

Análise do Desempenho Físico e Mecânico da Escória de Aciaria como Alternativa Sustentável a Rochas Naturais em Ferrovias de Carga Pesada

Guilherme Faria Souza Mussi de Andrade,
Maelckson Bruno Barros Gomes,
Antônio Carlos Rodrigues Guimarães,
Bruno Teixeira Lima

Resumo: Este estudo avaliou o desempenho físico e mecânico da escória de aciaria em comparação ao agregado de calcário para aplicação como material de lastro em ferrovias. A investigação incluiu ensaios triaxiais cíclicos em escala real, realizados sob diferentes razões de tensões principais, com foco nas deformações permanentes de longo prazo, comportamento resiliente e na quebra de partículas, quantificada pelo índice de quebra de lastro (BBI). Os resultados mostraram que a escória de aciaria apresentou desempenho técnico comparável — e, em alguns aspectos, superior ao calcário, especialmente no que se refere à menor degradação sob carregamentos severos, indicando potencial para redução na frequência de manutenção da via. Adicionalmente, simulações numéricas realizadas com o *software* SysTrain® confirmaram que a escória proporciona um comportamento tensão-deformação adequado às condições de linhas ferroviárias de carga pesada (32,5 t/eixo). A substituição parcial ou total de agregados naturais por escória de aciaria representa uma alternativa viável do ponto de vista técnico e ambiental. Trata-se de uma aplicação de alto impacto sustentável, pois permite o reaproveitamento de um resíduo industrial abundante e contribui para a conservação de recursos naturais não renováveis, como rochas britadas. Assim, o uso da escória de aciaria no lastro ferroviário alinha-se às diretrizes de infraestrutura mais resiliente, econômica e ambientalmente responsável.

Palavras-Chave: Lastro de calcário, Lastro de escória de aciaria, Linhas ferroviárias de carga pesada, Ensaios triaxiais cíclicos, Análises MEF

1 Abstract: This study evaluated the physical and mechanical performance of steel slag in
2 comparison to limestone aggregate for use as railway ballast material. Large-scale cyclic triaxial
3 tests were conducted under varying principal stress ratios to investigate long-term permanent
4 deformation, resilient behavior, and particle degradation, assessed through the Ballast Breakage
5 Index (BBI). Results indicated that steel slag performed similarly—or even superiorly—to
6 limestone, particularly showing lower particle degradation under higher stress ratios. This
7 suggests a reduced need for track maintenance when using slag. Numerical simulations using
8 SysTrain® (a finite element-based *software*) confirmed the adequacy of steel slag ballast under
9 heavy haul loading conditions (32.5 t/axle). The use of steel slag as ballast material presents a
10 technically viable and environmentally sustainable alternative, enabling the reuse of industrial
11 byproducts while preserving non-renewable natural aggregates. This aligns with global goals
12 of developing resilient, cost-effective, and sustainable railway infrastructure.

13 Keywords: Limestone ballast; Steel Slag ballast; Heavy haul raily track; Cyclic loading triaxial
14 tests; FEM analysis

15 **1. Introdução**

16 Diante das crescentes preocupações ambientais e do avanço das políticas de
17 sustentabilidade, destaca-se a importância de adotar práticas alinhadas ao conceito de economia
18 circular, sobretudo na Engenharia Civil. Nesse contexto, a reutilização de subprodutos
19 industriais em aplicações tecnológicas tem se mostrado uma estratégia promissora,
20 contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e a mitigação de impactos
21 ambientais associados à disposição de resíduos. Um exemplo relevante é a escória de aciaria,
22 subproduto gerado em grande escala em países com forte atividade siderúrgica, como China,
23 EUA, Brasil e membros da União Europeia (Jing *et al.*, 2020). A valorização desse material
24 como insumo técnico para diferentes finalidades tem sido incentivada por sua abundância e
25 pelas diretrizes que priorizam sua reutilização como alternativa às matérias-primas
26 convencionais.

27 A indústria siderúrgica tem apresentado um crescimento expressivo ao longo das últimas
28 décadas, impulsionada pela crescente demanda por aço em diversos setores da economia.
29 Globalmente, a produção de ferro e aço evoluiu de forma significativa, passando de cerca de 30
30 milhões de toneladas no início do século XX para mais de 1,3 bilhão de toneladas no final da
31 primeira década dos anos 2000 (Ferreira, 2010). No cenário brasileiro, o setor também possui
32 forte representatividade, com dezenas de usinas distribuídas em diferentes regiões do país. Em
33 2020, o Brasil produziu aproximadamente 31,4 milhões de toneladas de aço bruto, ocupando a
34 nona posição entre os maiores produtores mundiais, segundo dados do Instituto Aço Brasil
35 (IAB, 2022).

36 Entre as aplicações investigadas para o reaproveitamento da escória de aciaria, destaca-se
37 seu uso na infraestrutura de transportes, especialmente em obras rodoviárias. Diversos estudos
38 têm demonstrado o potencial técnico desse material tanto como agregado em camadas de base
39 e sub-base, quanto como componente de misturas asfálticas (Mathur *et al.*, 1999; Shen *et al.*,
40 2009; Behiry, 2013; Zumrawi e Khalill, 2015). Essas pesquisas têm avaliado aspectos
41 ambientais — como composição química e potencial de lixiviação — e parâmetros de
42 desempenho mecânico sob condições de carregamento compatíveis com o uso pretendido. Os
43 resultados, em geral, indicam que o agregado siderúrgico apresenta comportamento satisfatório,
44 reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável aos materiais convencionais
45 empregados em pavimentação.

46 Outra aplicação que tem despertado grande interesse é o uso da escória de aciaria na camada
47 de lastro ferroviário, especialmente considerando que o setor ferroviário é um dos maiores

48 consumidores mundiais de rocha britada, sendo essa amplamente utilizada na composição do
49 lastro (Li *et al.*, 2016). Apesar do crescente interesse do setor ferroviário, até meados da última
50 década os estudos disponíveis sobre seu desempenho mecânico sob condições reais de
51 carregamento ainda eram limitados. A maior parte das investigações iniciais concentrou-se em
52 aspectos ambientais, como a resistividade elétrica, ou em avaliações indiretas do
53 comportamento mecânico, baseadas em ensaios empíricos como os de Los Angeles e
54 MicroDeval (Morata e Saborido, 2016; Kuo e Lin, 2017; Paixão e Fortunato, 2021). Embora
55 alguns estudos mais recentes tenham avançado na análise do comportamento das escórias de
56 aciaria (Delgado *et al.*, 2019a; 2019b; 2021), destacando o comportamento do material sob
57 carregamentos cíclicos e os baixos índices de quebra de partículas observado, ainda há lacunas
58 importantes quanto à caracterização da resposta desse material em condições representativas
59 das solicitações impostas ao lastro ferroviário em operação.

60 As rochas naturais mais utilizadas como material lastro ferroviário em diversos países
61 incluem basalto, calcário, granito, gnaiss, dolomita, riolito e quartzito, conforme apontado por
62 Indraratna *et al.* (2011). Segundo Paixão *et al.* (2016), a aplicação desses materiais como lastro
63 representa uma das condições mais severas de solicitação, sobretudo quando submetidos a
64 carregamentos cíclicos intensos e prolongados. Dentre essas litologias, o calcário merece
65 destaque por apresentar características que frequentemente impõem restrições ao seu uso, como
66 a suscetibilidade à degradação causada pelas chuvas (Guo *et al.*, 2022) e à sua baixa resistência
67 à abrasão (Selig e Waters, 1994), fatores que comprometem sua capacidade de garantir a
68 estabilidade da via em longo prazo. Apesar dessas limitações, o calcário ainda é empregado,
69 principalmente em função dos menores custos de produção e da maior disponibilidade
70 (Raymond, 1985). A linha Lisboa-Algarve, em Portugal, por exemplo, adotou lastro de calcário
71 devido à escassez de materiais locais adequados, substituindo a camada original de granito de
72 30 cm de espessura por uma seção composta de 15 cm de granito e 15 cm de calcário (Paixão
73 *et al.*, 2011). Estudos mais recentes, como os de De Andrade *et al.* (2024 e 2025), demonstram
74 que o calcário pode apresentar comportamento estável sob carregamentos típicos de linhas
75 ferroviárias de carga pesada, especialmente quando submetidos a maiores níveis de
76 confinamento, o que destaca a importância de técnicas voltadas ao aumento do confinamento
77 da via

78 Uma das principais exigências relacionadas aos materiais de lastro é que não desenvolvam
79 deterioração significativa a longo prazo. A importância de materiais competentes torna-se ainda

80 mais relevante no contexto das ferrovias de carga pesada (*heavy-haul*), que operam com trens
81 cada vez mais longos e com cargas por eixos mais pesadas. De acordo com Delgado (2019a),
82 quatro linhas ferroviárias de carga pesada respondem por 82% da demanda total de transporte
83 ferroviário de carga no Brasil, com curva de distribuição granulométrica (PSD) enquadrada na
84 gradação padrão AREMA N. 24 (AREMA, 2020). Considerando os requisitos impostos a essas
85 linhas, é interessante estudar novos materiais e granulometrias para a camada de lastro e
86 comparar seu desempenho com o de rochas naturais tipicamente utilizadas, sob cargas cíclicas
87 elevadas e de longo prazo.

88 Neste estudo, foram realizados ensaios triaxiais cíclicos em amostras de lastro em escala
89 real, compostas por agregados de calcário e escória de aciaria, com o objetivo de avaliar a
90 viabilidade da utilização da escoria como material alternativo para a camada de lastro
91 ferroviário. Foram analisadas as deformações permanentes de longo prazo sob diferentes níveis
92 de razões de tensões principais (σ'_1/σ'_3), bem como o comportamento resiliente dos materiais.
93 A quebra de partículas resultante dos ensaios de deformação permanente (DP) foi quantificada
94 por meio do Índice de Quebra de Lastro (BBI) (Indraratna *et al.*, 2005). Por fim, foram
95 realizadas simulações numéricas no *software* SysTrain®, que se baseia no Método dos
96 Elementos Finitos (MEF), com o objetivo de analisar o comportamento tensão-deformação da
97 via para ambos os materiais de lastro, considerando carregamentos representativos da operação
98 de trens de carga pesada com 32,5 t/eixo

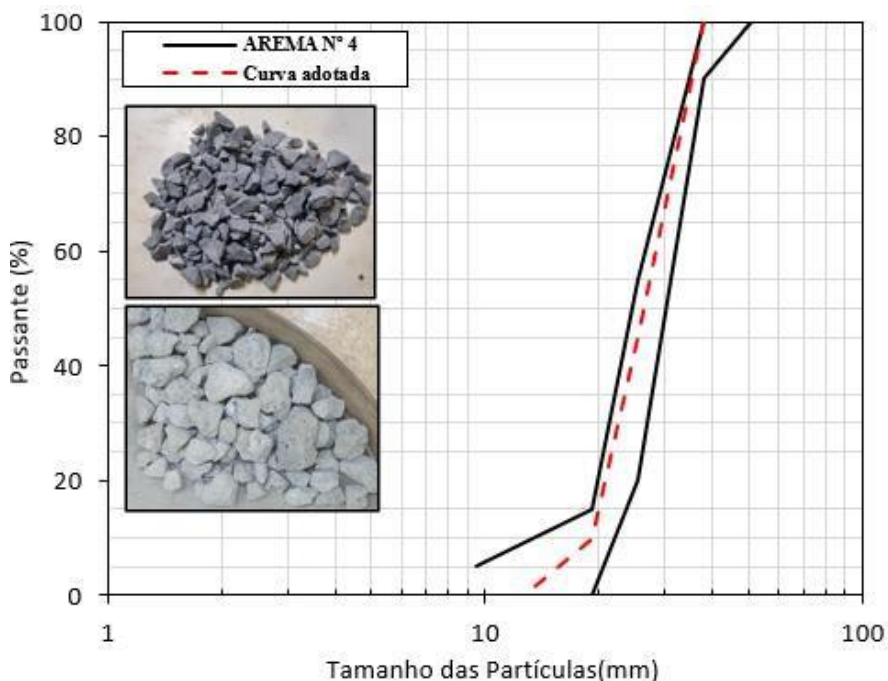
99

100 **2. Metodologia**

101 Uma ampla investigação laboratorial foi realizada com o objetivo de avaliar a viabilidade
102 do uso da escória de aciaria como material de lastro ferroviário, por meio da comparação de seu
103 comportamento com o de corpos de prova confeccionados com de agregados de calcário
104 britado. A investigação laboratorial incluiu ensaios de caracterização, deformação permanente
105 (DP) de longo prazo e módulo de resistência.

106 Os ensaios de caracterização foram realizados de acordo com as recomendações da norma
107 brasileira ABNT NBR 5564:2021 (ABNT, 2021). Por sua vez, os ensaios triaxiais de
108 deformação permanente e módulo de resiliência foram conduzidos de acordo com os
109 normativos do DNIT 179/2018-IE (DNIT, 2018a) e DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018b),
110 respectivamente. De maneira complementar, com vista a avaliar o desempenho de ambos os
111 materiais a longo prazo, os ensaios de DP foram conduzidos com 1 milhão de ciclos ($N=10^6$).

112 Os corpos de prova de lastro utilizados nesse estudo – tanto os de calcário quanto os de
113 escória de aciaria – foram confeccionados seguindo os mesmos procedimentos. A curva de
114 distribuição granulométrica de ambos os materiais, apresentada na Figura 1, enquadra-se nos
115 limites estabelecidos pela AREMA nº 4 (AREMA, 2020). O coeficiente de uniformidade (Cu)
116 e o coeficiente de curvatura (Cc) foram de 1,61 e 0,98 para o calcário, e de 1,53 e 0,95 para a
117 escória, respectivamente, classificando ambos os agregados como mal graduados.



118

119 Figura 1 – Curva de distribuição granulométrica dos corpos de prova de lastro

120

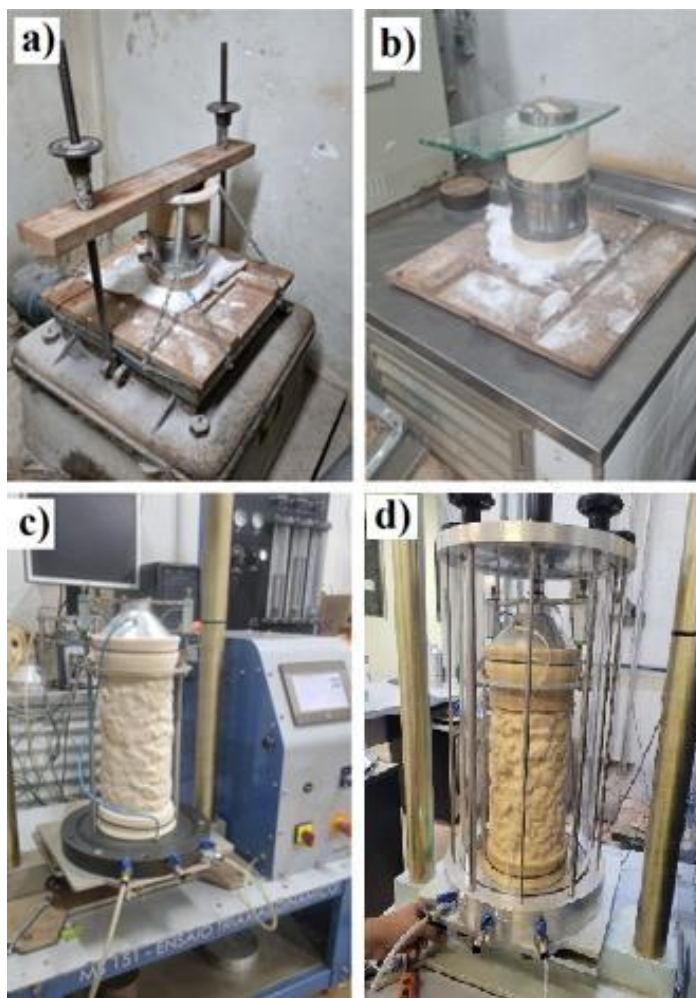
121 A escolha da faixa granulométrica AREMA Nº 4 foi motivada por dois fatores: por ser
122 uma graduação recomendada para linhas ferroviárias principais e por permitir a execução de
123 ensaios triaxiais em escala real. A viabilidade do ensaio sem escalonamento decorre da razão
124 diâmetro do corpo de prova (D) pelo diâmetro máximo de partícula ($d_{máx}$) atender ao critério
125 $D/d_{máx} \geq 4$, preconizado pela norma DNIT 179/2018-IE (DNIT, 2018a) e cuja aplicação para
126 lastros foi proposta por Gomes (2022). O aparato triaxial utilizado neste estudo permitiu a
127 realização de ensaios com corpos de prova com altura (H) de 300 mm e diâmetro (D) de 150
128 mm. Dessa forma, foi respeitada a relação $H/D = 2,00$, conforme recomendação de Bishop e
129 Green (1965), visando minimizar os efeitos de atrito nas extremidades.

130

131

O processo de moldagem dos corpos de prova e preparação do ensaio foi conduzido
pioneiramente por Cescon (2021), e consistiu das seguintes etapas: i) posicionar a membrana

132 de látex no interior de um molde tripartido; ii) compactar as partículas de lastro por vibração,
133 utilizando uma mesa vibratória; iii) realizar a compactação em quatro camadas de igual
134 espessura, aplicando um minuto de vibração por camada; iv) aplicar um ciclo final de vibração
135 com duração de dois minutos; v) ajustar manualmente o topo do corpo de prova, a fim de
136 otimizar a disposição das partículas; vi) nivelar a superfície superior do corpo de prova com
137 uma fina camada de gesso, alisada com uma placa de vidro; vii) aguardar a cura do gesso por
138 24 horas; viii) transferir o molde para o interior da câmara triaxial; ix) aplicar o vácuo e remover
139 o molde tripartido; e x) instalar os transdutores internos e montar a câmara triaxial. A Figura 2
140 ilustra os procedimentos descritos. O método de preparação foi considerado satisfatório, visto
141 que os corpos de prova apresentaram índices de vazios consistentes entre si e semelhantes aos
142 reportados por Indraratna e Salim (2003), Indraratna *et al.* (2007) e Anderson e Fair (2008) para
143 materiais de lastro mal graduados.
144



145

149 Para atenuar as possíveis imprecisões associadas ao uso de instrumentação externa, foram 150
 utilizados dispositivos de medição internos, posicionados no *top cap* e apoiados em um anel 151 rígido
 acoplado à base da célula triaxial. Essa abordagem foi adotada porque, em ensaios 152 cíclicos, a
 precisão na medição de pequenas deformações é essencial para a caracterização 153 adequada do
 comportamento do material. Dois LVDTs, instalados diametralmente opostos,
 154 foram empregados para fornecer medições de deformação mais precisas.

155

156 2.1 Configuração experimental dos ensaios de deformação permanente de longo prazo

157 A passagem de trens induz, além de tensões verticais, tensões horizontais cíclicas na camada 158
 de lastro. No entanto, nos ensaios de deformação permanente de longo prazo realizados, adotou 159 se
 a hipótese simplificadora de que apenas as tensões desviadoras variavam ciclicamente, 160 enquanto
 as pressões de confinamento eram mantidas constantes. As pressões confinantes 161 utilizadas
 variaram entre 40 kPa e 70 kPa. Essa magnitude está próxima das tensões horizontais 162 estimadas
 na região superior da camada de lastro, segundo Indraratna *et al.* (2011), e está dentro

163 da faixa realista de 10 a 70 kPa recomendada para esse tipo de aplicação (Indraratna et a., 2013).

164 A frequência de carregamento utilizada nos ensaios foi de 5 Hz, com aplicação senoidal, 165
 valor máximo permitido pelo equipamento. De acordo com Delgado *et al.* (2019a), essa 166 frequência
 é compatível com o carregamento gerado por vagões de carga pesada com distância 167 entre truques
 de 4 metros, operando a velocidades de até 80 km/h. Os ensaios de deformação 168 permanente foram
 conduzidos com três diferentes razões de tensões principais (σ'_1/σ'_3) para 169 cada material, até
 alcançarem de 1 milhão de ciclos de carregamento (N). A Tabela 1 resume o

170 programa experimental dos ensaios de deformação permanente de longo prazo.

171

172

Tabela 1. Programa experimental dos ensaios de deformação permanente

Ensaio	Material	e_0	N	σ_1/σ_3
DP1	Calcário	0,79	10^6	5,00
DP2	Calcário	0,78	10^6	6,00
DP3	Calcário	0,75	10^6	7,00
DP4	Escória de Aciaria	0,74	10^6	4,50
DP5	Escória de Aciaria	0,76	10^6	6,00
DP6	Escória de Aciaria	0,74	10^6	7,00

173

Nota: DP = Deformação Permanente; e_0 = Índice de vazios inicial.

175 **2.2 Configuração experimental dos ensaios de módulo de resiliência**

176 Os ensaios de módulo de resiliência (*MR*) foram conduzidos no mesmo equipamento triaxial
177 utilizado nos ensaios de deformação permanente, seguindo os procedimentos estabelecidos pela
178 norma DNIT 134/2018-ME (DNIT, 2018b). A frequência aplicada à tensão desviadora cíclica
179 foi de 1 Hz (60 ciclos por minuto), correspondente a um pulso de 0,1 segundo seguido por 0,9
180 segundo de repouso, mantendo-se a pressão de confinamento constante ao longo de cada
181 estágio. Avaliou-se o modelo destinado a descrever a variação do módulo resiliente dos
182 materiais em função da tensão desviadora cíclica (q_{cyc}), conforme expresso na equação a seguir:
183

$$184 \quad MR = K_1 q_{cyc}^{K_2} \quad (1)$$

185

186 onde: K_1 e K_2 , são parâmetros empíricos resilientes.

187

188 **2.3 Simulações Numéricas**

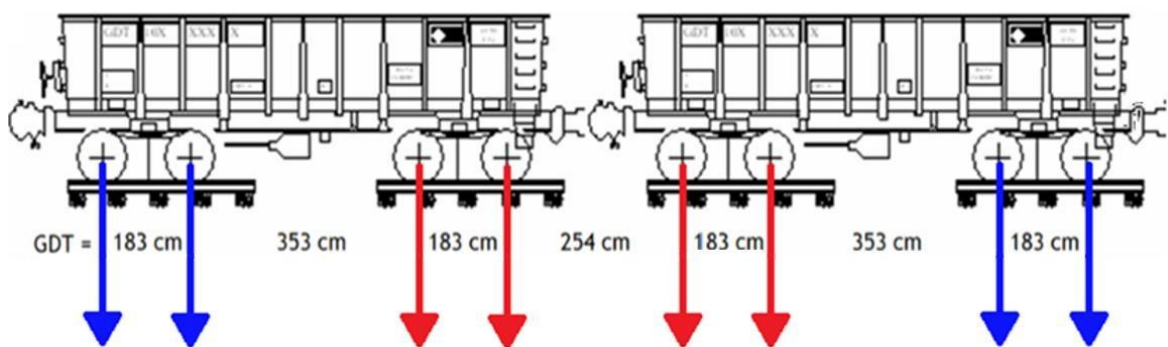
189 O comportamento de tensão-deformação foi avaliado por meio de simulações numéricas
190 realizadas com o *software* SysTrain® (versão 2.0), que foi desenvolvido por meio de uma
191 colaboração entre pesquisadores acadêmicos e profissionais do setor (Hussaini *et al.*, 2015).
192 Esse *software* baseia-se em elementos finitos e permite a modelagem dos componentes da
193 superestrutura (trilhos, dormentes e sistemas de fixação) e das camadas da subestrutura (lastro,
194 sublastro e subleito). Informações adicionais sobre discretização de malha, entrada de material,
195 esquemas de integração numérica e critérios de convergência podem ser encontradas em Silva
196 Filho (2018), que também detalha a validação do *software* usando dados de monitoramento em
197 escala real de sistemas ferroviários brasileiros.

198 Duas simulações foram realizadas para investigar o comportamento mecânico do pavimento
199 ferroviário sob uma condição de carregamento de 32,5 t/eixo: (i) Modelo 1 - carga posicionada
200 no meio do vão entre os dormentes, com lastro de calcário; e (ii) Modelo 2 - carga aplicada na
201 mesma posição, porém com lastro de escória de aciaria. Como o SysTrain® realiza apenas
202 simulações em regime estático, os efeitos dinâmicos foram incorporados indiretamente por
203 meio de uma carga equivalente, obtida com a aplicação de um coeficiente de amplificação
204 dinâmica de 1,4, estimado com base nas equações recomendadas pela AREMA (2020). Essa

205 representação estática corresponde as solicitações geradas por um vagão do tipo GDT, com peso
206 bruto total de 182 toneladas, estimado por meio de equações empíricas (Delgado *et al.*, 2019a).
207 Detalhes adicionais sobre as especificações do vagão podem ser consultados em Santos *et al.*
208 (2014).

209 De acordo com Spada (2003), a condição crítica de carregamento, em termos de
210 deslocamentos verticais em ferrovias de carga pesada, ocorre quando dois truques adjacentes
211 de vagões consecutivos estão posicionados sobre o mesmo segmento da via. Com base nessa
212 configuração, a carga aplicada nas simulações foi modelada como dois truques – ou seja, quatro
213 eixos – pertencentes a dois vagões gôndola do tipo GDT consecutivos, representando um
214 carregamento típico de 32,5 t/eixo (Figura 3). Foram considerados apenas os eixos internos,
215 destacados por setas vermelhas, por representarem a condição mais severa de carregamento
216 devido à sobreposição dos efeitos. Os eixos externos, indicados por setas azuis, foram
217 desconsiderados na análise por apresentarem influência desprezível sobre a resposta
218 tensão-deformação no segmento de via estudado. A carga foi aplicada sobre uma estrutura
219 composta por 27 dormentes igualmente espaçados, abrangendo 8 dormentes adicionais em cada
220 extremidade além do par de eixos principais. O eixo de referência da análise foi posicionado no
221 centro do modelo, entre os dormentes 14 e 15.

222



223

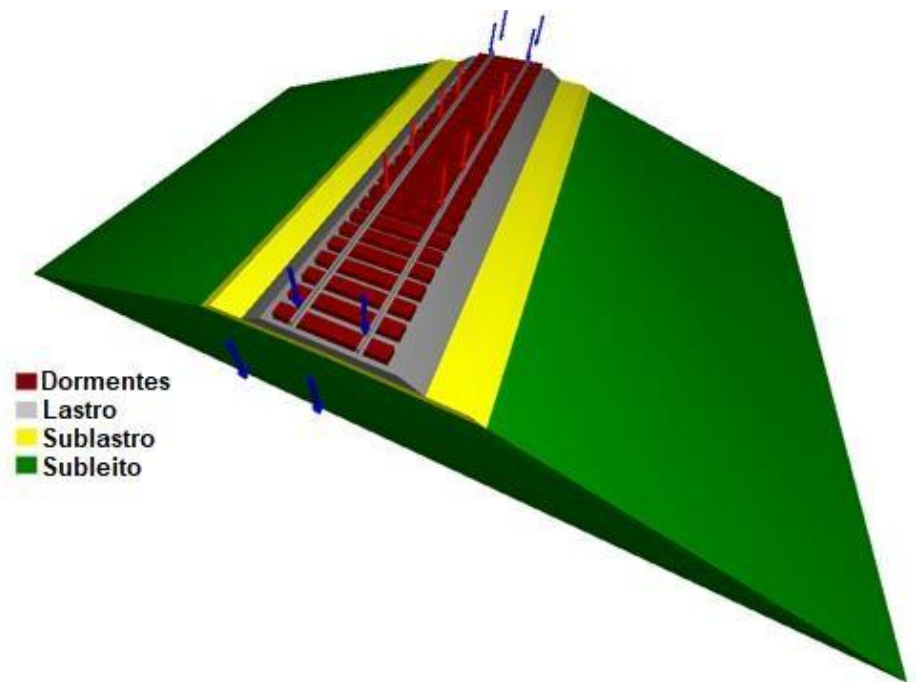
224 Figura 3 – Condição crítica de carregamento composta por dois vagões gôndola do tipo GDT. (adaptado de
225 Delgado *et al.*, 2021)

226

227 A Figura 4 apresenta a geometria tridimensional da via e a configuração de carga
228 adotada, representando os dois vagões gôndola do tipo GDT. A Tabela 2 complementa com os
229 dados geométricos de cada elemento do modelo. A geometria do pavimento ferroviário foi

230 mantida idêntica em ambas as simulações. O lastro de preenchimento no vão entre os dormentes
231 não foi considerado na modelagem, a fim de compensar a ausência de um elemento de junta

232 entre o lastro e os dormentes, seguindo uma abordagem semelhante à adotada por Fortunato 233
 (2005), Fortunato e Resende (2006) e Delgado *et al.* (2021).



234

235

236

237

Figura 4 – Modelo numérico 3D e geometria da via

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no SysTrain

Trilho	
Material	Aço
Tipo	TR57
Bitola	1,60 m
Dormente	
Material	Concreto tipo monobloco
Espaçamento	60 cm
Comprimento	2,80 m
Altura	22 cm
Largura Inferior	35 cm
Largura Superior	35 cm
Lastro	

Material	Lastro de Calcário
Altura	30 cm
Ombreira	30 cm
Declividade (H:V)	1,63
Declividade Fundo	3% (ambos os lados)
Encobrimento Dormente	não
Sublastro	
Material	Solo Tropical (Santos, 2022)
Altura	20 cm
Ombreira	0,95 m
Declividade (H:V)	1,75
Declividade Fundo	3%
Subleito	
Material	Solo
Altura	300 cm
Ombreira	0,00 m
Declividade (H:V)	3,00
Declividade Fundo	0%

238

239 Os parâmetros dos materiais adotados para cada camada do modelo numérico são 240 apresentados na Tabela 3. Os parâmetros empíricos de resiliência do agregado de calcário e da 241 escória de aciaria foram obtidos por meio de regressão linear, utilizando a Equação 1, com base 242 nos dados experimentais dos ensaios de módulo de resiliência. Para a camada de sublastro, 243 foram adotados os parâmetros propostos por Santos (2022), que utilizou o modelo composto

244 para caracterizar o comportamento do material. Os valores atribuídos aos trilhos, dormentes e 245 fixações correspondem a propriedades típicas de materiais de aço e concreto. No caso do 246 subleito, foram consideradas propriedades representativas de solos naturais comumente

247 utilizados em projetos de infraestrutura ferroviária no Brasil.

248

Tabela 3 - Parâmetros de comportamento mecânico adotados nas análises numéricas do Sysstrain®

Componentes ferroviários	Parâmetro	Calcário	Escória de Aciaria
Trilhos	Massa Específica (kg/m ³)		7850
	Módulo de Elasticidade (GPa)		210
	Coefficiente de Poisson		0,30
Dormentes	Massa Específica (kg/m ³)		2400
	Módulo de Elasticidade (GPa)		32
	Coefficiente de Poisson		0,30
Fixações	Rigidez Mola K_x (kN/m)		7000
	Rigidez Mola K_y (kN/m)		7000
	Rigidez Mola K_z (tração) (kN/m)		70000
	Rigidez Mola K_z (compressão) (kN/m)		70000
Lastro	Massa Específica (kg/m ³)	1480	1835
	Coefficiente K_1 (MPa)	878,62	740,36
	Coefficiente K_2 (MPa)		0,5142
		0,4191	
	σ_d mínima (MPa)	0,0207	0,0207

	σ_d máxima (MPa)	0,421	0,421
	Coefficiente de Poisson	0,30	0,30
Sublastro	Massa Específica (kg/m ³)		1830
	Coefficiente K'_1 (MPa)		1172,90
	Coefficiente K'_2 (MPa)		0,60 0,00
	Coefficiente K'_3 (MPa)		0,02
	σ_d mínima (MPa)		
	σ_3 mínima (MPa)		0,02
	σ_d máxima (MPa)		0,42
	σ_3 máxima (MPa)		0,14
	Coefficiente de Poisson		0,30
Subleito	Massa Específica (kg/m ³)		1800
	Coefficiente K'_1 (MPa)		100
	Coefficiente de Poisson		0,40

250

251 3 Desenvolvimento e Resultados

252 As propriedades físicas tanto do agregado de calcário quanto da escória de aciaria foram
 253 comparadas com os critérios estabelecidos pelas normas do Brasil (ABNT, 2021) e pelo manual
 254 da AREMA (2020), conforme apresentado na Tabela 4. Observa-se que o agregado de calcário
 255 atendeu integralmente aos limites estabelecidos por ambas as especificações, enquanto a escória
 256 de aciaria não atendeu aos critérios relativos à absorção de água e à porosidade aparente. Em
 257 contrapartida, a escória apresentou massa específica dos grãos significativamente superior à do
 258 lastro de calcário, e bem acima dos valores mínimos exigidos tanto pela AREMA (2020) quanto
 259 pela norma brasileira (ABNT, 2021), o que pode representar uma vantagem em termos de
 260 estabilidade estrutural da via, conforme apontado por Indraratna *et al.* (2011).

261

262 Tabela 4 – Propriedades dos materiais estudados em comparação com os critérios de especificação internacionais
 263 de lastro

264

265

Materiais Estudados	Especificações de Lastro
	EUA (AREMA, 2020)

266

Brasil (ABNT, 2021) e (AREMA 2010) Propriedades Índice

	Calcário	Escória de		Outras			Escória
		Aciaria	Calcário	Calcário	de litologias	Aciaria	
267	Forma Média das						
268	Partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica
269	Massa específica dos						
270		2,7	3,2	> 2,6	> 2,5	> 2,6	> 2,9 grãos (t/m ³)
271	Absorção d'água (%)	0,06	3,9	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0
	Torrões de Argila (%)	0,0	0,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
	Porosidade Aparente (%)	0,2	11,0	< 2,0	< 2,0	-	-
	Abrasão Los Angeles (%)	22	10,6	< 30	< 30	< 30	< 30
	Impacto Treton (%)	12,3	5,2	< 25	< 25	-	-

272

273

274 Com relação ao índice de abrasão de Los Angeles, a escória apresentou um valor inferior ao
 275 do agregado de calcário, embora ambos estejam em conformidade com os limites especificados.
 276 A maior absorção de água verificada na escória está associada à sua elevada porosidade. No
 277 Brasil, a norma (ABNT, 2021) estabelece um limite máximo de 2,0% para materiais utilizados
 278 como lastro, enquanto o manual da AREMA (2020) admite absorção de até 2% no caso de
 279 escórias siderúrgicas. A variabilidade observada nos valores de absorção está possivelmente
 280 relacionada ao tempo de resfriamento necessário para a maturação do material e aos
 281 procedimentos adotados para a sua estabilização química. Caso a demanda industrial pelo uso
 282 de escória como lastro ferroviário aumente, esse parâmetro poderá ser mais bem controlado,
 283 permitindo a produção de escórias menos porosas e mais adequadas ao uso técnico.

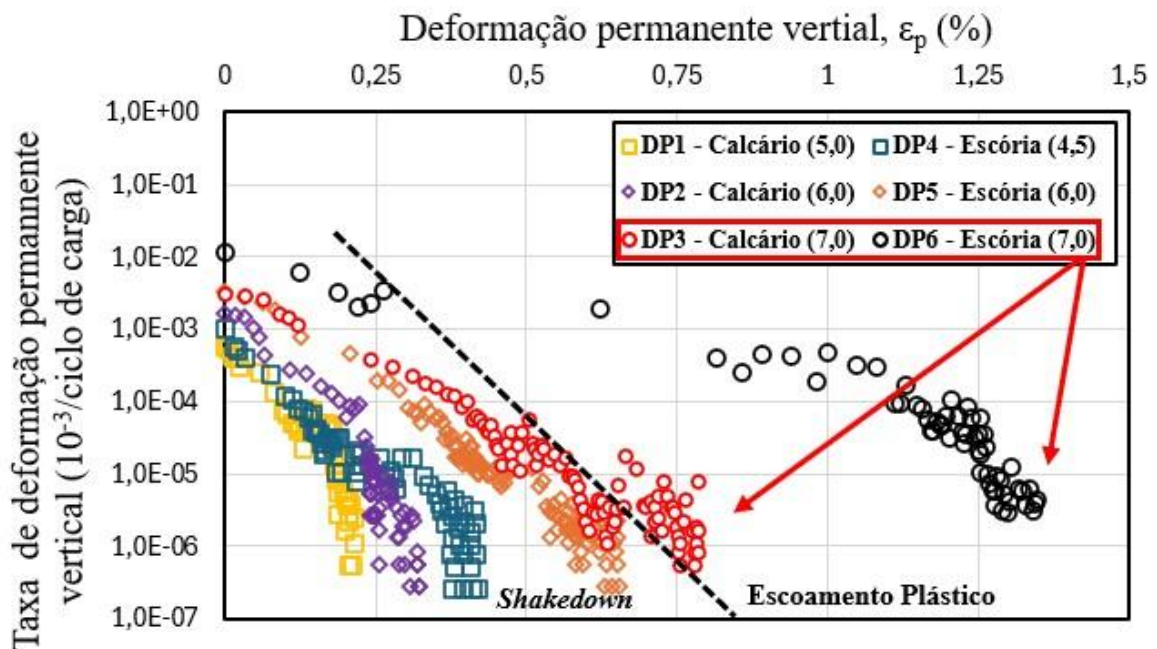
284

285 3.1 Deformação permanente

286 Conforme Guimarães (2009), um corpo sujeito a cargas repetidas gera após um ciclo de
 287 carregamento tensões residuais que são acumuladas, sendo conservadas mesmo ao cessar o
 288 carregamento. Durante as consecutivas aplicações de carga, estas tensões residuais interagem
 289 com as tensões induzidas pelos carregamentos posteriores, o que eleva a parcela da tensão
 290 residual, que tende a diminuir a taxa de deformação permanente. O acúmulo destas tensões
 291 residuais, a certo momento, equilibra-se com as tensões induzidas pelos sucessivos
 292 carregamentos, que fazem o material apresentar deslocamentos quase que predominantemente
 293 elásticos, estabelecendo a condição de *shakedown*.

294 Na interpretação dos resultados de deformação permanente, mais relevante do que os
295 valores absolutos de deformação é a análise da evolução da curva de deformação ao longo do
296 tempo. Isso porque os corpos de prova de lastro podem apresentar diferentes níveis de
297 compactação inicial, influenciando o comportamento observado. Como critério para avaliação da
298 estabilização da deformação, pode-se adotar a proposta de Dawson e Wellner (1999), segundo a
299 qual o regime de *shakedown* é atingido quando a razão de deformação vertical permanente
300 decresce até valores da ordem de 10^{-10} mm/ciclo de carga, indicando que o material não
301 continuará se deformando significativamente sob carregamentos subsequentes (Werkmeister *et*
302 *al.*, 2001).

303 A Figura 5 apresenta a avaliação do regime de *shakedown* com base nas curvas da razão
304 de deformação vertical permanente, segundo o critério de Dawson e Wellner, para ambos os
305 materiais analisados. Os ensaios triaxiais de deformação permanente de longo prazo revelaram
306 que, tanto sob níveis de tensão mais brandos (DP1 e DP4), quanto para níveis intermediários
307 (DP2 e DP5), o agregado de calcário e a escória de aciaria apresentaram comportamento plástico
308 semelhante, com clara tendência à estabilização da deformação permanente, característica típica
309 do regime de *shakedown*.



310

311

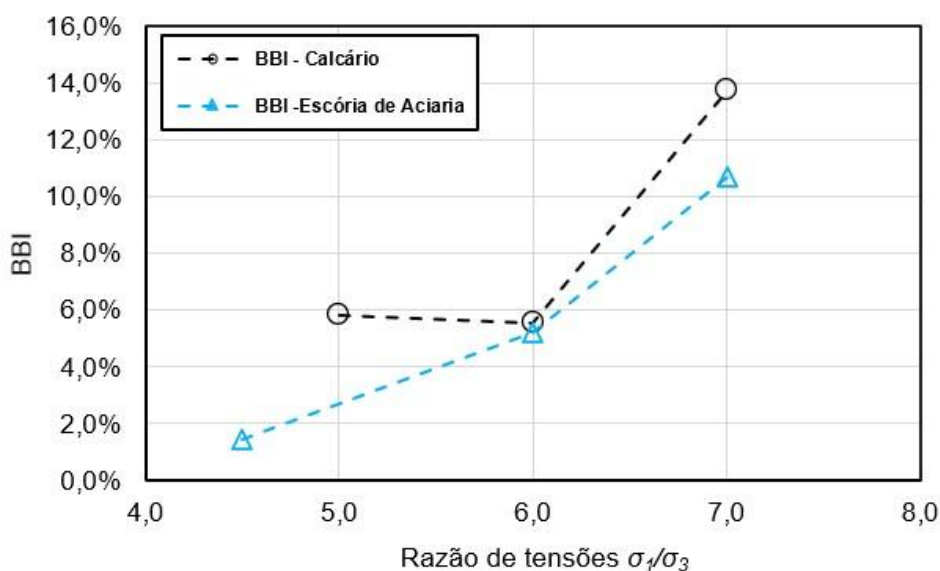
Figura 5. Comportamento plástico dos materiais: avaliação da ocorrência de *shakedown*

312

313 Por outro lado, sob níveis de tensão mais elevados (DP3 e DP6), os dois materiais não
314 exibiram tendência à estabilização das deformações permanentes. Nessas condições, observouse
315 uma leve inflexão nas curvas, seguida por um aumento contínuo das deformações, o que indica
316 que os materiais migraram para o regime de escoamento plástico.

317 Após os ensaios de deformação permanente, os corpos de prova foram novamente
318 peneirados com o objetivo de quantificar a degradação dos materiais, por meio dos índices de
319 quebra de lastro *BBI*, proposto por Indraratna *et al.* (2005). A Figura 6 apresenta os valores
320 obtidos desses índices em função da razão de tensões principais (σ_1/σ_3), para ambos os materiais
321 avaliados.

322



323

324

Figure 6. Resultados dos índices de quebra

325

326 Em termos de quebra de partículas, a escória de aciaria apresentou desempenho superior
327 ao do agregado de calcário, sugerindo uma menor propensão à degradação por carregamentos
328 repetidos. Esse comportamento indica um potencial benéfico técnico e econômico, uma vez que
329 materiais mais resistentes à degradação tendem a demandar menos intervenções de manutenção
330 na via, reduzindo interrupções operacionais e custos associados.

331

332

333

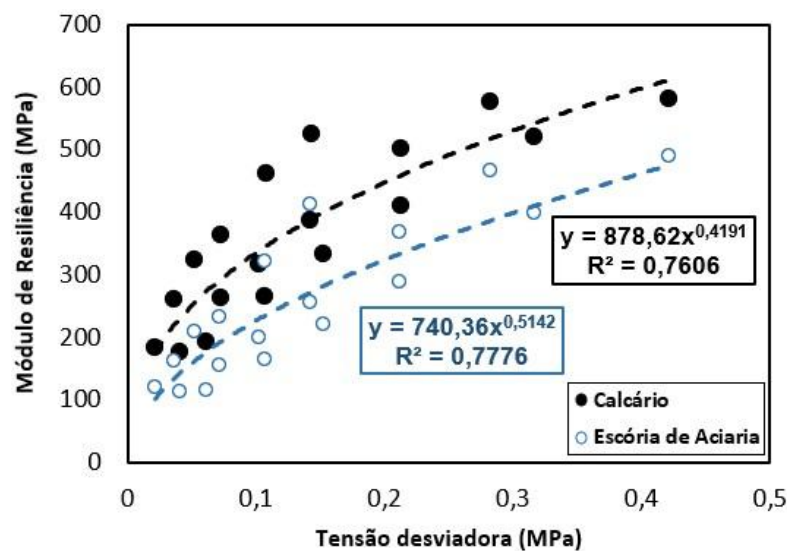
334

Observou-se que o aumento da razão de tensões principais resultou em intensificação da
degradação de partículas, refletindo-se em incrementos progressivos de *BBI*. Esse
comportamento também foi reportado por diversos autores (Indraratna *et al.*, 2000; Aursudkij *et al.*,
et al., 2009; Al-Saoudi e Hassan, 2014; Delgado *et al.*, 2019a). Verificou-se que, enquanto os

335 corpos de prova permaneceram no regime de *shakedown*, a evolução dos índices de quebra foi
336 limitada, principalmente para o agregado de calcário. No entanto, ao se atingir uma razão de
337 tensões de 7,0, associada ao regime de escoamento plástico, os índices de quebra aumentaram
338 de forma expressiva, caracterizada pelo gradiente da curva que aumenta após $\sigma_1/\sigma_3 > 6,0$.
339

340 3.2 Módulo de Resiliência

341 O módulo de resiliência (*MR*) é amplamente reconhecido como um parâmetro
342 fundamental para caracterizar a resposta elástica de materiais granulares e solos submetidos a
343 carregamentos repetidos. A Figura 7 apresenta os resultados dos ensaios de módulo de resiliência
344 para ambos os materiais estudados, em função da tensão desviadora cíclica, incluindo os
345 parâmetros empíricos que melhor se ajustaram ao modelo de lei de potência. Observa-se que,
346 em todas as trajetórias de tensão aplicadas, a escória de aciaria apresentou comportamento
347 similar ao agregado de calcário, porém, ligeiramente menos rígida. Os valores do *MR* obtidos
348 para o calcário variaram entre 175 e 581 MPa, enquanto para a escória de aciaria variaram entre
349 113 e 489 MPa
350



351

352 Figure 7. Módulo de resiliência do agregado de calcário e da escória de aciaria em função da variação da tensão
353 desviadora

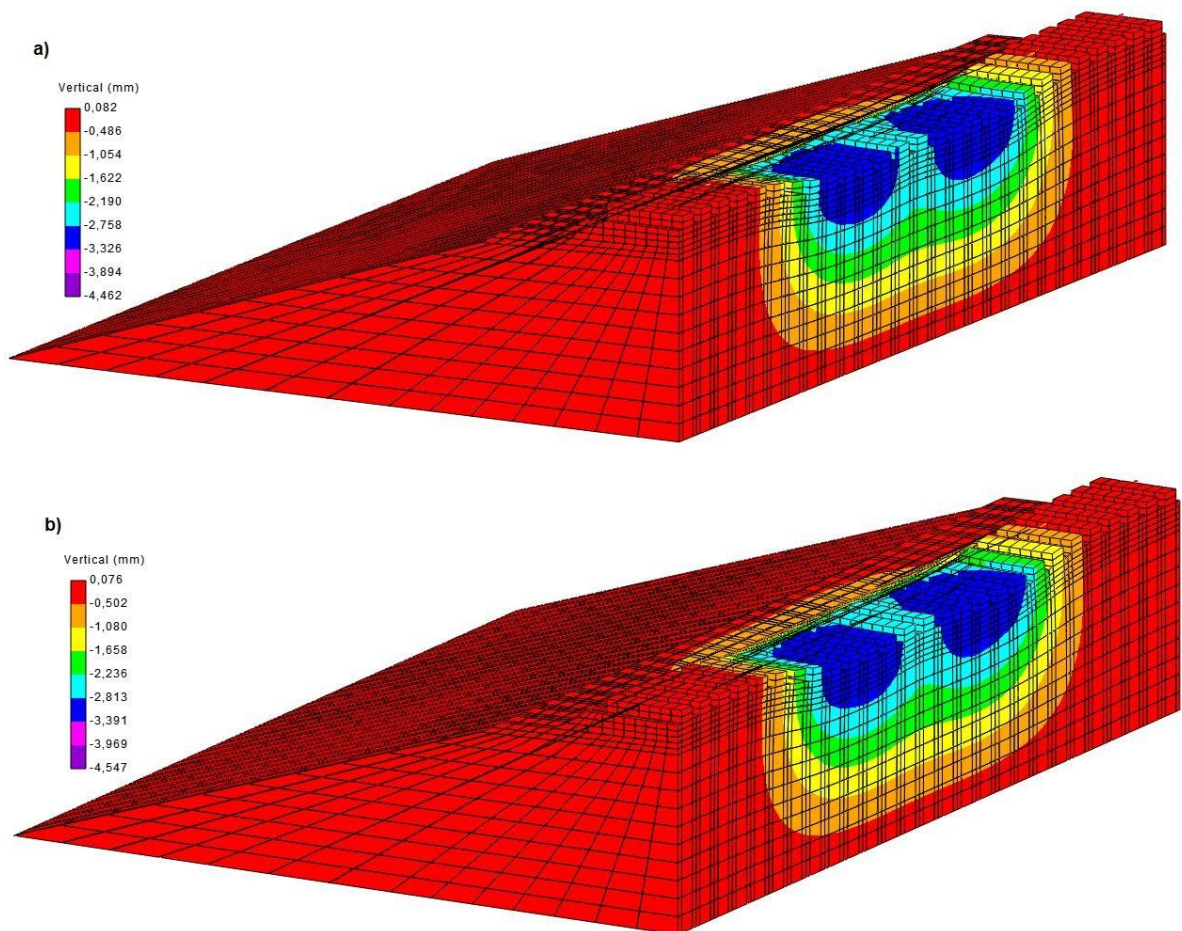
354

355 3.3 Simulações Numéricas

356 Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos nas simulações realizadas para o modelo
357 de carga de 32,5 t/eixo, com ênfase na zona crítica correspondente a dois truques de dois vagões
358 consecutivos.

359 A Figura 8 apresenta a malha deformada obtida nas simulações numéricas, destacando os
360 deslocamentos verticais induzidos na estrutura da via férrea. Os deslocamentos descendentes
361 são representados por valores negativos. Observa-se que os deslocamentos verticais máximos
362 ocorreram nas regiões correspondentes aos pontos de aplicação de carga.

363



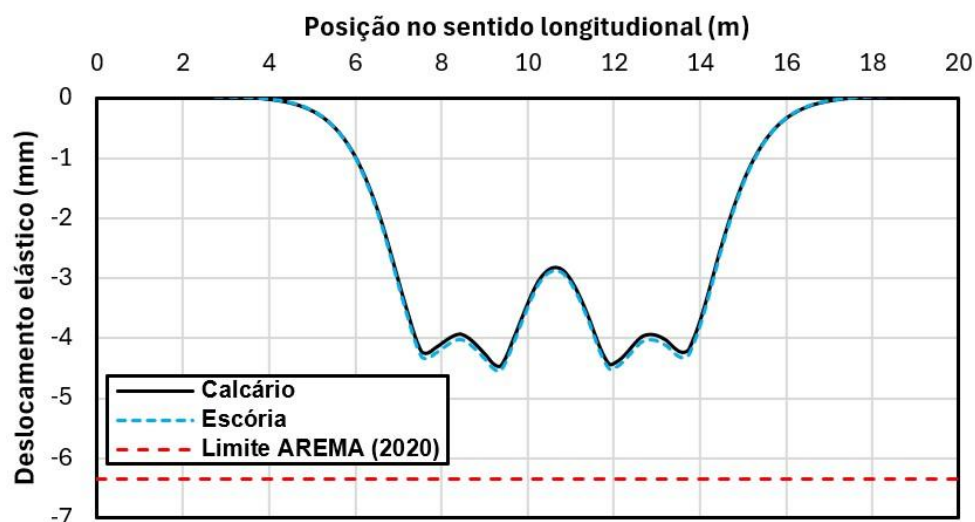
364

365 Figura 8 - Deslocamentos verticais observados na estrutura da via ferroviária sob carregamento de 32.5 t/eixo: a)
366 lastro de calcário; b) lastro de escória de aciaria

367

368 A Figura 9 ilustra o perfil dos deslocamentos verticais máximos ao longo da direção
369 longitudinal do trilho. Os valores obtidos para o agregado de calcário e para a escória de aciaria
370 foram bastante semelhantes, embora ligeiramente superiores no caso da escória. O pico de

371 deslocamento vertical registrado para o calcário foi de aproximadamente 4,46 mm, enquanto
372 para a escória foi de aproximadamente 4,55 mm, ambos inferiores ao limite de 6,35 mm
373 recomendado pelo manual AREMA (2020). O comportamento semelhante observado pode ser
374 atribuído à equivalência dos módulos de resiliência obtidos para os dois materiais nos ensaios
375 de laboratório. No entanto, a leve diferença nos deslocamentos verticais pode estar relacionada
376 à menor rigidez e à maior massa específica da escória de aciaria, em comparação ao agregado
377 de calcário.
378



370

371

Figura 9 – Perfil de deslocamento vertical do trilho ao longo da direção longitudinal

372

373 Embora essa condição de carga representasse a condição mais crítica em termos de 374 deslocamentos verticais, ela não produziu as tensões verticais mais altas na superfície do lastro 375 sob os dormentes. Para avaliar a tensão máxima de contato na interface dormente-balastro, a 376 função do *software* foi usada para reposicionar a carga diretamente sobre o centro dos 377 dormentes. A Tabela 5 apresenta as tensões verticais máximas obtidas em cada camada do

378 modelo numérico.

379

380

Tabela 5 – Tensão vertical máxima em cada camada da ferrovia

	Tensão vertical máxima (kPa)	
	Modelo 1 - Calcário	Modelo 2 – Escória de Aciaria
Lastro	398,4	413,3
Sublastro	104,6	113,0
Subleito	108,8	109,8
Camadas		

381

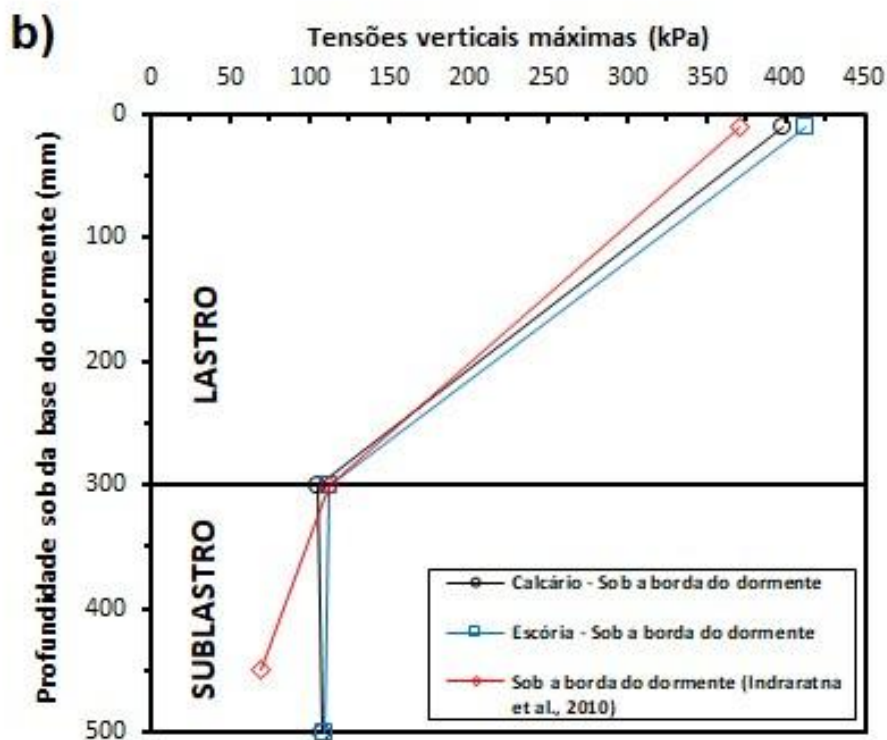
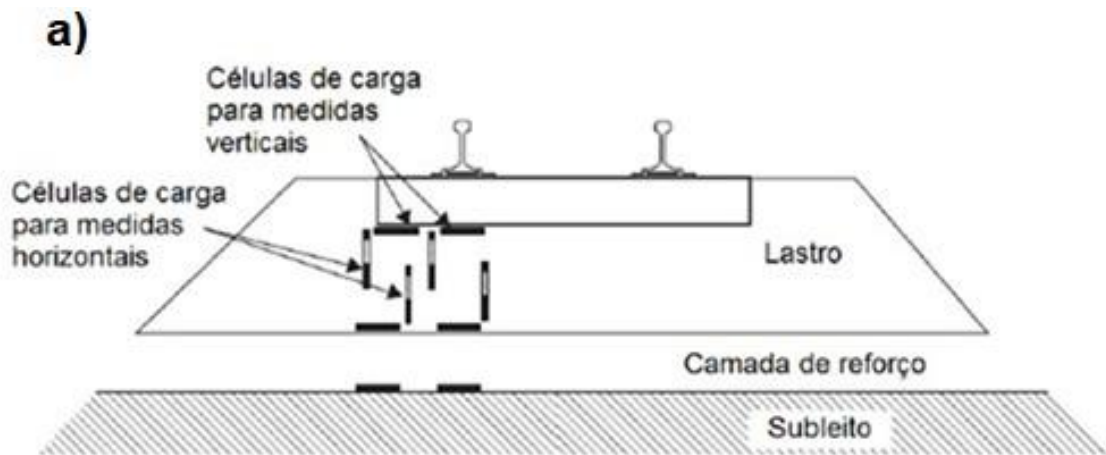
382 A tensão vertical máxima na camada de lastro foi de 398,4 kPa para o agregado de 383 calcário e de 413,3 kPa para a escória de aciaria. Ambos os valores se mantiveram abaixo do

384 limite de 586 kPa, estabelecido pelo manual AREMA (2020) para a tensão de contato entre
385 dormentes de concreto e o lastro. Vale destacar que as tensões verticais calculadas na interface
386 dormente-lastro representam uma pressão média distribuída ao longo da área total de contato,
387 uma vez que o *software* adotado não simula a concentração de tensão local decorrente do
388 contato discreto entre as partículas do lastro e a superfície do dormente. Em relação à tensão

389 vertical máxima no topo da camada de sublastro, observou-se que o valor obtido para a escória
390 de aciaria (113,0 kPa) foi ligeiramente superior ao agregado de calcário (104,6 kPa). No topo
391 da camada de subleito, as tensões permaneceram praticamente estáveis em relação às
392 observadas no sublastro, alcançando aproximadamente 109 kPa para ambos os materiais.

393 Os resultados de tensão nas camadas, obtidos por meio das simulações numéricas, foram
394 comparados com dados de instrumentação de uma via ferroviária submetida à passagem de um
395 trem de carvão com 100 vagões de 25 t/ eixo, conforme estudo de Indraratna *et al.* (2010). A
396 Figura 10a apresenta o posicionamento das células de tensão, destacando que as tensões
397 verticais foram medidas em diferentes camadas do pavimento, tanto no alinhamento sob o trilho
398 quanto no alinhamento sob a borda do dormente. Para facilitar a visualização, a Figura 10b
399 mostra apenas as tensões obtidas no alinhamento sob a borda do dormente, região considerada
400 mais crítica na camada de lastro. Essa escolha permitiu uma comparação direta entre os
401 resultados da simulação numérica, os dados de campo e os limites estabelecidos pela AREMA
402 (2020). Observa-se que as simulações numéricas reproduziram adequadamente os padrões
403 observados em campo, conferindo maior confiabilidade ao modelo adotado. Para ambos os
404 materiais, as tensões obtidas no contato dormente-lastro foram ligeiramente superiores às
405 observadas por Indraratna *et al.* (2010), o que pode ser atribuído à maior carga por eixo adotada
406 nas simulações numéricas (32,5 t/eixo).

407 As simulações numéricas indicam que o segmento de via férrea modelado com escória
408 de aciaria apresentou desempenho semelhante ao do agregado de calcário, atendendo aos limites
409 estabelecidos pelo manual AREMA (2020) para a condição de carga de 32,5 t/eixo, além de
410 representar uma alternativa mais sustentável para o setor ferroviário.



411

412

Figura 10 – a) Posicionamento da instrumentação realizada por Indraratna *et al.* (2010) b) Comparação entre os resultados das simulações numéricas e dados de via instrumentada por Indraratna *et al.* (2010).

413

414

415 4 Conclusões

416

Este estudo apresentou uma investigação experimental e numérica sobre o desempenho físico e mecânico da escória de aciaria em comparação com o agregado de calcário, visando à sua aplicação em camadas de lastro de ferrovias de carga pesada. Com base na análise comparativa dos materiais, foi possível constatar que a escória apresenta desempenho compatível com o do agregado de calcário, revelando-se uma alternativa viável do ponto de

420

421 vista mecânico para utilização como lastro. Além disso, representa uma solução de alto impacto
422 sustentável, ao valorizar um resíduo industrial e reduzir a extração de recursos naturais.

423 Dentre as principais conclusões do presente estudo, destacam-se:

- 424 • A escória de aciaria apresentou comportamento de estabilização das deformações
425 permanentes semelhante ao do agregado de calcário sob razões de tensão principais
426 baixas e intermediárias, com tendência a permanecer em regime de *shakedown*. Sob
427 razões de tensão mais elevadas ($\sigma_1/\sigma_3 = 7,0$), ambos os materiais apresentaram
428 comportamento de aumento contínuo das deformações permanentes, caracterizando a
429 transição para o regime de escoamento plástico;
- 430 • Os módulos de resiliência obtidos para ambos os materiais foram praticamente iguais,
431 evidenciando comportamento elástico equivalente sob solicitações repetidas.
- 432 • As simulações numéricas demonstraram que os deslocamentos verticais máximos de
433 ambos os materiais se mantiveram abaixo do limite recomendado pela AREMA (6,35
434 mm), indicando desempenho satisfatório;
- 435 • As tensões verticais obtidas nas simulações numéricas permaneceram abaixo dos limites
436 estabelecidos pela AREMA (2020) para o topo do lastro (586 kPa), tanto para o agregado
437 de calcário quanto para a escória de aciaria, com valores de 398,4 kPa e 413,3 kPa,
438 respectivamente. Além disso, verificou-se boa concordância entre os resultados
439 numéricos e os dados de campo de Indraratna *et al.* (2010), especialmente sob borda do
440 dormente, validando os modelos utilizados;
- 441 • A utilização da escória de aciaria como lastro ferroviário pode contribuir
442 significativamente para a sustentabilidade do setor ferroviário, ao mitigar impactos
443 ambientais associados tanto à disposição inadequada de resíduos siderúrgicos quanto à
444 extração intensiva de agregados naturais.

445

446 **Referências**

447 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5564: Via
448 férrea - Lastro Ferroviário - Requisitos e método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.

449 AL-SAOUDI, N. K. S.; HASSAN, K. H. Behaviour of track ballast under repeated
450 loading. *Geotechnical and geological engineering*, v. 32, n. 1, p. 167–178, 2014.

451 ANDERSON, W. F.; FAIR, P. Behavior of railroad ballast under monotonic and cyclic
452 loading. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v. 134, n. 3, p. 316–327,
453 2008.

454 AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY
455 ASSOCIATION. AREMA. *Manual for Railway Engineering*. Lanham, USA, 2010.

456 AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY
457 ASSOCIATION. AREMA. *Manual for Railway Engineering*. Lanham, USA, 2020.

458 AURSUDKIJ, B.; MCDOWELL, G. R.; COLLOP, A. C. Cyclic loading of railway
459 ballast under triaxial conditions and in a railway test facility. ***Granular matter***, v. 11, n. 6, p.
460 391–401, 2009.

461 BEHIRY, A. E. A. E.-M. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as
462 subbase material in flexible pavement. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 4, n. 1, p. 43–53,
463 2013.

464 BISHOP, A. W.; GREEN, G. E. The influence of end restraint on the compression
465 strength of a cohesionless soil. ***Géotechnique***, v. 15, n. 3, p. 243–266, 1965.

466 CESCON, J. T. A. M. Comportamento mecânico da mistura de lastro ferroviário com
467 borracha de pneu. 2021. Dissertação - Instituto Militar de Engenharia Rio de Janeiro, RJ, 2021.

468 DAWSON, A. R.; WELLNER, F. Plastic behavior of granular materials. Final report
469 ARC project 933, University of Nottingham, 1999.

470 DE ANDRADE, G. F. S. M. *et al.* Mechanical behavior of limestone ballast for heavy
471 haul Brazilian railway lines: Laboratory evaluation. ***Transportation geotechnics***, v. 52, n.
472 101547, p. 101547, 2025.

473 DE ANDRADE, G. F. S. M. *et al.* Evaluation of limestone aggregates for railway ballast:
474 particle characteristics and shear strength analysis. ***Soils and Rocks***, v. 47, n. 4, p. e2024011223,
475 2024.

476 DELGADO, B. G. *et al.* Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul
477 rail track: Laboratory evaluation. ***Transportation geotechnics***, v. 20, n. 100243, p. 100243,
478 2019a.

479 DELGADO, B. G. *et al.* Particle morphology's influence on the rail ballast behaviour of
480 a steel slag aggregate. ***Environmental geotechnics***, p. 1–10, 2019b.

481 DELGADO, B. G. *et al.* Geomechanical assessment of an inert steel slag aggregate as
482 an alternative ballast material for heavy haul rail tracks. **Construction and building materials**,
483 v. 279, n. 122438, p. 122438, 2021.

484 Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 179/2018-IE:
485 Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio. Rio
486 de Janeiro, 2018a.

487 Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 134/2018-ME:
488 Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de
489 Janeiro, 2018b.

490 FERREIRA, S. M. R. Comportamento Mecânico e Ambiental de Materiais Granulares.
491 Aplicação às Escórias de Aciaria Nacionais. 2010. Tese - Universidade do Minho, Guimarães,
492 2010.

493 FORTUNATO, E. Renovação de plataformas ferroviárias: estudos relativos à capacidade
494 de carga. 2005. Tese - Universidade do Porto, Porto, 2005.

495 FORTUNATO, E.; RESENDE, J. R. Mechanical behaviour of railway track structure
496 and foundation – three dimensional numerical modelling. Em: RailFound 06 - International
497 Conference on Railway Track Foundations. Birmingham, UK, 2006.

498 GOMES, M. B. B. Análise da deformabilidade do lastro ferroviário de agregado
499 siderúrgico utilizando ensaios triaxiais de cargas repetidas. 2022. Dissertação – Instituto Militar
500 de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2022.

501 GUIMARÃES, A. C. R. Um metodo mecanistico-empirico para previsão da deformação
502 permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. 2009. Tese - Universidade Federal
503 do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

504 GUO, Y. *et al.* Railway ballast material selection and evaluation: A review.
505 **Construction and building materials**, v. 344, n. 128218, p. 128218, 2022.

506 HUSSAINI, S. K. K.; INDRARATNA, B.; VINOD, J. S. Performance assessment of
507 geogrid-reinforced railroad ballast during cyclic loading. **Transportation geotechnics**, v. 2, p.
508 99–107, 2015.

509 IAB. Parque siderúrgico - Instituto Aço Brasil. [S.l.], 2022. Acessado 13 Jun. 2022.
510 Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/parque-siderurgico/>>.

511 INDRARATNA, B. *et al.* Behaviour of clay-fouled ballast under drained triaxial testing.
512 **Géotechnique**, v. 63, n. 5, p. 410–419, 2013.

513 INDRARATNA, B. *et al.* Field Assessment of the Performance of a Ballasted Rail Track
514 with and without Geosynthetics. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental**
515 **Engineering**, v. 136, n. 7, p. 907–917, 2010.

516 INDRARATNA, B.; IONESCU, D.; CHRISTIE, D. State-of-the-Art Large Scale Testing
517 of Ballast. Conference on Railway Engineering, v. (CORE 2000), Adelaide, p. 24.1-
518 24.13, 2000.

519 INDRARATNA, B.; LACKENBY, J.; CHRISTIE, D. Effect of confining pressure on
520 the degradation of ballast under cyclic loading. **Géotechnique**, v. 55, n. 4, p. 325–328, 2005.

521 INDRARATNA, B.; NIMBALKAR, S. Stress-strain degradation response of railway
522 ballast stabilized with geosynthetics. **Journal of geotechnical and geoenvironmental**
523 **engineering**, v. 139, n. 5, p. 684–700, 2013.

524 INDRARATNA, B.; SALIM, W. Deformation and degradation mechanics of recycled
525 ballast stabilised with geosynthetics. **Soils and foundations**, v. 43, n. 4, p. 35–46, 2003.

526 INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C. Advanced rail
527 geotechnology ballasted track. Taylor & Francis eBooks, 2011.

528 INDRARATNA, B.; SHAHIN, M. A.; SALIM, W. Stabilisation of granular media and
529 formation soil using geosynthetics with special reference to railway engineering. **Proceedings**
530 **of the Institution of Civil Engineers. Ground Improvement**, v. 11, n. 1, p. 27–43, 2007.

531 INDRARATNA, B.; WIJewardena, L. S. S.; BALASUBRAMANIAM, A. S.
532 Large-scale triaxial testing of grey wacke rockfill. **Géotechnique**, v. 43, n. 1, p. 37–51, 1993.

533 JING, G. *et al.* Numerical investigation of the behavior of stone ballast mixed by steel
534 slag in ballasted railway track. **Construction and building materials**, v. 262, n. 120015, p.
535 120015, 2020.

536 KUO, C.; LIN, C. Engineering performance of steel slag as railway ballast. Em: Proc.
537 10th Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields. Atenas, Grécia, p. 1859–1864, 2017.

538 LI, D. *et al.* Railway geotechnics. Londres, Inglaterra: CRC Press, 2019.

539 MATHUR, S.; SONI, S. K.; MURTY, A. Utilization of industrial wastes in low-volume
540 roads. **Transportation research record**, v. 1652, n. 1, p. 246–256, 1999.

541 MORATA, M.; E SABORIDO, C. Slag aggregates with enhanced performance for
542 railway track bed layers. Em: Proc. 3rd International Conference on Railway Technology:
543 Research, Development and Maintenance, Stirlingshire, UK, 2016.

544 PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E. Abrasion evolution of steel furnace slag aggregate for
545 railway ballast: 3D morphology analysis of scanned particles by close-range photogrammetry.
546 **Construction and building materials**, v. 267, n. 121225, p. 121225, 2021.

547 PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; CALÇADA, R. A numerical study on the influence of
548 backfill settlements in the train/track interaction at transition zones to railway bridges.
549 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: **Journal of Rail and Rapid**
550 **Transit**, v. 230, n. 3, p. 866–878, 2016.

551 PAIXÃO, A.; FORTUNATO, E.; FONTUL, S.; MARTINS, F. A case study in
552 construction optimisation for sub-ballast layer. Em: Proc. of 11th International Conference on
553 Railway Engineering, London, p. 1-13, 2011

554 RAYMOND, G. P. Research on Railroad Ballast Specification and Evaluation.
555 **Transportation Research Record**, v. 1006, p. 8, 1985.

556 SANTOS, G. F. M. DOS *et al.* Characterization and modelling of a new heavy axle load
557 freight wagon for wheel rail wear prediction. **Journal of mechanical engineering and**
558 **technology**, p. 17–28, 2014.

559 SANTOS, J. T. A. DOS. Avaliação do comportamento mecânico de solos tropicais para
560 uso em camada de sublastro ferroviário. 2022. Dissertação - Instituto Militar de Engenharia,
561 Rio de Janeiro, 2022

562 SELIG, E. T.; WATERS, J. M. Track Geotechnology and Substructure Management.
563 Thomas Telford Publishing, 1994.

564 SHEN, W. *et al.* Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum
565 solidified material as road base material. **Journal of hazardous materials**, v. 164, n. 1, p. 99–
566 104, 2009.

567 SILVA, F. H. P. Estudo do comportamento de um lastro ferroviário sob carga repetida
568 em modelo físico de verdadeira grandeza. 2018. Dissertação - Universidade Federal do Rio de
569 Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2018.

570 SKOGLUND, K. A.; HOSETH, S.; VÆRNES, E. Development of a large triaxial cell
571 apparatus with variable deviatoric e confining stresses. **Unbound Aggreg Road Constr**, p.
572 145–152, 2000.

573 SPADA, J. L. G. Uma abordagem de mecânica dos pavimentos aplicada ao entendimento
574 do mecanismo de comportamento tensão-deformação da via férrea. 2003. Tese - Universidade
575 Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003

576 ZUMRAWI, M. M. E.; KHALILL, F. O. A. Experimental study of steel slag used as
577 aggregate in asphalt mixture. 2015. **International Journal of Civil and Environmental**
578 **Engineering**, v. 9, n. 6, p. 753–758, 2015.