

UM DISPOSITIVO TIPO BOX TEST PARA ENSAIOS DE MATERIAL DE LASTRO FERROVIARIO

William Wilson dos Santos
Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, E-mail: william_wilson94@hotmail.com

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães
Professor, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, guimaraes@ime.eb.br

Maria Esther Soares Marques
Professora, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, esther@ime.eb.br

RESUMO: O aparato Box Test desempenha um papel crucial na simulação de pavimentos ferroviários em larga escala, fornecendo percepções valiosas sobre o desempenho do material sob condições mais próximas da realidade. Esta pesquisa utiliza Box Test para analisar de forma abrangente o potencial uso da escória de aço como material para lastro ferroviário, focando em sua caracterização e avaliação do módulo resiliente para viabilidade sustentável do pavimento ferroviário. A pesquisa envolveu a realização de diversos testes de acordo com normas brasileiras e americanas para avaliar a viabilidade da escória de aço como material de lastro. Os resultados revelaram que, embora a escória atenda a certos limites regulatórios, ela excede os limites especificados para porosidade e absorção. Também foi avaliado o módulo de elasticidade do lastro de escória de aço, confirmando sua perspectiva positiva e contribuição para a viabilidade do pavimento ferroviário sustentável. O artigo enfatiza a importância de experimentos em larga escala na simulação de pavimentos ferroviários. A pesquisa está em andamento, o objetivo é realizar ensaios em escala real para simular completamente o pavimento e observar as interações das camadas em condições mais representativas. Prevê-se que os resultados dos experimentos da Box Test proporcionarão uma compreensão mais abrangente do desempenho do material em condições realistas, contribuindo para uma melhor compreensão do pavimento ferroviário.

PALAVRAS-CHAVE: Box Test, lastro, escória de aço.

ABSTRACT: The Box Test apparatus plays a crucial role in simulating large-scale railway pavements, providing valuable insights into material performance under conditions closer to reality. This research utilizes the Box Test to comprehensively analyze the potential use of steel slag as a material for railway ballast, focusing on its characterization and evaluation of the resilient modulus for sustainable railway pavement viability. The research involved conducting various tests in accordance with Brazilian and American standards to assess the feasibility of steel slag as a ballast material. The results revealed that, while the slag meets certain regulatory limits, it exceeds specified limits for porosity and absorption. The elasticity modulus of the steel slag ballast was also evaluated, confirming its positive outlook and contribution to sustainable railway pavement viability. The article emphasizes the significance of large-scale experiments in simulating railway pavements. The research is ongoing, aiming to conduct full-scale tests to fully simulate the pavement and observe layer interactions under more representative conditions. It is anticipated that the results of the Box Test experiments will provide a more comprehensive understanding of material performance in realistic conditions, contributing to a better understanding of railway pavement.

KEYWORDS: Box Test, ballast, steel slag.

1 INTRODUÇÃO

O avanço do transporte ferroviário em âmbito mundial está estreitamente vinculado à necessidade de movimentar grandes volumes de mercadorias de forma eficiente, aproveitando os recursos naturais e minerais de nações que possuem extensões territoriais consideráveis.

Segundo Indraratna (2011), embora a concepção das vias férreas tenha permanecido praticamente inalterada por várias centenas de anos, houve um aumento na velocidade e capacidade de transporte de passageiros e cargas dos trens. A composição da via férrea envolve uma fundação em camadas, composta por um sublastro compactado ou camada de cobertura sobre o solo de base (subleito), e uma camada espessa de material granular, geralmente lastro de rocha sólida, colocado acima do sublastro. Os trilhos, feitos de aço, são instalados em dormentes de madeira ou concreto, que transferem a carga para o lastro, que é a principal camada de suporte.

Jia *et al.* (2021) salienta que a utilização de escória de forno nas camadas do pavimento ferroviário promove a sustentabilidade e reduz os custos de manutenção. Segundo Koh *et al.* (2018) a escória de aço da indústria siderúrgica pode ser um excelente material de lastro devido à sua maior durabilidade em comparação aos materiais de qualidade padrão, ao custo-benefício em termos de sustentabilidade e manutenção, este tipo de escória tem sido aplicado como material de lastro em ferrovias na região oeste adjacente à fronteira entre Califórnia e Nevada, nos Estados Unidos.

A importância deste estudo reside em destacar a relevância de ensaios conduzidos no aparato Box Test, que simula o pavimento ferroviário em grande escala e apresenta escassez de resultados de testes conduzidos no Brasil. Serão realizados ensaios na Box Test do Instituto Militar de Engenharia visando simular integralmente a infraestrutura do pavimento ferroviário (subleito, sublastro e lastro). O material utilizado para a camada de lastro é um co-produto oriundo da produção do aço, que passou por toda a etapa de caracterização para verificar sua adequabilidade com as normas específicas NBR 5564 (2021) e AREMA (2013), além de ensaios triaxiais em corpos de prova 15x30cm. Este estudo tem como objetivos realizar ensaios na Box Test para proporcionar uma compreensão mais abrangente do desempenho dos materiais em condições mais próximas à realidade, analisar a viabilidade do uso do co-produto na camada de lastro para aplicações desejadas, contribuir para um maior entendimento do pavimento ferroviário a partir de resultados gerados por ensaios em grande escala e promover uma infraestrutura ferroviária sustentável, considerando a utilização de um co-produto na camada de lastro ferroviário. Esses objetivos permitirão uma análise precisa da viabilidade do material e contribuirão para uma infraestrutura ferroviária mais sustentável.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Embora a literatura não forneça detalhes específicos sobre os critérios de seleção do tamanho da caixa em relação ao tamanho da amostra, é relevante destacar que o Box Test utilizado neste estudo possui dimensões superiores às comumente empregadas. Autores como Alabbasi e Hussein (2019) e Hussaini *et al.* (2016) indicam a existência de diferentes tamanhos de caixa em estudos experimentais de grande escala para investigar o comportamento mecânico do lastro ferroviário sob cargas de tráfego reais. Adicionalmente, pode-se citar Al-Saoudi e Hassan (2013), Lim (2004), McDowell e Stickley (2006), Rosa (2019) e Vizcarra (2015) Hussaini *et al.* (2016), Indraratna e Nimbalkar (2013), Chen *et al.* (2015) que conduziram pesquisas em aparato box test com configurações distintas.

O uso de uma caixa com dimensões maiores proporciona benefícios significativos, permitindo a reprodução de condições mais próximas da realidade em termos de tamanho e escala. Isso resulta em uma representação mais precisa do comportamento das camadas em pavimentos ferroviários reais, com uma simulação mais eficaz dos esforços e interações entre os componentes do pavimento. Além disso, as dimensões ampliadas possibilitam acomodar uma área de amostragem maior, aumentando a representatividade dos resultados e permitindo uma compreensão mais completa e aprofundada das propriedades e desempenho dos materiais. Em resumo, o Box Test foi concebido para realizar investigações abrangentes e precisas sobre o comportamento do pavimento ferroviário, fornecendo resultados mais confiáveis e contribuindo para o avanço do conhecimento nesse contexto. A Figura 1 apresenta o equipamento Box Test do Instituto Militar de Engenharia.



(a) (b)

Figura 1. Box Test instalada no sistema MTS de aplicação de carga.

2.1 Estrutura completa do pavimento prevista para ensaio.

A Box Test do Instituto Militar de Engenharia possui as dimensões 1.1m x 1.2m x 1.3m. A estrutura foi configurada com uma Camada de Subleito de 36 cm uma camada de Sublastro de 11 cm e uma camada de Lastro de 43 cm. A Figura 2 apresenta a estrutura do pavimento que foi montada para os ensaios.

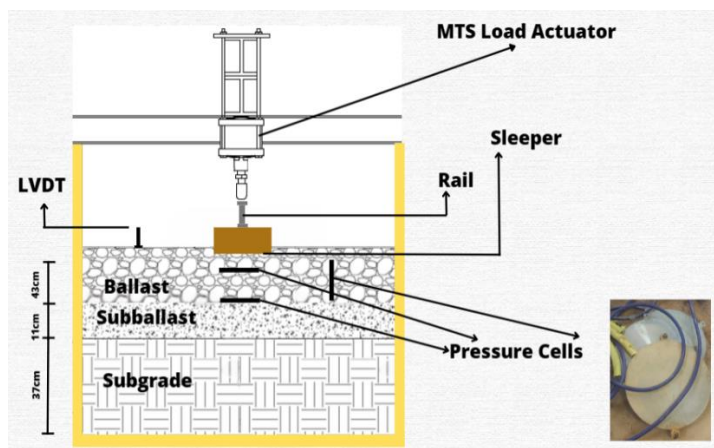


Figura 2. Desenho Esquemático Estrutura do pavimento.

Ensaio de caracterização foram conduzidos para os materiais que compõem a estrutura do pavimento que será ensaiado. Na camada de subleito além dos ensaios de caracterização foram realizados ensaios in situ, tais como ensaio de Cone de Penetração Dinâmica (DCP), Deflectometro de impacto leve (LWD) e Densidade in situ.

Para a camada de sublastro foram realizados ensaios de caracterização e ensaio LWD.

Para a camada de lastro foram realizados ensaios de caracterização que atestassem a adequabilidade do agregado siderúrgico para utilização em lastro ferroviário de acordo com a norma NBR 5564 (ABNT, 2021) e Arema (2013). A faixa granulométrica utilizada no lastro ferroviário foi a faixa N° 4 da Arema (2013).

Foram conduzidos ensaios triaxiais em corpos de prova 15x30cm em uma prensa triaxial do laboratório de solos do Instituto Militar de Engenharia (IME). A prensa permite conduzir ensaios com frequências de 1, 2 e 5 Hz. Para a pesquisa em questão, foi utilizada uma frequência de 1 Hz para ensaios de módulo de resiliência conforme Gomes, (2022).

2.1 Montagem da Estrutura no aparato Box Test

Após finalizar a etapa de caracterização, o material do subleito foi misturado de acordo com a sua umidade ótima e compactado no aparato com o auxílio de um compactador de solos como mostra a Figura 3.

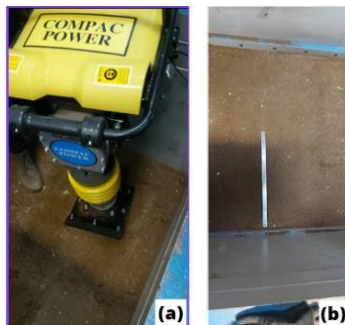


Figura 3. Preparação do subleito na Box Test: (a) Compactação da camada (b) Detalhe da camada, em vista superior, após compactação

Para o sublastro uma camada de 11 cm foi adicionada Box Test e compactada com o auxílio de um compactador de solos, após homogeneização utilizando a umidade ótima do material. O processo de compactação é ilustrado na Figura 4a, enquanto a Figura 4b detalha a camada já compactada na Box Test, evidenciando trincas, um fenômeno característico em solos lateríticos discutido por autores como Guimarães (2009), Guimarães *et al.* (2024), Delgado (2012) e Nogami e Villibor (1995), entre outros.

Pesquisas recentes, como as conduzidas por Delgado (2012), Filho (2018) e Guimarães *et al.* (2021b), têm explorado a viabilidade de incorporar solos de granulometria fina na construção de pavimentos ferroviários. Essa abordagem é motivada pela presença de solos nas proximidades das áreas de pavimentação com boas características mecânicas, mas que não atendem plenamente às normas vigentes. Delgado (2012) investigou a aplicação de um solo de granulometria fina no oeste do Maranhão como material para sublastro, identificando que o solo classificado como "LG" possuía propriedades adequadas para ser utilizado em pavimentos ferroviários. Já Filho (2018) realizou uma avaliação prática do desempenho de um solo arenoso fino laterítico empregado como sublastro, conduzindo os testes em uma seção experimental em Açailândia, Maranhão.



Figura 4. Preparação do sublastro na Box Test: (a) Camada compactada (b) Detalhe da camada após compactação

Para a instalação da camada de lastro, foi necessário separar o material e peneirá-lo de acordo com as especificações da norma Arema (2013) para a faixa granulométrica 4. Após a homogeneização, o material foi instalado cuidadosamente na Box Test, com precauções necessárias para que não houvesse quebra de partículas. As células de pressão foram posicionadas, uma na superfície do sublastro e outra verticalmente na camada de lastro e a Terceira também na camada de lastro horizontalmente. A Figura 5 apresenta o detalhe da instalação da camada de lastro.

aos limites normativos estabelecidos pelo DNIT (2018b) e a norma americana AREMA (2013) em alguns aspectos, mas supera os limites para porosidade e absorção. Vale destacar outros estudos como de Gomes (2022) e Guimarães *et al.* (2021a) e Costa *et al.* (2017) que abordam a caracterização das propriedades físicas, químicas e mecânicas da escória de aço no emprego como agregado com fins de pavimentação.

Observou-se que a origem siderúrgica das partículas influencia diretamente suas características físicas, relacionadas à velocidade de resfriamento, conforme discutido por Fortunato (2005) e Samaris (2006). Visualmente heterogênea, a escória de aciaria apresenta algumas partículas consolidadas e outras porosas, o que pode ser associado à sua produção, não destinada originalmente ao uso como lastro ferroviário. Apesar das características desfavoráveis de elevada porosidade e absorção, destaca-se que a escória exibiu atributos positivos, como elevada massa específica e baixa perda de massa por impacto e abrasão, alinhando-se a critérios de bom desempenho para lastro ferroviário, conforme indicado por estudos anteriores (Indrarnatna *et al.*, 2011; Selig & Waters, 1994). Sugere-se que, mediante demanda e adoção de métodos específicos, essas características adversas possam ser mitigadas, viabilizando a potencial utilização da escória de aciaria na camada de lastro ferroviário.

Foram realizados contabilizados 7 ensaios de Módulo de Resiliência (CP-9 ao CP-15) com condicionamento conforme a norma brasileira DNIT 134/2018. O ensaio, conduzido a 1 Hz, teve como objetivo verificar a similaridade na rigidez dos corpos de prova utilizados para ensaios de carga repetida em estágio único. Além disso, buscou fornecer dados de módulos resilientes do material de lastro para futuras simulações numéricas, como as realizadas por Delgado *et al.* (2021).

Os resultados estão na Tabela 3, Optou-se por descrever na Tabela 3 somente os resultados do Modelo Composto (PEZO, 1993; MACÊDO, 1996) por conta de ser o mesmo modelo utilizado por Silva (2018) e Rosa (2019), que também utilizaram os pares de tensões proposto pela norma DNIT 134/2018 (DNIT, 2018a).

A fase de condicionamento dos CPs em que foram realizados os ensaios de MR também foi conduzida segundo a norma DNIT 134/2018 (DNIT, 2018a).

Tabela 2. Tabela de ensaios de modulo de resiliência Lastro

Ensaio 1	1	2	3	4	5	6	7	Média
CP	CP-9	CP-10	CP-11	CP-12	CP-13	CP-14	CP-15	
k1	2369,6	1767	1867,3	2068,7	2098,6	1925,8	2115,2	2030,3
k2	0,68	0,52	0,6	0,64	0,64	0,6	0,52	0,6
k3	0,12	0,12	0,16	0,04	0,08	0,04	0,12	0,1
R²	0,992	0,992	0,991	0,991	0,994	0,994	0,987	
Maior MR (Mpa)	552	578	489	572	564	563	669	
Menor MR (Mpa)	112	150	113	134	122	147	194	
Média	290	328	260	329	308	340	393	

Os valores do módulo de resiliência obtidos nos ensaios variaram entre 112 e 669 MPa para os diferentes pares de tensões aplicados ao corpo de prova. Embora os procedimentos de condicionamento e trajetória de tensões tenham diferido de estudos anteriores, como o de Delgado (2019), os resultados encontrados neste trabalho, entre 260 e 390 MPa em média, são considerados validadores do ensaio conduzido conforme as recomendações da norma brasileira. O alto coeficiente de determinação (0,99) indica que o modelo adotado é satisfatório para descrever o comportamento resiliente do lastro ferroviário.

A ausência de outliers nos valores médios dos módulos de resiliência, verificada pelo teste de Grubbs, e o sucesso do procedimento de moldagem sugerem que a equação 1 proposta pode descrever a resposta resiliente do agregado siderúrgico com distribuição granulométrica Arema (2013) N° 4 em uma via férrea recentemente construída.

$$Mr = 2030,3. \sigma_d^{0,60}. \sigma_3^{0,1} \quad (1)$$

Esta equação foi derivada a partir da média dos coeficientes dos modelos encontrados em cada um dos 7 ensaios de módulo resiliente conduzidos.

5 CONCLUSÕES

Em síntese, os ensaios realizados conforme a NBR 5564 (ABNT, 2021) destaca a escória de aciaria como uma alternativa promissora para lastro ferroviário. A escória atendeu aos critérios normativos, evidenciando qualidade em termos de forma, massa específica, resistência ao desgaste e ao choque. Apesar de apresentar características visuais heterogêneas e porosidade elevada, associadas à sua origem não convencional, esses fatores não comprometem seu desempenho favorável, como indicado pela alta massa específica e baixa perda de massa em ensaios de impacto e abrasão.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência (MR) confirmam a perspectiva positiva, sustentando a viabilidade da escória de aciaria para uso no lastro ferroviário. A pesquisa, está sendo conduzida para finalização dos ensaios em escala real, simulando integralmente o pavimento, para observar a interação entre as camadas em condições mais representativas. Esses ensaios em grande escala buscam proporcionar resultados em verdadeira grandeza, oferecendo insights adicionais sobre a adequabilidade da escória para a aplicação pretendida. Planeja-se efetuar medições das tensões aplicadas na camada de lastro, tanto horizontalmente quanto em uma das laterais. Isso será complementado pela verificação das tensões atuantes no sublastro, mediante a aplicação de cargas no trilho que simulam as tensões reais geradas. Além disso, almeja-se calcular com precisão as deformações elásticas e plásticas da camada de lastro em escala real, proporcionando uma compreensão mais profunda do seu comportamento estrutural e possibilitando uma comparação de resultados em ensaios de grande escala com ensaios de pequena escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alabbasi, Y.; Hussein, M. Large-scale triaxial and box testing on railroad ballast: a re-view. *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 12, 2019.
- Arema - American Railway Engineering and Maintenance-Of-Way Association. *Manual for Railway Engineering*. [S.l.], 2013.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5564. *Via férrea - Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio*. [S.l.], ABNT, 2021.
- Costa, K. A.; Guimarães, A. C. R.; Reis, M. M.; Santana, C. S. A. Estudo do processo de lixiviação controlada de escória de aço em extrator Soxhlet visando emprego em pavimentos. *Matéria* (Rio J.), V. 22. 2017.
- Delgado, B. G. *Análise da deformabilidade de um solo tropical do oeste do Maranhão como material de sublastro na Ferrovia Carajás*. 131 p. Mestrado em Engenharia Geotécnica — Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2012.
- Delgado, B. G. *Geomecânica de um agregado de escória de aço inerte como material alternativo para lastro ferroviário de carga pesada*. Tese de doutorado, dezembro de 2019.
- Delgado, B. G.; Fonseca, A. V. da; Fortunato, E.; Paixão, A.; Alves, R. Avaliação geomecânica de um agregado de escória de aço inerte como material de lastro alternativo para trilhos ferroviários de carga pesada. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 279, p. 122438, 2021.
- DNIT. DNIT 134/2018-ME - *Pavimento - Solos - Determinação do Módulo de Resiliência - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 2018a.
- DNIT. DNIT 179/2018-IE - *Pavimento - Solos - Determinação da Deformação Permanente*. Rio de Janeiro, 2018b.

- Filho, J. C. S. *Contribuição para o desenvolvimento de um método de projeto mecânico-empírico para pavimentos ferroviários com foco em solos tropicais*. Tese de doutorado — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.
- Fortunato, E. M. C. *Renovação de plataformas ferroviárias: estudos relacionados à capacidade de carga*. Tese de doutorado — Engenharia Civil. Universidade do Porto, Lisboa, Portugal, 2005.
- Gomes, M. B. B. *Análise da deformabilidade do lastro ferroviário de escória de aço utilizando ensaios triaxiais sob cargas repetidas*. 180 p. Mestrado em Engenharia de Transportes — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2022.
- Guimarães, A. C. R. *Um Método Empírico Mecânico para Prever Deformações Permanentes em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos*. 352 p. Tese de doutorado — UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.
- Guimarães, A. C. R.; Costa, K. A.; Reis, M. M.; Santana, C. S. A.; Castro, C. D. Estudo do processo de lixiviação controlada de escória de aço em extrator Soxhlet visando emprego em pavimentos. *Geotecnia de Transportes*, V. 27. 2021a.
- Guimarães, A. C. R.; Filho, J. C. S.; Castro, C. D. Contribuição para o uso de material alternativo na camada de sub-lastro ferroviário de carga pesada. *Geotecnia de Transportes*, V. 30. 2021b.
- Guimarães, A. C. R.; Lima, C. D. A.; Aragão, F. T. S.; Motta, L. M. G.; Santos, J. T. A. Caracterização mecânica de um cascalho laterítico alternativo utilizado como material de pavimentação. *Solo e Rochas*. 2024.
- Hussaini, S. K. K.; Indraratna, B.; Vinod, J. S.; A laboratory investigation to assess the functioning of railway ballast with and without geogrids. *Transportation Geotechnics*, Elsevier Ltd, v. 6, p. 45 – 54, 2016.
- Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C.; *Advanced rail geotechnology - Ballasted track*. 1st Edition. CRC Press. (2011).
- Jia, W., Markine, V., & Jing, G. Analysis of furnace slag in railway sub-ballast based on experimental tests and DEM simulations. *Construction and Building Materials*. 2021.
- Koh, T., Moon, S., Jung, H., Jeong, Y., & Pyo, S. A Feasibility Study on the Application of Basic Oxygen Furnace (BOF) Steel Slag for Railway Ballast Material. *Sustainability*, 10, 284. 2018.
- Macêdo, J. A. G. de. *Interpretação de testes de deflexão para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis*. Tese de doutorado — Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.
- Nogami, J. S.; Villibor, D. F. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. [S.l.]: Vilibor, 1995.
- Pezo, R. F. A general method of reporting resilient modulus tests of soils, a pavement engineer's point of view. *In: 72nd Annual Meeting of the TRB*. [S.l.: s.n.], 1993.
- Rosa, A. F. *Efeito da distribuição de tamanho de partículas e litologia no comportamento de lastros ferroviários em análises laboratoriais e computacionais*. 240 p. Mestrado em Engenharia Civil — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- Samaris. *European Commission 5th Framework Program - Deliverable D29: Guide on techniques for recycling in pavement structures*. [S.l.], 2006.
- Silva, F. H. P. *Estudo do comportamento de um lastro ferroviário sob carga repetida em um modelo físico em escala real*. Dissertação de mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018.
- Selig, E. T.; Waters, J. M. *Track geotechnology and substructure management*. [S.l.]: Thomas Telford, 1994.