



NORMAS TÉCNICAS E RESÍDUOS NO LASTRO FERROVIÁRIO: UMA PERSPECTIVA GLOBAL

Laura Coura Soranço¹; Katrine Stefânia Couto¹; Ana Flávia Vieira Gomes¹; Geraldo
Luciano de Oliveira Marques¹; Júlia Castro Mendes¹

¹Universidade Federal de Juiz de Fora — Brasil

RESUMO

Tradicionalmente, o lastro ferroviário consiste em rocha britada natural; no entanto, a extração desse recurso não renovável causa impactos ambientais consideráveis. Este estudo investiga as tendências globais no uso de materiais residuais como substitutos do lastro natural, com atenção especial à influência das normas técnicas em sua adoção. Foi realizada uma revisão da literatura publicada entre 2014 e 2026, identificando os países mais ativos, os tipos de resíduos mais comumente estudados e correlacionando os resultados com normas nacionais. Os materiais mais frequentemente estudados incluem borracha de pneus, escória de aço, resíduos da lavagem de carvão, concreto reciclado, cinzas de fundo de usinas termelétricas a carvão e lastro reciclado. Entre as diretrizes analisadas, apenas a EN 13450 (Europa) permite explicitamente agregados reciclados; o Código 301 do Irã recomenda rocha britada, mas permite alternativas; e a AREMA (Estados Unidos) aceita quaisquer agregados minerais, incluindo escória siderúrgica. A prevalência de estudos sobre lastro à base de resíduos parece estar intimamente ligada ao rigor das normas ou diretrizes técnicas, ao volume de resíduos gerados e às práticas nacionais de gestão de resíduos. Essas constatações destacam uma oportunidade significativa para o desenvolvimento de políticas e normas que promovam ativamente o uso de materiais sustentáveis na infraestrutura ferroviária brasileira.

Palavras-chave: *Lastro ferroviário, Resíduos, Normas técnicas, Sustentabilidade.*

1. INTRODUÇÃO

O lastro ferroviário desempenha diversas funções essenciais como suportar os deslocamentos verticais, laterais e longitudinais gerados pelo tráfego ferroviário, distribuir as cargas dos trilhos para o sublastro e garantir a drenagem eficiente da via (Guo *et al.*, 2022). A camada de lastro é geralmente composta por rocha natural britada, sendo as mais comuns o basalto, calcário, granito e dolomita, variando de acordo com o país com base na qualidade, disponibilidade e regulamentações ambientais (Indraratna, Salim e Rujikiatkamjorn, 2011; Fathali, Nejad e Esmaeili, 2018).

A atividade mineradora de rochas naturais, embora fundamental para o fornecimento de matérias-primas, gera diversos impactos ambientais negativos. Entre os principais estão a erosão e a contaminação do solo, a poluição de corpos d'água, a supressão da vegetação e a consequente perda de biodiversidade. Além disso, a mineração contribui para a emissão de poeira e gases poluentes, comprometendo a qualidade do ar e a saúde das populações próximas. Também pode provocar alterações significativas na paisagem e nos ecossistemas locais, agravando os desequilíbrios ambientais (Bomfim, 2017).

Uma alternativa promissora é a incorporação de resíduos como agregados na camada de lastro ferroviário, promovendo ganhos tanto ambientais quanto em desempenho estrutural (Indraratna *et al.*, 2024). A aplicação de borracha de pneus, por exemplo, tem se mostrado eficaz na atenuação de vibrações, na redução da fragmentação dos agregados em até 80% e na diminuição do assentamento da via em cerca de 6% (Qiang *et al.*, 2023; Jarjour e



Meguid, 2023). Outro resíduo com grande potencial é a escória de aciaria, cuja utilização tem resultado em melhorias significativas no desempenho do lastro, com aumentos de até 12% no módulo de elasticidade e reduções nos deslocamentos dos trilhos de até 51% (Sousa, 2007; Fernandes, 2010; Dayrell, 2013; Jing *et al.*, 2020).

Entretanto, de forma geral, ainda há uma escassez de normas que regulamentem o uso de resíduos como agregados para o lastro ferroviário no Brasil e no mundo, com a maioria dos documentos normativos voltados para materiais convencionais. Diante desse cenário, o presente artigo busca compreender como a existência, ou ausência, de normas técnicas influencia a viabilidade e a adoção de materiais alternativos. Complementarmente, serão analisadas as principais normas voltadas para agregados em lastros ferroviários, a fim de destacar diferenças, padrões e lacunas que possam justificar ou limitar o uso de resíduos.

2. DESENVOLVIMENTO

A revisão de literatura foi realizada em março de 2026 abrangendo estudos publicados entre 2014 e 2026, focando na análise das descobertas da década mais recente. Por apresentar amplitude de dados na literatura acadêmica, foram utilizadas as bases *Springer Link*, *Science Direct*, *Scielo (Scientific Electronic Library Online)*, *Scopus* e *Engineering Village (Compendex)*. A string de busca foi: ((*"railway"* OR *"railroad"*) AND (*"ballast"* OR *"track bed"*)) AND (*"waste"* OR *"residue"* OR *"tailings"* OR *"recycled aggregate"* OR *"by-product"*).

A triagem inicial dos estudos foi feita com base na leitura dos títulos e das palavras-chave, sendo eliminados os trabalhos duplicados. Na etapa seguinte, os resumos dos artigos pré-selecionados foram avaliados para verificar sua relevância em relação ao objetivo deste estudo. Por fim, realizou-se a leitura integral dos trabalhos considerados pertinentes. Do total de 2381 estudos identificados inicialmente, 79 foram mantidos após a análise completa. Além da busca sistemática por estudos acadêmicos, também foi realizada uma análise das normas técnicas vigentes que tratam das características exigidas para agregados utilizados no lastro ferroviário. O objetivo foi identificar semelhanças entre os diferentes regulamentos e destacar aquelas que permitem, mesmo que parcialmente, o uso de materiais reciclados ou resíduos como alternativa aos agregados convencionais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise bibliométrica

Com base nos artigos selecionados para esta revisão, observa-se um crescimento no número de pesquisas voltadas ao uso de resíduos como agregados no lastro ferroviário, conforme **Figura 1**. O gráfico indica uma tendência de aumento nas publicações ao longo do tempo, especialmente a partir de 2019.

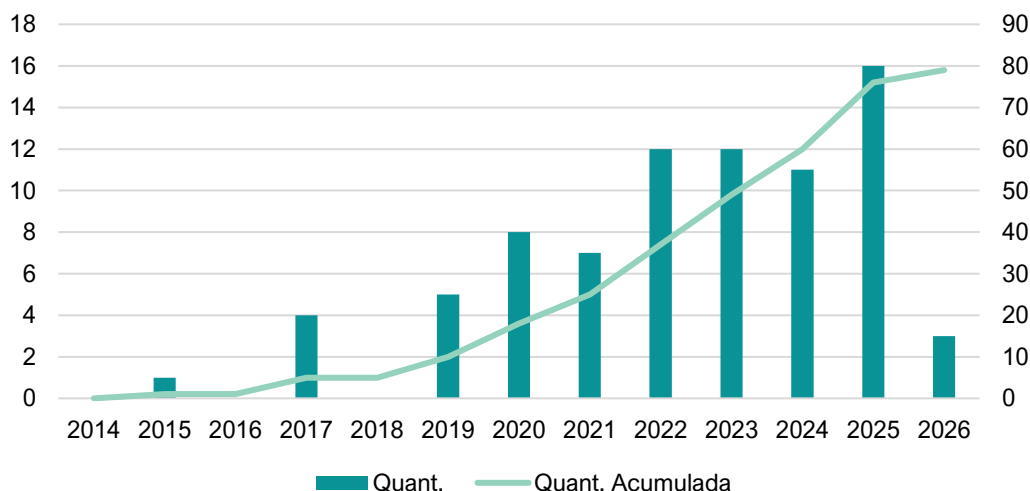


Figura 1. Quantidade de trabalhos por ano. Fonte: Autora (2025).

A análise dos estudos selecionados revelou uma predominância de pesquisas envolvendo resíduos de borracha (48 trabalhos) e escória de aciaria (32 trabalhos). Outros materiais apareceram com menor frequência: 4 estudos sobre lavagem de carvão, 2 sobre concreto, 2 sobre cinzas de fundo, 2 sobre lastro reciclado e 1 sobre resíduo da mineração de fosfato. Alguns trabalhos investigaram mais de um resíduo simultaneamente — três analisaram borracha, escória e lavagem de carvão em conjunto; um avaliou borracha e lavagem de carvão; um estudou escória, borracha e concreto; e outro focou na borracha e escória. As cinzas de fundo, por sua vez, sempre foram examinadas associadas a outros resíduos. Por isso, na **Figura 2**, cada tipo de resíduo foi contabilizado separadamente, de modo a representar com precisão todos os materiais abordados, mesmo quando estudados de forma combinada.

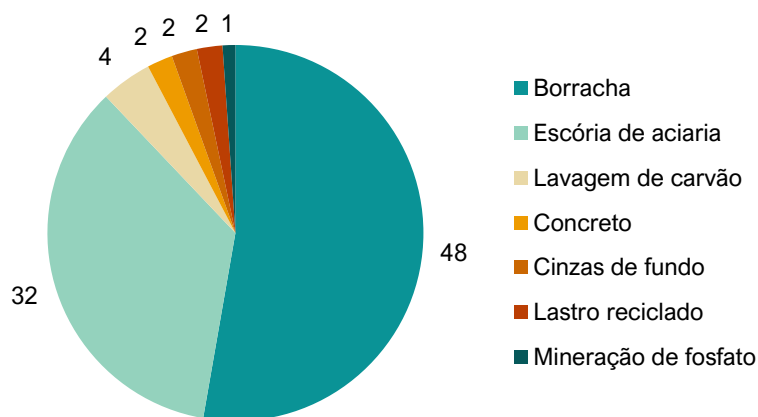


Figura 2. Quantidade de trabalhos por tipo de resíduo. Fonte: autora (2025).

Na **Figura 3**, é apresentada a quantidade de artigos por tipo de resíduo, distribuída conforme o país de afiliação dos autores. Como alguns estudos foram desenvolvidos em coautoria internacional, cada artigo foi contabilizado uma vez para cada país representado pelos autores envolvidos. A partir da análise do gráfico, observa-se que a Austrália lidera em número de publicações, com 26 trabalhos. Em contraste, países como Estados Unidos, Uzbequistão, Tailândia, Eslovênia, Marrocos, Indonésia e Tunísia aparecem com apenas um estudo publicado cada. Sendo que o Brasil apresentou apenas sete trabalhos.

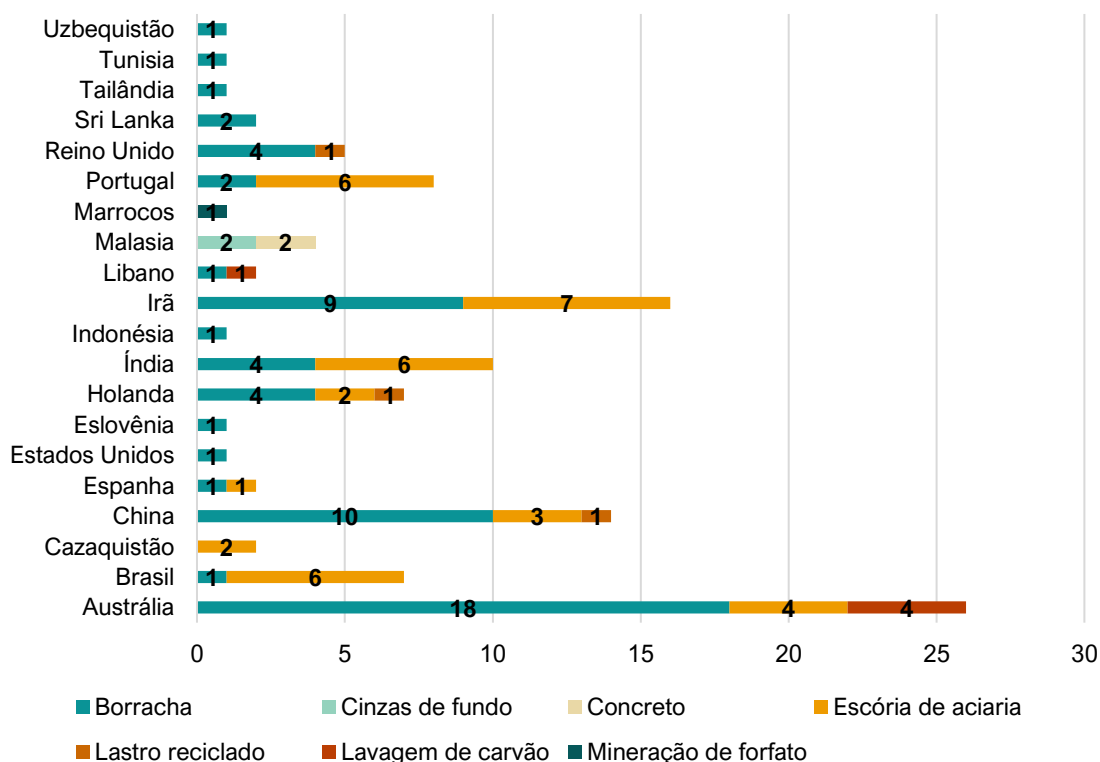


Figura 3. Quantidade e tipo de resíduo por país. Fonte: autora (2025).

3.2. Análise da gestão de resíduos

A borracha é o resíduo mais estudado devido à sua grande produção global e longa decomposição, já que cerca de 1,5 bilhão de pneus são fabricados anualmente, podendo chegar a 5 bilhões em 2030, e levar até 600 anos para se decompor (Malarvizhi, Senthil e Kamaraj, 2012; Grammelis *et al.*, 2021; Almeida Júnior *et al.*, 2012). Austrália e China lideram em pesquisas sobre o reaproveitamento de borracha, impulsionadas por altas gerações de resíduos, políticas ambientais rigorosas e incentivos governamentais. A Austrália o país produz, anualmente, cerca de 0,5 milhões de toneladas (Mt) de pneus inservíveis e o pneu inservível figura como uma das prioridades da Política Nacional de Resíduos Sólidos da Austrália de 2024, o que tem impulsionado iniciativas de pesquisa voltadas à sua reutilização (DCCEEW, 2024; DCCEEW, 2025). A China, embora possua uma taxa de reciclagem de aproximadamente 47%, enfrenta pressão ambiental devido à geração superior a 10 Mt anuais, o que impulsiona pesquisas voltadas a soluções sustentáveis e alinhadas à economia circular (Chen *et al.*, 2022; Meng *et al.*, 2023). O Irã, mesmo com menor volume de geração (0,34 Mt/ano), apresenta forte interesse acadêmico, motivado pelas sanções internacionais que limitam o acesso a tecnologias e materiais, estimulando alternativas internas (Zarei, Taghipour e Hassanzadeh, 2018; Khudokormov, 2023).

Nos Países Baixos e no Reino Unido, a presença de quatro estudos sobre o uso da borracha como agregado de lastro ferroviário é influenciada pela infraestrutura avançada, políticas ambientais rígidas e pela proibição do descarte de pneus em aterros desde 2003 (European Parliament; Council, 1999). Nesses países, porém, o grande índice de tratamento (95%) reduz a urgência por novas aplicações, uma vez que já há uma destinação adequada para



o resíduo, o que explica o número moderado de estudos (ETRMA, 2021). Já a baixa quantidade de pesquisas em países como Líbano, Uzbequistão, Sri Lanka e Tunísia está relacionada principalmente à pouca representatividade de suas malhas ferroviárias (The World Bank Group, 2025). Já em países como Brasil, Espanha e Portugal, onde há políticas de reciclagem mais estruturadas, a produção científica sobre resíduos aplicados em obras de engenharia tende a focar em frentes mais consolidadas, como pavimentação e concreto com adições sustentáveis, o que pode justificar a presença pontual, mas não abundante, de artigos sobre esse tema específico.

Nos Estados Unidos, apesar da elevada geração de resíduos (4,8 Mt/ano), foi identificado apenas um estudo sobre o uso de borracha no lastro ferroviário (USTMA, 2024). Essa escassez pode ser explicada pela gestão já madura dos pneus inservíveis, que desde 1990 destinou cerca de 94% dos estoques para novos usos (USTMA, 2021). No entanto, a queda recente na taxa de recuperação após 2018, decorrente do aumento da produção de pneus e da incapacidade dos mercados de reaproveitamento de absorvê-los, motivou o estudo publicado em 2019 (USTMA, 2021).

A distribuição dos estudos sobre o uso da escória de aciaria como agregado alternativo em lastros ferroviários tende a acompanhar, em grande parte, o volume de produção de aço de cada país. Isso se justifica pelo fato de que esse resíduo é inevitavelmente gerado no processo siderúrgico, com uma média de 150 a 200 kg de escória para cada tonelada de aço produzido (Han *et al.*, 2015; Prusti *et al.*, 2021; Chand, Paul e Kumar, 2016). A China, líder global na produção de aço bruto em 2024 com 1.028,860 Mt, possui apenas três estudos sobre o tema (WorldSteel, 2024). Esse número relativamente baixo pode ser explicado pelo direcionamento da pesquisa nacional para áreas em que o país possui políticas mais consolidadas de reaproveitamento. Um exemplo é a norma GB/T 13590 (2022) que especifica os requisitos para o cimento Portland com escória de aciaria e escória granulada de alto-forno para aplicação em construções civis, obras subterrâneas, engenharia hídrica e pavimentação.

A Índia, segunda maior produtora (140.761 Mt), apresenta seis artigos, alinhados à sua Política Nacional do Aço (2017), que incentiva o uso sustentável da escória frente à meta de elevar a produção a 300 Mt até 2030 (Índia, 2017; WorldSteel, 2024). O Brasil, na nona posição do ranking, com 33.751 Mt, contabiliza seis estudos, o que reflete sua importância no cenário siderúrgico global e o crescente interesse acadêmico nacional pela valorização de resíduos industriais (WorldSteel, 2024). O Irã, décimo colocado com 31.039 Mt, destaca-se com sete publicações, impulsionado não apenas pelo volume de escória gerado, mas também por um ambiente acadêmico voltado à autossuficiência e à busca por soluções tecnológicas alternativas diante de restrições comerciais (WorldSteel, 2024; Khudokormov, 2023).

Países com produção intermediária de aço, como Austrália (4.658 Mt, 4 estudos), Espanha (11.873 Mt, 1 estudo) e Cazaquistão (4.178 Mt, 1 estudo), apresentam números proporcionais de publicações, refletindo sua menor escala produtiva (WorldSteel, 2024). Já Portugal, embora ocupe a 43ª posição no ranking (2.040 Mt), aparece com seis estudos, o que foge à tendência industrial e se justifica pelo contexto ampliado de sua gestão de resíduos (WorldSteel, 2024). Em 2021, o país gerou quase 14 Mt de resíduos empresariais, sendo a escória responsável por 14,28% desse total, evidenciando um esforço nacional em reaproveitar resíduos industriais dentro de uma política ambientalmente orientada (Statistic Portugal, 2022). Assim, a produção científica em cada país reflete não apenas o volume de escória gerado, mas também diretrizes nacionais, foco acadêmico, alternativas tecnológicas e prioridades ambientais.

A baixa incidência de estudos sobre o uso de cinzas de fundo de usinas termelétricas a carvão, resíduos da lavagem de carvão, concreto e lastro reciclado como agregados



alternativos pode estar relacionada a fatores técnicos e logísticos. Em primeiro lugar, muitos desses materiais apresentam características físicas e químicas que dificultam sua aplicação direta, como baixa resistência à fragmentação, alta absorção de água ou comprometimento na durabilidade da via (Indraratn e Salim, 2003; Youventharan *et al.*, 2021; Riyad *et al.*, 2025). Do ponto de vista logístico, a obtenção desses materiais em quantidades regulares e homogêneas nem sempre é viável (Salgado e Silva, 2021). Também é importante considerar que esses materiais já possuem aplicações mais consolidadas em outras áreas da engenharia civil, como em aterros, sub-bases de pavimentos e blocos de concreto, o que reduz o incentivo à sua investigação no setor ferroviário (Wang *et al.*, 2021; Juan-Valdés *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2019).

3.3. Análise normativa

As normas para agregados utilizados como lastro ferroviário variam entre os países, mostrado na Tabela 1, embora apresentem princípios técnicos semelhantes.

Tabela 1. Normas utilizadas por país

País	Norma
Austrália	AS 2758.7:2015 – <i>Aggregates and Rock for Engineering Purposes, Part 7: Railway Ballast</i> (AS, 2009)
Brasil	ABNT NBR 5564:2021 – Via férrea — Lastro ferroviário — Requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2021)
Cazaquistão e membros do CIS	GOST 7392:2014 (<i>Crushed Stone from Dense Rocks for Ballast Layer of Railway Tracks</i>) (Russia, 2014)
China	TB/T 2140-2008 – <i>Railway Ballast</i> e TB/T 2140.2-2018 – <i>Railway Ballast – Part 2: Test Methods</i> (China, 2008; China, 2018)
Espanha, Eslovênia, Holanda, Portugal, Reino Unido e demais países europeus	EN 13450 – <i>Aggregates for Railway Ballast</i> (BSI, 2013)
Estados Unidos	AREMA (<i>American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association</i>), complementada pela ASTM (AREMA, 2013)
Índia	IRS-GE-1 (Índia, 2004)
Irã	<i>Iran 301 Code</i> (Iran, 2022)
Malásia	MRIS 3:2023 – <i>Railway Track – Ballast Standard</i>
Sri Lanka	Manual de Regras Especiais do Sri Lanka Railways

No caso do Irã, foi observado que todos os artigos com participação de autores iranianos adotaram as normas americanas (AREMA/ASTM) para a realização dos ensaios. Apenas três desses estudos utilizaram, adicionalmente, o *Iran 301 Code*. De maneira geral, os métodos de ensaio descritos no *Iran 301 Code* fazem referência às normas ASTM (exceto em um caso, em que é citada uma norma europeia), com a principal diferença sendo a adaptação dos limites dos resultados (Iran, 2022). De forma semelhante, a Malásia, mesmo apresentando norma nacional, utilizou a norma americana e britânica em seus artigos. Em Sri Lanka as especificações para o agregado de lastro ferroviário se encontram no Manual de Regras Especiais do Sri Lanka Railways, porém não está



disponível publicamente online. Por fim, não foram encontradas normas específicas para Libano, Uzbequistão, Marrocos, Indonésia, Tailândia e Tunísia, é comum que os países adotem ou se baseiem em normas internacionais, como a europeia e a americana.

É importante destacar que as normas técnicas analisadas correspondem, em muitos casos, às versões utilizadas pelos próprios estudos revisados ao longo do período investigado. Assim, algumas especificações podem ter sofrido revisões ou alterações mais recentes. Um exemplo relevante é o manual AREMA, cuja versão de 2013 admitia a utilização de escória siderúrgica como agregado mineral para lastro ferroviário. Entretanto, em versões mais recentes do manual, como a de 2020, esse material deixou de ser explicitamente considerado para essa aplicação. Essa mudança evidencia que os critérios normativos relacionados ao uso de resíduos podem evoluir ao longo do tempo, impactando diretamente a viabilidade futura desses materiais no setor ferroviário. Dessa forma, as propriedades apresentadas na Tabela 2 devem ser interpretadas à luz das versões normativas adotadas pelos estudos analisados, tendo caráter ilustrativo e comparativo dentro do contexto histórico da literatura revisada.



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

Tabela 2. Limites e propriedades normativas

Propriedade	Valores							
	NBR 5564 (2021)	AREMA (2013)	AS 2758.7 (2009)	EN 13450 (2013)	IRS-GE-1 (2004)	TB/T 2140 (2008)	301 Code (2022)	GOST (2014)
	Brasil	Estados Unidos	Austrália	Europa	Índia	China	Irã	Rússia
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	-	-	-	-	-	-
Partículas não cúbicas (%)	≤15-17 ^c	-	-	-	-	≤50	-	-
Índice de forma (%)	-	-	-	≤10-30	-	-	-	-
Partículas alongadas (%)	-	3:1 – Max 5	2:1 – Max.30 3:1 – alt.	-	-	-	≤5	-
Partículas lamelares (%)	-	≤5	≤30%	≤15-25	-	-	-	≤15
Superfície britada (textura)	-	-	≥ 75% em massa	-	-	-	-	-
Densidade - Kg/m³	≥2500-2700 ^c	≥2600	2500	-	-	≥2500	≥ 2600	≥2400
Porosidade aparente (%)	≤2	-	-	-	-	-	-	-
Absorção de água (%)	≤1-2 ^c	≤2	-	-	≤1	-	≤1	≤2
Teor de grãos britados (cascalho/seixo) (%)	-	-	-	-	-	-	-	>50
Teor de grãos de rochas fracas (%)	-	-	-	-	-	-	-	<0,5-5
Perda de massa após fervura (basalto) (%)	-	-	-	≤ 1	-	-	-	≤5
Aumento no valor do impacto pós fervura (%)	-	-	-	≤ 3	-	-	-	-
Aumento do coeficiente de Los Angeles pós fervura (%)	-	-	-	≤ 5	-	-	-	-
Congelamento e descongelamento (%)	-	-	-	≤ 1-4	-	-	≤ 4	≤5
Resistência a congelamento-degelo em ambiente salino (%)	-	-	-	≤ 2-8	-	-	-	-
Classe de resistência à geada	-	-	-	-	-	-	-	≥ F300
Resistência à intempérie –teste de sulfato (%)	≤10	5	-	≤ 3-6	-	<10	≤ 5	≤5
Massa unitária - Kg/m³	≥1250	≥1120	≥1200	-	-	-	≥ 1400	-
Material pulverulento (peneira nº200) (%)	≤1	1	1	0,5-1,5 ^b	-	-	≤1	-
Torrões de argila (%)	≤0,5	0,5	-	-	-	-	≤0,5	Não permitido
Resistência ao desgaste – Los Angeles, LAA (%)	≤30-35 ^c	≤30	≤25-40 ^b	≤12-24 ^b	≤30-35 ^{b,d}	≤18 ^c 18<LAA<27	≤ 20	≤12



Propriedade	Valores							
	NBR 5564 (2021)	AREMA (2013)	AS 2758.7 (2009)	EN 13450 (2013)	IRS-GE-1 (2004)	TB/T 2140 (2008)	301 Code (2022)	GOST (2014)
	Brasil	Estados Unidos	Austrália	Europa	Índia	China	Irã	Rússia
Micro-Deval (%)	-	-	-	≤5-15	-	-	≤ 15	-
Resistência ao choque ^a (%)	≤25	-	-	≤14-22 ^b	≤20-30% ^{b,d}	-	-	≤4
Valor de esmagamento do agregado (%)	-	-	≤ 25-40 ^b	-	-	<19 ^c	-	-
						19≤CB<22		
Coeficiente de desgaste de partículas (%)	-	-	-	-	-	<8 ^c	-	-
						8≤CA<9		
Índice de resistência à fragmentação (%)	-	-	-	-	-	>18.3 ^c	-	-
						18<K≤18,3		
Índice de capacidade de suporte (%)	-	-	-	-	-	≥110 ^c	-	-
						95<IP<110		
Teor de fragmentos macios e friáveis ^a (%)	≤5	-	-	-	-	-	-	-
Teste de atrito do moinho (%)	-	25<AN<65	-	-	-	-	-	-
Teste de atrito úmido (%)	-	-	≤ 6-12 ^b	-	-	-	-	-
Coeficiente de permeabilidade (cm/s)	-	-	-	-	-	≥4,5 × 10 ⁻⁶	-	-
Limite de liquidez (%)	-	-	-	-	-	≤20	-	-
Limite de plasticidade (%)	-	-	-	-	-	≥11	-	-
Resistividade Elétrica (Ohm.m)	-	-	≥ 60	-	-	-	-	-
Condutividade elétrica específica (S/m)	-	-	-	-	-	-	-	≤0,32
Atividade efetiva específica de radionuclídeos (Bq/Kg)	-	-	-	-	-	-	-	≤740
Notas: ^a Ensaio opcional pela NBR 5564; ^b Variação de acordo com a classe da pista; ^c Variação de acordo com a litologia da rocha; ^d Pode variar em casos excepcionais (técnicos e/ou econômicos); ^e Lastro especial								



IX Simpósio de Engenharia Ferroviária

24 e 25 de junho de 2026 – Campinas/SP

Entre as normas analisadas, algumas permitem explicitamente o uso de agregados reciclados, enquanto outras adotam uma abordagem mais restritiva a essa possibilidade. Essa variação nos critérios pode ser observada na

Tabela 3. Permissão quanto ao uso de agregado reciclado

Norma	Região	Permite o uso de resíduos?	Observação
EN 13450	União Europeia e Reino Unido	Sim	O texto afirma que agregados naturais, artificiais e reciclados podem ser utilizados.
IRS-GE-1	Índia	Não	Especifica "pedra britada" em seu escopo.
NBR 5564	Brasil	Não	Especifica "pedra britada" em seu escopo.
AREMA	Estados Unidos	Sim	As especificações referem-se a agregados minerais, incluindo escória siderúrgica. No entanto, não especificam outros resíduos.
AS 2758.7	Austrália	Não	Especifica "pedra britada" em seu escopo.
TB/T 2140	China	Não	Especifica "pedra britada" em seu escopo.
301 Code	Irã	Sim	Indica o uso de pedra britada, mas afirma que agregados reciclados podem ser usados se atenderem aos limites especificados.
GOST 7392	Rússia e membros do CIS	Não	Especifica "pedra britada" em seu escopo.

Entre as normas analisadas, algumas permitem explicitamente o uso de agregados reciclados, enquanto outras adotam uma abordagem mais restritiva. A EN 13450, utilizada em países europeus como Países Baixos, Portugal, Espanha e Reino Unido, destaca-se por sua flexibilidade ao autorizar o emprego de agregados naturais, artificiais e reciclados, desde que atendam aos limites técnicos especificados. Essa abertura regulatória se reflete diretamente no número significativo de estudos publicados nesses países, mesmo que muitos deles não estejam entre os principais geradores mundiais de resíduos. O mesmo se aplica ao Irã, o Código 301 do Irã permite o uso de resíduos, desde que atendam aos critérios técnicos estabelecidos, o que se reflete em 16 publicações, mesmo que o país também não esteja entre os maiores geradores de resíduos do mundo. Isso demonstra que a existência de diretrizes permissivas reduz barreiras de entrada para pesquisas com materiais alternativos, facilitando a aplicação prática e a realização de experimentações *in situ* pelas empresas parceiras.

Por outro lado, normas mais rígidas — como a NBR 5564 (Brasil), a AS 2758.7 (Austrália), a IRS-GE-1 (Índia), a TB/T 2140 (China) e a GOST 7392 (Rússia e países do CIS) — restringem o escopo do lastro ferroviário à pedra britada natural. Essa limitação implica que materiais alternativos não podem ser empregados em aplicações práticas sem expansões normativas ou exceções técnicas. Já nos Estados Unidos, a norma AREMA permite o uso de escória mineral e impõe limites rigorosos para finos e densidade, o que ajuda a explicar a existência de apenas um estudo relacionado à borracha. Além disso, a ausência de estudos sobre escória de aciaria pode estar relacionada ao fato de esse material ser tratado como um agregado mineral convencional, sendo, portanto, utilizado diretamente pela indústria ferroviária sem a necessidade de validação acadêmica.

Quando se consideram condições climáticas, percebe-se que grande parte da rigidez normativa está relacionada à necessidade de garantir desempenho em ambientes extremos, especialmente regiões sujeitas a ciclos severos de congelamento-degelo,



grandes amplitudes térmicas, ocorrência de geadas ou elevado regime pluviométrico. Nesse sentido, normas como a EN 13450 e a GOST 7392 apresentam classes específicas de resistência à geada (como F300 na norma russa), enquanto a AREMA e a AS 2758.7 exigem rigorosos ensaios de durabilidade, como os testes de sulfato e de congelamento-degelo.

Em países localizados em climas temperados, continentais ou boreais — como Rússia, Cazaquistão, parte da China e regiões da Europa Central — o desempenho do lastro ferroviário é diretamente afetado por condições climáticas extremas. Nesses ambientes, são comuns ciclos intensos de congelamento e degelo, grandes amplitudes térmicas sazonais e longos períodos de saturação hídrica do solo. Esses fatores aceleram a deterioração do lastro ferroviário. Então as normas de países com climas extremos se tornaram mais conservadoras e restritivas. A Austrália se destaca nesse contexto. Apesar de possuir clima majoritariamente quente e árido, sua norma AS 2758.7 é uma das mais rigorosas entre as analisadas, restringindo a utilização de agregados reciclados. Ainda assim, o país lidera mundialmente as pesquisas sobre o uso de resíduos em lastro ferroviário. Isso é explicado pela presença de políticas ambientais robustas, programas governamentais voltados à inovação e metas nacionais relacionadas à economia circular, como o *National Waste Policy Action Plan 2024* (DCCEEW, 2024).

Já nos Estados Unidos, a AREMA adota uma abordagem intermediária. A associação permite o uso de escória siderúrgica por considerá-la um agregado mineral e estabelece limites definidos para absorção, teor de finos, resistência ao desgaste e densidade — parâmetros com forte relação com o desempenho em regiões de grande variação térmica e cargas ferroviárias elevadas. Entretanto, a ausência de menções explícitas a outros resíduos acaba por restringir o interesse científico, uma vez que pesquisadores precisam justificar tecnicamente a equivalência do material alternativo para cada parâmetro.

Além das limitações normativas e climáticas, outro fator que pode restringir a aplicação de resíduos como agregado de lastro ferroviário é a variabilidade inerente desses materiais. Diferentemente das rochas naturais extraídas de jazidas controladas, muitos resíduos apresentam heterogeneidade física, química e mineralógica em função de sua origem, processo industrial ou condições de armazenamento. Essa variabilidade pode dificultar a padronização do desempenho geotécnico e da durabilidade do material. Além disso, dependendo do tipo de resíduo e de suas características, pode ser necessária a realização de tratamentos prévios, como estabilização, envelhecimento ou beneficiamento, antes de sua aplicação em campo, o que pode aumentar a complexidade técnica e os custos associados ao seu uso.

Combinando a análise normativa, climática e bibliométrica, observa-se que a rigidez técnica tende a limitar a experimentação, enquanto políticas ambientais robustas e pressões por redução de resíduos podem compensar parcialmente essa limitação. Países que conjugam normas flexíveis com políticas ambientais avançadas — como aqueles que adotam a EN 13450 — apresentam o cenário mais favorável ao avanço do uso de resíduos como lastro ferroviário. Em contraste, nações com normas rígidas e contexto institucional pouco orientado à inovação apresentam produção científica reduzida sobre o tema, mesmo quando geram grandes quantidades de resíduos.

4. CONCLUSÃO

A revisão realizada neste artigo mostra que o uso de resíduos como material para lastro ferroviário está relacionado ao contexto de cada país. Observou-se que regiões com normas mais flexíveis — como a EN 13450 na Europa e o Código 301 do Irã — apresentam maior abertura à experimentação e, conseqüentemente, maior produção



científica sobre o tema. Em contraste, países cujas normas restringem o uso do lastro a rocha britada natural, como Cazaquistão, Brasil, China e Austrália, tendem a desenvolver menos estudos, exceto quando políticas de incentivo à gestão sustentável de resíduos compensam essa rigidez normativa.

A análise também revelou que muitos estudos utilizam a norma AREMA como referência devido ao seu caráter abrangente e ampla aceitação internacional. Além disso, países como os Estados Unidos, embora permitam o uso de escória siderúrgica, não apresentam grande volume de pesquisas sobre esse material, possivelmente porque sua aplicação já está consolidada industrialmente e porque a disponibilidade de materiais naturais reduz a necessidade de investigação adicional. Em geral, resíduos que já possuem cadeias estabelecidas de reciclagem ou reaproveitamento raramente se tornam foco de pesquisa para aplicação em lastro.

Assim, conclui-se que a adoção de resíduos em lastro ferroviário não depende apenas da quantidade de resíduos disponíveis ou da rigidez das especificações técnicas, mas sim da combinação entre flexibilidade regulatória, estímulos à inovação e demandas ambientais e políticas. Esses fatores se mostram mais determinantes do que o volume de resíduos gerados em cada país para promover a reutilização de materiais no setor ferroviário.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa MRS Logística S.A. e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para a realização deste estudo. Este trabalho também contou com o suporte de bolsas fornecidas pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

6. REFERÊNCIAS

- ABNT, A. B. D. N. T. **NBR 5564: Via férrea — Lastro ferroviário — Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 54. 2021.
- ALMEIDA JÚNIOR, A. F. et al. Use of scrap tire rubber in place of SBS in modified asphalt as an environmentally correct alternative for Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 33, 2012. 236-238. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.039>>.
- AREMA. **Manual for Railway Engineering - Chapter 1: Roadway and Ballast**. Laham: American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association, v. I, 2013.
- AS, S. A. **AS 2758.7:2009. Aggregates and rock for engineering purposes: Part 7: Railway ballast**. Sydney. [S.l.]. 2009.
- BOMFIM, M. R. **Avaliação de impactos ambientais da atividade minerária**. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas, p. 46. 2017.
- BSI, B. S. I. **Aggregates for railway ballast**. BS EN 13450:2013. London. 2013.
- CHAND, S.; PAUL, B.; KUMAR, M. Sustainable Approaches for LD Slag Waste Management in Steel Industries: A Review. **Metallurgist**, 2016. 116-128.
- CHEN, B. et al. Disposal methods for used passenger car tires: One of the fastest growing solid wastes in China. **Green Energy & Environment**, 7, n. 6, 2022. 1298-1309.
- CHINA. **TB/T 2140-2008 – Railway ballast**. Nacional Railway Industry Standard of the People's Republic of China. Beijing. 2008.
- CHINA. **TB/T 2140.2-2018 – Railway ballast – Part 2: Test methods**. Nacional Railway Industry Standard of the People's Republic of China. Beijing. 2018.
- CHINA. **GB/T 13590-2022 - Steel slag and granulated furnace slag Portland cement**. Standardization Administration of China. Beijing. 2022.



- 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.
- DCCEEW, D. O. C. C. E. T. E. A. W. **National Waste Policy Action Plan 2024**. Australian Government. [S.l.], p. 18. 2024.
- DCCEEW, D. O. C. C. E. T. E. A. W. **Nacional waste and resource recovery report 2024**. Australian Government. [S.l.], p. 104. 2025.
- ETRMA, E. T. A. R. M. A. **In Europe 95% of all End of Life Tyres were collected and treated in 2019**. [S.l.]. 2021.
- EUROPEAN PARLIAMENT; COUNCIL. COUNCIL DIRECTIVE 1999/31/EC, 29 April 1999. Disponível em: <<https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur38106.pdf>>. Acesso em: 16 April 2025.
- FATHALI, M.; NEJAD, F.; ESMAEILI, M. A New Technique for Quality Assessment of Railway Ballast Materials. **International Journal of Railway Research**, 5, n. 2, 2018. 53-60.
- 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.
- GRAMMELIS, P. et al. A Review on Management of End of Life Tires (ELTs) and Alternative Uses of Textile Fibers. **Energies**, 14, n. 3, 2021.
- GUO, Y. et al. Railway ballast material selection and evaluation: A review. **Construction and Building Materials**, 344, 2022.
- HAN, F. et al. Hydration heat evolution and kinetics of blended cement containing steel slag at different temperatures. **Thermochimica Acta**, 605, 2015. 43-51.
- INDIA. **Track – Geotechnical engineering: IRS-GE-1**. Research Designs and Standards Organisation (RDSO). Lucknow. 2004.
- ÍNDIA. **National Steel Policy 2017**. Ministry of steel. New Delhi, p. 36. 2017. Part II - Section 3.
- INDRARATN, B.; SALIM, W. Deformation and Degradation Mechanics of Recycled Ballast Stabilised with Geosynthetics. **Soils and Foundations**, 43, n. 4, 2003. 35-46.
- 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.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C. **Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track**. 1ª. ed. [S.l.]: CRC Press, 2011. 432 p. ISBN 9781138072893. Disponível em: <https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780203815779_A24381674/preview-9780203815779_A24381674.pdf>.
- IRAN. **Regulation No. 301 - General Technical Specifications for Railway Track Superstructure**. Islamic Republic of Iran. Tehran, p. 301. 2022.
- 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.
- JUAN-VALDÉS, A. et al. Recycled Precast Concrete Kerbs and Paving Blocks, a Technically Viable Option for Footways. **Materials**, 14, n. 22, 2021.
- KHUDOKORMOV, G. A. Technological development by sub-sanction pressure: the case of Iran. **Theoretical and Applied Economics**, 3, 2023. 41-53.



- MALARVIZHI, G.; SENTHIL, N.; KAMARAJ, C. A Study on Recycling Of Crumb Rubber and Low Density Polyethylene Blend on Stone Matrix Asphalt. **International Journal of Scientific and Research Publications**, 2, n. 10, 2012. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4a83683b5656bfae1c2a0469bd0d1c816c1a47b0>>. Acesso em: 15 Abril 2025.
- MENG, X. et al. Identification of the potential environmental loads of waste tire treatment in China from the life cycle perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, 193, 2023. 106938.
- PRUSTI, P. et al. Effect of limestone and dolomite flux on the quality of pellets using high LOI iron ore. **Powder Technology**, 379, 2021. 154-164.
- QIANG, W. et al. The use of recycled rubber in ballasted railway tracks: A review. **Journal of Cleaner Production**, 420, 2023. 138339.
- RIYAD, A. S. M. et al. Constitutive behaviour of a granular matrix containing coal mine waste intermixed with rubber crumbs. **Acta Geotechnica**, 20, 2025. 185-196.
- RUSSIA. **GOST 7392-2014: Crushed stone from dense rocks for ballast layer of railway track**. Moscow, p. 35. 2014.
- SALGADO, F. A.; SILVA, F. A. Properties of recycled aggregates from different composition and its influence on concrete strength. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 14, n. 6, 2021.
- SILVA, B. E. P. et al. Estudo de viabilidade técnica e ambiental para utilização de lastro ferroviário degradado em pavimentos. **Revista Ibero-Americana de Ciencias Ambientais**, 10, n. 4, 2019. 273-288.
- 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.
- STATISTIC PORTUGAL. **Estado do ambiente em 2021**. Instituto Nacional de Estatística (INE). [S.l.]. 2022.
- THE WORLD BANK GROUP. Rail lines (total route-km). **World Bank Group Data**, 2025. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/IS.RRS.TOTL.KM?end=2021&start=1995&view=chart>>. Acesso em: 16 April 2025.
- USTMA, U. S. T. M. A. **Sustainability Update**. [S.l.]. 2021.
- USTMA, U. S. T. M. A. **2023 End-of-Life Tire Management Report**. [S.l.], p. 21. 2024.
- WANG, Q. et al. Leaching characteristics of heavy metals in MSW and bottom ash co-disposal landfills. **Journal of Hazardous Materials**, 416, 2021. 126042.
- WORLDSTEEL. Annual production steel data. **World Steel Association**, 2024. Disponível em: <https://worldsteel.org/data/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/CHE>. Acesso em: 17 April 2025.
- YOUVENTHARAN, D. et al. **Durability Performance of Concrete Debris and Bottom Ash as an Alternative Track Ballast Material**. 4th National Conference on Wind & Earthquake Engineering. [S.l.]: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021.
- ZAREI, M.; TAGHIPOUR, H.; HASSANZADEH, Y. Survey of quantity and management condition of end-of-life tires in Iran: a case study in Tabriz. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, 20, 2018. 1099–1105.



TECHNICAL STANDARDS AND WASTE MATERIALS IN RAILWAY BALLAST: A GLOBAL PERSPECTIVE

ABSTRACT

Traditionally, railway ballast consists of crushed natural rock; however, the extraction of this non-renewable resource causes considerable environmental impacts. This study investigates global trends in the use of waste materials as substitutes for natural ballast, with particular attention to the influence of technical standards on their adoption. A literature review of publications from 2014 to 2026 was conducted, identifying the most active countries, the most commonly studied waste types, and correlating these findings with national standards. The materials most frequently studied include tire rubber, steel slag, coal washing waste, recycled concrete, coal-fired power plant bottom ash, and recycled ballast. Among the guidelines analyzed, only EN 13450 (Europe) explicitly permits recycled aggregates; Iran's Code 301 recommends crushed rock but allows alternatives; and AREMA (United States) accepts any mineral aggregates, including steel slag. The prevalence of studies on waste-based ballast appears to be closely related to the strictness of technical standards or guidelines, the volume of waste generated, and national waste management practices. These findings highlight a significant opportunity for the development of policies and standards that actively promote the use of sustainable materials in Brazilian railway infrastructure.

Keywords: *Railway ballast; Waste materials; Technical standards; Sustainability.*