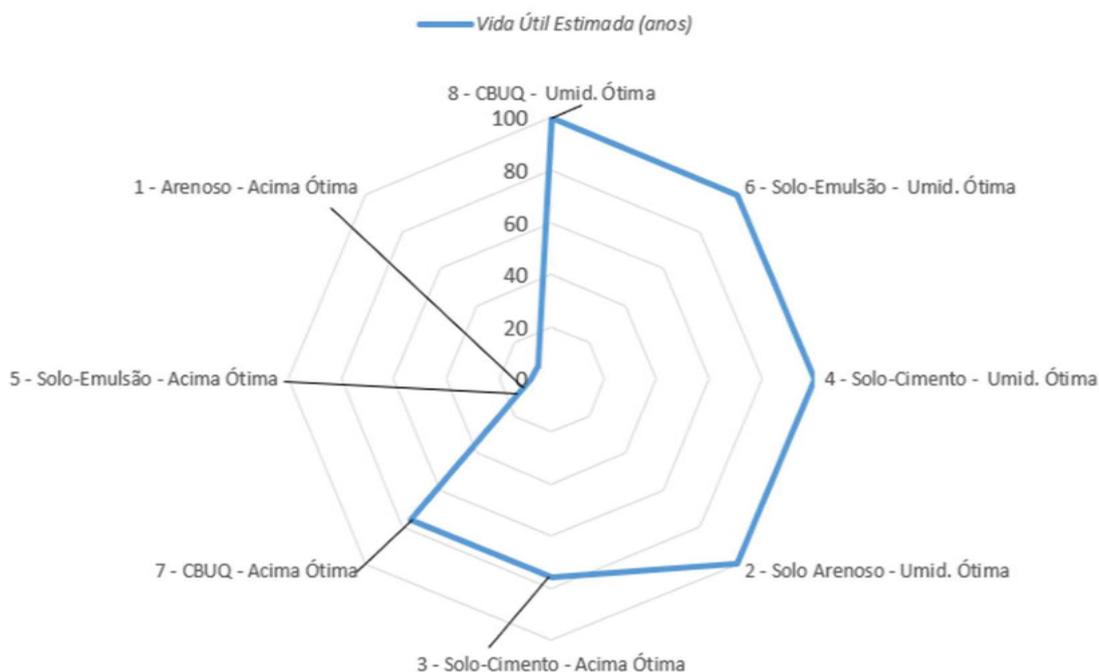


Figura 40 Estimativa de vida útil do subleito para os diferentes cenários analisados

Diante dos resultados apresentados, o presente estudo foi comparado com o trabalho de Castro *et al.* (2022), o qual também se propôs a avaliar o desempenho do pavimento ferroviário, a partir da análise estrutural da fundação, sob diferentes condições de umidade e adotando soluções de engenharia distintas, como o CBUQ no sublastro. Para isto, o autor avaliou três condições de umidade, dos quais, para comparação com o trabalho aqui desenvolvido, pode ser adotado aquele sob condição climática de chuva e condição de umidade do subleito acima da ótima, frente à condição sem chuva, efeito climático seco e condição de umidade ótima. Mesmo empregando modelos distintos para avaliar a estrutura e para estimar a vida útil da fundação (Rose *et al.*, 2014), entende-se que o comportamento da via permanente pode ser avaliado por paridade e, por isso, a Tabela 22 mostra os critérios de projeto adotados e os resultados.

Tabela 22: Resultados da modelagem realizada por Castro *et al.* (2022)

Critério de Projeto	Sublastro CBUQ			Sublastro granular		
	Chuva	Chuva	Sem chuva	Chuva	Chuva	Sem chuva
Histerese / efeito climático	Úmido	Úmido	Seco	Úmido	Úmido	Seco
Umidade do subleito (%)	24	18,1	18,1	24	18,1	18,1
Condição de umidade do subleito	<b>acima da ótima</b>	ótima	<b>ótima</b>	<b>acima da ótima</b>	ótima	<b>ótima</b>
Sucção no subleito (kPa)	9	30	100	10	30	100
MR do subleito (MPa)	17	26	70	17	26	70
$N_{admissivel}$ do subleito	$3,41 \times 10^5$	$9,40 \times 10^5$	$8,60 \times 10^6$	$2,39 \times 10^5$	$7,17 \times 10^5$	$8,70 \times 10^6$
Vida útil do subleito (anos)	2,9	8,1	73,8	2,1	6,2	74,7

De forma similar no trabalho aqui desenvolvido, quando se compara os valores de  $N_{admissível}$  é possível depreender que as simulações com a condição de umidade favorável do subleito apresentam o melhor desempenho, enquanto aquelas sob condição de umidade acima da ótima tendem a permitir um menor uso da vida pela repetição de carga, conforme a Figura 41 construído a partir dos dados do trabalho em análise. Além disso, quando se utiliza o  $N_{projeto}$  do presente estudo, nesta mesma figura, para confrontar os dois trabalhos, é possível perceber que fica evidente a convergência entre eles.

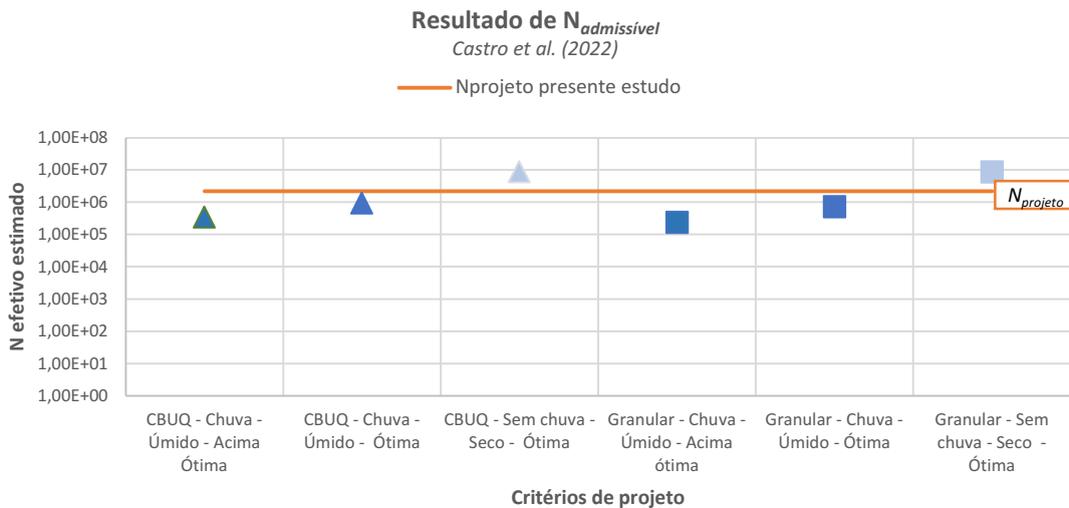


Figura 41 Consolidação dos dados de  $N_{admissível}$  de Castro et al. (2022)

Por fim, em relação ao paralelo entre os dois estudos que tratam do comportamento do desempenho mecânico do subleito quando submetido a condições distintas de umidade, e com o emprego de soluções variadas de emprego de material na camada de sublastro, a Figura 42 permite inferir que a condição de umidade tem impacto direto na estimativa de vida útil da estrutura. Todavia, o emprego do CBUQ, mesmo propiciando um desempenho melhor quando o pavimento se encontra em condições desfavoráveis de umidade, parece ter demonstrado uma contribuição menor para elevar a estimativa de vida útil do que o encontrado neste estudo e em Li (2018).

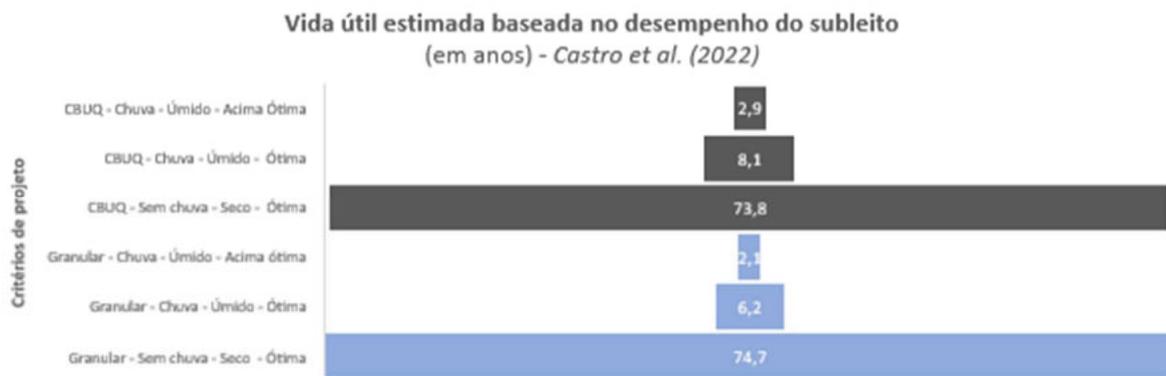


Figura 42 Resultados de vida útil estimada por Castro et al. (2022).

### 4.3 Levantamento de insumos para Construção e Manutenção

Finalizada a etapa de estimativa de vida útil da via férrea, conforme descrito na seção 4.2, foram usadas as cotas da seção transversal, apresentada na Figura 33, e os materiais descritos na Figura 34, para o levantamento das quantidades dos insumos, empregados nas atividades de Construção e Manutenção, sendo esta última também compreendida pela reconstrução da via permanente. Vale ressaltar que, apesar da análise estrutural ter sido realizada para 08 (oito) cenários, o levantamento de quantidades teve como critério apenas a variação dos materiais que constituem o sublastro e, por isso, foram avaliados os 04 (quatro) tipos de seções de pavimento.

Para a quantificação dos insumos, foram utilizados os serviços descritos no estudo de viabilidade da Ferrogrão (Ministério de Infraestrutura, 2016), aliado às composições de custo unitário do Sistema de Custo Referenciais de Obras – SICRO 3 (julho/2020) do Departamento Nacional de Infraestrutura – DNIT.

De toda forma, é preciso ressaltar que, diante da heterogeneidade das seções avaliadas e da vida útil estimada para cada uma, foi preciso uniformizar o parâmetro de análise. Diante disso, o tempo de operação da via para todos os cenários foi fixado em 100 anos, ordem de grandeza alinhada com a estimativa de 120 anos no estudo de Krezó *et al.* (2016). É possível assumir que essa padronização permitiu reduzir as distorções entre os cenários cujos materiais possuem maior durabilidade, mas contribuem com maior impacto de potencial de aquecimento global na etapa de construção, quando comparados com aqueles que geram menor impacto, entretanto exigem maior frequência de manutenção. Finalmente, a padronização do tempo de operação da via buscou tornar mais claro o *trade-off* entre essas e outras variáveis.

#### 4.3.1 Quantidade de insumos para Construção de 01km de via

Com base na seção transversal da unidade funcional, apresentada na Figura 33, considerando a extensão de 01 km de via em tangente, e nas premissas da Tabela 23, apresentada a seguir, foram levantados os quantitativos para as atividades de construção e manutenção das estruturas a serem avaliadas nos cenários escolhidos.

Tabela 23 Parâmetros para estimativa de quantitativo

Premissa	Unidade	Quantidade
Extensão	km	1
Área de Implantação	m2	6.050
Trilho	km	1
Dormente - esp. 0,60m	un	1.667
Volume de Lastro	m3	1.301
Volume de sublastro (solo e misturas)	m3	1.390
Volume de sublastro (CBUQ)	m3	695

O levantamento foi realizado de forma segregada, ou seja, foi elaborada uma planilha de quantidades para cada tipo de variação do material aplicado no sublastro, conforme Figura 34. Deste modo, a Tabela 24 a

Tabela 27 apresentam os serviços do SICRO utilizados para o levantamento de quantidades para a construção, assim como o Anexo V traz as composições de preço unitário utilizadas. Nessas mesmas tabelas, estão consolidados os quantitativos estimados e as observações acerca do componente em que cada item foi empregado, assim como os códigos das composições aplicadas.

Tabela 24: Lista de atividades para construção dos Cenários 01 e 02

Sublastro de solo arenoso					
ITEM	CPU	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
1	4011209	Regularização do subleito	m2	6.050,0	Subleito
2	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - empol. 25%	m3	1.737,5	Obtenção material sublastro
3	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - rodovia em leito natural	tkm	93.825,0	Transporte sublastro
4.1	4011227	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida	m3	1.390,0	Construção sublastro
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões	m3	1.300,5	Lastro
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1,0	Lastro
7	3009281	Posicionamento com pórtico de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	1,0	Dormente
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola métrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixação elástica	km	1,0	Assentamento do trilho e dormente
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1,0	Trilho e lastro
10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	1,0	Trilho e lastro
11	2909150	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas	km	1,0	Trilho e lastro

Tabela 25: Lista de atividades para construção dos Cenários 03 e 04

Sublastro de solo-cimento					
ITEM	CPU	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
1	4011209	Regularização do subleito	m2	6.050,0	Subleito
2	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - empol. 25%	m3	1.737,5	Obtenção material sublastro

3	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - rodovia em leito natural - massa espec. 1,8g/cm <sup>3</sup>	tkm	93.825,0	Transporte sublastro
4.2	4011300	Sub-base de solo melhorado com 4% de cimento e mistura na pista com material de jazida	m <sup>3</sup>	1.390,0	Construção sublastro com cimento
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões	m <sup>3</sup>	1.300,5	Lastro
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1,0	Lastro
7	3009281	Posicionamento com pórtico de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	1,0	Dormente
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola métrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixação elástica	km	1,0	Assentamento do trilho e dormente
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1,0	Trilho e lastro
10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	1,0	Trilho e lastro
11	2909150	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas	km	1,0	Trilho e lastro

Tabela 26: Lista de atividades para construção dos Cenários 05 e 06

Sublastro de solo-emulsão					
ITEM	CPU	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
1	4011209	Regularização do subleito	m <sup>2</sup>	6.050,00	Subleito
2	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - empol. 25%	m <sup>3</sup>	1.737,50	Obtenção material sublastro
3	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - rodovia em leito natural - massa espec. 1,8g/cm <sup>3</sup>	tkm	93.825,00	Transporte sublastro
4.3	4011300	Sub-base de solo melhorado com 4% de emulsão asfáltica e mistura na pista com material de jazida	m <sup>3</sup>	1.390,00	Construção sublastro com emulsão
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões	m <sup>3</sup>	1.300,50	Lastro
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1,00	Lastro
7	3009281	Posicionamento com pórtico de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	1,00	Dormente
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola métrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixação elástica	km	1,00	Assentamento do trilho e dormente
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1,00	Trilho e lastro
10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	Trilho e lastro
11	2909150	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	Trilho e lastro

Tabela 27: Lista de atividades para construção dos Cenários 07 e 08

Sublastro de CBUQ					
ITEM	CPU	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
1	4011209	Regularização do subleito	m2	6.050	Subleito
2.1	4011352	Imprimação com emulsão asfáltica	m2	6.050	
3.1	4011353	Pintura de ligação	m2	6.050	
4.4	4011462	Concreto asfáltico - faixa C - areia extraída, brita produzida	t	1.668	
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões	m3	1301	Lastro
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1	Lastro
7	3009281	Posicionamento com pórtico de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	1	Dormente
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola métrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixação elástica	km	1	Assentamento do trilho e dormente
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1	Trilho e lastro
10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	1	Trilho e lastro
11	2909150	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas	km	1	Trilho e lastro

Calculadas as quantidades de atividades, a seguir, os insumos que constam dentro das composições analisadas foram mensurados separadamente e agrupados para serem servirem de *input* no SimaPro 9.3, com base nos inventários de ciclo de vida do EcoInvent 3.6. Por isso, a Tabela 28 mostra a consolidação desses insumos, segregados pelos cenários onde os materiais foram utilizados.

Tabela 28: Consolidação dos insumos, por cenários, para a etapa de Construção

Etapa de Construção						
Código	Insumo	Unid.	Cenários 01 e 02	Cenários 03 e 04	Cenários 05 e 06	Cenários 07 e 08
E9021	Grupo gerador - 456 kVA	h				23,80
E9051	Máquina levantadora e puxadora de via - 7,4 kW	h	6,71	6,71	6,71	6,71
E9073	Bomba de concreto rebocável com capacidade de 30 m³/h - 74 kW	h	10,44	10,44	10,44	10,44
E9108	Soldadora de trilho por caldeamento na via - 400 kW	h	38,15	38,15	38,15	38,15
E9117	Carregadeira de pneus para rocha com capacidade de 2,9 m³ - 96 kW	h				2,22
E9144	Pórtico metálico com talha com capacidade de 5 t	h	38,15	38,15	38,15	38,15
E9149	Máquina de aplicação e extração de grampo elástico tipo pandrol - 6,7 kW	h	5,26	5,26	5,26	5,26
E9158	Locomot diesel-elétrica CC - bitola larga - 2.237 kW	h	68,83	68,83	68,83	68,83
E9160	Vagão plataforma PNT com capacidade de 98 t - bitola larga	h	61,88	61,88	61,88	61,88
E9162	Vagão fechado com porta para carga e descarga de paletes FLT com capacidade de 99 t - bitola larga	h	0,32	0,32	0,32	0,32
E9167	Equipamento para carga e descarga de TLS de até 250 m - 90 kW	h	1,45	1,45	1,45	1,45
E9168	Carregadeira de pneus com implemento de garfo - 195 kW	h	10,57	10,57	10,57	10,57
E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7kW/136 kW	h				49,30

E9511	Carregadeira de pneus capacidade de 3,3 m <sup>3</sup> - 213 kW	h	4,91	4,91	4,91	8,00
E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteira com caçamba com capacidade de 1,5 m <sup>3</sup> - 110 kW	h	14,19	17,38	17,38	
E9518	Grade de 24 discos rebocável de 24"	h	8,00	9,43	9,43	3,72
E9524	Motoniveladora - 93 kW	h	9,97	13,04	13,04	3,83
E9527	Martelete perfurador/rompedor a ar comprimido de 25 kg para rocha	h				3,09
E9540	Trator de esteiras com lâmina - 112 kW	h				1,48
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	h				16,75
E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	h				53,88
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW	h				17,08
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	h	65,94	65,75	65,75	27,52
E9574	Perfuratriz sobre esteiras - 145 kW	h				3,09
E9577	Trator agrícola - 77 kW	h	8,00	9,43	9,43	3,72
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m <sup>3</sup> - 188 kW	h	822,07	818,50	818,50	555,51
E9582	Carregadeira de pneus com capacidade de 2,9 m <sup>3</sup> - 96 kW	h	3,05	3,05	3,05	3,05
E9583	Distribuidor de agregados rebocável com capacidade de 1,9 m <sup>3</sup>	h	0,90	0,90	0,90	0,90
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,53 m <sup>3</sup> - 106 kW	h	2,82	2,82	2,82	19,98
E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW	h	22,16	59,39	59,39	22,16
E9599	Central de concreto com capacidade de 30 m <sup>3</sup> /h - dosadora RS	h	10,44	10,44	10,44	10,44
E9600	Caminhão betoneira com capacidade de 8 m <sup>3</sup> - 188 kW	h	1.071,16	1.113,01	1.113,01	1.113,01
E9609	Draga de sucção para extração de areia com tubo de descarga de 150 mm - 100 kW	h				18,42
E9611	Conjunto de britagem com capacidade de 80 m <sup>3</sup> /h	h				6,72
E9646	Compressor de ar portátil de 124 PCM - 27 kW	h				3,09
E9672	Caminhão basculante para rocha com capacidade de 12 m <sup>3</sup> - 188 kW	h				29,00
E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW	h				13,73
E9682	Rolo compactador liso autopropelido vibratório de 1,6 t - 18 kW	h	0,15	0,15	0,15	0,15
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	h	11,59	11,57	11,57	5,40
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW	h				17,08
E9710	Socadora automática de linha - 253 kW	h	8,03	8,03	8,03	8,03
E9712	Reguladora e distribuidora de lastro - 300 kW	h	0,24	0,24	0,24	0,24
E9718	Pórtico duplo de descarga e posicionamento de dormente - 89 kW	h	2,51	2,51	2,51	2,51
E9727	Posicionadora de trilhos - 7,4 kW	h	1,51	1,51	1,51	1,51
E9738	Máquina de esmerilhar topo e lateral de boleto - 5,2 kW	h	19,08	19,08	19,08	19,08
E9762	Rolo compactador pneus autopropelidos de 27 t - 85 kW	h	11,13	11,17	11,17	17,07
E9763	Grupo gerador - 36/40 kVA	h	10,44	10,44	10,44	10,44
M0005	Brita 0	m <sup>3</sup>	74,99	74,99	74,99	74,99
M0007	Fibra de aço para concreto	kg	13.002,60	13.002,60	13.002,60	13.002,60
M0009	Aço CP 175 RB	kg	16.579,32	16.579,32	16.579,32	16.579,32
M0010	Superplastificante	kg	909,08	909,08	909,08	909,08
M0011	Aditivo modificador de viscosidade	kg	363,63	363,63	363,63	363,63
M0012	Silicato de alumínio	kg	16.528,70	16.528,70	16.528,70	16.528,70
M0067	Tubo PE 100 PN10 com flanges - D = 160 mm	m				0,55
M0082	Areia média lavada	m <sup>3</sup>	134,99	134,99	134,99	134,99
M0099	Equipamentos para a fábrica de dormentes de concreto protendido	ISF	32,44	32,44	32,44	32,44
M0191	Brita 1	m <sup>3</sup>	74,99	74,99	74,99	74,99
M0204	Instalações físicas para a central de pré-moldagem de dormentes de concreto protendido	CMCC	5,98	5,98	5,98	5,98
M0345	Cal hidratada	kg				96.303,39
M0424	Cimento Portland CP II - 32	kg	165.287,05	251.314,15	165.287,05	165.287,05
M0560	Desmoldante para formas	l	47,84	47,84	47,84	47,84
M1941	Óleo combustível 1A	l				13.610,88

M1943	Cimento asfáltico CAP 50/70	t				1.075,77
M1947	Emulsão asfáltica catiônica, a granel RM-1C	t			86.027,10	10.587,50
M2001	Dispositivo de ancoragem de fixação elástica pandrol	un	6.668,00	6.668,00	6.668,00	6.668,00
M2042	Emulsão explosiva encartuchada	kg				1,42
M2062	Coroa para perfuratriz T38 - D = 2 1/2"	un				0,0013
M2065	Haste para perfuratriz de esteira T38 de 1 1/2" x 3 m	un				0,0010
M2066	Luva para perfuratriz de esteira T38 - D = 1 1/2"	un				0,0010
M2067	Punho para perfuratriz de esteira T38 - D = 1 1/2"	un				0,0008
M2110	Mandíbula móvel C96 Std	un				0,01
M2111	Mandíbula fixa C96 Std	un				0,03
M2112	Manta HP200	un				0,01
M2113	Revestimento bojo Std HP200	un				0,02
M2114	Cunha lateral superior C96	un				0,0045
M2115	Cunha lateral inferior C96	un				0,01
M2138	Nonel de coluna com 12 m	un				0,06
M2141	Nonel de iniciação para fogacho com 6 m	un				0,04
M2143	Nonel de ligação	un				0,02
M2145	Série de brocas S-12 - D = 22 mm	un				0,01
M2146	Nonel iniciador com 150 m	un				0,0022
M2204	Trilho TR 68, aço carbono com 12 m de comprimento	t	135,12	135,12	135,12	135,12
M2214	Grampo elástico Pandrol	un	6.668,00	6.668,00	6.668,00	6.668,00
M2217	Placa de apoio para TR 68 para fixação elástica	un	3.334,00	3.334,00	3.334,00	3.334,00
M2229	Tala de junção TJ 68 com 6 furos, não isolada	par	8,00	8,00	8,00	8,00
M2233	Parafuso - D = 25 mm, com porca e arruela de pressão para tala de junção	un	48,00	48,00	48,00	48,00
M2356	Brita padrão para lastro ferroviário	m³	39,44	39,44	39,44	39,44
M2358	Palmita de borracha para dormente de concreto	un	3.334,00	3.334,00	3.334,00	3.334,00
XXCBUQ1	Areia extraída com draga de sucção tipo bomba	t				552,52
XXCBUQ2	Brita produzida em central de britagem de 80 m³/h	m3				446,25

Finalmente, essas quantidades foram organizadas de modo a permitir a inserção dos valores obtidos no *software* de avaliação de ciclo de vida, para a fase de construção. A seguir, a seção 4.3.2 trata da mensuração dos serviços e insumos para a etapa de manutenção.

#### 4.3.2 Quantidade de insumos para Manutenção de 01 km de via

Para as atividades de manutenção, a estratégia adotada foi segmentada em duas grandes fases: a primeira trata das atividades executadas durante a vida útil da estrutura, como socaria do lastro, fresagem do trilho, aferição geométrica automatizada e complemento de lastro; já a segunda diz respeito aos serviços realizados após o fim da vida útil estimado para o subleito, sendo compilados no que convencionou-se denominar neste estudo de reconstrução da via permanente, o que consistiu na remoção de todos os elementos do pavimento, com certo reaproveitamento de materiais, e replantação da plataforma no local mantendo as mesmas características geométricas da construção.

É preciso reforçar que as frequências adotadas foram obtidas com base na literatura, diante disso algumas atividades precisaram ser compatibilizadas, considerando

o recomendado por Krezo *et al.* (2016), em seu estudo paramétrico sobre emissões de gases estufa para planejamento de atividades de reconstrução ferroviária, Caetano & Teixeira (2016), em seu trabalho acerca do modelo estratégico para otimização das operações de reconstrução da plataforma a nível de rede, e Bortoli *et al.*, (2020), ao trazerem uma proposta de modelo para avaliar os impactos ambientais gerados pela infraestrutura de transporte ferroviário de alta velocidade.

Como resultado da análise, a frequência das atividades de fresagem do trilho, socaria do lastro, recomposição do lastro e aferição geométrica automatizada foi considerada como anual. E, por fim, a frequência adotada a atividade de reconstrução foi de 10 anos, conforme Caetano & Teixeira (2016), sendo considerado o reaproveitamento dos materiais detalhado na Tabela 29. Além disso, a frequência se encontra alinhada com o tempo de vigência dos contratos de concessão, ou seja, de 30 anos (TCU, 2019), possibilitando que as concessionárias executem pelo menos duas intervenções durante a operação da via.

Tabela 29: Frequência das atividades e % de reaproveitamento de materiais

Componente	Atividades	Frequência (anos)	Segmento tratado	% Reaproveitamento
Pavimento completo	Reconstrução	10	100%	Lastro: 40%; Dormente: 31%; Trilho: 16%
Trilho	Fresagem	1	100%	
Lastro	Socaria	1	85%	
	Recomposição	1	15cm	
Geometria da via	Inspeção automatizada	1	100%	

Por conseguinte, definidos os critérios de manutenção, foram estimadas as quantidades para as atividades, com base nos serviços existentes no SICRO. Logo, a Tabela 30 a Tabela 34 apresentam as quantidades das atividades calculadas para a manutenção dos cenários estudados, para análise a nível de projeto.

Tabela 30: Lista de atividades para manutenção dos Cenários 01 a 08

Manutenção - Cenários 01 a 08					
ITEM	CÓDIGO	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões	m <sup>3</sup>	723,75	Lastro - Complemento
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões	m <sup>3</sup>	390,15	Lastro - Substituição
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1,00	Lastro - Complemento
7	3009281	Posicionamento com pórtico de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	1,00	Dormente – Substituição
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola metrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixacao elástica	km	1,00	Trilho - Substituição
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1,00	Trilho - Substituição

10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	0,85	Lastro – Socaria
11	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	0,30	Lastro - Substituição
12	2909152	Aferição da geometria da via com carro controle	km	1,00	Controle tecnológico
13	CPU 03	Fresagem de trilho	km	1,00	Trilho – Fresagem
19	CPU 04	Desguarnecimento do lastro	km	0,30	Lastro - Substituição

Tabela 31: Lista de atividades para reconstrução dos Cenários 01 e 02

Sublastro de solo arenoso – Reconstrução					
ITEM	CÓDIGO	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
20	CPU 05	Demolicao de via, bitola larga, 1.667 dormentes de concreto/km, trilho TR 68, barra com 12 m de comprimento, com separacao e empilhamento	km	1,00	Desmontagem da grade, inclusive transporte do material não utilizado para descarte. Reuso aplicado direto na CPU
21	5502857	Escavação, carga e transporte de material de 2ª categoria na distância de 3.000 m - caminho de serviço em leito natural	m3	1.390,00	Remoção da camada de sublastro
1	4011209	Regularização do subleito	m2	6.050,00	Subleito
2	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	m3	1.737,50	Obtenção material sublastro
3	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural	tkm	93.825,00	Transporte sublastro
4.1	4011227	Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida	m3	1.390,00	Construção sublastro
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhos	m3	780,30	Lastro
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1,00	Lastro
7	3009281	Posicionamento com pórtico de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	0,69	Dormente
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola métrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixação elástica	km	0,84	Assentamento do trilho e dormente
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1,00	
10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	
11	2909150	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	

Tabela 32: Lista de atividades para reconstrução dos Cenários 03 e 04

Sublastro de solo-cimento – Reconstrução					
ITEM	CÓDIGO	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
20	CPU 05	Demolicao de via, bitola larga, 1.667 dormentes de concreto/km, trilho TR 68, barra com 12 m de comprimento, com separacao e empilhamento	km	1,00	Desmontagem da linha, inclusive transporte do material não utilizado para descarte. Reuso aplicado direto na CPU
21	5502857	Escavação, carga e transporte de material de 2ª categoria na distância de 3.000 m - caminho de serviço em leito natural	m3	1.390,00	Remoção da camada de sublastro
1	4011209	Regularização do subleito	m2	6.050,00	Subleito
2	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	m3	1.737,50	Obtenção material sublastro

3	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - rodovia em leito natural	tkm	93.825,00	Transporte sublastro
4.2	4011300	Sub-base de solo melhorado com 4% de cimento e mistura na pista com material de jazida	m3	1.390,00	Construção sublastro com cimento
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões	m3	780,30	Lastro
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1,00	Lastro
7	3009281	Posicionamento com pórtico de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	0,69	Dormente
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola métrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixação elástica	km	0,84	Assentamento do trilho e dormente
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1,00	
10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	
11	2909150	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	

Tabela 33: Lista de atividades para reconstrução dos Cenários 05 e 06

Sublastro de solo-emulsão – Reconstrução					
ITEM	CÓDIGO	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
20	CPU 05	Demolicao de via, bitola larga, 1.667 dormentes de concreto/km, trilho TR 68, barra com 12 m de comprimento, com separacao e empilhamento	km	1,00	Desmontagem da linha, inclusive transporte do material não utilizado para descarte. Reuso aplicado direto na CPU
21	5502857	Escavação, carga e transporte de material de 2ª categoria na distância de 3.000 m - caminho de serviço em leito natural	m3	1.390,00	Remoção da camada de sublastro
1	4011209	Regularização do subleito	m2	6.050,00	Subleito
2	4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	m3	1.737,50	Obtenção material sublastro
3	5914359	Transporte com caminhão basculante de 10 m <sup>3</sup> - rodovia em leito natural	tkm	93.825,00	Transporte sublastro
4.3	4011300	Sub-base de solo melhorado com 4% de emulsão asfáltica e mistura na pista com material de jazida	m3	1.390,00	Construção sublastro com emulsão
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões	m3	780,30	Lastro
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1,00	Lastro
7	3009281	Posicionamento com pórtico de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	0,69	Dormente
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola métrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixação elástica	km	0,84	Assentamento do trilho e dormente
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1,00	
10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	

11	2909150	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	
----	---------	--	----	------	--

Tabela 34: Lista de atividades para reconstrução dos Cenários 07 e 08  
Sublastro de CBUQ - Reconstrução

ITEM	CÓDIGO	SERVIÇO	UNID.	QUANT.	Observações
20	CPU 05	Demolicao de via, bitola larga, 1.667 dormentes de concreto/km, trilho TR 68, barra com 12 m de comprimento, com separacao e empilhamento	km	1,00	Desmontagem da linha, inclusive transporte do material não utilizado para descarte. Reuso aplicado direto na CPU
21	5502886	Escavação, carga e transporte de material de 3ª categoria na distância de 3.000 m - caminho de serviço em leito natural	m3	667,20	Remoção da camada de sublastro
1	4011209	Regularização do subleito	m2	6.050,00	Subleito
2.1	4011352	Imprimação com emulsão asfáltica	m2	6.050,00	
3.1	4011353	Pintura de ligação	m2	6.050,00	
4.4	4011462	Concreto asfáltico - faixa C - areia extraída, brita produzida	t	1.668,00	
5	3009091	Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhos	m3	780,30	Lastro
6	2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	1,00	Lastro
7	3009281	Posicionamento com pórtilco de dormentes de concreto, bitola larga - 1.667 un/km	km	0,69	Dormente
8	3009248	Posicionamento e assentamento mecanizado de trilhos TR 68, comprimento de 240 m, bitola métrica ou larga, dormente de concreto, 1.667 un/km, fixação elástica	km	0,84	Assentamento do trilho e dormente
9	3009133	Pré-alinhamento mecanizado da grade	km	1,00	
10	2909149	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, segundo levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	
11	2909150	Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas	km	1,00	

Calculadas as quantidades de atividades, a seguir, os insumos que constam dentro das composições analisadas foram mensurados separadamente e agrupados para serem servirem de *input* no SimaPro 9.3, com base nos inventários de ciclo de vida do EcoInvent 3.6. Dessa maneira, a Tabela 35 a Tabela 36 mostram a consolidação desses insumos, segregados pelos cenários onde os materiais foram utilizados.

Tabela 35: Consolidação dos insumos, por atividades, para a etapa de Manutenção

Etapa de Manutenção						
CÓD.	Insumo	Unid.	Fresagem de Trilho	Socaria de Lastro	Recomposição de lastro	Aferição de geometria
E9065	Carro controle ferroviário - 186 kW	h				0,04
E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,3 m <sup>3</sup> - 213 kW	h			2,73	
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m <sup>3</sup> - 188 kW	h			175,65	
E9583	Distribuidor de agregados rebocável com capacidade de 1,9 m <sup>3</sup>	h			0,50	
E9710	Socadora automática de linha - 253 kW	h		4,10		
E9712	Reguladora e distribuidora de lastro - 300 kW	h			0,24	
INS-04	Fresadora de trilho - 118 kW	h	1,19			
INS-05	Desguamecedora de lastro - 300 kW	h			10,00	
M2356	Brita padrão para lastro ferroviário	m <sup>3</sup>			21,95	

Tabela 36: Consolidação dos insumos, por cenários, para a Reconstrução

Etapa de Manutenção - Reconstrução					
Cód	Descrição	Cenário 01 e 02	Cenário 03 e 04	Cenário 05 e 06	Cenário 07 e 08
E9021	Grupo gerador - 456 kVA				23,80
E9051	Máquina levantadora e puxadora de via - 7,4 kW	6,71	6,71	6,71	6,71
E9073	Bomba de concreto rebocável com capacidade de 30 m <sup>3</sup> /h - 74 kW	7,25	7,25	7,25	7,25
E9108	Soldadora de trilho por caldeamento na via - 400 kW	32,03	32,03	32,03	32,03
E9117	Carregadeira de pneus para rocha com capacidade de 2,9 m <sup>3</sup> - 96 kW				2,22
E9144	Pórtico metálico com talha com capacidade de 5 t	32,03	32,03	32,03	32,03
E9149	Máquina de aplicação e extração de grampo elástico tipo pandrol - 6,7 kW	4,42	4,42	4,42	4,42
E9157	Locomotiva diesel-elétrica CC - bitola métrica - 2.237 kW	0,55	0,55	0,55	0,55
E9158	Locomotiva diesel-elétrica CC - bitola larga - 2.237 kW	57,06	57,06	57,06	57,06
E9159	Vagão plataforma PNE com capacidade de 82 t - bitola métrica	5,50	5,50	5,50	5,50
E9160	Vagão plataforma PNT com capacidade de 98 t - bitola larga	59,70	59,70	59,70	59,70
E9162	Vagão fechado com porta para carga e descarga de paletes FLT com capacidade de 99 t - bitola larga	3,49	3,49	3,49	3,49
E9164	Vagão hopper aberto com descarga automática HNT com capacidade de 63 m <sup>3</sup> - bitola larga	19,41	19,41	19,41	19,41
E9167	Equipamento para carga e descarga de TLS de até 250 m - 90 kW	1,22	1,22	1,22	1,22
E9168	Carregadeira de pneus com implemento de garfo - 195 kW	11,77	11,77	11,77	11,77
E9509	Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7kW/136 kW				49,30
E9511	Carregadeira de pneus com capacidade de 3,3 m <sup>3</sup> - 213 kW	21,23	21,23	21,23	20,25
E9515	Escavadeira hidráulica sobre esteira com caçamba com capacidade de 1,5 m <sup>3</sup> - 110 kW	14,19	17,38	17,38	
E9518	Grade de 24 discos rebocável de 24"	8,00	9,43	9,43	3,72
E9524	Motoniveladora - 93 kW	9,97	13,04	13,04	3,83
E9527	Martelete perfurador/rompedor a ar comprimido de 25 kg para rocha				3,09
E9540	Trator de esteiras com lâmina - 112 kW				1,48
E9541	Trator de esteiras com lâmina - 259 kW	7,84	7,84	7,84	3,76
E9545	Vibroacabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW				16,75

E9558	Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l				53,88
E9559	Aquecedor de fluido térmico - 12 kW				17,08
E9565	Trator de esteiras com escarificador - 259 Kw	5,33	5,33	5,33	2,56
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	65,94	65,75	65,75	27,52
E9574	Perfuratriz sobre esteiras - 145 kW				3,09
E9577	Trator agrícola - 77 kW	8,00	9,43	9,43	3,72
E9579	Caminhão basculante com capacidade de 10 m <sup>3</sup> - 188 kW	692,90	689,32	689,32	426,33
E9582	Carregadeira de pneus com capacidade de 2,9 m <sup>3</sup> - 96 kW	2,56	2,56	2,56	2,56
E9583	Distribuidor de agregados rebocável com capacidade de 1,9 m <sup>3</sup>	0,54	0,54	0,54	0,54
E9584	Carregadeira de pneus com capacidade de 1,53 m <sup>3</sup> - 106 kW	1,96	1,96	1,96	19,12
E9592	Caminhão carroceria com capacidade de 15 t - 188 kW	15,38	52,62	52,62	15,38
E9599	Central de concreto com capacidade de 30 m <sup>3</sup> /h - dosadora RS	7,25	7,25	7,25	7,25
E9600	Caminhão betoneira com capacidade de 8 m <sup>3</sup> - 188 kW	772,48	772,48	772,48	772,48
E9609	Draga de sucção para extração de areia com tubo de descarga de 150 mm - 100 kW				18,42
E9611	Conjunto de britagem com capacidade de 80 m <sup>3</sup> /h				6,72
E9646	Compressor de ar portátil de 124 PCM - 27 kW				3,09
E9667	Caminhão basculante com capacidade de 14 m <sup>3</sup> - 188 kW	52,68	52,68	52,68	25,29
E9672	Caminhão basculante para rocha com capacidade de 12 m <sup>3</sup> - 188 kW				29,00
E9681	Rolo compactador liso tandem vibratório autopropelido de 10,4 t - 82 kW				13,73
E9682	Rolo compactador liso autopropelido vibratório de 1,6 t - 18 kW	0,09	0,09	0,09	0,09
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	11,59	11,57	11,57	5,40
E9689	Usina de asfalto a quente gravimétrica com capacidade de 100/140 t/h - 260 kW				17,08
E9710	Socadora automática de linha - 253 kW	8,03	8,03	8,03	8,03
E9712	Reguladora e distribuidora de lastro - 300 kW	0,24	0,24	0,24	0,24
E9718	Pórtico duplo de descarga e posicionamento de dormente - 89 kW	1,74	1,74	1,74	1,74
E9727	Posicionadora de trilhos - 7,4 kW	1,26	1,26	1,26	1,26
E9733	Tirefonadora/parafusadora - 6,7 kW	11,16	11,16	11,16	11,16
E9735	Máquina para serrar trilho - 5,0 kW	11,16	11,16	11,16	11,16
E9738	Máquina de esmerilhar topo e lateral de boleto - 5,2 kW	16,01	16,01	16,01	16,01
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	11,13	11,17	11,17	17,07
E9763	Grupo gerador - 36/40 kVA	7,25	7,25	7,25	7,25
M0005	Brita 0	52,05	52,05	52,05	52,05
M0007	Fibra de aço para concreto	9.024,38	9.024,38	9.024,38	9.024,38
M0009	Aço CP 175 RB	11.506,78	11.506,78	11.506,78	11.506,78
M0010	Superplastificante	630,94	630,94	630,94	630,94
M0011	Aditivo modificador de viscosidade	252,38	252,38	252,38	252,38
M0012	Silicato de alumínio	11.471,65	11.471,65	11.471,65	11.471,65
M0067	Tubo PE 100 PN10 com flanges - D = 160 mm				0,55
M0082	Areia média lavada	93,69	93,69	93,69	93,69
M0099	Equipamentos para a fábrica de dormentes de concreto protendido	22,51	22,51	22,51	22,51
M0191	Brita 1	52,05	52,05	52,05	52,05
M0204	Instalações físicas para a central de pré-moldagem de dormentes de concreto protendido	4,15	4,15	4,15	4,15
M0345	Cal hidratada				96.303,39
M0424	Cimento Portland CP II - 32	114.716,52	200.743,62	114.716,52	114.716,52
M0560	Desmoldante para formas	33,21	33,21	33,21	33,21
M1941	Óleo combustível 1A				13.610,88

M1943	Cimento asfáltico CAP 50/70				1.075,77
M1947	Emulsão asfáltica catiônica, a granel RM-1C			86.027,10	10.587,50
M2001	Dispositivo de ancoragem de fixação elástica pandrol	4.627,89	4.627,89	4.627,89	4.627,89
M2042	Emulsão explosiva encartuchada				1,42
M2062	Coroa para perfuratriz T38 - D = 2 1/2"				0,0013
M2065	Haste para perfuratriz de esteira T38 de 1 1/2" x 3 m				0,001
M2066	Luva para perfuratriz de esteira T38 - D = 1 1/2"				0,001
M2067	Punho para perfuratriz de esteira T38 - D = 1 1/2"				0,0008
M2110	Mandíbula móvel C96 Std				0,0134
M2111	Mandíbula fixa C96 Std				0,0268
M2112	Manta HP200				0,0134
M2113	Revestimento bojo Std HP200				0,0178
M2114	Cunha lateral superior C96				0,0045
M2115	Cunha lateral inferior C96				0,0089
M2138	Nonel de coluna com 12 m				0,0617
M2141	Nonel de iniciação para fogacho com 6 m				0,0441
M2143	Nonel de ligação				0,0242
M2145	Série de brocas S-12 - D = 22 mm				0,0103
M2146	Nonel iniciador com 150 m				0,0022
M2204	Trilho TR 68, aço carbono com 12 m de comprimento	113,43	113,43	113,43	113,43
M2214	Grampo elástico Pandrol	5.597,65	5.597,65	5.597,65	5.597,65
M2217	Placa de apoio para TR 68 para fixação elástica	2.798,83	2.798,83	2.798,83	2.798,83
M2229	Tala de junção TJ 68 com 6 furos, não isolada	6,72	6,72	6,72	6,72
M2233	Parafuso - D = 25 mm, com porca e arruela de pressão para tala de junção	40,30	40,30	40,30	40,30
M2356	Brita padrão para lastro ferroviário	23,66	23,66	23,66	23,66
M2358	Palmilha de borracha para dormente de concreto	2.798,83	2.798,83	2.798,83	2.798,83
XXCBUQ1	Areia extraída com draga de sucção tipo bomba				552,52
XXCBUQ2	Brita produzida em central de britagem de 80 m³/h				446,25

Concluída a etapa de levantamento de insumos a partir das composições do SICRO, seguiu-se o processo de correlação entre tais *outputs* e as composições do inventário do EcoInvent 3.6 existente dentro do SimaPro 9.3, sempre priorizando as de origem brasileira, ou seja, a transposição entre as bases de inventários de serviços de engenharia e de impacto ambiental. Diante disso, alguns itens foram agregados, como os equipamentos, ou segregados, como o material e a aplicação do CBUQ, conforme a disponibilidade da base de dados de inventário.

#### 4.4 Caracterização do Impacto de Potencial de Aquecimento Global

Como etapa inicial da ACV, a definição do objetivo e escopo permitiu o delineamento do objeto do estudo, cujo foco trata da infraestrutura ferroviária no Brasil, mais especificamente do pavimento ferroviário, considerando as etapas desde a extração

do material, beneficiamento/manufatura, construção, manutenção e reconstrução, assim como o transporte entre cada fase. Diante disso, a mensuração do impacto ambiental, dada pela caracterização, empregada para avaliação geral dos cenários e expressa pela Equação 07, adaptada de Hermann *et al.* (2007), é apresentada a seguir:

$$\text{Impacto total}_{CI} = E + B + C + M\&R + T \quad (7)$$

onde

*CI*: categoria de impacto

*E*: impacto relativa à extração de matéria-prima

*B*: impacto relativa ao beneficiamento/manufatura

*C*: impacto relativa à construção

*M&R*: impacto relativa à manutenção e reconstrução

*T*: impacto relativa ao transporte

Diante disso, destaca-se que a caracterização da fase de construção abrangeu também àqueles referentes à extração e beneficiamento/manufatura, assim como o transporte realizado. Já para a caracterização de impacto das etapas de manutenção e reconstrução, esta pode ser detalhada pela Equação 08 a seguir:

$$\text{Impacto Man\&Reconst} = (I_{\text{Manutenção}_{CI}} \times f_M) + (I_{\text{Reconstrução}_{CI}} \times f_R) \quad (8)$$

onde

*I* Manutenção *CI*: impacto relativo às intervenções anuais

*I* Reconstrução *CI*: impacto relativo às intervenções de reconstrução

*f<sub>M</sub>*: frequência de intervenções baseado na Tabela 18, para o período de 100 anos

*f<sub>R</sub>*: frequência de intervenções durante a vida de serviço, sendo *f<sub>R</sub>* em função da vida útil estimada do elemento estrutural usado como critério de desempenho,  $f_R = 100/(\text{vida útil}_{\text{elemento}})$

Portanto, é possível notar que a estimativa de vida útil da estrutura tem significativa relevância na caracterização do impacto, uma vez que representa o *input* para a etapa de manutenção, implicando diretamente na análise do *trade-off* entre uso de material com maior impacto, na fase de construção, *versus* número de frequência de intervenções de manutenção e reconstrução, quando há o emprego de material com menor impacto ambiental na fase de implantação da via.

Logo, para a estimativa do impacto de potencial de aquecimento global (GWP100a) deste estudo, foi utilizado o inventário do EcoInvent 3.6, priorizando, quando possível, as composições desenvolvidas para a realidade brasileira, como no caso do cimento Portland e areia para a camada de sublastro, com auxílio do *software* SimaPro 9.3. Para tanto, assim como no levantamento de quantidades de insumos da seção 4.3, os

cenários foram agrupados conforme o material empregado no sublastro, visto que a variação de umidade não tem influência no processo de estimativa de insumos.

Para a execução dos serviços e o transporte dos materiais, foram empregados diferentes equipamentos, os quais foram agregados devido às limitações da base de dados utilizada. Especificamente para o transporte, foram utilizados os modos ferroviário e rodoviário, sendo que o consumo de diesel para os caminhões já consta nos inventários dos veículos, enquanto para a ferrovia foram considerados o combustível, a locomotiva, os vagões e o lubrificante separadamente. Além disso, os cenários foram separados entre as etapas de Construção e Manutenção, sendo esta última ainda desdobrada em Reconstrução, Aferição Geométrica, Recomposição do Lastro, Fresagem do Trilho e Socaria do Lastro. Portanto, a Tabela 37 e Tabela 38 apresentam os inventários da base de dados do EcoInvent 3.6 utilizado para a ACV do estudo aqui proposto. As quantidades utilizadas foram aquelas consolidadas no levantamento da seção 4.3.

É interessante mencionar que, nos inventários selecionados, a ACV dos equipamentos, assim como os caminhões, locomotiva e vagões, é considerada desde a construção do equipamento até o consumo do combustível na operação destes. Isto posto, baseado no objetivo e escopo do estudo de caso em análise, foram considerados os inventários que admitem os materiais postos em obra, ou seja, do tipo “*market for*”.

Tabela 37: Inventários de ciclo de vida utilizadas na etapa de Construção

Composição	Cenário	Unidade	Descrição
<b>Materiais e Componentes</b>			
Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material para trilho - Ref. von Rozycki et al. (2003). Ecology profile of the German High-Speed Rail Passenger Transport System, ICE. International Journal of Life Cycle Assessment. 8(2), pp. 83-91
Fibre-reinforced concrete {BR}  market for fibre-reinforced concrete, steel   Cut-off, U	1 a 8	m3	Material para dormente - Ref. von Rozycki C., et al. (2003). Ecology profile of the German High-Speed Rail Passenger Transport System, ICE. International Journal of Life Cycle Assessment. 8(2), pp. 83-91. Quant: 0,156m3/pcx1667=260,05m3
Reinforcing steel {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material para dormente - Ref. von Rozycki et al. (2003). Ecology profile of the German High-Speed Rail Passenger Transport System, ICE. International Journal of Life Cycle Assessment. 8(2), pp. 83-91
Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material para dormente
Sodium silicate, solid {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Aditivo de concreto para dormente - considerado em substituição ao Silicato de alumínio, visto o uso de silicato de alumínio e sódio em peças de concreto.
White mineral oil, at plant/RNA System - Copied from USLCI	1 a 8	Kg	Material para desmoldante de formas e aditivo modificador de viscosidade - Densidade = 1g/cm3

Manufatura Dormente Concreto - Concrete block {BR}  concrete block production   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Produção do dormente: 321,95 kg/pç -> [(0,156m3 x 2t/m3) + (16.579kg/1667un)] -> 321,95*1667 = 536.690,65 kg
Clip para fixação ferroviária - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material para fixação do dormente - 0,80kg/pç - Ref. E2055 Rail Clip - Railtrackfastener.com - 6.668 pç x 0,80 kg/pç =5.334,40 kg
Parafuso fixação tala - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material (Parafuso) para fixação tala/trilho -Rail Bolt - AREMA fish bolt (1) - 0,417kg/pç - Railtrackfastener.com -> 48 pç x 0,417kg/pç =20,016 kg
Tala juncao trilhos - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material para junção de trilhos - 115RE Rail Joints - 4 Holes - AREMA - 16,7kg/pç, Railtrackfastener.com - 16 pç x 16,7kg/pç =
Tie plate (placa fix.) - - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material para fixação do trilho no dormente - Tipo Rph 1/210 FVZ - 4 Furos - 10,69kg/pç. Railtrackfastener.com -> 6.668 pç x 10,69kg/pç =71.280,92kg
Synthetic rubber {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Palmita -Rail Pad-25x30mm-esp 6mm. Maes, J.; Sol, H.; Guillaume, P. Measurements of the dynamic railpad properties. Journal of Sound and Vibration. 2006. Densidade: 1,21g/cm3 (deltarubber.co.uk - polyurethane rubber) - 25x30x6x1,21=5,445kg/pç x 3334pç
Building, hall, steel construction {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	m2	Instalações físicas para a Central de Prémoldagem de dormente. Área estimada: 1.500 m2 - Vollert.de - Depreciação 350mil pç/ano = 1667pç/(350.000pç x 10anos) x 1500m2 =0,714m2
Gravel, crushed {RoW}  market for gravel, crushed   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material para lastro - Ref. von Rozycki et al. (2003). Ecology profile of the German High-Speed Rail Passenger Transport System, ICE. International Journal of Life Cycle Assessment. 8(2), pp. 83-91. Quant: 39,44m3 / 2,4 (t/m3) =16,43t
Sand {BR}  market for sand   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Material para sublastro - 1º Inventário de Materiais Brasileiros - Ministério do Meio Ambiente. Quantidade: 1.737,5m3 / 1,8 (t/m3) = 965,28t
Lubricating oil {RoW}  market for lubricating oil   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Lubrificante (locomotiva) calculado com base na composição "Diesel, burned in building machine {GLO}  processing  Cut-off, U". Usando a proporção do consumo de diesel para estimar a quantidade de óleo lubrificante.
Lubricating oil {RER}  market for lubricating oil   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Lubrificante calculado (locomotiva) com base na composição "Diesel, burned in building machine {GLO}  processing  Cut-off, U". Usando a proporção do consumo de diesel para estimar a quantidade de óleo lubrificante.
Diesel {BR}  market for diesel   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Combustível para equipamentos de construção: locomotiva
<b>Processos</b>			
Locomotive {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	P	Locomotiva considerada com vida útil para 30 anos. Ref. Dal Pai, 2012. LCC de um motor de locomotiva. 30 anos = 259.200 horas. CPU: 68,83h -> p=68,83/259200 = 0,00027
Maintenance, locomotive {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	P	Considerada 1 manutenção da locomotiva por ano.
Goods wagon {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	P	Vagão considerado com vida útil para 30 anos. Ref. Dal Pai, 2012. 30 anos = 259.200 horas. CPU = 62,2h -> p=0,00024
Maintenance, goods wagon {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	P	Considerada 1 manutenção do vagão por ano. Admitida a Composição de 100 vagões.
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state {GLO}  machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   Cut-off, U	1 a 8	Hr	Equipamentos considerados: máquina de aplicação e extração de grampo elástico; máquina para esmerilhar boleto; máquina

			levantadora de via; posicionadora de trilhos; rolo compactador liso vibratório.
Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	1 a 8	h	Equip. considerados: cam.. basc. 10m3; Cam. carroc. 15t; cam. tanq. 10.000 l; carregad. pneus 1,53m3; carregad. pneus 2,9m3; carregad. pneus 3,3m3; carregad. pneus com garfo; equip. carga/desc. TLS; rolo comp. 27t; rolo comp. 11,6t; trator agríc; motoniv.
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state   Cut-off, U	1 a 8	h	Equip. considerados: pórtico duplo desc. e posic. dormente; pórtico metálico 5t; reguladora e distrib. lastro; socadora autom. linha; soldadora trilho.
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators {GLO}  machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators   Cut-off, U	1 a 8	h	Grupo Gerador 40 kVA
Agricultural trailer {GLO}  market for   Cut-off, U	1 a 8	Kg	Considerado para Distribuidor de agregado rebocável, e grade de discos rebocável. Peso estimado: 800 kg (ref. Marca Romanelli - EAR800)
Cement, limestone 6-10% {BR}  market for cement, limestone 6-10%   Cut-off, U	3 e 4	Kg	Material para sublastro - Mistura solo-cimento - 86.027,10 kg
Bitumen seal {GLO}  market for   Cut-off, U	5 e 6	Kg	Material para sublastro - Mistura solo-emulsão - 86.027,10 kg
Bitumen adhesive compound, hot {GLO}  market for   Cut-off, U	7 e 8	Kg	Material para execução de CBUQ (produção e transporte) - Referência: material usado na composição de construção do de rodovia do SIMPRO (Road {RoW}  road construction  Cut-off, U)
Aplicação CBUQ - Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  market for   Cut-off, U	7 e 8	h	Aplicação de CBUQ como camada de sublastro (vibroacabadora, trator de esteira, rolo comp. liso vibrat., rolo comp. pneus. caminhão tanque)

Tabela 38: Inventários de ciclo de vida utilizadas na etapa de Manutenção

Composição	Atividade	Unidade	Descrição
<b>Materiais e Componentes</b>			
Gravel, crushed {RoW}  market for gravel, crushed   Cut-off, U	Recomposição do Lastro	Kg	Material para lastro - Ref. von Rozycki et al. (2003). Ecology profile of the German High-Speed Rail Passenger Transport System, ICE. International Journal of Life Cycle Assessment. 8(2), pp. 83-91. Quant: 21,95m3 / 2,4 (t/m3) = 9,146t
<b>Processos</b>			
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state   Cut-off, U	Aferição geométrica	h	Carro controle ferroviário
Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	Recomposição do Lastro	h	Equip. considerados: cam.. basc. 10m3; carregad. pneus 3,3m3; reguladora e distribuidora lastro; rolo compactador listo vibrat. 1,6t
Agricultural trailer {GLO}  market for   Cut-off, U	Recomposição do Lastro	Kg	Considerado para Distribuidor de agregado rebocável. Peso estimado: 400 kg (ref. Marca Romanelli - EAR800)
Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	Fresagem do trilho	h	Fresadora de trilho
Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	Socaria	H	Socadora automática de linha

No que concerne às atividades de reconstrução, integrante da manutenção, os inventários de ciclo de vida empregados foram os mesmos do estágio de construção, sendo a variação caracterizada na quantidade dos insumos consumidos. Isto porque, mesmo nos serviços específicos de reconstrução, como a desmontagem da plataforma, os inventários se mostravam compatíveis.

Adiante, para este estudo foi utilizado o método CML-IA, visto sua abrangência global e a inexistência de um método exclusivo para o Brasil. A escolha do método também teve como motivação a intenção de manter os resultados comparáveis com a maioria dos estudos disponíveis na literatura, como apresenta o estudo de revisão de Olugbenga *et al.* (2019), que conclui que predomina entre os estudos de ACV aqueles que utilizam métodos baseados em processos.

É interessante reforçar que, para o presente estudo, não foram usados dados normalizados.

Portanto, como processo final, os dados foram exportados para o formato de planilha eletrônica e consolidados para possibilitar a análise da categoria de impacto de potencial de aquecimento global.

A seguir, são apresentados os resultados do processo de caracterização de impacto de potencial de aquecimento global, detalhado em: *i. input do SimaPro 9.3, com emprego dos inventários de ciclo de vida do EcoInvent, utilizando as quantidades extraídas do levantamento quantitativo pelo uso do SICRO 3.6; ii. caracterização do impacto de potencial de aquecimento global propriamente dito, segregado por cenários e etapa do ciclo de vida; iii. considerações sobre a matriz energética do Brasil.*

#### 4.4.1 *Input* de dados no software de ACV

A Tabela 39 a Tabela 41, a seguir, apresentam os *inputs* realizados no SimaPro, após o processo de transposição entre os insumos extraídos do SICRO e inventários de ciclo de vida, utilizando os dados do EcoInvent 3.6.

Tabela 39: Consolidação dos quantitativos dos inventários de ciclo de vida, segregados pelos cenários, para a etapa de Construção

Etapa de Construção					
Materiais					
Composição	Unidade	Cenário 01 e 02	Cenário 03 e 04	Cenário 05 e 06	Cenário 07 e 08
Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	135.120,00	135.120,00	135.120,00	135.120,00
Fibre-reinforced concrete {BR}  market for fibre-reinforced concrete, steel   Cut-off, U	m3	260,05	260,05	260,05	260,05
Reinforcing steel {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	16.579,32	16.579,32	16.579,32	16.579,32
Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	909,80	909,80	909,80	909,80
Sodium silicate, solid {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	16.528,70	16.528,70	16.528,70	16.528,70
White mineral oil, at plant/RNA System - Copied from USLCI	kg	411,47	411,47	411,47	411,47
Manufatura Dormente Concreto - Concrete block {BR}  concrete block production   Cut-off, U	kg	536.690,65	536.690,65	536.690,65	536.690,65
Clip para fixação ferroviária - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	5.334,40	5.334,40	5.334,40	5.334,40
Parafuso fixação tala - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	20,02	20,02	20,02	20,02
Tala juncao trilhos - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	267,20	267,20	267,20	267,20
Tie plate (placa fix.) - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	71.280,92	71.280,92	71.280,92	71.280,92
Synthetic rubber {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	18.153,63	18.153,63	18.153,63	18.153,63
Building, hall, steel construction {GLO}  market for   Cut-off, U	m2	0,71	0,71	0,71	0,71
Gravel, crushed {RoW}  market for gravel, crushed   Cut-off, U	kg	16.430,00	16.430,00	16.430,00	16.430,00
Cement, limestone 6-10% {BR}  market for cement, limestone 6-10%   Cut-off, U	kg		86.027,10		
Bitumen seal {GLO}  market for   Cut-off, U	kg			86.027,10	
Bitumen adhesive compound, hot {GLO}  market for   Cut-off, U	kg				1.668.000,00
Sand {BR}  market for sand   Cut-off, U	kg	965.280,00	926.668,80	926.668,80	
Lubricating oil {RoW}  market for lubricating oil   Cut-off, U	kg	0,02	0,02	0,02	0,02
Lubricating oil {RER}  market for lubricating oil   Cut-off, U	kg	382,20	382,20	382,20	382,20
Diesel {BR}  market for diesel   Cut-off, U	kg	27.715,66	27.715,66	27.715,66	27.715,66
Processos					
Composição	Unidade	Cenário 01 e 02	Cenário 03 e 04	Cenário 05 e 06	Cenário 07 e 08
Locomotive {GLO}  market for   Cut-off, U	p	0,00027	0,00027	0,00027	0,00027
Maintenance, locomotive {GLO}  market for   Cut-off, U	p	0,00027	0,00027	0,00027	0,00027
Goods wagon {GLO}  market for   Cut-off, U	p	0,00024	0,00024	0,00024	0,00024

Maintenance, goods wagon {GLO}  market for   Cut-off, U	p	0,00024	0,00024	0,00024	0,00024
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state {GLO}  machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   Cut-off, U	hr	32,71	32,71	32,71	32,71
Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	hr	542,59	587,35	587,35	473,40
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state   Cut-off, U	hr	87,09	87,09	87,09	87,09
Aplicação CBUQ - Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  market for   Cut-off, U	hr				47,55
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators {GLO}  machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators   Cut-off, U	hr	10,44	10,44	10,44	10,44
Agricultural trailer {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	800,00	800,00	800,00	800,00

Tabela 40: Consolidação dos quantitativos dos inventários de ciclo de vida para a etapa de Manutenção

Etapas de Manutenção			
Composição	Unidade	Quantidade	Atividade
<b>Materiais</b>			
Gravel, crushed {RoW}  market for gravel, crushed   Cut-off, U	kg	9.146,00	Recomposição do Lastro
<b>Processos</b>			
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state   Cut-off, U	hr	0,04	Aferição geométrica
Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	hr	178,71	Recomposição do Lastro
Agricultural trailer {GLO}  market for   Cut-off, U	kg	400,00	Recomposição do Lastro
Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	hr	1,19	Fresagem do trilho
Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	hr	4,10	Socaria

Tabela 41: Consolidação dos quantitativos dos inventários de ciclo de vida, segregados pelos cenários, para a etapa de Manutenção - Reconstrução

Etapa de Manutenção – Reconstrução					
Materiais					
Composição	Unidade	Cenário 01 e 02	Cenário 03 e 04	Cenário 05 e 06	Cenário 07 e 08
Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	113.430,00	113.430,00	113.430,00	113.430,00
Fibre-reinforced concrete {BR}  market for fibre-reinforced concrete, steel   Cut-off, U	m3	179,44	179,44	179,44	179,44
Reinforcing steel {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	11.506,78	11.506,78	11.506,78	11.506,78
Plasticiser, for concrete, based on sulfonated melamine formaldehyde {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	630,94	630,94	630,94	630,94
Sodium silicate, solid {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	11.471,65	11.471,65	11.471,65	11.471,65
White mineral oil, at plant/RNA System - Copied from USLCI	Kg	285,58	285,58	285,58	285,58
Manufatura Dormente Concreto - Concrete block {BR}  concrete block production   Cut-off, U	Kg	370.316,55	370.316,55	370.316,55	370.316,55
Clip para fixação ferroviária - - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	4.478,40	4.478,40	4.478,40	4.478,40
Parafuso fixação tala - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	17,51	17,51	17,51	17,51
Tala juncao trilhos - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	233,80	233,80	233,80	233,80
Tie plate (placa fix.) - - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	49.473,32	49.473,32	49.473,32	49.473,32
Synthetic rubber {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	15.246,00	15.246,00	15.246,00	15.246,00
Building, hall, steel construction {GLO}  market for   Cut-off, U	m2	0,49	0,49	0,49	0,49
Gravel, crushed {RoW}  market for gravel, crushed   Cut-off, U	Kg	9.858,00	9.858,00	9.858,00	9.858,00
Cement, limestone 6-10% {BR}  market for cement, limestone 6-10%   Cut-off, U	Kg		86.027,10		
Bitumen seal {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg			86.027,10	
Bitumen adhesive compound, hot {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg				1.668.000,00
Sand {BR}  market for sand   Cut-off, U	Kg	965.280,00	926.668,80	926.668,80	
Lubricating oil {RoW}  market for lubricating oil   Cut-off, U	Kg	0,01	0,01	0,01	0,01
Lubricating oil {RER}  market for lubricating oil   Cut-off, U	Kg	272,85	272,85	272,85	272,85
Diesel {BR}  market for diesel   Cut-off, U	Kg	19.787,39	19.787,39	19.787,39	19.787,39
Processos					
Composição	Unidade	Cenário 01 e 02	Cenário 03 e 04	Cenário 05 e 06	Cenário 07 e 08
Locomotive {GLO}  market for   Cut-off, U	P	0,00022	0,00022	0,00022	0,00022
Maintenance, locomotive {GLO}  market for   Cut-off, U	P	0,00022	0,00022	0,00022	0,00022
Goods wagon {GLO}  market for   Cut-off, U	P	0,00034	0,00034	0,00034	0,00034
Maintenance, goods wagon {GLO}  market for   Cut-off, U	P	0,00034	0,00034	0,00034	0,00034
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state {GLO}  machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state   Cut-off, U	Hr	50,82	50,82	50,82	50,82

Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, underground mining   Cut-off, U	Hr	973,98	983,14	983,14	605,97
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state {GLO}  machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state   Cut-off, U	Hr	65,80	65,80	65,80	65,80
Aplicação CBUQ - Machine operation, diesel, >= 74.57, underground mining {GLO}  market for   Cut-off, U	Hr				47,55
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators {GLO}  machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators   Cut-off, U	Hr	7,25	7,25	7,25	7,25
Agricultural trailer {GLO}  market for   Cut-off, U	Kg	800,00	800,00	800,00	800,00

#### 4.4.2 Caracterização para Construção e Manutenção

Nessa etapa, os valores da caracterização foram avaliados separadamente, sem considerar o montante para todo o ciclo de vida do objeto em estudo, com o objetivo de explicitar a contribuição unitária de cada sistema de produto. Além disso, é importante ressaltar que a maior parte dos estudos encontrados durante a revisão bibliográfica sobre aplicação do ciclo de vida em infraestrutura ferroviária trata do transporte de passageiros por trens de alta velocidade, ou seja, com emprego de estrutura *ballastless* (sem uso de lastro), diferente da avaliada neste estudo, no qual foi empregada uma unidade funcional lastreada e para transporte de cargas.

Logo, os dados obtidos foram plotados em gráfico de barras para se obter uma percepção visual dos resultados gerados e, a partir disto, extrair informações e inferências iniciais para a etapa de interpretação. Além disso, o uso de elementos gráficos foi empregado para permitir a comparação com estudos existentes na literatura, como Bortolli *et al.* (2020), pelo indicador de tCO<sub>2</sub>eq/km.ano.

Diante disso, com o objetivo de permitir uma visão inicial dos resultados, a Figura 43 a Figura 45 apresentam os valores consolidados para cada estágio do sistema de produto, conforme os cenários empregados, representando a execução unitária da atividade, ou seja, para a agregação dos dados, não foi considerada a repetição destas ao longo da vida útil da estrutura. Vale ressaltar que nesse ponto os cenários foram analisados aos pares, uma vez que apenas a variação do tipo de material é avaliada, sem considerar o critério da condição de umidade.

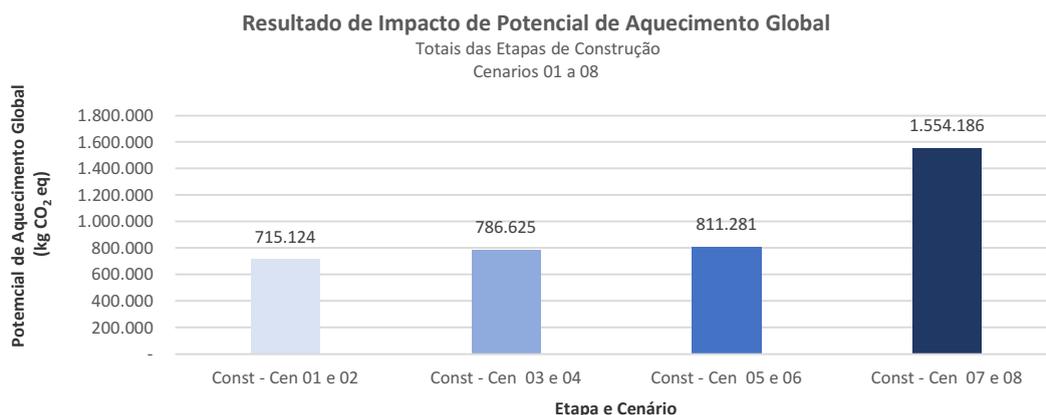


Figura 43 Impacto de Potencial de Aquecimento Global para estágio de Construção

Quanto aos resultados obtidos na Figura 43, fica evidente que o uso do CBUQ tem o impacto mais relevante dentre as seções de projetos avaliadas. Além disso, quando comparado ao uso de cimento com emulsão asfáltica, o produto de origem de petróleo mantém a tendência de contribuir com maior impacto. Por fim, os cenários 01 e 02, nos quais o sublastro foi composto apenas por solo arenoso, se mostraram a solução mais interessante a partir da perspectiva de impacto ambiental, ou seja, dentro do comportamento esperado. Nesse sentido, para balizamento do resultado, e utilizando o estudo de Mathieu *et al.* (2013), constatou-se a ordem de grandeza para a infraestrutura ferroviária similar ao estudo aqui desenvolvido, com o valor de impacto de 730.000 gCO<sub>2eq</sub>/km.

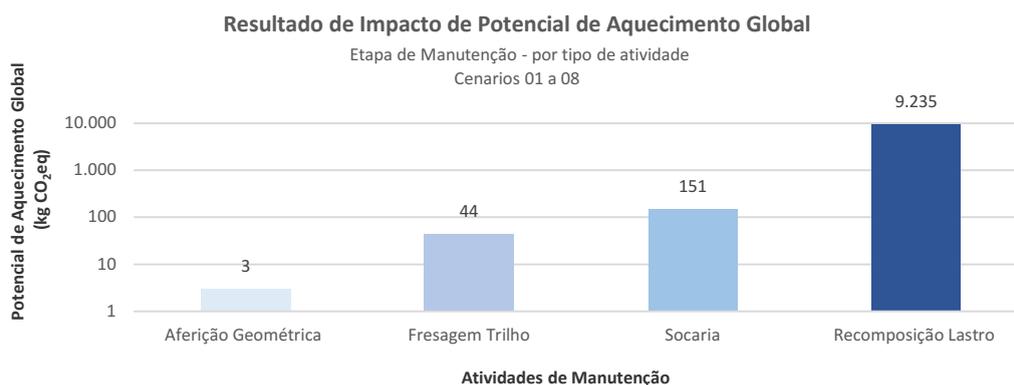


Figura 44 Impacto de Potencial de Aquecimento Global para estágio de Manutenção

No que se refere às atividades de manutenção, Krezo *et al.* (2016), ao avaliarem diferentes tipologias de pavimento ferroviário quanto às emissões de gás de efeito estufa (CO<sub>2eq</sub>), mensuraram algumas intervenções que constam neste trabalho. Visando realizar um paralelo entre os trabalhos mediante a ordem de grandeza dos valores, foi executada a compatibilização para as unidades empregadas na presente análise, sendo os valores por

eles calculados, para uma via singela com uso de lastro (em  $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ ), os seguintes: para a recomposição do lastro, 11.830; e, para a reconstrução, 554.000. Diante disso, é possível verificar que tanto o serviço de recomposição do lastro (Figura 44) quanto a reconstrução dos cenários 01 e 02 (Figura 45) mantém coerência com o estudo de Krezo *et al.* (2016).

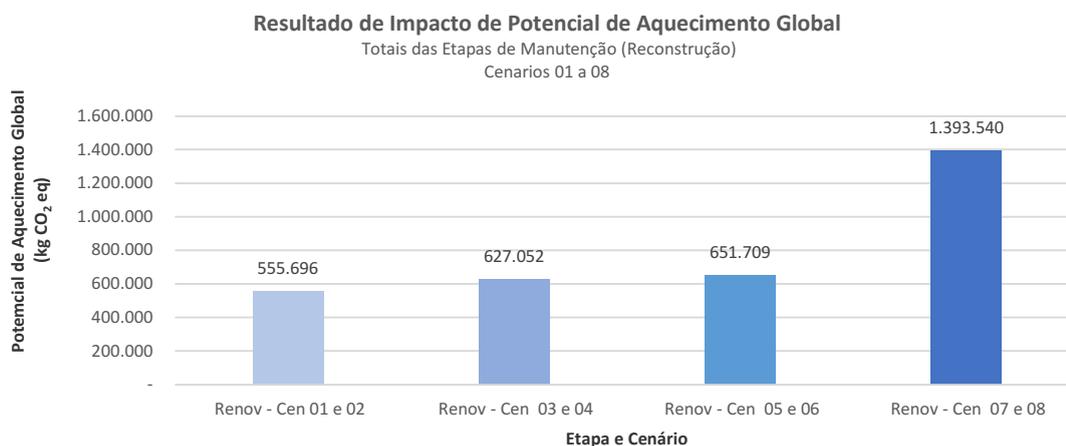


Figura 45 Potencial de Aquecimento Global para estágio de Reconstrução

Por fim, relativamente aos valores encontrados para as atividades de reconstrução, esses se mostram coerentes com o comportamento da construção, mas com níveis abaixo devido ao reaproveitamento dos materiais.

Com os dados obtidos neste estudo, foi possível desagregar as informações de forma a permitir uma análise mais detalhada, permitindo, por exemplo, identificar quais os insumos mais contribuem para o impacto de potencial de aquecimento global nas etapas dos sistemas de produtos. Portanto, a seguir, da Figura 46 até a Figura 58 são mostrados os impactos gerados a partir de cada material empregado, ou seja, uma análise micro, para a construção e manutenção da via permanente.

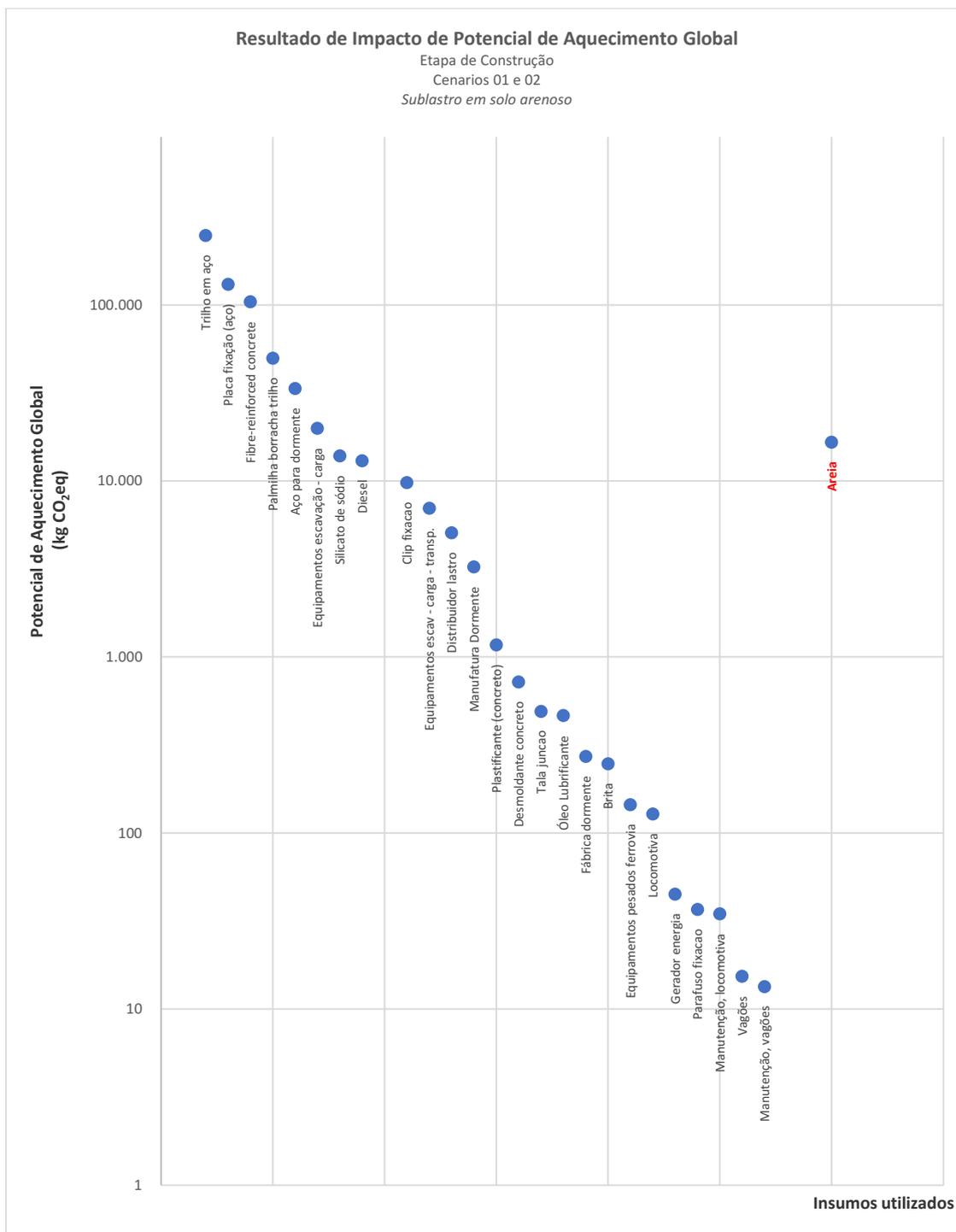


Figura 46 Potencial de Aquecimento Global por insumo – Construção – Cenários 01 e 02

Como análise inicial, é possível perceber a significativa diferença entre as contribuições de impactos entre os insumos estudados, visto que foi necessária aplicar uma escala logarítmica para a representação dos dados. Quanto às principais fontes, nota-se que os materiais compostos de aço (trilho, fixações, talas e placa) têm maior relevância frente aos demais, seguido concreto e do *railpad* à base de polímero.

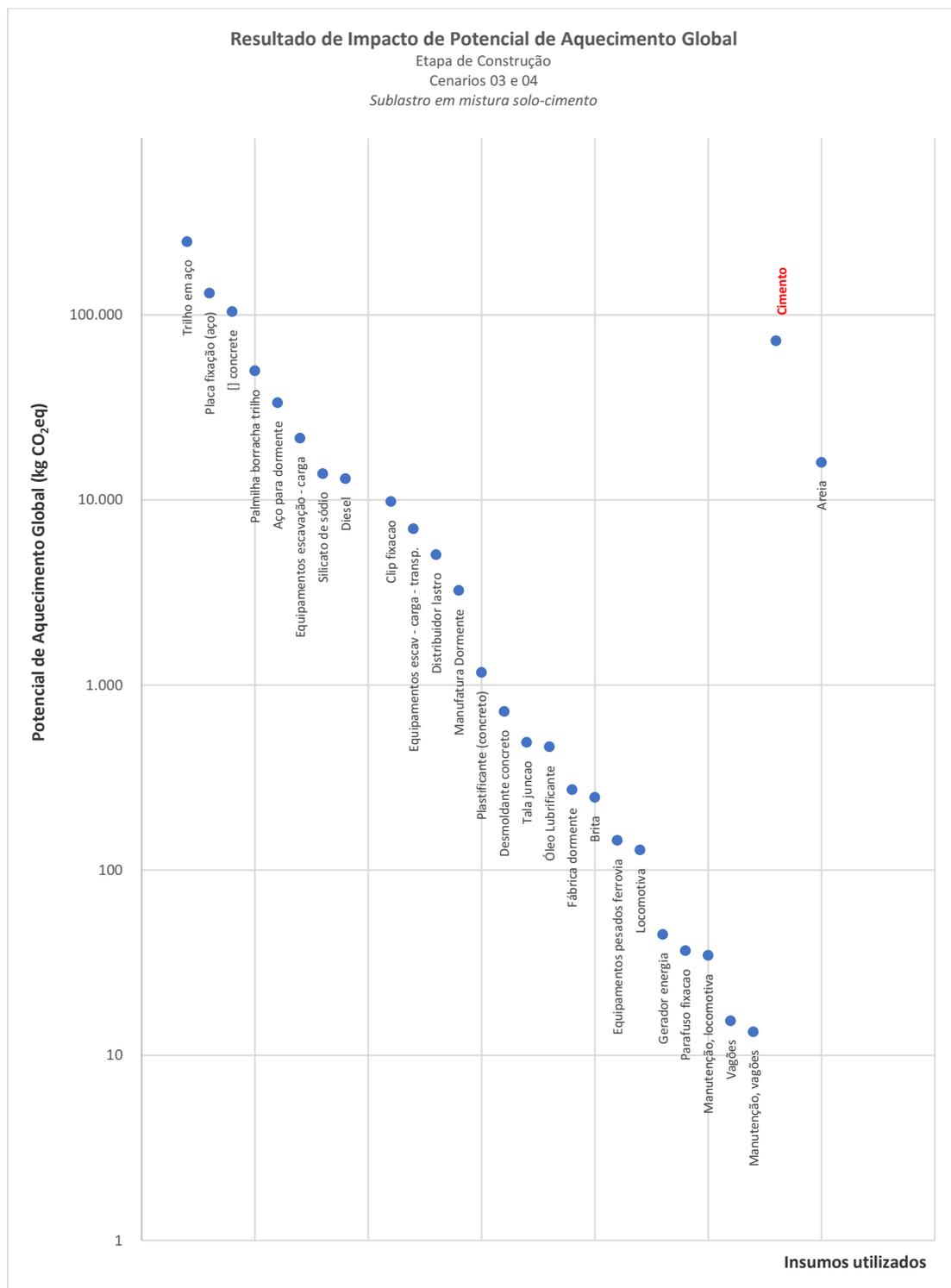


Figura 47 Potencial de Aquecimento Global por insumo – Construção – Cenários 03 e 04

Seguindo o mesmo comportamento da figura anterior, os insumos constituídos de aço se caracterizam como a principal fonte de impacto de potencial de aquecimento global, seguido do concreto e do cimento, o qual foi empregado na mistura com o solo para a melhoria do desempenho mecânico da estrutura, ultrapassando o *railpad*.

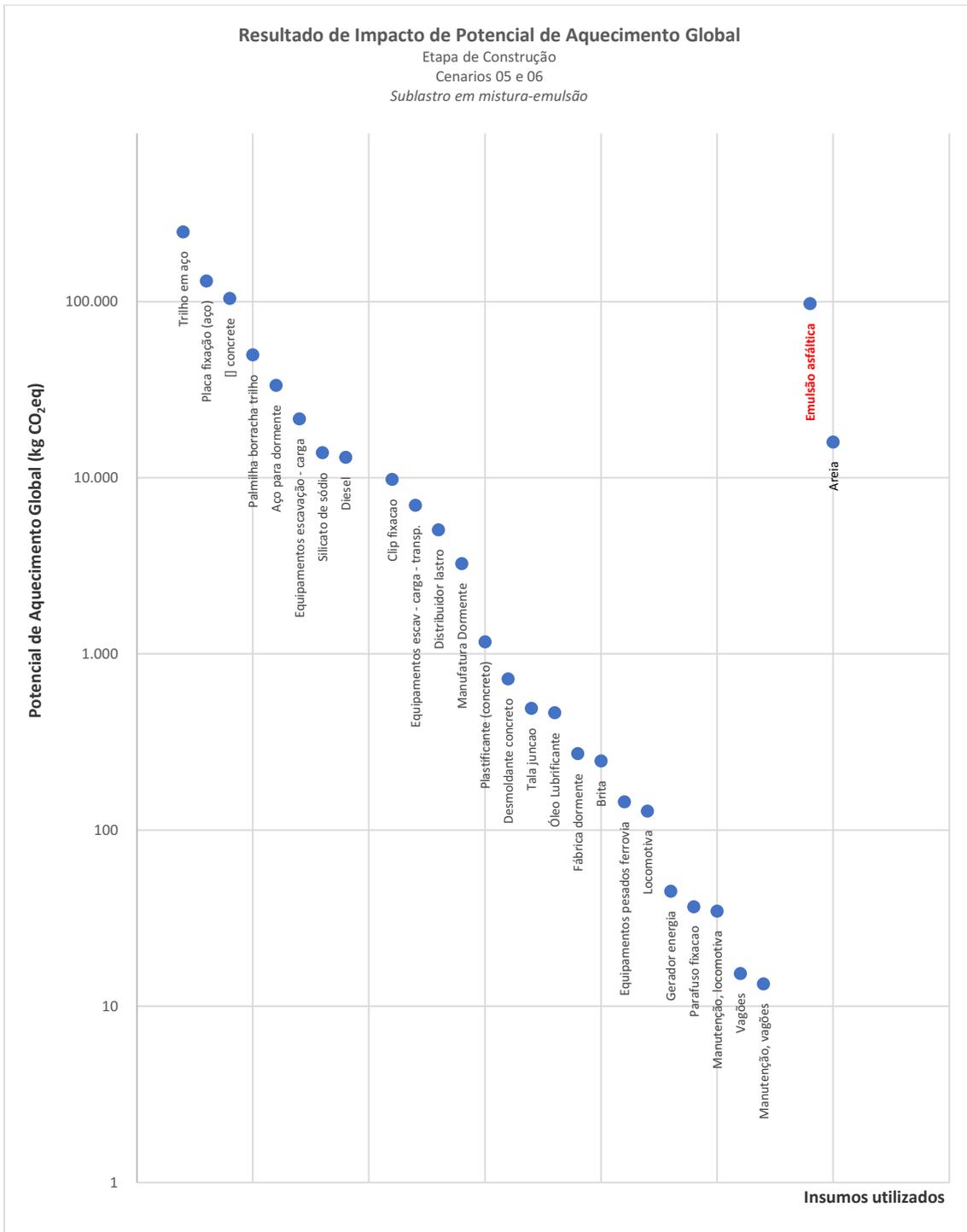


Figura 48 Potencial de Aquecimento Global por insumo – Construção – Cenários 05 e 06

Adiante, nota-se novamente o comportamento da figura inicial, ou seja, os insumos constituídos de aço se caracterizam como a principal fonte de impacto, seguido do concreto e, agora, da emulsão asfáltica, que também foi empregada na mistura com o solo para a melhoria do desempenho mecânico da estrutura.

### Resultado de Impacto de Potencial de Aquecimento Global

Etapa de Construção  
Cenários 07 e 08  
Sublastro em CBUQ

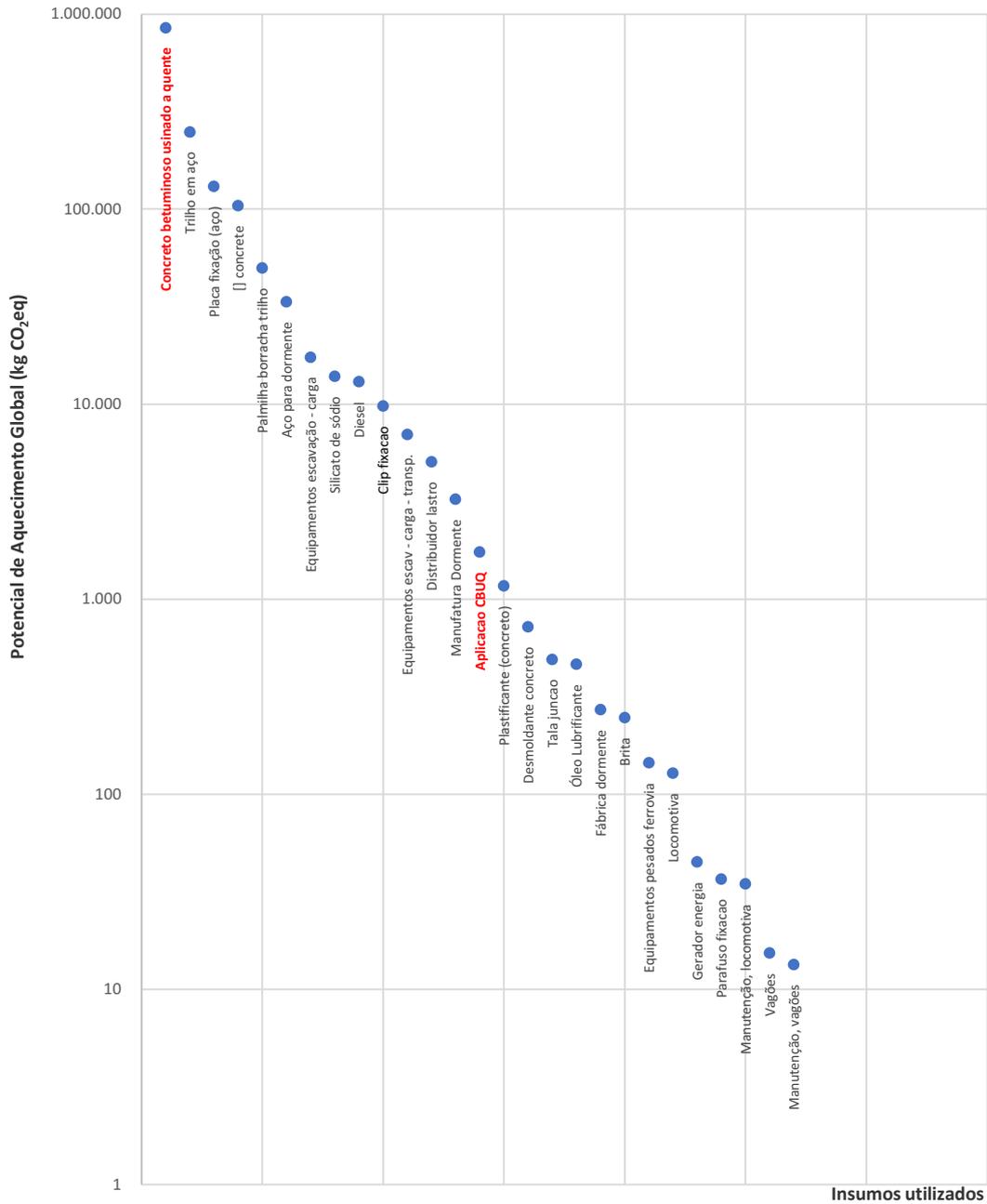


Figura 49 Potencial de Aquecimento Global por insumo – Construção – Cenários 07 e 08

Por fim, a contribuição mais significativa nos cenários 07 e 08 trata justamente do material empregado no sublastro, ou seja, o CBUQ. O insumo superou significativamente a contribuição do aço e dos demais elementos avaliados, os quais mantiveram o comportamento das figuras anteriores. Quanto à aplicação do concreto betuminoso, esta foi avaliada separadamente do material, para uma análise detalhada dessa solução técnica.

Com o objetivo de comparar os dados anteriores, ou seja, os diferentes cenários a partir dos insumos, foram utilizados gráficos de coordenadas paralelas, visto que este formato permite comparar visualmente muitas séries com várias variáveis, como apresentado por Hollberg *et al.* (2021). Inicialmente, a Figura 50 mostra os cenários 01 a 06, enquanto a Figura 51 apresenta os cenários 01 a 08. Eles foram assim separados devido a escala, uma vez que os cenários 07 e 08 tendem a penalizar a visualização diante do resultado do CBUQ. Além disso, para a elaboração destes, inicialmente destacou-se o elemento com maior impacto, o aço, para os seis primeiros cenários. Adiante, como segundo critério, visto a proximidade entre as linhas, foi considerado o uso das cores para destacar apenas os elementos que apresentaram variação, mantendo os demais em tons de cinza. Portanto, reforça-se que o objetivo desta representação é permitir um comparativo entre os cenários avaliados a nível dos insumos aplicados, possibilitando uma visão rápida de quais elementos contribuíram para a variabilidade.

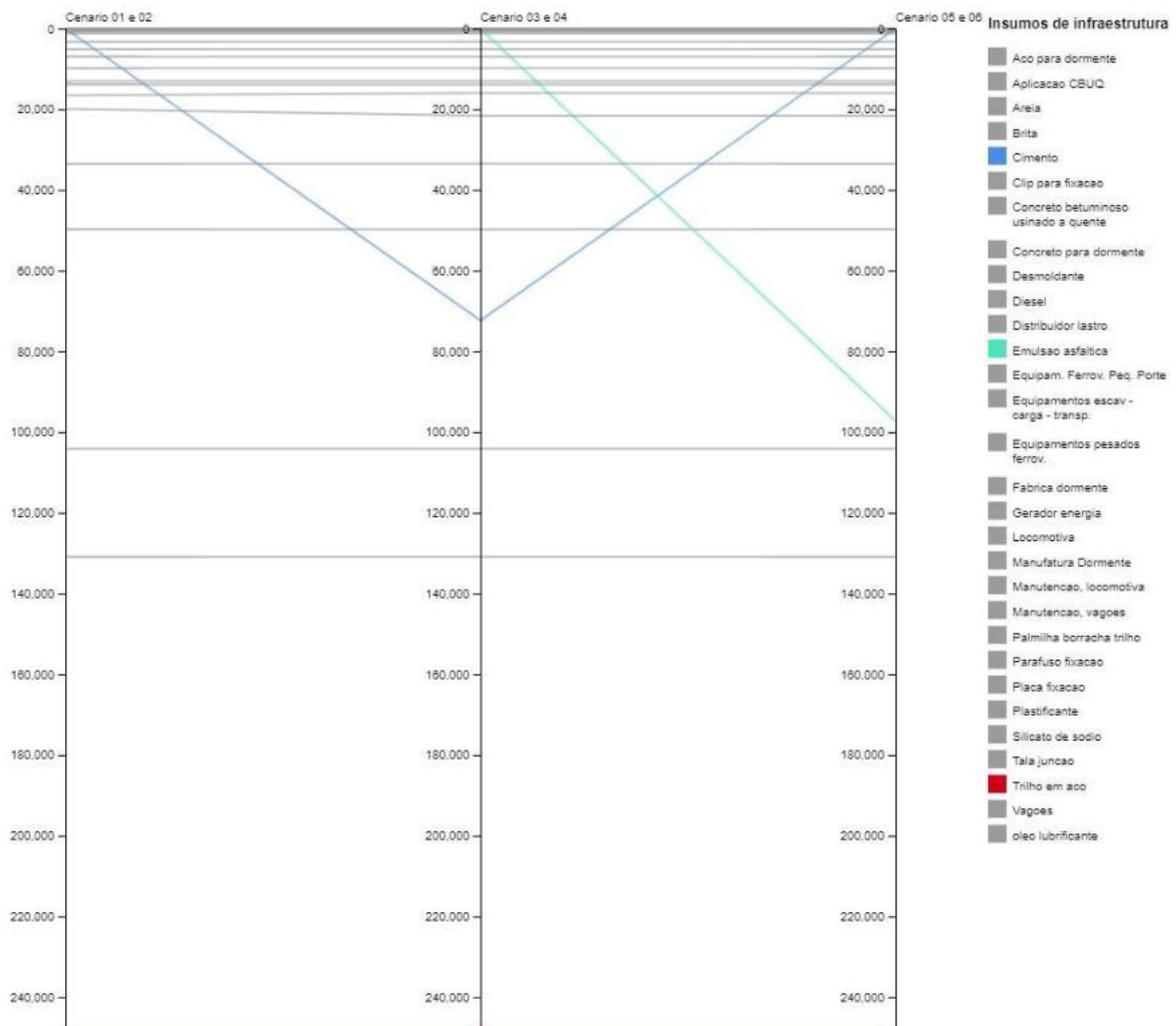


Figura 50 Comparativo de impacto por insumo – Construção – Cenários 01 a 06

Diante disso, fica evidente que o aço é a maior fonte de contribuição nos cenários da Figura 50, enquanto verifica-se a variação no uso do cimento e da emulsão, sendo este último o cenário que gera o maior impacto, ao comparar as três seções iniciais. Alinhado a esses resultados, avaliando os materiais de infraestrutura, Stripple & Uppenberg (2010) mostram que o aço da grade representa cerca de 29% do impacto mensurado em seu estudo.

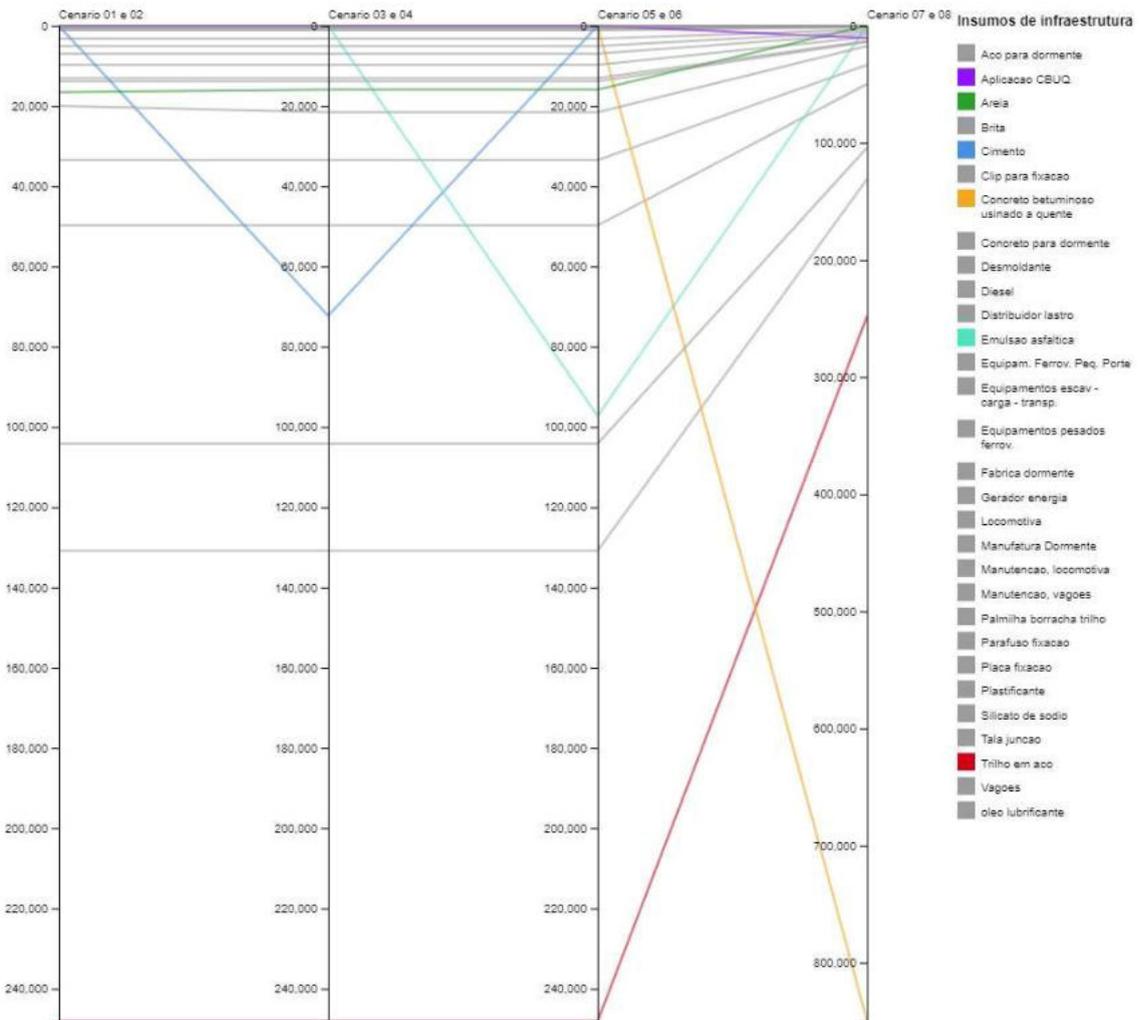


Figura 51 Comparativo de impacto por insumo – Construção – Cenários 01 a 08

Finalmente, na Figura 51, nota-se que o aço, maior fonte de impacto nos cenários 01 ao 06, mantém o patamar nos cenários 07 e 08, mas perde seu protagonismo para o CBUQ. No que diz respeito a esse material, Bressi *et al.* (2018a), ao aplicarem os conhecimentos de ACV para diferentes misturas asfálticas em sublastro na Itália, identificaram que o processo de produção do CBUQ, e sua aplicação no campo, são as principais fontes de impacto de potencial de aquecimento global. Ainda tratando do

concreto betuminoso, Ma *et al.* (2019), em seu estudo sobre a ACV comparativa entre diferentes tipos de misturas asfálticas na China, evidenciam que a matéria-prima foi responsável por aproximadamente 420.000 kg/CO<sub>2eq</sub> para 1 km de rodovia com 6 faixas, ordem de grandeza de cerca de 50% do resultado obtido neste estudo, que também considera a produção e o transporte do CBUQ em sua caracterização.

A seguir, na Figura 52, foram consolidados os dados para a etapa de manutenção da via permanente, compreendida pelas atividades de aferição de geometria, recomposição do lastro, fresagem do trilho e socaria do lastro.

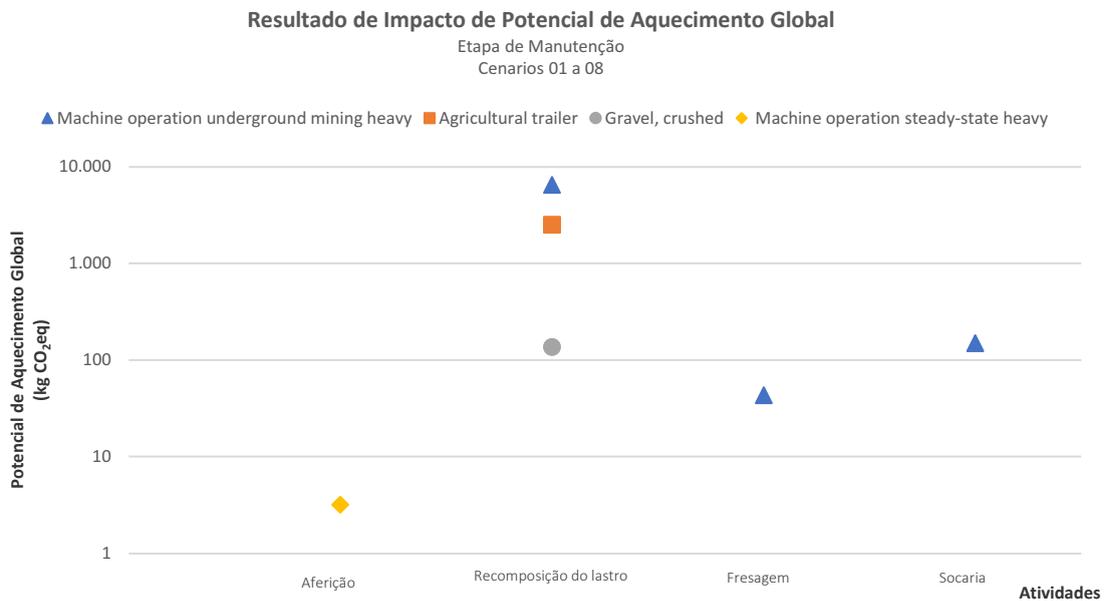


Figura 52 Impacto por insumo – Manutenção – Cenários 01 a 08

Por conseguinte, como resultado da Figura 52, nota-se que a principal fonte de impacto trata do uso dos equipamentos para as intervenções. Desse modo, é possível depreender, assim como em Stripple & Uppenberg (2010) e Ortega *et al.* (2018), os quais também avaliaram atividades similares, que o consumo de combustível é a maior fonte de impacto nessa etapa.

Por fim, a seguir, são apresentados os resultados para a etapa de reconstrução da via permanente. Como conclusão, é possível perceber a perpetuação do comportamento da construção, no que diz respeito aos elementos que apresentam a maior contribuição de impacto ambiental.

### Resultado de Impacto de Potencial de Aquecimento Global

Etapa de Manutenção - Reconstrução

Cenários 01 e 02

Sublastro em solo arenoso

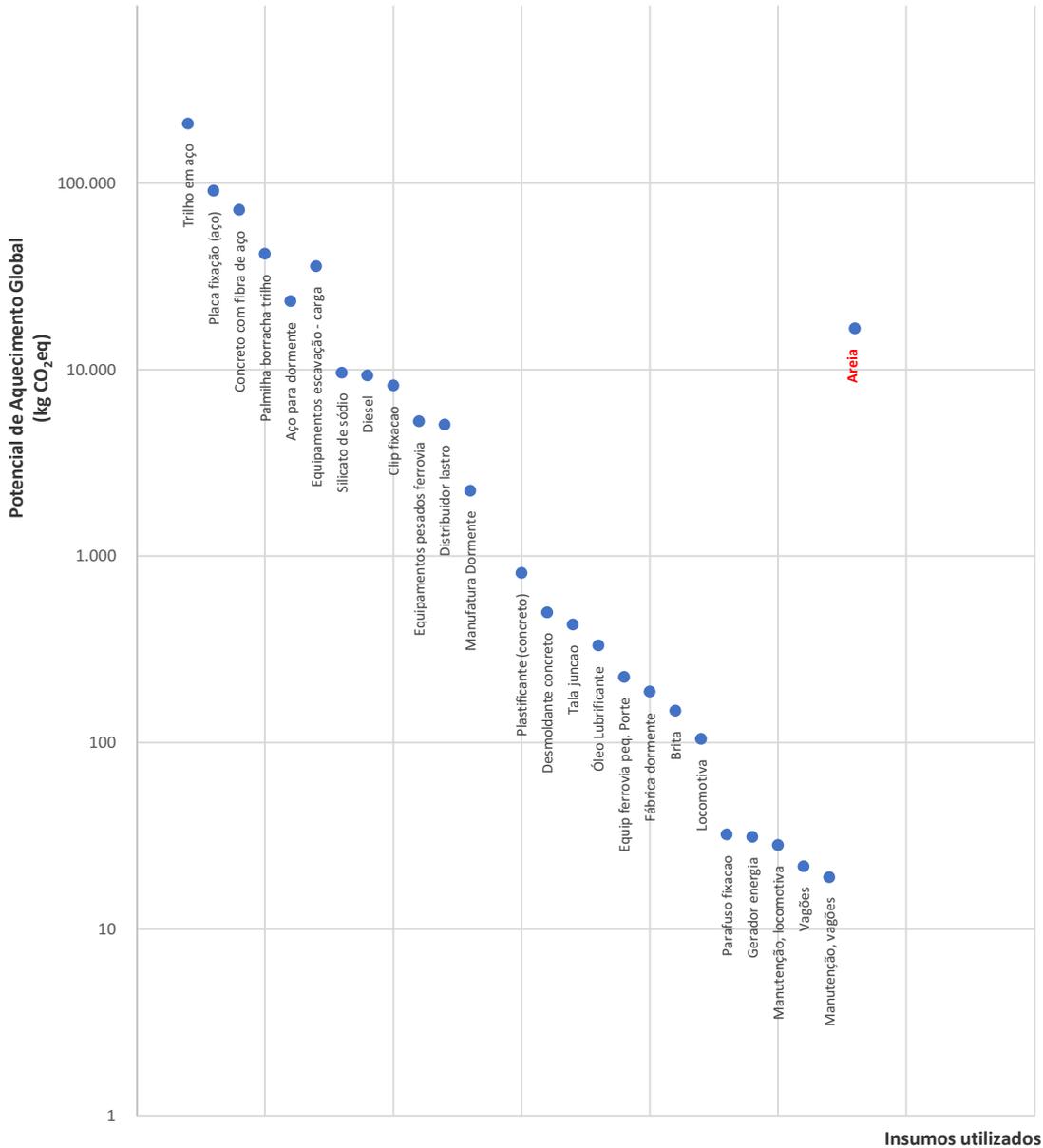


Figura 53 Impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 01 e 02

Alinhada com a etapa de construção, a magnitude dos impactos dos insumos é altamente heterogênea, como mostra a Figura 53. Além disso, uma vez que a distinção entre a construção e a reconstrução trata basicamente dos serviços de desmontagem da via, seguida de sua reconstrução com reaproveitamento de insumos, pode-se concluir que o impacto gerado pelos materiais é mais relevante que o dos equipamentos.

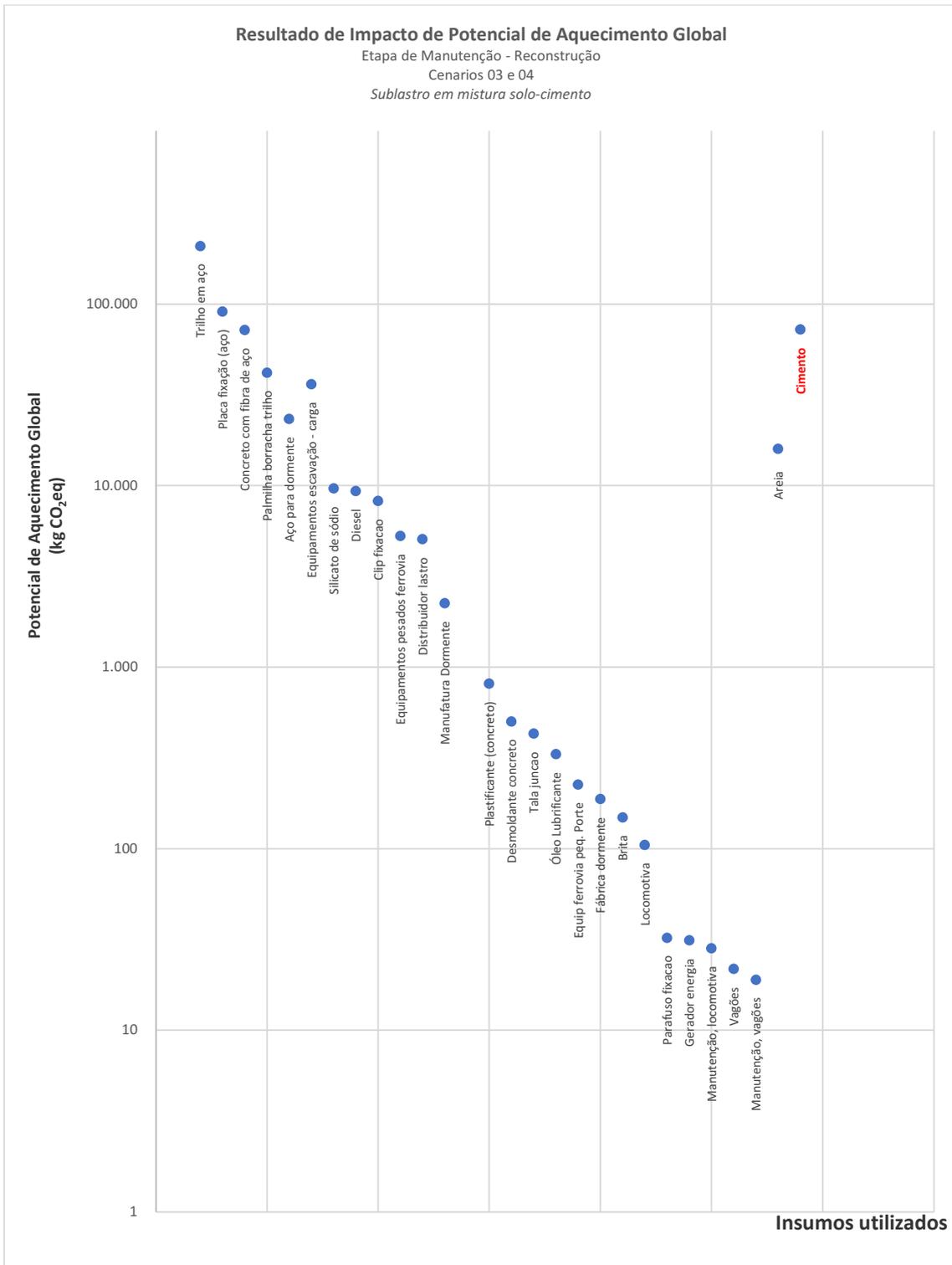


Figura 54 Impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 03 e 04

Ao comparar a Figura 47 (Construção) e a Figura 54 (Reconstrução), assim como na análise anterior, é possível notar a similaridade entre os cenários avaliados, conforme a premissa adotada no estudo.

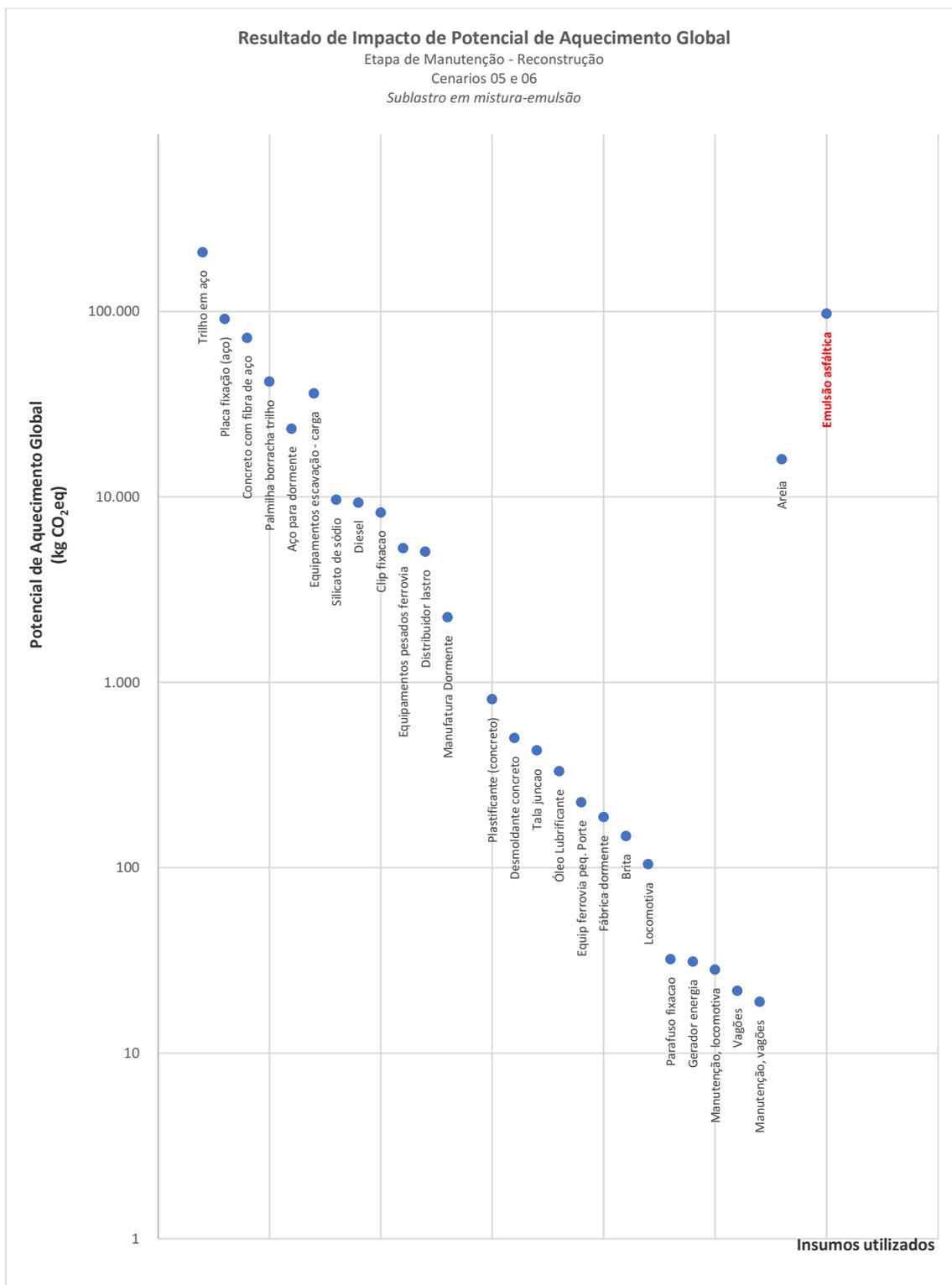


Figura 55 Impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 05 e 06

Também, ao comparar a Figura 48 (Construção) e Figura 55 (Reconstrução), observa-se maior relevância dos impactos gerados pelos materiais em detrimento dos equipamentos, sendo os elementos constituídos de aço, polímeros e concreto os mais representativos.

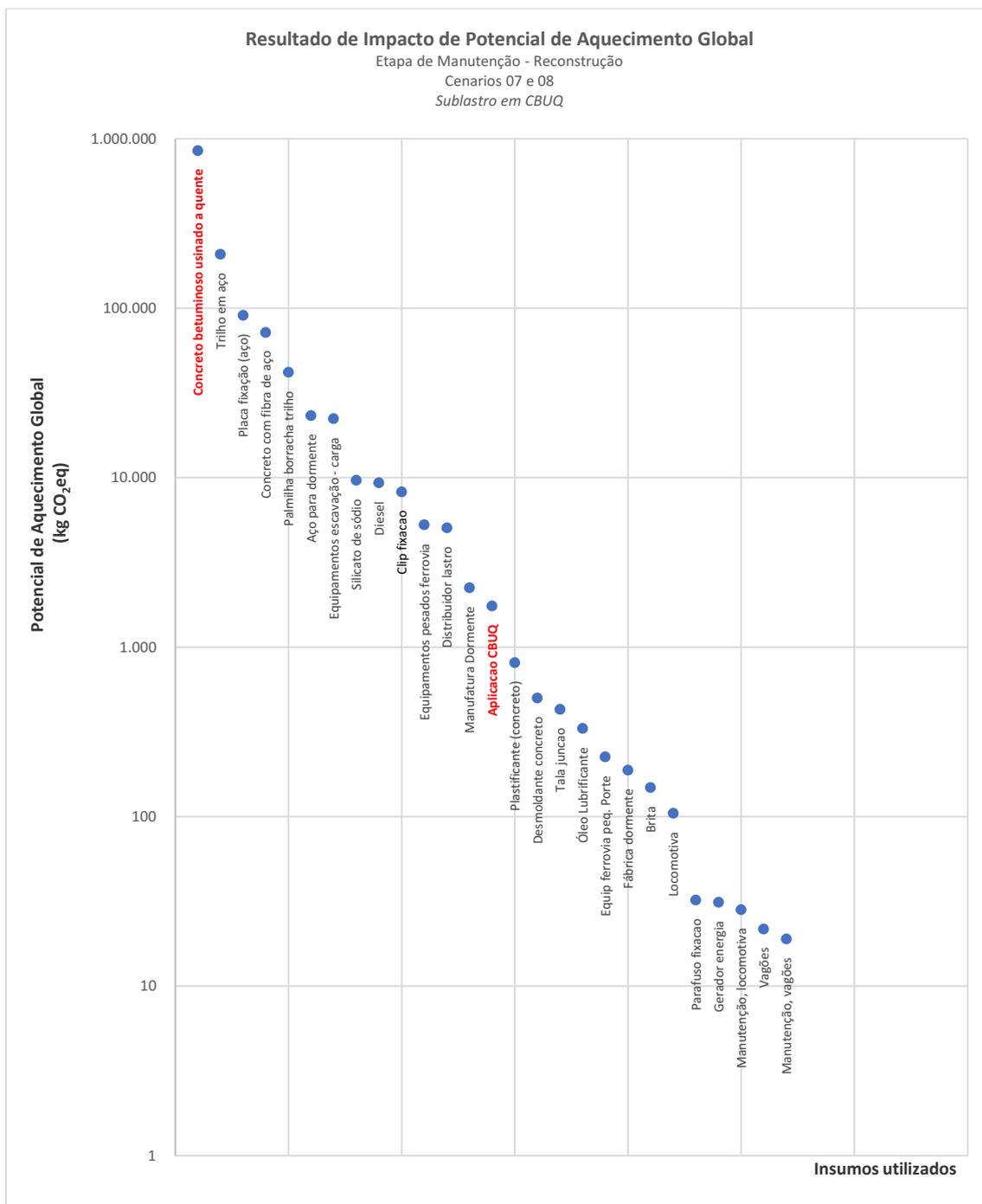


Figura 56 Impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 07 e 08

Por fim, assim como demonstrado na Figura 49 (Construção, o uso do CBUQ no sublastro na Figura 56 sobrepuja significativamente o impacto dos demais. No que concerne ao emprego deste material, Kuksova (2020), avaliando o desempenho estrutural do subleito, mostra que a redução da tensão vertical se mostrou na ordem de 10,29%, enquanto a deformação reduziu cerca de 17,02%, para a condição de carga dinâmica, como mostrado na Tabela 21. Portanto, é possível inferir que, partir do ponto de vista

ambiental, apesar de melhorar o desempenho mecânico da estrutura, o uso de concreto asfáltico deve ser racional.

Novamente, em paralelo a Figura 50 (Construção), o aço se mostra como principal fonte de impacto de potencial de aquecimento global, na Figura 57. No tocante a isso, Bortoli *et al.*, (2020) ao consolidarem o quantitativo de impactos ambientais para o ciclo de vida de um quilômetro de uma via singela por ano, mostram que apenas o aço do trilho representa aproximadamente 30% do impacto de mudança climática nos elementos da via permanente.

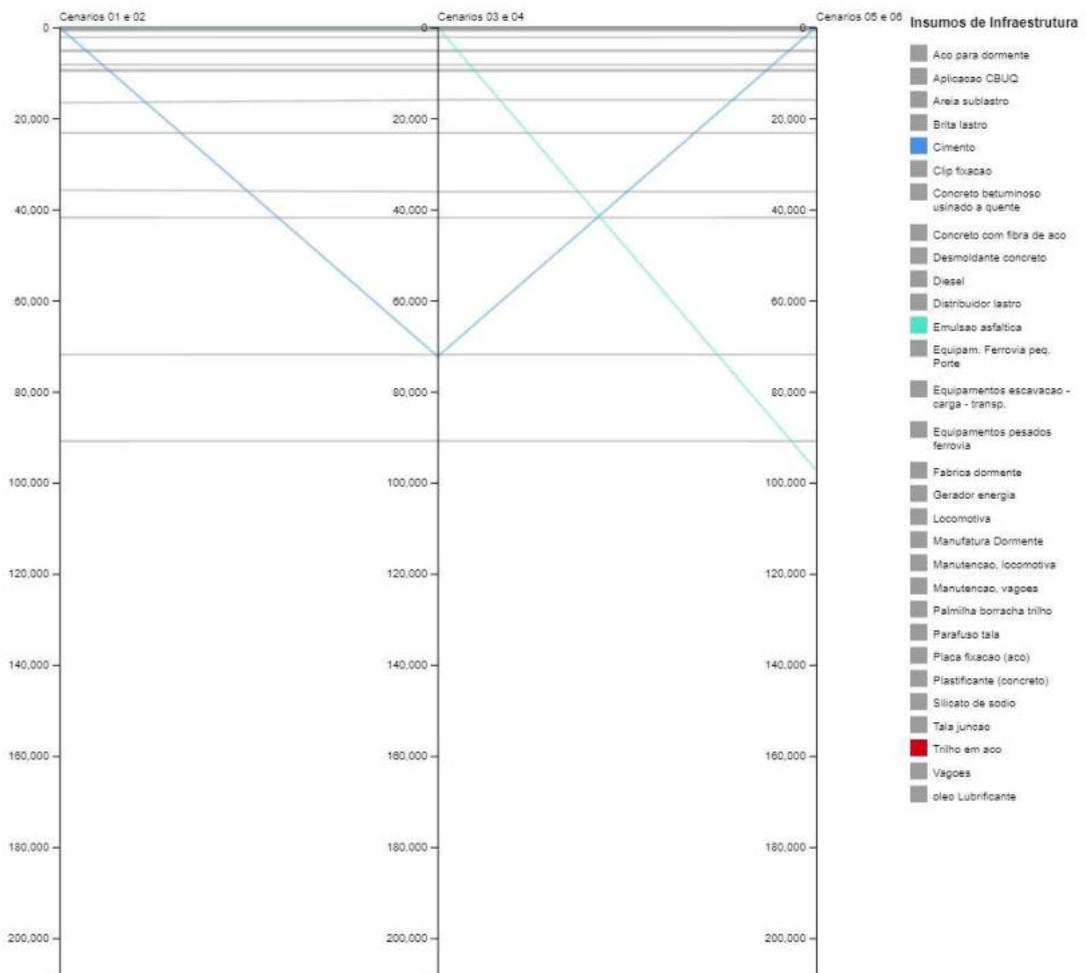


Figura 57 Comparativo de impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 01 a 06

Finalmente, na Figura 58, é possível notar a prevalência do concreto asfáltico na geração de impacto diante dos demais cenários avaliados, conforme também apresentado na Figura 51 (Construção). Além disso, apesar da distorção da escala na representação dos cenários finais, ainda ficam nítidas as variações dos insumos aplicados nas diferentes

seções de projeto, deixando claro o esforço empreendido neste estudo, e evidencia a coerência nas premissas e resultados obtidos ao longo dos cenários selecionados.

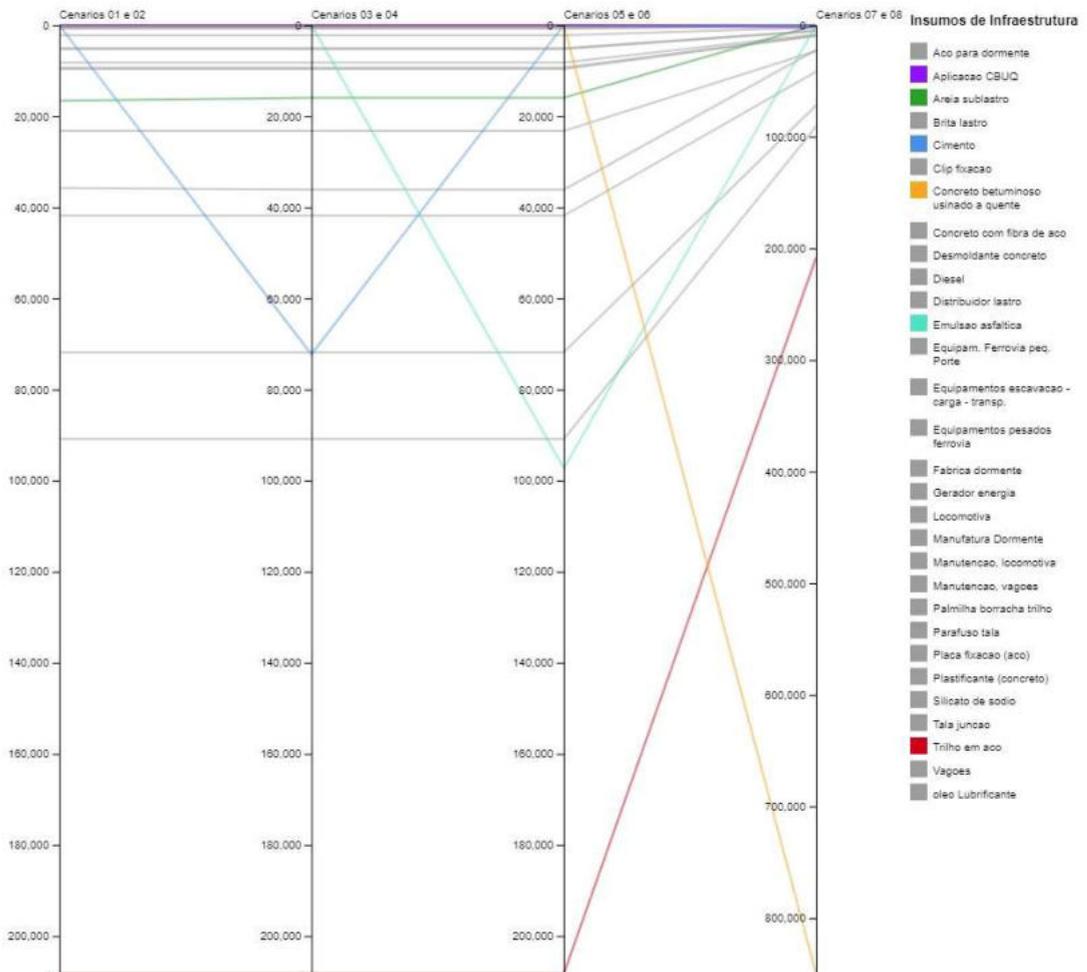


Figura 58 Comparativo de impacto por insumo – Reconstrução – Cenários 01 a 08

Adiante, com o intuito de identificar a contribuição a partir da perspectiva dos elementos que compõe a infraestrutura analisada, mostrados desde a Figura 59 até a Figura 61, segregados pelas etapas do sistema de produto, mostram os resultados de potencial de aquecimento global mensurados. Os elementos foram identificados pela agregação dos insumos, ou seja, compreendem os materiais e os equipamentos. Dessa forma, entende-se que tal agregação permite a comparação com estudos similares.

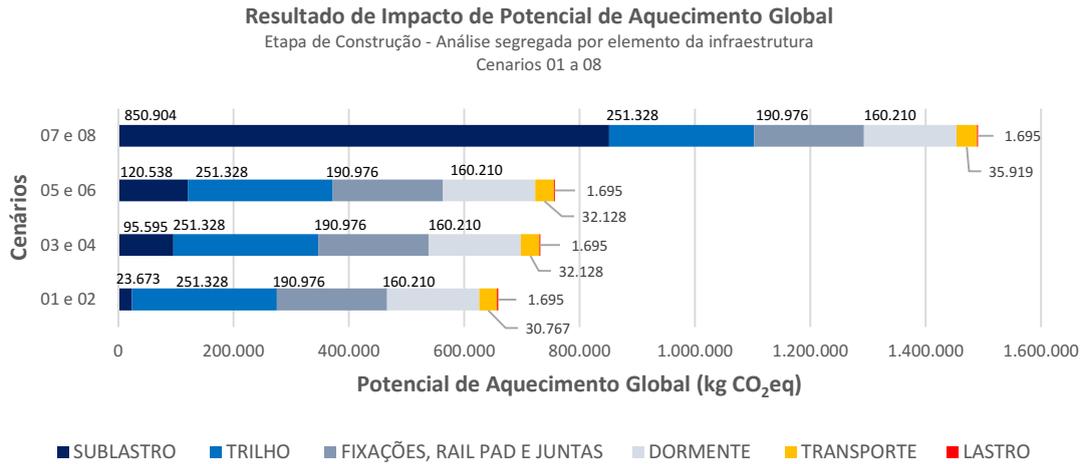


Figura 59 Resultado de impacto por elementos da infraestrutura - Construção

Com isso, ao se analisar os resultados para a Construção, na Figura 59, infere-se que, apesar de ocorrerem variações pouco significativas no transporte, os demais elementos como trilho, dormente, fixações e lastro se mantêm constante, ficando a cargo do sublastro as diferenças mais representativas, o que se mostra alinhado com o objeto do presente estudo. Além disso, o comportamento do impacto gerado pelos insumos se mostra coerente com o avaliado inicialmente, ou seja, o cenário sem uso de aglomerante na camada de sublastro é responsável por gerar o menor impacto entre os demais, assim como o cenário com uso de CBUQ pode gerar o maior patamar de valores do critério avaliado, ficando os outros dois cenários nas posições intermediárias.

De modo similar, Bortoli *et al.*, (2020), analisando a infraestrutura ferroviária para um veículo de alta velocidade na França, realizaram a ACV, considerando 13 tipos de impactos, dentre eles o de mudança climática. Entretanto, o estudo também teve como unidade funcional os viadutos e rede de energia (catenária), diferentemente do deste trabalho. Além disso, a fundação da via contou além do subleito, com uma camada de reforço e uma plataforma de concreto. Por fim, como resultado, o estudo de Bortoli *et al.*, (2020) apresentou a camada de fundação (composta pelo reforço do subleito, subleito e plataforma de concreto) e os trilhos como maiores fontes de impacto, com cerca de 22% cada, seguido do dormente com caracterização por volta de 10%, e do lastro e sublastro (analisados conjuntamente), com aproximadamente 9%, enquanto o transporte se mostrou em torno de 8%. Dessa maneira, considerando que a fundação do estudo utilizado como comparativo se mostra distinta da estrutura analisada neste trabalho, ao confrontá-lo com

os cenários 01 e 02, é possível identificar coerência nos resultados obtidos, visto que os elementos como o trilho e o dormente se apresentam como importantes fontes de impacto.

Adiante, na Figura 60, é apresentado o resultado para a etapa de manutenção, o qual foi segregado entre os materiais e equipamentos empregados. Diante disso, fica evidente que o maior impacto é gerado pelo uso dos equipamentos, representado em boa parte pelo consumo do combustível, diferentemente das etapas de construção e reconstrução, quando a maior fonte trata justamente dos materiais.

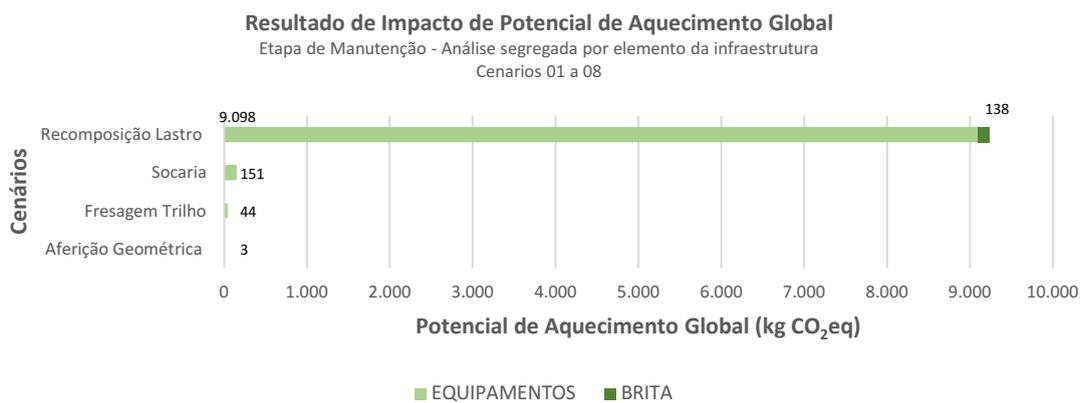


Figura 60 Resultado de impacto por elementos da infraestrutura - Manutenção

Finalmente, em linha com o descrito para a construção, a Figura 61 mostra os resultados para a Reconstrução, nos quais o comportamento quanto aos impactos dos elementos se mostra coerente com as análises iniciais. Além disso, notam-se os patamares inferiores dos quantitativos quando comparados com a Figura 59, consistente com o reaproveitamento do material.

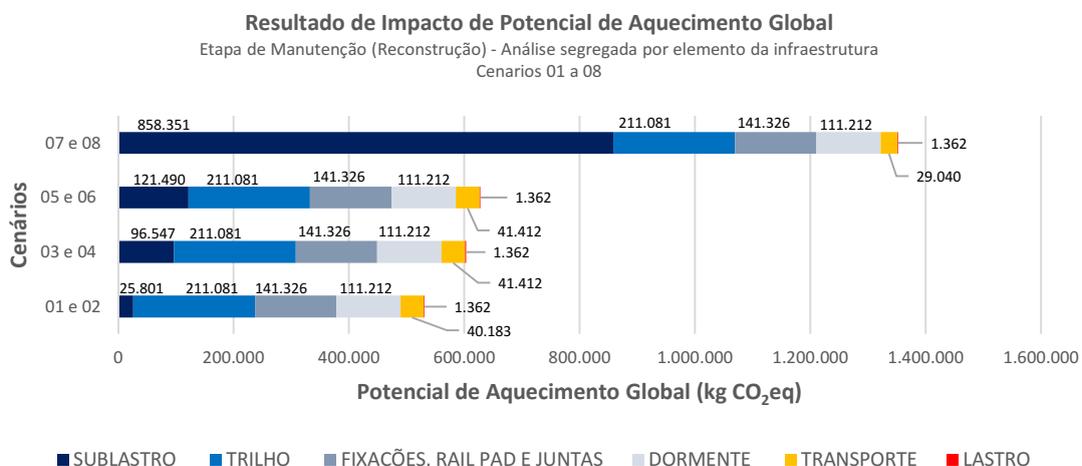


Figura 61 Resultado de impacto por elementos da infraestrutura - Reconstrução

#### 4.4.3 Considerações sobre a matriz energética brasileira na ACV

O consumo de energia é um dos elementos que compõe os inventários de ACV, tendo significativa relevância na caracterização dos impactos. Nesse sentido, Unece (2021) apresenta a variação regional entre as matrizes energéticas. Como conclusão, fica evidente que o maior impacto de potencial de aquecimento global é causado pela energia gerada pela queima do carvão, seguido pelo gás natural e, por fim, a energia proveniente de hidrelétrica é apresentada como uma dentre as opções mais limpas.

Logo, com isso em vista, Silva & Moura Junior (2019), mostrando o crescimento da energia eólica no Brasil, evidenciam a predominância da energia gerada nas hidrelétricas neste país. Portanto, este cenário, atrelado ao fato de que a maioria dos inventários de ciclo de vida disponíveis na base de dados consultada não ser de origem nacional, é interessante que se mensure a ordem de grandeza do impacto diante dessa substituição, visando reduzir as incertezas quanto a este parâmetro. Logo, a seguir, é apresentado o processo adotado para identificar o inventário com maior contribuição na ACV empregada no estudo de caso, com base em Pareto, e a alteração da matriz energética original pelas informações da matriz brasileira também presente na base do EcoInvent 3.6. Para essa análise, foi considerado o uso da geração da rede hidrelétrica do sudeste brasileiro, local com a maior concentração de indústrias do país.

Diante disso, foi avaliado o resultado da caracterização do impacto de potencial de aquecimento global dos cenários 01 e 02 para a construção, ou seja, a seção sem aditivos aglomerantes na camada de sublastro. Assim sendo, a Tabela 42 identifica o inventário do aço, utilizado na composição do trilho, como a principal fonte de contribuição, representado pela nomenclatura de *Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} | market for | Cut-off, U*, e usada também na placa de fixação e parafuso.

À vista disso, é preciso lembrar que o inventário, assim como uma composição unitária de preços do SICRO, pode ser dito como composto por “sub-inventários”, ou seja, construídos pela sobreposição em níveis. Logo, conforme demonstrado no Anexo VI, para o inventário em estudo foram utilizados 14 níveis, totalizando 53 inventários avaliados.

Portanto, para a análise proposta, a matriz original do inventário de aço citado foi atualizada com a matriz energética do Brasil e os inventários substituídos na avaliação do trilho e nos demais elementos como a placa de fixação e parafusos. Dessa forma, uniformizou-se a ACV para os elementos com maior impacto.

Tabela 42 Inventário com maior contribuição - Cenários 01 e 02 na Construção

Inventários	% Contribuição Individual	% Contribuição Acumulado
Trilho - Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	40,8%	40,8%
Placa fixacao - Steel, low-alloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	19,0%	59,9%
Fibre-reinforced concrete, steel {BR}  market   Cut-off, U	14,4%	74,2%
Rail pad - Synthetic rubber {GLO}  market for   Cut-off, U	6,9%	81,1%
Concrete block {BR}  concrete block production   Cut-off, U	4,9%	86,0%
Reinforcing steel {GLO}  market for   Cut-off, U	4,8%	90,8%
Sodium silicate, solid {GLO}  market for   Cut-off, U	1,9%	92,7%
Sand {BR}  market for sand   Cut-off, U	1,8%	94,5%
Diesel {BR}  market for diesel   Cut-off, U	1,5%	96,0%
Rail Clip - Fix. trilho - Steel, low-alloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	1,4%	97,5%
Machine operation, diesel, >= 74.57 kW, steady-state {GLO}  Cut-off, U	1,0%	98,5%
Agricultural trailer {GLO}  market for   Cut-off, U	0,7%	99,2%
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, underground mining {GLO}  Cut-off, U	0,3%	99,5%
Plasticiser, for concrete {GLO}  market for   Cut-off, U	0,2%	99,6%
White mineral oil, at plant/RNA	0,1%	99,7%
Tala de junção - Steel, low-alloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	0,1%	99,8%
Lubricating oil {RER}  market for lubricating oil   Cut-off, U	0,1%	99,9%
Building, hall, steel construction {GLO}  market for   Cut-off, U	< 0,1%	99,9%
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state {GLO}  Cut-off, U	< 0,1%	99,9%
Locomotive {GLO}  market for   Cut-off, U	< 0,1%	100,0%
Gravel, crushed {BR}  market for gravel, crushed   Cut-off, U	< 0,1%	100,0%
Machine operation, diesel, < 18.64 kW, generators {GLO}  Cut-off, U	< 0,1%	100,0%
Parafuso - Steel, low-alloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	< 0,1%	100,0%
Maintenance, locomotive {GLO}  market for   Cut-off, U	< 0,1%	100,0%
Goods wagon {GLO}  market for   Cut-off, U	< 0,1%	100,0%
Maintenance, goods wagon {GLO}  market for   Cut-off, U	< 0,1%	100,0%
Lubricating oil {RoW}  market for lubricating oil   Cut-off, U	< 0,1%	100,0%

Como resultado, a Figura 62, mostra redução de aproximadamente 10% do impacto de potencial de aquecimento global, quando usada a matriz energética do Brasil.

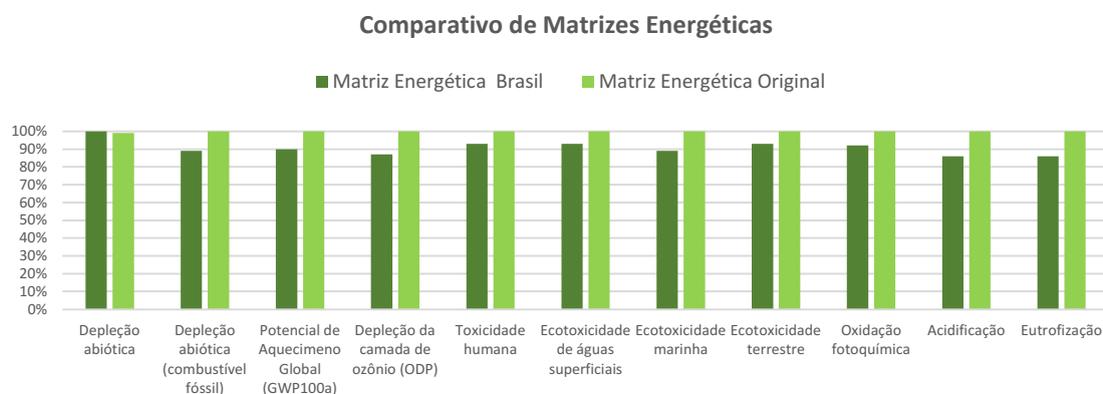


Figura 62 Comparativo de categorias, baseado na variação das matrizes energéticas.

#### 4.5 Interpretação da ACV para as etapas de Construção e Manutenção

A etapa de interpretação trata da fase de entrega de conclusões e recomendações. Dito isto, e tendo por base os dados e avaliações na seção 4.4.2, na qual foram avaliadas as contribuições individuais dos processos e insumos, sem considerar as etapas do ciclo de vida conjuntamente, a presente seção se diferencia ao avaliar tanto a construção quanto a frequência de intervenções de manutenção ao longo do período de uso da via permanente, adotado como 100 anos. Ou seja, na interpretação, considerou-se o montante das contribuições do impacto, desde a primeira até a última fase do sistema de produto adotado.

Logo, a presente seção trata da consolidação dos *outputs* de vida útil estimados no final da seção 4.2 agregados aos impactos de potencial de aquecimento global mensurados na seção 4.4. Com isso em vista, é relevante identificar a frequência de manutenção e, para isso, foram usadas a Figura 63 a Figura 66, as quais comparam a degradação da via e atividades de manutenção distribuídas no tempo, conforme Vale & Simões (2022), baseado nos conhecimentos da gerência de pavimentos.

Para isso, os cenários com o uso dos materiais similares foram sobrepostos, visando mostrar a variação do número de intervenções para as diferentes condições de umidade adotadas. Em seguida, quantificadas as frequências das intervenções, os impactos foram consolidados para cada etapa do sistema de produto, conforme a Figura 67 até a Figura 69 e, por fim, o montante de cada cenário foi agregado na Figura 70.

Diante disso, tendo como primeira análise a comparação dos cenários quanto à variabilidade das condições de umidade do subleito, é possível notar que, mesmo quando são empregados materiais idênticos na via permanente, a preservação das condições ideais de trabalho desta camada é essencial, uma vez que visa garantir um menor impacto de aquecimento global, fruto da menor frequência das atividades de manutenção/reconstrução. Além disso, é possível afirmar que, com base na Figura 70, o uso de aglomerantes para reforço da camada de sublastro - em condições de umidade ótima - pode elevar cerca de 8% (solo-cimento) a 11% (solo-emulsão) o impacto de aquecimento global, quando comparado com a mesma camada constituída apenas de solo arenoso. Entretanto, quando usado o CBUQ, esse aumento é da ordem de 100%. Isso tende a mostrar que, mesmo diante da frequência distinta nas atividades de manutenção e reconstrução dos cenários analisados, considerando a condição de uso da via com o

subleito na umidade ótima e tendo como parâmetros o impacto de aquecimento global, os resultados apontam que o uso de aglomerantes nas camadas do pavimento pode não ser uma tomada de decisão interessante. De toda forma, reforça-se que tal conclusão depende do modelo de desempenho de deterioração adotado.

A seguir são apresentadas as informações da Figura 63 até a Figura 66, para detalhar a frequência da manutenção diante da degradação da via. Para isso, com base nos conceitos de índice de qualidade da via (Offenbacher *et al.*, 2020), foi adotada a referência superior com base no limite do desempenho mecânico (índice igual a 5, indicando o fim da vida útil), e na delimitação inferior convencionou-se como a condição pós-intervenção (índice igual a 1, representando o estágio inicial de uso).

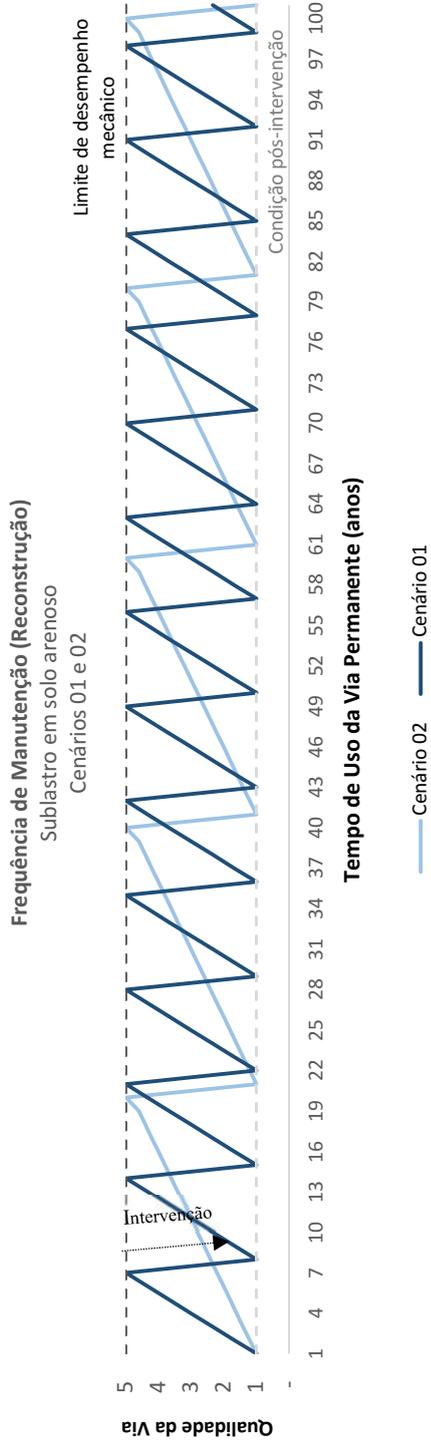


Figura 63 Comparativo entre frequências de reconstrução - Cenários 01 e 02

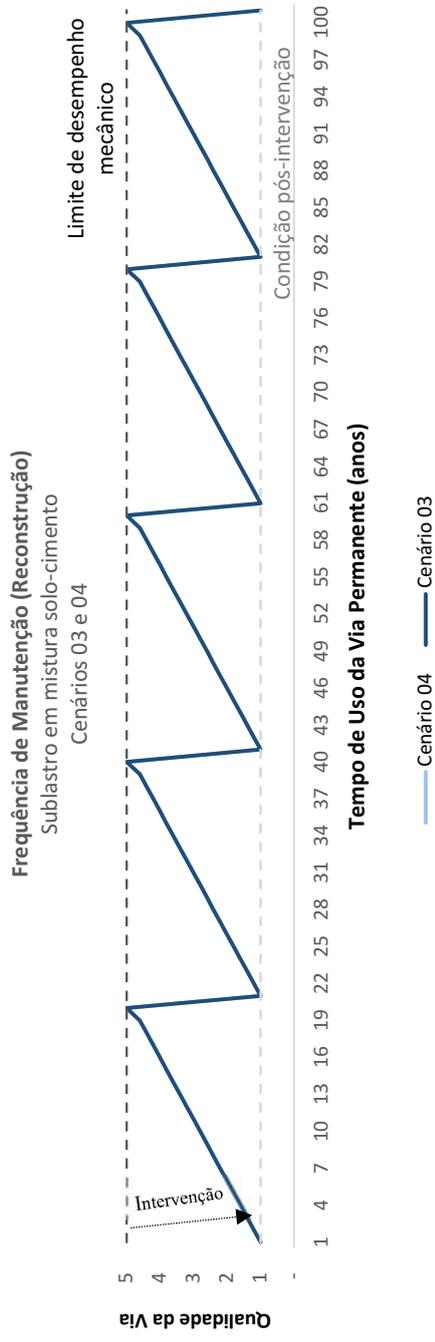


Figura 64 Comparativo entre frequências de reconstrução - Cenários 03 e 04

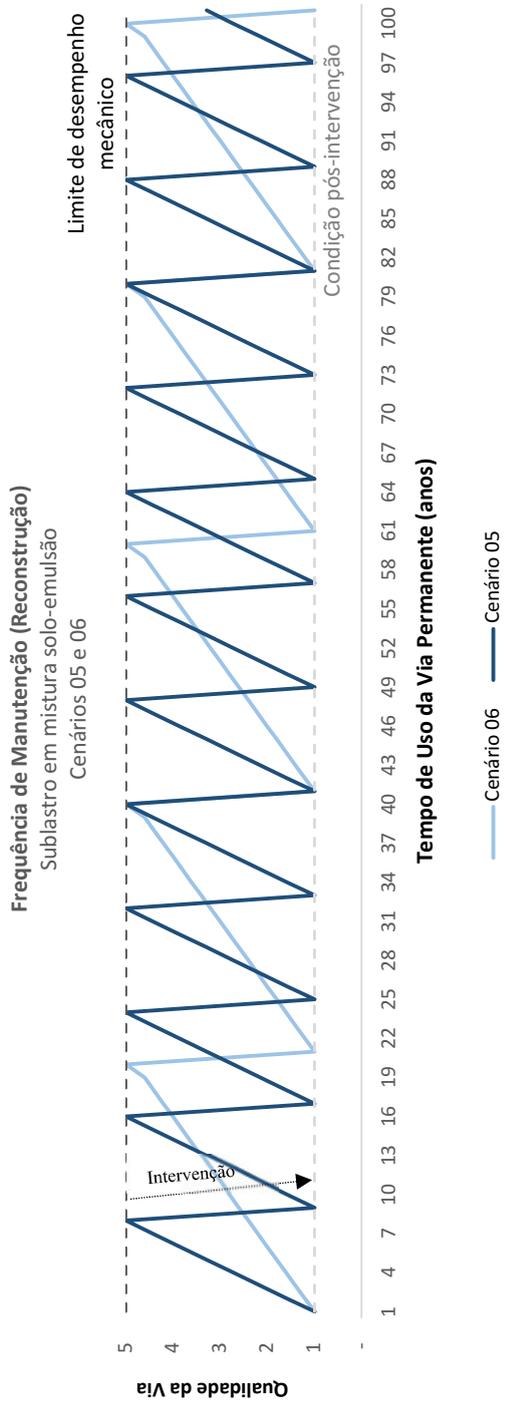


Figura 65 Comparativo entre frequências de reconstrução - Cenários 05 e 06

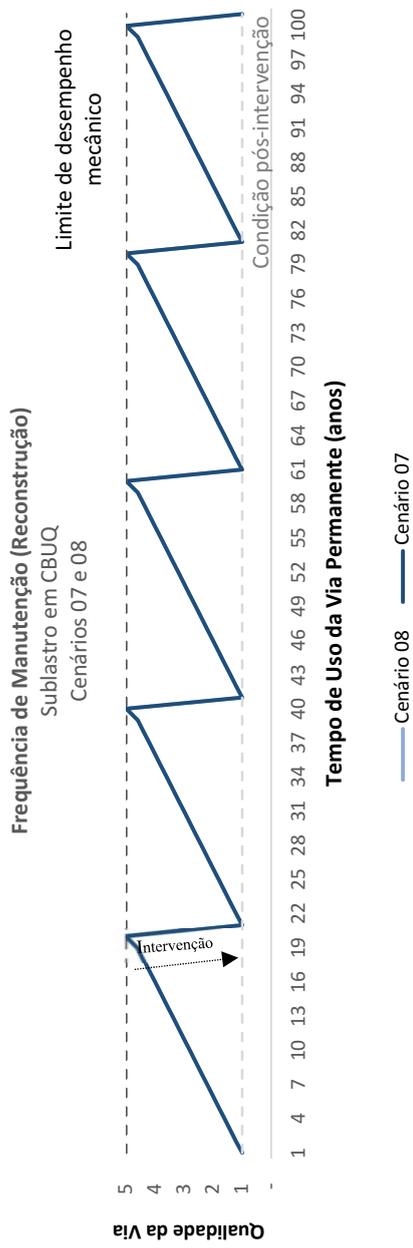


Figura 66 Comparativo entre frequências de reconstrução - Cenários 07 e 08

Adiante, no que se refere à etapa de construção, visto na Figura 67, é possível notar que os impactos mensurados apresentam variação apenas quando levada em consideração a variação de material empregado na camada de sublastro, não se observando influência das diferenças nas condições de umidade do subleito. No tocante à magnitude do parâmetro avaliado, os cenários com emprego de material asfáltico apresentam maior impacto quando comparado com o demais.

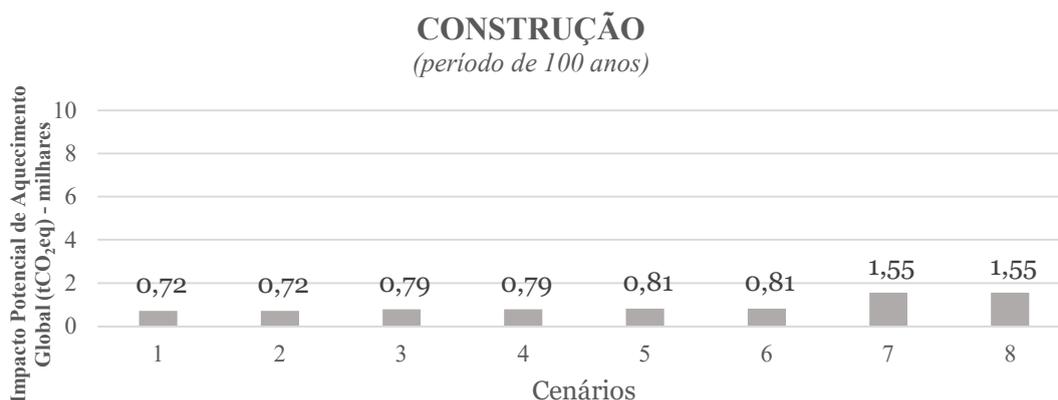


Figura 67 Impacto gerado no período de 100 anos - Construção

No que se refere às estratégias de manutenção, excetuando-se a reconstrução, é interessante lembrar que foram adotadas as mesmas atividades, com frequência idêntica para todos os cenários, conforme Tabela 18 e Tabela 29. Diante disso, fica evidente que o impacto dos serviços considerados tem pouca influência quando comparado com a etapa de construção e reconstrução, visto que o consumo de insumos é inferior aos demais, sendo a principal contribuição advinda do diesel, conforme na Figura 60

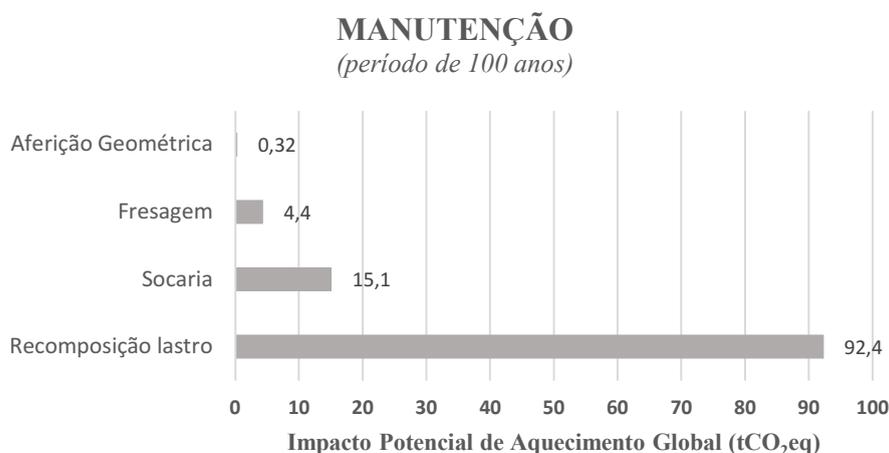


Figura 68 Impacto gerado para o período de 100 anos - Manutenção

Adiante, no que diz respeito aos impactos mensurados, é possível notar a influência da variação de umidade que, devido ao menor tempo de vida útil do subleito, leva a uma frequência maior nas atividades de reconstrução, demandando maior consumo de insumos. Diante disso, avaliando a Figura 69, observa-se que o uso de materiais como o solo-cimento (Cenário 03) se mostra uma solução interessante quando a fundação trabalha no ramo úmido da curva de compactação. Além disso, o uso de solo-emulsão (Cenário 05), considerando o *trade-off* entre o tempo de vida final do projeto e o impacto gerado, se mostra uma opção pouco interessante. Reforça-se que a diferença entre a Figura 45 e a Figura 69 reside no fato deste segundo compreender todo o ciclo de vida da estrutura, para um período de análise de 100 anos, enquanto o primeiro trata dos impactos para a execução de uma atividade de intervenção.



Figura 69 Impacto gerado para o período de 100 anos - Reconstrução

Assim, quando se avalia os sistemas de produto de todo o ciclo de vida, apresentado na Figura 70, a conclusão similar ao mencionado para a análise do estágio de reconstrução é confirmada. Ou seja, tendo como referência os cenários 01 e 02, nos quais são empregados apenas material granular no sublastro, sem aglomerantes, pode-se afirmar que manter o subleito em condições de umidade ótima se mostra uma medida interessante do ponto de vista do impacto de aquecimento global, visto que a frequência das atividades de reconstrução se mantém em patamares significativamente menores. Quando isso não for possível, o emprego da mistura solo-cimento tende a ser a melhor escolha a ser empregada no sublastro, ao se comparar com outras soluções como solo-emulsão e CBUQ, tendo como critérios o tempo de operação da via adotado neste estudo e a categoria de impacto de aquecimento global.

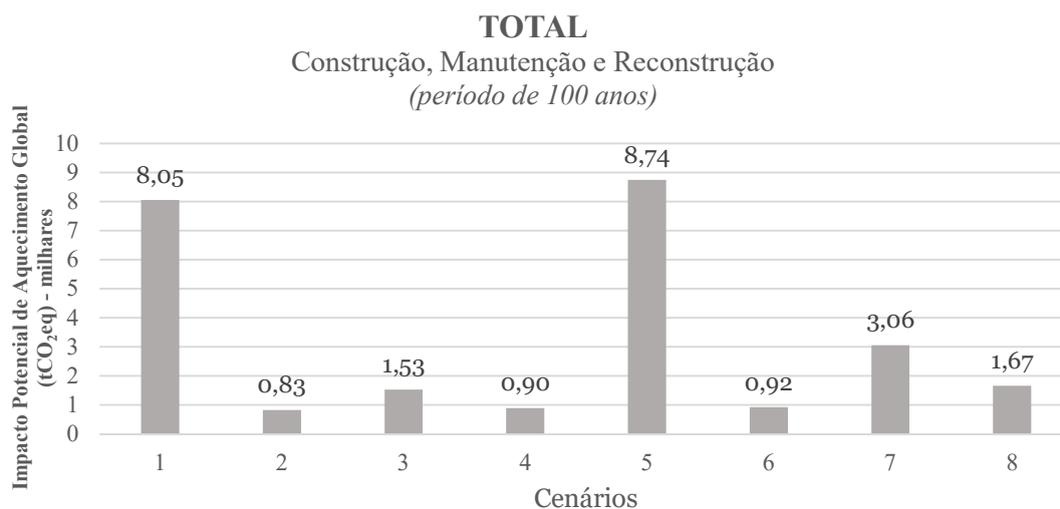


Figura 70 Total de caracterização de impacto, considerando o período de 100 anos.

Visando comparar os resultados encontrados, utilizou-se como referência os estudos de Bortoli *et al.*, (2020), Pons *et al.* (2020), Chang & Kendall (2011) e Stripple & Uppenberg (2010). No primeiro trabalho, as autoras obtiveram os seguintes valores de impactos (em tCO<sub>2</sub>eq/km.ano): para o subleito e sublastro, 5,9; para os equipamentos de construção, 2,0; para o lastro, 3,14; para o dormente de concreto, 2,83; para o trilho, 5,79; para os elementos de fixação, 0,139; e, para o transporte de materiais, 2,57; totalizando 22,37. Já Pons *et al.* (2020) apresentam o valor consolidado de 2,01E+7 kgCO<sub>2</sub>eq para uma seção similar ao avaliado no Cenário 02, ou seja, a *baseline* usada para avaliar os demais cenários, nos quais a via está trabalhando na condição ideal de umidade e sem adição de aglomerantes no sublastro para melhoria do desempenho mecânico. Compatibilizando a unidade funcional deste estudo, ou seja, o período de 75 anos, via dupla e extensão de 10km para atender a unidade de tCO<sub>2</sub>eq/km.ano, é possível obter o índice de 13,40 tCO<sub>2</sub>eq/km.ano. Nesse mesmo sentido, considerando o trabalho de Chang & Kendall (2011), no qual é estimada a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub>eq para o *track bed* em 869,215 t, para uma via com extensão de 725km e, sendo conservador ao adotar o menor período de vida útil da via mencionado, como 60 anos, é possível obter um índice de emissão de 19,98 tCO<sub>2</sub>eq/km.ano. Além disso, Stripple & Uppenberg (2010) realizam um detalhamento do impacto de potencial de aquecimento global por quilômetro para um período de 60 anos, segregado entre as atividades de fundação da via e dos demais elementos do pavimento ferroviário. Compatibilizando também com a unidade funcional do presente estudo, foi considerada a limpeza do topo do solo (6.33E+03 kg CO<sub>2</sub>eq), a construção da fundação (1.02E+05 kg CO<sub>2</sub>eq) da categoria de fundação e todos os

serviços do *track* ( $8,08E+005$  kg CO<sub>2</sub>eq). Diante disso, foi possível obter um índice de 15,27 t CO<sub>2</sub>eq.

Portanto, baseado na Figura 71, é possível afirmar que, tendo o Cenário 02 como referência e a elucidação a seguir quanto aos sistemas de produtos e fronteira de sistema dos estudos comparados, os valores encontrados neste estudo estão coerentes com os resultados obtidos em trabalhos científicos publicados. Isto permite balizar os esforços para futuros estudos que possam avaliar outras diferentes soluções para as questões avaliadas no procedimento metodológico proposto.

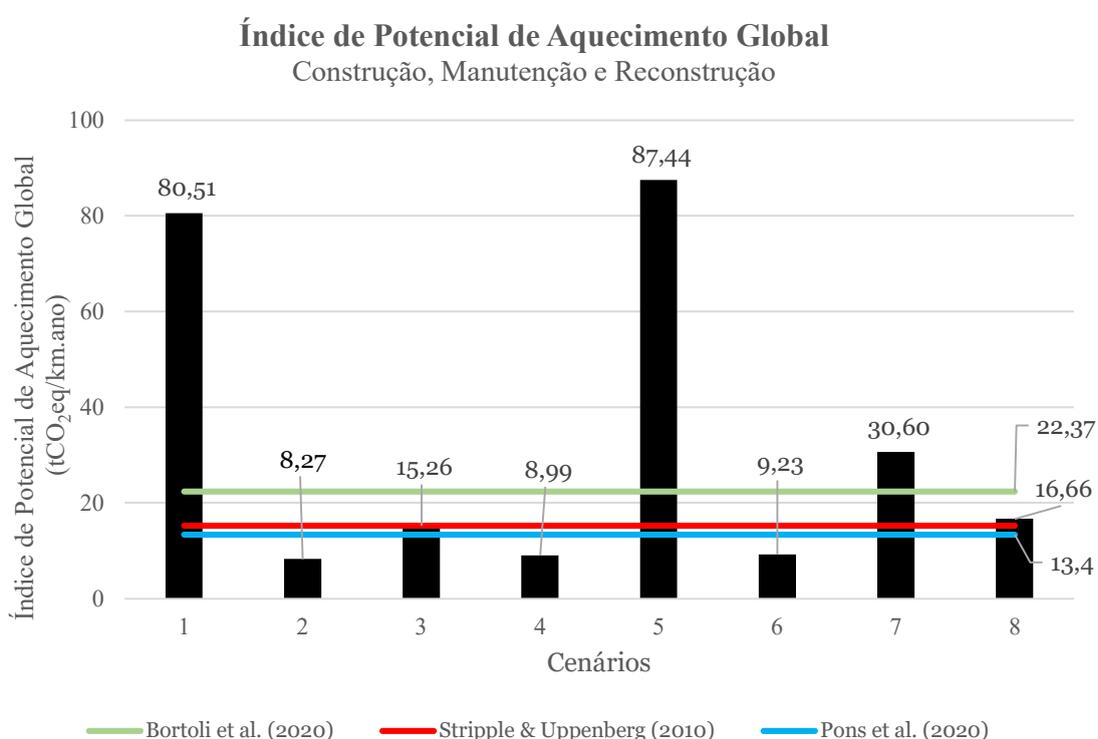


Figura 71 Comparativo de índices de impacto do presente estudo com a literatura

Além dos índices comparativos supracitados, adiante são detalhados os estudos empregados como referência, como Landgraf & Horvath (2021), Bortoli *et al.* (2020), Pons *et al.* (2020) e Stripple & Uppenberg (2010), com foco na explicitação de seus objetivos, unidades funcionais, sistemas de produtos e fronteiras de sistemas. O intuito nessa etapa é evidenciar primeiramente as diferenças e, em seguida, apresentar as convergências com o presente estudo, visando uma análise de nível estratégica dos resultados obtidos. Logo, os estudos são elucidados a seguir:

- Landgraf & Horvath (2021) utilizaram a malha ferroviária austríaca para realizar seu estudo de estimativa das emissões de gases de efeito estufa e consumo de energia, cuja unidade funcional compreendeu diferentes seções de pavimento, assim como outros elementos como estruturas, túnel, barreira acústica, sistema de energia e sinalização, para transporte de cargas e passageiros;

- Bortoli *et al.*, (2020), avaliando 13 (treze) impactos ambientais, dentre eles a mudança climática, tiveram como unidade funcional 01 (um) quilômetro de via singela em tangente localizado na França, para um período de 120 anos, no qual também foram incluídos os viadutos e o sistema de energia na ACV, para transporte de passageiros;

- Pons *et al.* (2020), em seu estudo para análise de 18 (dezoito) impactos ambientais, tiveram como unidade funcional 10 (dez) km de via dupla em tangente, pelo período de 75 anos, para transporte de passageiros na Espanha;

- Stripple & Uppenbergh (2010), em análise a malha ferroviária da Suécia, avaliaram o ciclo de vida para o consumo de energia, emissões e impactos ambientais, além de potencial de aquecimento global, considerando a fundação da via, o *track*, pontes, sistema de energia e sinalização. Também consideraram as estações de passageiros e terminais de carga, assim como os veículos para esses transportes. A unidade funcional adotada compreendeu 01 (um) km de via singela em tangente, com uso de lastro e dormente de concreto, pelo período de 60 anos. Vale ressaltar que o estudo se mostra robusto no detalhamento, avaliando as atividades de fundação como limpeza de terreno e movimentação de solo, assim como desflorestamento.

Quanto à fronteira de sistema, os estudos de Bortoli *et al.*, (2020), Pons *et al.* (2020) e Stripple & Uppenbergh (2010) abordam a extração das matérias-primas, fabricação dos materiais, construção, manutenção e fim da vida dos elementos. Landgraf & Horvath (2021) consideram, também, as mesmas etapas anteriores, com destaque para a reconstrução, exceto o fim da vida.

Relativamente aos inventários de ciclo de vida empregados, Landgraf & Horvath (2021) utilizaram diferentes estudos desenvolvidos acerca da temática, priorizando aqueles feitos para a Áustria e Europa. Já Bortoli *et al.*, (2020), assim como no presente estudo, utilizaram as bases de dados do EcoInvent. Diferentemente, Pons *et al.* (2020) empregaram as informações do ReCiPe e do EcoInvent. Stripple & Uppenbergh (2010) mencionam que os dados de LCI foram obtidos de diferentes fontes, como

literatura técnica, dados de plantas de operação, advindos dos fornecedores dos equipamentos, assim como legislação e diretrizes.

Já sobre os pontos de convergência adotados nos estudos de Landgraf & Horvath (2021) e Pons *et al.* (2020) com relação ao presente trabalho tratam justamente do uso da variação de materiais empregados na infraestrutura ferroviária e o tempo de vida de serviço como principais critérios para análise da sensibilidade do objeto de estudo quanto à ACV. De toda forma, enquanto o estudo desenvolvido na Áustria teve como foco a variação do tipo de dormente adotado (madeira, concreto e concreto usando *rail pad*), o trabalho desenvolvido na Espanha contou com a variabilidade do *track system* (lastreado e não lastreado) e o estudo aqui desenvolvido decidiu selecionar diferentes soluções no sublastro, resultando em desempenhos mecânicos distintos e, conseqüentemente, a vidas de serviço distintas.

Além disso, outro ponto de aderência entre os estudos de Landgraf & Horvath (2021) e Bortoli *et al.*, (2020) com o presente trabalho trata do parâmetro de análise da unidade funcional, o qual consistiu no uso da quantidade de CO<sub>2</sub>eq por quilômetro de via por ano. Nesse mesmo sentido, apesar de não utilizar especificamente o critério de forma similar aos estudos mencionados anteriormente, Stripple & Uppenberg (2010) apresentam seus resultados de impacto de potencial de aquecimento global na unidade de kgCO<sub>2</sub>eq para o período de 60 anos, o que permite a compatibilização.

Ainda sobre os pontos principais de convergência, pode-se afirmar que os estudos mostram que a grade ferroviária (*track*) é a principal fonte de emissões e impactos, sendo o trilho e o dormente os que mais contribuem. Corroborando nesse sentido, para Bortoli *et al.* (2020), o trilho contribui cerca de 21% do impacto de mudança climática avaliado, enquanto no estudo aqui desenvolvido, essa participação é de aproximadamente 38%, podendo essa variação ser explicada na diferença da unidade funcional, visto que o viaduto considerado por Bortoli *et al.*, (2020) representa cerca de 14%. Esse mesmo comportamento é observado em Stripple & Uppenberg (2010), quando fica evidente que a produção do trilho é a maior fonte de impacto de potencial de aquecimento global.

Ainda tratando dos elementos que compõe o pavimento, Pons *et al.* (2020), ao compararem três tipos de seções para a ferrovia, mostram que, considerando o impacto de potencial de aquecimento global, o uso de lastro, como a estrutura usada no presente estudo, é o que gera menor impacto quando comparado com outras soluções não-

lastreadas. Além disso, os dois estudos evidenciam que a etapa de manutenção, a qual abrange também a reconstrução, é a responsável pela maior parte dos impactos gerados.

Por fim, evidencia-se que, tendo o critério de impactos ambientais como referência para análise da infraestrutura ferroviária a partir da ACV, os estudos analisados mostram que os esforços devem ser direcionados para a seleção criteriosa dos tipos de materiais empregados na estrutura visando garantir o maior tempo de vida de serviço. Além disso, os critérios de desempenho mecânico, como carga aplicada sobre a via, citado por Pons *et al.* (2020), e a condição de umidade do subleito, como avaliado no presente trabalho, devem ser levados em consideração, visto que têm influência direta no *trigger* para iniciar a etapa de manutenção.

#### 4.5.1 Sumário executivo do Estudo de Caso

Diante da demanda crescente nas ações de mitigação do impacto de potencial de aquecimento global, este estudo se mostra como uma proposta inicial da aplicação dos conceitos das ferramentas da avaliação do ciclo de vida aplicados à infraestrutura de transporte ferroviário, promovendo uma reflexão para que os tomadores de decisão de futuros projetos tenham uma referência de método a ser aplicado quanto às estratégias de investimento no setor.

Para essa finalidade, foi avaliado o pavimento ferroviário, cuja unidade funcional é baseada na quantidade de passagens do material rodante sobre a via, sendo composta por um quilômetro de via permanente singela lastreada para transporte de carga, em tangente, cujos elementos vão desde o trilho, fixações, dormente, lastro, sublastro até o subleito. Isto pelo período de 100 anos de uso da via, sob a aplicação de carga de um eixo-padrão de 25 toneladas. Para o objetivo, dentre os impactos e emissões tradicionalmente estudados, este trabalho avaliou o potencial de impacto de aquecimento global, visto a demanda de ações necessárias para mitigação das mudanças climáticas. Quanto ao escopo, a ACV considerou desde a extração das matérias-primas, até a manufatura dos insumos e equipamentos e a construção da via e sua manutenção, sendo o transporte dos materiais incluso em cada respectiva etapa. Já para a análise do inventário, foram empregadas as matérias-primas e equipamentos detalhados na base de dados do Sistema de Custo de Obras do Ministério da Infraestrutura brasileiro e, a partir desses elementos, foram selecionadas as composições mais aderentes na base do EcoInvent 3.6, visando a tradução apropriada entre o *input* e *output* de cada processo. Adiante, foram consolidados

os dados de potencial de aquecimento global, obtidos na etapa anterior, e agrupados em gráficos e tabelas para permitir a interpretação dos resultados, os quais são detalhados a seguir:

a) Com base na Figura 70, as atividades anuais de manutenção (aferição geométrica, fresagem, socaria e recomposição do lastro) são as que menos contribuem para o total de impacto gerado em cada cenário avaliado, variando de 1 a 14%; já a etapa de construção, possui o segundo maior patamar em relação ao impacto total, com amplitude de 9 a 93%; por fim, a etapa de manutenção compreendida pela atividade de reconstrução abrange a maior parte das contribuições de impacto em relação ao total, cerca de 41 a 90%. Isto se deve à frequência e magnitude dessa atividade durante a vida útil da estrutura considerada no estudo. O tempo adotado, para que novas intervenções de reconstrução fossem realizadas foi de 10 anos, pode ser inferior, caso o desempenho mecânico do subleito apresentasse menor durabilidade. Além disso, o volume de materiais e serviços empregados se mostra próximos aos da construção, caracterizada por uma significativa parcela de contribuição em relação ao impacto total.

b) Diante do exposto no tópico anterior, ainda na Figura 70, no qual a atividade de reconstrução se mostrou como a maior fonte de contribuição do potencial de impacto de aquecimento global em relação aos demais, o desempenho mecânico do pavimento se mostra como um elemento relevante a ser considerado na gestão do ativo ferroviário. Desta maneira, retomando os dois critérios de variabilidade adotados no estudo (tipos de materiais do sublastro e condição de umidade do subleito), é possível verificar que: (i) quando a estrutura se encontra em condições ideais de umidade da fundação – Cenários 2, 4, 6 e 8 –, o maior valor de potencial de impacto de aquecimento global é gerado na seção de pavimento onde há emprego de CBUQ (1.670 tCO<sub>2</sub>eq), enquanto que, para os demais cenários, o patamar oscila de 830 a 920 tCO<sub>2</sub>eq, o que tende a atribuir essa variação justamente aos diferentes processos produtivos dos materiais empregados; (ii) quando a estrutura se encontra em condições não ideais de umidade do subleito – Cenários 1, 3, 5 e 7 –, nessa situação, a maior contribuição de impacto ainda é do cenário com uso de solo-emulsão (8.740 tCO<sub>2</sub>eq), seguido da solução sem aglomerante (8.050 tCO<sub>2</sub>eq), do cenário 08 que emprega CBUQ (1.670 tCO<sub>2</sub>eq) e, por fim, da seção de pavimento com solo-cimento (1.530 tCO<sub>2</sub>eq). Isto pode ser atribuído, além dos processos produtivos dos materiais, também ao mal desempenho mecânico da estrutura, que leva a uma maior frequência da atividade de reconstrução;

c) Quanto à contribuição pela origem dos materiais, observou-se que os elementos compostos por aço (trilho e fixações) são os que mais geram impacto de potencial de aquecimento global, alinhado com o estudo de Umweltbundesamt (2013); exceto quando são empregados os materiais asfálticos, como a emulsão e o CBUQ, sendo que o impacto desse último pode ser minimizado com o uso de revestimento asfáltico reutilizável - RAP, tendo como referência o estudo de Bressi *et al.* (2018a), no qual as misturas asfálticas com uso de 30% de RAP empregadas em sublastro apresentaram redução de impacto ambiental;

d) De toda forma, o presente estudo não visa desencorajar o uso de materiais asfálticos na infraestrutura ferroviária, visto que o critério utilizado para análise do desempenho do subleito tratou da variação na condição de umidade em patamar de aproximadamente 2% acima da umidade ótima. Estudos consistentes, como o desenvolvido por Lazorenko *et al.* (2019) e Li (2018), trazem evidências do uso dessa solução, aplicada ao sublastro, para impermeabilização da camada de fundação em condições de umidade adversas muito superiores às aquelas aqui estudadas. Nesse mesmo objetivo, Khairallah *et al.* (2019), com uso de equipamentos de medição em campo, mostraram que tal solução de engenharia impede significativamente o acesso da umidade na camada de subleito, mantendo a estrutura operando em condições ideais mesmo diante de intensa precipitação, podendo inclusive ser usada como medida de adaptação para a infraestrutura de transporte frente às mudanças climáticas (Rattanachot *et al.* 2015; Palin *et al.*, 2021). Portanto, o intento deste estudo é fornecer uma ferramenta que possa avaliar os projetos e soluções de engenharia que sejam adequadas a cada tipo de demanda.

#### 4.5.2 Análise de Incertezas

Os resultados da análise de incertezas, baseada nas simulações de Monte Carlo, são apresentadas na Figura 72 até a Figura 75, a seguir. Para isso, foi avaliada a caracterização do impacto de potencial de aquecimento global, baseado na unidade kg CO<sub>2</sub>eq, empregando 10.000 simulações, com intervalo de confiança de 95%. O objetivo da análise foi compreender o nível de qualidade das informações dos inventários utilizados.

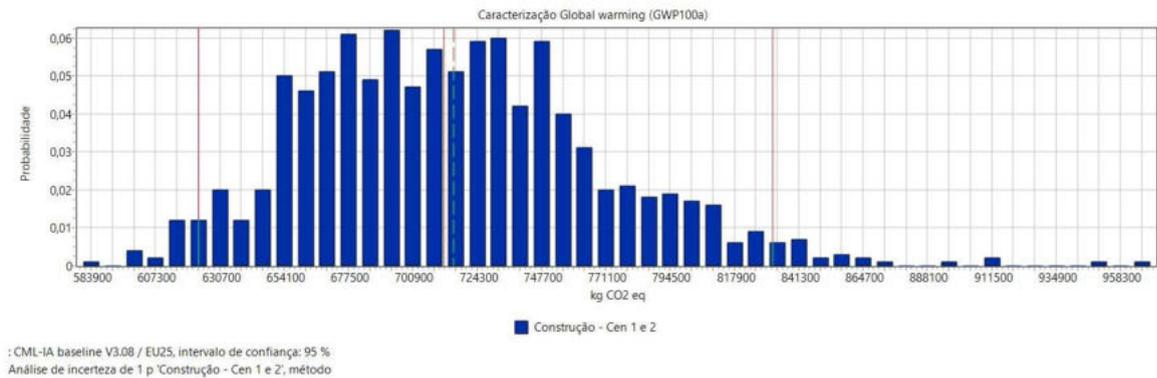


Figura 72 Análise de Incertezas - Cenários 01 e 02

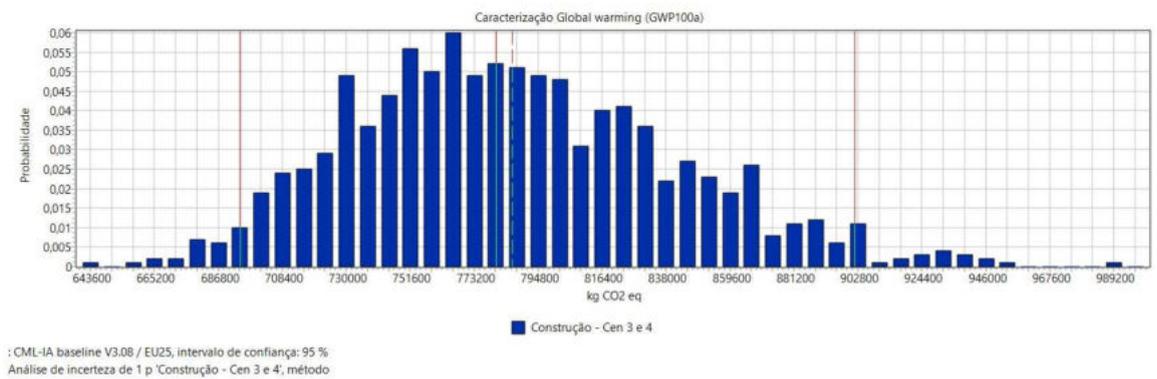


Figura 73 Análise de Incertezas - Cenários 03 e 04

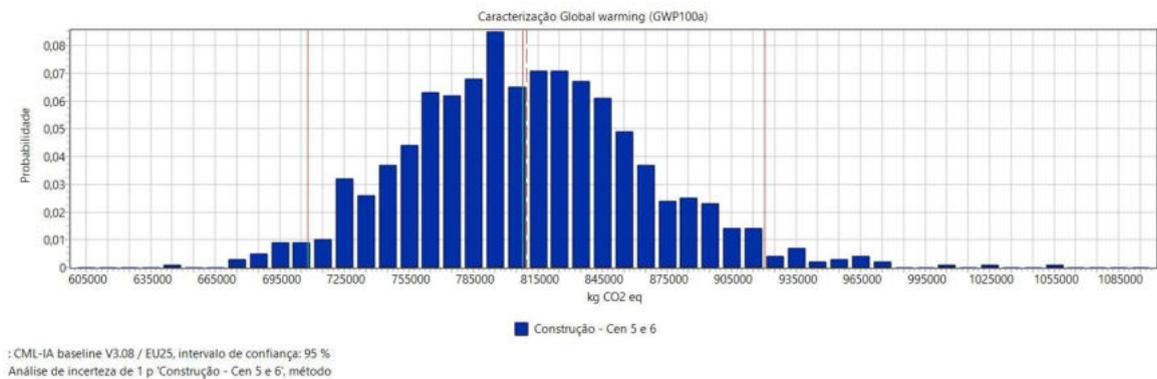


Figura 74 Análise de Incertezas - Cenários 05 e 06

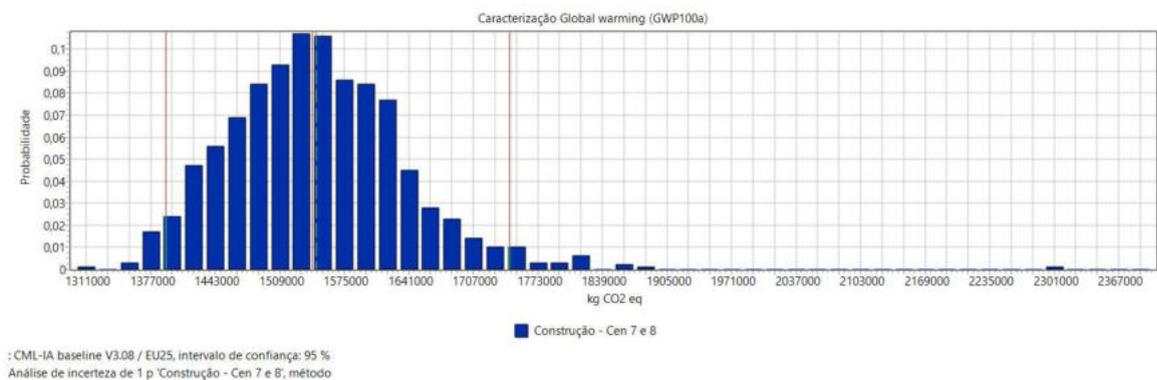


Figura 75 Análise de Incertezas - Cenários 07 e 08

Adiante, a Tabela 43 apresenta os resultados obtidos para a análise de incertezas dos cenários avaliados no presente estudo de caso.

Tabela 43 Consolidação dos resultados da Análise de Incertezas

Cenário	Média	Mediana	SD	CV	2,5%	97,5%	SEM
01 e 02	715.585,81	712.050,36	53.451,60	7,47	622.823,16	831.569,77	1.690,29
03 e 04	785.831,77	780.492,71	54.015,26	6,87	694.290,76	901.652,14	1.708,11
05 e 06	809.510,69	807.567,52	54.674,31	6,75	707.727,24	920.405,23	1.728,95
07 e 08	1.546.298,12	1.541.810,17	89.889,97	5,81	1.392.041,20	1.744.013,34	2.842,57

\*SD: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação; SEM: erro padrão da média

Por fim, a Figura 76 apresenta o comparativo de variação das incertezas entre os cenários avaliados. Como é possível inferir, os dois últimos cenários têm maior amplitude no critério avaliado, podendo ser atribuído aos processos de produção do concreto asfáltico, que trata justamente da diferença entre as seções analisadas.

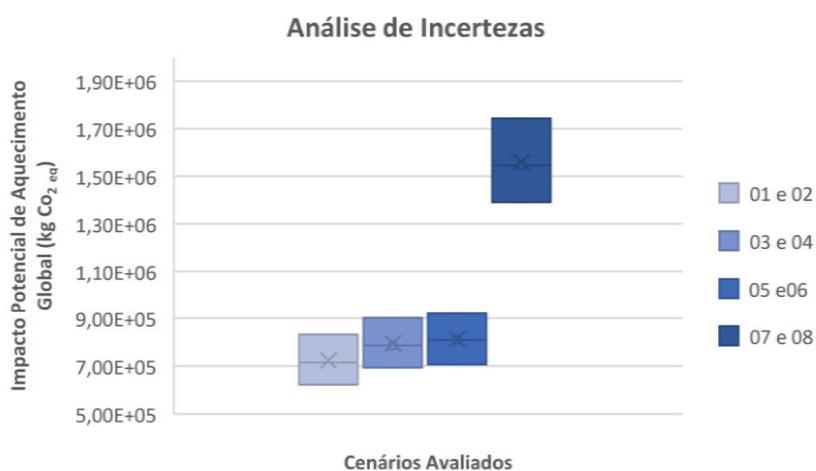


Figura 76 Comparativo da variação dos cenários para a Análise de Incertezas

Finalmente, com base nas figuras e tabela apresentadas acima, é possível concluir que o comportamento de variação das médias entre os cenários se manteve em linha com os resultados indicados nas análises anteriores, ou seja, com os cenários sem aditivo de aglomerante no sublastro definidos pelos menores valores de caracterização de impacto, seguido uso de solo-cimento, solo-emulsão e, por fim, CBUQ. Tal característica também é observada nos resultados do trabalho de Bressi *et. al* (2022), ao avaliar diferentes seções de pavimento com uso de cimento e RAP (material asfáltico reciclado). No referido estudo, os resultados explicitam a relação entre o tipo e quantidade de material com o volume dos impactos gerados, ou seja, quanto maior a quantidade de aglomerante utilizado, maior também a quantidade de impacto, assim como o acréscimo de resistência da estrutura.

#### 4.6 Conclusões do Estudo de Caso

O uso de ACV para diferentes aplicações tem sido foco de estudo durante os últimos anos, inclusive no setor de infraestrutura ferroviária, como demonstrado na Tabela 3. Diante disso, baseados na padronização da série ISO 14040, diversos métodos foram criados para essa finalidade. Além das peculiaridades dos procedimentos metodológicos, as bases de dados de inventários de ciclo de vida vêm sendo desenvolvidas em locais distintos, sendo sua maior parte proveniente do hemisfério norte. Ademais, as metodologias executivas das atividades de construção e manutenção possuem sua própria especificidade, de acordo com o grau de desenvolvimento tecnológico do país, equipamentos e materiais disponíveis, assim como a capacitação da mão-de-obra.

Outro ponto relevante trata da estimativa de vida útil da estrutura. Como já mencionado, em relação aos estudos de ACV para a plataforma ferroviária, tradicionalmente emprega-se o critério de total de carga acumulada transportada sobre a via permanente ou mesmo dados históricos de intervenções. De toda forma, com esse mesmo objetivo, diferentes modelos de degradação têm sido concebidos a partir dos diversos elementos que compõe a via permanente e de parâmetros distintos, conforme os materiais que os constituem, como apresentado na seção 2.3.

Portanto, o presente estudo de caso se comprometeu a aplicar uma proposta de contribuição a um método para a quantificação do impacto de potencial de aquecimento global, baseado na avaliação do ciclo de vida para a infraestrutura ferroviária de carga do Brasil, a nível de projeto, e que possa ser utilizado para tomadas de decisão em investimentos os quais utilizem como critério de seleção o desempenho ambiental, a partir dos conhecimentos da Mecânica dos Pavimentos.

Como evidência do esforço em representar a realidade brasileira no procedimento metodológico em desenvolvimento, fundamentado na ACV, inicialmente é possível mencionar o uso da unidade funcional, baseada no número N da RFFSA e caracterizada a partir da referência a um projeto nacional de infraestrutura ferroviária, a ferrovia Ferrogrão, cujas especificações técnicas provêm dos órgãos competentes brasileiros. Além disso, o uso da base de dados de serviços de obras de infraestrutura, o SICRO, representa as metodologias e insumos comumente aplicados no país e suas peculiaridades,

como a produtividade dos equipamentos, que tem influência direta no consumo de combustível, relevante fonte de impacto ambiental. Outro esforço para garantir aderência à realidade brasileira trata do uso preferencial de ICV's existentes no EcoInvent 3.6, desenvolvidos para a matriz energética do Brasil, como o cimento *Portland*. Nesse mesmo sentido, a compatibilização entre os insumos extraídos do SICRO para identificação de seu correspondente ICV no Simapro, com caráter empírico, se mostra uma contribuição deste estudo. De toda forma, foi possível observar que, ao se fazer a análise do inventário do aço, admitido para a fabricação e entrega do trilho, a ordem de grandeza da relevância da substituição da matriz energética original (global e resto do mundo) pela brasileira é representada por uma redução de aproximadamente 10% do impacto ambiental avaliado.

Outro ponto de contribuição do presente trabalho trata do uso dos conhecimentos da engenharia civil, para estimar a vida útil do pavimento ferroviário. A via permanente, sendo constituída por diferentes elementos, como trilho, dormente e lastro, necessita de uma análise ampla para determinar a degradação de cada entidade, aplicando modelos de comportamento apropriados para cada tipo de material, característica geométrica e propriedade mecânica. Diante disso, para este estudo, foi selecionado o subleito visto que, baseado nos estudos da seção 2.3, o mal funcionamento da fundação da via compromete todo o desempenho mecânico da estrutura, representado na variação do módulo de via do referido estudo. Selecionado o componente de análise, foi necessário escolher as ferramentas para esse fim. Para isso, optou-se por uma ferramenta de análise tensão-deformação, Systrain, desenvolvida por pesquisadores do Brasil em uma instituição de ensino brasileira, cujo acesso gratuito foi concedido ao autor desse trabalho e cujos *inputs* se encontram alinhados com informações de ensaios de laboratório relacionados ao desempenho mecanístico-empírico dos materiais geotécnicos e do comportamento mecânico dos demais elementos. Adiante, frente a diversos modelos de tensão e deformação exposto na literatura, foram selecionados os modelos para tensão e para deformação, sendo este último desenvolvido com base em solos tropicais brasileiros. Dessa forma, definidas tais limitações, é preciso reforçar que os resultados estão condicionados aos modelos de desempenho e critérios de desempenho (fadiga e deformação permanente), podendo ocorrer variações para a estimativa de vida útil, quando adotados parâmetros diferentes daqueles empregados no presente estudo. De toda forma, o intento de usar as ferramentas da mecânica dos pavimentos foi viabilizar uma

quantificação de durabilidade da estrutura para seu uso como *input* na ACV e, para isso, modelos e critérios de desempenho foram selecionados em conformidade com as ferramentas disponíveis. Por isso, entende-se que a análise aplicada no presente estudo seja suficiente e efetiva para o objetivo que foi proposto.

Ainda quanto às limitações, é relevante mencionar que a modelagem utilizada para avaliar o desempenho mecânico considerou o subleito sob condições climáticas uniformes ao longo do período de análise, o que sabidamente não representa a realidade em sua totalidade. Outro ponto relevante trata da restrição quanto à inserção dos efeitos de colmatação do lastro no desempenho da estrutura, a quebra de lastro pelo aumento de rigidez da via e variação na distribuição de tensões geradas por defeitos na geometria.

Portanto, em análise aos cenários de construção, aqueles com aplicação de CBUQ na camada de sublastro apresentam maior impacto dentro os avaliados, seguido da mistura solo-emulsão. Adiante, o emprego de solo-cimento se mostrou como alternativa cuja ordem de grandeza é similar à solução solo-emulsão. Por fim, o uso do sublastro composto apenas por solo arenoso, sem aglomerante, apresenta o menor impacto entre os cenários avaliados para a etapa de construção, entretanto o patamar é similar ao das misturas com aglomerantes.

Adiante, com relação às atividades de manutenção, o uso dos equipamentos é a principal fonte de impacto, representado pelo consumo de combustível. A recomposição do lastro trata da intervenção com maior relevância, seguido da socaria, fresagem do trilho e inspeção geométrica, respectivamente. É importante lembrar que foi adotada a mesma frequência das manutenções para todo o período de uso da via em todos os cenários.

Em seguida, tratando da reconstrução, pode-se inferir que esta é a intervenção que permite avaliar o impacto de potencial de aquecimento global entre os cenários, relacionando-o ao desempenho mecânico do pavimento. Isto porque a variação de sua frequência ao longo da vida de serviço de 100 anos permite a distinção entre os cenários pela magnitude desse critério ambiental. Desta maneira, assumindo uma primeira análise a partir do parâmetro de condição de umidade do subleito, os cenários cuja umidade se mostrou acima da ótima apresentaram os maiores valores de impacto ambiental quando comparados com aqueles cuja fundação se encontrava em condições de umidade ótima. Já no tocante às seções de pavimento avaliadas com aquela camada em condições de

umidade ótima, a magnitude dos valores entre os cenários se mostrou igual, ou seja, foi nula, visto que não houve intervenção.

Finalmente, tendo como critério o desempenho ambiental, o resultado para todo o ciclo de vida considerado mostra que a solução sem aglomerante é a mais interessante quando o subleito se encontra em condições ideais de saturação, enquanto o solo-cimento é indicado para a saturação condição acima da ótima.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS**

### **5.1 Considerações finais e limitações**

O presente estudo se baseou na premissa do uso de um critério ambiental objetivo para permitir a seleção de projetos de infraestrutura ferroviária, visando atender as demandas ambientais pretendidas de mitigação de impactos. Para isso, adotou as ferramentas da ACV, mesmo diante da ausência de um método de avaliação de ciclo de vida desenvolvido para o Brasil, sugerindo métodos de ACV aplicáveis à nível global. Além disso, para estimar a vida útil do pavimento ferroviário partiu do pressuposto da viabilidade do emprego dos conhecimentos da Mecânica dos pavimentos, a partir do desempenho mecânico do subleito. E finalmente, assumiu a existência da compatibilidade entre os insumos das bases de dados de serviços de engenharia, e os inventários de ciclo de vida.

À vista disso, como hipótese foi declarada que era possível alinhar os conhecimentos de engenharia civil, objetivando estimar a vida útil, assim como a quantificação de insumos pela orçamentação de obras, e uso das ferramentas de ACV, para a caracterização dos impactos ambientais, com a finalidade permitir a seleção entre cenários que admitiam os critérios de variação de materiais e desempenho mecânico, para projetos de pavimento ferroviário no Brasil. Para isto, as análises foram aplicadas em nível de projeto, baseadas nos critérios de variação de materiais no sublastro e da condição estrutural do subleito, para identificar as melhores soluções a partir do desempenho ambiental. A agregação da ACV às ferramentas de análise estrutural parece se adequar às necessidades pretendidas e se mostra uma solução com potencial expansão para a estruturação de demandas correlacionadas ao presente estudo. De toda forma, o problema de análise da condição de saturação do subleito ainda carece de um modelo que considere

as sazonalidades ao longo dos anos, assim como equações de tensão e deformação desenvolvidas para o número  $N$  com magnitudes mais elevadas que aquelas adotadas para o  $N_{projeto}$ . Além disso, é preciso superar as restrições quanto à existência limitada de inventários de ciclo de vida nacionais.

Alicerçado nisso, o objetivo geral desta pesquisa se concretizou na proposta de um procedimento para hierarquizar projetos de pavimento ferroviário com base no desempenho ambiental obtido na ACV, tendo por premissa o uso das informações, bases de dados e ferramentas brasileiras, aplicadas na avaliação estrutural da via permanente, a nível de projeto. Tal procedimento metodológico proposto incluiu cinco grandes áreas: (1) definição de objetivo e escopo; (2) análise estrutural do pavimento ferroviário, considerando a variabilidade dos materiais, elemento estrutural avaliado e desempenho mecânico; (3) levantamento de insumos para os serviços de engenharia; (4) levantamento dos impactos ambientais, representado pela caracterização; e (5) análise dos cenários escolhidos para avaliação. Quanto à contribuição metodológica ao tema, o presente trabalho desenvolveu a estruturação de um processo, constituído de diferentes disciplinas, como o dimensionamento de pavimentos, orçamentação de obra e avaliação do ciclo de vida, para viabilizar a seleção de projetos de infraestrutura, a depender da finalidade do transporte, da seção transversal do pavimento e dos impactos pretendidos a serem avaliados. Ainda como contribuição, diante da escassez de trabalhos no Brasil sobre ACV para ferrovia, mapeada durante a revisão bibliográfica, também é possível mencionar a identificação dos elementos da temática de infraestrutura de transportes para realização de ACV, considerando a realidade nacional. Dessa forma, tendo em vista uma questão mais ampla, ao considerar outros modos de transporte, como o rodoviário, o presente estudo contribuiu para lastrear o desenvolvimento de outros trabalhos nacionais sobre ACV em projetos de pavimentação, cuja análise estrutural pode ser adequada para a unidade funcional que se pretende avaliar.

Adiante, ao que se refere aos objetivos específicos, foram identificados os elementos de ACV para a aplicação pretendida, concluindo-se que esta se mostra uma ferramenta interessante para ser incorporada em análise de cenários para pavimentação ferroviária, a nível de projeto, uma vez que o conceito sistemático da ACV permite a definição clara de objetivo e escopo, assim com o acesso e seleção dos inventários, cálculo dos impactos e interpretação dos resultados. De toda forma, a revisão bibliométrica mostra que o tema de ACV em ferrovia tem sido relevante nos últimos 10

anos, mantendo tendência de crescimento, mas os estudos consultados ainda apresentam unidade funcional diversa, assim como a segregação das atividades de construção e manutenção de modo distinto, podendo-se dizer o mesmo para o tempo de uso da via, resultando em desafio a comparação entre os trabalhos. Considerando ainda a revisão bibliográfica, os esforços dos pesquisadores têm se direcionado para a análise de estruturas *ballastless* para uso de transporte de passageiros, tornando mais desafiadora a busca para referências para o transporte de carga, com uso de via lastreada.

Ulteriormente, apesar da escassez identificada em termos de bibliografia referente à avaliação estrutural do pavimento, a partir do desempenho do subleito, foi possível mapear e estruturar os elementos necessários para estimativa de vida útil da via, adotando-se a agregação dos critérios de tensão (Heukelom & Klomp, 1962) e deformação (Guimarães, 2009) ao procedimento de desempenho do pavimento, em função do número N, baseado no método de dimensionamento de Li *et al* (2015).

Em seguida, após mapeadas as bases nacionais de dados de serviços de engenharia nacionais, foi identificado que o processo de orçamentação, baseado na elaboração de uma planilha de quantidades de serviços, permitiu a extração dos insumos das atividades de construção e, por conseguinte, a execução do “*de-para*” com os inventários de ciclo de vida. Como resultado, foi possível identificar que os documentos da área de engenharia para o Brasil ainda são escassos, apesar dos esforços de entidades do setor. De toda forma, as limitações foram superadas pela adoção de inventários com abrangência global.

Finalmente, baseado no estudo de ILCD (2010), foram definidos os procedimentos comparativos entre os cenários, empregando elementos gráficos, com diferentes níveis de segregação, tanto da estrutura do pavimento quanto do sistema de produto, para interpretação da ACV.

Já sobre os resultados oriundos do estudo de caso, baseado na ferrovia Ferrogrão, projeto nacional localizado no Centro-Oeste e Norte, no que diz respeito à construção, os cenários com aplicação de CBUQ na camada de sublastro são caracterizados pelo maior impacto dentro os avaliados, seguido da mistura solo-emulsão. Em seguida, o uso de solo-cimento apresenta ordem de grandeza similar à solução solo-emulsão. Por fim, o sublastro constituído apenas por solo arenoso, sem aglomerante, apresenta o menor impacto entre os cenários avaliados para a etapa de construção, mas com valores similares às misturas com aglomerantes. No que diz respeito às atividades de manutenção, o consumo de

combustível dos equipamentos é a principal fonte de impacto. Adiante, as maiores relevâncias ficam a cargo da recomposição do lastro, seguidas da socaria, fresagem do trilho e inspeção geométrica, respectivamente. Tratando da reconstrução, é possível afirmar que a intervenção permite avaliar o impacto de potencial de aquecimento global entre os cenários, relacionando-o ao desempenho mecânico do pavimento. Tal fato se baseia na premissa de que a variação de sua frequência, ao longo da vida de serviço de 100 anos, permitiu a distinção entre os cenários pela magnitude desse critério ambiental. Diante disso, assumindo uma avaliação preliminar a partir do parâmetro de condição de saturação da fundação, os cenários, cuja umidade se mostrou acima da ótima, apresentaram os maiores valores de impacto ambiental quando comparados com aqueles cujo subleito se encontrava em condições de umidade ótima. No que diz respeito às seções de pavimento avaliadas com aquela camada em condições de umidade ótima, o patamar dos valores entre os cenários se mostrou similar, ou seja, foi nulo, visto que não houve atividade de reconstrução. Por fim, considerando o critério do desempenho ambiental, o resultado para todo o ciclo de vida evidencia que o emprego do sublastro sem aglomerante é o mais interessante quando o subleito se encontra em condições ideais de saturação, enquanto o solo-cimento é indicado para a saturação condição acima da ótima.

Assim, infere-se que o trabalho aqui desenvolvido tem o potencial de ser desdobrado em estudos que validam, refutam ou complementam os resultados aqui encontrados, considerando três principais disciplinas: (i) engenharia, com emprego de diferentes modelos para predição do fim da vida útil estimada para a plataforma, assim como detalhamento da degradação de cada elemento (trilho, dormente, lastro e sublastro) e não apenas o subleito, como realizado no presente estudo; (ii) ambiental, pela variação de outros materiais possíveis de serem empregados na composição da infraestrutura; (iii) políticas públicas, para viabilidade do emprego dos critérios de ACV nas tomadas de decisão para a contratação de serviços e aquisições no setor de infraestrutura.

No tocante aos aspectos de engenharia, o uso de modelos de desempenho e/ou deterioração do pavimento ferroviário distintos do empregado neste trabalho, com alguns exemplos compilados por Elkhoury *et al.* (2018), pode trazer resultados que ofereçam uma visão mais ampla para as análises. Nesse mesmo sentido, a aplicação de outros modelos de tensão e deformação, identificados por Tutumluer (2013), tende a permitir a identificação de dados que viabilizem uma crítica aos resultados estruturais calculados. Além disso, o uso de *softwares* distintos daquele aplicado no presente estudo pode ajudar

a balizar os valores obtidos durante a modelagem estrutural, visando elevar a acurácia da estimativa de vida útil.

Quanto aos impactos ambientais, entende-se que diante da considerável variabilidade de materiais e suas combinações, aplicáveis na construção e manutenção ferroviária, é possível que se utilizem as ferramentas aqui apresentadas para julgamento de outros cenários. Com isso, vislumbra-se a viabilidade na aplicação do presente procedimento metodológico para a análise de escórias (Jia, Markine & Jing, 2021), revestimento asfáltico reciclável - RAP (Bilodeau & Gonzalez, 2021), e soluções de polímero reciclado (Osorto & Casagrande, 2023) os quais se encontram no estágio de fim de vida útil de outra cadeia produtiva, assim como: variação no uso de dormentes de madeira e aço, como Rempelos *et al.*, (2020); misturas de areia-borracha granulada (Ding *et al.*, 2021); estabilização de lastro com poliuretano (D'Angelo *et al.*, 2018); e uso de caolim para reforço de solos moles do subleito (Thevakumar *et al.*, 2021).

Tratando, por fim, das políticas públicas, exemplificadas no estudo de Landgraf, Schirmer & Marschnig (2021) a respeito do emprego de critérios de impactos ambientais nas aquisições públicas de infraestrutura ferroviária austríaca, é possível aperfeiçoar os instrumentos e critérios de análise. Nesse mesmo sentido, a aplicação dos conceitos de ACV pode permitir a expansão da emissão de títulos verdes, que já utiliza o parâmetro de emissão (Climate Bonds Initiative, 2020) para viabilizar o investimento privado nos projetos de transporte por trilhos, visando reduzir a pressão por recursos públicos, como já ocorre no Brasil (Ministério da Infraestrutura, 2021).

Finalmente, considerando a contextualização da infraestrutura de transporte no cenário da indústria quanto à sustentabilidade, o melhor entendimento dos impactos provocados pela ação humana permite definir estratégias de ação que vão desde o nível mais amplo, como a gestão baseada em ecossistemas (Kato & Huang, 2021), até medidas mais operacionais (Sanchis *et al.*, 2020). Ambas as abordagens têm seus esforços direcionados para oferecer instrumentos práticos à sociedade com o objetivo de mensurar as incertezas quanto aos diversos impactos a que o planeta está sujeito, como o potencial de aquecimento global. Logo, conclui-se que o presente estudo entregou uma proposta de ação operacional, baseada em ACV, para a avaliação de projetos de infraestrutura, em nível de projeto, cujas aplicações podem ser empregadas nas tomadas de decisão das intervenções de construção e manutenção para pavimentação ferroviária no Brasil.

## 5.2 Proposições para novos estudos

Para trabalhos futuros, considerando as limitações e oportunidades encontradas ao longo do desenvolvimento deste trabalho, a seguir são apresentadas algumas recomendações:

- Ampliação do sistema de produto do procedimento método proposto, propondo o emprego da avaliação do ciclo de vida que considere o fim da vida útil, com emprego de reciclagem e reuso de material;

- Ainda sobre o sistema de produto de ACV, inclusão da etapa de operação do material rodante, para avaliar a variação do impacto frente à degradação da via;

- Desenvolvimento de um sistema integrado que avalie tanto os critérios técnicos de engenharia, o custo do investimento quanto à mensuração das emissões e impactos, se mostrando interessante para que melhores decisões sejam tomadas nas seleções dos projetos de infraestrutura, como proposto por Nilsen & Bohne (2019);

- Emprego da ACV aliada ao uso da tecnologia BIM, focado em *ecodesign*, considerando que tal tecnologia permite a quantificação dos insumos;

- Contribuição ao método de ACV que permita a avaliação do pavimento pela análise estrutural específica para cada elemento, ou seja, estimar a vida útil separadamente de cada componente da plataforma e, por fim, realizar a agregação da ACV. Isto porque o presente estudo considerou apenas o fim da útil do subleito;

- Emprego de outros métodos de degradação da via, como aplicação de Big Data proposto por Attoh-Okine (2017), com foco na predição de estimativa de via útil;

- Construção de um sistema de avaliação multi-critério brasileiro para a plataforma ferroviária, com foco em permitir a seleção de diferentes alternativas de seção de pavimento, para suportar decisões quanto à construção e manutenção, como proposto por Bressi *et al.* (2017).

## REFERÊNCIAS

ABNT (2009) NBR ISO 14044 - Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ISBN 978-85-07-01533-8

Abreu, V. H.S.; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. (2021) Uma Revisão Bibliográfica sobre os Possíveis Impactos da Mudança Climática na Infraestrutura de Transporte Ferroviário. In: 35º ANPET - Congresso de Pesquisas e Ensino em Transportes, 2021. Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes.

Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT (2023) Declaração de Rede – dados técnico-operacionais da infraestrutura ferroviária brasileira concedida. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/declaracao-de-rede-2020>. Acesso em: 25/04/2023

Åkerman, J. (2011) ‘The role of high-speed rail in mitigating climate change - The Swedish case Europabanan from a life cycle perspective’, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(3), pp. 208–217. doi:10.1016/j.trd.2010.12.004

Akponeware, A.; Dawood, N.; Rodriguez, S.; Dawood, H. (2020) Exploring the Development of a BIM-Enabled Process Framework for LCA of Rail Tracks. 37<sup>th</sup> CIB W78 Information Technology in Construction Conference. Brazil. DOI:10.46421/2706-6568.37.2020.paper013. Available: <https://itc.scix.net/paper/w78-2020-paper-013>

Albahkali, T.; Alsanabani, N.; Souli, M.; Albahkali, E. (2021) A concept to estimate the life cycle of the railway track using finite element modeling. *International Journal of Multiphysics*. Vol.15. Disponível em: <https://doi.org/10.21152/1750-9548.15.3.265>

Alves, T. F., 2018. Análise do comportamento de via permanente lastrada com emprego de sublastro betuminoso. Master Thesis. Universidade de São Paulo. Brazil

American Railway Engineering Association – AREA (1918) First Progress Report of the Special Committee on Stresses in Railroad Track. In: *Bulletin of AREA* vol.19 nº205, pp875-1058.

Andrade (2016) Avaliação da emissão de dióxido de carbono e do uso de energia no ciclo de vida de sistemas metroferroviários de passageiros: aplicação na Linha 4 do metrô do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. UFRJ/COPPE.

Andrade, C.E.S., D'Agosto, M.A. (2016) Energy use and carbon dioxide emissions assessment in the lifecycle of passenger rail systems: the case of the Rio de Janeiro Metro. *Journal of Cleaner Production*, vol. 126, pp. 526-536. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.094>

Angarten, N. B. O.; Silva, P. A. M.; Silva, A. C. A. (2020) Estimativa de emissões para FIOLE e FICO: certificação de ferrovias estruturantes para obtenção de títulos verdes no Brasil. Eixo I – Estudos sobre a emissão de efeito estufa na infraestrutura de transportes. ViaViva – IV Seminário Socioambiental em Infraestrutura de Transportes. v3.

ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (2023) Mapa Ferroviário. Disponível em: <https://www.antf.org.br/mapa-ferroviario/>. Acesso em: 22/02/2023.

ANTT- Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2016) Estudos Técnicos – Parte 2. Relatório IV – Estudos Definitivos de Engenharia. Volume 7 – Parte 01 e Parte 02.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres (2023) SICFER – Sistema de Custos Referenciais Ferroviários. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/sicfer/custos-referenciais>. Acesso em 11/05/2023

AREMA - American Railway Engineering and Maintenance of way Association (2006) Manual for Railway Engineering, Volume 4, Chapter 16, Part 10, “Economics of Railway Engineering and Operations – Construction and Maintenance Operations”.

Asplan Viak AS (2011) New Double Track Line Oslo – Ski Life Cycle Assessment of the Follo Line-Infrastructure. Disponível em: [https://www.banenor.no/globalassets/documents/prosjekter/follobanen/lca-follolineinfrastrukture\\_en.pdf](https://www.banenor.no/globalassets/documents/prosjekter/follobanen/lca-follolineinfrastrukture_en.pdf).

Attoh-Okine, N. O. (2017) Big Data and Differential Privacy: Analysis Strategies for Railway Track Engineering. Wiley. 1º Ed. ISBN: 978-1119229049

Austroroads (1992) Pavement Design- A Guide to the Structural Design of Road Pavements. Sydney, NSW, Australia.

Ayres, M; Witczak, M. W.; (1998) AYMA: Mechanistic Probabilistic System to Evaluate Flexible Pavement Performance. Transportation Research Record, 1629 (1). Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1629-16>

Azevedo, L.B., van Zelm, R., Hendriks, A.J., Bobbink, R., Huijbregts, M.A. (2013). Global assessment of the effects of terrestrial acidification on plant species richness. Environmental Pollution. 174, 10-15.

Azzouz, L. Jack, A. (2020) Benchmarking the sustainability reporting of high-speed railways (HSRs): Towards a state-of-the-art benchmarking and reporting framework for HSRs. Journal of Cleaner Production. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119505>

Balbo, J. T. (2007) Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração. Editora Oficina de Textos.

Ballou, R. H. Gerenciamento da cadeia de suprimentos – Logística empresarial. 5ª edição. Editora Bookman. 2005.

Banar, M., Özdemir, A. (2015) An evaluation of railway passenger transport in Turkey using life cycle assessment and life cycle cost methods. Transportation Research Part D, vol. 41, pp. 88-105. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.09.017>

Barksdale, R. D (1972). Laboratory Evaluation of Rutting in Base Course Materials. In Proceedings of the Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, London, 1972, pp. 161-174

Barrientos, F.; Moral, A.; Rodriguez, J.; Martinez, C.; Campo, F.; Canerero, R.; Parra, M.; Bnitez, J. M.; Sainz, G. (2016) Knowledge-based minimization of railway infrastructures environmental impact. Transportation Research Procedia. Vol.14. 840-849. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.032

Barros, L. B.; Marcy, M.; Carvalho, M. T. M. (2018) Construction cost estimation of Brazilian highways using artificial neural network. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, Vol. 7, nº 3. doi: 10.18178/ijscer.7.3.283-289

Bilgili, L.; Kuzu, S.L.; Çentikaya, A. Y.; Kumar, P. (2019) Evaluation of railway versus highway emissions using LCA approach between the two cities of Middle Anatolia. Sustainable Cities and Society. Vol. 49. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101635>

Bilodeau, J.P.; Gonzalez, E.L.P., 2021. Permanent deformation analysis of base layers with recycled material: Effect of density and stress level. Transportation Geotechnics 27 100466. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100466>

Blackwood, L.; Renaud, F.G.; Gillespie, S. (2022) Nature-based solutions as climate change adaptation measures for rail infrastructure. Nature-Based Solutions. Vol.2. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100013>

Bortoli, A.; Bouhaya, L.; Feraille, A. (2020). A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bourdeaux railway in France. The Journal of Life Cycle Assessment. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01727-2>

Boulay, Anne-Marie et al. (2011) Regional characterization of freshwater use in LCA: modeling direct impacts on human health. Environmental science & technology, v. 45, n. 20, p. 8948-8957.

Boulay, Anne-Marie et al. (2016) Water use related impacts: Part 1: Water Scarcity. In: Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators. Paris: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. cap. 5, p. 100-115. v. 1.

Boussinesq, M. J. (1885) Application des potentiels a l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques, avec des notes étendues sur divers points de physique mathématique et d'analyse. Paris: Gauthier-Villard imprimeur libraire

Brandão, M.; Milà I Canals, L. (2013) Global characterisation factors to assess land use impacts on biotic production. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 18, n. 6, p. 1243-1252.

BRASIL. Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 1981. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/16938.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm).

Bressi, S.; D'Angelo, G.; Santos, J.; Giunta, M. (2018b) Environmental performance analysis of bitumen stabilized ballast for railway track-bed using life-cycle assessment. *Construction and Building Materials*. Volume 188, 1050-1064. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.175>

Bressi, S.; Di Mino, G.; Lo Presti, D. (2017) A framework for defining a Sustainability rating system for railway track-beds. *Proceedings of the 2017 IEEE/ ASME Joint Rail Conference*. JRC2017-2232. USA. DOI: 10.1115/JRC2017-2232

Bressi, S.; Primavera, M.; Santos, J. (2022) A comparative life cycle assessment study with uncertainty analysis of cement treated base (CTB) pavement layers containing recycled asphalt pavement (RAP) materials. *Resources, Conservation & Recycling*. 180. 106160. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106160>

Bressi, S.; Santos, J.; Giunta, M.; Pistonesi, L.; Lo Presti, D. (2018a) A comparative life-cycle assessment of asphalt mixtures for railway sub-ballast containing alternative materials. *Resources, Conservation & Recycling*. Vol. 137. p. 76-88. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.028>

Brockveld Junior, S. L. (2022) Sistema multiporta com controle droop destinado a regeneração de energia em locomotivas diesel-elétricas. Tese de doutorado. UFSC.

Bueno, C.; Hauschild, M.Z.; Rossignolo, J. A.; Ometto, A. R.; Mendes, N. C. (2015) Sensitivity Analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment Methods: A case study on building materials. *Journal of Cleaner Production*. doi/10.1016/j.jclepro.2015.10.006

Bueno, G., Hoyos, D. and Capellán-Pérez, I. (2017) 'Evaluating the environmental performance of the high-speed rail project in the Basque Country, Spain', *Research in Transportation Economics*, 62, pp. 44–56. doi:10.1016/j.retrec.2017.02.004.

Burrow, M. P. N.; Bowness, D.; Ghataora, G. S. (2006) A comparison of railway track foundation design methods. *Journal of Rail and Rapid Transit*. Proceeding IMechE Vol. 221. Part F. DOI: 10.1243/09544097JRRT58

Caetano, L. F.; Teixeira, P. F., 2016. Strategic Model to Optimize Railway - Track Renewal Operations at a Network Level. *Journal of Infrastructure Systems*. DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000292

Caixa Econômica Federal (2023) SINAPI – Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>.

Casey, A. R.; Mandel, I.; Ray, P. K. (2021) The impact of the COVID-19 pandemic on academic productivity. *Royal Society Open Science*. Papers 2109.06591. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/2109.06591.pdf>

Castella, P.S., Blanc, I., Ferrer, M.G., Ecabert, B., Wakeman, M., Manson, J., Emery, D., Han, S., Hong, J., Jolliet, O. (2009) "Integrating life cycle costs and environmental

impacts of composite rail car-bodies for a Korean train”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 14, pp. 429-442.

Castro, G.; Pires, J.; Motta, R.; Bernucci, L.; Fortunato, E.; Futai, M. (2022) Evaluating environmental effects on the structural behavior of the railroad track subgrade considering different sub-ballast design solutions. *Transportation Geotechnics*. Vol.34. 100761. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100761>

Castro, G.; Pires, J.; Motta, R.; Bernucci, L.; Marinho, F.; Merheb, A. (2021) Unsaturated numerical analysis of a railroad track substructure considering climate data. *Transportation Geotechnics*. Vol. 31. 100662. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100662>

Cerbino, F. S.; Seraco, I. P.; Donatto, M.; Ratton Neto, H. X. (2019) Diagnóstico do setor ferroviário brasileiro frente às expectativas com a renovação antecipada das concessões. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET.

Chan, S., Miranda-Moreno, L., Patterson, Z. (2013) Analysis of GHG Emissions for City Passenger Trains: Is Electricity an Obvious Option for Montreal Commuter Trains? *Journal of Transportation Technologies*, vol. 3, pp. 17-29 DOI: 10.4236/jtts.2013.32A003

Chang, B.; Kendall, A. (2011). Life cycle greenhouse gas assessment of infrastructure construction for California’s high-speed rail system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 16. Issue 6. p. 429-434. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.004>

Chen, Q.; Indraratna, B.; Carter, J.; Rujikiatkamjorn, C. (2014) A theoretical and experimental study on the behaviour of lignosulfonate-treated sandy silt. *Computers and Geotechnics*. Vol. 61. P.316-327. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.06.010>

Chen, X.; Matthews, H. S.; Griffin, W.M. (2021a) Uncertainty caused by life cycle impact assessment methods: Case studies in process-based LCI databases. *Resources, Conservation & Recycling*. Vol.172. 105678. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105678>

Chen, X.; Wang, H.; Horton, R.; DeFlorio, J. (2021b) Life cycle assessment of climate change impact on time-dependent carbon-footprint of asphalt pavement. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 91. 102697. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102697>

Chester, M. V.; Cano, A. (2016) Time-based life-cycle assessment for environmental policymaking: Greenhouse gas reduction goals and public transit. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Elsevier Ltd, 43, pp. 49-58. doi: 10.1016/j.trd.2015.12.003

Chester, M., Horvath, A. (2012) High-speed rail with emerging automobiles and aircraft can reduce environmental impacts in California’s future. *Environmental Research Letters*, vol. 7, pp. 1-11. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034012>

Chester, M.; Horvath, A. (2010) 'Life-cycle assessment of high-speed rail: The case of California', *Environmental Research Letters*, 5(1). doi: 10.1088/1748-9326/5/1/014003

Chester, M.; Pincetl, S.; Elizabeth, Z.; Eisenstein, W.; Matute, J. (2013) Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals. *Environmental Research Letters*. Vol. 8. 015041. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015041

Chester, M. V.; Einstein, W.; Pincetl, S. S.; Elizabeth, Z.; Matute, J.; Bunje, P. (2012) Environmental Life-cycle Assessment of Los Angeles Metro's Orange Bus Rapid Transit and Gold Light Rail Transit Lines. Phoenix, AZ. Available at: <https://keep.lib.asu.edu/items/144>

Ciccione, A.; Di Stasio, S.; Asprone, D.; Salzano, A.; Nicolella, M. (2022) Application of openBIM for the Management of Existing Railway Infrastructure: Case Study of the Cancellor-Benevento Railway Line. *Sustainability*. MDPI. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14042283>

Claessen, A. I. M.; Edwards, J.M.; Sommer, P.; Uge, P. (1977) Asphalt Pavement Design – The Shell Method. *Proceedings, Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. I, Ann Arbor, 39-74.*

Climate Bonds Initiative (2018) Oportunidades de Investimento em Infraestrutura à Nível Municipal no Brasil. Disponível em: [https://www.climatebonds.net/files/files/iadb-por\\_01b.pdf](https://www.climatebonds.net/files/files/iadb-por_01b.pdf)

Climate Bonds Initiative (2020) Rumo emite o primeiro título verde da história das ferrovias de carga na América Latina. Media Release. São Paulo. Disponível em: [https://www.climatebonds.net/files/releases/rumo\\_mediarelease\\_portugues.pdf](https://www.climatebonds.net/files/releases/rumo_mediarelease_portugues.pdf)

Climate Watch the World Institute (2020) Our World in Data, 2021. Acesso em 20/03/2022. Disponível em: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>.

CNT – Confederação Nacional dos Transportes (2015) Pesquisa CNT de Ferrovias 2015. Disponível em: <https://cnt.org.br/pesquisa-cnt-ferrovias>.

Cobut, A.; Beauregard, R.; Blanchet, P. (2015) Reducing the environmental footprint of interior wood doors in non-residential buildings – part 2: ecodesign. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 109. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.068>

Comité Européen de Normalisation. (2005) Comitee CEN/TC 256. EN 13848-5:2008+A1:2010. Railway applications – Track geometry quality – Part 5: Geometric quality assessment, German version.

Costa, R.; Motta, R.; Bernucci, L.L.B.; Moura, E.; Pires, J.; Oliveira, L. (2017) Bearing capacity evaluation of a subgrade in a heavy haul railway in Brazil. The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. DOI: 10.1201/9781315100333-280.

Costin, A.; Adibfar, A.; Hu, H.; Chen, S. S. (2018) Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction*. Volume 94. p.257-281. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>

D’Agosto, M.A.; Ribeiro, S. K. (2009) Assessing total and renewable energy in Brazilian automotive fuels. A life cycle inventory (LCI) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13. P.1326-1337. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.008>

D’Angelo, G.; Sol-Sánchez, M.; Moreno-Navarro, F.; Lo Presti, D.; Thom, N. (2018) Use of bitumen-stabilised ballast for improving railway trackbed conventional maintenance. *Geotechnique*. doi.org/10.1680/JGEO.17.P.022

Da Fonseca-Soares, D.; Galvinicio, J.D.; Eliziário, S.A.; Ramos-Ridao, A.F. (2022) A Bibliometric Analysis of the Trends and Characteristics of Railway Research. *Sustainability*, 14, 13956. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142113956>

Danske Transportministeriet (2022) Beregninger af CO2-udledning for anlæg i forbindelse med Investeringsplan 2035. Folketinget. Denmark. Disponível em: <https://www.ft.dk/samling/20211/almdel/tru/spm/212/svar/1851578/2522294.pdf>

Dantas, A. A. N.; Fraga, Y. S. B. (2021) Ferrovias no Brasil: Projetos futuros e em andamento. *Research, Society and Development*. v.10 n. 5. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i5.14917>

Del Pero, F., Delogu, M., Pierini, M., Bonaffini, D., 2015. “Life Cycle Assessment of a heavy metro train”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, pp. 787-799. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.10.023

Delgado, B. G. (2019) Geomecânica de um agregado siderúrgico inerte como material alternativo para lastro de vias férreas do tipo heavy haul. PhD. Thesis. Universidade do Porto. Portugal.

DER-ES – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Espírito Santo (2023) Referencial de Preços Rodovias do DER-ES. Disponível em: <https://der.es.gov.br/referencial-de-precos-rodovias>.

Dewulf J, Bosch ME, Meester BD, Vorst GVd, Langenhove HV, Hellweg S, Huijbregts MAJ (2007) Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource accounting. *Environmental Science & Technology*, 41, 8477-8483

Dimoula, V., Kehagia, F. and Tsakalidis, A. (2016) ‘A holistic approach for estimating carbon emissions of road and rail transport systems’, *Aerosol and Air Quality Research*, 16(1), pp. 61–68. doi: 10.4209/aaqr.2015.05.0313

Ding, Y.; Zhang, J.; Chen, X.; Wang, X. Jia, Y. (2021) Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway

subgrade filler Construction and Building Materials 273. 121955. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121955>

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2023) SICRO – Sistema de Custos Referenciais de Obras. Ministério da Infraestrutura. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro>.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura (2020) Sistema de Custos Referenciais de Obras. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro-2>

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2017) Novo Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro\\_antiga/eventos-1/seminario-de-apresentacao-do-sicro-2017-1/ApresentaodoSICRO2017.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/eventos-1/seminario-de-apresentacao-do-sicro-2017-1/ApresentaodoSICRO2017.pdf)

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura (2011) Manual de Gerência de Pavimentos. Publicação IPR 745. Rio de Janeiro.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura. (2007) Manual de custos de infraestrutura de transportes. Volume 5 – Custos unitários de referência para obras ferroviárias.

Dodd, N.; Donatello, S.; Cordella, M. (2020) Level(s) indicator 1.2: Life cycle Global Warming Potential (GWP). European Commission. Joint Research Centre.

EcoInvent (2022). Life Cycle Database Inventory. Disponível em: <https://ecoinvent.org/>

EDIP – Environmental Development of Industrial Products (2022). Disponível em <https://lca-center.dk/>.

Elkhoury, N.; Hitihamillage, L.; Moridpour, S.; Robert, D. Degradation prediction of rail tracks: A review of the existing literature. Open Transportation Journal, v.12, p.88-104, 2018. Doi. Disponível em: <http://doi.org/10.2174/1874447801812010088>

EMOP-RJ – Empresa de Obras Públicas do Estado do Rio de Janeiro (2023) Catálogos e Boletins de Preços. Disponível em: [http://www.emop.rj.gov.br/cad\\_catalogo.asp](http://www.emop.rj.gov.br/cad_catalogo.asp).

EPL – Empresa de Planejamento e Logística (2023) Observatório Nacional de Transportes e Logística. Plataforma de Painéis Analíticos. Anuário Estatístico de Transporte. Disponível em: <https://ontl.epl.gov.br/paineis-analiticos/painel-de-indicadores-de-transporte-e-logistica/investimentos/ferroviario/>

Esmaeili, M.; Amiri, S.; Jadidi, K. (2012). An investigation into the use of asphalt layers to control stress and strain levels in railway track foundations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Doi. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954409712468850>

eTool (2022) Carbon reduction in Europe's biggest infrastructure project HS2. eTool Global. Disponível em: <https://etoolglobal.com/portfolio-item/carbon-reduction-in-europes-biggest-infrastructure-project-hs2-2/>

Felício, R. A. (2014) “Mudanças climáticas” e “Aquecimento Global” – Nova Formatação e Paradigma para o pensamento contemporâneo? *Ciência e Natura*. V.36. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM. doi: 10.5902/2179460X13221

FGV – Fundação Getúlio Vargas (2022) Transporte público e a Covid-19: o abandono do setor durante a pandemia. Centro de Estudos de Regulação e Infraestrutura.

FIGUEIREDO, A.R.; WANDERLEY, B.G.; VILAS BOAS, T. S.; SANTOS, M. C. (2017) Estudo da eficiência dos portais ScienceDirect, Scopus, Lilacs e Periódicos CAPES, evidenciando seus aspectos positivos e negativos. *Revista Scientia Amazonia*.

Fisch-Romito, V. (2021) Embodied carbon dioxide emissions to provide high access level to basic infrastructure around the world. *Global Environmental Change*. Vol 70. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102362>

Franco, F. A. C. P. (2007). Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav. Tese de Doutorado da COPPE/UFRJ

Fridell, E.; Bäckström, S.; Stripple, H. (2019) Considering infrastructure when calculating emissions for freight transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 69. P.346-363. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.013>

Fries N.; Hellweg, S. (2014) LCA of land-based freight transportation: facilitating practical application and including accidents in LCIA. *Int J Life Cycle Assess* 19:546–557. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0657-2>

GaBi (2022). GaBi LCI database. Disponível em: <https://gabi.sphera.com/brazil/index/>

Gabriel, L. C. (2021) Transição energética no Brasil: Desafios e Oportunidades. *Revista do Clube Naval*. V.3. n. 399. Marinha do Brasil.

German Network on LCI Data. AusLCI (2022). Australian Life Cycle Inventory Database Initiative. Disponível em: <http://www.auslci.com.au/>

Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; et al. (2009) ReCiPe 2008. Potentials, p.1–44. Disponível em: [http://www.prsustainability.com/download/misc/ReCiPe\\_main\\_report\\_final\\_27-02-2009\\_web.pdf](http://www.prsustainability.com/download/misc/ReCiPe_main_report_final_27-02-2009_web.pdf)

Gouveia, B.G.; Ribeiro, F.B.; Silva, M.A.V. (2021) Avaliação ao Ciclo De Vida no Planejamento da Infraestrutura de Transporte Ferroviária – Contextualização e Considerações. *Via Viva – Seminário Socioambiental em Infraestrutura de Transportes: Investimento Verde e Resiliência*. e-ISSN 2675-2700.

Government of Western Australia (2020) Byford Rail Extensio recommended for environmental approval. Environmental Protection Authority. Available:

[https://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/PER\\_documentation2/Byford%20Rail%20Extension%20ERD\\_REV1%204%20May\\_Part2.pdf](https://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/PER_documentation2/Byford%20Rail%20Extension%20ERD_REV1%204%20May_Part2.pdf)

Greenhouse Gas Protocol (2022) Life Cycle Database. Available: <https://ghgprotocol.org/life-cycle-databases>.

Greet (2022). Greet Life Cycle Analysis Tool. Disponível em: <https://greet.es.anl.gov/net>.

Guimarães, A.C.R.; Silva Filho, J. C.; Castro, C.D. (2021) Contribution to the use of alternative material in heavy haul railway sub-ballast layer. *Transportation Geotechnics*. Vol. 30. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100524>

Guimarães, A.C.R. (2009) Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Ph.D. Thesis. Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Brazil.

Gulcimen, S.; Aydogan, E. K.; Uzal, N. (2021) Life Cycle Sustainability Assessment of a Light Rail Transit System: Integration of Environmental, Economic and Social Impacts. *Integrated Environmental Assessment and Management*. Lyfe Cycle & Sustainability. doi: 10.1002/ieam.4428.

Guo, Y.; Zhai, W. (2018) Long-term prediction of track geometry degradation in high-speed vehicle–ballastless track system due to differential subgrade settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 113, 1–11. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.024>

Haanstra, W.; Rensink, W.J.; Martinetti, A.; Braaksma, J. Dongen, L. (2020) Design for Sustainable Public Transportation: LCA-Based Tooling for Guiding Early Design Priorities. *Sustainability*. MDPI. doi:10.3390/su12239811

Hanna, A. M.; Meyerhof, G. G. (1980) Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlaying soft clay. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol.17. Pp. 300-303. doi: 10.1139/t80-030

Hanson, C. S., Noland, R. B. and Porter, C. D. (2016) Greenhouse gas emissions associated with materials used in commuter rail lines. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(5), pp. 475–484. doi:10.1080/15568318.2014.985859

Harvey, J.; Kendall, A.; Lee, I.-S.; Santero, N. Van Dam, T.; Wang, T. (2010) Pavement Life Cycle Assessment Workshop: Discussion Summary and Guidelines. University of California Pavement Research Center. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/3jc3d3xs>

Hauschild, M.Z.; Rosenbaum, R.K.; Olsen, S.I. (2018) *Life Cycle Assessment – Theory and Practice*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-56475-3

Hermann, B.G.; Kroeze, C.; Jawjit, W. (2007) Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis, and environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 1. 1787-1796. doi:10.1016/j.jclepro.2006.04.004

Heukelom, W.; Klomp, A.J.G. (1962) Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction. Proceedings of the Int. Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement, Ann Arbor, Michigan, U.S.A. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/717112>.

Hjort, J.; Karjalainen, O.; Aalto, J.; Westermann, S.; Romanovsky, V. E.; Nelson, F. E.; Etzelmüller, B.; Luoto, M. (2018) Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nature*. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4>

Hollberg, A.; Kiss, B.; Röck, M.; Soust-Verdaguer, B.; Wiberg, A. H.; Lasvaux, S.; Galimshina, A.; Habert, G. (2021) Review of visualization LCA results in the design process of building. *Building and Environment*. Vol. 190. 107530. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530>

Horvath A (2006) Environmental assessment of freight transportation in the U.S. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11:229–239. Disponível em: <https://doi.org/10.1065/lca2006.02.244>

Huang, Y.; Wang, Y. (2020) How does high-speed railway affect green innovation efficiency? A perspective of innovation factor mobility. *Journal of Cleaner Production*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121623>

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (2022). Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil). Disponível em: <https://acv.ibict.br/banco-nacional/o-que-e-sicv/>. Acesso em 11/04/2022. Base de dados disponível em: <https://sicv.acv.ibict.br/Node/>

ILCD – International Reference Life Cycle Data System (2010) General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. JRC European Commission. Disponível em: [https://vpt.lrv.lt/uploads/vpt/documents/files/mp/kiti\\_leidiniai/ILCD\\_handbook.pdf](https://vpt.lrv.lt/uploads/vpt/documents/files/mp/kiti_leidiniai/ILCD_handbook.pdf)

Infraestructuras, A. (2015) Environmental Product Declaration – “Arroyo Valchano railway bridge. EN 15804 and ISO 14025:2010 compliant. Acciona. The international EDP System. pp. 1–16. Disponível em: <https://portal.environdec.com/api/api/v1/EPDLibrary/Files/c6740659-69d4-4bc0-a5f2-1646a16b2b71/Data>

Indraratna, B.; Ngo, T. (2018) *Ballast Railroad Design: SMART-UOW Approach*. CRC Press. ISBN: 978-1-138-58703-8. Australia.

International Union of Railways (2016) Carbon footprint of Railway Infrastructure. Comparing existing methodologies on typical corridors. Available at: [https://uic.org/IMG/pdf/carbon\\_footprint\\_of\\_railway\\_infrastructure.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/carbon_footprint_of_railway_infrastructure.pdf)

IPCC– Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Technical Summary*. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_TS.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf)

IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change. AR5 *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*. Chapter 8 – Transport. Ralph Sims & Roberto Schaefer.

2014. Disponível em:  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_chapter8.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter8.pdf)

Jackson, D. J.; Brander, M. (2019) The risk of burden shifting from embodied carbon calculation tools for the infrastructure sector. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 223. 739-746. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.171>

Jia, W.; Markine, V.L.; Jing, G., 2021. Analysis of furnace slag in railway sub-ballast based on experimental tests and DEM simulations. *Construction and Building Materials*. Vol. 288. 123114. Doi. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123114>

Jiang, R.; Wu, C.; Song, Y.; Wu, P. (2020) Estimating carbon emissions from road use, maintenance, and rehabilitation through a hybrid life cycle assessment approach – A case study. *Journal of Cleaner Production*. 277. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123276>

Jones, H., Moura, F. and Domingos, T. (2017) ‘Life cycle assessment of high-speed rail: a case study in Portugal’, *International Journal of Life Cycle Assessment*. The *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(3), pp.410–422. doi: 10.1007/s11367-016-1177-7

Kaewunruen, S.; Liao, P. (2020) Sustainability and recyclability of composite materials for railway turnout system. *Journal of Cleaner Production*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124890>

Kaewunruen, S.; Lian, Q. (2019) Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 228. p. 1537-1551. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.156>

Kapetanović, M.; van Oort, N.; Núñez, A.; Goverde, R. M. P. (2019) Sustainability of Railway Passenger Services – A Review of Aspects, Issues, Contributions and Challenges of Life Cycle Emissions. 8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (CROMA) - RailNorrköping 2019. Delft University of Technology. Available: <https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/57107987/ecp19069036.pdf>

Karlsson, I.; Rootzén, J.; Johnsson, F. (2020) “Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains – Analysis of a Swedish road construction project,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 120. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109651>

Kato, S.; Huang, W. (2021) Land use management recommendations for reducing the risk of downstream flooding based on a land use change analysis and the concept of ecosystem-based disaster risk reduction. *Journal of Environmental Management*. Volume 287. 112341. Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112341>

Khairallah, D; Blanc, J.; Hornych, P.; Piau, J. M.; Cottineau, L. M.; Pouget, S.; Ducreau, A.; Savin, F.; Hosseingholian, M. (2019). Influence of the bituminous layer on temperature and water infiltration in railway structures of the Bretagne-Pays de Loire

High-Speed line. *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM International, 48 (1), p. 134-149. DOI: 10.1520/JTE20180894

Koks, E.E.; Rozenberg, J.; Zorn, C.; Tariverdi, M.; Vousdoukas, M.; Fraser, S.A.; Hall, J.W.; Hallegatte, S. (2019) A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assests. *Nature Communications*. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3>

Kortazar, A.; Bueno, G.; Hoyos, D. (2021) Dataset for the life cycle assessment of the high-speed rail network in Spain. *Data in Brief*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107006>

Krezo, S.; Mirza, O.; He, Y.; Makim, P.; Kaewunruen, S. (2016) Field investigation and parametric study of greenhouse gas emissions from railway plain-line renewals. *Transportation Research Part D*. Disponível em : <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.021>

Kuksova, A. (2020) Simulation of railway infrastructure with asphalt layer for tracks in Sweden. Master Thesis. KTH Royal Institute of Technology. ISBN: 978-91-7873-667-6

Kumara, J.J.; Hayano, K. (2016) Deformation characteristics of fresh and fouled ballasts subjected to tamping maintenance. *Soils and Foundations*. Vol 56. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2016.07.006>

Lacerda, F.; Nobre, P. (2010) Aquecimento global: conceituação e repercussões sobre o Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v3i1.232653>

Landgraf, M. (2011) Der Einfluss von Unterbau, Untergrund und Wasserwegigkeit auf die Gleislagequalität. Masterarbeit. Technische Universität Graz.

Landgraf, M.; Horvath, A. (2021) Embodied greenhouse gas Assessment of rail infrastructure: the case of Austria. *IOP Science – Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac1242>

Landgraf, M.; Schirmer, S.; Marschnig, S. (2021) Integration von Umweltwirkungen im öffentlichen Beschaffungsprozess am Beispiel der Eisenbahn. *Infrastruktur Network*. ZEV Rail. V.145. Österreich.

Landgraf, M.; Zeiner, M.; Knabl, D.; Corman, F. (2022) Environmental impacts and associated costs of railway turnouts based on Austrian data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol.103. pp103168. 10.1016/j.trd.2021.103168

Langlois, Juliette et al. (2014) New methods for impact assessment of biotic-resource depletion in life cycle assessment of fisheries: theory and application. *Journal of cleaner production*, v. 73, p. 63-71.

Lausselet, C.; Lund, K. M.; BrattebØ, H. (2021) LCA and scenario analysis of a Norwegian net-zero GHG emission neighbourhood: The importance of mobility and surplus energy from PV technologies. *Building and Environment*. Vol. 189. Disponível

em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107528>

Lave, C. A. (1978). *Transportation and Energy: Some Current Myths*. *Policy Analysis*, 4(3), 297–315. Available: <http://www.jstor.org/stable/42783543>

Lazorenko, G.; Kasprzhitskii, A.; Khakiev, Z.; Yavna, V. (2019) Dynamic behavior and stability of soil foundation in heavy haul railway tracks: A review. *Construction and Building Materials*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.184>

Lee, C. K.; Lee, J. Y.; Lee, I. W.; Kim, Y.K. (2018) GHGH mitigation of railway concrete products using eco-concrete and surface protection agent. *Construction and Building Materials*. Vol. 186. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.046>

Lee, H. Y. (2016) *Combined Economic and Environmental Assessment Tool for Maintenance of Railway Bridges*. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Surrey. PhD Thesis. England.

Lee, J.Y.; Lee, C.K.; Chun, Y.Y. (2020) Greenhouse gas emissions from high-speed rail infrastructure construction in Korea. *Journal of Cleaner Production*. Doi. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102514>

Lederer, J.; Ott, C.; Brunner, P. H.; Ossberger, M. (2016) ‘The life cycle energy demand and greenhouse gas emissions of high-capacity urban transport systems: A case study from Vienna’s subway line U2’, *International Journal of Sustainable Transportation*, 10(2), pp.120–130. doi: 10.1080/15568318.2013.869704

Li, D. (2018). 25 years of heavy axle load railway subgrade research at the Facility for Accelerated Service Testing (FAST). *Transportation Geotechnics*. Vol. 17. 51-60. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.09.003>

Li, D.; Hyslip, J.; Sussmann, T.; Chrismer, S. (2015) *Railway Geotechnics*. CRC Press. ISBN 0415695015. USA.

Li, D.; Selig, E. T. (1998). Method for railroad track foundation design I: development. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol. 24. Doi. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:4\(316\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:4(316))

Li, D., Sussman, T. R., and Selig, E. T. (1996) Procedure for railway track granular layer thickness determination. Report no. R-898, Association of American Railroads, Transportation Technology Center, Pueblo, Colorado, USA.

Li, L.; Zhang, X. (2020) Integrated optimization of railway freight operation planning and pricing based on carbon emission reduction policies. *Journal of Cleaner Production*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121316>

Li, Y.; He, Q.; Luo, X.; Zhang, Y.; Dong, L. (2016) Calculation of life-cycle greenhouse gas emissions of urban rail transit systems: A case study of Shanghai Metro. *Resources, Conservation and Recycling*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.007>

- Lichtberger, B., 2005. Track Compendium. Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. Eurail Press. ISBN: 3-7771-0320-9. Germany.
- Liljenström, C.; Björklund, A.; Toller, S. (2022) Including maintenance in life cycle assessment of road and rail infrastructure – a literature review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Disponível em: [https://doi.org/ 10.1007/s11367-021-02012-x](https://doi.org/10.1007/s11367-021-02012-x)
- Linder, E. (2020) Comparison of two life cycle assessment tools for infrastructure projects in Sweden. KTH Royal Institute of Technology. Sweden. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1463301/FULLTEXT01.pdf>
- Liu, K.; Wang, M.; Zhou, T. (2021) Increasing costs to Chinese railway infrastructure by extreme precipitation in a warmer world. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 93. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102797>
- Loijos, A. (2011) Life Cycle Assessment of Concrete Pavements: Impacts and Opportunities. Master thesis. Massachusetts Institute of Technology. USA.
- Loijos, A.; Santero, N.; Ochsendorf, J. (2013) Life cycle climate impacts of the US concrete pavement network. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol.72. p.76-83. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.014>
- Love, A. E. H. (1928) The stress produced in a semi-infinite body by pressure on part of the boundary. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.1929.0009>
- Ma, H.; Zhang, Z.; Zhao, X.; Wu, S. (2019) A Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Warm Mix Asphalt (WMA) and Hot Mix Asphalt (HMA) Pavement: A Case Study in China. *Advances in Civil Engineering*. ID 9391857. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/9391857>
- Macêdo, M.M., 2004. Solos modificados com cimento – Efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos. PhD Thesis. Universidade Federal de Pernambuco. Brazil.
- Maes, J.; Sol, H.; Guillaume, P. (2006) Measurements of the dynamic railpad properties. *Journal of Sound and Vibration*. Vol 293. P.557-565. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.042>
- Mao, R.; Bao, Y.; Duan, H.; Liu, G. (2021) Global urban subway development, construction material stocks, and embodied carbon emissions. *Nature. Humanities & Social Sciences Communications*. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/s41599-021-00757-2>
- Maris, E.; Froelich, D.; Aoussat, A.; Naffrechoux, E. (2014) Chapter 27 – From Recycling to Eco-design. *Handbook of Recycling*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00027-1>

Matias, S. R.; Ferreira, P. A. (2020) Railway slab track systems: review and research potentials. *Structure and Infrastructure Engineering. Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*. ISSN: 1573-2479. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1719167>

Mathieu, G.; Pavaux, J.; Gaudry, M. (2013) Evaluation de la contribution du réseau et de la politique ferroviaires à l'objectif du facteur 4. *RFF – Réseau Ferré de France*.

Medina, J.; Motta, L.M.G. (2015). *Mecânica dos pavimentos*. Editora Interciência. Rio de Janeiro.

Mendes, N. C. (2013) Métodos e modelos de caracterização para avaliação de impacto do ciclo de vida: análise e subsídios para aplicação no Brasil. *Dissertação de Mestrado*. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

Mendes, N. C.; Bueno, C.; Ometto, A. R. (2016) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. *Revista Production*. Ed. 26. P.160-175. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>

Merchan, A. L.; Belboom, S.; Léonard, A. (2020) Life cycle assessment of rail freight transport in Belgium. *Clean Technologies and Environmental Policy*. Vol. 22. 1109–1131. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01853-8>

Merchan, A. L.; Belboom, S.; Leonard, A. (2017) Life Cycle Assessment of railway infrastructure in Belgium. *7th Conference Life Cycle Management, the pathway for ecotransition*. France. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/321027385\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_of\\_railway\\_infrastructure\\_in\\_Belgium](https://www.researchgate.net/publication/321027385_Life_Cycle_Assessment_of_railway_infrastructure_in_Belgium)

Miceli Júnior, G., 2006. Comportamento de solos do estado do Rio de Janeiro estabilizado com emulsão asfáltica. *Master Thesis*. Instituto Militar de Engenharia. Brazil.

Ministério da Infraestrutura (2021) Certificação pela CBI do Programa de Novas Concessões Ferroviárias. Acesso em: 21/04/2022. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/certificacao-pela-cbi-do-programa-de-novas-concessoes-ferroviarias>

Ministério de Infraestrutura. (2016) EF-170 Trecho Sinop/MT – Itaituba/PA – Relatório IV: Estudos Definitivos de Engenharia. Volume 7 – Orçamento Parte 01. Brasil. Disponível em: <https://participantt.antt.gov.br/Site/AudienciaPublica/VisualizarAvisoAudienciaPublica.aspx?CodigoAudiencia=176>

Miyoshi, C. and Givoni, M. (2014) ‘The Environmental Case for the High-Speed Train in the UK: Examining the LondonManchester Route’, *International Journal of Sustainable Transportation*, 8(2), pp. 107–126. doi:10.1080/15568318.2011.645124

Monismith, C. L.; Ogawa, N.; Freeme, C. R. (1975). Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils Due to Repeated Loading. *54° Annual Meeting of TRB*. Washington. ISSN: 0361-1981.

- Morita, Y.; Shimizu, K.; Yanasaki, T.; Kato, H.; Shibahara, N. (2012) A study on the life-cycle assessment for evaluating carbon impact from construction of rail infrastructure. ETC Conference. United Kingdom. Available: <https://aetransport.org/past-etc-papers/conference-papers-2012?state=b&abstractId=4013>
- Motoshita, Masaharu et al. (2016) Water use related impacts: Part 2: Human Health Effects. In: Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators. Paris: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. cap. 5, p. 116-124. v. 1
- Motta, L M. G. (1991) Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ. Brasil.
- Mottschall, M.; Bergmann, T. (2013) Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Strassen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschiffahrt in Deutschland: Arbeitspaket 4 des Projektes "Weiterentwicklung des Analyseinstrumentes Renewbility. Umweltbundesamt. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). ISSN: 1862-4804
- MRS (2022) MRS recebe locomotive ES44CI, desenvolvida pela Wabtec. Disponível em: <https://www.mrs.com.br/post-blog-mrs/mrs-recebe-locomotiva-es44aci-desenvolvida-pela-wabtec/>
- Muthu, S. S. (2021) Life Cycle Sustainability Assessment. (LCSA). Environmental Footprint and Eco-design of Products and Process. Springer. SCI026000.
- Nascimento, F.; Gouveia, B.; Dias, F.; Ribeiro, F.; Silva, M. A. (2020) A method to select a road pavement structure with life cycle assessment. Journal of Cleaner Production. 122210. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122210
- Network Rail (2009) Comparing environmental impact of conventional and high-speed rail. Planning and Regulation. Route Planning. New Lines Programme. United Kingdom.
- Newmark, N. M., (1943). "Numerical procedure for computing deflections, moments, and buckling loads," Transactions of the. American Society of Civil Engineers, vol. 108, 1161.
- NG, A. W. (2018) From sustainability accounting to a green financing system: Institutional legitimacy and market heterogeneity in a global financial centre. Journal of Cleaner Production. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.05.250
- Ngo, T.; Indraratna, B. (2020) Mitigating ballast degradation with under-sleeper rubber pads: Experimental and numerical perspectives. Computers and Geotechnics. Vol. 122. Australia.
- Nielsen, J.C.O.; Li, X., (2018) Railway track geometry degradation due to differential settlement of ballast/subgrade e Numerical prediction by an iterative procedure. Journal of Sound and Vibration 412, 441e456. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.10.005>

Nilsen, M; Bohne, R. A. (2019) Evaluation of BIM based LCA in early design phase (low LOD) of buildings. Norwegian University of Science and Technology. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 323. doi:10.1088/1755-1315/323/1/012119

NORD-LCA (2017), Specification State of the art “Life Cycle Analysis tools to assess climate impact”. Nord-LCA: State of the art of LCA tools and methods for infrastructure for Finland, Sweden and Norway. Finnish Transport Agency. Norwegian Public Roads Administration. Swedish Transport Administration. Available: <http://www.nordfou.org/Documents/SOTA%20final%20version%201.1.pdf>

Norouzi, A.; Kim, D.; Kim, Y.R. (2015) Numerical evaluation of pavement design parameters for the fatigue cracking and rutting performance of asphalt pavements. Materials and Structures. DOI 10.1617/s11527-015-0744-

Norwegian Public Roads Administration (2021) Brukerveiledning VegLCA v5.01. Disponível em: <https://www.vegvesen.no/contentassets/059d38d1c5504f76927cfe0b8b47c8ba/veglca-v5.01-brukerveiledning.pdf>

Noshadravan, A.; Wildnauer, M.; Gregory, J.; Kirchain, R. (2013) Comparative pavement life cycle assessment with parameter uncertainty. Transportation Research Part D. v.25, p. 131-138. Doi. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2013.10.002>

Offenbacher, S.; Neuhold, J.; Veit, P.; Landgraf, M. (2020) Analyzing Major Track Quality Indices and Introducing a Universally Applicable TQI. Applied Sciences. MDPI. DOI. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10238490>

Olugbenga, O.; Kalyviotis, N.; Saxe, S. (2019) Embodied emissions in rail infrastructure: a critical literature review. Environmental Research Letters. Vol. 14. 123002. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab442f>

Ortega, A.; Blainey, S.; Preston, J. (2018) Assessing whole-life carbon footprint of under sleeper pad installation for ballasted track. Journal of Transportation Engineering. Part A: Systems. 144 (2). DOI: 10.1061/JTEPBS.0000192

Osorto, M. R. R.; Casagrande, M. D. T. (2023) Environmental Impact Comparison Analysis between a Traditional Hot Mixed Asphalt (HMA) and with the Addition of Recycled Post-Consumer Polyethylene Terephthalate (RPET) through the Life Cycle Assessment (LCA) Methodology. Sustainability. Vol. 15. <https://doi.org/10.3390/su15021102>

Pacañot, V.D.J. (2022) Evaluating environmental impacts with life cycle assessment. Nature Reviews – Earth & Environment. Vol. 3, 224. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00288-7>

Palin, E. J.; Oslakovic, I. S.; Gavin, K.; Quinn, A. (2021) Implications of climate change for railway infrastructure. Wires Climate Change. Vol. 12, issue 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/wcc.728>

Paris, R., de Silva, M. (2010) Delivering Crossrail, UK: a holistic approach to sustainability. ICE Proceedings. Engineering Sustainability. Vol. 168. United Kingdom. <http://dx.doi.org/10.1680/ensu.1400037>

Pasin, J. A. B. (2002) Indústria Naval do Brasil: Panorama, Desafios e Perspectivas. Revista do BNDES, v.9. n.8, p. 121-148. Rio de Janeiro.

Pfister, S.; Bayer, P. (2014) Monthly water stress: spatially and temporally explicit consumptive water footprint of global crop production. Journal of Cleaner Production, v. 73, p. 52-62.

Pichlmaier, S.; Kult, M.; Wagner, U. Extension of energy and transport scenario modelling to include a life cycle perspective. Future Transportation. Vol.1, 188–201. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/futuretransp1020012>

Piekarski, C. M. (2015) Modelo multicritério para apoio à tomada de decisão baseado em avaliação do ciclo de vida e indicadores corporativos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

PINI Consultoria (2023) TCPO – Tabela de Composições e Preços para Orçamentos. Disponível em: [https://tcpoweb.pini.com.br/home/base\\_tcpo.html](https://tcpoweb.pini.com.br/home/base_tcpo.html).

Pons, J.; Sanchis, I. V.; Franco, R. I.; Yepes, V. (2020) Life cycle assessment of a railway tracks substructures: Comparison of ballast and ballastless rail tracks. Environmental Impact Assessment Review. Vol. 85. 106444. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106444>

Prefeitura de São Paulo (2023) Tabela de custos de infraestrutura urbanas e obras da Prefeitura da Cidade de São Paulo. Disponível em: [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/tabelas\\_de\\_custos/](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/tabelas_de_custos/).

Prakoso, P. B. (2017). Analysis and Evaluation of Railway Track System on Soft Soil: Trackbed Thickness Design and Dynamic Track-soil interaction. PhD. Thesis. Technische Universität München. Germany.

Prakoso, P. B. (2012). The basic concepts of modelling railway track systems using conventional and finite element methods. Info Teknik, vol. 13. Staf Pengajar Pada Fakultas Teknik Unlam. Indonésia.

Profillidis, V.A. (2014). Railway Management and Engineering, Ashgate, England.

Ramos, A.; Correia, A. G.; Indraratna, B.; Ngo, T.; Calçada, R.; Costa. P. A. (2020) Mechanistic-empirical permanent deformation models: Laboratory testing, modelling and ranking. Transportation Geotechnics. Vol. 23.100326. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100326>

Rattanocht, W.; Wang, Y.; Chong, D.; Suwansawas, S. (2015) Adaptation strategies of transport infrastructure to global climate change. Transport Policy. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.03.001>

Rempelos, G.; Preston, J.; Blainey, S. (2020) A carbon footprint analysis of railway sleepers in the United Kingdom. *Transportation Research Part D*. doi: 10.1016/j.trd.2020.102285

Revista Ferroviária. (2020) Rumo anuncia emissão de US\$ 500 milhões em green bonds. Acesso em: 03/04/2022. Disponível em: <http://www.revistaferroviaria.com.br/detalhe-noticias.asp?InCdEditoria=1&InCdMateria=32458>

Ribeiro, F.B.; Gouveia, B.G.; Nascimento, F.A.C.; Silva, M.A.V. Campos, P.C.O.; Rosa, A. F. (2021a) Proposta de método para aplicação de Ecoeficiência em infraestrutura ferroviária. *Anais do VII Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida*. 1ed.Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. 2, p. 8-13

Ribeiro, F. R.; Nascimento, F.A.C.; Silva, M. A. V. (2022) Environmental performance analysis of railway infrastructure using life cycle assessment: Selecting pavement projects based on global warming potential impacts. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 365. 132558. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132558>

Ribeiro, F.B.; Silva, M.A.V. (2021). Life Cycle Assessment applied to railway infrastructure: a proposed method. *Revista Geintec*. Vol.11. nº4. Brasil. Doi. Disponível em: <https://doi.org/10.47059/revistageintec.v11i4.2598>

Ribeiro, F.B.; Silva, M.A.V.; Rosa, A. F.; Nascimento, F.A.C (2021b). Proposta de método para avaliação do ciclo de vida em infraestrutura ferroviária. In: 35º ANPET - Congresso de Pesquisas e Ensino em Transportes, 2021. *Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*.

Rosa, R. A.; Ribeiro, R.C.H. (2016) Estradas de ferro: projeto, especificação e construção. Edufes. ISBN: 978-85-7772-384-3

Rosa, A.C.; Teixeira, M.A.O.; Guimarães, A.C.R.; Cruz, L.O.S.R.; Pires, D.C.A.F.; Freitas, R.G. (2019). Avaliação estrutural de pavimentos ferroviários do corredor Centro Sudeste Paulista utilizando o software Sysstrain. 33º Congresso ANPET. Brasil.

Rose, J. G.; Liu, S.; Souleyrette (2014) Kentrack 4.0: A railway trackbed structural design program. ASME/IEE. *Proceedings of Joint Rail Conference*. JRC2014-3752. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/JRC2014-3752>

Roshan, M. J.; Rashid, A. S. A.; Wahab, N. A.; Tamassoki, S.; Jusoh, S. N.; Hezmi, M. A.; Daud, N. N. N.; Apandi, N. M.; Azmi, M. (2022) Improved methods to prevent railway embankment failure and subgrade degradation: A review. *Transportation Geotechnics*. 37. 100834. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100834>

Rossetti, M. A. (2021) Potential Impacts of climate change on railroads. Department of Transportation of United States of America. Acesso em 03/04/2022. Disponível em: [https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/rossetti\\_CC\\_Impact\\_Railroads.Pdf](https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/docs/rossetti_CC_Impact_Railroads.Pdf)

Roy, P. O.; Azevedo, L.; Margni, M.; van Zelm, R.; Deschenes, L.; Huijbregts, M. A. (2014). Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: A systematic analysis of spatial variability and uncertainty. *Science of The Total*.

Salles, A. C. N. (2009) Emissões de gases do efeito estufa dos dormentes de ferrovia de madeira natural e de madeira plástica no Brasil e na Alemanha com base nos seus ciclos de vida. Tese de doutorado. UFRJ/COPPE.

Sanchis, I. V.; Franco, R. I.; Zuriaga, P. S.; Fernandez, P. M. (2020). Risk of increasing temperature due to climate change on operation of the Spanish rail network. *Transportation Research Procedia*. Volume 45. 5-12. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.056>

Santos, R. G. (2022) Transporte ferroviário de cargas no brasil: Comportamento do setor frente ao período pandêmico (Covid-19) e impactos na matriz de transportes. Universidade Federal de Pernambuco.

Santos, J.; Bressi, S.; Cerezo, V.; Presti, D. L. (2019) SUP&R DSS: A sustainability-based decision support system for road pavements. *Journal of Cleaner Production*, 206. 524-540. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.308>

Sárik, V. (2018) Decision-making model for track system of high-speed rail lines. Ballasted track, ballastless track or both? Master Thesis. KTH Royal Institute of Technology. Sweden.

Savietto, J. P. (2017) Análise de Impactos Ambientais da restauração de pavimentos asfálticos pela Avaliação do Ciclo de Vida. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

Saxe, S., Miller, E. J. and Guthrie, P. (2017) ‘The Net Greenhouse Gas Impact of the Sheppard Subway Line’, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, pp. 261–275 DOI:10.1016/j.trd.2017.01.007

Schmied, M; Mottschall, M. (2013) Treibhausgasemissionen durch die Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland. FKZ 36301244. Öko-Institut e.V. Germany.

Scienedirect. Journals and Books. 2023. Acesso em 23/02/2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/browse/journals-and-books>

Seed, H.B., F.G. Mitry, C.L. Monismith; C.K. Chan, NCHRP Report 35: Prediction of Flexible Pavement Deflections from Laboratory Repeated Load Tests, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1967. Shackel, B., “Repeated Loading”.

Selig, E.T.; Chang, C.S.; Alva-Hurtado, J. E.; Adegoke, C.W. (1979). A theory for track maintenance life prediction. U.S. Department of Transportation. USA.

Selig, E. T., Li, D. (1994) Track Modulus: Its Meaning and Factors Influencing It. Transportation Research Board 1470. Washington, D. C., p. 47-54.

Selig, E.T.; Waters, J.M. (1994) Track geotechnology and substructure management. ISBN: 0727720139. Thomas Telford. Redwood Books. United Kingdom.

Senaratne, S.; Mirza, O.; Dekruif, T.; Camille, C. (2020) Life cycle cost analysis of alternative railway track support material: A case study of the Sydney Harbour Bridge. Journal of Cleaner Production. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124258>

Sgavioli, F. R., 2017. Contribuição para análise do custo do ciclo de vida de um sistema de gerência de pavimento ferroviário. Ph.D. Thesis. University of São Paulo. Brazil. doi: 10.11606/T.3.2018.tde-15012018-134934

Shi, C.; Fan, Z.; Connolly, D. P.; Jing, G.; Markine, V.; Guo, Y. (2023) Railway ballast performance: Recent advances in the understanding of geometry, distribution and degradation. Transportation Geotechnics. Vol 41. 101042. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101042>

Shinde, A. M.; Dikshit, A. K.; Singh, R. K.; Campana, P. E. (2018) 'Life Cycle Analysis based Comprehensive Environmental Performance Evaluation of Mumbai Suburban Railway, India', Journal of Cleaner Production. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.022

Silva Filho, J. C. (2018) Contribuição para o Desenvolvimento de Um Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Ferroviários com Foco nos Solos Tropicais. Ph.D. Thesis. Militar Institute of Engineering. Brazil.

Silva Filho J.C., Skwarok A.M., Witiuk R.L., 2022. Study of the Track Dynamics for Optimizing the Railway Superstructure. In: Tutumluer E., Nazarian S., Al-Qadi I., Qamhia I.I. (eds) Advances in Transportation Geotechnics IV. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 165. Springer, Cham. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77234-5\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77234-5_25)

Silva, V. B. S.; Moura Júnior, A. A. (2019) growth of the participation of wind energy in the energy-brazilian energy matrix: an analysis from the regulatory framework. International Journal of Development Research. Vol. 09. Issue 10. ISSN: 2230-9926

SimaPro (2022). Simapro software for LCA. Disponível em <https://acvbrasil.com.br/software/simapro>

Singh, M.; Indraratna, B.; Nguyen. (2021) Experimental insights into the stiffness degradation of subgrade soils prone to mud pumping. Transportation Geotechnics. Vol. 27. 100490. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100490>

Sol-Sánchez, M.; Moreno-Navarro, F.; Tauste-Martínez, R.; Saíz, L.; Rubio-Gámez, M.C. (2020) Recycling tire-derived aggregate as elastic particles under railway sleepers: Impact on track lateral resistance and durability. Journal of Cleaner Production. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123322>

Sol-Sánchez, M.; Pirozzolo, L.; Moreno-Navarro, F.; Rubio-Gámez, M. C. (2016) A study into the mechanical performance of different configurations for the railway track section: A laboratory approach. *Engineering Structures*. Vol.119. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.008>

Soust-Verdaguer, B.; Galeana, I. B.; Llatas, C.; Montes, M.V.; Hoxha, E.; Passer, A. (2022) How to conduct consistent environmental, economic, and social assessment during the building design process. A BIM-based Life Cycle Sustainability Assessment method. *Journal of Building Engineering*. Vol.45. 103516. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103516>

Spada, J. L. G. (2003) Uma Abordagem de Mecânica dos Pavimentos Aplicada ao Entendimento do Mecanismo de Comportamento Tensão-Deformação da Via Férrea. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Spielmann, M; Scholz, R. W. (2005) Life Cycle Inventories of Transport Services: Background Data for Freight Transport. *The Journal of Life Cycle Assessment*. DOI:10.1065/lca2004.10.181.10

Statens vegvesen Vegdirektoratet (2018) LCA Transport Litteraturstudie – Rapport. Asplan Viak. Disponível em: <https://www.jernbanedirektoratet.no/contentassets/b67e526f127d42fdb985ce6ea6550ea3/klima/lca-transport-litteraturstudie-asplan-viak-20.09.18.pdf>

Steen, B.; Arvidsson, P.; Nobel Gunnar Borg, A.; (1999) Centre for Environmental Assessment of Products and Material Systems A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics.

Stopatto, S. Via permanente ferroviária: conceitos e aplicações. São Paulo: T.A. Queiroz, 251 p. (1987)

Stripple, H; Uppenberg, S. (2010) Life cycle assessment of railways and rail transports - Application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothinia Line. Report. Swedish Environmental Research Institute – IVL. Disponível em: <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473456/1628416183076/FULLTEXT01.pdf>

Studiengesellschaft Holzschwellenoberbau E.V. (2009) Life cycle assessment (LCA) of railway sleepers. Comparison of railway sleepers made from concrete, steel, beech wood and oak wood. Schweiz. Disponível em: <http://www.frankwerner.ch/LCAHolzschwellenfassung091012KurzfassungEnglisch1.pdf>

SUDECAP – Superintendência de Desenvolvimento da Capital (2023) Tabela de Preços do Caderno de Encargos da Sudecap. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sudecap/tabela-de-precos>

Sudmeier-Rieux, K.; Arce-Mojica, T.; Boehmer, H.J.; Doswald, N.; Emerton, L.; Friess, D.A.; Galvin, S.; Hagenlocher, M.; James, H.; Laban, P.; Lacambra, C.; Lange, W.; Mcadoo, B.G.; Moos, C.; Mysiak, J.; Narvaez, L.; Nehren, U.; Peduzzi, P.; Renaud, F.G.; Sandholz, S.; Schreyers, L.; Sebesvari, Z.; Tom, T.; Triyanti, A.; Van Eijk, P.; Van Staveren, M.; Vicarelli, M.; Walz, Y. (2021) Scientific evidence for ecosystem-based disaster risk reduction. *Nature Sustainability*. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00732-4>

Svensson, N (2006) Life-cycle considerations for environmental management of the Swedish railway infrastructure. Manuscript de these n°1064, Linköping studies in science and technology, Linköping University.

Swedish Transport Administration (2020) Klimatförbättringar i infrastrukturprojekt: Vägledning för planering och projektering. ISBN: 978-91-7725-627-4. Swedish. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=6470&pid=diva2%3A1416323>

Tayabji, S. D.; Thompson, M. R. (1976). ILLITRACK: A finite element analysis of conventional railway support system – User’s Manual and Program Listing. University of Illinois Urbana-Champaign, IL. USA.

TCU – Tribunal de Contas da União (2019) Evolução dos contratos das concessões ferroviárias. Governança e Controle da Regulação em infraestrutura. Instituto Serzedello Corrêa.

The Carbon Leadership Forum (2019) Life Cycle Assessment of Buildings: A Practice Guide. University of Washington. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1773/41885>

Thevakumar, K.; Indraratna, B.; Ferreira, F. B.; Carter, J.; Rujikiatkamjorn, C. (2021) The influence of cyclic loading on the response of soft subgrade soil in relation to heavy haul railways. *Transportation Geotechnics*. Vol. 29. 100571. doi:10.1016/J.TRGEO.2021.100571

Timoshenko, S. (1915) “K voprosu o prochnosti rels” (To the strength of rails, in Russian). Transaction Institute of Ways of Communication, St. Petersburg.

To, W.M.; Lee, P.K.C.; Yu, B.T.W. (2020) Sustainability assessment of an urban rail system – The case of Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119961>

Trafikverket (2021) Including Sustainability and Life Cycle Perspectives in Decision Making. Swedish Transport Administration, Sweden. Disponível em: [http://www.ucprc.ucdavis.edu/pdf/lca2020/Asa\\_Lindgren.pdf](http://www.ucprc.ucdavis.edu/pdf/lca2020/Asa_Lindgren.pdf)

Tseng, K. H.; Lytton, R. L. (1989) Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials. In: implication of aggregates in the design, construction, and performance of flexible pavements, ASTM International, p. 154-172. ISBN: 0-8031-1193-2

Tutumluer, E. (2013). Practices for Unbound Aggregate Pavement Layers. NCHRP Synthesis 445, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Ugaya, C. M. L.; Neto, J. A. A.; Figueiredo, M. C. B. (2019) Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o Contexto Brasileiro. Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida. IBICT. Brasília.

UIC – International Union of Railways. (2017) Rail adapt: Adapting the railway for the future. Disponível em: [https://uic.org/IMG/pdf/railadapt\\_final\\_report.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/railadapt_final_report.pdf)

Umberto (2022), Umberto LCA+ software. Disponível em: [https://www.ifu.com/umberto/lca-software/?gclid=EAIaIQobChMI5ODUw7SY9AIVuD6tBh0gqwuUEAAYASAAEgKC3PD\\_BwE](https://www.ifu.com/umberto/lca-software/?gclid=EAIaIQobChMI5ODUw7SY9AIVuD6tBh0gqwuUEAAYASAAEgKC3PD_BwE)

Umweltbundesamt (2020) Ökologische Bewertung von Verkehrsarten. Abschlussbericht. Texte 156/2020. Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Available: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_156-2020\\_oekologische\\_bewertung\\_von\\_verkehrsarten\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_156-2020_oekologische_bewertung_von_verkehrsarten_0.pdf)

Umweltbundesamt (2013) Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland. Deutschland.

UNECE – United Nations Economic Commission for Europe (2021) Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options. United Nations. Geneva. Disponível em: <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf>

Usman, K.; Burrow, M.; Ghataora, G., (2015) Railway track subgrade failure mechanisms using a fault chart approach. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum. Procedia Engineering 125, 547 – 555. doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.060

Uzan, J. (1982) Permanent deformation in pavement design and evaluation. Proceedings of the International Symposium on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Volume 2, Trondheim, June 23-25. ISBN: 82-519-0480-3

Vandanjon, P. O.; Coiret, A.; Muresan, B.; Fargier, A.; Dauvergne, M.; Bosquet, R.; Jullien, A.; Fracois, D.; Labarthe, F. (2012) Practical guidelines for Life Cycle Assessment applied to railways project. International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction. France. pp.144–153. hal-00960384. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00960384/document>

Vale, C.; Simões, M. L. (2022) Prediction of Railway Track Condition for Preventive Maintenance by Using a Data-Driven Approach. Infrastructures. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030034>

Veit, P.; Holzfeind, J. (2009) Asphalt layers in railway lines. 12th Colloquium on Asphalt and Bitumen. Slovenia. Available at: [online.tugraz.at/tug\\_online/voe\\_main2.getVollText?pDocu](https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocu)

Veit, P.; Vonbun, S. (2018) Elastic elements in track influencing total track costs and reducing vibrations. UEEIV - European Railway Engineering Associations and Institutions Conference. Disponível em: [https://www.thepwi.org/technical\\_hub/presentations\\_for\\_tech\\_hub/181015\\_pwi\\_ueeiv\\_conference\\_manchester/04\\_stefan\\_vonbun\\_peter\\_veit](https://www.thepwi.org/technical_hub/presentations_for_tech_hub/181015_pwi_ueeiv_conference_manchester/04_stefan_vonbun_peter_veit)

Vizcarra, G. C.; Muniz, L.; Gonçalves, T.; Nimbalkar, S. (2022). Railway subgrade characterization through repeated loading triaxial testing. *Advances in Transportation Geotechnics IV*. p. 327-335. doi: 10.1007/978-3-030-77234-5\_27

Vogel, D. (2005) *The market for virtue: the potential and limits of corporate social responsibility*. Brookings Institution Press. Washington, DC. USA.

Von Rozycki C, Koeser H, Schwarz H (2003) Ecology profile of the German high-speed rail passenger transport system, ICE. *Int J Life Cycle Assess* 8:83–91. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02978431>

Xiao, X.; Cai, D.; Lou, L.; Shi, Y.; Xiao, F. (2021) Application of asphalt based materials in railway system: A review. *Construction and Building Materials*. DOI. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124630>

Xu, F.; Yang, Q.; Liu, W.; Leng, W.; Nie, R.; Mei, H. (2018). Dynamic stress of subgrade bed layers subjected to train vehicles with large axle loads. *Journal Shock and Vibration*. Vol. 2018. p. 1-12. Doi. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/2916096>

Zimmermann H (1888) *Die Berechnung von Eisenbahn-oberbaues*. Berlin: Verlag Von Ernst & Korn.

Wahrlich, J.; Alvarenga, R. A. F.; Henkes, J. A.; Rossato, I. F.; Simioni, F. J. (2020) Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida: uma revisão. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*. v.9.n.2. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e22020183-201>

Wang, K.; Zhuang, Y. (2021) Characterizing the permanent deformation Response-Behavior of subgrade material under cyclic loading based on the shakedown theory. *Construction and Building Materials*. vol. 311. Doi. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125325>

Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016) The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*. DOI 10.1007/s11367-016-1087-8 *Environment*, v. 500–501, nº 0, p. 270-276. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.099

Westin, J.; Kågeson, P. (2012) ‘Can high speed rail offset its embedded emissions?’, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Elsevier Ltd, 17(1), pp. 1–7. doi:10.1016/j.trd.2011.09.006

Winkler (1867) Die Lehre Von Der Elasticitaet Und Festigkeit. (on Elasticity and Fixity). Dominicus, Prague. Kessinger Publishing. 978-1166781811

World Bank – International Finance Corporation (2004) The Global Impact: Who Cares Wins – Connecting Financial Markets to a Changing World. Disponível em: [https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics\\_ext\\_content/ifc\\_external\\_corporate\\_site/sustainability-at-ifc/publications/publications\\_report\\_whocareswins\\_wci\\_1319579355342](https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/publications_report_whocareswins_wci_1319579355342)

Yoder, E.J. and Witczak, M.W. (1975) Principle of Pavement Design. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 711 p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470172919>

Yue, Y.; Wang, T.; Liang, S.; Yang, J.; Hou, P.; Qu, S.; Zhou, J.; Jia, X.; Wang, H.; Xu, M. (2015) Life cycle assessment of High-Speed Rail in China. Transportation and Research Part D: Transport and Environment. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.005>

Yvna, V.; Shapovalov, V.; Okost, M.; Morozov, A.; Ermolov, Y.; Kochur, A. (2023) Modeling of long-term train loads impacts on subgrade soils: a review. International Journal of Transportation Science and Technology. Vol. 12. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.06.005>

## GLOSSÁRIO

*i. Análise mecânica-empírica* – método para analisar o pavimento a partir do desempenho de suas tensões e deformações, com foco na determinação da fadiga e deformabilidade.

*ii. Avaliação do ciclo de vida* – conforme NBR14040, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma entre várias técnicas de gestão ambiental (por exemplo, avaliação de risco, avaliação de desempenho ambiental, auditoria ambiental e avaliação de impacto ambiental), composta por quatro fases: *i. definição de objetivo e escopo; ii. análise de inventário; iii. avaliação de impactos; iv. interpretação.* Para isso, a ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final, ou seja, do berço ao túmulo.

*iii. Bitola* - medida padrão ferroviária, representada pela distância das faces internas dos boletos (parte superior) de dois trilhos.

*iv. Concreto Betuminoso Usinado a Quente* – mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta por agregado graduado, material de enchimento (*filler*), se necessário, e cimento asfáltico, espalhado e compactado a quente. Pode ser empregado como revestimento, camada de ligação (*Binder*), base, regularização ou reforço do pavimento.

*v. Deformação permanente* – parcela permanente, não recuperável, da deformação total ou deslocamento total proveniente da passagem repetida do material rodante, considerando a contribuição das camadas da via permanente, sendo cumulativa ao longo da vida do pavimento.

*vi. Dormente* – peça de concreto, aço, compostos poliméricos, madeira ou outro material que apresenta características para suportar os esforços ferroviários. É instalado na direção transversal à linha férrea, sobre a qual são fixados os trilhos. Tem função de transmitir ao lastro parte dos esforços produzidos pelos veículos ferroviários e manter a bitola da via permanente.

*vii. Ecoinvent* – ampla biblioteca de inventários com valores de cargas ambientais (entradas e saídas de materiais, substâncias e energia) associadas ao ciclo de vida de um grande número de produtos, processos, sistemas de energia, de transporte, de disposição de resíduos, dentre outros.

*viii. Escopo* – fase inicial da avaliação do ciclo de vida e trata da delimitação do objeto de estudo. É composto pelo sistema de produto, funções do sistema de produto, unidade funcional, fronteira do sistema, procedimentos de alocação, seleção das categorias de impacto e metodologias para avaliação, requisitos de dados, pressupostos, limitações,

requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados, tipo de análise crítica e tipo e formato de relatório requerido pelo estudo.

*ix. Fronteira de Sistema* – conjunto de critérios que especifica quais processos elementares faz parte de um sistema de produto. Também define os processos elementares a serem incluídos no sistema. Idealmente, convém que o sistema de produto seja modelado de tal forma que as entradas e saídas na sua fronteira sejam fluxos elementares.

*x. Potencial de Aquecimento Global* – categoria de impacto, originário do inglês *Global Warming Potential (GWP)*, que pode ser selecionado no momento da execução da avaliação do impacto do ciclo de vida, atualmente denominado também de mudanças climáticas.

*xi. Inventário de ciclo de vida* – conjunto de informações contendo os fluxos de massas e energias que entram e saem das diversas etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço.

*xii. Lastro* – camada do pavimento ferroviário imediatamente inferior ao dormente, é comumente constituído de pedra britada, de dimensões de 2 cm a 6 cm e resistente à abrasão. Tem, entre suas funções, assegurar que não haja sobrecarga nos trilhos e também deve-se manter permeável e resistente.

*xiii. Mistura solo-cimento* - é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade.

*xiv. Mistura solo-emulsão* - técnica de estabilização de solos com emulsão asfáltica. A emulsão recobre as partículas do solo, proporcionando maior coesão entre elas, além de impedir que a umidade as atinja. Logo, a emulsão asfáltica aumenta a resistência do solo, além de funcionar como impermeabilizante.

*xv. Módulo resiliente ou módulo de resiliência* – medida de rigidez, obtida através do ensaio de carga repetida, para permitir a caracterização mecânica dos materiais e também ser possível a avaliação estrutural das camadas do pavimento.

*xvi. Número N* – número de repetições de aplicação de carga, de determinado eixo-padrão, sobre o pavimento.

*xvii. Objetivo* – trata de uma das fases preliminares da avaliação do ciclo de vida, e visa declarar a aplicação pretendida, as razões para execução do estudo, o público-alvo e se existe a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

*xviii. Pavimento ferroviário* – estrutura de camadas, constituída por trilho, dormente, lastro e sublastro, também designada de via permanente, se que apoia no solo de fundação (subleito).

*xix. Simapro* - *software* profissional para coletar, analisar e monitorar os dados de desempenho da sustentabilidade dos produtos e serviços. A ferramenta é utilizada em

diferentes aplicações, como pegadas de carbono e hídrica, *design* de produto, geração de declarações ambientais de produtos e definição de indicadores chave de desempenho.

*xx. Sistema de Produto* - conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto.

*xxi. Sublastro* – camada da via permanente localizada entre o lastro e o subleito, com função de resistir às tensões para evitar a sobrecarga nos trilhos.

*xxii. Subleito* – é o terreno de fundação do pavimento. No presente estudo, caracteriza-se como o principal elemento avaliado durante a análise estrutural.

*xxiii. Trilho* – peça longa metálica com seção transversal semelhante ao duplo T e com características de viga, a qual é assentada e fixada em dormentes e ligada ou soldada ao topo com outras peças iguais. Estas formam fiadas paralelas que suportam e guiam as rodas do material rodante (veículos ferroviários) e constituem a superfície de rolamento da linha férrea.

*xxiv. Unidade Funcional* - desempenho quantificado de um sistema de produto para utilização como uma unidade de referência. A unidade funcional define a quantificação das funções identificadas (características de desempenho) do produto. O propósito primário de uma unidade funcional é fornecer uma referência à qual as entradas e saídas são relacionadas. Esta referência é necessária para assegurar a comparabilidade dos resultados de ACV.

A comparabilidade dos resultados de ACV é particularmente crítica quando diferentes sistemas estão sendo avaliados, para assegurar que as comparações entre eles sejam feitas em uma base comum.

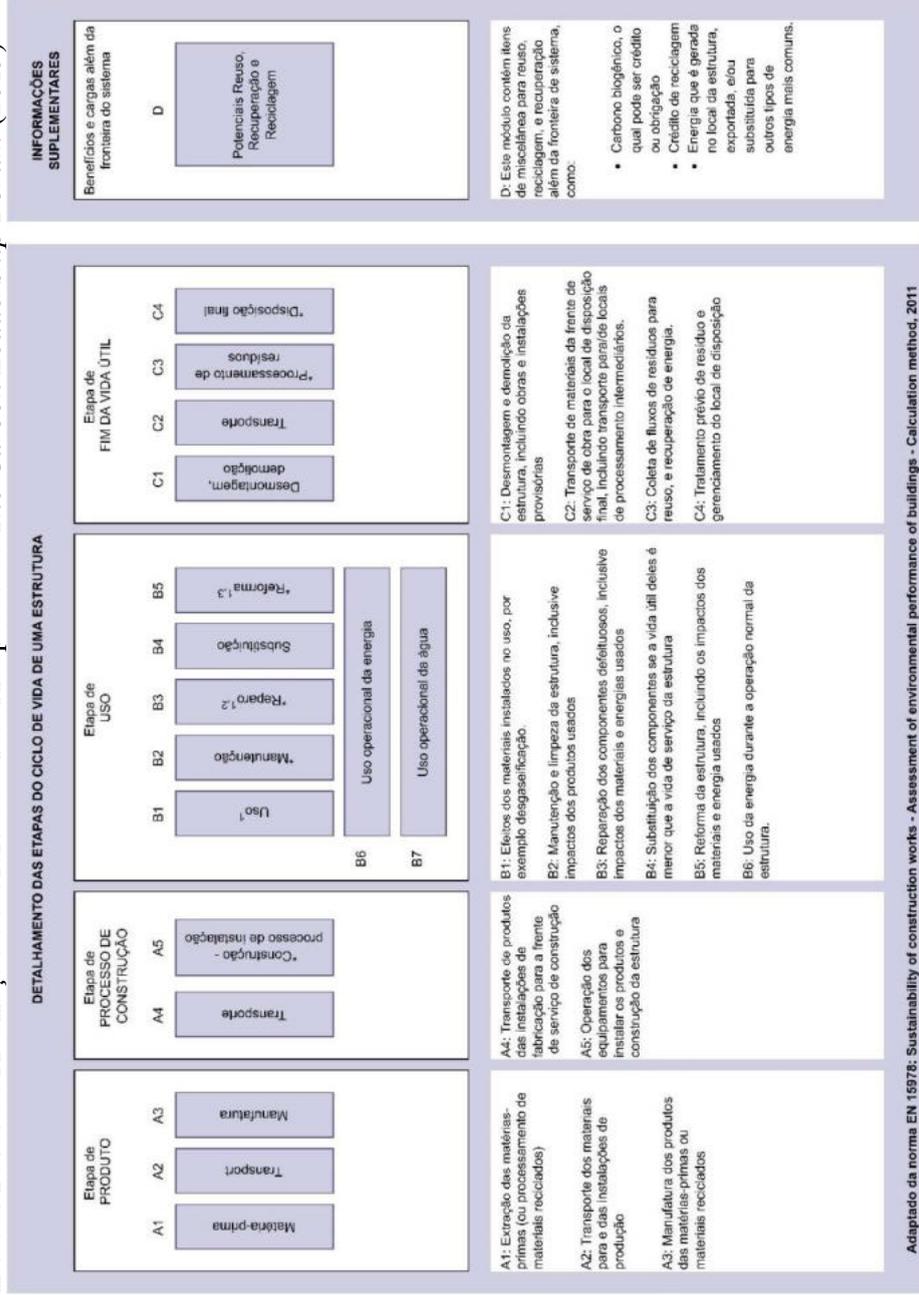
*xxv. Umidade ótima* – também chamada de *humidade ótima* ( $h_{ót}$ ), é aquela em que o solo atinge a maior massa específica aparente seca máxima, ou seja, se a quantidade de água utilizada na compactação da camada de aterro for maior ou menor que a umidade ótima, o solo não atingirá o seu grau de compactação máxima.

*xxvi. Via permanente* – conjunto de linhas férreas existentes na faixa de domínio da ferrovia, caracterizada pelos trilhos, dormente, lastro, sublastro e subleito.



## ANEXOS

### Anexo I – Detalhamento das Fases de Avaliação do Ciclo de Vida. Adaptado de *The Carbon Leadership Forum (2019)*



Adaptado da norma EN 15978: Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method, 2011

<sup>1</sup>Descrição do cenário requerida

<sup>2</sup>Esses módulos não são geralmente bem suportados pelas bases de dados e ferramentas de ACV

<sup>3</sup>Reparo é definido como "retorno de um item para uma condição aceitável pela renovação, substituição ou reparo de desgaste, dano ou partes degradadas.

<sup>4</sup>Reforma é definida como "modificação e melhorias para uma estrutura existente no intuito de melhorar o desempenho para uma condição aceitável.

## Anexo II – Dados de modelagem estrutural do pavimento ferroviário

CENÁRIO	CRITÉRIO	TIPO DE CARGA	VALOR DA CARGA	MATERIAL DO DORMENTE	MATERIAL DO SUBLASTRO	MATERIAL DO SUBLEITO	CONDIÇÃO SATURAÇÃO DO SUBLEITO	TRILHO		DORMENTES				
								Biola	Seção	Espaçamento	Comprimento	Altura	Largura Inf.	Largura Sup.
1	Concreto Areia com cascalho Saturado	Dinâmica	25	Concreto	Areia com cascalho	Areia	Saturado	1,6	TR-68	60	2,8	20	30	28
2	Concreto Areia com cascalho Umidade ótima	Dinâmica	25	Concreto	Areia com cascalho	Areia	Umidade ótima	1,6	TR-68	60	2,8	20	30	28
3	Concreto Solo-cimento Saturado	Dinâmica	25	Concreto	Solo-cimento	Areia	Saturado	1,6	TR-68	60	2,8	20	30	28
4	Concreto Solo-cimento Umidade ótima	Dinâmica	25	Concreto	Solo-cimento	Areia	Umidade ótima	1,6	TR-68	60	2,8	20	30	28
5	Concreto Solo-emulsão Saturado	Dinâmica	25	Concreto	Solo-emulsão	Areia	Saturado	1,6	TR-68	60	2,8	20	30	28
6	Concreto Solo-emulsão Umidade ótima	Dinâmica	25	Concreto	Solo-emulsão	Areia	Umidade ótima	1,6	TR-68	60	2,8	20	30	28
7	Concreto CBUQ Saturado	Dinâmica	25	Concreto	CBUQ	Areia	Saturado	1,6	TR-68	60	2,8	20	30	28
8	Concreto CBUQ Umidade ótima	Dinâmica	25	Concreto	CBUQ	Areia	Umidade ótima	1,6	TR-68	60	2,8	20	30	28

CENÁRIO	CRITÉRIO	LASTRO							CAMADAS						
		Altura	Ombreira	Decl. Talude	Decl. Fundo	Tipo decl. Fundo	Encobrim. Dornmente	Altura (cm)	Ombreira (m)	Talude	Fundo	Altura (cm)	Ombreira (m)	Talude	Fundo
1	Concreto Areia com cascalho Saturado	30	40	1,5	3	ambos	sim	25	0,5	1,2	1	200	2	1,5	1
2	Concreto Areia com cascalho Umidade ótima	30	40	1,5	3	ambos	sim	25	0,5	1,2	1	200	2	1,5	1
3	Concreto Solo-cimento Saturado	30	40	1,5	3	ambos	sim	25	0,5	1,2	1	200	2	1,5	1
4	Concreto Solo-cimento Umidade ótima	30	40	1,5	3	ambos	sim	25	0,5	1,2	1	200	2	1,5	1
5	Concreto Solo-emulsão Saturado	30	40	1,5	3	ambos	sim	25	0,5	1,2	1	200	2	1,5	1
6	Concreto Solo-emulsão Umidade ótima	30	40	1,5	3	ambos	sim	25	0,5	1,2	1	200	2	1,5	1
7	Concreto CBUQ Saturado	30	40	1,5	3	ambos	sim	12,5	0,5	1,2	1	200	2	1,5	1
8	Concreto CBUQ Umidade ótima	30	40	1,5	3	ambos	sim	12,5	0,5	1,2	1	200	2	1,5	1

CENÁRIO	CRITÉRIO	MATERIAIS												
		Nome	Tipo	Cor	Massa esp.	Mod. Elast. / K1	k2	k3	σ3 min (Mpa)	σ3 máx (Mpa)	σd min (Mpa)	σd máx (Mpa)	Coef. Poisson	
1	Concreto Areia com cascalho Saturado	Aço	Linear isotr.	dGray	7850	210							0,3	
		Concreto	Linear isotr.	dMaroon	2500	32								0,25
		Brita	Resil. Granular1	dMedGray	2400	2.466,80	0,7803			0,02	10			0,2
		Sublastro - Cascalho	Resiliente Granular2	dYellow	1800	2182	0,687			0,02	10			0,35
2	Concreto Areia com cascalho Umidade ótima	Subbleito - Areia Um. Ótima	Resil. Granular1	dGreen	1907	23.202	-0,187			0,02	10	0,02	0,42	0,3
		Aço	Linear isotr.	dGray	7850	210								0,3
		Concreto	Linear isotr.	dMaroon	2500	32								0,25
		Brita	Resil. Granular1	dMedGray	2400	2.466,80	0,7803			0,020	10			0,200
3	Concreto Solo-cimento Saturado	Sublastro - Cascalho	Resiliente Granular2	dYellow	1800	2182	0,687			0,02	10			0,35
		Subbleito - Areia Um. Ótima	Resil. Granular1	dGreen	1935	115.287	-0,242			0,02	10	0,02	0,42	0,3
		Aço	Linear isotr.	dGray	7850	210								0,3
		Concreto	Linear isotr.	dMaroon	2500	32								0,25
4	Concreto Solo-cimento Umidade ótima	Brita	Resil. Granular1	dMedGray	2400	2.466,80	0,7803			0,020	10			0,2
		Sublastro - Solo-cimento 3%	Resiliente Granular1	dYellow	1931	6.680,8	0,4291751			0,02	10	0,02	0,42	0,35
		Subbleito - Areia Um. Ótima	Resil. Granular1	dGreen	1907	23.202	-0,187			0,02	10	0,02	0,42	0,3
		Aço	Linear isotr.	dGray	7850	210								0,3
5	Concreto Solo-emulsão Saturado	Concreto	Linear isotr.	dMaroon	2500	32								0,25
		Brita	Resil. Granular1	dMedGray	2400	2.466,80	0,7803			0,020	10			0,2
		Sublastro - Solo-cimento 3%	Resiliente Granular1	dYellow	1931	6.680,8	0,4291751			0,02	10	0,02	0,42	0,35
		Subbleito - Areia Um. Ótima	Resil. Granular1	dGreen	1935	115.287	-0,242			0,02	10	0,02	0,42	0,3
6	Concreto Solo-emulsão Umidade ótima	Aço	Linear isotr.	dGray	7850	210								0,3
		Concreto	Linear isotr.	dMaroon	2500	32								0,25
		Brita	Resil. Granular1	dMedGray	2400	2.466,80	0,7803			0,020	10			0,2
		Sublastro - Solo-emulsão - 4%	Resiliente Granular1	dYellow	1900	1.300,0	0,29			0,02	10			0,35
7	Concreto CBUQ Saturado	Subbleito - Areia Um. Ótima	Resil. Granular1	dGreen	1907	23.202	-0,187			0,02	10	0,02	0,42	0,3
		Aço	Linear isotr.	dGray	7850	210								0,3
		Concreto	Linear isotr.	dMaroon	2500	32								0,25
		Brita	Resil. Granular1	dMedGray	2400	2.466,80	0,7803			0,020	10			0,2
8	Concreto CBUQ Umidade ótima	Sublastro - CBUQ	Resil. Elás. Linear	dYellow	2400	4000			0,020	10			0,2	
		Subbleito - Areia Um. Ótima	Resil. Granular1	dGreen	1907	23.202	-0,187			0,02	10	0,02	0,42	0,3
		Aço	Linear isotr.	dGray	7850	210								0,3
		Concreto	Linear isotr.	dMaroon	2500	32								0,25

CENÁRIO	CRITÉRIO	ATRIBUIÇÃO DE MATERIAIS								VAGÕES					COMPOSIÇÃO					POSICIONAMENTO				
		Trilho	Grampo	Dormente	Lastro	Sublastro	Subleito	Nome	Tipo	Dist. Engate ao eixo	Dist. entre eixos	Dist. Entre truques	Quant. Membros	Membro	Carga (ton) - Norma NBR 7189	1º Eixo	Quant. Eixos	Simetria	Pos. Refér.	Dormentes além cargas extremas				
1	Concreto Areia com cascalho Saturado	Aço Trilho	Grampo 01	Concreto	Brita	Areia com cascalho	Areia	Hooper	2 truques	1,21	1,7	13,945	1	Hooper	134	1	2	Simetria	Meio do vão	4				
2	Concreto Areia com cascalho Umidade ótima	Aço Trilho	Grampo 01	Concreto	Brita	Areia com cascalho	Areia	Hooper	2 truques	1,21	1,7	13,945	1	Hooper	134	1	2	Simetria	Meio do vão	4				
3	Concreto Solo-cimento Saturado	Aço Trilho	Grampo 01	Concreto	Brita	Solo-cimento	Areia	Hooper	2 truques	1,21	1,7	13,945	1	Hooper	134	1	2	Simetria	Meio do vão	4				
4	Concreto Solo-cimento Umidade ótima	Aço Trilho	Grampo 01	Concreto	Brita	Solo-cimento	Areia	Hooper	2 truques	1,21	1,7	13,945	1	Hooper	134	1	2	Simetria	Meio do vão	4				
5	Concreto Solo-emulsão Saturado	Aço Trilho	Grampo 01	Concreto	Brita	Solo-emulsão	Areia	Hooper	2 truques	1,21	1,7	13,945	1	Hooper	134	1	2	Simetria	Meio do vão	4				
6	Concreto Solo-emulsão Umidade ótima	Aço Trilho	Grampo 01	Concreto	Brita	Solo-emulsão	Areia	Hooper	2 truques	1,21	1,7	13,945	1	Hooper	134	1	2	Simetria	Meio do vão	4				
7	Concreto CBUQ Saturado	Aço Trilho	Grampo 01	Concreto	Brita	CBUQ	Areia	Hooper	2 truques	1,21	1,7	13,945	1	Hooper	134	1	2	Simetria	Meio do vão	4				
8	Concreto CBUQ Umidade ótima	Aço Trilho	Grampo 01	Concreto	Brita	CBUQ	Areia	Hooper	2 truques	1,21	1,7	13,945	1	Hooper	134	1	2	Simetria	Meio do vão	4				

CENÁRIO	CRITÉRIO	Tensão Desvio (kPa)	Tensão Confinante (kPa)	Deslocamento vertical (mm)	$\sigma_3/\sigma_d$	MR Camada Subleito (Mpa)	N projeto	Tensão Admissível (kgf/cm <sup>2</sup> )	Tensão efetiva no subleito (kgf/cm <sup>2</sup> )	N efetivo (por tensão)	Deformação específica (%) - intrínseca	N efetivo (por deformação)
1	Concreto Areia com cascalho Saturado	3.144										
		2.466										
		177,10	653,40	2.466	3,69							
2	Concreto Areia com cascalho Umidade ótima	65,60	2,70	2.330	0,04							
		44,80	56,10	2.266	1,25	39,76	2,22E+06	0,488	0,448	1,51E+06	0,1783	1,47E+06
		93,20	59,70	0,687								
3	Concreto Solo-cimento Saturado	69,40	46,30	0,513	0,67							
		61,50	52,30	0,483	0,85	235,45	2,22E+06	2,60	0,62	2,44E+31	1,7767	1,62E+18
		2.332,00	6.728,90	1.988	2,89							
4	Concreto Solo-cimento Umidade ótima	96,70	34,00	1,989	0,35							
		38,10	66,90	1,957	1,76	38,47	2,22E+06	0,42	0,38	1,69E+07	0,1839	1,70E+07
		102,50	89,80	0,668	0,88							
5	Concreto Solo-emulsão Saturado	78,20	3,00	0,508	0,04							
		60,20	57,60	0,493	0,96	230,02	2,22E+06	2,54	0,60	2,10E+31	1,7943	1,56E+18
		325,50	839,40	2.460	2,58							
6	Concreto Solo-emulsão Umidade ótima	54,70	43,10	2.366	0,79							
		43,70	61,30	2.295	1,40	39,11	2,22E+06	0,43	0,44	1,75E+06	0,1811	1,72E+06
		93,00	74,50	0,697	0,80							
7	Concreto CBUQ Saturado	69,90	36,70	0,524	0,53							
		61,20	53,30	0,488	0,87	234,38	2,22E+06	2,58	0,61	2,50E+31	1,7801	1,63E+18
		509,60	2.336,00	2.064	4,58							
8	Concreto CBUQ Umidade ótima	104,30	42,20	2.003	0,40							
		37,70	71,00	1,990	1,88	38,05	2,22E+06	0,42	0,38	1,67E+07	0,1858	1,68E+07
		216,90	1.002,50	2.096	4,62							
		107,20	268,10	1,973	2,50							
		47,80	67,30	1,964	1,41	221,51	2,22E+06	2,44	0,48	1,96E+38	1,8231	6,08E+19

### Anexo III - Tela de Exemplo de Input do Systrain 1.84.

The screenshot displays the SysTrain software interface. At the top, there is a menu bar with the following options: Arquivo, Geometria, Materiais, Carregamento, MEF, Visualização, Verificação, and Ajuda. Below the menu bar is a toolbar containing various icons for file operations, geometry, materials, loading, finite element analysis (MEF), visualization, and verification. The main window is titled 'Trilho' and contains a data entry table for a section named 'TR-68'. The table lists various geometric and material properties with their corresponding values. At the bottom of the window, there are three buttons: 'Ok', 'Aplicar', and 'Cancelar'.

Nome da seção	TR-68
Bitola (m)	1,6
H - altura (mm)	185,7
B - largura patim(mm)	152,4
C1 - largura 1 boleto (mm)	0
C2 - largura 2 boleto (mm)	74,6
S - espessura alma (mm)	17,4
K1 - espessura boleto (mm)	0
K2 - altura boleto (mm)	0
F - altura patim (mm)	0
D - espessura patim (mm)	0
A - área do trilho (mm <sup>2</sup> )	8617
Yh - linha neutra (mm)	0
Ix - momento de inércia (cm <sup>4</sup> )	3950
Iy - momento de inércia (cm <sup>4</sup> )	395
T - momento polar (cm <sup>4</sup> )	79
Wx - módulo da seção (cm <sup>3</sup> )	391,6

Entrada de dados

**Anexo IV – Análise comparativa de modelo de Módulo de Resiliência – Composto x Granular**

CENÁRIO	MATERIAL DO SUBLASTRO E CONDIÇÃO DE SATURAÇÃO	MR Camada Subleito - modelo arenoso (Mpa)	MR Camada Subleito - modelo composto (Mpa)
1	Areia com cascalho - Saturado	39,76	45,84
2	Areia com cascalho - Umidade ótima	235,45	410,93
3	Solo-cimento - Saturado	38,47	43,95
4	Solo-cimento - Umidade ótima	230,02	379,01
5	Solo-emulsão - Saturado	39,11	44,91
6	Solo-emulsão - Umidade ótima	234,38	404,34
7	CBUQ - Saturado	38,05	43,35
8	CBUQ - Umidade ótima	221,51	306,42

**Dados de Caracterização física e mecânica para modelo MR composto**

Caracterização solo	Umidade acima da ótima			Umidade ótima				
	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	k1	k2	k3	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	k1	k2	k3
Areia siltosa: (A-2-4); MCT - NA'	1907	24,966	-0,226	0,014	1935	146,727	-0,745	0,419

Anexo V – Composições de Preços Unitários – SICRO/DNIT

**CGCIT**

**DNIT**

**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

Produção da equipe 841,00 m<sup>2</sup>

4011209 Regularização do subleito

jul/20

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9571 Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,76	0,24			
E9518 Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,52	0,48			
E9524 Motoniveladora - 93 kW	1,00000	0,55	0,45			
E9762 Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,72	0,28			
E9685 Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	1,00	0,00			
E9577 Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,52	0,48			
<b>Custo horário total de equipamentos</b>						
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total		
P9824 Servente	1,00000	h				
			Custo horário total de mão de obra			
			Custo horário total de execução			
			Custo unitário de execução			
			Custo do FIC			
			Custo do FIT			
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário		
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo unitário total de material	Custo Unitário		
			Custo total de atividades auxiliares			
			Subtotal			
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
			Custo unitário total de tempo fixo			
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT	RP	P	Custo Unitário
			LN			
			Custo unitário total de transporte			
			Custo unitário direto total			



## SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Custo Unitário de Referência

jul/20

Produção da equipe 249,00 tkm

5914359 Transporte com caminhão basculante de 10 m³ - rodovia em leito natural

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário	Custo
		Operativa	Improdutiva		
E9579 Caminhão basculante com capacidade de 10 m³ - 188 kW	1,00000	1,00	0,00		
Custo horário total de equipamentos					
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total	
Custo horário total de mão de obra					-
Custo horário total de execução					-
Custo unitário de execução					-
Custo do FIC					-
Custo do FIT					-
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário	
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo unitário total de material	Custo Unitário	Custo Unitário
Custo total de atividades auxiliares					
Subtotal					
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
Custo unitário total de tempo fixo					
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT	RP	Custo Unitário
Custo unitário total de transporte					-

**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

jul/20

Produção da equipe

216,26 m³

Valores em reais (R\$)

4011227 Sub-base de solo estabilizado granulometricamente sem mistura com material de jazida

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9571 Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	2,00000	0,60	0,40			
E9518 Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,66	0,34			
E9524 Motoniveladora - 93 kW	1,00000	0,99	0,01			
E9762 Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,93	0,07			
E9685 Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	1,00	0,00			
E9577 Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,66	0,34			
<b>Custo horário total de equipamentos</b>						
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário	Custo Horário Total	
P9824 Servente	1,00000	h				
<b>Custo horário total de mão de obra</b>						
<b>Custo horário total de execução</b>						
<b>Custo unitário de execução</b>						
<b>Custo do FIC</b>						
<b>Custo do FIT</b>						
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário		
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo unitário total de material	Custo Unitário		
4016096 Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	1,10000	m³				
<b>Custo total de atividades auxiliares</b>						
<b>Subtotal</b>						
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
4016096 Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m³	5914354	2,06250	t			
<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>						
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT	RP	P	Custo Unitário
4016096 Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m³	2,06250	tkm	5914359	5914374	5914389	
<b>Custo unitário total de transporte</b>						
<b>Custo unitário direto total</b>						

**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

jul/20

Produção da equipe

37,92 m³

3009091 Lançamento de lastro, 10 cm de altura, primeiro levante, descarga de pedra britada de caminhões **Valores em reais (R\$)**

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9583 Distribuidor de agregados rebocável com capacidade de 1,9 m³	1,00000	1,00	0,00			
E9682 Rolo compactador liso autopropelido vibratório de 1,6 t - 18 kW	1,00000	0,41	0,59			
<b>Custo horário total de equipamentos</b>						
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total		
P9859 Trabalhador de via	6,00000	h				
<b>Custo horário total de mão de obra</b>						
<b>Custo horário total de execução</b>						
<b>Custo unitário de execução</b>						
<b>Custo do FIC</b>						
<b>Custo do FIT</b>						
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário		
M2356 Brita padrão para lastro ferroviário	1,15000	m³				
<b>Custo unitário total de material</b>						
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário		
<b>Custo total de atividades auxiliares</b>						
<b>Subtotal</b>						
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
M2356 Brita padrão para lastro ferroviário - Vagão Hopper 75 t	5909137	1,72500	t			
<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>						
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT	RP	P	FE
M2356 Brita padrão para lastro ferroviário - Vagão Hopper 75 t	tkm	1,725				5909138
<b>Custo unitário total de transporte</b>						
<b>Custo unitário direto total</b>						

## SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Custo Unitário de Referência

Produção da equipe 4,15000 km

jul/20

2909148 Regularização do lastro com reguladora de lastro

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário	Custo
		Operativa	Improdutiva		
E9712 Reguladora e distribuidora de lastro - 300 kW	1,00000	1,00	0,00		
Custo horário total de equipamentos					
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total	
P9859 Trabalhador de via	2,00000	h			
Custo horário total de mão de obra					-
Custo horário total de execução					-
Custo unitário de execução					-
Custo do FIC					-
Custo do FIT					-
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário	
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo unitário total de material	Custo Unitário	
Custo total de atividades auxiliares					
Subtotal					
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
Custo unitário total de tempo fixo					
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	LN	RP	P
Custo unitário total de transporte					
Custo unitário direto total					-
					-





**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

Produção da equipe 0,14900 km

jul/20

3009133 Pré-alinhamento mecanizado da grade

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário	Custo
		Operativa	Improdutiva		
E9051 Máquina levantadora e puxadora de via - 7,4 kW	1,00000	1,00	0,00		
Custo horário total de equipamentos					
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total	
P9859 Trabalhador de via	3,00000	h			
Custo horário total de mão de obra					-
Custo horário total de execução					-
Custo unitário de execução					-
Custo do FIC					-
Custo do FIT					-
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário	
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo unitário total de material	Custo Unitário	
Custo total de atividades auxiliares					
Subtotal					
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
Custo unitário total de tempo fixo					
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT	RP	P
Custo unitário total de transporte					



## SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Custo Unitário de Referência

Produção da equipe 0,31125 km

jul/20

2909150 Nivelamento contínuo com socadora automática de linha, terceiro levante de 15 cm - duas passadas Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9710 Socadora automática de linha - 253 kW	1,00000	1,00	0,00	Custo horário total de equipamentos		
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total		
P9859 Trabalhador de via	2,00000	h		Custo horário total de mão de obra		
				Custo horário total de execução		
				Custo unitário de execução		
				Custo do FIC		
				Custo do FIT		
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário		
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo unitário total de material	Custo Unitário		
			Custo total de atividades auxiliares	Subtotal		
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
				Custo unitário total de tempo fixo		
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	LN	RP	P	Custo Unitário
						Custo Unitário
						Custo unitário total de transporte
						Custo unitário direto total
						-
						-

**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

jul/20

Produção da equipe

146,26 m³

Valores em reais (R\$)

4011300 Sub-base de solo melhorado com 4% de cimento e mistura na pista com material de jazida

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9571 Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,73	0,27			
E9518 Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,45	0,55			
E9524 Motoniveladora - 93 kW	1,00000	1,00	0,00			
E9762 Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,63	0,37			
E9685 Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	0,64	0,36			
E9577 Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,45	0,55			
<b>Custo horário total de equipamentos</b>						
<b>B - MÃO DE OBRA</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Horário</b>	<b>Custo Horário Total</b>		
P9824 Servente	6,00000	h				
				<b>Custo horário total de mão de obra</b>		
				<b>Custo horário total de execução</b>		
				<b>Custo unitário de execução</b>		
				<b>Custo do FIC</b>		
				<b>Custo do FIT</b>		
<b>C - MATERIAL</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Preço Unitário</b>	<b>Custo Unitário</b>		
M0424 Cimento Portland CP II - 32	82,52000	kg				
				<b>Custo unitário total de material</b>		
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário</b>	<b>Custo Unitário</b>		
4016096 Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	1,05626	m³				
				<b>Custo total de atividades auxiliares</b>		
				<b>Subtotal</b>		
<b>E - TEMPO FIXO</b>	<b>Código</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Custo Unitário</b>	<b>Custo Unitário</b>	
M0424 Cimento Portland CP II - 32 - Caminhão carroceria 15 t	5914655	0,08252	t			
4016096 Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m³	5914354	1,98049	t			
				<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>		
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>DMT</b>	<b>RP</b>	<b>P</b>	<b>Custo Unitário</b>
M0424 Cimento Portland CP II - 32 - Caminhão carroceria 15 t	0,08252	tkm	5914449	5914464	5914479	
4016096 Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m³	1,98049	tkm	5914359	5914374	5914389	
				<b>Custo unitário total de transporte</b>		
				<b>Custo unitário direto total</b>		

**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

jul/20

Produção da equipe 146,26 m³

4011300 - Adaptado Sub-base de solo melhorado com 4% de emulsão asfáltica e mistura na pista com material de jazida **Valores em reais (R\$)****A - EQUIPAMENTOS**

	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9571	1,00000	0,73	0,27			
E9518	1,00000	0,45	0,55			
E9524	1,00000	1,00	0,00			
E9762	1,00000	0,63	0,37			
E9685	1,00000	0,64	0,36			
E9577	1,00000	0,45	0,55			
						<b>Custo horário total de equipamentos</b>

**B - MÃO DE OBRA**

	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total
P9824	6,00000	h		
				<b>Custo horário total de mão de obra</b>

				<b>Custo horário total de execução</b>
				<b>Custo unitário de execução</b>
				<b>Custo do FIC</b>
				<b>Custo do FIT</b>
				<b>Custo Unitário</b>

**C - MATERIAL**

	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário
M1947	61,89000	kg		
				<b>Custo unitário total de material</b>

**D - ATIVIDADES AUXILIARES**

	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
4016096	1,05626	m³		
				<b>Custo total de atividades auxiliares</b>

	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
M1947	5914655	0,06189	t		
4016096	5914354	1,98049	t		
					<b>Subtotal</b>

	Quantidade	Unidade	DMT	RP	P	Custo Unitário
						<b>Custo unitário total de tempo fixo</b>

**F - MOMENTO DE TRANSPORTE**

	Quantidade	Unidade	LN	RP	P	Custo Unitário
M1947	0,06189	tkm	5914479	5914464	5914479	
4016096	1,98049	tkm	5914359	5914374	5914389	
						<b>Custo unitário total de transporte</b>
						<b>Custo unitário direto total</b>



**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

jul/20

Produção da equipe 1.500,00 m<sup>2</sup>

4011353 Pintura de ligação

Valores em reais (R\$)

	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
<b>A - EQUIPAMENTOS</b>						
E9509 Caminhão tanque distribuidor de asfalto com capacidade de 6.000 l - 7 kW/136 kW	1,00000	1,00	0,00			
E9558 Tanque de estocagem de asfalto com capacidade de 30.000 l	2,00000	1,00	0,00			
E9577 Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,47	0,53			
E9544 Vassoura mecânica rebocável	1,00000	0,47	0,53			
						<b>Custo horário total de equipamentos</b>
<b>B - MÃO DE OBRA</b>						
P9824 Servente	2,00000					<b>Custo Horário Total</b>
						<b>Custo horário total de mão de obra</b>
						<b>Custo horário total de execução</b>
						<b>Custo unitário de execução</b>
						<b>Custo do FIC</b>
						<b>Custo do FIT</b>
						<b>Custo Unitário</b>
<b>C - MATERIAL</b>						
M1946 Emulsão asfáltica RR-1C	0,00045					<b>Custo Unitário</b>
						<b>Custo unitário total de material</b>
						<b>Custo Unitário</b>
<b>D - ATIVIDADES AUXILIARES</b>						
						<b>Custo total de atividades auxiliares</b>
						<b>Subtotal</b>
<b>E - TEMPO FIXO</b>						
						<b>Custo Unitário</b>
						<b>Custo Unitário total de tempo fixo</b>
						<b>Custo Unitário</b>
<b>F - MOMENTO DE TRANSPORTE</b>						
						<b>Custo Unitário</b>
						<b>Custo unitário total de transporte</b>
						<b>Custo unitário direto total</b>

**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

Produção da equipe 83,00 t

jul/20

Valores em reais (R\$)

4011462 Concreto asfáltico - faixa C - areia extraída, brita produzida

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9762 Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,59	0,41			
E9530 Rolo compactador liso autopropelido vibratório de 11 t - 97 kW	1,00000	0,51	0,49			
E9545 Vibrocabadora de asfalto sobre esteiras - 82 kW	1,00000	0,89	0,11			
Custo horário total de equipamentos						
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total		
P9824 Servente	8,00000	h				
			Custo horário total de mão de obra			-
			Custo horário total de execução			-
			Custo unitário de execução			-
			Custo do FIC			-
			Custo do FIT			-
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário		
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário		
6416077 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia extraída e brita produzida	1,02000	t				
			Custo unitário total de material			
			Custo Unitário			
			Custo total de atividades auxiliares			
			Subtotal			
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
6416077 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia extraída e brita produzida - Caminhão basculante 10 m³	5914649	1,02000	t			
			Custo unitário total de tempo fixo			
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT	RP	P	Custo Unitário
6416077 Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia extraída e brita produzida - Caminhão basculante 10 m³	1,02000	tkm	5914359	5914374	5914389	
			Custo unitário total de transporte			
			Custo unitário direto total			
						-
						-



### SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Custo Unitário de Referência  
CPU 03 Fresagem de trilho

jul/20

Produção da equipe 0,84 km

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS		Utilização		Custo Horário		Custo
	Quantidade	Operativa	Improdutiva	Produtiva	Improdutiva	Horário Total
INS-04	Fresadora de trilho - 118 KW	1,00000	1,00	0,00		
Custo horário total de equipamentos						
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total	
P9859	Trabalhador de via	1,00000	h			
Custo horário total de mão de obra						
Custo horário total de execução						
Custo unitário de execução 0,00						
Custo do FIC -						
Custo do FIT -						
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário	
Custo unitário total de material						
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
Custo total de atividades auxiliares						
Subtotal						
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
Custo unitário total de tempo fixo						
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade	Unidade	LN	RP	DMT
Custo unitário total de transporte						
Custo unitário direto total 0,00						

## SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO

Custo Unitário de Referência

Desguarnecimento do lastro

jul/20

Produção da equipe 0,10000 km

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário	Custo
		Operativa	Improdutiva		
INS-05 Desguarnecedora de lastro - 300 kW	1,00000	1,00			
				Custo horário total de equipamentos	
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total	
P9859 Trabalhador de via	2,00000	h			
			Custo horário total de mão de obra		
			Custo horário total de execução		
			Custo unitário de execução		
			Custo do FIC		-
			Custo do FIT		-
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário	
			Custo unitário total de material		
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário	
			Custo total de atividades auxiliares		
			Subtotal		
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
				Custo unitário total de tempo fixo	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT	RP	P
			LN		
			Custo unitário total de transporte		
			Custo unitário direto total		-

**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

jul/20

Produção da equipe

0,08962 km

2809221 - Adaptado Demolição de via, bitola larga, 1.667 dormentes de concreto/km, trilho TR 68, barra com 12 m de comprimento, com

Valores em reais (R\$)

**A - EQUIPAMENTOS**

	Quantidade	Utilização		Custo Horário	Custo
		Operativa	Improdutiva		
E9511	1,00000	0,76	0,24		Horário Total
E9735	1,00000	1,00	0,00		
E9733	1,00000	1,00	0,00		

Custo horário total de equipamentos

**B - MÃO DE OBRA**

	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total
P9859	20,00000	h		

Trabalhador de via

Custo horário total de mão de obra

-

Custo horário total de execução

-

Custo unitário de execução

-

Custo do FIC

-

Custo do FIT

-

Custo Unitário

**F - MOMENTO DE TRANSPORTE**

	Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário
			LN	RP	FE	
M3511	63,80232	tkm				5909121
M2356	1500	tkm				5909138
M2281	190,43808	tkm				5909129
M1606	135,12	tkm				5909117

Custo unitário total de transporte

-

Custo unitário direto total

-

**SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO**

Custo Unitário de Referência

jul/20

Produção da equipe

172,11 m³

5502857 Escavação, carga e transporte de material de 2ª categoria na distância de 3.000 m - caminho de serviço em leito natural com carregadeira e caminhão basculante de 14 m³

Valores em reais (R\$)

A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo	
E9667 Caminhão basculante com capacidade de 14 m³ - 188 kW	7,00000	0,91	0,09			
E9511 Carregadeira de pneus com capacidade de 3,3 m³ - 213 kW	1,00000	1,00	0,00			
E9565 Trator de esteiras com escarificador - 259 kW	1,00000	0,66	0,34			
E9541 Trator de esteiras com lâmina - 259 kW	1,00000	0,97	0,03			

Custo horário total de equipamentos

B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário	Custo Horário Total
P9824 Servente	1,00000	h		

Custo horário total de mão de obra

--	--	--	--	--

Custo horário total de execução

--	--	--	--	--

Custo unitário de execução

--	--	--	--	--

Custo do FIC

--	--	--	--	--

Custo do FIT

C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário	Custo Unitário

D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário

Custo unitário total de material

--	--	--	--	--

Custo Unitário

--	--	--	--	--

Custo total de atividades auxiliares

--	--	--	--	--

Subtotal

E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário

--	--	--	--	--	--

Custo unitário total de tempo fixo

F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT	RP	P	Custo Unitário

Custo unitário total de transporte

--	--	--	--	--	--	--

Custo unitário total de transporte

## Anexo VI – Inventários atualizados com a matriz energética do Brasil

Tabela 44 Inventários atualizados para a matriz energética do Brasil

N <sup>o</sup>	INVENTÁRIOS ORIGINAIS	SUBSTITUÍDO POR	OBSERVAÇÃO ESPECÍFICAS
1	Steel, low-alloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	Filipe - Steel, low-alloyed {BR}  market for   Cut-off, U	Inventário principal em análise
2	Bulk carrier, for dry goods {GLO}  bulk carrier production, for dry goods   Cut-off, U	Filipe - Bulk carrier, for dry goods {BR}  bulk carrier production, for dry goods   Cut-off, U	Ajuste da Eletricidade e Calor (outras energias, exceto gás natural)
3	Bulk carrier, for dry goods {GLO}  market for bulk carrier, for dry goods   Cut-off, U	Filipe - Bulk carrier, for dry goods {BR}  market for bulk carrier, for dry goods   Cut-off, U	Alterado para navio
4	Coke {GLO}  market for   Cut-off, U	Filipe - Coke {BR}  market for   Cut-off, U	Alterado o Coke e o transporte terrestre
5	Coke {RoW}  coking   Cut-off, U	Filipe - Coke {BR}  coking   Cut-off, U	Alterada Água Descarbonizada, e eletricidade.
6	Diesel, burned in building machine {GLO}  market for   Cut-off, U	Filipe - Diesel, burned in building machine {BR}  market for   Cut-off, U	Atualizado para Diesel BR
7	Diesel, burned in building machine {GLO}  processing   Cut-off, U	Filipe - Diesel, burned in building machine {BR}  processing   Cut-off, U	
8	Ferronickel {GLO}  ferronickel production   Cut-off, U	Filipe - Ferronickel {BR}  ferronickel production   Cut-off, U	Substituição do Diesel
9	Ferronickel {GLO}  market for ferronickel   Cut-off, U	Filipe - Ferronickel {BR}  market for ferronickel   Cut-off, U	Substituição do Diesel do transporte rodoviário
10	Hard coal {CN}  market for   Cut-off, U		Não alterado, o inventário se encontra num nível muito rudimentar. Além disso, não foi encontrado um par brasileiro para substituir.
11	Heat, district or industrial, natural gas {CH}  market for heat, district or industrial, natural gas   Cut-off, U	Filipe - Heat, district or industrial, natural gas {BR}  market for heat, district or industrial, natural gas   Cut-off, U	Atualizado para Gás BR
12	Heat, district or industrial, natural gas {GLO}  market group for   Cut-off, U	Filipe - Heat, district or industrial, natural gas {BR}  market group for   Cut-off, U	Atualizado para Gás BR

13	Heat, district or industrial, natural gas {RoW}  market for heat, district or industrial, natural gas   Cut-off, U	Filipe - Heat, district or industrial, natural gas {BR}  market for heat, district or industrial, natural gas   Cut-off, U	Atualizado para Gás BR
14	Heat, district or industrial, natural gas {RU}  heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical   Cut-off, U	Heat, district or industrial, natural gas {BR}  heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical   Cut-off, U	Atualizado para Gás BR, já existente no Simapro
15	Heat, district or industrial, other than natural gas {GLO}  market group for   Cut-off, U	Filipe - Heat, district or industrial, other than natural gas {BR}  market for   Cut-off, U	Considerando que o GLO se tratava do agrupamento de outros três inventários (RER, RoW, CA_QC), foi considerada a quantidade de 1 para o inventário Filipe - Heat, district or industrial, other than natural gas {BR}  market for   Cut-off, U
16	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW   Cut-off, U		Mantido
17	Heat, district or industrial, other than natural gas {RoW}  market for   Cut-off, U	Filipe - Heat, district or industrial, other than natural gas {BR}  market for   Cut-off, U	Atualizado para Gás BR
18	Heavy fuel oil {RoW}  market for   Cut-off, U	Filipe - Heavy fuel oil {RoW}  market for   Cut-off, U	Atualizado, considerando prioritariamente a matriz BR
19	Hot rolling, steel {Europe without Austria}  hot rolling, steel   Cut-off, U	Filipe - Hot rolling, steel {BR}  hot rolling, steel   Cut-off, U	Alterada a matriz elétrica
20	Hot rolling, steel {GLO}  market for   Cut-off, U	Filipe - Hot rolling, steel {BR}  hot rolling, steel   Cut-off, U	Alterada a matriz elétrica
21	Hot rolling, steel {RoW}  processing   Cut-off, U	Filipe - Hot rolling, steel {BR}  hot rolling, steel   Cut-off, U	Alterada a matriz elétrica
22	Iron ore concentrate {GLO}  market for iron ore concentrate   Cut-off, U	Filipe - Iron ore concentrate {BR}  market for iron ore concentrate   Cut-off, U	Atualizado
23	Iron ore concentrate {IN}  iron ore beneficiation   Cut-off, U	Filipe - Iron ore concentrate {BR}  iron ore beneficiation   Cut-off, U	Atualizado
24	Iron ore concentrate {RoW}  iron ore beneficiation   Cut-off, U	Filipe - Iron ore concentrate {BR}  iron ore beneficiation   Cut-off, U	Atualizado
25	Iron ore, crude ore, 46% Fe {GLO}  iron ore mine operation, 46% Fe   Cut-off, U	Filipe - Iron ore, crude ore, 46% Fe {BR}  iron ore mine operation, 46% Fe   Cut-off, U	Atualizado

26	Iron ore, crude ore, 63% Fe {IN}  iron ore mine operation, 63% Fe   Cut-off, U	Filipe - Iron ore, crude ore, 63% Fe {BR}  iron ore mine operation, 63% Fe   Cut-off, U	Atualizado
27	Iron pellet {IN}  iron pellet production   Cut-off, U	Filipe - Iron pellet {BR}  iron pellet production   Cut-off, U	Atualizado
28	Iron sinter {RER}  iron sinter production   Cut-off, U	Filipe - Iron sinter {BR}  iron sinter production   Cut-off, U	Atualizado
29	Iron sinter {RoW}  iron sinter production   Cut-off, U	Filipe - Iron sinter {BR}  iron sinter production   Cut-off, U	Atualizado
30	Lime, hydrated, loose weight {RoW}  market for lime, hydrated, loose weight   Cut-off, U	Filipe - Lime, hydrated, loose weight {BR}  market for lime, hydrated, loose weight   Cut-off, U	Atualizado
31	Lime, hydrated, loose weight {RoW}  production   Cut-off, U	Filipe - Lime, hydrated, loose weight {BR}  production   Cut-off, U	Atualizado
32	Natural gas, high pressure {RU}  market for natural gas, high pressure   Cut-off, U	Natural gas, high pressure {BR}  market for natural gas, high pressure   Cut-off, U	Atualizado para Gás BR
33	Natural gas, high pressure {RU}  natural gas production   Cut-off, U	Natural gas, high pressure {BR}  petroleum and natural gas production, off-shore   Cut-off, U	Atualizado para Gás BR
34	Pig iron {RER}  market for pig iron   Cut-off, U	Filipe - Pig iron {BR}  market for pig iron   Cut-off, U	Atualizado
35	Pig iron {RER}  pig iron production   Cut-off, U	Filipe - Pig iron {BR}  pig iron production   Cut-off, U	Atualizado
36	Pig iron {RoW}  market for pig iron   Cut-off, U	Filipe - Pig iron {BR}  market for pig iron   Cut-off, U	Atualizado
37	Pig iron {RoW}  pig iron production   Cut-off, U	Filipe - Pig iron {BR}  pig iron production   Cut-off, U	Atualizado
38	Quicklime, in pieces, loose {RoW}  market for quicklime, in pieces, loose   Cut-off, U	Filipe - Quicklime, in pieces, loose {BR}  market for quicklime, in pieces, loose   Cut-off, U	Atualizado
39	Quicklime, in pieces, loose {RoW}  production   Cut-off, U	Filipe - Quicklime, in pieces, loose {BR}  production   Cut-off, U	Atualizado

40	Recultivation, iron mine {GLO}  market for   Cut-off, U	Filipe - Recultivation, iron mine {BR}  market for   Cut-off, U	Atualizado
41	Sponge iron {GLO}  market for sponge iron   Cut-off, U	Filipe - Sponge iron {BR}  market for sponge iron   Cut-off, U	Atualizado
42	Sponge iron {IN}  sponge iron production   Cut-off, U	Filipe - Sponge iron {BR}  sponge iron production   Cut-off, U	Atualizado
43	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER}   production   Cut-off, U	Filipe - Steel, low-alloyed, hot rolled {BR}   production   Cut-off, U	Atualizado
44	Steel, low-alloyed {RER}  steel production, converter, low-alloyed   Cut-off, U	Filipe - Steel, low-alloyed {BR}  steel production, converter, low-alloyed   Cut-off, U	Atualizado
45	Steel, low-alloyed {RoW}  steel production, converter, low-alloyed   Cut-off, U	Filipe - Steel, low-alloyed {BR}  steel production, converter, low-alloyed   Cut-off, U	Atualizado
46	Steel, low-alloyed {RoW}  steel production, electric, low-alloyed   Cut-off, U	Filipe - Steel, low-alloyed {BR}  steel production, electric, low-alloyed   Cut-off, U	Atualizado
47	Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO}  market for   Cut-off, U	Filipe - Steel, low-alloyed, hot rolled {BR}  market for   Cut-off, U	Atualizado
48	Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW}  production   Cut-off, U	Filipe - Steel, low-alloyed, hot rolled {BR}   production   Cut-off, U	Atualizado
49	Steel, unalloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	Filipe - Steel, unalloyed {GLO}  market for   Cut-off, U	Atualizado, considerando prioritariamente a matriz BR
50	Steel, unalloyed {RoW}  steel production, converter, unalloyed   Cut-off, U	Filipe - Steel, unalloyed {BR}  steel production, converter, unalloyed   Cut-off, U	Atualizado
51	Transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods {GLO}  market for transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods   Cut-off, U	Filipe - Transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods {GLO}  market for transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods   Cut-off, U	Transporte intercontinental
52	Transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods {GLO}  transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods   Cut-off, U	Filipe - Transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods {BR}  transport, freight, sea, bulk carrier for dry goods   Cut-off, U	Atualizado, considerando prioritariamente a matriz BR
53	Transport, pipeline, long distance, natural gas {RU}  processing   Cut-off, U	Filipe - Transport, pipeline, long distance, natural gas {BR}  processing   Cut-off, U	Atualizado