

ANÁLISE DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MINERALÓGICA E DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DO LASTRO DA FERROVIA DE INTEGRAÇÃO OESTE-LESTE

Guilherme Faria Souza Mussi de Andrade

Doutorando, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, guimussi@hotmail.com

Bruno Teixeira Lima

Professor Adjunto, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, bruno.lima@uerj.br

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães

Professor Adjunto, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, guimaraes@ime.eb.br

Anderson Costa dos Santos

Professor Associado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, andcostasantos@gmail.com

Werlem Holanda dos Santos

Professor Adjunto, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, werlemholanda@hotmail.com

RESUMO: O artigo apresenta uma investigação experimental com o lastro a ser utilizado na Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), que tem como objetivo promover a integração e o desenvolvimento socioeconômico nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil. A caracterização da estrutura microscópica da rocha foi realizada por meio de lâminas petrográficas e de difratometria de raios X (DRX). Posteriormente, foram realizados os ensaios de caracterização obrigatórios e alguns opcionais constantes da NBR 5564/2021. Por último, o comportamento resiliente do lastro foi avaliado através dos ensaios triaxiais de carga repetida. Os resultados indicam que o lastro atende aos requisitos da norma, com exceção da porcentagem de partículas não cúbicas, e que o comportamento resiliente demonstrou-se satisfatório, com módulos de resiliência comparáveis aos de pesquisas anteriores para a mesma litologia e granulometria.

PALAVRAS-CHAVE: FIOL, comportamento do lastro, lastro de calcário, ensaio triaxial de carga repetida.

ABSTRACT: The paper presents an experimental investigation into the ballast to be used in the West-East Integration Railway (FIOL, in Portuguese), which aims to promote integration and socio-economic development in the North, Northeast and Central-West regions of Brazil. The microscopic structure of the rock was conducted through thin-section and X-ray diffraction (XRD). Subsequently, mandatory characterization tests and some optional ones from NBR 5564/2021 were performed. Finally, the resilient behavior of the ballast was evaluated through cyclic load triaxial tests. The results indicate that the ballast meets the requirements of the standard, except for the percentage of non-cubic particles, and that the resilient behavior proved to be satisfactory, with resilient modulus comparable to those of previous research for the same lithology and granulometry.

KEYWORDS: FIOL, ballast behaviour, limestone ballast, cyclic load triaxial test.

1 INTRODUÇÃO

O sistema ferroviário destaca-se por sua eficiência em transportar grandes volumes de carga por médias e longas distâncias, oferecendo um custo por quilômetro transportado e níveis de emissão de poluentes geralmente menores em comparação com outros modos de transporte. Especificamente quanto a camada de lastro, ressalta-se que é o componente do pavimento ferroviário com maior peso e volume, geralmente composto por partículas médias e grandes e pode ser executado em diversas granulometrias (Selig e Waters, 1994). Um desafio significativo na compreensão e aplicação dos materiais que compõem a camada de lastro ferroviário é atribuído à litologia do material a ser utilizado, além das tensões impostas pela passagem dos trens. Uma compreensão precisa desta questão ajuda a evitar a deterioração acelerada falhas prematuras que podem levar a interrupções na operação ferroviária (Indraratna e Ngo, 2018).

A indústria ferroviária é uma das maiores consumidoras mundiais de rocha britada natural, sendo a maior parte deste material utilizado na camada de lastro (Li *et al.*, 2015). De acordo com Paixão *et al.* (2016), a utilização de britas na camada de lastro é provavelmente uma das aplicações mais severas as quais estes materiais podem ser solicitados. As principais litologias utilizadas incluem calcário, gnaisse, basalto, quartzito, granito, riolito e dolomita (Selig e Waters, 1994). Atualmente, materiais reciclados, como escória de aciaria, têm sido amplamente estudados como alternativas aos agregados de rocha britada para uso em camadas de lastro (Delgado *et al.*, 2019; Guimarães *et al.*, 2021; Gomes *et al.*, 2023). Entretanto, a normativa portuguesa de lastro (REFER, 2015) veda a utilização de quaisquer calcários (rochas sedimentares) e materiais alternativos, pois exigem que o material seja obtido exclusivamente de rochas sãs e duras.

Existem diversas normas técnicas estabelecidas por instituições internacionais que orientam o uso de materiais na camada de lastro. Cada uma delas possui características específicas, como ensaios obrigatórios, limites aceitáveis para propriedades físicas, litologias, distribuições granulométricas, dentre outros aspectos. Recentemente, a norma brasileira de lastro ferroviário NBR 5564 (ABNT, 2021) foi atualizada para classificar os limites de propriedades físicas de acordo com a litologia do agregado de rocha britada. É difícil estabelecer normas e modelos constitutivos rígidos para as propriedades dos agregados de lastro, no entanto, sabe-se que o comportamento da camada é influenciado pelas suas propriedades mecânicas, como a resistência e a deformabilidade, bem como pelas suas propriedades hidráulicas.

Antes de discutir sobre a investigação experimental, é necessário apresentar um breve histórico do projeto da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL). A FIOL é um projeto de transporte ferroviário localizado no estado da Bahia. Com aproximadamente 1.527 quilômetros de extensão, a ferrovia ligará o município de Figueirópolis-TO (ponto de conexão com a Ferrovia Norte-Sul), ao Porto Sul, localizado em Ilhéus-BA. O objetivo da FIOL é promover a integração e fomentar o desenvolvimento socioeconômico entre as regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste do Brasil. A ferrovia possibilitará o transporte de produtos agrícolas, minerais e industrializados por uma nova rota de exportação eficiente.

Neste artigo é avaliado a eficiência de um agregado calcário para utilização como material de lastro da FIOL. É apresentada uma visão geral do aparato experimental, a preparação dos corpos de prova de lastro, o procedimento de ensaio e alguns resultados experimentais. Realizaram-se os ensaios obrigatórios recomendados pela NBR 5564 (ABNT, 2021), bem como alguns ensaios opcionais. A análise mineralógica foi conduzida através de lâminas petrográficas e de difratometria de raios X (DRX) com o pó do lastro. O módulo de resiliência do lastro foi obtido através de ensaios triaxiais de carga repetida. Finalmente, são apresentadas algumas conclusões e apontadas algumas limitações da presente investigação experimental.

2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

O conceito de resiliência foi introduzido na pavimentação por Hveem (1955), que buscava, particularmente, compreender as causas do trincamento por fadiga dos revestimentos asfálticos. Hveem optou por utilizar o termo deformação resiliente em vez de deformação elástica, devido ao fato de que as deformações nos pavimentos são muito superiores às obtidas nos sólidos elásticos que os engenheiros lidam. Apesar das diferentes terminologias, ambas possuem o mesmo significado físico. O MR é definido como a razão entre a tensão desvio cíclica (q_{cic}) e a deformação resiliente axial específica (ϵ_a) durante o ensaio triaxial de cargas repetidas, conforme definido na Equação 1:

$$MR = \frac{q_{cic}}{\varepsilon_a} \quad (1)$$

onde: $q_{cic} = \sigma_1 - \sigma_3$ e $\varepsilon_a = \Delta h/h_0$, sendo Δh o deslocamento vertical máximo e h_0 é a altura inicial de referência do corpo de prova cilíndrico.

Segundo Selig e Waters (1994), o módulo de resiliência tem grande importância na avaliação das propriedades mecânicas dos materiais que compõem as camadas do pavimento ferroviário (subleito, sublastro e lastro). O MR do lastro geralmente aumenta com o aumento do número de ciclos de carga, devido ao enrijecimento proveniente da acomodação do material. Para determinados níveis de tensão, após uma certa quantidade de ciclos de carga, o MR tende a atingir um valor aproximadamente constante e o material comporta-se de maneira quase elástico.

Diversos modelos de ajuste do módulo de resiliência foram desenvolvidos para solos e britas. Seed *et al.* (1967), Hicks e Monismith (1971) e Pell e Brown (1972) observaram que o MR de materiais não coesivos era consideravelmente influenciado pela pressão confinante, porém, pouco sensível à tensão desvio. De acordo com os autores, na medida em que a pressão confinante aumentava, constatou-se um significativo aumento do MR. Portanto, para solos granulares, destacaram-se os modelos em que o MR é dependente, principalmente, da pressão confinante (σ_c) e da soma das tensões principais (θ), conforme Equações 2 e 3:

$$MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \quad (2)$$

e

$$MR = K'_1 \theta^{K'_2} \quad (3)$$

onde: K_1 , K_2 , K'_1 , K'_2 são parâmetros experimentais e θ é o primeiro invariante de tensões, que no caso de ensaios triaxiais em condições axissimétricas, $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$.

Apesar do modelo $K-\theta$ considerar a significativa influência da pressão confinante, e também a influência da tensão axial, uma das críticas que ele recebe deve-se ao fato de não considerar as tensões principais atuantes separadamente.

No caso de solos argilosos, o módulo de resiliência é mais sensível a influência da tensão desvio, conforme observado por Svenson (1980), podendo ser determinado pela equação:

$$MR = K_1 \sigma_d^{K_2} \quad (4)$$

Macêdo (1996) introduziu o modelo $K-\sigma_d-\sigma_3$, conforme apresentado na Equação 5. Também conhecido como modelo composto, este associa os dois modelos mais comuns (Equações 2 e 4) e pode ser aplicado a qualquer tipo de solo ou agregado granular.

$$MR = K_1 \sigma_3^{K_2} \sigma_d^{K_3} \quad (5)$$

onde: K_1 , K_2 , K_3 são parâmetros de regressão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do Lastro e Preparação dos Corpos de Prova

O lastro é produzido através da britagem de rochas e do posterior peneiramento para obter as dimensões de partículas pretendidas. A distribuição granulométrica adotada para confecção dos corpos de prova de lastro atende aos requisitos dos fusos granulométricos da AREMA n.º 4 (AREMA, 2020), conforme representado na Figura 1a. Segundo a definição do Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), o material ensaiado

é classificado como um pedregulho mal graduado, visto que o coeficiente de uniformidade (C_u) e do coeficiente de curvatura (C_c) foram 1,61 e 0,98, respectivamente. A principal razão para a adoção da AREMA nº 4 foi o fato desta granulometria ser empregada em linhas ferroviárias principais, permitindo assim a realização de ensaios triaxiais sem a necessidade de utilizar a técnica de decalagem da curva granulométrica, uma vez que a utilização de técnicas de redução de escala tem ainda uma aceitação limitada entre diferentes autores (Indraratna *et al.*, 1998; Klinevicius, 2011).

Os corpos de prova (CP) apresentavam 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Poranto, os ensaios realizados respeitaram a relação H/D igual a 2, proposta por Bishop e Green (1965), minimizando os efeitos de atrito nas extremidades da amostra. Além disto, em função da distribuição granulométrica adotada, os corpos de prova atenderam a relação $D/d_{máx}$ recomendada por Skoglund (2002). O referido autor considera que para garantir que os efeitos de escala possam ser desprezados, o diâmetro máximo da partícula ($d_{máx}$) deve ser igual ou inferior a 1/6 do diâmetro do corpo de prova (D).

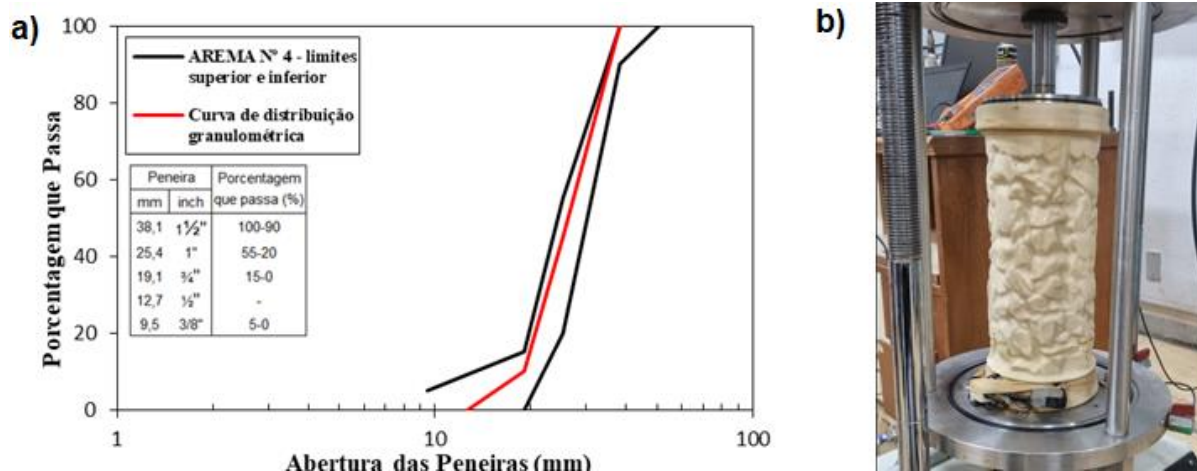


Figura 1. a) Distribuição granulométrica adotada para o CP; b) CP moldado para os ensaios triaxiais.

A preparação dos corpos de prova de lastro ocorreu através da compactação por vibração de quatro camadas de igual espessura dentro de um molde tripartido. Inicialmente, instalava-se uma membrana de látex de 2,00 mm de espessura contra a parede do molde. A espessura da membrana é necessária para evitar a sua perfuração pelas arestas vivas das partículas de lastro. O processo de compactação consistiu na vibração, através de um agitador de peneiras, de cada camada durante um minuto, seguido de um quinto ciclo com a duração de dois minutos. Finalizada a compactação procedia-se com a regularização manual do CP, buscando o melhor preenchimento possível para as partículas que se encontravam na parte superior do molde. Posteriormente, aplicava-se uma camada de gesso de regularização no topo do CP. O CP era então conduzido ao aparato triaxial, onde eram colocados o *top-cap* e os *o-rings* e, em seguida, aplicava-se um vácuo interno temporário para permitir a remoção do molde (Figura 1b).

O processo de preparação do CP foi considerado eficaz, uma vez que resultou em índice de vazios inicial (e_0), coeficiente de uniformidade e coeficiente de curvatura semelhantes aos obtidos por Indraratna e Salim (2003) para materiais de lastro de granulometria uniforme. A Tabela 1 apresenta os resultados de e_0 após moldagem, C_c , C_u e da massa específica dos corpos de prova.

Tabela 1. Propriedades dos corpos de prova confeccionados para os ensaios triaxiais de módulo de resiliência

CP	e_0	C_u	C_c	Massa Específica (kg/m ³)
CP 1	0,83	1,631	0,988	1.481
CP 2	0,76	1,600	0,975	1.538

3.2 Ensaios de Módulo de Resiliência

O aparato triaxial utilizado para os ensaios de MR consiste numa bancada em aço móvel que suporta a prensa de carga, a célula triaxial, o sistema pneumático de controle de pressão e o painel de comando. O pistão

de carga é acionado por um servomotor, onde a célula de carga está instalada e a pressão confinante é aplicada através de um sistema pneumático. Como no caso dos ensaios cíclicos as pequenas deformações são relevantes para determinar adequadamente o comportamento do material, foram utilizadas instrumentações de medição interna, instaladas no *top-cap* e na base da célula triaxial, buscando minimizar as imprecisões que podem ocorrer com a utilização de instrumentação externa (fora da câmara triaxial). Portanto, foram utilizados dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transformer*) internos, diametralmente opostos, posicionados e fixados em toda a altura do corpo de prova buscando obter medições de deformação mais precisas.

Os ensaios de MR foram conduzidos segundo a norma DNIT 135/2018 (DNIT, 2018). Inicialmente o CP foi submetido a uma etapa de condicionamento, na qual uma sequência de carregamentos cíclicos é aplicada, com intuito de eliminar as deformações permanentes que podem ocorrer nos primeiros carregamentos. Finalizada a etapa do condicionamento é iniciado o procedimento para determinação do MR (Equação 1), aplicando-se dezoito pares de tensões distintos para obtenção das deformações específicas. A frequência aplicada na tensão desvio cíclica é de 1 Hz, enquanto a pressão confinante é mantida constante. Os resultados dos ensaios de MR foram analisados a partir das Equações 2, 3, 4 e 5.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Caracterização Mineralógica e Física do Lastro

Inicialmente, buscou-se caracterizar a estrutura microscópica do material através da análise de vinte lâminas petrográficas com intuito de obter o percentual de minerais, a forma dos grãos, tamanho, textura, etc. Porém, em todas as amostras, foi observado um alto grau de alteração das rochas, impossibilitando, assim, a identificação dos minerais e cristais através das lâminas. A Figura 2a apresenta a imagem obtida em uma das lâminas petrográficas, na qual observa-se um carbonato impuro muito alterado. Portanto, para determinar a composição mineralógica do lastro, cinco amostras do pó do material foram analisadas através de difratometria de raios X. A Figura 2b apresenta o difratograma obtido de uma das amostras onde tem-se a intensidade da luz difratada em função da variação do ângulo 2θ . O gráfico foi comparado com os disponíveis no catálogo da *Crystallography Open Database* (COD, 2013) para determinação dos minerais presentes no lastro.

As distâncias interplanares (d) relativas as reflexões difratométricas, observadas com o DRX, permitiram caracterizar os seguintes componentes minerais para o lastro: calcita ($d = 3,03 \text{ \AA}$; $2,09 \text{ \AA}$; $2,28 \text{ \AA}$), quartzo ($d = 3,34 \text{ \AA}$) e dolomita ($d = 2,88 \text{ \AA}$). As mineralogias identificadas foram idênticas nas cinco amostras (Figura 2b).

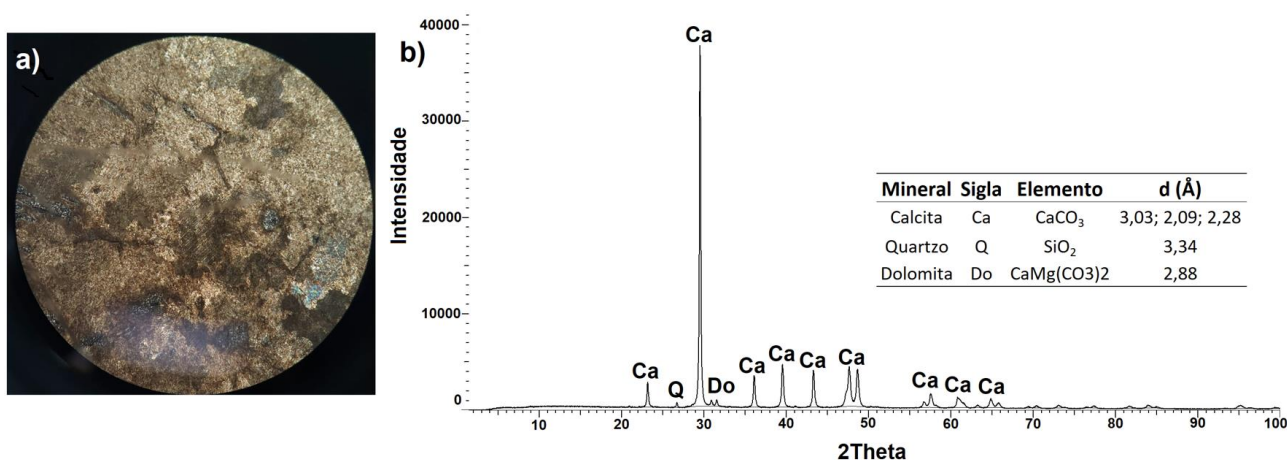


Figura 2. a) Alto grau de alteração da rocha apresentado nas lâminas petrográficas; b) Difratograma de raios X da composição mineral do lastro.

Os ensaios de caracterização foram conduzidos para determinar as propriedades físicas do lastro de calcário. Os ensaios seguiram as recomendações da norma brasileira (ABNT, 2021), que estabelece os requisitos e os métodos de ensaio para lastro ferroviário. Os resultados foram comparados com os limites estabelecidos tanto pela norma brasileira quanto pelo Manual de Engenharia Ferroviária da AREMA

(AREMA, 2020). Observou-se que o lastro de calcário atendeu à maioria dos limites propostos, sendo a quantidade de partículas não cúbicas a única propriedade que excedeu o limite permitido em ambas as especificações de lastro (Tabela 3). O não atendimento ao limite de partículas não cúbicas é um aspecto negativo, visto que partículas lamelares tendem a se alinhar segundo uma direção (vertical ou horizontal) e, conseqüentemente, formarem planos de fraqueza. Além disto, partículas com formatos não-cúbicos podem vir a apresentar maior desgaste por abrasão e quebra de partículas.

Tabela 3. Propriedades do lastro de calcário em comparação com os limites normativos internacionais

Propriedades	Lastro de Calcário	NBR 5564 (2021)	AREMA (2020)
Forma Média das Partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (%)	18	< 15	< 5
Massa Específica Aparente (kg/m ³)	2.703	> 2.600	> 2.600
Porosidade Aparente (%)	0,0017	< 2	-
Absorção d'água (%)	0,06	< 2	< 2
Material Pulverulento (%)	0	< 1	< 1
Torrões de Argila (%)	0	< 0,5	< 0,5
Massa Unitária no Estado Solto (kg/m ³)	1.385	> 1.250	-
Abrasão Los Angeles (%)	22	< 30	< 30
Impacto Treton (%)	12,26	< 25	-
	4,75 (63,5 a 38 mm)		
Resistência a Intempérie (%)	1,90 (38 a 19 mm)	< 10	< 5
	3,47 (19 a 12,5 mm)		

4.2 Comportamento Resiliente

A Figura 3 apresenta os resultados do módulo de resiliência conduzidos, em função da tensão confinante (Figura 3a), da tensão desvio (Figura 3b) e do primeiro invariante de tensões (Figura 3c). Nota-se que os resultados dos ensaios com os corpos de prova praticamente se sobrepõem, garantindo a repetibilidade dos resultados. Os valores do MR obtidos variaram entre 160 e 600 Mpa.

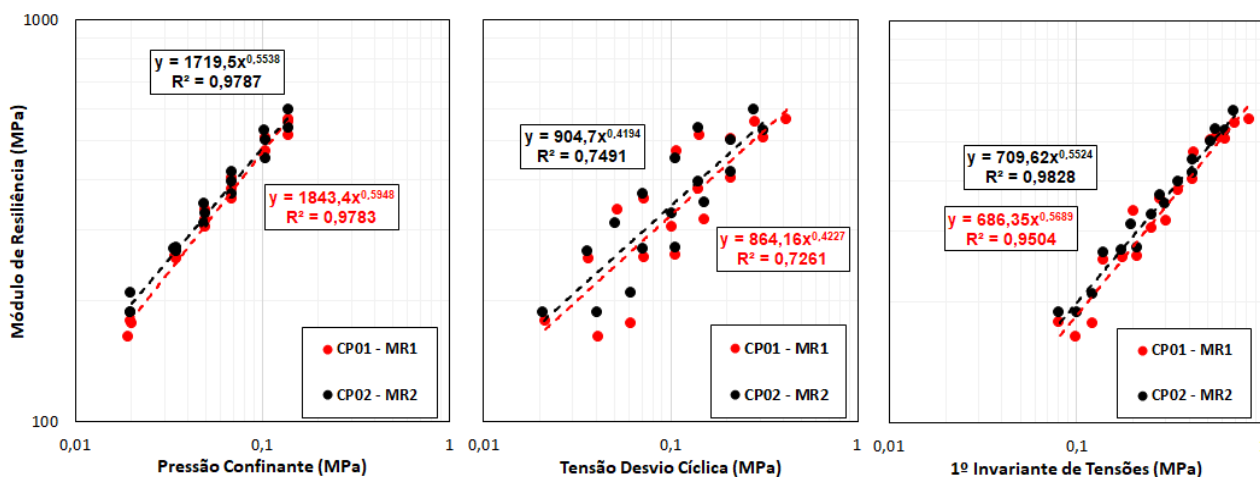


Figura 3. Variação do MR em função: a) da tensão confinante; b) da tensão desvio cíclica; c) do 1º invariante de tensões.

Os resultados do MR obtidos apresentaram magnitudes similares aos observados por Knutson e Thompson (1977). Os referidos autores conduziram seus ensaios em corpos de prova de lastro de calcário utilizando uma distribuição granulométrica enquadrada nos limites da AREMA nº 4, assim como neste estudo, e obtiveram valores para o MR variando entre, aproximadamente, 200 e 500 MPa. Apesar dos pares de tensão empregados pelos pesquisadores não serem os mesmos utilizados pela norma DNIT 134/2018, acredita-se que os resultados de MR obtidos por Knutson e Thompson (1977) corroborem com os apresentados na Figura 3.

A partir da análise da Figura 3 pode-se observar que os valores do módulo de resiliência do lastro de calcário apresentaram melhor ajuste com a variação da pressão confinante ou do primeiro invariante de tensões do que com a variação da tensão desvio cíclica. Este comportamento concorda com as observações de diversos pesquisadores (Seed *et al.*, 1967; Hicks e Monismith, 1971; Pell e Brown, 1972).

O Modelo Composto foi o que apresentou o melhor resultado dentre os modelos de comportamento analisados. A resposta resiliente do agregado de calcário em uma via férrea recém construída pode ser representada pela Equação 5, obtida através da média dos coeficientes dos ensaios CP1 e CP2.

$$MR = 1620,6 \sigma_3^{0,46} \sigma_d^{0,09} \quad (5)$$

5 CONCLUSÕES

A eficiência do agregado calcário para uso na camada de lastro da FIOL foi avaliada por meio de uma investigação laboratorial, na qual foi caracterizada a estrutura microscópica do material e determinada as propriedades físicas e o módulo de resiliência do lastro. Os resultados de e_0 , C_u e C_c pós-moldagem foram semelhantes aos obtidos por outros pesquisadores utilizando diferentes procedimentos de compactação (Indraratna e Salim, 2003), demonstrando uma consistente repetibilidade entre os corpos de prova ensaiados e comprovando a eficácia da metodologia utilizada para preparação do CP.

Dentre as propriedades físicas do lastro, observou-se que a quantidade de partículas não cúbicas ultrapassou os valores limites propostos pelas normas analisadas. As lâminas petrográficas apresentaram um alto grau de alteração sobre as rochas, impossibilitando a identificação dos minerais e cristais. O DRX possibilitou a caracterização de uma quantidade significativa de calcita além da presença de quartzo e dolomita. Os resultados do módulo de resiliência obtiveram boa repetibilidade, sendo o Modelo Composto aquele que apresentou o melhor ajuste com os resultados experimentais.

A pesquisa experimental determinou características importantes do lastro calcário estudado. No entanto, para se considerar a utilização desse material na camada de lastro da FIOL, são necessárias investigações complementares, a fim de garantir a durabilidade e a eficiência do material, uma vez que as especificações quanto à forma das partículas não foram atendidas. Para isto, é necessário avaliar o nível da quebra do lastro ao final dos ensaios triaxiais de carga repetida de longa duração (deformação permanente), com intuito de evitar a utilização de um lastro que apresente deterioração acelerada, acarretando em constantes interrupções na operação ferroviária.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Eng. Ciro Azevedo pela valiosa assistência durante os ensaios de caracterização e de módulo de resiliência. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AREMA - American Railway Engineering Maintenance-of-way Association (2020). *Manual for Railway Engineering*. Lanham.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 5564. *Via férrea - Lastro ferroviário*. Rio de Janeiro.

Bishop, A. W., Green, G. E. (1965) The Influence of End Restraint on the Compression Strength of a Cohesionless Soil. *Géotechnique*, 15 (3), p. 243–266.

COD (2013) *Crystallography Open Database*. Disponível em: <<https://www.crystallography.net/cod/>>. Acesso em: 26 fev. 2024.

Delgado, B. G., Viana da Fonseca, A., Fortunato, E., Maia, P. (2019) Mechanical behavior of inert steel slag ballast for heavy haul rail track: Laboratory evaluation. *Transportation Geotechnics*, 20, p. 100243.

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 134/2018-ME. *Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Gomes, M. B. B., Guimarães, A. C. R., Nascimento, F. A. C., Santos, J. T. A. (2023) Ballast with siderurgic aggregates: variation analysis of the shape parameters of particles submitted to triaxial tests through 3D scanner. *Soils and Rocks*, 46 (3), p. 1-13.
- Guimarães, A. C. R., Costa, K. A., Reis, M. M., Santana, C. S. A., Castro, C. D. (2021) Study of controlled leaching process of steel slag in soxhlet extractor aiming employment in pavements. *Transportation Geotechnics*, 27, p. 100485.
- Hicks, R. G., Monismith, C. L. (1971) Factors influencing the resilient response of granular materials. *Highway Research Record*, 345, p. 15-31.
- Hveem, F. N. (1955) Pavement deflections e fatigue failures. *Highway Research Board Bulletin*, 114, p. 43-87.
- Indraratna, B., Ionescu, D., Christie, D. (1998) Shear Behavior of Railway Ballast Based on Large-Scale Triaxial Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124 (5), p. 439-449.
- Indraratna, B., Ngo, N. T. (2018) *Ballast Railroad Design: SMART-UOW Approach*, 1st ed., CRC Press, Londres, 176 p.
- Indraratna, B., Salim, W. (2003) Deformation and Degradation Mechanics of Recycled Ballast Stabilised with Geosynthetics. *Soils and Foundations*, 43 (4), p. 35-46.
- Klincevicus, M. G. Y. (2011) *Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 171 f.
- Knutson, R. M., Thompson, M. R. (1977) Resilient Response of Railway Ballast. *Transportation Research Record*, 651, p. 31-39.
- Li, D., Hyslip, J., Sussmann, T., Chrismer, S. (2015) *Railway Geotechnics*, CRC Press, Londres, 592 p.
- Macêdo, J. A. G. (1996) *Interpretação de ensaios defletométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 456 f.
- Paixão, A., Fortunato, E., Calçada, R. (2016) A numerical study on the influence of backfill settlements in the train/track interaction at transition zones to railway bridges. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit, v. 230, p. 866-878 .
- Pell, P. S., Brown, S. F. (1972) The characteristics of materials for the design of flexible pavement structures. In: The third international conference on the structural design of asphalt pavements, Grosvenor house, Park Lane, London, England. v. 1., p. 11-15.
- REFER - Rede Ferroviária Nacional (2015). RF.IT.VIA.015. *Especificações técnicas para fornecimento de balastro novo*. Portugal.
- Seed, H. B., Mitry, F. G., Monismith, C. L., Chan, C. K. (1967) Factors influencing the resilient deformations of untreated aggregate base in two-layer pavements subjected to repeated loading. *Highway Research Record*, 190, p. 19-57.
- Selig, E. T., Waters, J. M. (1994) *Track geotechnology e substructure management*, Thomas Telford, Londres, 446 p.
- Skoglund, K. A. (2002) *A study of some factors in mechanistic railway track design*. Tese de Doutorado, Norwegian University of Science and Technology, 260 f.
- Svenson, M. (1980) *Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos*. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 135 f.