

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



Laura Coura Soranço

**Avaliação da resistividade elétrica e liberação de finos da escória de aciaria
como lastro ferroviário.**

Juiz de Fora
2026

ufjf

Laura Coura Soranço

**Avaliação da resistividade elétrica e liberação de finos da escória de aciaria
como lastro ferroviário.**

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

Data da aprovação:

Orientadora: Profa. D.Sc. Julia Castro Mendes

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

Juiz de Fora

2026

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

Soranço, Laura.

Avaliação da resistividade elétrica e liberação de finos da escória de aciaria como lastro ferroviário / Laura Soranço. -- 2026.
108 p.

Orientadora: Júlia Mendes

Coorientador: Geraldo Luciano Marques

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2026.

1. Escória siderúrgica. 2. Lastro ferroviário. 3. Agregado. 4. Resistência elétrica. 5. Resíduo. I. Mendes, Júlia, orient. II. Marques, Geraldo Luciano, coorient. III. Título.

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil

Laura Coura Soranço

"Avaliação da resistividade elétrica e liberação de finos da escória de aciaria como lastro ferroviário"

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

Aprovada em 24/02/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof(a) Dr(a) Júlia Castro Mendes - Orientadora e Presidente da Banca -(UFJF)

Prof. Dr. Geraldo Luciano de Oliveira Marques - Coorientador - (UFJF)

Prof. Dr. Ronderson Queiroz Hilário- Membro Titular Externo - (UFMG)

Prof(a). Dr.(a) Laís Cristina Barbosa Costa - Membro Titular Externo - (UFC)

Juiz de Fora, 11/03/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Luciano de Oliveira Marques, Professor(a)**, em 11/03/2026, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronderson Queiroz Hilário, Usuário Externo**, em 11/03/2026, às 13:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Júlia Castro Mendes, Professor(a)**, em 11/03/2026, às 20:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LAÍS CRISTINA BARBOSA COSTA, Usuário Externo**, em 23/03/2026, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2900848** e o código CRC **79822C00**.

“A verdadeira inovação está em transformar o desperdício
em recurso e o consumo em responsabilidade.”

- William McDonough

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha orientadora, Prof^a Dra. Júlia Mendes, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Geraldo Marques, ambos da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), por sua orientação, paciência e incansável dedicação ao longo desta jornada. Seus conselhos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos professores e técnicos-administrativos em educação (TAEs) da UFJF, em especial Vitor e Romilda, que sempre estiveram dispostos a compartilhar seus conhecimentos e a oferecer suporte nas etapas do projeto.

Manifesto minha gratidão à Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e à MRS Logística pelas contribuições técnicas e pela disponibilização de recursos materiais e financeiros para a realização de ensaios e análises essenciais. Reconheço, ainda, a colaboração dos laboratórios da UFJF, cujas estruturas foram imprescindíveis para a execução desta pesquisa.

Estendo meus agradecimentos ao Engenheiro Alberto Souza, ao grupo ATIVE e ao Laboratório de Construção Civil da UFOP, pelo apoio técnico e pela colaboração no desenvolvimento das atividades experimentais. Agradeço, igualmente, ao José Agenor e ao Aldo Carvalho, cuja contribuição foi essencial para o avanço das etapas experimentais. Agradeço ao professor Antônio Carlos Rodrigues Guimarães pelas valiosas contribuições, sugestões e questionamentos ao longo da avaliação deste trabalho.

Gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CNPq) pelo suporte financeiro durante o período de desenvolvimento deste trabalho, que possibilitou a dedicação integral à pesquisa.

Aos colegas de curso, que tornaram essa caminhada mais leve com apoio e aprendizado mútuo, meu muito obrigado.

Não poderia deixar de agradecer à minha família e ao meu namorado, cujo amor, compreensão e incentivo incondicional me deram força em cada etapa deste percurso.

RESUMO

A indústria siderúrgica exerce um papel fundamental no cenário global, no entanto, sua operação resulta na geração significativa de resíduos. Paralelamente, o transporte ferroviário se destaca por sua elevada eficiência de carga, mas demandando intenso volume de recursos naturais para sua operação. Nesse contexto, uma estratégia sustentável é a reutilização de resíduos siderúrgicos como agregado para lastro ferroviário. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da utilização da escória de aciaria tratada como agregado para lastro ferroviário (lastro siderúrgico), em especial em relação à geração de pulverulentos e a resistividade elétrica do material com diferentes teores de pulverulento, ainda pouco explorada na literatura. Para tal, foram conduzidos ensaios de massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água, índice de tenacidade Treton, abrasão Los Angeles, medições de resistividade elétrica em diferentes teores de umidade e pulverulento, avaliação da expansão por meio do método PTM adaptado, além da análise da correlação entre a quantidade de material pulverulento e os ciclos de abrasão. Os resultados indicaram massa específica aparente de 3122 kg/m³, absorção de água de 2,0% e porosidade aparente de 5,5% (acima dos limites normativos). O índice de tenacidade Treton obtido para a escória foi de 9,6% e para a abrasão Los Angeles, 20,3%, valores em conformidade com a literatura e melhores do que a brita natural (gnaisse), com 21,8% de tenacidade Treton e 21,6% de abrasão, indicando melhor desempenho mecânico da escória. Em relação à resistividade, a escória apresentou valores adequados em condição seca (2.580.000 $\Omega \cdot m$), contra 3.900.000 $\Omega \cdot m$ da brita), porém com a introdução de umidade os valores reduziram-se, atingindo resultados próximos ou inferiores a 60 $\Omega \cdot m$, contra 528 $\Omega \cdot m$ da brita aos 16% de umidade. A introdução de pulverulento e minério de ferro também foi prejudicial, com a escória chegando a apenas 27,9 $\Omega \cdot m$. Dessa forma, o lastro siderúrgico não é indicado em vias que operam com sistemas de detecção por circuito elétrico, porém é viável em trechos que utilizam detecção por contador de eixos. Esses achados corroboram a possibilidade de utilizar a escória como lastro, tendo como ressalva sistemas com circuitos elétricos.

Palavras-chaves: Escória siderúrgica; Lastro ferroviário; Agregado; Resistência elétrica; Resíduo.

ABSTRACT

The steel industry plays a fundamental role in the global economy; however, its operation results in the significant generation of waste. At the same time, railway transportation stands out for its high freight efficiency, although it requires substantial consumption of natural resources for its infrastructure. In this context, a sustainable strategy is the reuse of steelmaking waste as aggregate for railway ballast. Therefore, this study aims to evaluate the technical feasibility of using treated steel slag as railway ballast aggregate (steel slag ballast), with particular emphasis on fines generation and electrical resistivity, the latter still scarcely explored in the literature. To this end, tests of apparent specific gravity, apparent porosity, water absorption, Treton impact toughness index, Los Angeles abrasion, electrical resistivity under different moisture and fines contents, expansion assessment using the adapted PTM method, and the correlation between fines content and abrasion cycles were conducted. The results indicated an apparent specific gravity of 3,122 kg/m³, water absorption of 2.0%, and apparent porosity of 5.5% (above normative limits). The Treton toughness index obtained for the slag was 9.6%, and the Los Angeles abrasion value was 20.3%, both in accordance with the literature and superior to natural aggregate (gneiss), which presented 21.8% (Treton) and 21.6% (Los Angeles abrasion), indicating better mechanical performance of the slag. Regarding electrical resistivity, slag exhibited adequate values under dry conditions (2,580,000 Ω·m, compared to 3,900,000 Ω·m for natural aggregate). However, with increasing moisture, resistivity decreased, reaching values close to or below 60 Ω·m, while natural aggregate maintained 528 Ω·m at 16% moisture. The addition of fines and iron ore contamination was also detrimental, with slag reaching as low as 27.9 Ω·m. Therefore, steel slag ballast is not recommended for railway tracks operating with track circuit detection systems, but it is suitable for sections that employ axle counter detection systems. These findings support the feasibility of using steel slag as ballast, with restrictions in systems that rely on electrical track circuits.

Keywords: Steel slag; Railway ballast; Aggregate; Electrical resistivity; Waste reuse.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema via de lastro ferroviário	17
Figura 2 - Máquina socadora compactando quatro dormentes simultâneos.....	21
Figura 3 - Maquinário para limpeza do lastro. a) máquina reguladora e distribuidora de lastro com armazenamento para agregado; b) máquina USP 2010 SWS-U durante trabalho de ajuste no lastro; c) arado lateral; d) dispositivo de vassoura	22
Figura 4 - Desguarnecimento. a) desguarnecedora bimodal; b) processo de introdução e distribuição de lastro desguarnecido.	22
Figura 5 - Lastro com adição de borracha de pneu	25
Figura 6 - Morfologia da escória de aciaria. (a) poroso; (b) menos poroso; (c) denso	27
Figura 7 - Bloco de pavimentação produzido com escória de siderurgia sem tratamento	29
Figura 8 - Finos no fundo do lastro	35
Figura 9 - Pilhas de escória de aciaria para tratamento. a) EH1, submetida apenas à hidratação; b) EH2, submetida à hidratação e à carbonatação; e c) controle (estabilização natural sob as intempéries)	37
Figura 10 - Porcentagem de expansão da escória de aciaria.....	38
Figura 11 - Porcentagem de teor de cal livre no período de monitoramento.	39
Figura 12 - Monitoramento do teste PTM-130/78	40
Figura 13 - Gráfico mostrando o impacto de Treton em função do tempo de lixiviação. Sendo C1 lixiviado superior, C2 lixiviado médio e C3 lixiviado inferior.	41
Figura 14 - Resistividade elétrica do trilho medida por megômetro	42
Figura 15 - Caixa-teste para avaliação dos efeitos da cura nas escórias de aciaria	42
Figura 16 - Caixa-teste para ensaios de condutividade do material	44
Figura 17 - Resumo gráfico de Jing <i>et al.</i>	47
Figura 18 - Agregados utilizados. Esquerda: Escória de Aciaria; Direita: Brita de Gnaisse	52
Figura 19 – Local de retirada do material na pedreira de Juiz de Fora	52
Figura 20 - DRX do minério de ferro	54

Figura 21 - Amostras para ensaios de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção. a) Amostra de escória seca; b) Amostra de escória com 1/3 de água; c) Amostra de escória com 2/3 de água; d) Amostra de escória submersa	55
Figura 22 - Corpo de Prova para ensaio PTM adaptado. a) Procedimento de montagem; b) Montagem finalizada	56
Figura 23 – Banho térmico no PTM adaptado. a) corpo de prova com sobrecarga; b) corpo de prova submerso.....	57
Figura 24 - Ensaio de impacto; a) aparelho treton; b) amostra da mistura de escória e brita com 20 fragmentos.....	58
Figura 25 – Ensaio de abrasão “Los Angeles”	59
Figura 26 - Amostra de escória para abrasão Los Angeles	60
Figura 27 - Ensaio de resistividade elétrica. a) caixa plástica; b) caixa com tapete isolante	61
Figura 28 – Amostra para o ensaio de resistividade. a) amostra de escórica seca; b) pontos fixos de medição marcados; c) medição com megôhmetro.....	62
Figura 29 – Geometria do modelo de lastro adotado.....	63
Figura 30 – Expansão da amostra encontrada no ensaio PTM	70
Figura 31 – Resultados do índice de tenacidade Treton.....	71
Figura 32 - Relação entre energia e produção de finos no Treton.....	72
Figura 33 - Resultados da abrasão Los Angeles	74
Figura 34 - Relação entre energia e produção de finos na abrasão Los Angeles	75
Figura 35 - Resultados da resistência elétrica para o material puro e com adição de minério de ferro (MF) e de pulverulento (P).....	77
Figura 36 - Amostra de escória contaminada por ferro.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre a norma brasileira de requisitos de agregados ferroviário e algumas normas de referência do exterior	18
Tabela 2 - Valores limites para escória e rocha natural de acordo com a AREMA	20
Tabela 3 - Produtos originados a partir das reações de oxidação e corrosão do ferro metálico.....	30
Tabela 4 - Principais fatores que controlam a expansão da escória.....	31
Tabela 5 - Propriedades mecânicas da escória de aciaria e do agregado natural com diferentes especificações	45
Tabela 6 - Principais resultados dos lastros siderúrgicos, com resultados abaixo dos limites destacados em vermelho	50
Tabela 7 - Índice pluviométrico de Juiz de Fora em mm/m ² em relação ao tempo de duração e o tempo de retorno das chuvas	63
Tabela 8 - Teor de umidade para 1 m linear de lastro de brita conforme o índice pluviométrico.	65
Tabela 9 - Teor de umidade para 1 m linear de lastro siderúrgico conforme o índice pluviométrico	66
Tabela 10 - Resultados dos ensaios realizados para os agregados convencional e siderúrgico.....	67
Tabela 11 - Resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água.....	68
Tabela 12 - Comparação de resultados da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água para a escória	69
Tabela 13 - Comparação de resultados do ensaio PTM adaptado	70
Tabela 14 - Comparação de resultados do índice de tenacidade da escória	72
Tabela 15 - Comparação de resultados da abrasão Los Angeles da escória	75
Tabela 16 - Resistividade elétrica da brita	78
Tabela 17 - Resistividade elétrica da escória de aciaria	79
Tabela 18 - Comparação de resultados da resistividade elétrica da escória	81

LISTA DE SIGLAS

Al_2O_3	Alumínio
BF	Escória de Alto Forno
BOF	Escória de Forno de Oxigênio Básico
CaCO_3	Carbonato de Cálcio
C_4AF	$\text{Ca}_3\text{Fe}_4\text{Al}_4\text{O}_2$ - Ferroaluminato Tetracálcico
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Dolomita
CaO	Óxido de Cálcio
$\text{Ca}_2\text{O}_4\text{Si}$	Silicatos de Cálcio
C_2F	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ - Óxido de Ferro
CH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Hidróxido de Cálcio
CO_2	Dióxido de Carbono
C_2S	Ca_2SiO_4 - Silicato Dicálcico
C_3S	Ca_3SiO_5 - Silicato Tricálcico
EAF	Escória de Forno Elétrico
FeO	Óxidos de Ferro
f-CaO	Óxidos de Cálcio Livre
LD	Escória de Linz-Donawitz
MFe_2O_4	Ferritas
MnO_2	Óxidos de Manganês
MgO	Óxidos de Magnésio
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Brucita
O_2	Oxigênio
RO	Solução sólida de FeO-MnO-MgO
SiO_2	Óxido de Silício

SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Objetivo	15
1.2	Objetivos Específicos.....	16
2	Revisão Bibliográfica.....	17
2.1	Lastro ferroviário	17
2.1.1	Normas e caracterização do agregado	17
2.1.2	Material pulverulento e desguarnição.....	20
2.1.3	Impacto ambiental das rochas naturais e uso de agregado não-convencional.....	23
2.2	Escória de aciaria	26
2.2.1	Características da escória de aciaria	26
2.2.2	Carbonatação, expansibilidade e potencial de contaminação ambiental	28
2.2.3	Resistividade elétrica	33
2.3	Estado da arte.....	36
2.3.1	Cura e expansão da escória para uso em lastro ferroviário	36
2.3.2	Resistividade	41
2.3.3	Propriedades mecânicas	45
3	Materiais e métodos.....	51
3.1	Materiais	51
3.2	Ensaios	54
3.2.1	Massa aparente, porosidade e absorção de água	54
3.2.2	Expansão	56
3.2.3	Resistência ao choque - Treton.....	58
3.2.4	Abrasão Los Angeles	59

3.2.5	Resistividade elétrica	61
4	Resultados	67
4.1	Ensaio realizado pela empresa ferroviária	67
4.2	Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água 68	
4.3	Ensaio de expansão	69
4.4	Ensaio de resistência mecânica.....	70
4.5	Resistividade Elétrica.....	77
5	Conclusão	83
	Referências.....	86
	Apêndice A – tabelas de resultados Brutos	99
A.1	Granulometria da brita de gnaiss	99
A.2	Granulometria da escória de aciaria	101
A.3	Tabela de resultados do ensaio treton	102
A.4	Tabela de resultados do ensaio de abrasão Los Angeles	103
A.5	Tabela de resultados do ensaio de resistência elétrica	104
	Apêndice B – trabalhos publicados.....	106

1 INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica desempenha um papel crucial no cenário mundial ao fornecer insumos para diversos setores (Carvalho, Mesquita e Araújo, 2015), embora a produção de aço também acarrete a geração de grandes volumes de resíduos sólidos, líquidos e gasosos (Lobato, 2014). Segundo o relatório “Aço e Sustentabilidade de 2021” (Instituto Aço Brasil, 2021), o Brasil ocupa o 9º lugar no *ranking* mundial de produtores de aço. De acordo com o mesmo relatório, em 2020 o país produziu 27 milhões de toneladas de aço bruto e gerou 17 milhões de toneladas de coprodutos e resíduos, dos quais 40% correspondem à escória de alto-forno e 25% à escória de aciaria.

De acordo com Hosseini *et al.* (2016), a escória de aciaria pode ser dividida em escória de forno de oxigênio básico (BOF) ou Linz-Donawitz (LD) e escória de forno elétrico (EAF), sendo cada uma resultante de diferentes processos de fabricação do aço. As escórias BOF ou LD e EAF são um subproduto da conversão do ferro gusa e sucata. A escória BOF é formada durante a reação do metal quente no forno de oxigênio básico, enquanto na escória EAF essa reação ocorre no forno elétrico (Lan *et al.*, 2017). Quando britadas, essas escórias são adequadas para uso em misturas asfálticas e em concreto, representando uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável (Pasetto *et al.*, 2023) Como será visto a seguir, alguns estudos também defendem o uso das escórias de aciaria na infraestrutura e superestrutura ferroviária.

As ferrovias desempenham um papel global crucial no transporte de cargas e passageiros, sendo uma das formas mais eficientes de logística devido à sua capacidade de movimentar grandes volumes com menor impacto ambiental em comparação a outros modos de transporte (Pecharrómán *et al.*, 2014). As ferrovias são responsáveis por apenas 3% das emissões de CO₂ no setor de transportes, embora movimentem 9% dos passageiros e cargas, destacando o seu potencial na transição para uma economia de baixo carbono (Robison e Schut, 2014). No entanto, no Brasil, o modal predominante são as rodovias, o que resulta em gargalos durante períodos de alta demanda (Oliveira e Brito, 2024). Além disso, a matriz produtiva brasileira enfrenta um grande desafio na logística de transporte, devido à vasta extensão territorial do país, o que leva a altos custos de movimentação de mercadorias (Oliveira e Brito, 2024). Nesse contexto, o fortalecimento da malha ferroviária nacional

se mostra essencial, não apenas para reduzir esses custos logísticos e diminuir a dependência das rodovias, mas também para promover um desenvolvimento mais equilibrado e sustentável no país (Ministério da Infraestrutura, 2021).

A via férrea abrange uma interação entre a camada de lastro, travessas (ou dormentes) e trilhos, todos influenciados por cargas dinâmicas e fatores externos (Nabochenko *et al.*, 2019). O lastro é uma camada que desempenha diversas funções essenciais, como resistir aos deslocamentos verticais, laterais e longitudinais causados pelas cargas dinâmicas dos trens, transferir os esforços dos trilhos para o sublastro, e garantir a drenagem da via. Além disso, ele contribui para preservar a geometria da pista, proporcionar elasticidade e rigidez à estrutura, absorver vibrações e ruídos e impedir o crescimento de vegetação sobre os trilhos (Guo *et al.*, 2022).

No entanto, a construção de ferrovias também tem impacto ambiental, especialmente pelo uso de lastro composto por agregados de rochas naturais (Merheb, 2014), o que intensifica a atividade mineradora, reconhecidamente poluente (Leite *et al.*, 2017). Além disso, o lastro de brita enfrenta degradação e compactação ao longo do tempo, comprometendo a eficiência e a segurança das vias férreas e demandando manutenção constante (Delgado *et al.*, 2021).

Uma estratégia para alcançar sustentabilidade e eficiência no lastro ferroviário é o uso de resíduos como agregados (Soranzo *et al.*, 2025). Entre os materiais estudados para essa finalidade, destaca-se a escória siderúrgica, que tem obtido resultados promissores do ponto de vista mecânico e físico (Couto, 2025; Dayrell, 2013; Fernandes, 2010; Sousa, 2007; Jing *et al.*, 2020). Jing *et al.* (2020), por exemplo, utilizaram o método dos elementos finitos para investigar o comportamento da camada de lastro ferroviário de rocha britada misturada com diferentes frações de escória de aciaria. Os resultados mostraram que a adição de escória melhora significativamente o desempenho do lastro, com aumentos no módulo de elasticidade de até 12% e reduções nos deslocamentos dos trilhos de até 51%. Além disso, a aceleração nos dormentes, que quantifica a intensidade das vibrações resultantes das cargas dinâmicas aplicadas, apresentou uma redução de até 86%. Simultaneamente, as taxas de amortecimento aumentaram, contribuindo para a diminuição significativa das vibrações transmitidas à estrutura.

Além de reduzir a exploração de materiais naturais, o uso da escória de aciaria como agregado contribui para o sequestro de carbono. Durante o processo natural de

carbonatação da escória, o dióxido de carbono (CO_2) do ar é convertido em minerais estáveis, resultando na captura e armazenamento de CO_2 no próprio material (Luo e He, 2021). Nesse contexto, se toda a escória produzida anualmente no mundo fosse destinada à carbonatação mineral, seria possível sequestrar aproximadamente 209 milhões de toneladas de CO_2 , o equivalente a 9,1%–10,4% das emissões totais de CO_2 da indústria siderúrgica (Luo e He, 2021). Além do significativo potencial de mitigação das emissões de carbono, a carbonatação também contribui para a estabilidade volumétrica da escória e reduz a lixiviação de metais pesados, ampliando seus benefícios ambientais (Luo e He, 2021). Corroborando esses resultados, o estudo de Couto (2025) indica que o lastro siderúrgico apresenta emissões equivalentes de CO_2 de $-2,45 \times 10^5$ kg CO_2eq , evidenciando captura líquida de carbono, enquanto o lastro tradicional apresenta valor de $1,30 \times 10^4$ kg CO_2eq .

Apesar de diversos trabalhos terem avaliado a viabilidade da escória de aciaria como lastro do ponto de vista mecânico e da expansão, ainda há desafios significativos a serem enfrentados, como a geração de partículas finas com propriedades cimentantes e a alta condutividade elétrica da escória. Devido ao alto teor de CaO , a escória apresenta material fino com ação cimentante (Wan, Yang e Yan, 2013). Como a camada de lastro está sujeita à colmatação devido à presença de partículas finas nos agregados, a solidificação da escória por efeito cimentante poderia dificultar a migração dessas partículas, agravando o problema. Além disso, por ser um material condutor, a escória de aciaria pode interferir no sistema de sinalização ferroviária, resultando em leituras imprecisas e comprometendo a eficiência da linha férrea (Sousa, 2007; Couto, 2025).

O uso da escória de aciaria pode proporcionar benefícios econômicos e ambientais significativos, ao reduzir o uso de recursos naturais e minimizar a disposição de resíduos. Assim, o presente estudo objetiva oferecer dados técnicos e análises detalhadas sobre o desempenho da escória de aciaria, contribuindo para a aplicação efetiva dessa alternativa sustentável ao lastro convencional.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade da utilização da escória de aciaria como agregado para lastro ferroviário, com foco em sua resistividade elétrica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos do estudo, tem-se:

- Comparar as características da escoria siderúrgica com os requisitos técnicos do lastro ferroviário padrão;
- Avaliar como o material pulverulento no lastro influencia a resistividade elétrica;
- Comparação entre a geração de material pulverulento do lastro siderúrgico com o lastro de rocha britada convencional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

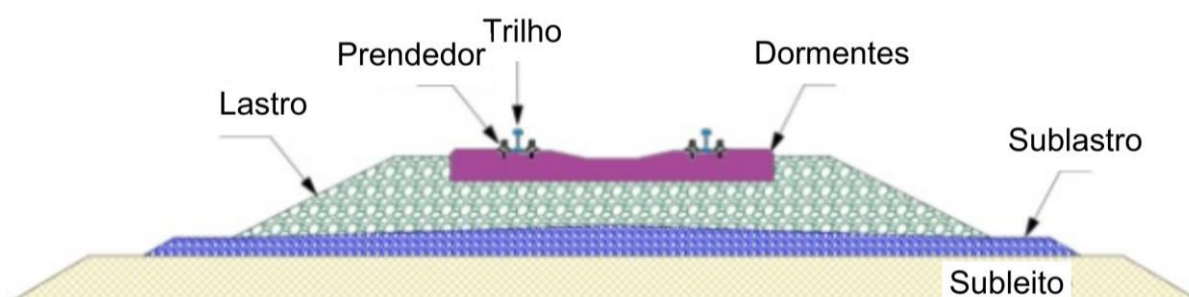
2.1 LASTRO FERROVIÁRIO

Este item abordará o material utilizado como lastro ferroviário, incluindo suas normas e especificações técnicas. Além disso, discutirá o processo de desgarnecimento causado pelo acúmulo de material pulverulento, que compromete a eficiência do lastro. Por fim, será analisado o impacto do uso de lastro convencional, assim como potenciais alternativas para substituição por resíduos, visando a utilização de agregados sustentáveis.

2.1.1 Normas e caracterização do agregado

A camada de lastro, Figura 1, desempenha um papel crucial na via férrea, sendo responsável por sustentar os dormentes e evitar seu deslocamento vertical, lateral e longitudinal (Mishra *et al.*, 2013). As características dos agregados utilizados no lastro ferroviário são fundamentais para assegurar a estabilidade e durabilidade dos trilhos. O lastro ferroviário é geralmente composto por agregados graúdos de materiais provenientes de rochas extraídas de pedreiras, como calcário, gnaise, granito, quartzito e basalto (Guo *et al.*, 2022). A escolha dessas rochas é influenciada por fatores como disponibilidade local, características técnicas das jazidas, viabilidade econômica e considerações ambientais (Indraratna, Nimbalkar e Neville, 2014). Conforme discutido por Seling e Waters (1994), o lastro ferroviário, comumente disposto em uma ou duas camadas sobre o sublastro, deve atender a critérios granulométricos específicos, incluindo espessura adequada, distribuição de tamanhos de partículas e propriedades físicas que garantam sua eficiência no desempenho estrutural e funcional das vias férreas.

Figura 1 - Esquema via de lastro ferroviário



Fonte: Adaptado (Guo *et al.*, 2022).

A NBR 5564, intitulada "Via férrea - Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio" (ABNT, 2021), define as especificações e os ensaios necessários para o lastro ferroviário de rocha natural britada. Essa norma exige que o material atenda a critérios rigorosos, como partículas com forma cúbica, massa específica aparente mínima de 2500 kg/m³, porosidade aparente máxima de 2% e absorção de água limitada a 2%, além de uma resistência à intempérie de até 10%. Esses requisitos garantem que o lastro possua a qualidade necessária para suportar as cargas e condições operacionais das ferrovias.

O lastro ferroviário é tradicionalmente composto por rochas duras, irregulares, com superfície rugosa e granulometria uniforme, porém os padrões para seu uso variam entre os países, devido a qualidade e disponibilidade das rochas, além de regulamentações ambientais e fatores econômicos (Guo *et al.*, 2022). Desta forma, vale destacar que as normas técnicas e especificações para o lastro ferroviário variam entre países, com diferentes exigências em termos de caracterização e limites mínimos e máximos, como exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação entre a norma brasileira de requisitos de agregados ferroviário e algumas normas de referência do exterior

Propriedade	Requisitos			
	NBR 5564 (ABNT, 2021)	AREMA (AREMA, 2013)	EN 13450 (2013)	AS 2758.7 (2009)
	Brasil	EUA	União Europeia	Austrália
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	-	-
Massa específica aparente (mínima)	2500-2700 Kg/m ³ ^a	2600kg/m ³	EN1097-2	2500Kg/m ³
Porosidade aparente (máxima)	2%	-	-	-
Absorção de água (máxima)	2%	2%	EN1097-6	-
Resistência à intempérie (máxima)	10%	5%	1%	-
Limite de massa unitária no estado solto (mínimo)	1250Kg/m ³	1120Kg/m ³	ISO/TS 17892-2	1200Kg/m ³
Material pulverulento (máximo)	1%	1%	0,5-1,5% ^b	1%
Torrões de argila (máximo)	0,5%	0,5%	-	-

Propriedade	Requisitos			
	NBR 5564 (ABNT, 2021)	AREMA (AREMA, 2013)	EN 13450 (2013)	AS 2758.7 (2009)
	Brasil	EUA	União Europeia	Austrália
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles máxima)	30-35% ^a	30%	12-24% ^b	25-40% ^b
Resistência ao choque (índice de tenacidade treton máximo) ^b	25%	-	14-22% ^b	-
Teor de fragmentos macios e friáveis (máximo) ^b	5%	-	-	-
Partículas alongadas (%)	-	3:1 – Max 5	-	2:1 – Max.30 3:1 – Alt.
Partículas lamelares (%)	-	≤5	≤15-25	≤30
Perda de massa após ebulição (basalto) (%)	-	-	≤ 1	-
Aumento do valor de impacto após ebulição (%)	-	-	≤ 3	-
Aumento do coeficiente Los Angeles após ebulição (%)	-	-	≤ 5	-
Resistência ao congelamento e descongelamento (%)	-	-	≤ 1-4	-
Resistência ao congelamento- descongelamento em meio salino (%)	-	-	≤ 2-8	-
Micro-Deval (%)	-	-	-	≤5-15
Valor de esmagamento dos agregados (%)	-	-	-	≤ 25-40 ^c
Valor de abrasão em moinho (%) – NA	-	25<AN<65	-	-
Resistência ao escorregamento em condição molhada (%)	-	-	-	≤ 6-12 ^c
Resistividade elétrica (Ohm.m)	-	-	-	≥ 60

Notas: ^aVariação de acordo com a litologia da rocha; ^bEnsaio opcional pela NBR 5564;
^cVariação de acordo com a classe da pista

Fonte: Autora (2026).

A NBR 5564 (ABNT, 2021) também inclui ensaios para determinação de resistência à compressão uniaxial no estado saturado, índice de resistência à

compressão pontual e amostragem de material de lastro. No entanto, a norma brasileira não aborda a resistividade ou condutividade elétrica do lastro, não considera o uso de resíduos ou materiais alternativos, como a escória de aciaria, e também não estabelece prescrições para a composição química do lastro. Dessa forma, o documento normativo permanece restrito a agregados pétreos naturais, não abrindo espaço técnico-regulatório para a incorporação formal de materiais alternativos.

Por outro lado, a norma americana AREMA (*American Railway Engineering and Maintenance of Way Association*), em seu Manual de Engenharia Ferroviária, considera as escórias siderúrgicas como material candidato para lastro de ferrovia, trazendo valores limites específicos, mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores limites para escória e rocha natural de acordo com a AREMA

Propriedade	Valor	
	Escória	Brita Natural
Material passante na peneira nº 200 (máximo)	1%	1%
Massa específica (mínimo)	2,90	2,60
Absorção de água (máxima)	2%	2%
Torrões de argila e partículas friáveis (máximo)	0,5%	0,5%
Degradação (máximo)	30%	30%
Solidez do sulfato de sódio (máximo)	5%	5%
Partículas planas e/ou alongadas (máximo)	5%	5%

Fonte: (AREMA, 2013), adaptado.

2.1.2 Material pulverulento e desguarnição

Durante seu ciclo de vida, o lastro ferroviário suporta cargas geradas pela passagem dos trens, podendo acumular mais de 15 milhões de toneladas brutas por ano (Abadi *et al.*, 2016). O uso contínuo provoca a deterioração da geometria da via, exigindo manutenção periódica para restabelecer o alinhamento e nivelamento, garantindo, assim, uma operação segura (Abadi *et al.*, 2022). A manutenção do lastro ferroviário é realizada geralmente por meio de compactação mecanizada, na qual dentes vibratórios são inseridos verticalmente em ambos os lados dos dormentes para compactar o material e aumentar o suporte sob essas bases, Figura 2.

Simultaneamente, trilhos e dormentes são levantados e posicionados conforme o alinhamento e nivelamento planejados, garantindo a estabilidade e durabilidade da estrutura ferroviária (Abadi *et al.*, 2022). Entretanto, tal procedimento é prejudicial ao material por acarretar abrasão, atrito e quebra dos grãos, gerando material pulverulento (Seling e Waters, 1994).

Figura 2 - Máquina socadora compactando quatro dormentes simultâneos

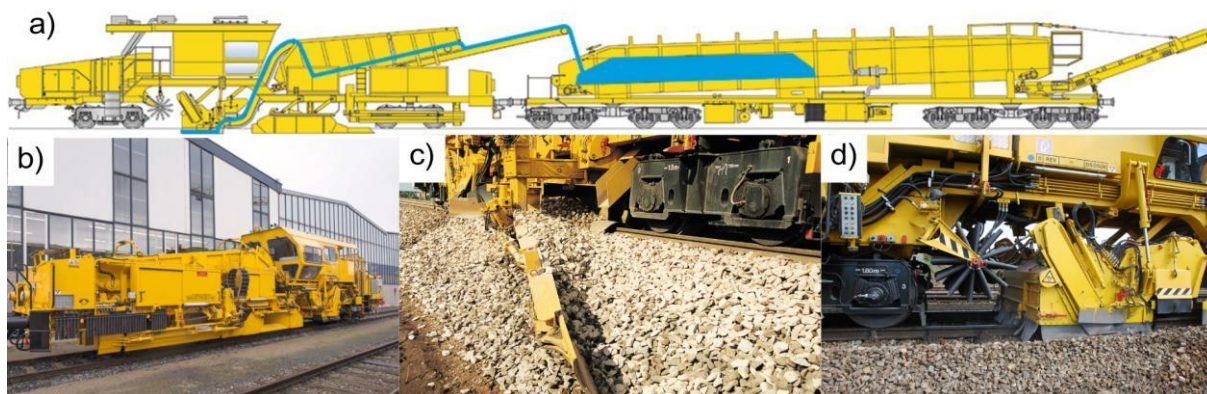


Fonte: (Plasser & Theurer, 2018).

Conforme critérios comumente adotados por empresas ferroviárias brasileiras, considera-se contaminante o material que passa pela peneira de $\frac{3}{4}$ " (19 mm), sendo aceitável que até 5% do material fique retido na peneira de $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm). A contaminação do lastro por materiais finos também ocorre devido colmatação do solo de fundação, como a migração de partículas do subleito. O acúmulo desses finos e o aumento do teor de umidade que eles proporcionam comprometem a resistência do lastro, acelerando a deterioração da via e aumentando a necessidade de manutenção frequente (Qian *et al.*, 2022).

A limpeza do lastro, realizada por máquinas especializadas, como na Figura 3, ao longo de seu ciclo de vida, pode mitigar parcialmente o problema, incorporando uma quantidade de lastro novo para restabelecer a distribuição ideal dos tamanhos de partículas (Abadi *et al.*, 2022). No entanto, a recuperação completa do lastro ainda é necessária quando ele atinge o fim de sua vida útil, especialmente em casos de contaminação elevada com partículas finas, colmatação e redução de sua altura abaixo de 35 cm (Sgavioli *et al.*, 2015).

Figura 3 - Maquinário para limpeza do lastro. a) máquina reguladora e distribuidora de lastro com armazenamento para agregado; b) máquina USP 2010 SWS-U durante trabalho de ajuste no lastro; c) arado lateral; d) dispositivo de vassoura



Fonte: (Plasser do Brasil, 2018a).

A recuperação do lastro degradado é realizada por um processo mecanizado denominado desguarnecimento, que emprega uma máquina desguarnecedora para substituir o lastro antigo por material novo, Figura 4. Essa máquina utiliza um sistema de arado com correntes e correias transportadoras para recolher o material antigo e direcioná-lo a peneiras vibratórias, onde ocorre a seleção granulométrica (Sgavioli *et al.*, 2015; Pires *et al.*, 2017). No desguarnecimento parcial, cerca de 50% do lastro é devolvido à via misturado com material novo, com um consumo médio de 900 m³ de brita por quilômetro (Sgavioli *et al.*, 2015; Pires *et al.*, 2017). Já na recuperação completa, esse consumo aumenta para aproximadamente 2000-2100 m³ por quilômetro (Sgavioli *et al.*, 2015). O desguarnecimento parcial é geralmente realizado a cada 4 anos, enquanto o desguarnecimento total ocorre a cada 8 a 12 anos (Sgavioli *et al.*, 2015).

Figura 4 - Desguarnecimento. a) desguarnecedora bimodal; b) processo de introdução e distribuição de lastro desguarnecido.



b)



Fonte: (Plasser do Brasil, 2018b).

2.1.3 Impacto ambiental das rochas naturais e uso de agregado não-convencional

O lastro ferroviário é tradicionalmente composto por agregados de rochas naturais (Merheb, 2014), o que promove a demanda pela extração mineral para construção e manutenção de ferrovias. Nesse contexto, o uso de brita natural levanta uma série de questões ambientais e técnicas relacionadas à atividade mineradora.

A extração de rochas é considerada uma atividade poluente, pois pode promover perda da cobertura vegetal, assoreamento de corpos hídricos, poluição atmosférica por partículas liberadas no desmonte, alteração do relevo e modificação na estrutura geológica das rochas (Leite *et al.*, 2017). Apesar de serem amplamente utilizadas na construção de lastros ferroviários, as rochas britadas apresentam desafios que impactam diretamente a eficiência e durabilidade das vias férreas, sofrendo degradação e compactação ao longo do tempo (Delgado *et al.*, 2021). Esses processos de degradação podem resultar em assentamentos diferenciais, levando à irregularidade da via, o que aumenta o desgaste dos trilhos e dos veículos que circulam sobre eles (Arulrajah *et al.*, 2020).

Além disso, o lastro ferroviário sofre abrasão contínua devido a cargas repetidas de trens, levando à erosão, o que compromete a estabilidade do lastro e, conseqüentemente, a segurança e a eficiência das operações ferroviárias (Delgado *et al.*, 2021; Liu, Gao e Chen, 2021). Essa também contribui para o crescimento de

vegetação indesejada, que pode comprometer a estabilidade do lastro e interferir no funcionamento ferroviário (Naeini *et al.*, 2020).

Adicionalmente, as rochas britadas podem conter impurezas e apresentar partículas de tamanhos desuniformes, o que afeta a capacidade de suporte do lastro, resultando em afundamentos localizados (Naeini *et al.*, 2020). Essas irregularidades na superfície da via férrea não só aceleram o desgaste dos componentes ferroviários, como também representam um risco à segurança operacional (Arulrajah *et al.*, 2020).

Diante desse cenário, torna-se essencial considerar alternativas ao uso de rocha natural britada no lastro ferroviário. Estudos recentes têm explorado a implementação de novos materiais e técnicas para prevenir a degradação do lastro e aumentar a durabilidade dos trilhos (Arulrajah *et al.*, 2020). O uso de resíduos tem se mostrado uma alternativa promissora, trazendo vantagens tanto em sustentabilidade quanto em desempenho (Indraratna *et al.*, 2024).

Um exemplo é a utilização de borracha de pneus, Figura 5, que tem se mostrado eficaz na redução de vibrações, na quebra de agregados em até 80% e no assentamento em 6% (Qiang *et al.*, 2023; Jarjour e Meguid, 2023). A partir de testes de Abrasão de Los Angeles e análises de imagens 3D para avaliar a degradação do material, Guo *et al.* (2019) constataram que o uso de agregado de borracha reduz a abrasão do lastro. Arachchige *et al.* (2022) e Indraratna *et al.* (2022) investigaram as propriedades dinâmicas do lastro de borracha por meio de cargas cíclicas. Assim, pode-se observar que o sistema se densifica de forma mais eficiente, com uma redução de até 5 vezes na taxa de vazios em comparação ao lastro convencional, resultando em menor deformação axial permanente, maior taxa de amortecimento e maior capacidade de dissipação de energia. Já Indraratna *et al.* (2021) adicionaram uma camada composta por misturas de resíduos com diferentes teores de borracha, em diferentes posições do lastro, observando uma redução na dilatação lateral. Todos os estudos indicam que o teor ideal de borracha é de cerca de 10%.

Figura 5 - Lastro com adição de borracha de pneu



Fonte: (Arachchige *et al.*, 2022).

Naeini *et al.* (2020) investigaram a viabilidade do uso de resíduo de construção civil, especificamente o agregado de concreto (RCA) com adição de até 40% de vidro reciclado e 3% a 5% de plástico para camadas de lastro ferroviário, avaliando rigidez e resistência pelo teste Triaxial de Carga Repetida. O RCA mostrou módulo de resiliência de 50 a 150 MPa, de 1,4 a 1,9 vezes maior que os materiais convencionais, devido ao menor teor de finos. A inclusão de até 5% de plástico reciclado aumentou o módulo de resiliência em 22% em relação ao RCA puro, chegando a ser 45% superior aos agregados tradicionais, atribuído à elasticidade do plástico. O RCA apresentou ângulos de atrito até 20% superiores e tensão desviadora de pico aproximadamente o dobro dos materiais convencionais, enquanto a adição de vidro e plástico reduziu levemente a rigidez, mas manteve a resistência ao cisalhamento acima dos padrões convencionais. A ductilidade e dissipação de energia foram melhoradas com plástico, enquanto vidro reduziu a absorção de energia. Os autores concluíram que RCA com até 20% de vidro e 5% de plástico é viável como substituto superior a agregados convencionais para uso em lastro, com até 40% de vidro sendo indicado para aplicações de menor demanda energética.

Arulrajah *et al.* (2020) investigaram a viabilidade de misturas de plástico recuperado combinadas com RCA e tijolo triturado como lastro ferroviário, analisando propriedades como quebra de partículas, compressibilidade, rigidez e resistência. A adição de 5% de plástico em RCA reduziu a quebra relativa dos agregados em mais de 50% e melhorou significativamente a resistência ao cisalhamento e a capacidade de absorção de energia. Contudo, proporções acima de 5% apresentaram impacto marginal na redução adicional da quebra. As misturas com tijolo triturado mostraram maior quebra relativa, cerca de 1% superior às com RCA, devido à menor resistência

intrínseca do tijolo. Em termos de resistência ao cisalhamento, RCA superou o tijolo triturado em cerca de 33% e ambos os materiais reciclados apresentaram desempenho estrutural superior ao do agregado convencional para lastro ferroviário. A proporção ideal foi identificada como 5% de plástico em RCA e 3% em tijolo triturado, otimizando a redução de quebra relativa e a absorção de energia, mostrando que o uso de resíduos é uma alternativa sustentável e eficiente para aplicações ferroviárias.

2.2 ESCÓRIA DE ACIARIA

Este item abordará a escória de aciaria, explorando suas características que podem impactar seu uso como agregado ferroviário, como as propriedades mecânicas e morfológicas. Além disso, será discutido o processo de carbonatação e a expansibilidade do material, detalhando como esse processo químico ocorre e as formas de estabilização possíveis. Por fim, será analisada a condutividade elétrica da escória.

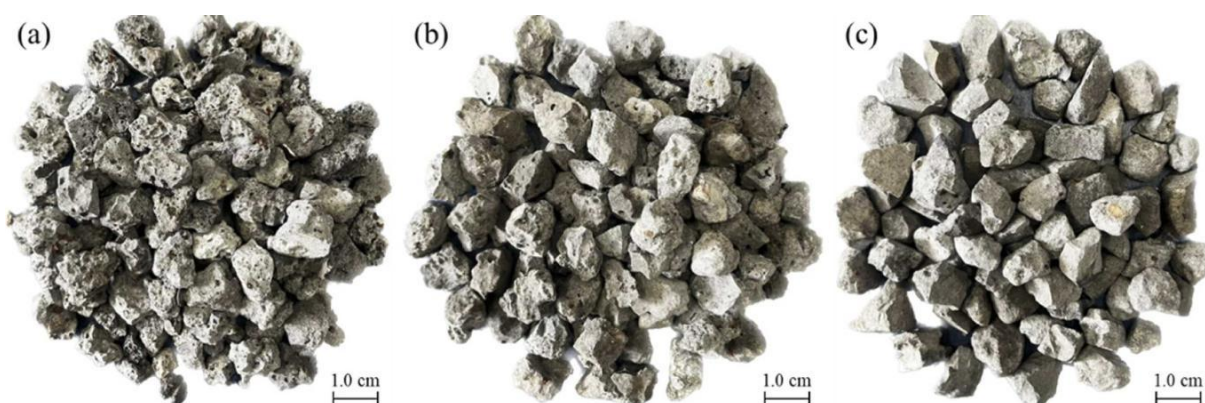
2.2.1 Características da escória de aciaria

A composição e as proporções dos componentes químicos presentes na escória de aciaria variam conforme os processos de produção dos diferentes tipos de aço em cada siderúrgica, o que resulta em um material heterogêneo (Dominguez *et al.*, 2022). Durante a fabricação do aço em conversores a oxigênio, pode ser utilizado cal virgem (CaO) e oxigênio (O₂) para remover elementos indesejados (Polese *et al.*, 2006). Dessa forma, a escória de aciaria é formada pela interação desses elementos com os compostos eliminados do ferro gusa e, por vezes, restos de sucata metálica (Polese *et al.*, 2006). Os componentes da escória podem incluir silicatos de cálcio (Ca₂O₄Si), ferritas (MFe₂O₄), óxidos de ferro (FeO/Fe₂O₃), alumínio (Al₂O₃), óxidos de manganês (MnO/MnO₂), cálcio (CaO), silício (SiO₂) e magnésio (MgO), trióxido de enxofre (SO₃), óxido de cromo (Cr₂O₃), pentóxido de vanádio (V₂O₅), dióxido de titânio (TiO₂) e anidrido fosfórico (P₂O₅). (Xie *et al.*, 2017; Martins *et al.*, 2021). A variação em sua composição química é influenciada, sobretudo, pelo tipo de fundente utilizado no processo siderúrgico, sendo os principais o calcário (CaCO₃) ou a dolomita (CaMg(CO₃)₂) (Fernandes, 2016).

No tocante à mineralogia, a escória de aciaria é composta por fases minerais típicas, como o silicato tricálcico (Ca_3SiO_5 , C_3S), o silicato dicálcico (Ca_2SiO_4 , C_2S), o ferroaluminato tetracálcico ($\text{Ca}_8\text{Fe}_4\text{Al}_4\text{O}_{20}$, C_4AF), o óxido de ferro ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, C_2F), a fase RO (uma solução sólida de FeO-MnO-MgO) e o óxido de cálcio livre (f-CaO) (Martins *et al.*, 2021) (Li *et al.*, 2024). Em termos de composição percentual, estudos relatam que até 80% da escória de aciaria pode ser composta por C_2F e C_3S (Zhang *et al.*, 2023).

As características morfológicas da escória de aciaria incluem um material cúbico (com as 3 dimensões equivalentes), uma superfície áspera e um número significativo de poros de tamanhos distintos (Wang *et al.*, 2023). Porém, o material apresenta variações significativas em sua aparência, sendo classificadas em tipos porosos, menos porosos ou densos com base em suas características visuais (Li *et al.*, 2024), como observado na Figura 6.

Figura 6 - Morfologia da escória de aciaria. (a) poroso; (b) menos poroso; (c) denso



Fonte: (Li *et al.*, 2024).

Em relação às propriedades físicas, destaca-se que as escórias apresentam uma massa específica entre 2,7 e 3,8 g/cm^3 , sendo significativamente superior à dos agregados de rochas naturais, chegando a 30% maior (Olagunju *et al.*, 2023; Martins *et al.*, 2021). Essa elevada massa específica está correlacionada ao alto teor de óxidos metálicos contido nas escórias (Ren e Li, 2023).

O processo de fabricação do aço ocorre em temperaturas extremamente altas e o resfriamento controlado, lento e gradual, da escória permite otimizar sua composição mineral. Esse controle térmico aumenta a atividade de hidratação e melhora as propriedades mecânicas da escória, resultando em um material mais denso e resistente (Li *et al.*, 2024). Essa resistência foi comprovada por meio de testes

laboratoriais, como o de abrasão de Los Angeles, 18,7% e Micro-Deval, 8,4%, já os valores de esmagamento de agregados e valores de impacto de agregados foram 20,5% e 16,1%, respectivamente, superiores ao agregado convencional (Olagunju *et al.*, 2023). Demonstrando a durabilidade e a capacidade desses agregados de suportar cargas elevadas e impactos sem perda significativa de massa, tornando-os adequados para aplicações estruturais exigentes, como no lastro ferroviário (Olagunju *et al.*, 2023).

2.2.2 Carbonatação, expansibilidade e potencial de contaminação ambiental

A carbonatação é um processo químico em que o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH) reage com o CO_2 , levando à formação de carbonato de cálcio (CaCO_3), que pode melhorar a resistência mecânica, preenchendo poros e contribuindo para a coesão da matriz (Kouzehkanan *et al.*, 2023). Na carbonatação completa da escória de aciaria, o hidróxido de cálcio livre (CH) é totalmente transformado. No entanto, em condições de carbonatação parcial, o CH pode persistir em regiões menos expostas, levando a possíveis problemas mecânicos (Wang *et al.*, 2024). Se o CH não é transformado em CaCO_3 , ele permanece em uma forma menos densa e mais suscetível a dissolução em ambientes úmidos (Wang *et al.*, 2024; Librandi *et al.*, 2019). A dissolução do CH pode criar microvazios ou aumentar a porosidade local, gerando zonas de fraqueza estrutural (Librandi *et al.*, 2019).

Para medir o CH livre após a carbonatação da escória de aciaria, várias metodologias podem ser empregadas, com foco nas mudanças mineralógicas e químicas que ocorrem durante o processo de carbonatação. Assim, a quantificação de CH livre pode ser feita por difração de raios-X com refinamento de Rietveld, análise térmica diferencial, termogravimetria e etilenoglicol (Biffen, 1956; El-Jazairi e Illston, 1977; Midgley, 1979; Fordham e Smalley, 1985; Bhatti, 1991; Sousa, 2007). Sendo o método mais recomendado por diversos autores a análise termogravimétrica (Biffen, 1956).

A adoção de uma rota de carbonatação baseada na tecnologia de captura, utilização e armazenamento de carbono permite reduzir o potencial de aquecimento global em até 480% em comparação ao processo convencional de brasagem a quente, alcançando um saldo de $-76,78$ kg de CO_2 eq. por tonelada de escória de

aciaria (Li *et al.*, 2024). Contudo, é fundamental considerar as etapas de beneficiamento da escória, que serão discutidas posteriormente.

Uma dificuldade no uso da escória como agregado para lastro ferroviário é a possibilidade de expansão do material, exemplificado na Figura 7. A escória de aciaria está sujeita a reações expansivas devido à presença de compostos volumetricamente instáveis, em especial o CaO e do MgO livres, que reagem com o ambiente por meio de processos de hidratação, oxidação e transformação mineralógica (Dayrell, 2013) (Inoue *et al.*, 2021).

Figura 7 - Bloco de pavimentação produzido com escória de siderurgia sem tratamento



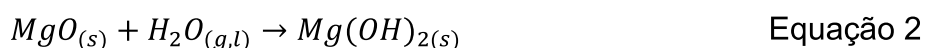
Fonte: (Silva *et al.*, 2016).

O CaO, ao se hidratar, forma o Ca(OH)_2 , indicado na Equação 1, aumentando significativamente o volume molar em até 99%, o que causa tensões internas e pode levar à pulverização do material. A cal livre, que pode atingir até 7% do total, é o principal fator de instabilidade dimensional das escórias, sendo mais reativa em partículas esponjosas de até 50 μm . Sua reatividade depende do tamanho dos grãos, temperatura e umidade, sendo menor quando fabricada acima de 1000°C devido à formação de cristais mais densos. Estudos recomendam limitar o teor de cal livre a no máximo 5-7% para garantir a durabilidade das aplicações das escórias (Weast, 1971; Sbrighi e Battagin, 2002; Machado, 2000; Geiseler e Schlosser, 1988; Fernandes, 2010; Cao *et al.*, 2024; Amaral, 1999).



A adição de dolomita no refino do aço, embora necessária para proteger o revestimento refratário do forno, introduz MgO na escória de aciaria, que ao hidratar-se lentamente forma brucita (Mg(OH)_2), com aumento volumétrico de 119,5%,

exemplificado na Equação 2. O MgO na escória pode estar combinado, em solução sólida ou na forma livre (periclásio), sendo esta última a principal responsável pela expansão, especialmente em teores acima de 3%, comuns na maioria das siderúrgicas. A hidratação do periclásio ocorre de forma lenta, devido à sua estrutura cristalina, podendo levar semanas ou anos, causando instabilidade volumétrica prolongada. A expansão é influenciada por fatores como umidade, temperatura, teor de CO₂ e tamanho dos cristais, sendo mais severa em cristais grandes, formados durante resfriamento lento, que aumentam significativamente o volume do hidróxido formado (Weast, 1971; Amaral, 1999; Machado, 2000; Sbrighi e Battagin, 2002; Fernandes, 2010).



A expansão volumétrica das escórias de aciaria é influenciada pela oxidação e corrosão do ferro metálico retido durante o sopro de oxigênio ou vazamento do aço líquido, mesmo após a separação magnética, as reações se encontram na Tabela 3. Esse ferro, presente em cerca de 15% a 20% da composição da escória, pode gerar variações de volume de 77% a 329% devido à transformação de ferro metálico (Fe⁰) em íons ferroso (Fe²⁺) e férrico (Fe³⁺), bem como óxidos mistos como Fe₃O₄. Essas reações, associadas ao alto teor de ferro bivalente (FeO) e à proporção MgO/(FeO + MnO), influenciam a estabilidade das fases cristalinas. Quando a razão é maior que 1, a fase periclásio se torna instável, enquanto razões menores favorecem a formação de wüstita ou Mg-wüstita, que possuem maior estabilidade, mas não predominam na composição típica das escórias de aciaria (Fernandes, 2010; Zhao *et al.*, 2023; Lee e Lee, 1995).

Tabela 3 - Produtos originados a partir das reações de oxidação e corrosão do ferro metálico

Reações de Oxidação	
$Fe^0 + 1/2O_2 \rightarrow FeO$	Wüstita
$2Fe^0 + 3/2O_2 \rightarrow Fe_2O_3$	Hematita
$3Fe^0 + 2O_2 \rightarrow Fe_3O_4$	Magnetita
Reações de Corrosão	
$Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$	Hidróxido ferrosol
$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$	Hidróxido férrico

Fonte: (Fernandes, 2010), adaptado.

A expansão volumétrica da escória de aciaria também é influenciada pela transformação alotrópica do silicato dicálcico (C_2S), que ocorre em diferentes fases (α , α' , β e γ) e está associada a alterações significativas no sistema cristalino. A transição de α - C_2S para α' - C_2S reduz o volume em 8%, enquanto as mudanças para β - C_2S e γ - C_2S aumentam o volume em 1% e 10,4%, respectivamente, sendo esta última a mais prejudicial à estabilidade volumétrica devido ao significativo incremento de volume e redução da simetria molecular, agravando os efeitos expansivos do CaO e MgO presentes na escória. Na Tabela 4, podem ser observados os parâmetros mais relevantes que controlam a expansão da escória de aciaria (Machado, 2000; Sbrighi e Battagin, 2002; Fernandes, 2010).

Tabela 4 - Principais fatores que controlam a expansão da escória

Espécies Químicas	Fatores que Influenciam na Expansão	Mecanismo
CaO e MgO	Teor da espécie no estado livre Umidade Temperatura Teor de CO_2 Tamanho dos grãos da escória	Hidratação
Fe⁰	Teor de Fe ⁰ Umidade Tempo de exposição ao ar Teor de oxigênio no resfriamento Tamanho dos grãos da escória	Oxidação
C₂S	Velocidade de resfriamento Impurezas iônicas Temperatura de resfriamento Basicidade das escórias	Transformação Alotrópica

Fonte: (Fernandes, 2010).

Dentre as formas de estabilização da escória e diminuição de sua capacidade expansiva, alguns autores sugerem alterações no processo de escorificação. Durante a fabricação do aço são adicionados CaO e oxigênio (O_2) para eliminação de impurezas e dolomita para proteção do revestimento refratário do forno (Polese *et al.*, 2006), que são os principais responsáveis por sua expansão posterior (Baricová *et al.*, 2018). Uma opção para mitigar esse processo expansivo seria reduzir o tamanho das partículas de cal virgem ou dolomita inseridas no convertedor, com o objetivo de promover uma dissolução mais eficiente e uma reação completa, minimizando o conteúdo de CaO e MgO livres na escória de aciaria (Geyer, 2001).

Outra forma de estabilização da escória de aciaria é através da cura ou envelhecimento. Nesse processo, logo após o resfriamento, a escória passa por processos de britagem e separação magnética, onde a fração metálica é retornada à siderúrgica e a fração não-metálica, escória, é separada (He, Hu e Chou, 2022). Em seguida, a escória é estocada ao ar livre permitindo que o intemperismo atue no material (Jing, Mingyang e Feng, 2019). Esse processo favorece a hidratação e estabilização dos óxidos livres previamente à aplicação, promovendo a redução de reações expansivas indesejadas (Moliné, Martinez e Galliano, 2021).

No Brasil, de acordo com as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), o tempo convencionado para que a escória fique estocada ao ar livre é de 6 meses (Silva *et al.*, 1988). Entretanto, o tempo seguro para estabilização está diretamente ligado às concentrações de óxidos que não reagiram, às propriedades físicas e químicas específicas de cada tipo de escória, além das características geométricas das pilhas de armazenamento e das condições ambientais do local onde o processo de tratamento é realizado (Fernandes, 2016).

O processo de estabilização pode ser acelerado por meio do envelhecimento a vapor e de umectação. O processo a vapor acelera a hidratação e reduz os problemas de expansão da escória, tanto nova quanto envelhecida, permitindo que o tempo de cura seja reduzido para poucos dias (Wang, Liu e Lee, 2013). Nesse sentido, Fernandes (2010) desenvolveu um método de estabilização química que envolveu a aplicação de uma metodologia de umectação temporizada das pilhas de escória, utilizando um sistema de aspersão, aliado ao método de vapor para acelerar a hidratação dos óxidos de CaO e MgO. As pilhas foram monitoradas por sensores para controlar temperatura, umidade e teor de CO₂. Segundo o autor, em 90 dias, a escória foi transformada em um material inerte e não perigoso.

As escórias podem ser analisadas com base na norma ABNT NBR 10004 (2004), que regulamenta a classificação ambiental de resíduos sólidos. De acordo com a ABNT NBR 10004/04, os resíduos são classificados em:

- a. Classe I: Perigosos, considerando propriedades como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- b. Classe II: Não perigosos, subdivididos em:
 - o II A - Não inertes: Resíduos com características de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilização em água destilada.

- II B - Inertes: Resíduos que apresentam baixo grau de solubilização em água destilada.

A escória de aciaria é geralmente classificada como Classe II B, ou seja, um material não perigoso e inerte (Almeida, Vieira e Delaqua, 2019; Oliveira *et al.*, 2018). No entanto, em algumas circunstâncias, pode ser classificada como Classe II A – não perigoso e não inerte. Isso ocorreu, por exemplo, no estudo de Fernandes (2010), em que a escória não passou por processos de estabilização, e no trabalho de Silva *et al.* (2016) em que a rega diária do material por 90 dias não foi suficiente para atender aos parâmetros de solubilidade. Apesar dessas variações, em ambos os casos, a escória não apresentou características perigosas, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade (ABNT, 2004).

2.2.3 Resistividade elétrica

A condutividade elétrica (σ) é a capacidade de um material em conduzir corrente elétrica, sendo determinada pelo movimento de portadores de carga, como elétrons em metais ou íons em eletrólitos (Bahuguna *et al.*, 1998). Essa propriedade é influenciada por fatores como a concentração iônica, onde uma maior quantidade de íons na solução disponibiliza mais portadores de carga, e pela temperatura, que ao aumentar, facilita o movimento dos íons devido à redução da viscosidade do meio (Mizuhata, 2022; Mandal, 2014; Avni *et al.*, 2022). Além disso, a composição mineralógica também desempenha um papel importante, pois minerais como sulfetos, incluindo magnetita e pirita, contribuem para o aumento da condutividade elétrica (Wang *et al.*, 2024; Dai *et al.*, 2019). A presença de água ou salmoura nos poros do material reduz a resistividade, ampliando a capacidade de condução elétrica (Lu *et al.*, 2019). Na pesquisa de Sousa (2007), a condutividade de agregados de escória de aciaria, após tratamento com cura submersa por 90 dias, variou entre 150 e 200 $\mu\text{S/cm}$.

A resistividade elétrica (ρ) é uma propriedade intrínseca que quantifica a intensidade com que um material se opõe ao fluxo de corrente elétrica. Ela é definida pela resistência elétrica (R) multiplicada pela área da seção transversal do condutor (A) e dividida pelo comprimento do condutor (L), conforme apresentado na Equação 3, sendo expressa em ohm-metros ($\Omega \cdot \text{m}$) (El-Shahat, 2017). Quanto menores os valores de resistividade, maior a condutividade do material (El-Shahat, 2017).

Considerando que a condutividade elétrica é o inverso da resistividade, Equação 4, os valores de condutividade elétrica encontrados na pesquisa de Sousa (2007), de 150 e 200 $\mu\text{S/cm}$, correspondem a resistividades de 66,67 e 50 $\Omega \cdot \text{m}$, respectivamente.

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad \text{Equação 3}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{Equação 4}$$

O uso de escória de aciaria como lastro ferroviário apresenta vantagens e desafios, particularmente em relação à sua resistência elétrica. Embora a escória ofereça benefícios em sua utilização como lastro, suas propriedades condutoras podem interferir nos sistemas de sinalização ferroviária, especialmente em condições úmidas (Sousa, 2007). Nos sistemas ferroviários, uma corrente elétrica de baixa intensidade é enviada pelos trilhos para comunicação e monitoramento da via. Quando os trilhos estão intactos e bem alinhados, essa corrente circula sem interrupções, permitindo que o sistema identifique se a via está ocupada ou livre. Entretanto, se houver uma interrupção no fluxo de corrente, como quando o circuito é aberto, isso pode ser interpretado como um possível desalinhamento ou escorregamento dos trilhos, indicando um problema estrutural. Nesse cenário, a presença de materiais condutores, como a escória de aciaria, pode criar "caminhos alternativos" para a corrente, gerando leituras erradas. Isso leva o sistema a identificar a via como ocupada, mesmo que não haja nenhum trem presente, resultando em falsos alarmes e potenciais interrupções no tráfego ferroviário (Sousa, 2007).

A condutividade elétrica da escória depende da quantidade de íons condutivos e da resistência à migração de íons na escória (Pang *et al.*, 2019). Sendo a migração de íons determinada pela viscosidade da escória no estado fundido, apresentando tanto propriedades líquidas quanto estruturais, onde uma alta viscosidade resulta em alta resistência elétrica (Pang *et al.*, 2019).

Para reduzir a condutividade elétrica da escória de aciaria, vários ajustes de composição e técnicas de processamento podem ser empregados. Aumentar o teor de Al_2O_3 de 16% para cerca de 24% reduz a condutividade elétrica da escória porque o aumento do teor de Al_2O_3 promove a polimerização da rede estrutural da escória. Isso significa que há mais ligações químicas entre os tetraedros $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$, formando uma estrutura mais complexa e menos móvel (Pang *et al.*, 2019). Outra abordagem envolve aumentar a complexidade estrutural, grau de organização e

conectividade das unidades estruturais dentro da matriz fundida, de escórias à base de silicato a partir da promoção de maior polimerização da rede de tetraedros (Pang *et al.*, 2019).

Ao utilizar a escória de aciaria como agregado para lastro ferroviário, sua resistência elétrica é significativamente influenciada pela pulverulência do material, devido à interação entre os finos e a água. O excesso de finos, que na escória possuem propriedades cimentantes, pode resultar na colmatação da camada de lastro (Thanushan, Milojan e Kurukulasuriya, 2020). Esse preenchimento dos vazios e a subsequente solidificação comprometem a drenagem da água, aumentando a retenção de umidade e, conseqüentemente, a condutividade elétrica (Thanushan, Milojan e Kurukulasuriya, 2020).

No entanto, a movimentação das partículas finas e seu acúmulo abaixo da camada de lastro, como ilustrado na Figura 8, é capaz de formar uma camada impermeabilizante sobre o sublastro ou leito. Apesar de prejudicar a drenagem, essa ação cimentante pode contribuir para a proteção das camadas inferiores e para a melhoria da distribuição de cargas. Não foram encontrados trabalhos avaliando esse potencial cimentante da escória.

Figura 8 - Finos no fundo do lastro



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

A condutividade elétrica da água, em condições naturais, é inferior a $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ (equivalente à resistividade de $100 \Omega \cdot \text{m}$) (Libâneo, 2010). No caso da água da chuva, os valores variam entre 4,12 e $29,30 \mu\text{S}/\text{cm}$ (equivalente às resistividades de $2427,2 \Omega \cdot \text{m}$ e $341,312.2 \Omega \cdot \text{m}$, respectivamente) (Santos e Gastmans, 2016). Além disso, a pulverulência aumenta a área superficial do material, intensificando a adesão da água

por tensão superficial, o que também contribui para elevações na condutividade elétrica (Delgado *et al.*, 2022).

Além da umidade, a contaminação do lastro por minério de ferro constitui outro fator relevante na modificação da condutividade elétrica do material. Esse efeito está associado principalmente à introdução de partículas finas ricas em óxidos de ferro, que alteram a microestrutura do meio granular, reduzem o volume de vazios e aumentam a área de contato entre os grãos, favorecendo a formação de caminhos condutivos, especialmente na presença de água (Udo *et al.*, 2018; Carmignano *et al.*, 2021). Adicionalmente, minerais como hematita e magnetita apresentam condutividade elétrica superior à dos silicatos predominantes na brita natural, contribuindo para a redução da resistividade do conjunto quando dispersos no lastro (Vella e Emerson, 2012; Alves *et al.*, 2019).

2.3 ESTADO DA ARTE

2.3.1 Cura e expansão da escória para uso em lastro ferroviário

O uso da escória de aciaria como lastro ferroviário tem ganhado força devido às suas propriedades físicas e mecânicas vantajosas, que se alinham às metas de sustentabilidade das empresas. Pacheco (2006) conduziu uma série de ensaios físicos, químicos, microestruturais, ambientais e de expansibilidade em amostras de escória de aciaria coletadas de 15 siderúrgicas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, visando estabelecer normas e padrões que viabilizassem seu uso no setor ferroviário. Os resultados demonstraram que as propriedades físicas da escória atendiam aos requisitos normativos para lastro ferroviário, como massa específica, resistência ao desgaste (ensaio de abrasão Los Angeles), resistência ao impacto (método TRETÓN) e índice de forma, de acordo com a NBR 5564. Foi constatado que alguns valores superam os limites de absorção de água e porosidade em comparação ao padrão exigido (menor que 1% para ambas as propriedades), com valores variando de 0,54 a 4,48% e 1,37 a 6,88%, respectivamente. Em relação à expansibilidade, o tempo de estocagem se mostrou eficiente para limitar a variação volumétrica da escória, com expansão acumulada aos 14 dias nas amostras atingindo uma média 2,44%, mantendo-se abaixo do limite de 3% recomendado pelo DER-MG.

Fernandes (2010) desenvolveu e implementou uma metodologia de estabilização química da escória de aciaria LD visando seu uso como lastro ferroviário

em vias sinalizadas. A proposta incluiu a definição de um processo de cura no pátio de beneficiamento da escória, para hidratação e carbonatação, utilizando pilhas de 2 metros de altura umectadas com aspersores e instrumentadas com sensores para monitorar molhamento foliar, temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e teor de dióxido de carbono. Foram montadas duas pilhas experimentais: a EH1, submetida apenas à hidratação, e a EH2, submetida à hidratação e à carbonatação. Além disso, uma pilha controle, exposta às intempéries, foi incluída para monitorar o processo de estabilização natural, conforme a metodologia tradicionalmente adotada pela siderúrgica, Figura 9.

Figura 9 - Pilhas de escória de aciaria para tratamento. a) EH1, submetida apenas à hidratação; b) EH2, submetida à hidratação e à carbonatação; e c) controle (estabilização natural sob as intempéries)



Fonte: (Fernandes, 2010).

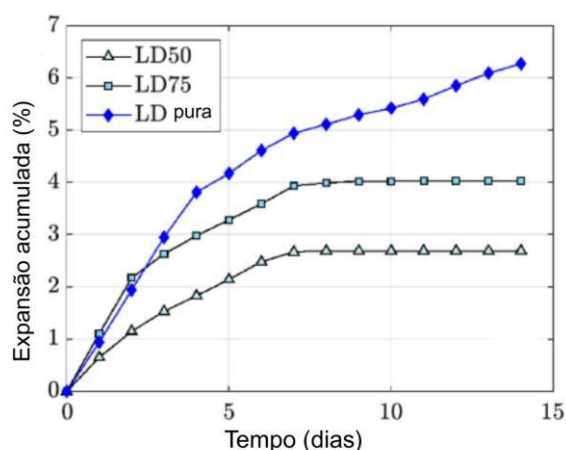
Durante um período de 180 dias, Fernandes (2010) fez um monitoramento do teor de cal livre e da expansibilidade das pilhas de escória, com campanhas de campo para caracterizações químicas, físico-mecânicas e ambientais antes e depois do processo de estabilização. Os resultados indicaram que as metodologias propostas para as pilhas EH1 e EH2 foram eficazes em reduzir o teor de cal livre, com a escória classificando-se como resíduo IIB (não perigoso - inerte), em contraste com a escória não-estabilizada (controle), que foi classificada como resíduo IIA (não perigoso - não inerte).

Ainda na pesquisa de Fernandes (2010), análises de difração de raios X revelaram que as pilhas EH1 e EH2, estabilizadas por hidratação e carbonatação, continham compostos hidratados que reduziram significativamente o potencial de expansão. Em contraste, a pilha controle apresentou fases mineralógicas não hidratadas, propensas a expansão. Análises químicas indicaram uma redução na massa de diversos óxidos,

como CaO e MgO, nas amostras estabilizadas, corroborada por observações em microscopia eletrônica de varredura. No ensaio de expansão PTM-130, o valor inicial de expansão (tempo 0) foi de 7,81%. Aos 75 dias de monitoramento, as expansões registradas foram de 0,78%, 0,44% e 5,69% para as pilhas EH1, EH2 e controle, respectivamente. Assim, no ensaio de expansão, as pilhas EH1 e EH2 exibiram uma redução significativa nos valores de expansão, permanecendo abaixo do limite normativo de 3%. Em contraste, a pilha controle apresentou uma redução mais modesta, possivelmente atribuída à precipitação durante o monitoramento, que pode ter desencadeado uma hidratação parcial. Esses resultados destacam a eficácia dos processos de estabilização na minimização da expansão e no aprimoramento das propriedades do material.

Considerando a aplicabilidade dos subprodutos do aço Linz–Donawitz (escória de aciaria), alto-forno e Reator Kambara como uma única camada de base para estradas rurais não pavimentadas no Brasil, Schumacher *et al.* (2022) conduziram uma série de experimentos laboratoriais para avaliar as características de misturas solo-subproduto com teores de 50% e 75%. Entre os ensaios realizados, destaca-se o ensaio PTM para a escória de aciaria, que apresentou uma expansão de aproximadamente 6% após 14 dias, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Porcentagem de expansão da escória de aciaria.

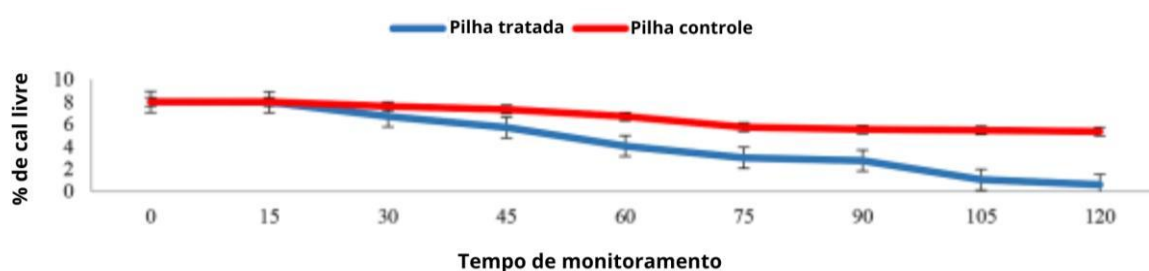


Fonte: adaptado (Schumacher *et al.*, 2022)

Fernandes, Cosme e Fernandes (2020) submetem a escória de aciaria BOF a estabilização química a partir da hidratação e carbonatação do material. Por meio de aspersores conectados a uma bomba hidráulica, o material, disposto em forma de

pilha em um pátio a céu aberto, era molhado durante sete minutos a cada 30 minutos. As análises foram feitas em duas pilhas de material recém produzido, uma exposta ao ar que apenas recebia água da chuva (controle) e uma coberta por lona a água do sistema hidráulico. A escória passou por um tratamento ao longo de quatro meses, com amostras coletadas quinzenalmente em ambas as pilhas. O controle do processo de expansão foi realizado através de um ensaio PTM-130 adaptado e de análises de teor de cal livre. Observa-se que, ao longo de todo o período de monitoramento, os materiais mantiveram temperaturas elevadas, o que contribuiu favoravelmente para a cinética de hidratação e as reações de carbonatação presentes nos materiais estudados. Durante toda a campanha foram realizadas medições do teor de CO₂ presente no material em análise, encontrando uma queda no teor de CO₂ presente no interior da pilha de escória tratada, devido à carbonatação dela. Para a pilha de controle, não foram registrados valores que apontassem para uma possível reação de carbonatação da escória, reforçando a necessidade de umedecimento adequado para estabilizar os óxidos. Destaca-se que a amostra tratada atendeu ao limite de 3% de cal livre recomendado pela AREMA e normas internacionais, como JIS A 5015 e BS EN 1744-1. Além disso, o processo de estabilização foi rápido: após 4 meses de tratamento, a amostra tratada apresentou teor de cal livre inferior a 1%, enquanto a amostra controle ainda registrava mais de 5%, como observado na Figura 11.

Figura 11 - Porcentagem de teor de cal livre no período de monitoramento.

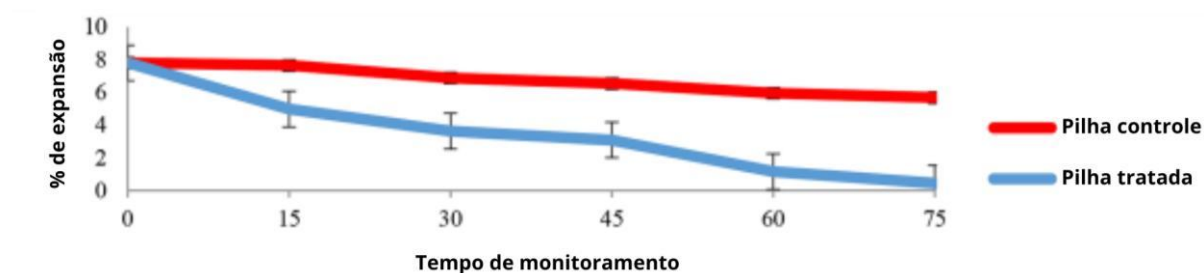


Fonte: (Fernandes, Cosme e Fernandes, 2020), adaptado pela autora.

No ensaio PTM-130 realizado por Fernandes, Comes e Fernandes (2020), os resultados mostraram que tanto a escória da pilha tratada quanto a de controle apresentaram alta expansão nos primeiros quatorze dias de medições. No entanto, à medida que o tratamento com hidratação e carbonatação progrediu, o comportamento expansivo do material foi reduzido, e após 45 dias, os índices de expansão da pilha tratada ficaram dentro do limite normativo de 3%, Figura 12. Por não ter passado por

tratamento específico e apenas ter sido exposto às condições climáticas locais, como a precipitação, o material de controle não mostrou alteração relevante em seu comportamento expansivo. Assim, ao final do período de monitoramento de 75 dias, o material apresentou uma expansão de 5,69%, excedendo o limite estabelecido pela norma.

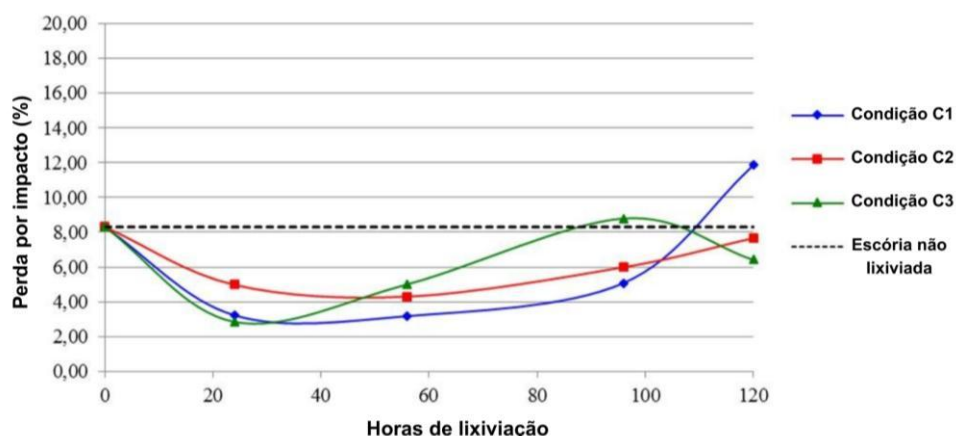
Figura 12 - Monitoramento do teste PTM-130/78



Fonte: (Fernandes, Cosme e Fernandes, 2020), adaptado pela autora.

O estudo de Guimarães *et al.* (2021) investiga as propriedades físicas, químicas e mecânicas da escória de aciaria após a realização de um ensaio de lixiviação controlada utilizando um extrator Soxhlet, com o objetivo compreender a influência do processo de lavagem no comportamento do material. No experimento, a escória foi submetida, em ambiente laboratorial, a uma simulação de precipitação no equipamento Soxhlet, sendo analisada em diferentes intervalos de tempo (24, 56, 96 e 120 horas). Os resultados indicaram que, após a lixiviação controlada, a escória manteve suas propriedades físicas sem perdas significativas. Os ensaios de expansão mecânica demonstraram uma redução progressiva no potencial expansivo da escória ao longo dos períodos avaliados, conseguindo atingir até 0% de expansão após 120 horas. Além disso, o ensaio Treton revelou que a perda por impacto diminui nas primeiras horas de lixiviação, mas apresenta uma tendência de crescimento em tempos mais longos, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Gráfico mostrando o impacto de Treton em função do tempo de lixiviação. Sendo C1 lixiviado superior, C2 lixiviado médio e C3 lixiviado inferior.



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

2.3.2 Resistividade

Sousa (2007) conduziu uma investigação detalhada sobre as propriedades químicas, físicas, mecânicas, ambientais, de resistividade e condutividade elétrica das escórias de aciaria, com foco em seu desempenho em ferrovias sinalizadas, especialmente devido ao risco de “ocupação fantasma” da via em condições de chuva intensa. Para monitorar a fuga de corrente no lastro siderúrgico, onde o material estava em uso há três anos, sensores de tensão foram instalados nos trilhos, dormentes e placas de cobre, complementados por instrumentos que registravam umidade, temperatura e índice de precipitação ao longo de seis meses.

Para determinar a resistividade elétrica, Sousa (2007) analisou amostras armazenadas por seis meses e entre nove e 12 meses em seis simuladores de dois metros, empregando um megôhmetro para medições em lastro seco e molhado, como exemplificado na Figura 14. Os resultados indicaram que, em períodos de chuva intensa, a tensão entre os trilhos caía substancialmente, ocasionando fechamento de relé e sinalizando possível ocupação fantasma. Em condições secas, para uma tensão de 500V, a resistividade manteve-se acima de 300 $\Omega \cdot m$ (equivalente à condutividade de 3333,33 $\mu S/cm$), conforme o valor recomendado pela AREA (American Railway Engineering Association); no entanto, em ambiente úmido, ela caiu abaixo do limite mínimo aceitável. Observou-se também que dormentes de madeira, por absorverem mais umidade, tornaram-se condutores elétricos, ao contrário dos dormentes de aço, que mantinham bom isolamento.

Figura 14 - Resistividade elétrica do trilho medida por megômetro



Fonte: (Sousa, 2007).

Em outra etapa, uma caixa-teste foi utilizada para imersão das amostras em água, permitindo a medição da condutividade ao longo de 90 dias, Figura 15. Os testes de cura revelaram que a condutividade da escória diminuiu ao longo dos 90 dias, chegando a cerca de $150 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($15.000 \mu\text{S}/\text{m}$) (equivalente à resistividade de $66,67 \Omega \cdot \text{m}$), embora houvesse fragmentação e expansão do material. Sousa (2007) concluiu que a resistividade da escória é três vezes menor que a das rochas naturais e recomenda a cura adequada, usando pilhas menores e aspersão frequente, para minimizar paradas no tráfego ferroviário devido à potenciais ocupações fantasma.

Figura 15 - Caixa-teste para avaliação dos efeitos da cura nas escórias de aciaria



Fonte: (Sousa, 2007).

Dayrell (2013) conduziu uma investigação laboratorial sobre a estabilização química da escória de aciaria LD em fase líquida, com o objetivo de aprimorar suas propriedades ambientais e geotécnicas para aplicação potencial como lastro ferroviário. A pesquisa iniciou com a caracterização da escória em seu estado recém-

produzido. Posteriormente, o material foi reduzido a pó, homogeneizado e fundido, combinando-se com adições de areia, argila, bentonita e dois tipos de lamas residuais. Esses argilominerais foram selecionados devido à semelhança química com a escória e à sua ampla disponibilidade. A adição de sílica visou neutralizar o CaO livre, resultando na formação de compostos estabilizados. As misturas obtidas foram submetidas a uma série de análises microestruturais, incluindo avaliações químicas, físicas, mineralógicas, morfológicas e ambientais. A escória de aciaria apresentou uma condutividade elétrica inicial de cerca de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (10.000 $\mu\text{S}/\text{m}$) (equivalente à resistividade de 100 $\Omega\cdot\text{m}$) no primeiro dia de ensaio. No entanto, antes de completar 90 dias, essa condutividade diminuiu significativamente, atingindo níveis compatíveis com a água potável, considerada como 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, em aproximadamente 25 dias, representando uma redução de 90% em relação ao valor inicial. Embora inicialmente estável, a escória recém-produzida começou a apresentar expansão significativa a partir do terceiro dia de ensaio, com um aumento contínuo até o 14º dia, atingindo uma expansão final de 5,09%. Entretanto, os resultados mostraram que a adição controlada de aditivos foi eficaz em alterar as propriedades da escória, tornando-a não expansiva e isolante.

No trabalho de Fernandes (2016), foi investigada a estabilização química de óxidos instáveis através da fusão de agregados siderúrgicos em fase líquida com refratário de coqueria cominuído. O material estabilizado foi triturado e caracterizado em termos de suas propriedades físicas, mecânicas, químicas, ambientais e elétricas, com foco em sua aplicação como lastro ferroviário. Para testar a condutividade elétrica, foi desenvolvida uma caixa-teste representando uma seção transversal de ferrovia. Essa estrutura de madeira, revestida com membrana plástica, possuía dimensões de 2,2 m de comprimento, 1,2 m de largura e 0,5 m de altura, sendo preenchida com agregado siderúrgico estabilizado na fase líquida e com água até cobrir o nível do material, apresentado na Figura 16. O ensaio, com duração de 90 dias, foi planejado para avaliar o impacto do tratamento aplicado sobre a condutividade elétrica do lastro. Durante o período de teste, a água foi drenada a cada seis dias, sendo reabastecida após 24 horas, garantindo condições controladas de avaliação.

Figura 16 - Caixa-teste para ensaios de condutividade do material



Fonte: (Fernandes, 2016).

Conforme o processo prosseguiu, observou-se uma redução gradual nos índices de condutividade do material, diminuindo a cada ciclo de drenagem da água. Em todo o período de monitoramento, os valores de condutividade permaneceram abaixo de $500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ($50.000 \mu\text{S}/\text{m}$) (equivalente à resistividade de $20 \Omega \cdot \text{m}$), indicando ausência de contaminação da água por sais. O pH da água manteve-se entre 8 e 10,5 em todos os ciclos, sem sinais de contaminação. Com base nesses resultados, conclui-se que a amostra, ao ser usada como lastro em ferrovias sinalizadas, não deverá gerar eventos de falsa ocupação, pois não dispersa corrente elétrica em condições de chuva.

Em âmbito internacional, Trykoz *et al.* (2016) examinou a condutividade elétrica de amostras compostas por solo argiloso misturado com escória (ácida e básica), variando a proporção de escória de 0% a 50% em relação à massa do solo. As amostras foram submetidas à saturação em água destilada, sendo agitadas até atingir um equilíbrio na condutância elétrica da solução. A estabilização foi monitorada por medições periódicas da condutância elétrica, capacidade do material em permitir a passagem de corrente elétrica, em um recipiente específico. Observou-se que, enquanto o aumento da proporção de escória básica reduz em 47,37% a condutância específica, a adição de escória ácida provoca um aumento de 184,62% desse parâmetro. Os resultados mostraram que a condutância desses sistemas

multicomponentes depende mais significativamente da composição química da escória do que de sua quantidade.

2.3.3 Propriedades mecânicas

Chamling, Haldar e Patra (2020) investigaram a viabilidade do uso de escória de aciaria como material para lastro ferroviário, destacando suas propriedades técnicas e ambientais. Os autores constataram que os agregados de escória possuem excelente resistência à abrasão, impacto e esmagamento, Tabela 5, características essenciais para a aplicação em lastros. A análise de metais pesados lixiviáveis indicou que a escória não apresenta riscos ambientais significativos, classificando-a como resíduo sólido inerte, conforme especificações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA). Testes cíclicos revelaram que a rigidez do lastro aumenta com a passagem dos trens, pois tanto o módulo de resiliência quanto a deformação axial permanente se estabilizam após 5.000 ciclos de carga. Além disso, o módulo de resiliência da escória de aciaria é superior ao dos agregados naturais, permitindo a redução da espessura do lastro sem comprometer o desempenho estrutural. Todas as propriedades técnicas avaliadas atendem aos limites estabelecidos por especificações internacionais, incluindo Estados Unidos, Reino Unido, Austrália e Índia. Com base nessas evidências, os autores recomendam que a escória de aciaria seja considerada uma alternativa viável e sustentável para substituir agregados naturais como material de lastro ferroviário.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas da escória de aciaria e do agregado natural com diferentes especificações

Propriedades	Escória de aciaria	Agregado natural	Especificações para lastro nos principais países			
			EUA	Reino Unido	Austrália	Índia
Abrasão Los Angeles (%)	16	17	< 30	< 24	< 25	< 30
Valor agregado de britagem (%)	21	25	-	< 22	< 25	-
Valor de impacto (%)	18	22	-	-	-	< 20

Fonte: (Chamling, Haldar e Patra, 2020), adaptado.

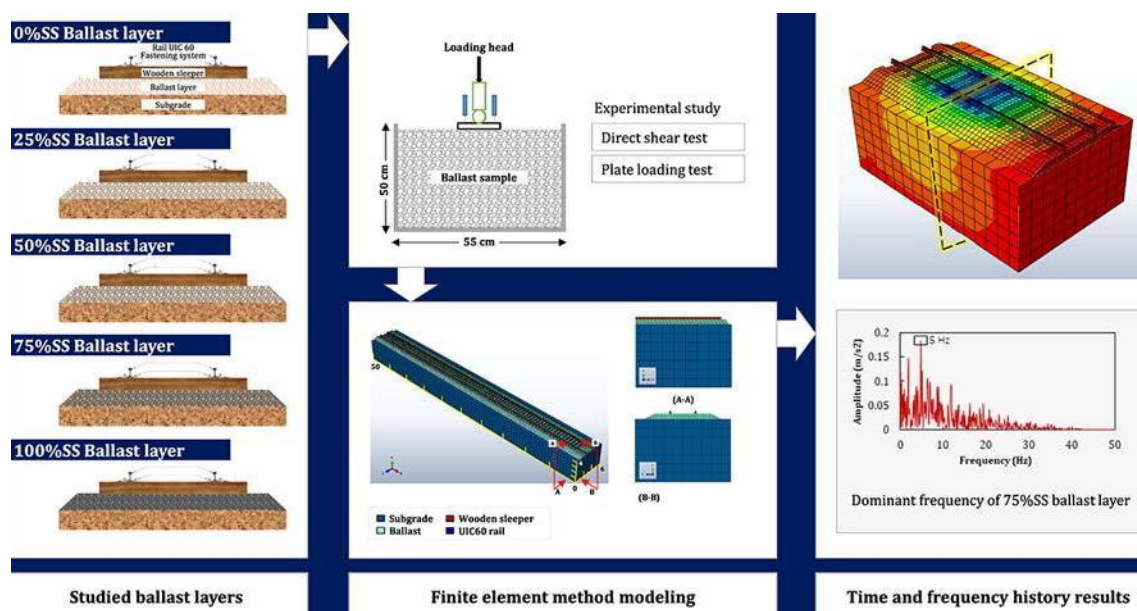
Koh *et al.* (2018) investigaram a viabilidade do uso da escória BOF como material para lastro ferroviário, realizando testes físicos e químicos para avaliar suas propriedades e os efeitos do envelhecimento devido à presença de CaO e MgO livres. Os resultados mostraram que as características físicas da escória BOF,

independentemente do tempo de envelhecimento, atendem plenamente aos requisitos normativos. Com um peso unitário médio de 19,7 kN/m³, superior ao do agregado natural (16,0 kN/m³), a escória oferece maior resistência à pressão lateral causada pela força centrífuga em curvas. Em testes de abrasão e dureza, a escória apresentou uma taxa de desgaste 25% inferior à do agregado natural e dureza 30-40% superior, destacando sua maior durabilidade sob cargas repetitivas. Ensaio de compressão não-confinada indicaram que sua resistência foi 220% superior à do agregado padrão, reduzindo significativamente a fragmentação de partículas e deformações no lastro. Esses fatores sugerem que o uso da escória BOF pode diminuir a necessidade de manutenção ao longo do tempo. Quanto ao envelhecimento, foi constatado que períodos de até seis meses não alteraram significativamente as propriedades físicas do material, evidenciando que o envelhecimento é um fator de menor relevância para as questões físicas e mecânicas. Assim, os autores concluíram que a escória BOF é uma alternativa viável e eficiente como material para lastro ferroviário, oferecendo vantagens em termos de resistência, durabilidade e redução de custos de manutenção.

O estudo de Jing *et al.* (2020), resumido na Figura 17, utilizou o método de elementos finitos para analisar o desempenho do lastro composto por pedra basáltica e escória de aciaria em diferentes proporções: 0%, 25%, 50%, 75% e 100% de escória em massa. Os resultados indicaram que a adição de escória ao lastro aumenta o módulo de elasticidade e o ângulo de atrito da camada, melhorando significativamente o desempenho da infraestrutura ferroviária. Conforme a proporção de escória aumenta, observou-se uma redução nas deflexões máximas e na raiz quadrada média das acelerações. Em uma comparação entre os lastros com 0% e 100% de escória, foram registrados os seguintes avanços: aumento de 12% no módulo de elasticidade; redução de 51% no deslocamento do trilho, diminuindo a abrasão e a deflexão da via; queda de 86% na aceleração do dormente, resultando em maior conforto para os passageiros e prolongando a vida útil dos componentes da via; e aumento de 44% na taxa de amortecimento, reduzindo as vibrações induzidas pelo trem. No entanto, a análise das frequências dominantes das camadas de lastro revelou que os resultados não crescem de forma linear com o aumento do teor de escória. Com base nos dados obtidos, os autores identificaram que a combinação ótima ocorre com 75% de escória,

oferecendo o melhor equilíbrio entre desempenho estrutural, redução de vibração e conforto operacional.

Figura 17 - Resumo gráfico de Jing *et al.*



Fonte: (Jing *et al.*, 2020).

Delgado *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo do comportamento geomecânico entre agregados de granito e de escória de forno a arco elétrico (EAF), ambos propostos como materiais de lastro ferroviário. Para avaliar a resposta estrutural da via férrea, foram conduzidas simulações numéricas utilizando modelos de carregamento estático e materiais elásticos não-lineares para as camadas de lastro e sublastro. Esses modelos foram calibrados com dados de ensaios laboratoriais, permitindo a análise do deslocamento vertical elástico no topo do trilho e da distribuição de tensões nas camadas de fundação da via. As simulações numéricas mostram que o uso de escória como lastro reduziu os deslocamentos verticais elásticos máximos do trilho em cerca de 3%. Além disso, os solos de fundação apresentaram menores tensões verticais máximas, com reduções de aproximadamente 4% para uma carga de 32,5 t/eixo e 9% para uma carga de 40 t/eixo. Esses resultados reforçam a viabilidade técnica da escória de aciaria como agregado para lastro ferroviário. Os autores concluíram que o material não apenas oferece um desempenho mecânico superior, mas também pode contribuir positivamente para aplicações em vias férreas destinadas ao transporte pesado, com benefícios adicionais relacionados à sustentabilidade e à durabilidade.

O estudo de Alves e Gomes (2023) analisou os efeitos do intemperismo físico e químico na escória LD como material de lastro ferroviário, comparando-a com basalto e gnaise. Foram realizados testes de congelamento-degelo (FT) e solidez ao sulfato (SS) para avaliar características das partículas, durabilidade e resistência. Os resultados indicam que a escória mantém sua forma e distribuição granulométrica, sendo mais resistente ao intemperismo físico do que os agregados naturais. No entanto, o intemperismo químico reduziu sua resistência em até 87% após 40 ciclos SS. A abrasão de Los Angeles apresentou perdas de 13% após 75 ciclos FT e 29% após 40 ciclos SS, ainda dentro dos limites permitidos. Apesar da redução significativa da resistência, a escória LD continua sendo uma alternativa viável, mas sua aplicação sob intemperismo químico severo requer avaliação em escala de campo.

Hussain e Hussaini (2022) realizaram uma análise crítica da literatura sobre o desempenho do lastro ferroviário produzido com escória de aciaria sob diferentes condições de carga. Os autores destacaram que a escória apresenta vantagens significativas em relação ao lastro convencional, como maior resistência ao cisalhamento e um ângulo de atrito superior. Sob cargas cíclicas, a deformação vertical permanente do lastro siderúrgico foi igual ou inferior à do lastro tradicional, além de apresentar menor quebra de partículas em comparação ao granito, o que sugere menor necessidade de manutenção e redução nos custos operacionais.

Adicionalmente, Hussain e Hussaini (2022) concluíram que o módulo de resiliência do lastro siderúrgico de aciaria é superior ao do granito, indicando um potencial para melhorar o conforto de rodagem para os passageiros. Ensaio em campo revelaram que a pressão máxima de contato entre o dormente e o lastro foi menor no caso da escória, em comparação ao calcário, enquanto sua resistência lateral foi superior, resultado de sua maior gravidade específica. Apesar dessas vantagens, desafios como a expansão volumétrica e a possível lixiviação de metais pesados ainda representam barreiras para o uso amplo da escória de aciaria em lastros ferroviários. No entanto, técnicas de estabilização, como a carbonatação e o tratamento com resina de silicone, composta por 99,5% de SiO_2 , demonstraram eficácia na mitigação dessas limitações, ampliando o potencial desse material para aplicações ferroviárias (Lv *et al.*, 2021; Hussain e Hussaini, 2022).

Em seu estudo, Couto (2025) sintetizou os principais trabalhos existentes, destacando as propriedades mecânicas da escória de aciaria e comparando seus

resultados com os critérios estabelecidos na norma NBR 5564 e no manual AREMA, Tabela 6. Os dados analisados evidenciam que, de maneira geral, as propriedades mecânicas da escória já foram amplamente investigadas, e tratamentos específicos foram desenvolvidos para adequar o material aos limites normativos, principalmente no tocante à expansão. No entanto, o estudo também apontou lacunas importantes. Até o momento, não foram estabelecidos métodos para avaliar, de forma sistemática, a porcentagem de pulverulentos gerados pelo uso contínuo da escória como lastro ferroviário, tampouco procedimentos para a medição de sua condutividade elétrica, aspectos que podem influenciar diretamente a funcionalidade e a durabilidade do material em aplicações ferroviárias. Esses aspectos representam os principais desafios atualmente enfrentados no uso da escória de aciaria como material de lastro ferroviário.

Tabela 6 - Principais resultados dos lastros siderúrgicos, com resultados abaixo dos limites destacados em vermelho

Propriedade	Valores		Pacheco (2006)	Sousa (2007)	Fernandes (2010)	Dayrell (2013)	Fernandes (2016)
	NBR 5564 (ABNT, 2021)	Manual (AREMA, 2013)	Envelhecida por mais de 6 meses	Após 6 meses de estocagem	Hidratação temporizada e carbonatação por 6 meses	Recém- produzida	Fusão com refratário de coqueria
	Brita natural	Escória	Gerdau (RJ)	Usiminas (MG)	Usiminas (MG)	Usiminas (MG)	Arcelor Mittal Tubarão (ES)
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Massa específica aparente (mínima)	2600kg/m ³	2900kg/m ³	3520kg/m ³	3580kg/m ³	3342kg/m ³	3600kg/m ³	3750kg/m ³
Porosidade aparente (máxima)	2%	-	5,69%	2,66%	3,2%	1,5%	0,39%
Absorção de água (máxima)	2%	2%	2,23%	0,99%	1,29%	0,59%	0,14%
Resistência à intempérie (máxima)	10%	5%	<10%	1,07%	1,31%	4,23%	0,53%
Material pulverulento (máximo)	1%	1%	Isento	0,3%	6,4%	0,25%	0,4%
Torrões de argila (máximo)	0,5%	0,5%	Isento	0,23%	0,17%	0,17%	0,08%
Abrasão Los Angeles (máxima)	35%	30%	25,24%	11,2%	13,77%	15,3%	11,1%
Resistência ao choque - Treton (máximo)	25%	-	3,54%	10,2%	7,74%	8,9%	9,4%
Teor de fragmentos macios e friáveis (máx.)	5%	-	Isento	20,2%	4,77%	6,4%	3,9%
Expansão (máximo) - EM 262 (DNER, 1994)	3%	-	<3%	*	<3% aos 45 dias	5,89%	*
Condutividade ou condutância (aos 90 dias de ensaio)	-	-	*	≈140μS/cm (14.000 μS/m)	50μS	9,6μS/cm** (960 μS/m)	≈125μS

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

Fonte: (Couto, 2025).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consiste em um estudo experimental sobre o uso da escória de aciaria como lastro ferroviário, especialmente do ponto de vista da expansibilidade e resistividade elétrica. Foram realizados ensaios de impacto com o aparelho Treton, ensaios de condutividade elétrica com o material em diferentes teores de umidade, ensaios para avaliação da expansão do material a partir do método PTM 130, análise de expansão do agregado do lastro com o decorrer do tempo e intempéries, resistividade elétrica do material e, por fim, correlação da quantidade de pulverulento com os ciclos de abrasão da escória para estimar a frequência de desguarnecimento do lastro. Esses ensaios foram feitos parcialmente em ambiente laboratorial (Laboratório de Pavimentação da UFJF).

Este estudo integra o programa Mestrado Acadêmico para Inovação (MAI), promovido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O programa foi criado visando impulsionar a pesquisa, o empreendedorismo e a inovação nas Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICTs) (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021). Nesse contexto, a parceria entre academia e indústria foi formalizada em conjunto com uma empresa ferroviária, conforme a Política de Inovação da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), por meio do Centro Regional de Inovação e Transferência de Tecnologia (CRITT). O projeto contou com representantes da empresa parceira e a equipe de pesquisa da UFJF, composta pela professora coordenadora e orientadora Júlia Castro Mendes, do Departamento de Construção Civil, pelo professor coorientador Geraldo Luciano de Oliveira Marques, do Departamento de Transportes e Geotecnia, e pela mestrande e autora do estudo, Laura Coura Soranço.

3.1 MATERIAIS

Para a realização deste estudo, foram utilizadas duas amostras: uma de escória de aciaria proveniente do processo BOF e outra de brita de gnaiss, conforme ilustrado na Figura 18. A escória foi produzida por uma empresa siderúrgica da região sudeste e separada para uso em novembro de 2024.

Durante o processo de produção de aço, a escória de aciaria é disposta em um pátio a céu aberto devido à falta de um destino adequado, permanecendo armazenada sem uso. Diante desse cenário, optou-se por utilizar uma amostra que já passou por

intemperização natural, permitindo avaliar as características da escória acumulada ao longo do tempo. Para isso, o material permaneceu exposto às condições ambientais com irrigação controlada, sendo periodicamente remexido para garantir a intemperização de todos os grãos durante o processo de carbonatação natural, antes de ser entregue ao laboratório de pavimentação da UFJF em 11/06/2025, com um total de sete meses de carbonatação.

Figura 18 - Agregados utilizados. Esquerda: Escória de Aciaria; Direita: Brita de Gnaisse



Fonte: Autora (2026).

A brita de gnaisse tem sua origem em uma pedreira da cidade de Juiz de Fora, frequente fornecedor de material de lastro para a empresa ferroviária da região. Sua amostragem foi feita utilizando os procedimentos indicados na NBR 5564:2021.

Figura 19 – Local de retirada do material na pedreira de Juiz de Fora

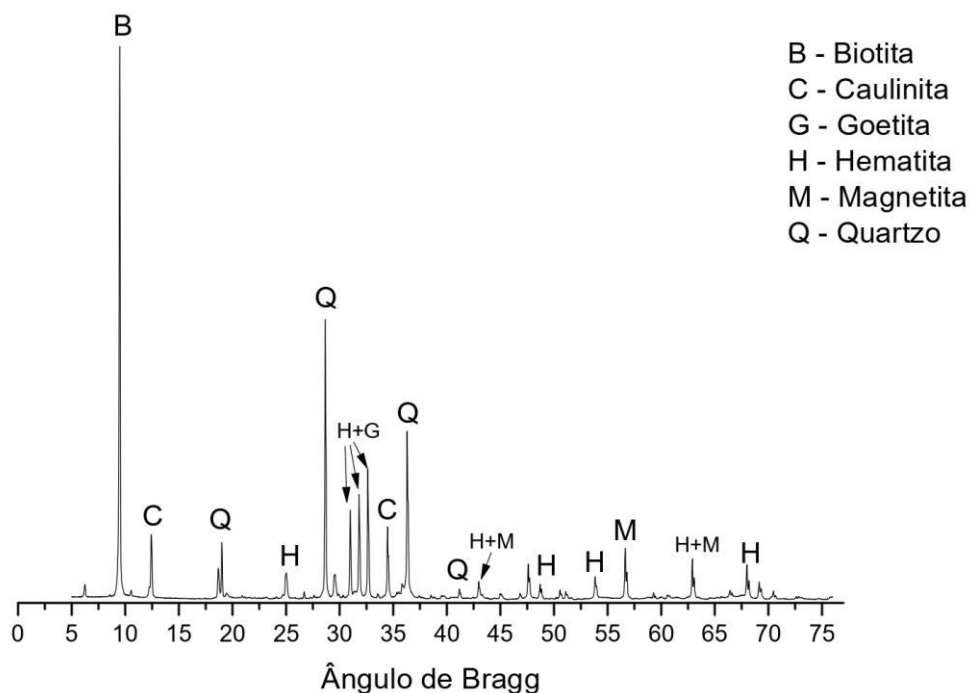


Fonte: Autora (2026).

Durante a vida útil do lastro ferroviário, é comum ocorrer contaminação por minério de ferro. Para simular essa condição, foi utilizado o material proveniente da barragem Xingu, localizada na Mina Alegria, em Mariana (MG). O material foi coletado na barreira defletora, apresentando classificação tátil-visual como arenoso com presença de pedregulhos, e foi retirado da camada superficial, entre as profundidades de 0,00 m e 0,40 m.

A análise do difratograma de raios X (DRX), realizada no laboratório de construção civil da Universidade Federal de Ouro Preto, Figura 20, evidencia que o minério apresenta composição dominada por biotita (B), quartzo (Q) e caulinita (C), indicando origem em materiais silico-argilosos derivados de processos de beneficiamento de minério de ferro (Chokshi *et al.*, 2016; Patra *et al.*, 2019; Sahoo *et al.*, 2021). Observa-se também a presença significativa de hematita (H) e, em menor proporção, magnetita (M) e goetita (G), minerais associados a rejeitos ferruginosos (Gomes, Pereira e Peres, 2011; Clout e Manuel, 2022; Souza *et al.*, 2021). A predominância de filossilicatos e argilominerais sugere elevada capacidade de retenção de água (Kumari e Mohan, 2021). Já a presença de óxidos de ferro pode acarretar em redução da resistividade elétrica quando incorporados ao lastro. De forma geral, as fases cristalinas encontradas são comumente detectadas em outros estudos como nos trabalhos de Carvalho *et al.* (2023) e Bastos *et al.* (2016).

Figura 20 - DRX do minério de ferro



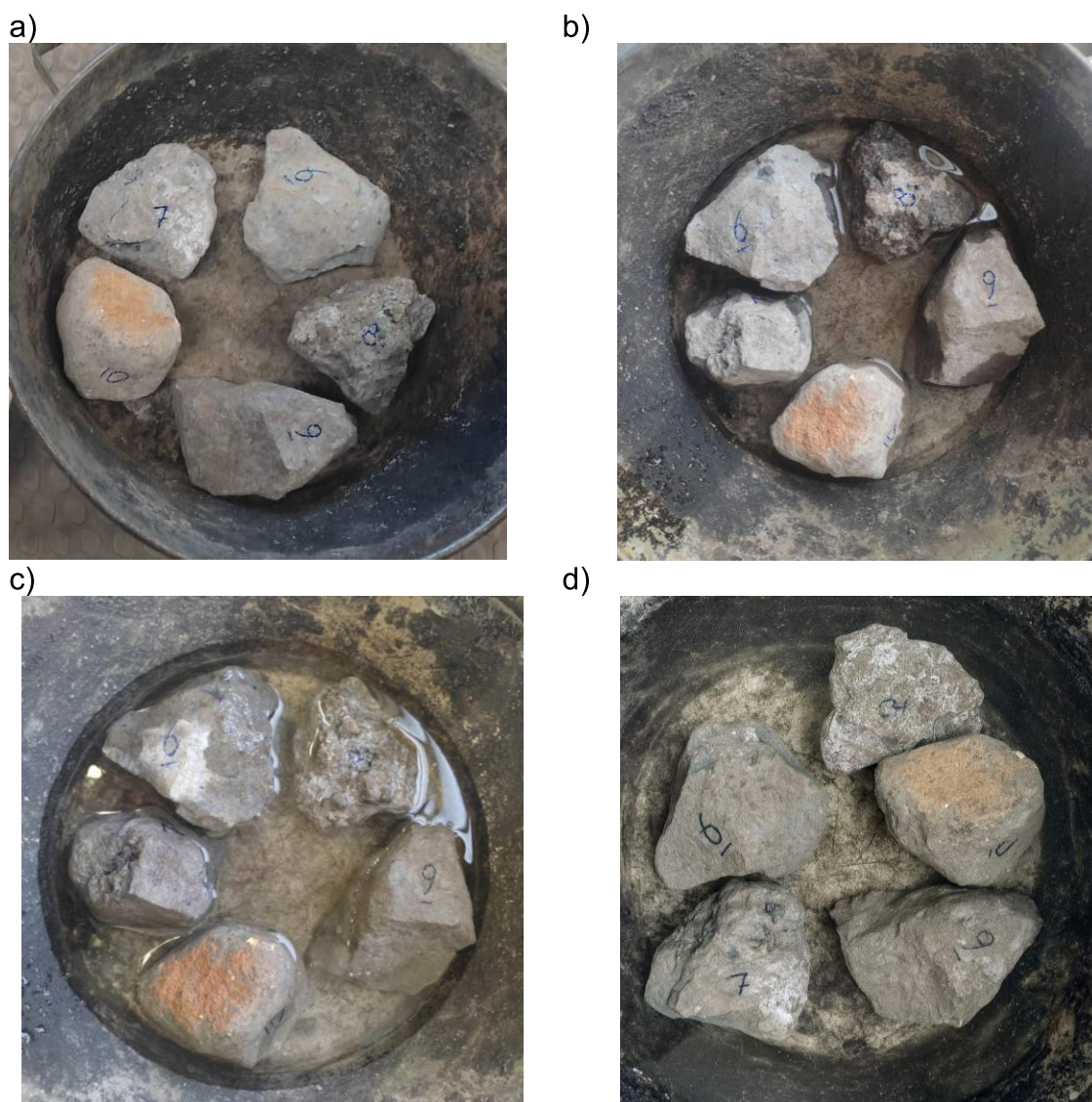
Fonte: Autora (2026)

3.2 ENSAIOS

3.2.1 Massa aparente, porosidade e absorção de água

Inicialmente, foram determinadas a massa específica aparente, a porosidade aparente e a absorção de água dos materiais, conforme o procedimento descrito no Anexo B da norma ABNT NBR 5564. Para a realização do ensaio, foram selecionados 10 corpos de prova (agregados) com dimensões aproximadas de 50 mm, independentemente da geometria. Os corpos de prova foram lavados em água corrente e, em seguida, acondicionados em uma bandeja, adicionando-se água até atingir 1/3 da altura dos corpos. Após 4 horas, o nível da água deve ser elevado até 2/3 da altura, e, após mais 4 horas, foi completada a submersão, esquema na Figura 21. Os corpos de prova permaneceram totalmente submersos por um período total de 48 horas.

Figura 21 - Amostras para ensaios de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção. a) Amostra de escória seca; b) Amostra de escória com 1/3 de água; c) Amostra de escória com 2/3 de água; d) Amostra de escória submersa



Fonte: Autora (2026).

Passado esse tempo, retirou-se cada corpo de prova da água, secou-se suavemente a superfície com um pano levemente úmido e realizou-se a pesagem ao ar (M_{sat}). Em seguida, foi realizada a pesagem individual dos corpos de prova na condição submersa (M_{sub}), utilizando o dispositivo hidrostático da balança. Posteriormente, os corpos foram secos em estufa até a obtenção de massa constante, sendo então pesados novamente ao ar (M_{seca}). Com base nessas três massas (úmida, submersa e seca), foram calculadas a massa específica aparente (Equação 5), a porosidade aparente (Equação 6) e a absorção de água (Equação 7) da escória de aciaria e da brita.

$$\rho_a = \frac{M_{seca}}{M_{sat} - M_{sub}} \quad \text{Equação 5}$$

$$\eta_a = \frac{(M_{sat} - M_{seca})}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

$$\alpha_a = \frac{(M_{sat} - M_{seca})}{M_{seca}} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

3.2.2 Expansão

O ensaio de PTM (*Pennsylvania Testing Material*) adaptado foi conduzido com base na norma DNIT 113/2009-ME (DNIT, 2009), visando determinar o potencial de expansão da escória de aciaria compactada e testada em laboratório. O procedimento tem início com a moldagem do corpo de prova em um molde cilíndrico. Considerando que a granulometria do material de lastro é superior àquela prevista para o ensaio, primeiramente são posicionadas as maiores partículas, e, em seguida, os vazios são preenchidos com material pulverulento de rocha gnaiss, inerte e não expansivo, Figura 22.

Figura 22 - Corpo de Prova para ensaio PTM adaptado. a) Procedimento de montagem; b) Montagem finalizada

a)



b)



Fonte: Autora (2026).

Após o preenchimento e a compactação, são aplicados pesos sobre o corpo de prova, de modo a gerar uma sobrecarga de 10 lb (aproximadamente 4,5 Kg). O conjunto, composto pelo molde e os pesos (Figura 23a), é submerso em água pré-aquecida a 71 ± 3 °C (banho térmico), conforme ilustrado na Figura 23b. Nesse momento, ajusta-se o tripé no colar de extensão e zera-se o dial do extensômetro. Após 30 minutos no banho térmico, realiza-se a leitura inicial.

Figura 23 – Banho térmico no PTM adaptado. a) corpo de prova com sobrecarga; b) corpo de prova submerso.

a)



b)



Fonte: Autora (2026).

As medições subsequentes foram realizadas diariamente ao longo de sete dias. Nesse período, adicionou-se água à parte superior da amostra duas horas antes de cada leitura, garantindo sua permanência completamente submersa. Concluída essa etapa inicial, a amostra foi mantida na estufa e na mesma faixa de temperatura (71 ± 3 °C), onde permaneceu em condição de saturação, mas sem submersão, por mais sete dias. As leituras de expansão seguiram sendo realizadas diariamente, conforme o procedimento descrito, até a conclusão do ciclo de 14 dias.

Após a realização do ensaio, a porcentagem de expansão volumétrica foi calculada dividindo a diferença entre a leitura final do extensômetro, após 14 dias de submersão (L_f), e a leitura inicial (L_i), pela altura inicial da amostra, de 116,4 mm, conforme indicado na Equação 8 (DNIT, 2009). A taxa de expansão é representada

por uma curva que relaciona o tempo em dias (eixo x) com a porcentagem de expansão (eixo y).

$$\%Exp = \frac{L_f - L_i}{116,4} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

3.2.3 Resistência ao choque - Treton

O ensaio de impacto foi realizado com o aparelho Treton (Figura 24a) seguindo a norma NBR 5564 (ABNT, 2021). Para este ensaio, são necessárias 3 amostras com partículas de forma cúbica, angulares e do mesmo tamanho, passantes na peneira de 3/4" (19 mm) e retidos na de 5/8" (16 mm), compostas por 20 fragmentos cada, exemplificado na Figura 24b (ABNT, 2021). O ensaio foi realizado para a brita de gnaiss, escória e para uma mistura de 50% brita e 50% escória.

Figura 24 - Ensaio de impacto; a) aparelho treton; b) amostra da mistura de escória e brita com 20 fragmentos

a)



b)



Fonte: Autora (2026).

No ensaio, as partículas foram colocadas no cilindro oco em contato com a face superior do cilindro maciço. Em seguida, deixou-se cair o martelo 10 vezes sobre o material, o que equivale a uma força de 59,6J. Após remover o cilindro, o material foi peneirado através da peneira número 12 (1,7 mm). Por fim, o material retido foi pesado (ABNT, 2021). A resistência ao choque (T) é dada pela média aritmética do resultado

de três conjuntos de amostra, calculados pela diferença entre a massa inicial (m_i) e a massa final (m_f) dividida pela massa inicial, mostrada na Equação 9.

$$T = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad \text{Equação 9}$$

Além do processo normativo, foi realizada, de forma adicional, a pesagem do material passante pela peneira número 4 (4,75 mm), de forma a analisar a porcentagem de finos (na classificação ferroviária) gerados. Para analisar a evolução da geração de finos, após a realização do ensaio, o material foi misturado e foram aplicados mais 10 golpes na amostra, processo repetido 4 vezes. A cada nova interação, foram avaliadas as porcentagens retidas nas peneiras de 4,75 mm e 1,7 mm.

3.2.4 Abrasão Los Angeles

Para determinar o desgaste do agregado por abrasão, foi realizado o ensaio de abrasão “Los Angeles”, conforme a norma DNIT 451/2024 – ME (DNIT, 2024) e ilustrado na Figura 25. O ensaio foi realizado com amostra de brita, escória e mistura com 50% de brita e 50% de escória. A cada repetição do ensaio, a amostra também foi passada na peneira de 1,7 mm, determinando a massa do material retido, acompanhando a geração de finos em função da energia fornecida para a amostra.

Figura 25 – Ensaio de abrasão “Los Angeles”



Fonte: Autora (2026).

O procedimento consiste no uso do equipamento de abrasão Los Angeles, no qual a amostra do material na graduação F, composta por $10.000 \pm 75g$ (Figura 26), foi colocada juntamente com 12 esferas de aço que atuam como carga abrasiva. O tambor foi girado a uma velocidade de 30 a 33 rpm, completando 1000 rotações, conforme o tamanho do agregado ensaiado. Após essa etapa, todo o material foi removido do tambor, as esferas foram separadas, e a amostra foi passada em uma peneira com abertura de malha de 1,7 mm, descartando-se o material que passar pela peneira. Em seguida, o material retido foi lavado, seco em estufa e pesado para determinação de sua massa.

Figura 26 - Amostra de escória para abrasão Los Angeles



Fonte: Autora (2026).

O desgaste por abrasão Los Angeles (A_n) é calculado pela diferença proporcional entre a massa inicial da amostra (m_n) e a massa final retida (m'_n), expressa em porcentagem, mostrada na Equação 10.

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100 \quad \text{Equação 10}$$

Similarmente ao ensaio Treton, de forma adicional, após a realização do ensaio, o material retido na peneira de 1,7 mm foi utilizado para realizar o ensaio novamente, processo repetido até que a porcentagem retida nas peneiras de 19,0 e 12,5 mm fosse inferior a 50% da massa inicial. A cada repetição do ensaio, a amostra também foi passada na peneira de 1,7 mm, determinando a massa do material retido, além das

peneiras de 19,0 mm, 12,5 mm e 4,75 mm, acompanhando a geração de finos em função da energia fornecida para a amostra.

3.2.5 Resistividade elétrica

O ensaio foi realizado utilizando um megôhmetro para medir a resistência do material em diferentes condições de umidade, pulverulência e contaminação de minério de ferro. O megôhmetro foi emprestado pela empresa ferroviária parceira, da marca Megabras, modelo MD 1035e. A tensão teste escolhida para o megôhmetro foi de 500 V, em concordância com os trabalhos de Sousa (2007) e Fernandes (2016). Para a realização do ensaio, foi utilizada uma caixa plástica com dimensões internas de 50 × 30 × 30 cm, conforme ilustrado na Figura 27a. Para evitar qualquer interferência da própria caixa na medição da resistência elétrica, seu interior foi revestido com um tapete isolante de borracha, com proteção de até 1kv, mostrado na Figura 27b.

Figura 27 - Ensaio de resistividade elétrica. a) caixa plástica; b) caixa com tapete isolante

a)



b)



Fonte: Autora (2026).

Inicialmente, foi feita a medição dos materiais (brita e escória) em estado seco, conforme Figura 28a. Para realizar as medições foram fixados 3 pontos (Figura 28b), em ambos os lados, de forma paralela (Figura 28c), e calculado uma média entre eles. Posteriormente, esses agregados foram misturados com volumes específicos de água, simulando a chuva, aumentando gradualmente o teor de umidade.

Figura 28 – Amostra para o ensaio de resistividade. a) amostra de escória seca; b) pontos fixos de medição marcados; c) medição com megôhmetro



Fonte: Autora (2026).

Para a definição dos teores de umidade analisados, realizou-se uma avaliação climática da cidade de Juiz de Fora, adotada como área de estudo. A partir dos dados de altura de chuva (h_{chuva}), apresentados na Tabela 7 e obtidos no Atlas Pluviométrico do Brasil, disponibilizado pelo Ministério de Minas e Energia, calculou-se o teor de umidade gravimétrico correspondente a eventos pluviométricos com tempos de retorno de até 50 anos (CPRM, 2014).

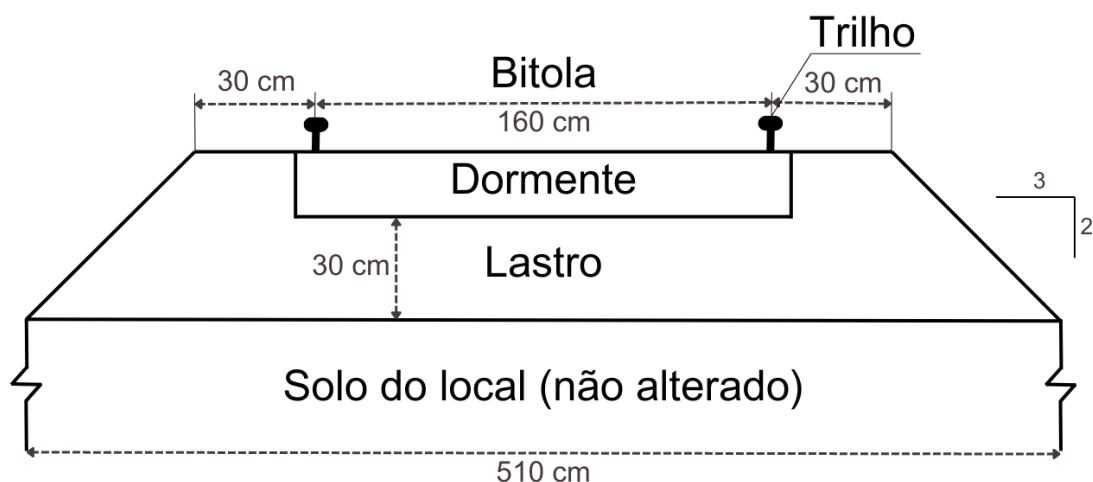
Tabela 7 - Índice pluviométrico de Juiz de Fora em mm/m² em relação ao tempo de duração e o tempo de retorno das chuvas

	Tempo de retorno (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	40	50
10 Minutos	19,1	22,4	25,2	27,1	28,5	29,6	30,5	32,1	33,4
15 Minutos	25,1	29,4	33,2	35,6	37,4	38,9	40,1	42,2	43,8
20 Minutos	29,8	35	39,4	42,3	44,4	46,2	47,7	50,1	52,1
30 Minutos	36,8	43,1	48,6	52,1	54,7	56,9	58,7	61,7	64,1
45 Minutos	43,6	51,1	57,6	61,7	64,9	67,4	69,6	73,2	76
1 Hora	48,1	56,4	63,5	68,1	71,6	74,4	76,8	80,8	83,9
2 Horas	57,3	67,2	75,7	81,2	85,4	88,7	91,6	96,2	100
3 Horas	61,5	72,1	81,3	87,2	91,7	95,3	98,3	103	107,4
4 Horas	64,1	75,1	84,6	90,8	95,4	99,2	102	108	111,8
5 Horas	65,8	77,1	86,9	93,2	98	102	105	111	114,8
6 Horas	67,1	78,6	88,6	95	99,9	104	107	113	117
7 Horas	68,1	79,7	89,9	96,4	101,4	105	109	114	118,8
8 Horas	68,9	80,7	91	97,6	102,6	107	110	116	120,2
12 Horas	71,1	83,3	93,9	101	105,8	110	114	119	124
14 Horas	71,8	84,2	94,9	102	107	111	115	121	125,4
20 Horas	73,4	86,1	97	104	109,4	114	117	123	128,2
24 Horas	74,2	87	98	105	110,5	115	119	125	129,5

Fonte: Adaptado (CPRM, 2014).

Para análise, definiu-se a geometria da camada de lastro, considerando-se uma largura inferior (l_{inf}) de 5,10 m, largura superior (l_{sup}) de 2,20 m e altura (h) de 0,35 m, conforme apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Geometria do modelo de lastro adotado



Fonte: Autora (2026).

Em seguida, calculou-se a área da seção transversal do lastro (A), conforme a Equação 11, resultando em 1,278 m².

$$A = \frac{(l_{inf} + l_{sup})}{2} \times h \quad \text{Equação 11}$$

Substituindo os valores adotados:

$$A = \frac{(2,20 + 5,10)}{2} \times 0,35 = 1,278 \text{ m}^2$$

Como a investigação pluviométrica foi conduzida por metro linear de via, o volume correspondente a 1 metro de lastro é igual a 1,278 m³, uma vez que o volume é obtido pela multiplicação da área pelo comprimento unitário. Para determinar a massa de lastro por metro de via, utilizou-se a massa unitária média apresentada na Tabela 10, aplicando-se a Equação 12.

$$m_{lastro} = V \times m_{unitária} \quad \text{Equação 12}$$

Assim, para os materiais analisados, obtiveram-se os seguintes valores:

a. Brita:

$$m_{lastro} = 1,278 \times 1418,33 = 1811,92 \text{ kg}$$

b. Escória:

$$m_{lastro} = 1,278 \times 1672 = 2135,98 \text{ kg}$$

Por fim, foram realizados os cálculos da massa de água ($m_{água}$) referente a um metro de via, de acordo com a intensidade de cada evento de chuva (Equação 13), bem como a determinação do teor de umidade (ω) correspondente a cada condição pluviométrica (Equação 14).

$$m_{água} = h_{chuva} \times \text{área de captação} \quad \text{Equação 13}$$

$$\omega = \frac{m_{água}}{m_{lastro}} \quad \text{Equação 14}$$

Como exemplo, para o caso da brita e considerando uma altura de água de 19,10 mm para um evento de chuva com duração de 10 minutos, a aplicação da Equação 13 resulta em uma massa de água de 42,02 L. Em seguida, aplicando-se a Equação 14, obtém-se um teor de umidade de 2,32%, conforme apresentado a seguir:

$$m_{água} = 0,0191 \times 2,20 \times 1 = 0,04202 \text{ m}^3 = 42,02 \text{ L}$$

$$\omega = \frac{42,02}{1811,92} = 2,32\%$$

Assim, os teores de umidade obtidos encontram-se apresentados nas Tabela 8 e Tabela 9. Com o intuito de adotar valores intermediários e representativos para os três materiais analisados, foram selecionados os teores de 4%, 8%, 12% e 16%.

Tabela 8 - Teor de umidade para 1 m linear de lastro de brita conforme o índice pluviométrico.

Duração das chuvas	Tempo de retorno (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	40	50
10 Minutos	2,32%	2,72%	3,06%	3,29%	3,46%	3,59%	3,70%	3,90%	4,06%
15 Minutos	3,05%	3,57%	4,03%	4,32%	4,54%	4,72%	4,87%	5,12%	5,32%
20 Minutos	3,62%	4,25%	4,78%	5,14%	5,39%	5,61%	5,79%	6,08%	6,33%
30 Minutos	4,47%	5,23%	5,90%	6,33%	6,64%	6,91%	7,13%	7,49%	7,78%
45 Minutos	5,29%	6,20%	6,99%	7,49%	7,88%	8,18%	8,45%	8,89%	9,23%
1 Hora	5,84%	6,85%	7,71%	8,27%	8,69%	9,03%	9,32%	9,81%	10,19%
2 Horas	6,96%	8,16%	9,19%	9,86%	10,37%	10,77%	11,12%	11,68%	12,14%
3 Horas	7,47%	8,75%	9,87%	10,59%	11,13%	11,57%	11,94%	12,51%	13,04%
4 Horas	7,78%	9,12%	10,27%	11,02%	11,58%	12,04%	12,38%	13,11%	13,57%
5 Horas	7,99%	9,36%	10,55%	11,32%	11,90%	12,38%	12,75%	13,48%	13,94%
6 Horas	8,15%	9,54%	10,76%	11,53%	12,13%	12,63%	12,99%	13,72%	14,21%
7 Horas	8,27%	9,68%	10,92%	11,70%	12,31%	12,75%	13,23%	13,84%	14,42%
8 Horas	8,37%	9,80%	11,05%	11,85%	12,46%	12,99%	13,36%	14,08%	14,59%
12 Horas	8,63%	10,11%	11,40%	12,26%	12,85%	13,36%	13,84%	14,45%	15,06%
14 Horas	8,72%	10,22%	11,52%	12,38%	12,99%	13,48%	13,96%	14,69%	15,23%
20 Horas	8,91%	10,45%	11,78%	12,63%	13,28%	13,84%	14,21%	14,93%	15,57%
24 Horas	9,01%	10,56%	11,90%	12,75%	13,42%	13,96%	14,45%	15,18%	15,72%

Fonte: Autora (2026)

Tabela 9 - Teor de umidade para 1 m linear de lastro siderúrgico conforme o índice pluviométrico

Duração das chuvas	Tempo de retorno (anos)								
	2	5	10	15	20	25	30	40	50
10 Minutos	1,97%	2,31%	2,60%	2,79%	2,94%	3,05%	3,14%	3,31%	3,44%
15 Minutos	2,59%	3,03%	3,42%	3,67%	3,85%	4,01%	4,13%	4,35%	4,51%
20 Minutos	3,07%	3,60%	4,06%	4,36%	4,57%	4,76%	4,91%	5,16%	5,37%
30 Minutos	3,79%	4,44%	5,01%	5,37%	5,63%	5,86%	6,05%	6,35%	6,60%
45 Minutos	4,49%	5,26%	5,93%	6,35%	6,68%	6,94%	7,17%	7,54%	7,83%
1 Hora	4,95%	5,81%	6,54%	7,01%	7,37%	7,66%	7,91%	8,32%	8,64%
2 Horas	5,90%	6,92%	7,80%	8,36%	8,80%	9,14%	9,43%	9,91%	10,30%
3 Horas	6,33%	7,43%	8,37%	8,98%	9,44%	9,82%	10,12%	10,61%	11,06%
4 Horas	6,60%	7,74%	8,71%	9,35%	9,83%	10,22%	10,51%	11,12%	11,52%
5 Horas	6,78%	7,94%	8,95%	9,60%	10,09%	10,51%	10,81%	11,43%	11,82%
6 Horas	6,91%	8,10%	9,13%	9,78%	10,29%	10,71%	11,02%	11,64%	12,05%
7 Horas	7,01%	8,21%	9,26%	9,93%	10,44%	10,81%	11,23%	11,74%	12,24%
8 Horas	7,10%	8,31%	9,37%	10,05%	10,57%	11,02%	11,33%	11,95%	12,38%
12 Horas	7,32%	8,58%	9,67%	10,40%	10,90%	11,33%	11,74%	12,26%	12,77%
14 Horas	7,40%	8,67%	9,77%	10,51%	11,02%	11,43%	11,84%	12,46%	12,92%
20 Horas	7,56%	8,87%	9,99%	10,71%	11,27%	11,74%	12,05%	12,67%	13,20%
24 Horas	7,64%	8,96%	10,09%	10,81%	11,38%	11,84%	12,26%	12,87%	13,34%

Fonte: Autora (2026).

O estudo também contemplou a análise dos agregados em três condições de teor de material siderúrgico pulverulento (P) para o lastro siderúrgico: a condição “como entregue” (isto é, aquela em que o material chegaria ao canteiro de obras) e duas condições com adições controladas de finos, correspondentes a 12,5% e 25%. A quantificação do teor de material pulverulento no agregado siderúrgico na condição “como entregue” é de 0,43% conforme os procedimentos da ABNT NBR 16973 (ABNT, 2021). Adicionalmente, foi conduzida uma análise dos dois materiais de lastro contaminados com minério de ferro (MF) da barragem Xingu, também considerando as proporções de 12,5% e 25% de contaminação.

Como o megôhmetro mede a resistência elétrica (R), em ohms (Ω), para o material em uma caixa de 50 × 30 × 30 cm. A partir da resistência elétrica na caixa, calcula-se a resistividade (ρ), propriedade intrínseca do material, pela Equação 15:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{Equação 15}$$

Onde L é o comprimento do condutor (a distância entre os pontos onde a corrente entra e sai) e A a área da seção transversal do condutor.

4 RESULTADOS

4.1 ENSAIOS REALIADOS PELA EMPRESA FERROVIÁRIA

Alguns ensaios físicos para lastro ferroviário tradicional foram realizados e fornecidos pela empresa ferroviária parceira para uma análise ampla dos materiais, mostrados na Tabela 10. A coleta para esse ensaio foi feita em 16/05/2024 (após aproximadamente 6 meses de intemperismo natural da escória), sendo utilizado material não peneirado. De maneira geral, a Tabela 10 revela que todas as amostras estão em conformidade com os requisitos estabelecidos pela norma NBR 5564.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios realizados para os agregados convencional e siderúrgico

Ensaio	Critério da NBR 5564	Rocha britada				Escória			
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Teor pulverulento (%)	≤ 1,00	0,17	0,16	0,15	0,16	0,27	0,23	0,31	0,27
Massa unitária (Kg/m³)	-	1423	1419	1413	1418,3	1625	1676	1715	1672
Torrões de argila (%)	≤ 0,50	-	-	-	-	0,09	0,20	0,22	0,17
Abrasão Los Angeles (%)	≤ 35	-	-	-	-	17,5	16,0	16,2	16,6

Fonte: Autora (2026).

As curvas granulométricas das amostras analisadas (Apêndice A) indicam que os materiais coletados não atendem integralmente aos limites especificados pelo padrão A da norma ABNT NBR 5564. A brita de gnaiss apresenta a melhor conformidade, posicionando-se predominantemente no limite superior do padrão A, com exceção da peneira de abertura de 37,5 mm, onde se encontra ligeiramente fora do limite. Em contraste, as curvas granulométricas da escória de aciaria permanecem, em sua maior parte, fora dos limites do padrão A, especialmente nas peneiras de maiores diâmetros, entre 37,5 mm a 76 mm. Por fim, notou-se uma diferença pontual: enquanto as britas não apresentaram retenção a partir da peneira de 63,5 mm, a escória registrou até 20% de material retido nessa faixa. Considerando os resultados foi realizado um ajuste de granulometria do material, sendo enquadrado no padrão A, conforme determinado pela empresa ferroviária parceira.

4.2 MASSA ESPECÍFICA APARENTE, POROSIDADE APARENTE E ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água obtidos no presente estudo se encontram na Tabela 11, cuja caracterização foi realizada em 11/07/2025.

Tabela 11 - Resultados de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

Material	Massa específica aparente (kg/m³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
Brita	2847	0,4	0,1
Escória	3122	5,5	2,0

Fonte: Autora (2026).

De acordo com a NBR 5564, a massa específica aparente dos agregados para lastro ferroviário deve ser, no mínimo, 2.600 kg/m³, enquanto os valores de porosidade aparente e absorção de água não devem ultrapassar 2%. No caso da brita, todos os parâmetros avaliados encontram-se plenamente em conformidade com os limites estabelecidos pela norma. Já em relação à escória de aciaria, observa-se que a massa específica aparente está acima do valor mínimo exigido, com 3.122 kg/m³, mas a sua porosidade aparente excede significativamente o limite, atingindo 5,5%, o que pode impactar a durabilidade e a retenção de umidade do material. A absorção de água, por sua vez, atinge 2,0%, sendo igual o limite permitido.

Essa condição é compatível com os valores reportados na literatura, conforme mostrado na Tabela 12. Estudos apontam que a massa específica da escória de aciaria geralmente varia entre 3.342 e 3.750 kg/m³, a porosidade aparente entre 0,4% e 5,7% e a absorção de água entre 0,1% e 2,2%. Essa ampla faixa de variação está relacionada principalmente à origem da escória, à composição química e ao processo de resfriamento e beneficiamento do material.

Tabela 12 - Comparação de resultados da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água para a escória

Autores	Massa específica aparente (kg/m³)	Porosidade aparente (%)	Absorção de água (%)
Presente trabalho	3122	5,5	2,0
Pacheco (2006)	3520	5,7	2,2
Sousa (2007)	3580	2,7	1,0
Fernandes (2010)	3342	3,2	1,3
Dayrell (2013)	3600	1,5	0,6
Fernandes (2016)	3750	0,4	0,1

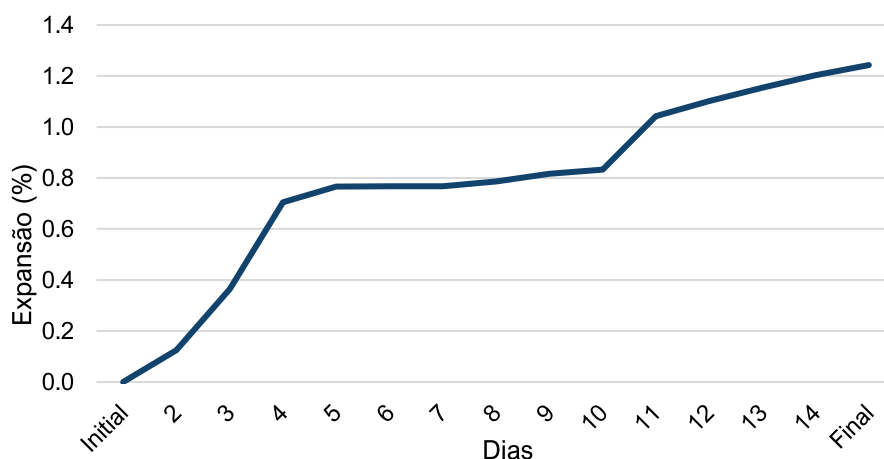
Fonte: Autora (2026).

No caso da utilização de escória como material de lastro, seus elevados valores de porosidade aparente e absorção de água podem impactar negativamente a durabilidade dos dormentes de madeira. Isso porque a maior capacidade de retenção de umidade no agregado favorece o acúmulo de água na região inferior dos dormentes, criando um ambiente constantemente úmido. Essa condição é especialmente propícia à proliferação de fungos e à intensificação de processos de apodrecimento. Além disso, a porosidade e a absorção de água apresentam alta relevância para a resistividade elétrica do material, uma vez que influenciam diretamente a formação de caminhos preferenciais de condutividade. Esse aspecto será discutido em maior detalhe na Seção 3.2.4.

4.3 ENSAIO DE EXPANSÃO

Para se determinar o potencial de expansão e verificar a estabilização da escória de aciaria foi realizado de forma adaptada o ensaio PTM 130. As medições, realizadas com um extensômetro, estão na Figura 30. Assim, aplicando a Equação 8, tem-se que ocorreu uma expansão de 1,2%, valor abaixo do limite normativo, que apresenta limite máximo de expansão permitido para a escória de aciaria de 3%, salvo valores determinados por especificação de projeto (DNER, 1994).

Figura 30 – Expansão da amostra encontrada no ensaio PTM



Fonte: Autora (2026)

Esse resultado encontra-se inferior aos valores reportados na literatura (Tabela 13), o que pode estar associado ao tempo de carbonatação do material. Considerando que a escória foi separada pela empresa em novembro de 2024 e mantida separada em bombonas desde junho de 2025, então é provável que o material já se encontrasse estabilizado no momento da execução do ensaio e que o processo de cura realizado foi eficiente.

Tabela 13 - Comparação de resultados do ensaio PTM adaptado

Autores	Expansão (%)
Trabalho atual	1,2
Pacheco (2006)	2,4
Fernandes (2010) – pilha H2 aos 15 dias	5,0
Dayrell (2013)	5,9
Fernandes, Cosme e Fernandes (2020)	5,7
Guimarães et al. (2021)	1,4

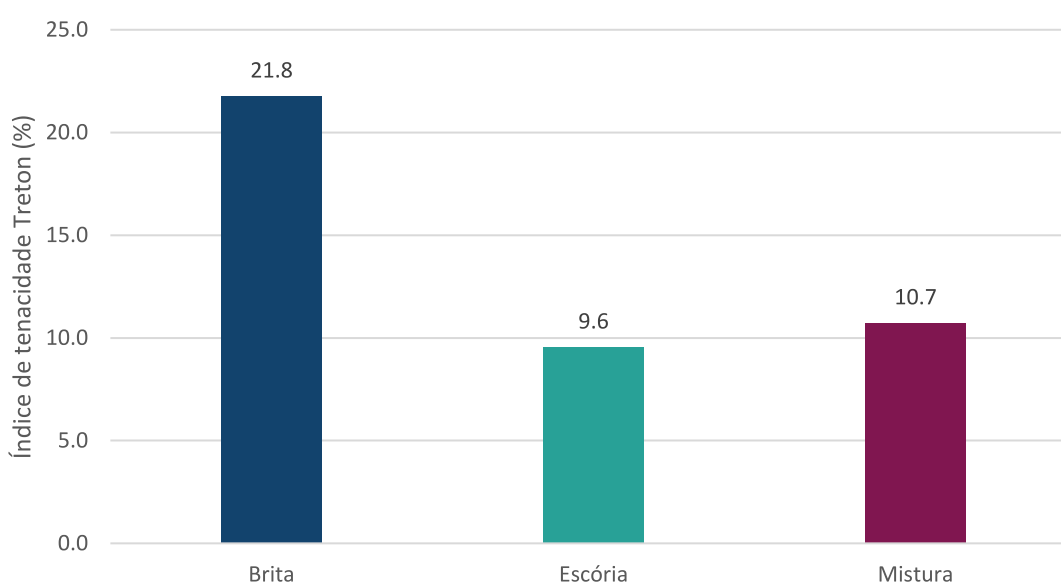
Fonte: Autora (2026).

4.4 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

A fim de analisar a resistência ao choque das amostras, foi realizado o ensaio Treton, que consiste na aplicação de impactos sucessivos para simular as solicitações dinâmicas presentes no ambiente ferroviário. O índice de tenacidade Treton foi calculado com base nos resultados da primeira repetição e na Equação 9, sendo o valor médio representado na Figura 31. Os valores brutos de todos os ensaios estão no Apêndice A1. Os resultados indicam que a escória de aciaria foi o material com

melhor desempenho, apresentando o menor índice (9,6%) e, portanto, maior resistência à fragmentação. A brita apresentou o pior desempenho (21,8%), com um índice elevado e próximo do limite de aceitação definido pela NBR 5564 (25%), indicando menor resistência a impactos repetidos. Por fim, a mistura de 50% brita e 50% escória obteve valor um pouco acima da escória (10,8%), revelando que a incorporação da escória melhora significativamente a tenacidade do conjunto em comparação com a brita pura.

Figura 31 – Resultados do índice de tenacidade Treton



Fonte: Autora (2026).

O valor obtido para o índice de tenacidade da escória (9,6%) encontra-se em conformidade com os dados reportados na literatura entre 3,5% e 10,2% (Tabela 14). Assim, os resultados obtidos corroboram a viabilidade da escória de aciaria como um material resistente ao impacto, com comportamento técnico compatível ao evidenciado em outros estudos nacionais.

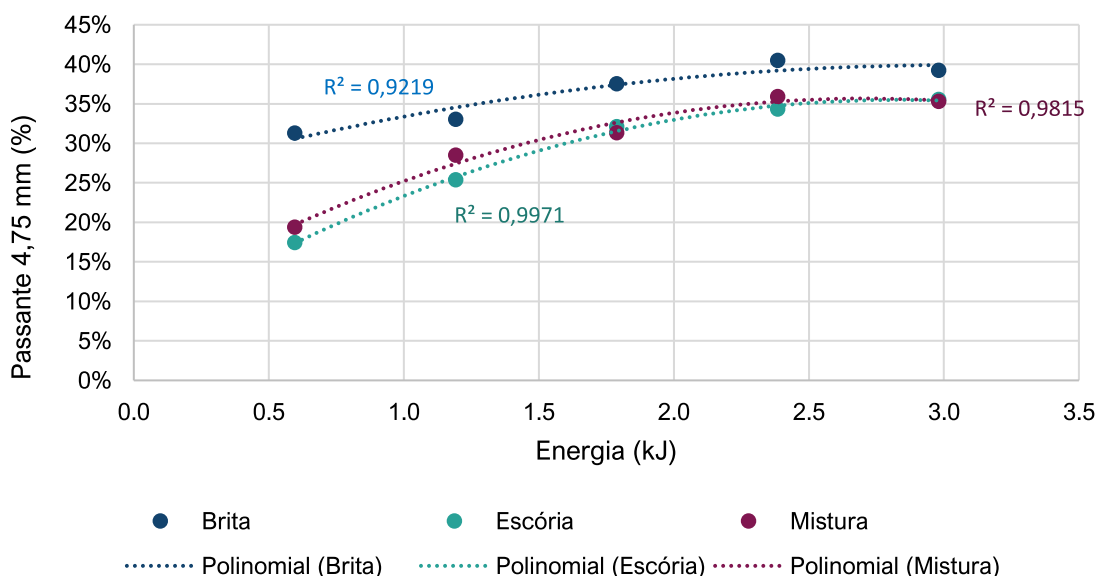
Tabela 14 - Comparação de resultados do índice de tenacidade da escória

Autores	Tenacidade Treton (%)
Presente trabalho	9,5
Pacheco (2006)	3,5
Sousa (2007)	10,2
Fernandes (2010)	7,7
Dayrell (2013)	8,9
Fernandes (2016)	9,4
Ribeiro (2020)	8,9
Gomes, Guimarães e Nascimento (2022)	5,2
Coelho (2024)	9,2

Fonte: Autora (2026).

Para realizar a análise refinada sobre como a energia aplicada influencia na geração de material fino, foi desenvolvido um gráfico de dispersão com os resultados, sendo adicionado uma linha de tendência com ajuste polinomial de segunda ordem, como indicado na Figura 32.

Figura 32 - Relação entre energia e produção de finos no Treton



Fonte: Autora (2026).

Observa-se que o material com menor inclinação é a brita, o que indica menor fragmentação nos primeiros impactos em comparação aos demais materiais. Isso reflete uma maior resistência inicial à quebra; no entanto, a brita continua se fragmentando progressivamente ao longo da aplicação de energia, alcançando a maior porcentagem de finos ao final do ensaio. A escória, por sua vez, apresenta a maior inclinação da curva, evidenciando uma fragmentação intensa nos primeiros

impactos. Contudo, essa inclinação diminui drasticamente ao final do ensaio, iniciando uma fase de estabilização do material.

Esse comportamento de maior quebra no período inicial da escória pode ser atribuído às características microestruturais e morfológicas da escória de aciaria. Trata-se de um material com matriz heterogênea e presença de poros em sua estrutura interna (Dominguez *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023). Isso favorece a concentração de tensões e, conseqüentemente, a ocorrência de fratura frágil nas primeiras solicitações mecânicas. Do ponto de vista morfológico, a escória apresenta formato predominantemente cúbico, com arestas e cantos bem definidos — regiões mecanicamente mais suscetíveis —, além de uma superfície áspera e irregular, que reforça a presença de descontinuidades e potencializa a concentração de tensões (Wang *et al.*, 2023). Contudo, à medida que o ensaio prossegue, essas partículas frágeis são gradualmente eliminadas, restando um conjunto de grãos mais resistentes. Esse comportamento também foi observado no estudo de Kang, Kim e Kang (2024), no qual a escória foi submetida a sucessivos ciclos de compactação. Os autores verificaram que, à medida que o número de ciclos de compactação aumenta, ocorre uma redução na taxa de fragmentação das partículas. Esse processo resulta em uma rápida redução nas taxas de fragmentação, indicando que o material sofre menor degradação e tende a se estabilizar frente a impactos repetidos.

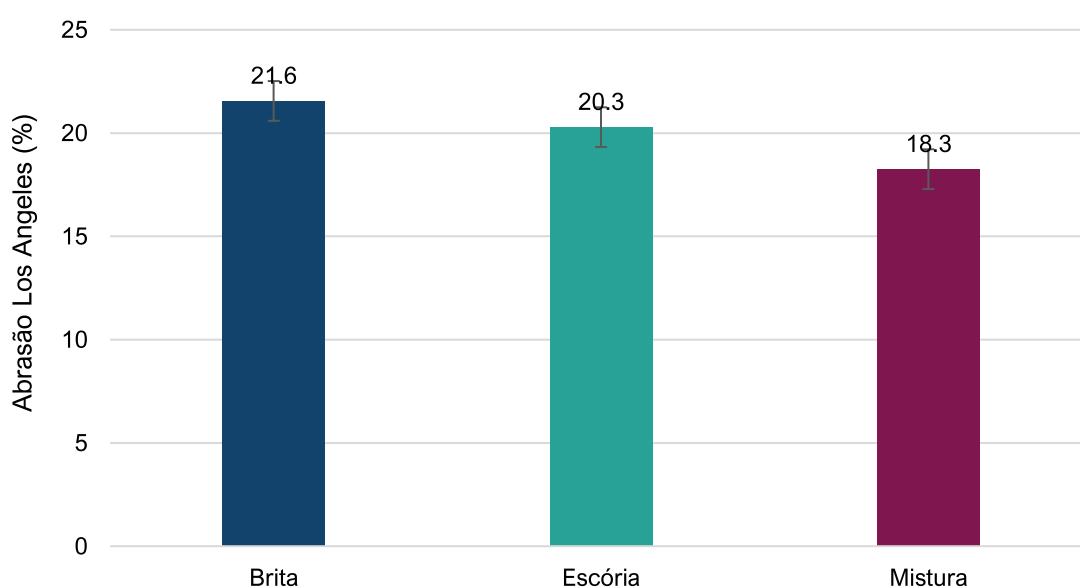
A mistura de brita e escória demonstra um comportamento híbrido: inicialmente semelhante ao da escória, com alta taxa de fragmentação, mas com uma tendência de estabilização nos ciclos seguintes. Isso sugere que a mistura promove uma rápida acomodação inicial, aliada a uma certa retenção de resistência residual, característica que pode ser vantajosa em aplicações onde o desempenho a longo prazo e o custo-benefício sejam relevantes.

Para avaliar o desgaste por abrasão das amostras, foi realizado o ensaio de abrasão Los Angeles, repetido sucessivamente até que a soma do material retido nas peneiras de 19,0 mm e 12,5 mm fosse inferior a 50% da massa inicial. Os resultados brutos obtidos foram organizados no Apêndice A.2, considerando o total de material retido (nas peneiras de 19,0 mm, 12,5 mm, 4,75 mm e 1,70 mm) e a porcentagem de contaminantes — definida como a fração passante na peneira de 19,0 mm.

A abrasão Los Angeles foi determinada com base nos resultados da primeira repetição e conforme a Equação 10, sendo os valores médios representados na

Figura 33. A brita natural apresentou o pior desempenho, com um índice de abrasão de 21,6%, indicando menor resistência ao desgaste. A escória de aciaria obteve um valor ligeiramente inferior, de 20,3%, demonstrando desempenho levemente superior. Já a mistura de brita e escória foi o material com melhor resultado, apresentando o menor índice de abrasão (18,3%) e, conseqüentemente, maior resistência ao impacto e à abrasão. Importante destacar que todos os materiais analisados atenderam aos critérios da NBR 5564, que estabelece um limite máximo de 30% para o ensaio.

Figura 33 - Resultados da abrasão Los Angeles



Fonte: Autora (2026).

A literatura apresenta uma ampla variação nos resultados do ensaio de abrasão Los Angeles para escória de aciaria, com valores entre 11,1% e 25,2% (Tabela 15). Essa discrepância está relacionada principalmente à origem da escória (tipo de forno e composição do aço) e aos tratamentos a que o material foi submetido (como cura, britagem e peneiramento). No presente estudo, foi obtido um valor de 20,3%, o que está dentro da faixa reportada na literatura.

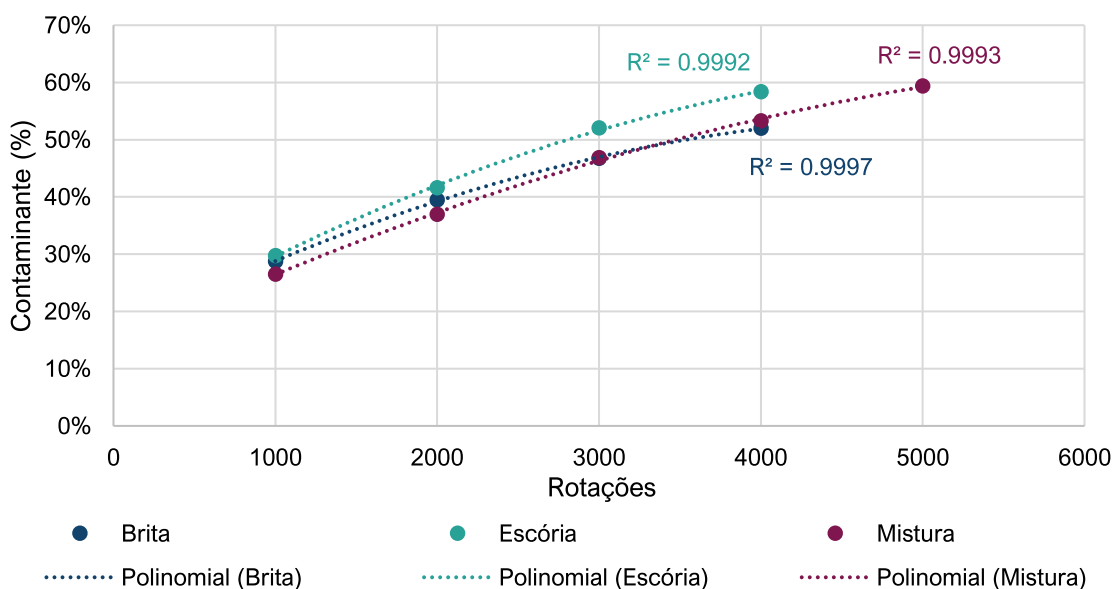
Tabela 15 - Comparação de resultados da abrasão Los Angeles da escória

Autores	Abrasão Los Angeles (%)
Presente trabalho	20,3
Pacheco (2006)	25,2
Sousa (2007)	11,2
Fernandes (2010)	13,8
Dayrell (2013)	15,3
Fernandes (2016)	11,1
Esmaeili, Yousefian e Ghahroudi (2017)	20,8
Chamling, Haldar e Patra (2020)	16,0
Olagunju <i>et al.</i> (2023)	18,7
Wang <i>et al.</i> (2023)	12,2

Fonte: Autora (2026).

Esses resultados são reforçados pela análise da geração de material fino continuada. Enquanto a brita e a escória apresentaram comportamentos semelhantes em termos de desgaste, a mistura demonstrou maior resistência, exigindo cerca de 1.000 rotações adicionais para atingir à porcentagem limite estabelecida de 50% (Figura 34). Isso evidencia a maior durabilidade da mistura frente à abrasão.

Figura 34 - Relação entre energia e produção de finos na abrasão Los Angeles



Fonte: Autora (2026).

Considerando que, no contexto das ferrovias brasileiras, é comum classificar como contaminante o material passante na peneira de 19 mm, observa-se que, após 4.000 rotações, a brita e a mistura apresentam desempenhos semelhantes e mais favoráveis, com 52% e 53% de contaminante, respectivamente. Em contraste, a

escória registra um valor mais elevado, com 58% de contaminante. Esses resultados indicam que a escória tende a se fragmentar mais intensamente, o que pode comprometer sua durabilidade em longo prazo.

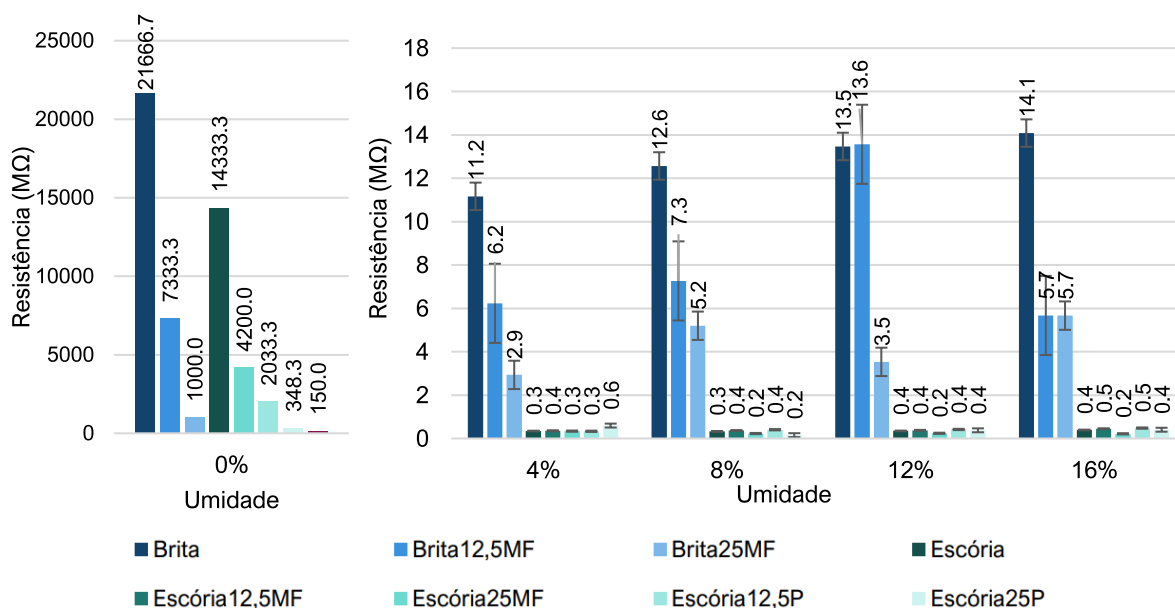
Assim, observa-se que a escória apresentou a maior taxa de geração de contaminante nas primeiras rotações, indicando maior fragilidade inicial frente à ação abrasiva. Em contrapartida, a brita iniciou com uma taxa levemente inferior, mas sofreu uma redução mais acentuada ao longo do ensaio, o que indica uma tendência de estabilização. A mistura, por sua vez, apresentou comportamento intermediário entre a brita e a escória. Da mesma forma que para o ensaio Treton, esse comportamento sugere que, enquanto a escória tem maior propensão à fragmentação desde o início, a brita resiste mais aos impactos e a mistura consegue equilibrar ambos os comportamentos, com degradação progressiva e controlada.

A análise conjunta dos ensaios Treton e abrasão Los Angeles evidencia que, embora ambos avaliem a degradação mecânica por meio da geração de finos, eles simulam mecanismos distintos e complementares de sollicitação no lastro ferroviário — o primeiro associado a impactos dinâmicos repetidos e o segundo ao desgaste por atrito e rolamento. Em ambos os ensaios, observa-se um padrão consistente: a escória apresenta maior fragmentação inicial, atribuída à sua microestrutura heterogênea e porosa, mas tende à estabilização ao longo da aplicação de energia, mantendo índices globais satisfatórios de tenacidade e abrasão; a brita, por sua vez, demonstra melhor desempenho inicial no Treton, porém degrada-se de forma mais contínua, alcançando maiores percentuais acumulados de finos; já a mistura combina os efeitos positivos de ambos os materiais, apresentando melhora significativa na tenacidade em relação à brita pura e o melhor desempenho global no ensaio de abrasão. Essa convergência de resultados indica que a incorporação da escória pode contribuir para uma acomodação inicial mais rápida do lastro, seguida de comportamento mecânico estável, enquanto a mistura se destaca como alternativa tecnicamente promissora por equilibrar resistência ao impacto e ao desgaste progressivo, uma vez que os materiais passam a atuar de forma complementar, distribuindo melhor as tensões e trabalhando de maneira mais eficiente quando combinados.

4.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Este ensaio mediu a resistência do material em diferentes condições de umidade, pulverulência e contaminação de minério de ferro. Os resultados obtidos se encontram no anexo A.3 e seus valores médios se encontram na Figura 35.

Figura 35 - Resultados da resistência elétrica para o material puro e com adição de minério de ferro (MF) e de pulverulento (P)



Fonte: Autora (2026)

A partir da resistência do material, é calculada a resistividade do material utilizando a Equação 15. Como a NBR 5564 não estabelece parâmetros para resistividade ou condutividade elétrica do agregado, adotou-se a referência normativas australiana AS 2758.7 (2009), que define que a resistividade do lastro deve ser superior a $60 \Omega \cdot m$. Outra norma encontrada foi a GOST 7392 (2014), norma Russa que define que a condutividade elétrica deve ser menor ou igual a $0,32 \text{ S/m}$, o que corresponde a, aproximadamente, $3 \Omega \cdot m$, porém devido ao seu baixo valor optou-se por adotar a norma AS 2758.7. A norma americana AREMA apresenta o limite mínimo de resistência como $10 \text{ M}\Omega$ e a empresa parceira, $5 \text{ M}\Omega$, isso representa uma resistividade de $1800 \Omega \cdot m$ e $900 \Omega \cdot m$, respectivamente, para o modelo teste analisado. Entretanto, tanto a AREMA quanto a empresa parceira consideram todo o conjunto estrutural da via, de trilho a trilho, incluindo dormentes e conectores, enquanto a norma australiana e o presente trabalho investigaram apenas o material do lastro isoladamente.

A brita natural apresentou valores elevados de resistividade tanto na condição seca quanto nas condições úmidas (Tabela 16). Em todas as condições analisadas, os valores permaneceram superiores ao limite mínimo de $60 \Omega \cdot m$ estabelecido pela norma AS 2758.7, indicando comportamento adequado para aplicação ferroviária, como se observa na prática.

Tabela 16 - Resistividade elétrica da brita

Material	Umidade	Pulverulento	Minério de ferro	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Brita	0%	0%	0%	3.900.000,0
	4%	0%	0%	2.010,0
	8%	0%	0%	2.262,0
	12%	0%	0%	2.424,0
	16%	0%	0%	2.535,0
Brita 12,5MF	0%	0%	12,5%	1.320.000,0
	4%	0%	12,5%	1.122,0
	8%	0%	12,5%	1.308,0
	12%	0%	12,5%	2.442,0
	16%	0%	12,5%	1.021,2
Brita 25MF	0%	0%	25,0%	180.000
	4%	0%	25,0%	528,0
	8%	0%	25,0%	936,0
	12%	0%	25,0%	636,0
	16%	0%	25,0%	1.020,0
	12%	0%	25,0%	43,2
	16%	0%	25,0%	39,0

Observação: valores em vermelho não se enquadram no padrão da AS 2758.7.

Fonte: Autora (2026)

O DRX (Figura 20) do minério de ferro (MF) evidencia que o material é constituído majoritariamente por quartzo, caulinita e biotita, minerais eletricamente isolantes, além de óxidos de ferro em fases não metálicas (Ekpunobi *et al.*, 2021). A resistividade elétrica do quartzo é da ordem de $10^5 \Omega \cdot m$, da caulinita é $10^4 \Omega \cdot m$ e biotita é $10^3 \Omega \cdot m$ (Saeed *et al.*, 2022; Emelianov *et al.*, 2024; Saltas, Pentari e Vallianatos, 2020). Essa composição mineralógica explica a resistividade do lastro de brita contaminado com 12,5% de minério em condição seca ($1320000 \Omega \cdot m$), uma vez que os finos do MF introduzem materiais de alta resistividade. Já com a presença de umidade ocorreu uma alta redução da resistividade, variando de 1021,2 a 2442,0 $\Omega \cdot m$, devido à formação de caminhos eletrolíticos nas superfícies. Com o aumento do teor de minério para 25%, os finos passam a ocupar de forma mais extensa os espaços

intergranulares, criando uma matriz mais contínua e com maior capacidade de retenção de umidade. Essa condição amplia a área superficial molhada e favorece a formação de caminhos eletrolíticos, resultando na redução da resistividade, variando de 528,0 a 1020,0 $\Omega \cdot m$).

Para a escória de aciaria os resultados se encontram na Tabela 17.

Tabela 17 - Resistividade elétrica da escória de aciaria

Material	Umidade	Pulverulento	Minério de ferro	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
Escória	0%	0%	0%	2.580.000,0
	4%	0%	0%	62,5
	8%	0%	0%	58,8
	12%	0%	0%	63,3
	16%	0%	0%	71,1
Escória 12,5P	0%	12,5%	0%	27.000,0
	4%	12,5%	0%	60,0
	8%	12,5%	0%	72,9
	12%	12,5%	0%	75,0
	16%	12,5%	0%	86,6
Escória 25P	0%	25,0%	0%	756.000,0
	4%	25,0%	0%	107,4
	8%	25,0%	0%	27,9
	12%	25,0%	0%	68,0
	16%	25,0%	0%	72,7
Escória 12,5MF	0%	0%	12,5%	366.000,0
	4%	0%	12,5%	64,5
	8%	0%	12,5%	66
	12%	0%	12,5%	67,8
	16%	0%	12,5%	81,0
Escória 25MF	0%	0%	25,0%	62.700,0
	4%	0%	25,0%	61,1
	8%	0%	25,0%	41,4
	12%	0%	25,0%	43,2
	16%	0%	25,0%	39,0

Observação: valores em vermelho não se enquadram no padrão da AS 2758.7.

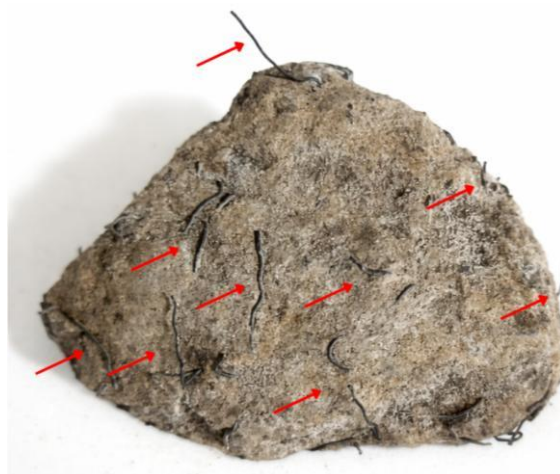
Fonte: Autora (2026)

Na condição seca, a resistividade foi elevada (2580000 $\Omega \cdot m$), porém com a introdução de umidade os valores reduziram-se, atingindo resultados próximos ou inferiores ao limite normativo. Essa situação é justificada pela alta porosidade (5,5%) e capacidade de absorção de água do material (2%). Dentre os valores abaixo do limite se encontram a escória com 8% de umidades, escória com 25% de pulverulento

e 8% de umidade e escória com 25% de minério de ferro nas umidades de 8%, 12% e 16%, variando entre 27,9 e 58,8 $\Omega \cdot m$.

Além disso, os baixos valores de resistividade também estão associados à contaminação da amostra por ferro metálico (Figura 36), proveniente de resíduos do processo de produção do aço. Outro aspecto a ser considerado é a possibilidade de parte dos agregados não apresentar completa estabilidade. Como o processo de carbonatação ocorreu em pátio aberto e envolveu grande volume de material, é possível que, em determinadas regiões, a cura não tenha ocorrido de forma homogênea ou integral.

Figura 36 - Amostra de escória contaminada por ferro



Fonte: Autora (2026)

A presença de material pulverulento mostrou influência relevante. Quando o material se encontra seco, há uma pequena diminuição da resistividade, porém ainda se mantém com valores elevados, isso ocorre porque o material fino ocupa os espaços vazios intragranulares, facilitando o caminho eletrolítico. Já quando associado à umidade ocorreu redução drástica dos valores de resistividade. Isso ocorre porque a combinação de finos e água intensifica a conectividade elétrica entre as partículas, em razão dos fenômenos de capilaridade e adsorção de água no material fino, que é aprimorada quanto mais fino o material, uma vez que apresenta maior área específica (Rostami e Osouli, 2021; Suzuki *et al.*, 2024). Comportamento semelhante foi observado na contaminação por minério de ferro, que também promoveu redução da resistividade, especialmente em maiores teores de umidade.

Para a escória, a resistividade diminuiu com a adição de finos, tanto para o pulverulento quanto para o minério de ferro. Isso provavelmente ocorre porque sua

matriz é rica em óxidos metálicos e microestrutura porosa, favorecendo a condução eletrônica e a formação de caminhos eletrolíticos. Além disso, o minério de ferro ainda contribui para maior retenção de umidade no material, contribuindo para a diminuição da resistência. Vale ressaltar que não foi observado grande variação de resultados entre a escória com pulverulento úmida (27,9 – 107,4 $\Omega \cdot m$) e a escória com minério de ferro úmida (39,0 – 81,0 $\Omega \cdot m$).

Dentre os estudos revisados, a resistividade elétrica do lastro foi determinada a partir de diferentes configurações experimentais. Sousa (2007) desenvolveu um ensaio em uma via férrea simulada, com 2,0 m de comprimento e 45 cm de altura. Já Fernandes (2016) projetou uma caixa de ensaio, reproduzindo um trecho de lastro com 2,2 m de comprimento e 35 cm de altura. Em ambos os casos, assim como no presente trabalho, as medições foram realizadas por meio de um megôhmetro, utilizando uma tensão de 500 V. Já Cosme e Fernandes (2025) instalaram sensores em um trecho experimental para monitorar a variação da resistividade da escória de aço e do lastro de gnaise. Os resultados dos estudos se encontram na Tabela 18.

Tabela 18 - Comparação de resultados da resistividade elétrica da escória

Autores	Setup experimental	Condição	Resistividade (Ωm)
Presente trabalho	Amostra: caixa teste (0,5X0,3X0,3 m) Equipamento: megôhmetro Tensão: 500V	Seco	62.700 – 2.580.000
		Molhado	27,9 – 86,6
(Sousa, 2007)	Amostra: seção de via ferroviária simulada Equipamento: megôhmetro Tensão: 500V	Seco	488,9 – 666,7
		Molhado	133,3 – 266,7
(Fernandes, 2016)	Amostra: caixa teste (2,2X1,2X0,5 m) Equipamento: megôhmetro Tensão: 500V	Seco	560.000 – 640.000
		Molhado	45.000 – 54.000
(Cosme e Fernandes, 2025)	Amostra: trecho experimental Equipamento: sensor TERSOS 12	Seco	10.000 – 11.000
		Molhado	852,0– 1000

Fonte: Autora (2026)

A comparação com a literatura demonstra ampla variação nos valores reportados para resistividade elétrica de lastros. Essa dispersão pode ser atribuída às diferenças de configuração experimental, origem e tratamento da escória, granulometria e

condições ambientais. Ainda assim, os valores obtidos neste trabalho para a escória em condição seca situam-se dentro da ordem de grandeza reportada por Fernandes (2016) e Cosme e Fernandes (2025), enquanto na condição úmida aproximam-se dos valores medidos em campo por Sousa (2007).

Assim, diante da baixa resistência elétrica observada a partir de 8% de umidade, chegando a $27,9 \Omega \cdot m$, não é recomendada a utilização do lastro siderúrgico em vias que empregam sistemas de detecção por circuito elétrico, uma vez que esse material pode interferir no funcionamento do circuito, ocasionando falhas na sinalização, como indicações indevidas de ocupação da via (ocupação fantasma). Entretanto, há a possibilidade de utilização do lastro siderúrgico em vias que adotam sistemas de detecção por contador de eixos, nos quais a resistividade do lastro não interfere na operação do sistema.

Os resultados apresentados evidenciam que a resistividade elétrica do lastro é influenciada pela umidade, pelo teor de material pulverulento e pela presença de minério de ferro. De modo geral, como esperado, observa-se que o aumento da umidade provoca redução da resistividade elétrica, isso ocorre porque as moléculas de água adsorvidas na superfície e absorvidas dentro dos poros do agregado criam caminhos condutores, facilitando o movimento iônico (Suzuki *et al.*, 2024).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso da escória de aciaria como agregado para lastro ferroviário, por meio da realização de ensaios de massa específica aparente, porosidade aparente, absorção de água, impacto Treton, abrasão Los Angeles, resistividade elétrica e expansão, utilizando o método PTM adaptado. Os resultados obtidos permitem uma análise abrangente do desempenho físico e mecânico da escória, bem como de seu comportamento quando comparada à brita natural e à mistura entre ambos os materiais.

A escória de aciaria apresentou massa específica aparente de 3.1 kg/m^3 , valor superior ao mínimo normativo e inclusive maior que o da brita, indicando elevada densidade e potencial contribuição para a estabilidade do lastro. A absorção de água foi de 2,0%, igual ao limite normativo de 2%, enquanto a porosidade aparente atingiu 5,5%, excedendo significativamente o valor recomendado de 2% também. Esses resultados indicam maior capacidade de retenção de água, o que pode impactar negativamente a durabilidade dos outros sistemas da via e exige atenção quanto ao seu comportamento de resistividade elétrica. Em relação à expansão determinada pelo ensaio PTM, a escória, que já veio curada, por carbonatação natural, da siderúrgica por 7 meses, apresentou comportamento satisfatório, mantendo-se dentro dos parâmetros normativos ($<3\%$), com valor de expansão de 1,24%.

No ensaio de impacto Treton, a escória de aciaria apresentou o melhor desempenho entre os materiais analisados, com o menor índice de tenacidade (9,6%), evidenciando elevada resistência a impactos. A brita natural apresentou o pior resultado (21,8%), valor próximo ao limite estabelecido pela NBR 5564 (25%), indicando menor tenacidade. A mistura de brita e escória apresentou desempenho intermediário (10,8%), demonstrando que a incorporação da escória contribui significativamente para o aumento da resistência à fragmentação do conjunto.

Resultados semelhantes foram observados no ensaio de abrasão Los Angeles. A brita natural apresentou o maior índice de desgaste (21,6%), enquanto a escória de aciaria apresentou valor ligeiramente inferior (20,3%). A mistura de brita e escória destacou-se como o material de melhor desempenho, com o menor índice de abrasão (18,3%), indicando maior resistência ao desgaste por impacto e atrito. Ressalta-se que todos os materiais analisados atenderam aos critérios da NBR 5564, que estabelece limite máximo de 30% para este ensaio.

A análise conjunta dos ensaios de impacto Treton e abrasão Los Angeles em ciclos subsequentes permite inferir o efeito do uso da escória de aciaria sobre a frequência de desguarnecimento do lastro ferroviário. Embora a escória apresente maior fragmentação inicial, seu comportamento tende à rápida estabilização, resultando em elevada resistência residual e menor degradação progressiva. Em contraste, a brita natural, apesar de apresentar menor fragmentação inicial, demonstra tendência contínua de degradação ao longo do carregamento, o que favorece a geração acumulada de finos, a colmatação do lastro e a redução acelerada da capacidade estrutural da via. Não foi possível, com a metodologia atual, fazer correlações quantitativas com a vida útil efetiva dos lastros. Recomenda-se, assim, que sejam realizados estudos futuros em ambientes operacionais reais.

Os ensaios de resistividade elétrica demonstraram que o comportamento elétrico do lastro é influenciado pela umidade, pelo teor de finos e pela presença de minério de ferro. A brita natural apresentou elevadas resistividades em condição seca ($180000 - 3900000 \Omega \cdot m$) e manteve valores acima do limite normativo ($60 \Omega \cdot m$ na norma Australiana) em todas as condições, com menor valor encontrado sendo $528,0 \Omega \cdot m$ para a brita com 25% de minério de ferro.

A escória apresentou resistividade de $2580000 \Omega \cdot m$ na condição seca, porém na condição úmida os resultados foram próximos ou inferiores ao limite normativo, chegando a $27,9 \Omega \cdot m$. A resistividade diminui com a adição de finos devido à matriz da escória ser rica em óxidos metálicos e à microestrutura porosa, que favorecem a condução eletrônica e caminhos eletrolíticos. A contaminação por pulverulentos da própria escória e por minério de ferro também aumenta a retenção de umidade devido à adsorção de água nessas partículas com maior área específica, reduzindo a resistência. Não houve grande variação entre a escória com pulverulento úmida ($27,9 - 107,4 \Omega \cdot m$) e com minério de ferro úmida ($39,0 - 81,0 \Omega \cdot m$).

Nesse sentido, a escória apresenta desempenho inferior ao da brita no que se refere à porosidade aparente e à condutividade elétrica, fatores que influenciam diretamente sua aplicação como material de lastro. Em razão da baixa resistência elétrica observada, a utilização do lastro siderúrgico não é indicada em vias que operam com sistemas de detecção por circuito elétrico, pois o material pode interferir no funcionamento do sistema em casos de chuva. Por outro lado, sua aplicação é viável em trechos ferroviários que utilizam sistemas de detecção por contador de

eixos, nos quais a resistividade do lastro não afeta a operação. Nesse contexto, a adoção de misturas entre brita e escória configura-se como uma alternativa promissora a ser investigada, com potencial para otimizar o desempenho global do material, tendo possível aplicação em vias com sistemas de detecção por circuito elétrico.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos em escala real, com a implantação experimental de trechos de via utilizando escória de aciaria pura e em diferentes proporções de mistura com brita natural, de modo a monitorar o desempenho estrutural, a geração de finos, a evolução da colmatação e a frequência de desguarnecimento ao longo do tempo. Ensaios sob carregamento cíclico em grande escala e modelagens numéricas também podem contribuir para estabelecer correlações quantitativas entre os resultados laboratoriais e a vida útil efetiva do lastro. Considerando a relevância da resistividade elétrica, sugere-se aprofundar a investigação do comportamento eletro-hidráulico do material, incluindo estudos sobre drenagem, diferentes teores de umidade, contaminação progressiva por finos e estratégias de mitigação, como tratamentos superficiais ou pré-processamentos da escória.

REFERÊNCIAS

ABADI, T. et al. Improving the performance of railway tracks through ballast interventions. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, 232, n. 2, 2016. 337-355.

ABADI, T. et al. Reusing Life-Expired Railway Ballast: Laboratory Testing, Shape Analysis, and Petrographic Evaluation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 149, n. 1, 2022.

ABNT. **NBR 10004: resíduos sólidos – classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2004.

ABNT. **ABNT NBR 16973:2021 - gregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2021.

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

ALMEIDA, R. C.; VIEIRA, C. M. F.; DELAQUA, G. C. G. **Incorporação de escórias dos processos siderúrgicos em cerâmica vermelha**. 63º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Bonito, MS: [s.n.]. 2019. p. 316-325.

ALVES, D. M. et al. Análise do comportamento da susceptibilidade magnética e condutividade elétrica no perfil de alteração rochoso do depósito niquelífero de Morro do Engenho, Goiás, Brasil. **Sixteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, Rio de Janeiro, 2019. 19-22.

ALVES, H. C.; GOMES, G. J. C. Weathering resistance of Linz–Donawitz (LD) slag as ballast material using freeze-thaw and sulfate soundness. **Transportation Geotechnics**, 40, 2023. 100973.

AMARAL, L. A. **Hormigones com escorias de forno elétrico como aridos: propriedades, durabilidad y comportamiento ambiental**. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona, p. 230. 1999.

ARACHCHIGE, C. M. K. et al. Deformation and degradation behaviour of Rubber Intermixed Ballast System under cyclic loading. **Engineering Geology**, 307, 2022. 106786.

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

ARULRAJAH, A. et al. Recovered plastic and demolition waste blends as railway capping materials. **Transportation Geotechnics**, 22, 2020. 100320.

AS, S. A. **AS 2758.7:2009. Aggregates and rock for engineering purposes: Part 7: Railway ballast**. Sydney. [S.I.]. 2009.

AVNI, Y. et al. Conductivity of Concentrated Electrolytes. **Physical Review Letters**, 128, 2022.

BAHUGUNA, B. P. et al. Theory of electrical conductivity. **Indian Journal of Pure & Applied Physics**, 37, 1998. 142-149.

BARICOVÁ, D. et al. Change of the Chemical and Mineralogical Composition of the Slag during Oxygen Blowing in the Oxygen Converter Process. **Metals**, Košice, 8, n. 10, Outubro 2018. 844.

BASTOS, L. A. D. C. et al. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 28, n. 10, 2016.

BHATTY, J. I. review of the application of thermal analysis to cement - admixture systems. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, 189, 1991. 313-350.

BIFFEN, F. M. Determination of free lime and carbonate in calcium silicate hydrates by thermobalance. **Analytical Chemistry**, 28, 1956. 1133-1136.

CAO, R. et al. **Volumetric stability control of steel slag and its mechanism research**. The 8th International Conference on Energy, Environment and Materials Science. [S.I.]: [s.n.]. 2024. p. 4.

CARMIGNANO, O. R. et al. Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 32, n. 10, 2021. 1895-1911.

CARVALHO, A. et al. Proposition of geopolymers obtained through the acid activation of iron ore. **Construction and Building Materials**, 403, 2023. 133078.

CARVALHO, P. S. L. D.; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 41, março 2015. 181-236. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4287>>.

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

CHOKSHI, Y. et al. Mineralogical Studies of Low-Grade Iron Ore from Jharkhand–Orissa Region, India. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, 69, 2016. 151–155.

CLOUT, J. M. F.; MANUEL, J. R. Chapter 2 - Mineralogical, chemical, and physical metallurgical characteristics of iron ore. In: _____ **Iron Ore**. 2^a. ed. [S.l.]: [s.n.], 2022. p. 59-108.

COELHO, L. M. et al. Influence of the Bailey Gradation Method on the Mechanical Behavior of Asphalt Mixture Containing Steel Slag as an Alternative Aggregate. **Buildings**, 14, n. 12, 2024. 3942.

CONSULAB - CONSULTORIA E ENGENHARIA. **Amostra da Harsco/CSN**. Juiz de Fora, p. 28. 2024.

CONSULAB - CONSULTORIA E ENGENHARIA. **Amostra da pedra CH Vargas**. Juiz de Fora, p. 20. 2024.

COSME, J.; FERNANDES, G. Steel slag aggregate as a sustainable alternative to railway ballast: field and laboratory evaluation. **Transportation Geotechnics**, 55, 2025. 101705.

COUTO, K. S. **Investigação ambiental e financeira do uso de agregado siderúrgico como lastro em pavimentos ferroviários**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2025.

CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil: Equações Intensidade-Duração-Frequência. Município: Juiz de Fora**. Ministério de Minas e Energia. Porto Alegre, p. 12. 2014.

DAI, L. et al. Electrical conductivities of minerals and rocks in the Earth crust, upper mantle, mantle transition zone and subduction zone. **Acta Geologica Sinica**, 93, 2019. 120-121.

DAYRELL, F. D. O. **Metodologia geotécnica sustentável para credenciamento da escória de aciaria como lastro ferroviário**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 179. 2013.

DELGADO, B. G. et al. Geomechanical assessment of an inert steel slag aggregate as an alternative ballast material for heavy haul rail tracks. **Construction and Building Materials**, 279, 12 Abril 2021. 122438.

DELGADO, B. G. et al. Particle morphology's influence on the rail ballast behaviour of a steel slag aggregate. **Environmental Geotechnics**, 9, n. 6, 2022. 373-382.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **EM 262/94 - Escórias de aciaria para pavimentos rodoviários**, Rio de Janeiro, p. 4, 1994.

DNIT. **DNIT 113/2009-ME: Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria - Método de ensaio**. DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. Rio de Janeiro, p. 12. 2009.

DNIT. **Agregados – Determinação do desgaste por abrasão e impacto no equipamento "Los Angeles" - Método de ensaio**. Ministério dos Transportes. Brasília, p. 9. 2024. (Processo: 50600.012970/2024-42). Revisão da norma DNER-ME 035/98.

DOMINGUEZ, A. G. B. et al. Characterization and Mössbauer spectroscopy of steel slag generated in the ladle furnace in SIDERPERU steel plant. **Hyperfine Interactions**, 243, 2022.

EKPUNOBI, U. et al. Production of Electrical Porcelain Insulators from Local Raw Materials: A Review. In: _____ **Clay and Clay Minerals**. [S.l.]: [s.n.], 2021.

EL-JAZAIRI, B.; ILLSTON, J. M. A simultaneous semi-isothermal method of. **Cement and Concrete Research**, 7, 1977. 247-258.

EL-SHAHAT, A. **Electrical Resistivity and Conductivity**. [S.l.]: IntechOpen, 2017. 124 p. ISBN 978-953-51-3186-1.

EMELIANOV, V. et al. Surface conductivity of clays. **Geophysical Journal International**, 238, n. 2, 2024. 1013–1026.

ESMAEILI, M.; YOUSEFIAN, K.; GHAHROUDI, P. A. An investigation of abrasion and wear characteristics of steel slag and granite ballasts. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, 24 Outubro 2017. 1-12.

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

FERNANDES, D. P. **Metodologia para estabilização química do agregado siderúrgico para aplicação como lastro ferroviário**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 224. 2016.

FERNANDES, D. P.; COSME, J.; FERNANDES, G. Analysis of carbonation and hydration of BOF steel slag for application as railway ballast. **Civil Engineering**, Ouro Preto, 73, n. 4, Outubro-Dezembro 2020. 477-485.

FORDHAM, C. J.; SMALLEY, I. J. A simple thermogravimetric study of hydrated cement. **Cement and Concrete Research**, New York, 15, 1985. 141-144.

GEISELER, J.; SCHLOSSER, R. **Investigations concerning structure and properties of steel slags**. International Conference on Molten Slags and Fluxes. Glasgow: [s.n.]. 1988. p. 27-29.

GEYER, R. M. T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 170. 2001.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. **Mineração, REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto**, 64, n. 2, 2011. 233-236.

GOMES, M. B. B.; GUIMARÃES, A. C. R.; NASCIMENTO, F. A. C. Análise da influência da umidade nos ensaios de perda de massa por abrasão e por impacto em um agregado siderúrgico para utilização em lastro ferroviário. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, 8, n. 7, 2022. 51646-51659.

GUIMARÃES, A. C. R. et al. Study of controlled leaching process of steel slag in Soxhlet extractor aiming employment in pavements. **Transportation Geotechnics**, 27, Março 2021. 100485.

GUO, Y. et al. Effects of crumb rubber size and percentage on degradation reduction of railway ballast. **Construction and Building Materials**, 212, 2019. 210-224.

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

HE, Z.; HU, X.; CHOU, K.-C. Synergetic modification of industrial basic oxygen furnace slag and copper slag for efficient iron recovery. **Process Safety and Environmental Protection**, 165, Setembro 2022. 487-495.

HOSSEINI, S. et al. Production and applications of electric-arc-furnace slag as solid waste in environmental technologies: a review. **Environmental Technology Reviews**, 5, 2016.

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

INDRARATNA, B. et al. Use of Recycled Rubber Inclusions with Granular Waste for Enhanced Track Performance. **Transportation Engineering**, 6, 2021. 100093.

INDRARATNA, B. et al. The role of recycled rubber inclusions on increased confinement in track substructure. **Transportation Geotechnics**, 36, 2022. 100829.

INDRARATNA, B. et al. Sustainable Performance of Recycled Rubber and Mining Waste Utilized for Efficient Rail Infrastructure. **Indian Geotechnical Journal**, 54, 2024. 1738-1750.

INDRARATNA, B.; NIMBALKAR, S.; NEVILLE, T. Performance assessment of reinforced ballasted rail track, 167, Fevereiro 2014. 24-34.

INOUE, R. et al. Control of Hydration of Free Magnesia in Steelmaking Slag. **Sustainable Metallurgy**, 7, 9 agosto 2021. 818-830. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40831-021-00401-y>>.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Aço & Sustentabilidade 2021**. Rio de Janeiro. 2021.

JARJOUR, J.; MEGUID, M. **On the Use of Recycled Waste Materials in Ballasted Railway Infrastructures: A Review**. Geosaskatoon 2023: Bridging infrastructures and resources. Canada: [s.n.]. 2023.

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

JING, Z.; MINGYANG, L.; FENG, L. **Reduction curing and stabilizing method for arsenic sulfide slag.**, 2019.

KANG, J.; KIM, Y.; KANG, G. Crushing characteristics and particle size distribution of steelmaking slag. **Powder Technology**, 439, 2024.

KOH, T. et al. A Feasibility Study on the Application of Basic Oxygen Furnace (BOF) Steel Slag for Railway Ballast Material. **Sustainability**, 10, n. 2, 2018.

KOUZEHKANAN, S. M. T. et al. Calcium-Based Sorbent Carbonation at Low Temperature via Reactive Milling under CO₂. **Inorganics**, 11, n. 5, 2023.

KUMARI, N.; MOHAN, C. Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties. In: DO NASCIMENTO, G. M. **Clay and Clay Minerals**. [S.l.]: IntechOpen, 2021.

LAN, Y. et al. Optimization of magnetic separation process for iron recovery from steel slag. **Jornal of Iron and Steel Research, Internacional**, 24, n. 2, 2017. 165-170.

LEE, F. T.; LEE, C. H. Study on the reduction behaviour of FeO in EAF slag. **Steel Times International**, 19, 1995. 20-21,24-25. Disponível em: <<https://www.proquest.com/scholarly-journals/study-on-reduction-behaviour-feo-eaf-slag/docview/1370924386/se-2>>. Acesso em: 30 Dezembro 2024.

LEITE, A. L. et al. Atividade mineradora e impactos ambientais em uma empresa cearense. In: _____ **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. [S.l.]: [s.n.], 2017. p. 7282-7286.

LI, G. et al. The mineral phase evolution characteristics and hydration activity enhancement mechanism of steel slag under NaOH alkaline excitation. **Journal of Alloys and Compounds**, 978, 25 março 2024. 173524.

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

LIBÂNO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 3^a. ed. Campinas: Editora Átomo, 2010. 494 p.

LIBRANDI, P. et al. Mechanical and environmental properties of carbonated steel slag compacts as a function of mineralogy and CO₂ uptake. **Journal of CO₂ Utilization**, 33, Outubro 2019. 201-214.

LIU, Y.; GAO, R.; CHEN, J. A new DEM model to simulate the abrasion behavior of irregularly-shaped coarse granular aggregates. **Granular Matter**, 23, n. 61, 2021.

LOBATO, N. C. C. Gerenciamento de resíduos sólidos da indústria, Belo Horizonte, 2014. 143. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/2182M.PDF>>.

LU, Y. et al. Effect of Pore-Water Salinity on the Electrical Resistivity of Partially Saturated Compacted Clay Liners. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2019. 13.

LUO, Y.; HE, D. Research status and future challenge for CO₂ sequestration by mineral carbonation strategy using iron and steel slag. **Environmental Science and Pollution Research**, 28, 2021. 49383-49409.

LV, Y. et al. Environmental and feasible analysis of recycling steel slag as aggregate treated by silicone resin. **Construction and Building Materials**, 299, 2021. 123914.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, p. 135. 2000.

MANDAL, H. K. Effect of temperature on electrical conductivity in industrial effluents. **Recent Research in Science and Technology**, 6, n. 1, 2014. 171-175.

MARTINS, A. C. P. et al. Steel slags in cement-based composites : an ultimate review on characterization, applications and performance. **Construction and Building Materials**, 291, 2021.

MENDES, J. C. et al. Coating mortars based on mining and industrial residues. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 22, 2020. 1569-1586.

MERHEB, A. H. M. **Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos**. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2014.

MIDGLEY, H. G. The determination of calcium hydroxide in set Portland cements. **Cement and Concrete Research**, New York, 9, 1979. 77-83.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Programa MAI/DAI**. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Brasília. 2021.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Plano Nacional de Logística 2035**. [S.l.], p. 216. 2021.

MISHRA, D. et al. Characterization of Railroad Ballast Behavior under Repeated Loading: Results from New Large Triaxial Test Setup. **Journal of the Transportation Research Board**, 2374, 2013.

MIZUHATA, M. Electrical Conductivity Measurement of Electrolyte Solution. **Electrochemistry**, 90, 2022. 102011.

MOLINÉ, M. N.; MARTINEZ, A. G. T.; GALLIANO, P. G. Effect of Humidity on Steelmaking White Slag Weathering. **Metallurgical and Material Transactions B**, 52, 2021. 3744-3755.

NABOCHENKO, O. et al. Studying the Railroad Track Geometry Deterioration as a Result of an Uneven Subsidence of the Ballast Layer. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, 7, 2019. 50-59.

NAEINI, M. et al. Stiffness and strength characteristics of demolition waste, glass and plastics in railway capping layers. **Soils and Foundations**, 59, n. 6, Fevereiro 2020.

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

OLIVEIRA, B. S. et al. Avaliação do potencial do reaproveitamento da escória de aciaria LD como agregado siderúrgico. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, 7, n. 2, 2018. 206-229.

OLIVEIRA, M. S.; BRITO, J. R. S. Eficiência do transporte ferroviário de carga brasileiro em perspectiva internacional: uma análise comparativa. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, 13, 2024.

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

PANG, A. et al. Transition of Blast Furnace Slag from Silicate Based to Aluminate Based: Electrical Conductivity. **Metallurgical and Materials Transactions B**, 50, 2019. 385-394.

PASETTO, M. et al. The Use of Steel Slags in Asphalt Pavements: A State-of-the-Art Review. **Sustainability**, 15, n. 11, 2023.

PATRA, S. et al. Mineralogical and Chemical Characterization of Low Grade Iron Ore Fines from Barsua Area, Eastern India with Implications on Beneficiation and Waste Utilization. **Journal of the Geological Society of India**, 94, n. 4, 2019. 443–454.

PECHARROMÁN, R. R. et al. Riding the Rails to DC Power Efficiency: Energy efficiency in dc-electrified metropolitan railways. **EEE Electrification Magazine**, 2, n. 3, 2014. 32-38.

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

PLASSER & THEURER. **O processo correto da socaria**. [S.l.], p. 36. 2018.

PLASSER DO BRASIL. **Site da Plasser do Brasil**, 2018a. Disponível em: <<https://www.plasser.com.br/pt/maquinas-sistemas/usp-2010-sws.html>>. Acesso em: 04 Janeiro 2025.

PLASSER DO BRASIL. **Site da Plasser do Brasil**, 2018b. Disponível em: <<https://www.plasser.com.br/pt/maquinas-sistemas/zrm-350.html>>. Acesso em: 01 Janeiro 2025.

POLESE et al. Caracterização Microestrutural da Escória de Aciaria. **Revista Matéria**, 11, 2006. 444-454. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10814>>. Acesso em: 09 outubro 2024.

QIAN, Y. et al. Triaxial testing of new and degraded ballast under dry and wet conditions. **Transportation Geotechnics**, 34, 2022. 100744. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100744>>.

QIANG, W. et al. The use of recycled rubber in ballasted railway tracks: A review. **Journal of Cleaner Production**, 420, 2023. 138339.

REN, Z.; LI, D. Application of Steel Slag as an Aggregate in Concrete Production: A Review. **Materials**, 16, n. 17, 2023. 5841. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma16175841>>.

RIBEIRO, F. B. et al. Characterization of silicon-manganese iron slag for employment in base and sub-base layers for highway. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)**, 7, n. 5, 2020. 105-114.

ROBISON, M.; SCHUT, D. RobinsRail as the Sustainable Backbone of the Energy Efficient Transport Chain – A World View. **OIDA International Journal of Sustainable Development**, 07, 31 Agosto 2014. 19-30. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=2489755>>. Acesso em: 26 setembro 2024.

ROSTAMI, H.; OSOULI, A. Electrical Resistivity Changes in Wet and Dry Side of Optimum Moisture Content for Soils with Low to High Fines Content. **Advances in Transportation Geotechnics IV**, 2021. 829–836.

RUSSIA. **GOST 7392-2014: Crushed stone from dense rocks for ballast layer of railway track**. Moscow, p. 35. 2014.

SAEED, A. et al. Electrical and Dielectric Properties of the Natural Calcite and Quartz. **Silicon**, 14, 2022. 5265–5276.

SAHOO, S. et al. A Study on Removal of Clay Minerals from Barbil Region Iron Ore; Effect of Scrubbing Followed by Pelletization. **Mining, Metallurgy & Exploration**, 38, 2021. 105-116.

SALTAS, V.; PENTARI, D.; VALLIANATOS, F. Complex Electrical Conductivity of Biotite and Muscovite Micas at Elevated Temperatures: A Comparative Study. **Materials**, 13, n. 16, 2020. 3513.

SANTOS, V.; GASTMANS, D. Composição química da água de chuva em Rio Claro (SP). **Revista Instituto Geológico**, São Paulo, 37, n. 2, 2016. 45-60.

SBRIGHI, C. N.; BATTAGIN, I. L. S. Precauções e limitações do uso de escórias como agregados na construção civil. **CPTI**, São Paulo, 2002. 40.

SCHUMACHER, A. G. et al. Blending Linz–Donawitz and Blast Furnace slags with the Kambara reactor byproduct to improve their reuse in roadworks. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 24, 2022. 2555–2568.

SELING, E. T.; WATERS, J. M. **Track Geotechnology and Substructure Management**. [S.l.]: [s.n.], 1994.

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

SILVA, G. et al. **Escórias Siderúrgicas–Material de Múltiplas Aplicações**. DNER/IPR/Divisão de Pesquisas. [S.l.]. 1988.

SILVA, M. J. et al. Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers. **ACI Materials Journal**, 113, n. 4, 2016. 439-446.

SORANÇO, L. et al. Reaproveitamento de resíduos como lastro ferroviário: uma revisão sistemática e análise crítica no contexto brasileiro. **Transportes, em revisão**, 2025.

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

SOUZA, A. H. et al. Mineralogical Characterization Applied to Iron Ore Tailings from the Desliming Stage with Emphasis on Quantitative Electron Microscopy (QEM). **Materials Research**, 24, n. 3, 2021.

SUZUKI, T. et al. Dependence of resistivity of natural rock samples on humidity. **Journal of Applied Geophysics**, 220, 2024. 105271.

THANUSHAN, G.; MILOJAN, K.; KURUKULASURIYA, L. C. **Hydraulic Characteristics of Ballast Subjected to Particle Degradation Using Parallel Gradation Technique**. ICSECM 2019. Singapore: Springer. 2020. p. 141-152.

TRYKOZ, L. V. et al. Investigation into electrical conductivity of the multicomponent system of trackbed. **International Journal of Engineering Research in Africa**, 25, 2016. 52-57.

UDO, M. O. et al. Factors Affecting Ballability of Mixture Iron Ore Concentrates and Iron Oxide Bearing Wastes in Metallurgical Processing. **Journal of Ecological Engineering**, 19, n. 3, 2018. 235-242.

VELLA, L.; EMERSON, D. Electrical Properties of Magnetite- and Hematite-Rich Rocks and Ores. **ASEG Extended Abstracts**, 2012. 1-4.

WAN, Q.; YANG, J.; YAN, P. Cementitious properties of super-fine steel slag. **Powder Technology**, 245, Setembro 2013. 35-39.

WANG, H. L. et al. Wear resistance analysis of steel slag aggregates based on. **Construction and Building Materials**, 409, 2023. 133649.

WANG, M. et al. The Electrical Properties of Dacite Mixed with Various Pyrite Contents and Its Geophysical Applications for the High-Conductivity Duobaoshan Island Arc. **Minerals**, 14, n. 10, 2024. 1032.

WANG, S. et al. A Review on the Carbonation of Steel Slag: Properties, Mechanism, and Application. **Materials**, 17, n. 9, 2024. 2066.

WANG, W. C.; LIU, C. C.; LEE, C. Effectiveness of Steam Treating Method on Inhibiting the Expansive Problem of Concrete with Slag as Aggregate. **Advanced Materials Research**, 723, 2013. 609-616.

WEAST, R. C. **Handbook of Chemistry and Physics**. 52. ed. [S.l.]: The Chemical Rubber Co, 1971.

XIE, J. et al. Material characterization and performance evaluation of asphalt mixture Incorporating basic oxygen furnace slag (BOF) sludge. **Construction and Building Materials**, 147, 2017. 362-370.

ZHANG, X. et al. The Mineral Phase Evolution Characteristics and Hydration Activity Enhancement Mechanism of Steel Slag Under Naoh Alkaline Excitation. **SSRN**, 29 setembro 2023. Disponível em: <<https://ssrn.com/abstract=4587492>>.

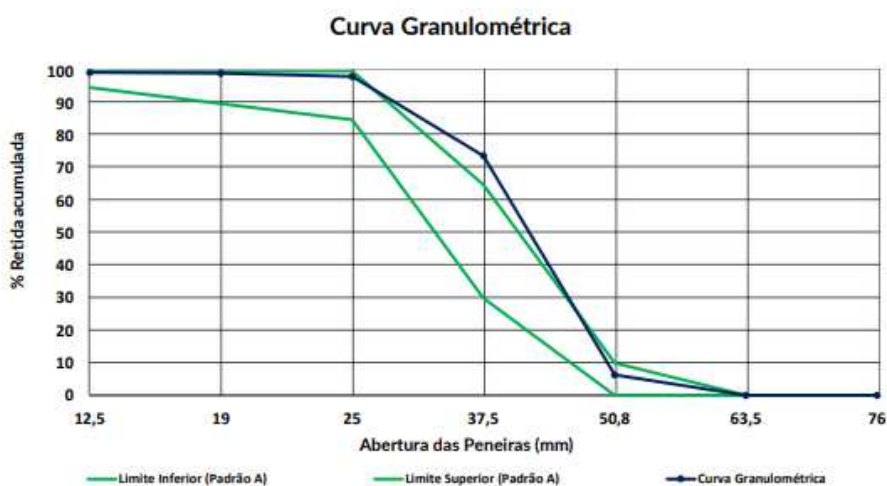
ZHAO, X. et al. Hydration activity and expansibility of different divalent metal oxide solution compositions in steel slag. **Advances in Cement Research**, 35, n. 9, 2023. 408-418.

APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS BRUTOS

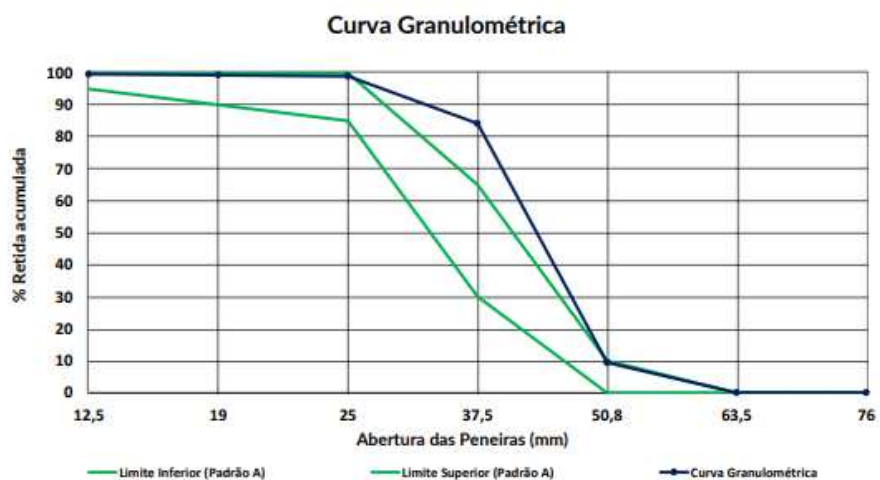
Neste apêndice, são apresentadas as tabelas com os resultados obtidos nos ensaios realizados durante a pesquisa. Esses dados complementam a análise descrita no corpo do trabalho, permitindo melhor compreensão e conferência dos cálculos e interpretações.

A.1 GRANULOMETRIA DA BRITA DE GNAISSE

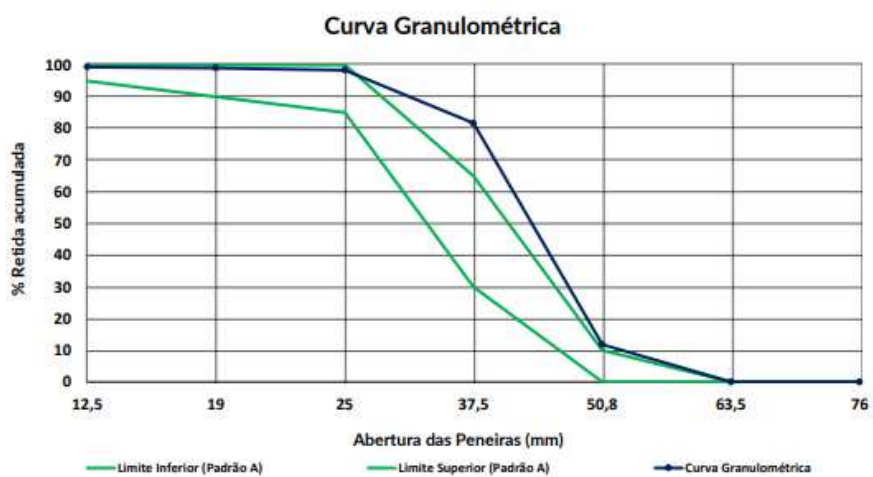
a) Amostra 1



b) Amostra 2



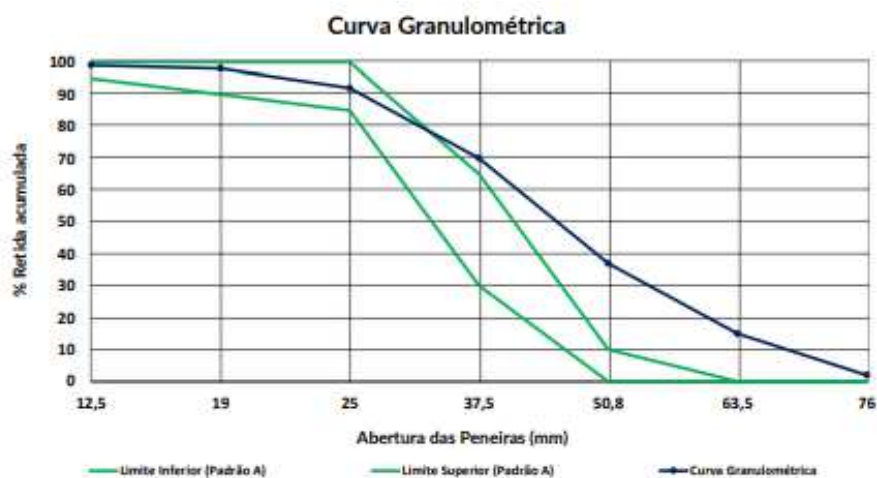
c) Amostra 3



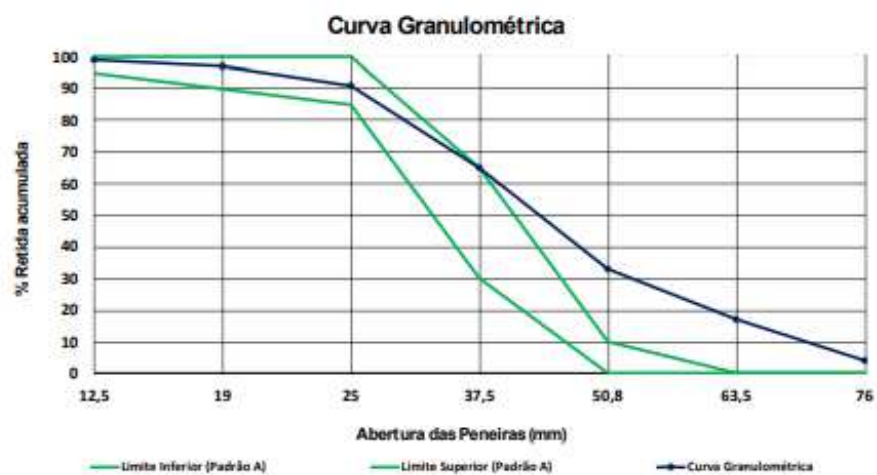
Fonte: (Consulab - Consultoria e Engenharia, 2024)

A.2 GRANULOMETRIA DA ESCÓRIA DE ACIARIA

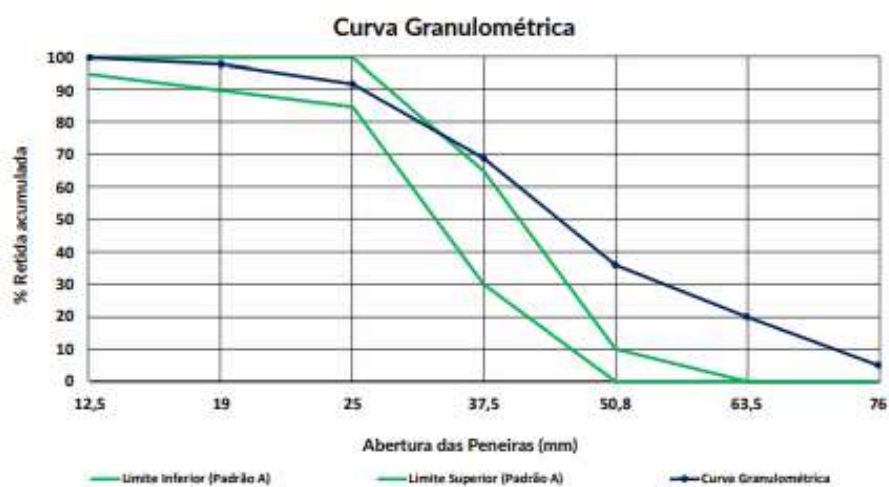
a) Amostra 1



b) Amostra 2



c) Amostra 3



Fonte: (Consulab - Consultoria e Engenharia, 2024).

A.3 TABELA DE RESULTADOS SO ENSAIO TRETON

São apresentados os resultados do ensaio Treton, realizado conforme o procedimento descrito no item 0.

Material	Repetição	Massa	Retido 4,75 mm	Retido 1,7 mm	Total retido	Passante	% Passante	% Retida
Brita	Massa inicial	-	-	-	132,2	-	-	100%
	1	132,2	90,8	18,0	108,8	23,4	18%	82%
	2	108,8	65,1	27,3	92,4	39,7	30%	70%
	3	92,4	42,8	33,3	76,2	56,0	42%	58%
	4	76,2	22,6	35,8	58,4	73,8	56%	44%
	5	58,4	6,6	33,6	40,1	92,0	70%	30%
Escória	Massa inicial	-	-	-	165,7	-	-	100%
	1	165,7	136,8	14,7	151,5	14,2	9%	91%
	2	151,5	109,4	26,3	135,7	29,9	18%	82%
	3	135,7	82,5	36,2	118,8	46,9	28%	72%
	4	118,8	61,9	40,9	102,8	62,9	38%	62%
	5	102,8	43,9	43,3	87,2	78,5	47%	53%
Mistura	Massa inicial	-	-	-	160,3	-	-	100%
	1	160,3	129,2	15,5	144,8	15,5	10%	90%
	2	144,8	99,1	21,3	120,4	39,9	25%	75%
	3	120,4	70,2	30,3	100,4	59,9	37%	63%
	4	100,4	42,9	36,0	78,9	81,4	51%	49%
	5	78,9	22,3	36,0	58,3	102,0	64%	36%

A.4 TABELA DE RESULTADOS DO ENSAIO DE ABRASÃO LOS ANGELES

São apresentados os resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles, realizado conforme o procedimento descrito no item 0.

Material	Rotações	Retido 19,0 mm	Retido 12,5 mm	Retido 4,75 mm	Retido 1,7 mm	%Retido	%Contaminante
Brita	0	-	-	-	-	100%	-
	1000	7127,9	369,55	271,45	75,75	78%	29%
	2000	6053,45	342,35	206,95	38,2	66%	39%
	3000	5325	270,4	148,55	24,9	58%	47%
	4000	4799,5	188,15	78,15	9,6	51%	52%
Escória	0	-	-	-	-	100%	-
	1000	7025,25	420,4	403,7	121,55	80%	30%
	2000	5837,75	532,15	469,55	115,8	70%	42%
	3000	4795,4	602,2	431,3	116,5	59%	52%
	4000	4165,15	524,55	378,45	88,5	52%	58%
Mistura	0	-	-	-	-	100%	-
	1000	7410,5	433,2	313,3	84,7	82%	26%
	2000	6354,45	504,1	312,65	59,65	72%	37%
	3000	5360,15	600,15	312,15	45	63%	47%
	4000	4711,8	462,5	292,4	46,6	55%	53%
	5000	4097,2	583,4	401,7	98,3	51%	59%

A.5 TABELA DE RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA

São apresentados os resultados do ensaio de resistência elétrica, realizado conforme o procedimento descrito no item 3.2.5.

Material	Umidade	Pulverulento	Minério de ferro	Resultados (MΩ)		
Brita 0	0%	0%	0%	16000	12000	37000
	4%	0%	0%	6,2	7,3	20,000
	8%	0%	0%	3,6	4,1	30
	12%	0%	0%	4	9,4	27
	16%	0%	0%	4,25	13	25
Escória 0	0%	0%	0%	20000	11000	12000
	4%	0%	0%	0,295	0,181	0,565
	8%	0%	0%	0,32	0,13	0,53
	12%	0%	0%	0,374	0,156	0,525
	16%	0%	0%	0,38	0,135	0,67
Escória 12,5P	0%	12,5%	0%	80	260	110
	4%	12,5%	0%	0,23	0,36	0,41
	8%	12,5%	0%	0,285	0,44	0,49
	12%	12,5%	0%	0,32	0,48	0,45
	16%	12,5%	0%	0,34	0,58	0,523
Escória 25P	0%	25,0%	0%	2600	4600	5400
	4%	25,0%	0%	0,8	0,8	0,19
	8%	25,0%	0%	0,13	0,11	0,225
	12%	25,0%	0%	0,16	0,77	0,203
	16%	25,0%	0%	0,142	0,8	0,27
Brita 12,5MF	0%	0%	12,5%	10000	2000	10000
	4%	0%	12,5%	5,5	7,4	5,8
	8%	0%	12,5%	6,5	10	5,3
	12%	0%	12,5%	30	4,6	6,1
	16%	0%	12,5%	4,62	7,4	5
Brita 25MF	0%	0%	25,0%	1500	600	900
	4%	0%	25,0%	2,5	1,8	4,5
	8%	0%	25,0%	6,1	2	7,5
	12%	0%	25,0%	2,9	2,2	5,5
	16%	0%	25,0%	6,8	2,5	7,7
Escória 12,5MF	0%	0%	12,5%	1800	2800	1500
	4%	0%	12,5%	0,57	0,22	0,285
	8%	0%	12,5%	0,58	0,16	0,36
	12%	0%	12,5%	0,55	0,17	0,41
	16%	0%	12,5%	0,75	0,16	0,44
Escória 25MF	0%	0%	25,0%	450	75	520
	4%	0%	25,0%	0,71	0,167	0,142
	8%	0%	25,0%	0,38	0,16	0,15

Material	Umidade	Pulverulento	Minério de ferro	Resultados (MΩ)		
	12%	0%	25,0%	0,42	0,18	0,12
	16%	0%	25,0%	0,34	0,19	0,12

APÊNDICE B – TRABALHOS PUBLICADOS

Titulo	Revista	Ano	Link
Use Of Waste As Railway Ballast: A Systematic Review	WREN Symposium 2025	2025	https://thewren.global/event/wren-symposium-2025/
Escória De Aciaria Como Alternativa Para Agregados No Lastro Ferroviário: Uma Revisão De Literatura	27° ENACOR 50ª RAPv	2025	https://enacorrappv.com.br/anais/2025/TT578.pdf
Global Trends in the Use of Waste Materials as Railway Ballast: A Review of Technical Standards and Applications	Transportation Geotechnics	2026	https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2025.101776