

Avaliação da relação entre comportamentos mecânico e hidráulico para lastro ferroviário

Evaluation of the relationship between mechanical and hydraulic behavior for railway ballast: case study

Daianne Fernandes Diógenes¹, Verônica Teixeira Franco Castelo Branco²,
Laura Maria Goretta Motta³

¹Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, daianne@det.ufc.br

²Universidade Federal do Ceará, Ceará – Brasil, veronica@det.ufc.br

³Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – Brasil, laura@coc.ufrj.br

Recebido:

1 de setembro de 2018

Aceito para publicação:

30 de janeiro de 2020

Publicado:

31 de agosto de 2020

Editor de área:

Kamilla Vasconcelos

Palavras-chaves:

Lastro ferroviário.
Propriedades de forma.
Comportamento mecânico.
Comportamento hidráulico.

Keywords:

Railway ballast.
Shape properties.
Mechanical behavior.
Hydraulic behavior.

DOI:10.14295/transportes.v28i3.1829

RESUMO

O desempenho da camada de lastro ferroviário é dependente das características físicas, mecânicas e hidráulicas, bem como das características de outros componentes, como veículo e velocidade da via. Este estudo objetiva avaliar materiais de lastro, em diversas fases de aplicação, quanto ao comportamento mecânico e hidráulico. Para tanto, foram realizados ensaios tradicionais de forma de agregados, ensaios avançados de propriedades de forma de agregados com o uso do processamento digital de imagens, módulo de resiliência, deformação permanente e condutividade hidráulica. Os resultados mostraram que uma maior deformação axial permanente não, necessariamente, implica em menor condutividade hidráulica, para os materiais avaliados nesse estudo. O comportamento mecânico foi alterado a partir das modificações nas propriedades de forma dos agregados (forma 2D e textura), bem como da granulometria. A condutividade hidráulica permaneceu a mesma para os três materiais avaliados, mesmo após a realização dos ensaios mecânicos. No geral, os três materiais foram considerados propícios a sofrerem quebras, mas, embora tenham passado por etapas de construção e operação, todos foram classificados como limpos.

ABSTRACT

The performance of the rail ballast layer is dependent on the physical, mechanical and hydraulic characteristics as well as the characteristics of other components such as vehicle and track speed. This study aims to evaluate ballast materials, in various application phases, regarding mechanical and hydraulic behavior. For this purpose, traditional aggregate shape tests, advanced aggregate shape properties tests were performed using digital image processing, resilience modulus, permanent deformation and hydraulic conductivity. The results showed that greater permanent axial deformation does not necessarily imply lower hydraulic conductivity for the materials evaluated in this study. The mechanical behavior was changed from the changes in the shape properties of the aggregates (2D shape and texture), as well as the particle size. The hydraulic conductivity remained the same for the three materials evaluated, even after the mechanical tests. Overall, the three materials were considered prone to breakage, but although they went through construction and operation, they were all classified as clean.



1. INTRODUÇÃO

A via permanente lastrada (tradicional) é caracterizada pela elasticidade transmitida à estrutura na recepção dos esforços e pela capacidade de absorver os ruídos referentes a locomoção dos trens. Em comparação à via permanente rígida, é uma estrutura que tem sua geometria de via alterada em ciclos curtos de uso, tem limitação com relação à resistência lateral e pode ter

mudança de permeabilidade a partir da degradação do material aplicado ou do bombeamento de finos das camadas inferiores para a camada de lastro, colmatando os espaços vazios.

A camada de lastro ferroviário deve distribuir uniformemente a tensão da via gerada pelo tráfego e, assim, diminuir a pressão sobre o subleito, manter a elasticidade, gerar ancoragem para a grade a fim de conter os movimentos laterais, verticais e longitudinais acentuados e proporcionar drenagem eficiente (Selig e Waters, 1994). O desempenho estrutural desta camada é influenciado pelas características físicas, mecânicas e hidráulicas, bem como pelas características de outros elementos, como veículo e velocidade da via.

Para um melhor entendimento do estado físico da matriz granular de lastro, a compreensão do comportamento tensão-deformação e da condutividade hidráulica são fundamentais para avaliar o desempenho da via quanto a critérios geométricos, durabilidade do material e economia nas intervenções de manutenção. No entanto, tais características se modificam ao longo do tempo, especialmente diante do preenchimento dos vazios entre as partículas maiores pelas partículas mais finas (< 4,75 mm), o que pode alterar o módulo de resiliência, diminuir a porosidade e a capacidade drenante do lastro (Selig e Waters, 1994).

O objetivo deste trabalho é avaliar a relação entre o comportamento mecânico e hidráulico da camada de lastro ferroviário em diferentes fases de aplicação. Foram avaliadas as alterações nas características de forma dos agregados passantes pelos processos de lançamento (lançamento do lastro da esteira da pedreira aos vagões e dos vagões à via permanente), de carregamentos (pranchas carregadas de trilhos e dormentes, vagões carregados de lastro e transporte de carga na via para tráfego projetado para 32,5 ton/eixo) e de manutenções por socaria (inserção de hastes metálicas na camada de lastro). Além disso, os impactos das alterações das propriedades de forma e da granulometria dos agregados nos comportamentos mecânico e hidráulico do lastro foram também avaliados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O lastro é uma camada granular responsável por suportar a grade ferroviária, sendo composto, no geral, por agregados cúbicos (entre 12,0 e 63,5 mm) e vazios. A distribuição granulométrica dessa camada se enquadra em faixas estabelecidas por diferentes países, empresas, órgãos ferroviários ou associações, como no Brasil (ABNT NBR 5564, 2011), nos EUA (American Railway Engineering and Maintenance of Way Association - AREMA, 2013) e na Austrália (Rail Infrastructure Corporation - RIC e Queensland Rail). Para Indraratna *et al.* (2011), lastros com granulometria uniforme apresentam maiores deslocamentos, sendo mais susceptíveis à quebra quando comparados a lastros melhor graduados. Vizcarra *et al.* (2014) avaliaram deformação e degradação de lastros em escala real, a partir do uso de duas normas: australiana AS 2758.7 (1996) – Curva A (bem graduada de diâmetro máximo e mínimo de 63 e 13,2 mm) e brasileira ABNT NBR 5564 (2011) – Curva B (uniforme de diâmetro máximo e mínimo de 63 e 19 mm). Pode-se concluir que a Curva A apresentou menor deformação e que a Curva B foi mais susceptível a quebra das partículas. Embora curvas bem graduadas proporcionem melhor intertravamento dos agregados (matriz granular mais densa), conseqüentemente menor deformação, quase todas as especificações de lastro exigem graduações uniformes, a fim de permitir drenagem livre. Com isso, Indraratna *et al.* (2011) propuseram uma graduação de lastro que garante adequada estabilidade e não compromete uma das principais funções da camada de lastro: a drenagem.

2.1. Comportamento mecânico

Segundo Selig e Waters (1994) e Johnson (1986), o comportamento mecânico do lastro está diretamente ligado à deformabilidade elástica (Módulo de Resiliência - MR) e à deformabilidade plástica (Deformação Permanente - DP). Tal comportamento elasto-plástico é afetado por dois fatores: o material, devido à atuação individual e em conjunto das partículas (granulometria, entrada de finos colmatantes, teor de umidade do material colmatante nos vazios do lastro, tamanho e forma das partículas) e o carregamento (nível de tensões, sequência de carregamento, número de ciclos e frequência). Esse comportamento é geralmente avaliado a partir de ensaios triaxiais de carga repetida em escalas real e reduzida. A técnica de escalonamento ou decalagem é definida pela redução da granulometria do material pela translação da curva granulométrica, de modo paralelo à curva granulométrica original. Tal técnica é utilizada para contornar a dificuldade de análise do comportamento tensão-deformação do lastro em laboratório com ensaio em escala real, em função do tamanho dos agregados de lastro, de modo a reduzir custos e dificuldades operacionais.

Para Lowe (1964), considerando um conjunto de esferas perfeitas, se o material possuir as mesmas propriedades (mineralogia, dureza, resistência, Coeficiente de Não Uniformidade (CNU), Coeficiente de Curvatura (CC), forma e textura das partículas), tamanhos menores podem ser utilizados para avaliar o comportamento mecânico de materiais de tamanhos maiores. Já para Sevi (2008), um conjunto de materiais de menor dimensão (38,1 e 19,1 mm) apresentou comportamento elasto-plástico diferente se comparado ao conjunto com granulometria original (63,5 mm). Durante o ensaio triaxial de carga repetida, a deformação axial aumentou à medida que o tamanho das partículas diminuiu. Já o MR aumentou para os tamanhos de agregados maiores quando maiores tensões foram utilizadas, o que pode ser atribuído a rigidez da matriz granular diante do empacotamento com agregados de tamanho original.

Pesquisas recentes em lastros ferroviários investigaram o comportamento mecânico com diferentes granulometrias e escalas de ensaio. Klinevicius (2011) avaliou materiais oriundos de diferentes processos de britagem, mas de mesma origem mineralógica, em escala reduzida na frequência de 5 Hz. A autora concluiu que materiais passantes pelo britador cônico secundário apresentam comportamento mecânico superior em relação aquele obtido para os materiais passantes pelo britador cônico terciário. A técnica de redução da granulometria foi considerada válida, porém com dificuldades em avaliar os resultados, já que o comportamento mecânico da matriz granular reduzida difere do conjunto em escala real, devido às diferenças entre as resistências individuais dos grãos. Merheb (2014) analisou lastro limpo e contaminado com diferentes granulometrias (AREMA Nº 3 e AREMA Nº 24) em escalas real e reduzida na frequência de 9 Hz. O autor concluiu que, nos primeiros ciclos de carregamentos, a rigidez do material é baixa devido à acomodação dos agregados. Após o rearranjo das partículas, a rigidez aumenta e atinge a estabilidade. As curvas granulométricas foram analisadas antes e após a realização dos ensaios mecânicos e notou-se que o nível de desgaste foi proporcional entre as amostras, independente da escala. Pode-se também observar maior valor de rigidez e menor deformação para lastro em escala reduzida. Diógenes (2016) caracterizou material de lastro oriundo da pedreira e da via permanente com o ensaio triaxial em escala reduzida (1 Hz). Pode-se identificar a influência da alteração das propriedades de forma e da granulometria no comportamento mecânico. Os materiais oriundos da via apresentaram menores deformações em relação ao material oriundo da pedreira. Paim da Silva (2018) avaliou o MR e a DP do lastro em diferentes cenários em um modelo físico de escala real e em escala reduzida. O autor obteve resultados de MR em

escala reduzida compatíveis com aqueles obtidos em escala real. Todos os trabalhos citados anteriormente avaliaram o comportamento mecânico de lastro na condição real e/ou reduzida, de modo a concluir como válida a caracterização reduzida, mesmo que esta apresente diferenças em termos de valores absolutos com relação aqueles obtidos em escala real.

2.2. Comportamento hidráulico

Indraratna *et al.* (2011) apresentaram uma análise sobre os comportamentos mecânico e hidráulico de lastro ferroviário com a proposição de uma curva granulométrica para atender os dois comportamentos. Os autores recomendam que os materiais aplicados em camada de lastro apresentem CNU entre 2,2 e 2,6. Com isso, a distribuição granulométrica proporcionará estabilidade a via com redução de quebra de partículas e satisfatória permeabilidade de água na via permanente.

Tennakoon *et al.* (2012) investigaram a condutividade hidráulica para materiais de lastro sob carga constante em escala real com diferentes percentuais de finos colmatantes e realizaram análise numérica da infiltração através de simulação do fluxo bidimensional para avaliar a capacidade drenante do material. Os citados autores analisaram o Índice de Colmatção (IC) estabelecido por Selig e Waters (1994) e o Percentual de Vazio Colmatado (PVC) sugerido por Feldman e Nissen (2002), e propuseram um novo parâmetro que representaria o real volume de material colmatante: Índice de Vazio Colmatado – (Void Contaminant Index – VCI). O parâmetro VCI incorpora efeitos de volume de vazios, densidade específica e granulometria do material colmatante.

Paiva *et al.* (2015) avaliaram a permeabilidade da camada de lastro a partir de amostras limpa e colmatadas com diferentes percentuais de solo: 10, 15, 20, 25 e 40%. Os autores realizaram o teste de permeabilidade e desenvolveram uma equação que pode ser utilizada para prever a condutividade hidráulica para diferentes taxas de colmatção do lastro com R^2 igual a 0,91. Os resultados indicaram redução na condutividade hidráulica a partir da inserção de finos, porém para as taxas de colmatção de 20 e 25% os valores encontrados foram similares (aproximadamente 0,009 cm/s).

Schmidt *et al.* (2017) analisaram a permeabilidade a partir do uso de ensaios de carga constante com um permeâmetro retangular de agregados com dimensões 30,5 × 30,5 × 61 cm. Esses autores pesquisaram os materiais de lastro colmatados com areia variando o IC de moderadamente limpo a colmatado. Os resultados indicaram que o fluxo de percolação reduziu de forma significativa com um pequeno incremento no teor de material colmatante. Vale ressaltar que os materiais foram ensaiados em tamanho real e apresentaram mudança de velocidade hidráulica de 15,86 a 0,094 cm/s diante da diferença da colmatção (IC de 1,6 a 39).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de avaliar um lastro ferroviário em diferentes condições, três diferentes cenários foram analisados no presente trabalho. No primeiro foi realizada a avaliação das propriedades físicas das partículas para identificar a qualidade dos materiais utilizados. No segundo foi executada a caracterização dos agregados (forma 2D, esfericidade, angularidade e textura superficial) e do comportamento mecânico do lastro inicial e dos lastros após os processos de lançamento na via e da aplicação dos ciclos de carregamento e manutenção. Por fim, o comportamento hidráulico dos materiais foi investigado a fim de avaliar as modificações no fluxo de água e identificar as relações entre os comportamentos mecânico e hidráulico.

3.1. Materiais utilizados

Os materiais utilizados nesta pesquisa, inicial e coletados na via, são de origem granítica provenientes de uma pedreira fornecedora da Transnordestina Logística S.A. O material na condição inicial (Lastro), coletado na pedreira, apresentou partículas de diâmetro entre 19 e 63 mm. O agregado passou por britagem primária com o uso do britador de mandíbula e por britagem secundária com o uso do britador cônico. Foram avaliados ainda materiais passantes por processo de britagem idêntico ao do material do Lastro, mas coletados na própria via permanente em diferentes estágios: Lastro posicionado imediatamente Abaixo do Dormente (LAD) e lastro com Determinado Tempo de Uso (DTU – 5 anos de uso). O material LAD representou os agregados lançados da esteira da pedreira aos vagões e dos vagões à via e que passaram pelo processo inicial de compactação (socaria). O material DTU representou os agregados submetidos aos processos de lançamentos em vagões e na via, socaria inicial, ciclos de carregamentos e manutenção com socaria corretiva na geometria do lastro. Vale ressaltar que o material DTU foi aplicado na via em 2011, e foi coletado (também abaixo do dormente) após cinco anos de uso.

O tráfego no trecho de coleta em campo atingiu cerca de 2,93 Milhões de Toneladas Brutas Transportadas (MTBT) com velocidade de operação em média de 35 km/h. O trecho escolhido foi a linha principal do canteiro industrial responsável pelo trânsito de entrada e saída de vagões e pranchas, submetido a carregamentos para a própria construção da via. Vale ressaltar que a via funciona desde 2011, e em janeiro de 2016 passou por manutenção com utilização de socadora, alinhadora e niveladora, sem inserção de material, apenas para correção geométrica do alinhamento e superelevação da via, dimensionada com capacidade de suporte de 32,5 toneladas por eixo. A Figura 1 mostra o programa experimental do estudo.

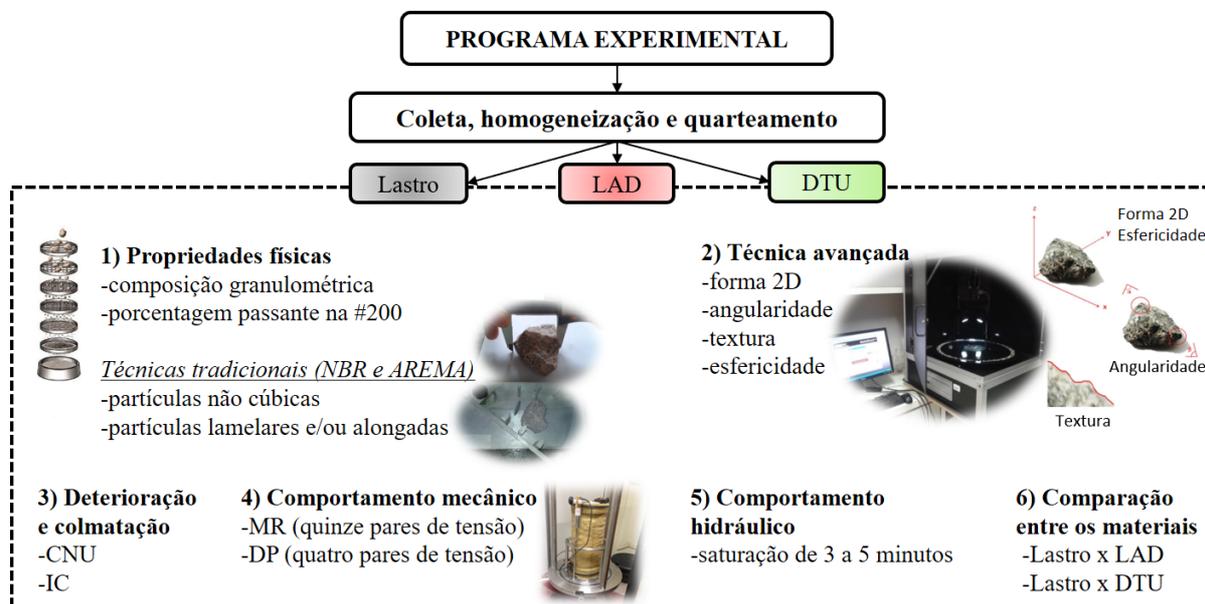


Figura 1. Programa experimental do estudo

3.2. Métodos de ensaio

Os materiais foram analisados quanto às propriedades físicas pelas normas ABNT NBR 5564 (2011) e AREMA (2013) através dos ensaios tradicionais (paquímetro) para identificar o percentual de partículas não cúbicas e lamelares e/ ou alongadas. Quanto à granulometria,

os materiais foram caracterizados por peneiramento, sendo o material Lastro enquadrado na faixa N° 60 da norma AS 2758.7 (1996), por ser esta a faixa granulométrica usada pela pedreira fornecedora dos agregados.

Para caracterizar as propriedades de forma das partículas (técnica avançada por imagens) foram realizados três ensaios para cada material com uso do equipamento Aggregate Image Measurement System (AIMS), seguindo as especificações da AASHTO TP 81-12 (2016). Os agregados foram classificados seguindo a metodologia proposta por Al Rousan (2004). Pelo fato do AIMS analisar agregados com tamanho máximo de até 25,4 mm, as partículas retidas nas peneiras de 37,5, 50 e 63,5 mm não foram avaliadas. No entanto, as propriedades de forma dos agregados graúdos (4,75 a 25,4 mm) foram consideradas semelhantes para os demais agregados graúdos (37,5 a 63,5 mm) usados no lastro de ferrovia. Segundo Bessa *et al.* (2013), os agregados retidos na mesma peneira com diferentes origens mineralógicas (granito, gnaiss e fonólito) possuem propriedades de forma médias semelhantes, se os mesmos processos de britagem forem utilizados. Especificamente para a lamelaridade, há consistência para diferentes tamanhos de partículas, desde que a origem e o tamanho nominal máximo dos agregados coincidam (Diógenes *et al.*, 2017).

Para a caracterização mecânica dos materiais foram realizados ensaios de MR e DP com aplicação de carga repetida para amostras com granulometria decalada e moldadas com auxílio de vácuo nas dimensões 150 × 300 mm. Os materiais foram preparados a partir das recomendações da especificação AASTHO T292 (1991), sendo 90% dos agregados com diâmetro máximo pelo menos seis vezes menor do que o diâmetro do CP e todos os agregados com diâmetro máximo inferior a 1/4 do diâmetro do CP (150 mm). O mesmo percentual retido nas peneiras da granulometria real foi mantido para as peneiras de menor tamanho para a formação da curva granulométrica decalada (partículas retidas nas peneiras 19,1; 12,5; 9,5; 6,3; e 4,75 mm).

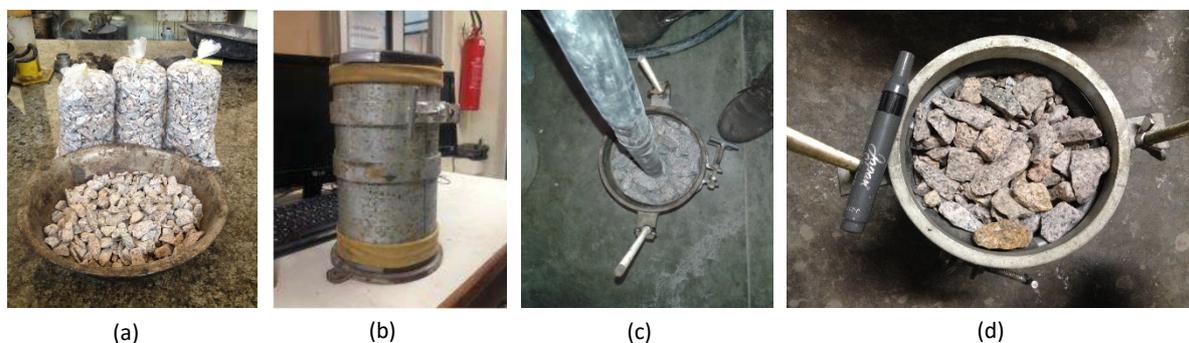


Figura 2. Moldagem da amostra de lastro escala reduzida: (a) agregados; (b) molde revestido de membranas de látex e de pneu; (c) vibração do material e (d) moldagem final do CP

As amostras retidas em cada peneira foram inseridas em um molde cilíndrico tripartido, divididas em quatro camadas (Figura 2a). O molde foi revestido com uma membrana de látex convencional utilizada na realização de ensaios triaxiais em solos (uma membrana convencional de sacrifício é colocada após a membrana de látex em estado inicial de uso) e por último uma membrana confeccionada de material de câmara de pneu (Figura 2b), com o intuito de evitar furos na membrana convencional em estado inicial de uso. Cada camada foi submetida a vinte vibrações no total de 40s (Merheb, 2014), com o uso do vibrador de concreto com mangote (Figura 2c). A vibração visa atingir um estado de compactação e um rearranjo dos agregados (Selig e Waters, 1994; Indraratna *et al.*, 2011). Após a vibração da última camada,

realizou-se o nivelamento manual dos agregados. Vale lembrar que na fase de vibração da nova camada de material no molde, a altura de material inserido foi mantida, de modo a não alterar a densificação da camada inferior. Todos os procedimentos foram igualmente replicados para todos os materiais. A Figura 2d mostra o CP após a moldagem final.

O CP moldado (Figura 3a) foi levado ao equipamento triaxial e a pedra porosa e o *top cap* foram inseridos, ainda no molde tripartido, sendo aplicada a fita adesiva do tipo *silver tape*, na base e no topo, na membrana de borracha de pneu (Figura 3b). Com o auxílio de uma bomba de vácuo (pressão de aproximadamente $0,75 \text{ kgf/cm}^2$), pode-se retirar o molde tripartido e revestir as extremidades do CP com as membranas de látex, sem que houvesse tombamento do material. Por fim, colocaram-se dois anéis de vedação de borracha, tanto na base como no topo, para evitar a entrada de ar entre a membrana e o CP (Figura 3c), e ajustaram-se os monitores de deslocamento do tipo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) (Figura 3d) para o fechamento da câmara do equipamento e execução do ensaio.

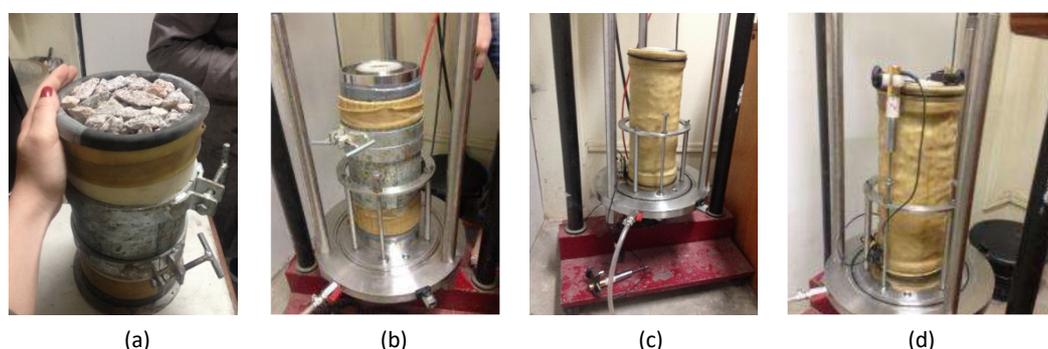


Figura 3. Preparação da amostra de lastro em escala reduzida para a execução do ensaio triaxial cíclico: (a) CP moldado; (b) vedação com a membrana de pneu; (c) aplicação da pressão de confinamento por vácuo e (d) amostra finalizada com fixação dos LVDTs

A Tabela 1 apresenta os carregamentos aplicados para a obtenção do MR e da DP dos materiais com frequência de 1 Hz: Lastro, LAD e DTU (ensaios realizados em triplicata para o primeiro material e em duplicata para os demais). Merheb (2014) realizou ensaios triaxiais em escala real e reduzida na frequência de 9 Hz, que caracteriza um trem de carga típico em baixa velocidade (60 a 70 km/h). Os resultados mostraram maior rigidez e menor deformação nos ensaios em escala reduzida, quando comparados aos ensaios em escala real. Para essa pesquisa, para fins de comparações entre materiais, a frequência de 1 Hz foi utilizada por limitação da infraestrutura laboratorial, apesar desta não representar a velocidade (35 km/h) da ferrovia utilizada como estudo de caso.

Tabela 1 – Combinações de tensões aplicadas durante os ensaios de carga repetida

Materiais	Tipo de ensaio	σ_3 (kPa)	σ_d/σ_3	Tipo de ensaio	σ_3 (kPa)	σ_1/σ_3	Nº de ciclos	Nº de ciclos (total)	Ton/eixo
Lastro	Ensaio triaxial*	80	0,5	Ensaio triaxial**	65	3	20.000		15,0
LAD	(5 séries-3 pares)	60	1,2	(4 séries)		4	20.000	290.000	22,0
		40	1,8			5	125.000		27,5
DTU		20				6	125.000		32,2
		10							

*Merheb (2014) – tensões variáveis (MR)

**Indraratna *et al.* (2010) – (MR/DP)

Para avaliar o comportamento hidráulico dos materiais passantes pelos ensaios de carga repetida foram realizados os ensaios de condutividade hidráulica baseados na determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante (NBR 13292, 1995). Os materiais foram preparados e ensaiados no permeâmetro com 15,2 cm de diâmetro e 18,0 cm de altura, respeitando o fato de o diâmetro interno mínimo ser 8 vezes a dimensão máxima dos grãos maiores (19,1 mm). Assim, mantiveram-se as mesmas frações utilizadas no ensaio mecânico, além das frações de materiais finos (colmatantes) gerados devido aos ciclos de carregamentos. Para a execução do ensaio de permeabilidade foram moldados CPs com aproximadamente 4 kg de material (Ferreira *et al.*, 2015; Paiva *et al.*, 2015), de forma proporcional à curva granulométrica gerada após o ensaio mecânico. Para calcular o coeficiente de condutividade (k) foi utilizada a Equação 1, em que: V é o volume (ml) estabilizado medido no ensaio a carga constante; L é a altura (cm) do material no permeâmetro; A é a área da seção transversal (cm²) do permeâmetro; h é a carga hidráulica (fixada em 96 cm) e t é o tempo (s) de duração da leitura de volume obtido. Vale ressaltar que quatro medidas de altura do material e volume foram obtidas e, assim, a média foi utilizada para o cálculo de k (cm/s).

$$k = \frac{V \times L}{A \times h \times t} \quad (1)$$

Os ensaios de permeabilidade foram realizados, inicialmente, com a parte inferior do permeâmetro envolvido por vaselina industrial para evitar o vazamento de água. Posteriormente, o material colmatante representante de cada material analisado foi inserido. Como terceiro passo, o material de lastro ferroviário em análise foi lançado. Por fim, realizou-se a vedação da tampa do permeâmetro com vaselina industrial. Os resultados de condutividade hidráulica foram verificados após se evidenciar a saturação das amostras diante da estabilização da leitura do volume d'água percolada na amostra em um determinado tempo (3 a 5 min).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização física

A Figura 4 mostra as curvas granulométricas dos materiais de lastro ferroviário, assim como a faixa granulométrica utilizada (Australiana N° 60) para enquadramento do material de origem (Lastro). Observa-se que o material Lastro se enquadra na faixa com CNU de 1,9. Para o material LAD, parte da curva se encontra fora da faixa com CNU de 2,1. O mesmo apresenta curva mais fina em relação ao material Lastro, sendo esta diferença explicada pela quebra de partículas em decorrência das fases de lançamento do material da esteira da pedreira aos vagões, dos vagões à via e pelo processo inicial de socaria. Com relação ao material DTU, a curva apresenta CNU de 1,9 com característica mais grossa em relação aos demais materiais. Justifica-se a característica mais grossa em relação ao material de Lastro pela renovação do material trazido do ombro da via permanente (região não solicitada de carregamento) para as regiões dos trilhos diante das fases de manutenção. No geral, diante do critério estabelecido por Indraratna *et al.* (2011), os três materiais são propícios à quebra e insatisfatórios com relação à drenagem, visto que não apresentam CNU entre 2,2 e 2,6.

Para o IC, todos os materiais foram considerados limpos (<1) (Selig e Waters, 1994). O esperado era um material DTU com maior percentual de finos, em decorrências dos processos construtivos e de manutenção da via e devido ao tráfego. No entanto, observou-se o contrário, sendo o material DTU com menor IC (0,2% em comparação a 0,8% para os materiais Lastro e LAD). A Tabela 2 apresenta os resultados de propriedades físicas dos três materiais em estudo. Com

relação aos aspectos físicos avaliados através de ensaios tradicionais, os resultados mostraram que os materiais são aceitáveis quanto às especificações ABNT NBR 5564 (2011), no entanto, para a especificação AREMA (2013), os três materiais apresentaram percentual de partículas lamelares e/ ou alongadas superiores a 5%.

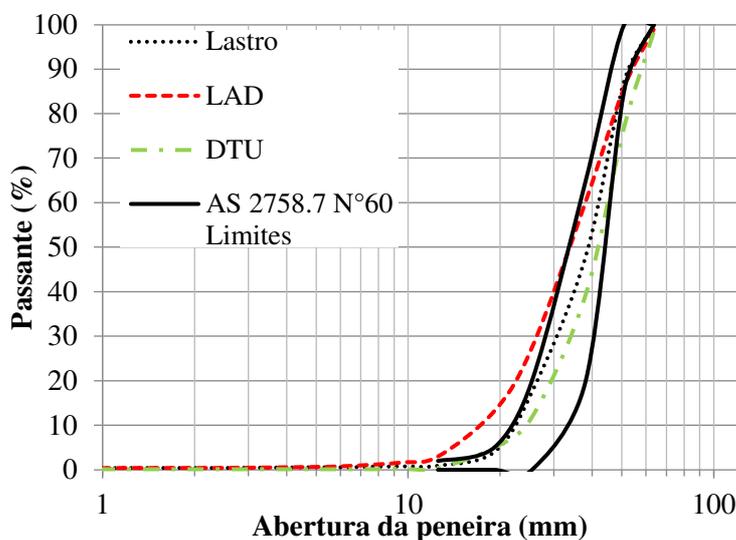


Figura 4. Curvas granulométricas dos materiais

Tabela 2 – Propriedades físicas dos agregados que compõem o lastro ferroviário deste estudo

Ensaio	ABNT	AREMA (granito)	Lastro	LAD	DTU
Forma média das partículas	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica
Partículas não cúbicas (máximo) (%)	15,0	-	[14,6; 18,8]*	[8,8; 14,4]*	[11,6; 14,4]*
Partículas lamelares e/ ou alongadas (máximo) (%)	-	5,0	[15,4; 22,4]*	[9,9; 14,9]*	[5,7; 10,3]*
Porcentagem passante na peneira nº 200 (máxima) (%)	-	1,0	0,30	0,16	0,06

4.2. Propriedades de forma com aplicação de Processamento Digital de Imagens (PDI)

A partir do PDI com o uso do AIMS pôde-se obter as propriedades de forma dos materiais. Os materiais LAD e DTU apresentaram classificações similares, sendo forma 2D semicircular, esfericidade baixa, angularidade subarredondada e textura macia, enquanto que o material Lastro apresentou forma 2D semialongada, esfericidade baixa, angularidade subarredondada e textura com baixa rugosidade. Conforme Huang (2010), as partículas com características mais angulares e rugosas possuem resistências superiores em relação às partículas com características macias e arredondadas, o que pode contribuir para melhorar a trabalhabilidade e a estabilidade da camada de lastro. Dessa forma, as características do material Lastro apresentaram propriedades de forma insatisfatórias, propício a ser frágil e de reduzido intertravamento, o que pode impactar a estabilidade e a resistência da via permanente.

4.3. Caracterização mecânica

Os ensaios mecânicos foram realizados com curvas granulométricas escalonadas. A influência da técnica de vibração no ensaio mecânico foi investigada, concluindo que a vibração com o uso do mangote não causou modificação na curva granulométrica do material levado ao ensaio

triaxial com 290.000 ciclos de carregamento. Ressalta-se que os resultados mecânicos estão condicionados à densificação inicial das amostras ensaiadas, já que a mesma não pode ser verificada.

Para análise do comportamento dos materiais, o modelo composto foi aplicado relacionando as tensões desvio (σ_d) e confinante (σ_3) (Merheb, 2014). Os materiais Lastro e LAD apresentaram valores de MR, para a maior parte dos pares de tensão, entre 100 e 200 MPa com coeficiente de correlação (R^2), respectivamente, de 80% e 90%. Para o material DTU, a variação encontrada para o MR foi de 250 a 800 MPa, sendo o R^2 de 80%.

Seguindo Indraratna *et al.* (2010) quanto às combinações de tensões (Tabela 1), a mudança do MR (Figuras 5a e 5c) e a evolução da deformação axial (Figuras 5b e 5d), ao longo do carregamento, podem ser vistas na Figura 5. Nos primeiros ciclos de carregamento, a rigidez dos materiais é baixa devido à acomodação dos agregados, que, conseqüentemente, remete a maiores deformações axiais. Após a ocorrência do rearranjo das partículas, a rigidez aumenta e atinge a estabilização (SEVI, 2008; MERHEB, 2014). Observa-se, também, que após a aplicação dos ciclos iniciais, todos os materiais apresentam estabilização da deformação plástica. À medida que o nível de tensão (nova combinação) aumenta, a deformação plástica continua sendo acumulada até alcançar um ponto de equilíbrio ou atingir a ruptura (*shakedown*).

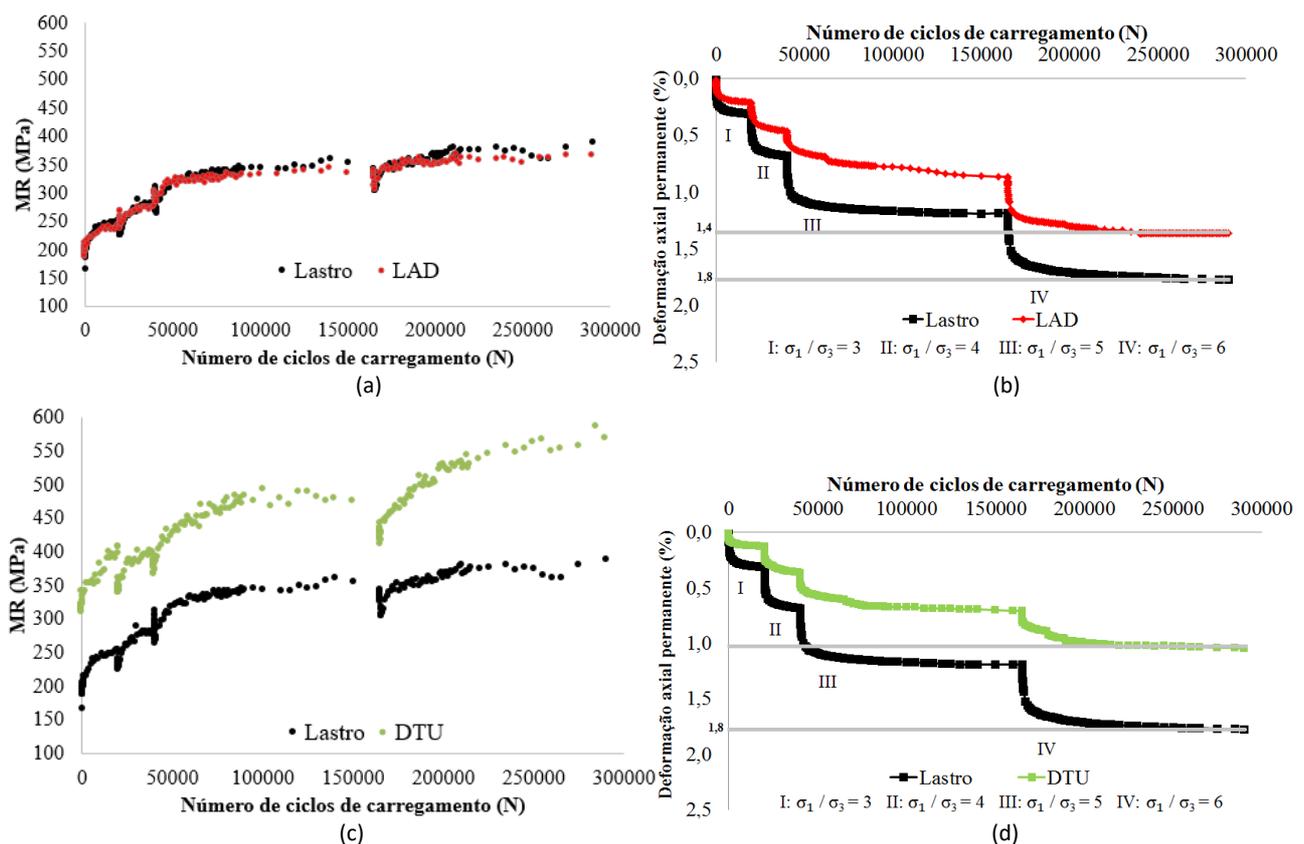


Figura 5. Resultados dos ensaios cíclicos para: a) Lastro-LAD: MR; b) Lastro-LAD: deformação axial permanente; c) Lastro-DTU: MR e d) Lastro-DTU: deformação axial permanente

Os valores dos ensaios triaxiais para o material Lastro são similares aos valores encontrados no estudo de Merheb (2014), baseado no estudo de Indraratna *et al.* (2010). No tocante, principalmente, à deformação axial permanente final o valor é igual a 1,8%. Vale ressaltar que,

assim como nesta pesquisa, o material estudado pelo citado autor era granítico, ensaiado em CP 15 × 30 cm (escala reduzida), com curva granulométrica enquadrada na faixa AREMA N° 3 que pode ser enquadrada dentro da faixa Australiana N° 60 e, por fim, este foi solicitado com os mesmos ciclos de carregamentos. Ressalta-se, porém, a diferença de frequência: enquanto Me-rheb (2014) aplicou 9 Hz de ciclos de carregamentos, a presente pesquisa aplicou 1 Hz. Deste modo, é possível observar que a frequência não trouxe impacto no valor dos resultados mecânicos quanto à deformação permanente.

Comparando os materiais Lastro e LAD, nota-se que as propriedades de forma, bem como a granulometria, podem ser um fator que proporcionou menor deformação axial permanente final (1,4) no LAD. Tal comportamento remete ao fato de que, no campo, os agregados do material Lastro (forma 2D semialongada) passam por quebra se tornando agregados semicirculares e com textura superficial macia, ou seja, contribuindo para um melhor empacotamento da matriz granular.

Comparando os materiais Lastro e DTU, as propriedades de forma e granulometria também podem ser o fator explicativo para a menor deformação do DTU em relação ao material Lastro. A deformação axial permanente final no DTU (1,0) comparada à deformação axial permanente final ocorrida no material Lastro (1,7) pode ser explicada a partir das fases de uso da via que ocorreram nos cinco anos de construção na via permanente (impactos de construção e operação), causando modificações nas propriedades de forma dos agregados (forma 2D de semialongada para semicircular e textura superficial de baixa rugosidade para macia). Por outro lado, a granulometria no DTU se mostrou mais grossa em relação ao Lastro, o que contribui para o intertravamento entre agregados e proporciona mais rigidez a matriz granular da camada.

4.4. Caracterização hidráulica

Os valores médios de k para os materiais Lastro, LAD e DTU foram respectivamente: 0,01296; 0,01247 e 0,01251 cm/s. A Figura 6 apresenta as curvas granulométricas dos materiais antes do ensaio mecânico e dos materiais preparados para o ensaio hidráulico (após a realização dos ensaios mecânicos), uma leve modificação na curva do DTU e uma maior alteração na curva do LAD e do Lastro podem ser observadas. Com relação aos parâmetros das curvas granulométricas para o ensaio hidráulico, os materiais Lastro, LAD e DTU apresentaram os seguintes valores, respectivamente: 1,7; 1,9 e 1,5 para CNU e 1,6; 4,2 e 1,0 para IC, sendo todos classificados como moderadamente colmatados quanto ao IC.

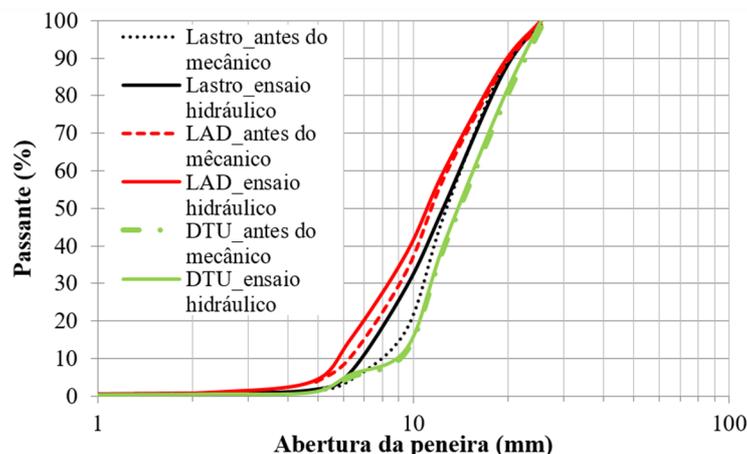


Figura 6. Curvas granulométricas escalonadas dos materiais antes e após o ensaio mecânico

O material LAD comparado ao Lastro apresenta k inferior (3,8%). Este valor pode ser justificado pelo preenchimento dos vazios por material fino colmatante (IC = 4,2). Acredita-se que o material colmatante (diferença de 2,6%) foi gerado pela modificação das propriedades de forma das partículas/granulometria devido aos ciclos de carregamento do ensaio mecânico (quebra, atrito, contato partícula-partícula).

O material DTU comparado ao Lastro também apresenta k inferior (3,6%), embora exponha valor de IC igual a 1,0, enquanto o Lastro exhibe IC igual a 1,6. A redução de permeabilidade no material DTU é justificada pelo intertravamento da matriz granular de modo a reduzir os espaços vazios, fato este, já evidenciado, anteriormente, na análise de deformação axial permanente (granulometria e propriedades de forma). Os processos de construção da via permanente e execução, mesmo em baixo tráfego, proporcionaram modificações nas propriedades de forma das partículas, tornando-as mais próximas a esferas e assim, gerando uma matriz granular mais densa.

Para melhor análise dos resultados, usaram-se ferramentas estatísticas para investigar a igualdade ou diferença entre os resultados de k e entre as curvas granulométricas. Com o intuito de verificar a existência de igualdade entre os valores médios de k , foi realizado o teste paramétrico de análise de variâncias ANOVA. Os resultados mostraram que, com 95% de confiança, os valores médios de k são significativamente iguais considerando a não rejeição da hipótese nula. Para as curvas granulométricas do ensaio hidráulico, o teste estatístico Qui-Quadrado foi realizado para identificar a existência ou não de igualdade entre as distribuições das curvas. Com isso, pode-se concluir, com 95% de confiança, que as distribuições das curvas são significativamente diferentes diante da rejeição da hipótese nula (igualdade entre as distribuições das curvas), quando comparados Lastro com LAD e Lastro com DTU.

Ressalta-se que a correlação entre os valores de permeabilidade é análoga ao que é observado para o estudo do comportamento mecânico em escala reduzida. A caracterização em escala real impacta em termos de valor absoluto de k , pois ocorre mudança no volume de vazios diante da alteração do tamanho das partículas (tamanho real *versus* tamanho escalonado) e modificação na altura e seção transversal do permeâmetro. Para Indraratna *et al.* (2010), um lastro limpo, avaliado em tamanho real, apresenta k de aproximadamente $3,0 \times 10^1$ cm/s.

5. CONCLUSÕES

Quanto aos critérios laboratoriais, a técnica de decalagem pode ser considerada eficiente para compreender o comportamento mecânico da camada lastrada, mesmo reportando valores inferiores em relação àqueles gerados por materiais ensaiados em escala real. Com isso, minimizam-se os entraves laboratoriais, conforme exposto por Merheb (2014).

No geral, relacionando deformação axial permanente e k , observou-se que o material que apresentou maior deformação axial permanente final (Lastro), não gerou uma matriz granular compactada a ponto de provocar uma redução na condutividade hidráulica. Com relação ao CNU, conforme mencionado por Indraratna *et al.* (2011), o material Lastro apresentou aspectos indesejáveis para uso em camada ferroviária, bem como os materiais LAD e DTU. No tocante às propriedades de forma, ressaltam-se propriedades inferiores para uso inicial na via, sendo as partículas rugosas e angulares mais desejáveis para aplicação na via conforme citado por Huang (2010). Em suma, os resultados revelaram que os materiais apresentaram características estatisticamente semelhantes em relação à permeabilidade e relativamente diferentes quanto

à deformação. Fato este, que pode ser justificado pela não solicitação de carregamentos intensos, estágio de serviço efetivo (transporte efetivo de carga de 32,5 ton/eixo), e sim, apenas para a construção da via totalizando aproximadamente 3 MTBT nos cinco anos de execução avaliados no presente estudo.

O material DTU (IC igual a 1,0) apresentou granulometria diferente do esperado. Acredita-se que os carregamentos e as fases corretivas da via causaram degradações nos agregados, o que alterou as propriedades de forma dos mesmos. Por outro lado, parte dos materiais localizados no ombro da via foram trazidos a grade, diante da realização das manutenções, o que proporcionou a renovação das partículas. Assim, a curva granulométrica apresentou característica mais grossa em relação ao Lastro, bem como melhor intertravamento da matriz granular.

Ao comparar os três materiais, verifica-se melhor comportamento mecânico, maior rigidez e menor deformação, para o material DTU. Assim, as características do material DTU seriam as mais desejáveis para aplicação na via permanente em fase inicial (granulometria mais grossa e partículas com forma 2D mais cúbica). Dessa forma, a via apresentaria melhor empacotamento da matriz granular de lastro e proporcionaria redução de desgastes e falhas dos elementos constituintes, bem como, no número de intervenções de manutenção. Destaca-se, porém, que, o tráfego existente até o momento da realização desse estudo foi referente somente aquele ocorrido devido ao próprio processo construtivo da via.

Este estudo avaliou agregados graníticos em diferentes estágios de aplicação na via permanente, portanto as tendências e os resultados apresentados aqui não podem ser generalizados para outros tipos de agregados. Recomenda-se reproduzir o estudo para outros tipos de agregados, e também realizar a análise em escala real para melhor simular as condições de campo. Além disso, a aplicação adequada do número de ciclos e da quantidade de carga transportada, em uma dada ferrovia, deve ser melhor observada, a fim de colaborar para a previsão de ciclos de manutenção da via.

AGRADECIMENTOS

À empresa Transnordestina Logística S/A e à equipe da via permanente Nova Transnordestina pelo fornecimento dos materiais investigados na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AASHTO T 292 (1991) Interim method of test for resilient modulus of subgrade soils and untreated base/subbase materials, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- AASHTO (2016) Standard method of test for determining aggregate shape properties by means of digital image analysis, Washington, DC, TP81-10.
- ABNT NBR 13292 (1995) Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT NBR 5564 (2011) Via Férrea – Lastro-Padrão, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- Al-Rousan, T. M. (2004) Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system, Tese de Doutorado, Texas A&M University, College Station, Texas, EUA.
- AREMA (2013) Manual for railway engineering. Lanham: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, AREMA.
- AS 2758.7 (1996) Aggregates and rock for engineering purposes, Part 7: Railway ballast, Australian Standard, Sydney, Austrália.
- Bessa, I. S.; V. T. F. Castelo Branco; J. B. Soares (2013) Análise da influência do tamanho nas propriedades de forma de agregados analisados através do processamento digital de imagens, In: 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Santos, SP.
- Diógenes, D. F. (2016) Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do Processamento Digital de Imagens, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Diógenes, D. F.; R. S. Maia; V. T. F. Castelo Branco (2017) Evaluation of the ballast aggregates shape properties using digital image processing techniques. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields –Loizos et al. (Eds). Taylor & Francis Group, London. ISBN 978-1-138-29595-7

- Feldman, F.; D. Nissen (2002) Alternative Testing Method for the Measurement of Ballast Fouling: Percentage Void Contamination. In: Conference on Railway Engineering, RTSA, Wollongong, p. 101-109.
- Ferreira, W. L. G.; S. L. Costa; V. T. F. Castelo Branco; R. S. Motta (2015) Análise experimental e numérica da capacidade drenante de diferentes lastros ferroviários, In: XXIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Ouro Preto, MG.
- Huang, H. (2010) Discrete element modeling of railroad ballast using imaging based aggregate morphology characterization, Tese de Doutorado, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL, EUA.
- Indraratna, B.; D. Ionescu; H. D. Christie (1998) Shear behavior of railway ballast based on large-scale triaxial tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 124, n. 5, p. 439-449. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:5(439)
- Indraratna, B.; P. K. Thakur; J. S. Vinod (2010) Experimental and numerical study of railway ballast behavior under cyclic loading, *International Journal of Geomechanics*, v. 10, n. 4, p. 136-144. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000055
- Indraratna, B.; W. Salim; C. Rujikiatkamjorn (2011) *Advanced rail geotechnology ballasted track*, Taylor & Francis Group, London, UK.
- Johnson, K. L. (1986) Plastic flow, residual stresses, and shakedown in rolling contact, In: 2nd International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, University of Rhode Island, Kingston, University of Waterloo Press, Ontario, Canadá.
- Klincevicus, M. G. Y. (2011) Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Lowe, J. (1964) Shear strength of course embankment dam materials. In: Huitieme Congresso des Grands Barrages, Èdimbourg, p. 745-761.
- Merheb, A. H. M. (2014) Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Merheb, A.; R. Motta; L. B. Bernucci; E. Moura; R. Costa; T. Vieira; F. Sgavioli (2013) Equipamento triaxial cíclico de grande escala para análise mecânica de lastro ferroviário. In: *Transportes*, v. 22, n. 3, p. 53-63. DOI: 10.14295/transportes.v22i3.804
- Paim da Silva, F. H. (2018) Estudo do comportamento de um lastro ferroviário sob carga repetida em modelo físico de verdadeira grandeza, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- Paiva, C.; M. Ferreira; A. Ferreira (2014) Ballast drainage in brazilian railway infrastructures, *Construction and Building Materials*, v. 92, p. 58-63. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.006
- Selig, E. T.; J. M. Waters (1994) *Track geotechnology and substructure management*, Thomas Telford Publications.
- Sevi, A. S. (2008) Physical modelling of railroad ballast using parallel gradation scaling technique within the cyclical triaxial framework, Tese de Doutorado, Missouri University of Science and Technology, p.137.
- Schmidt, S.; S. Shah; M. Moaveni; B. J. Landry; E. Tutumluer; C. Basye; D. Li (2017) Railway ballast permeability and cleaning considerations, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2607, p. 24-32. DOI: 10.3141/2607-05
- Tennakoon, N.; B. Indraratna; C. Rujikiatkamjorn; S. Nimbalkar; T. Neville (2012) The role of ballast fouling characteristics on the drainage capacity of rail substructure, *Geotechnical Testing Journal*, v. 35, n. 4, p. 629-640. DOI: 10.1520/GTJ104107
- Vizcarra, G. O. C.; S. Nimbalkar; B. Indraratna; M. D. T. Casagrande (2014) Efeito da granulometria na deformação e quebra de lastro ferroviário, In: COBRASEG, XVII Brazilian Congress of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, p. 1-6.
- Vizcarra, G. O. C. (2015) Efeito da granulometria no comportamento mecânico de lastro ferroviário, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.