

# COMPORTAMENTO DE DIFERENTES CURVAS GRANULOMÉTRICAS DE LASTRO FERROVIÁRIO EM ENSAIOS TRIAXIAIS DE ESCALA REDUZIDA

**André Fardin Rosa**

**Laura Maria Goretti da Motta**

**Francisco Thiago Sacramento Aragão**

Programa de Engenharia Civil, COPPE

Universidade Federal do Rio de Janeiro

## RESUMO

A granulometria do material de lastro tem influência direta no seu comportamento quando submetido ao carregamento gerado pela passagem de trens, sendo fator determinante na vida útil do pavimento ferroviário. No entanto, a maioria das especificações granulométricas para lastro fornecem limites com critérios pouco claros, abrangendo materiais com comportamentos distintos. Visando estes aspectos, o presente trabalho analisa os resultados de deformação permanente, módulo de resiliência e quebra de partículas de nove curvas granulométricas enquadradas nos limites da AREMA 24 transladados em ensaios triaxiais de escala reduzida. Os resultados de comportamento mecânico do material foram utilizados em correlações com dois parâmetros convencionais e três adicionais propostos, todos obtidos a partir das curvas granulométricas. As regressões múltiplas com as três variáveis propostas indicaram que, para os ensaios realizados, estas apresentaram correlações mais fortes com o comportamento mecânico do que os dois parâmetros convencionais, especialmente para a resistência ao acúmulo de deformações permanentes.

## ABSTRACT

The particle size distribution (PSD) of the ballast layer has huge influence on its behavior when subjected to the load generated by trains, being a key factor in the lifespan of the railway pavement. However, most specifications provide limits with unclear criteria, covering materials with different behaviors. Aiming at these aspects, the present work analyzes the results of permanent deformation, resilience modulus and particle breakage of nine PSD within the limits of AREMA 24 translated in small scale triaxial tests. The results related to the mechanical behavior of the material were used in correlations with two conventional parameters and three additional proposed here, all obtained from the particle size distributions. The multiple regressions with the three proposed variables indicated that, for the tests performed, they showed stronger correlations with the mechanical behavior than the two conventional parameters, especially for the resistance to the accumulation of permanent strain.

## 1. INTRODUÇÃO

Durante a vida útil de um pavimento ferroviário as ações do tráfego tendem a alterar a geometria da via, modificando por sua vez os esforços solicitantes na passagem do material rodante, acelerando a deterioração da via e resultando na necessidade de manutenção. Os ciclos de manutenção da via férrea costumam ser realizados em ações de socaria na camada de lastro, que restauram a geometria da via férrea, mas danificam o material, diminuindo a permeabilidade da camada e a sua resistência lateral.

Embora o lastro não seja o componente mais caro das ferrovias, a sua deterioração faz com que outros elementos também tenham a sua vida útil reduzida. Além disso, a frequente necessidade de manutenção faz com que as linhas férreas sejam temporariamente desativadas, fazendo com que, além de altos gastos com manutenção, a eficiência do transporte também seja comprometida. A notável importância do lastro tem levado os pesquisadores a estudar o seu comportamento e a influência dos seus parâmetros nas respostas mecânicas do material, e um destes parâmetros é a granulometria.

Os estudos para melhorar as especificações do material para lastro ferroviário têm como limitação o tamanho máximo das partículas de até 75 mm, o que faz com que sejam necessários equipamentos com grandes dimensões para avaliar o material em verdadeira grandeza. Para a

obtenção de parâmetros de deformabilidade, uma alternativa aos equipamentos de grandes dimensões é a utilização de granulometrias reduzidas em ensaios triaxiais de tamanho convencional existentes nos laboratórios preparados para a área rodoviária. Apesar das críticas principalmente relacionadas à resistência de partículas em diferentes escalas, os ensaios triaxiais em escala reduzida têm se mostrado ferramenta importante e útil na estimativa do comportamento do material de lastro, sendo utilizado principalmente por sua facilidade e rapidez na simulação de diferentes cenários.

O presente trabalho tem como objetivo discutir a variação de comportamento obtida para curvas granulométricas que se enquadram na faixa AREMA 24, bem como avaliar critérios e parâmetros encontrados na literatura referentes ao tema. São utilizados como base para discussão alguns ensaios triaxiais de escala reduzida realizados com diferentes granulometrias.

## **2. PRESSUPOSTOS TEÓRICOS**

As especificações relacionadas à granulometria do lastro ferroviário variam muito entre países e normativas. De modo geral, essas especificações são apresentadas em faixas com limite superior e inferior, classificando o lastro em categorias consideradas aceitáveis ou não para a utilização. O tamanho máximo das partículas para um material enquadrado nessas faixas varia entre 75 mm e 50 mm, dependendo da categoria na qual ele se enquadra.

Segundo Indraratna et al. (2011), de forma geral, as faixas delimitam curvas granulométricas com coeficiente de não uniformidade ( $C_{nu}$ ) entre 1,5 e 3,0. Apesar de muitas vezes não serem claros os motivos das delimitações em uma faixa com limite superior e inferior tão definidos, no geral têm-se como critério que a camada de lastro deve ter permeabilidade suficiente para funcionar como camada drenante durante toda a sua vida útil, além de resistir bem e transmitir os esforços gerados na passagem de trens. De acordo com Raymond (1985), a curva granulométrica utilizada na prática tem a sua produção nas pedreiras definida por apenas duas ou três peneiras.

A busca pela compreensão dos fatores que influenciam no comportamento do lastro e pelo equilíbrio entre as funções da camada fez com que diversos equipamentos fossem construídos para avaliar o seu material em condições mais próximas das de campo. Na universidade de Wollongong, Austrália, foram realizados estudos relacionados à influência da granulometria (Indraratna e Salim, 2003), frequência de carregamento (Thakur et al., 2013), tensão confinante (Lackenby et al., 2007 e Thakur et al., 2013) em um ensaio triaxial cilíndrico com dimensões 300 x 600 mm, além de estudos relacionados a granulometria e à degradação do lastro (Indraratna e Salim, 2003 e Vizcarra, 2015) em um equipamento triaxial prismoidal, que permite a aplicação de tensões confinantes distintas nas duas direções laterais do corpo de prova. Na universidade de Illinois, Estados Unidos, foi desenvolvida uma metodologia na tese de Huang (2010) combinando o uso de imagens digitais e o método dos elementos discretos para avaliar a utilização de agregados com propriedades diferentes quanto a sua resistência à deformação permanente e estabilidade lateral, sendo posteriormente utilizada para avaliar também diferentes granulometrias no trabalho de Bian et al. (2016). No Brasil, um ensaio triaxial cilíndrico com dimensões 400 x 800 mm foi desenvolvido no trabalho de Merheb (2014) para o estudo da influência da granulometria e nível de degradação no comportamento do lastro, na Escola Politécnica da USP, São Paulo. Na COPPE/UFRJ foi adaptado um modelo físico em verdadeira grandeza no trabalho de Silva (2018) para a avaliação do efeito de diferentes geossintéticos no comportamento do lastro, e este mesmo modelo físico será adaptado e utilizado em etapas posteriores ao presente trabalho.

A falta de padronização nos ensaios com relação ao equipamento utilizado e ao tipo e forma de carregamento aplicado dificultam a comparação entre diferentes autores. Além disso, estudos envolvendo variações granulométricas costumam ter número de cenários limitado pelas dificuldades na execução de ensaios em grandes dimensões, tornando difícil realizar experimentos suficientes para fornecer dados a serem utilizados na definição de critérios mais apurados (Sun et al., 2017). Como alternativa aos ensaios de grandes dimensões, têm-se os ensaios triaxiais de carga cíclica em escala reduzida em relação ao lastro, que podem ser realizados em equipamentos triaxiais cíclicos convencionais encontrados nos laboratórios de pavimentação.

De acordo com Merheb (2014), na comparação entre o uso de equipamentos triaxiais de grande e pequena escala, os desgastes das partículas são comparáveis. Este autor também observou que o módulo de resiliência obtido foi maior e a deformação específica axial menor para os ensaios em pequena escala, mas afirmou que os ensaios podem vir a ser comparáveis no futuro com o desenvolvimento de fatores de equivalência entre as escalas.

Para tornar possível a execução de ensaios triaxiais em escala reduzida, é necessário reduzir a granulometria para tamanhos adequados ao tamanho do corpo de prova. Dentre as técnicas utilizadas para redução de granulometria, a técnica da granulometria paralela (Lowe, 1964) é a mais utilizada na literatura. É importante destacar que a base teórica por trás da citada técnica considera que o comportamento de um material com granulometria reduzida será o mesmo da granulometria original apenas se todas as demais propriedades do material forem mantidas constantes. No entanto, sabe-se que mesmo que seja realizado um controle sobre a forma, angularidade e textura das partículas escolhidas, partículas com dimensões menores têm resistência à ruptura superior à de partículas maiores, pela influência que as fraturas internas da partícula têm em sua resistência. Esse ponto é destacado por Klinevicius (2011) e é importante de ser considerado em ensaios nos quais ocorre a quebra de partículas, como nos ensaios triaxiais cíclicos.

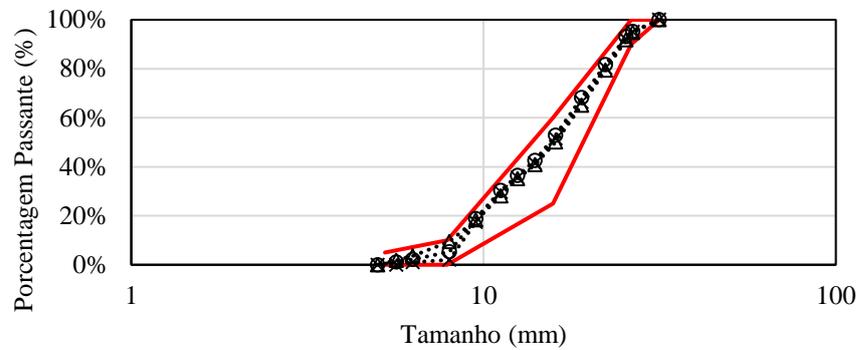
Apesar das limitações, acredita-se que o ensaio triaxial cíclico com granulometria paralela pode ser utilizado para a avaliação de diferentes granulometrias, de modo comparativo.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para estudar o efeito de variações na curva granulométrica nos resultados de deformação permanente, módulo de resiliência e quebra de partículas, foram ensaiados nove corpos de prova em ensaios triaxiais de escala reduzida, com um corpo de prova para cada curva granulométrica ensaiada. O material utilizado nas análises consiste em um gnaisse migmatítico com origem na região metropolitana do Rio de Janeiro.

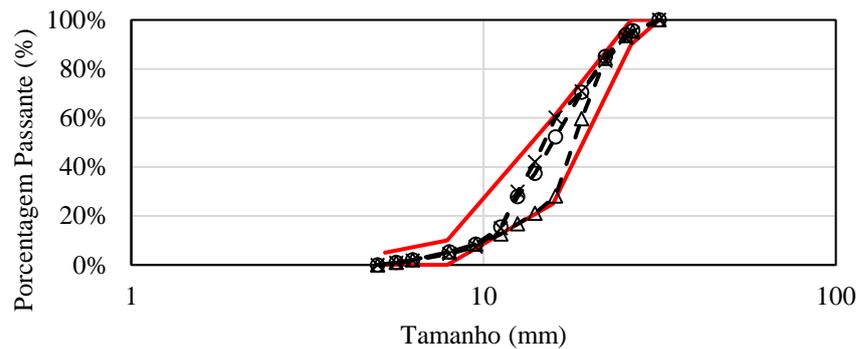
As nove curvas granulométricas ensaiadas foram pensadas e baseadas em um escalonamento dos limites da faixa AREMA 24. O escalonamento foi realizado para atender a relação entre tamanho máximo do agregado e diâmetro do corpo de prova de 1/5, indicada por Skoglund (2002). A maior peneira limitante da faixa (76,2 mm) foi reduzida ao tamanho de 31,5 mm, fornecendo um fator de escalonamento de  $\frac{31,5}{76,2}$ . A partir desse fator, foram utilizadas mais 13 peneiras com tamanho de malha reduzido gradualmente até chegar na menor peneira da faixa escalonada (5 mm), tornando possível o controle da curva granulométrica em diversos pontos. Para avaliar o efeito da granulometria, foram propostas três curvas apenas com diferenças nas peneiras menores, três com diferenças nas peneiras de tamanho intermediário e três nas maiores peneiras. Na execução dos corpos de prova foram separados inicialmente 9 kg de material em

4 frações com a granulometria desejada, para manter o corpo de prova mais homogêneo. Como não foi utilizado todo o material para a execução dos corpos de prova, a sobra foi peneirada e pesada para correção nas curvas granulométricas, resultando nas curvas ensaiadas apresentadas na Figura 1. É possível verificar que após a correção, a curva 8 ficou um pouco fora do limite inferior da AREMA 24 escalonada, mesmo assim ela foi ensaiada normalmente e considerada nas análises.



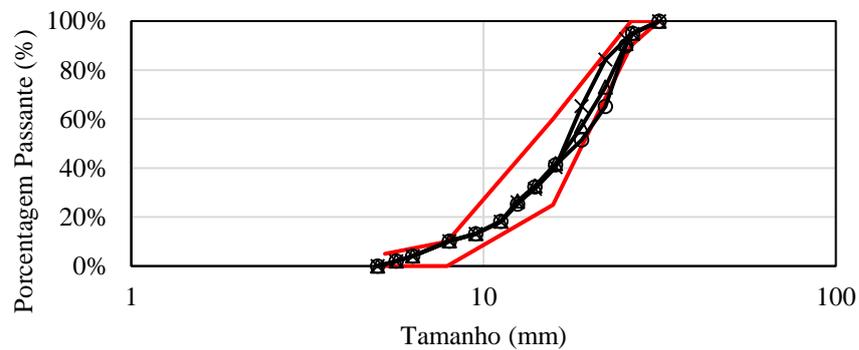
— AREMA 24    ···△··· Curva 1    ···○··· Curva 2    ···×··· Curva 3

(a)



— AREMA 24    -△- Curva 4    -○- Curva 5    -×- Curva 6

(b)



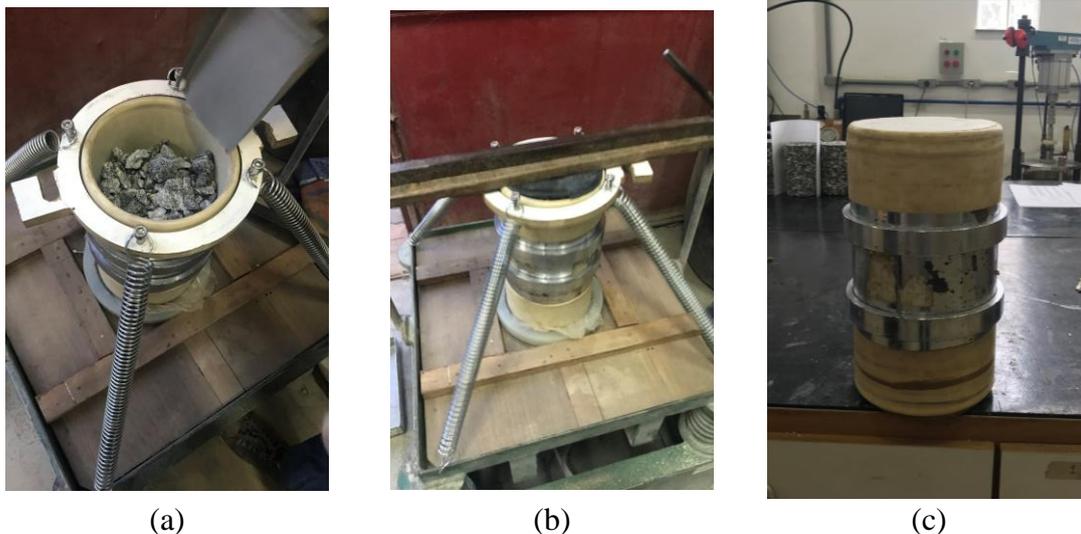
— AREMA 24    -△- Curva 7    -○- Curva 8    -×- Curva 9

(c)

**Figura 1:** Curvas granulométricas ensaiadas: Variações em peneiras de malha menor (a); Peneiras de malha intermediárias (b); Peneiras de malha maior (c).

O material utilizado para compor as curvas escalonadas foi obtido a partir da britagem em um britador de mandíbula de laboratório. A britagem foi adotada pela necessidade de se obter grande quantidade de material com um controle maior da granulometria. O material resultante foi separado e analisado no AIMS2, com 150 partículas em cada fração. Cuidou-se para não utilizar partículas muito lamelares, removendo aquelas com relação entre comprimento e largura maior que 5 e preparando os corpos de prova com amostras visivelmente homogêneas de acordo com os percentuais obtidos no AIMS2.

Para a execução dos corpos de prova, foi colocada uma membrana com 1,5 mm de espessura dentro de um molde tripartido com dimensões 15x30 cm, que foi posicionado sobre uma base. No interior do molde, foi inserida a primeira fração de material na granulometria controlada, seguida de compactação utilizando 1 minuto de vibração em um peneirador de laboratório. Passado este tempo, a vibração foi cessada e uma nova fração foi colocada no interior do cilindro, repetindo o processo. No término da última camada, após a execução de 4 camadas com 1 minuto de compactação cada, foram posicionadas partículas no topo do corpo de prova e uma borracha foi utilizada para a compactação final em mais dois ciclos de compactação com duração de 1 minuto cada, resultando em um total de 6 minutos de compactação. Por fim, o topo de cada corpo de prova foi regularizado, posicionando as partículas de modo que não ultrapassassem face superior do molde e executando uma camada de gesso no topo, alisando a superfície com o uso de espátula e um vidro com vaselina. As etapas de moldagem podem ser vistas na Figura 2.



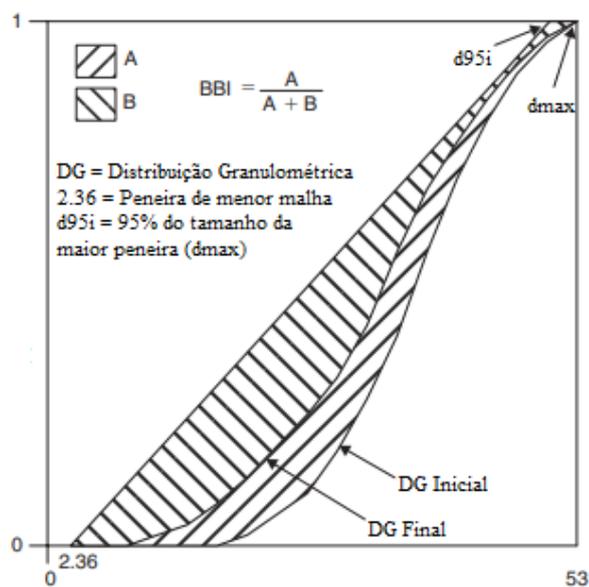
**Figura 2:** Etapas de moldagem do corpo de prova: Execução das camadas iniciais (a); Compactação da última camada (b); Regularização com gesso executada (c).

Após a execução de cada corpo de prova, esperou-se 24 horas para a secagem do gesso antes de ser realizado o ensaio. Nos ensaios, a frequência de carregamento utilizada foi 2 Hz e o carregamento foi realizado por um atuador pneumático, com duração de 0,1 s e repouso de 0,4 s, por ser o padrão de ensaios triaxiais cíclicos realizados no laboratório de pavimentação da COPPE/UFRJ, especialmente para a avaliação no contexto rodoviário. Estudos adicionais devem ser realizados para a determinação de parâmetros de ensaio apropriado para o contexto ferroviário.

Os ensaios foram realizados em duas etapas, a primeira consistindo em um ensaio de deformação permanente com tensão confinante ( $\sigma_c$ ) mantida em 40 kPa e tensão desvio ( $\sigma_d$ )

em 200 kPa, utilizando o padrão rodoviário de 150000 ciclos de carregamento. Após a etapa de deformação permanente e densificação da amostra, foi realizado ensaio de módulo de resiliência, variando os pares de tensões de acordo com a DNIT 134/2018, mas mantendo a frequência de 2 Hz. Com a variação do módulo de resiliência com os diferentes pares de tensões, foi feita uma regressão utilizando o modelo composto proposto por Macêdo (1996).

Para quantificar a quebra de partículas, foi utilizado o índice  $B_g$  (Marsal, 1967) e BBI (Indraratna et al., 2005), com dados obtidos do peneiramento após a execução do ensaio triaxial de cada granulometria. O índice  $B_g$  é calculado a partir das diferenças entre material retido em cada uma das peneiras antes e depois do ensaio pela soma das diferenças positivas obtidas. O BBI é calculado subtraindo as áreas geradas abaixo da distribuição granulométrica depois e antes do ensaio e dividindo pela subtração de uma área teórica máxima de quebra e a área abaixo da curva granulométrica antes do ensaio, como indicado na Figura 3.



**Figura 3:** Determinação do BBI adaptado de Indraratna et al. (2005)

Com os resultados de módulo de resiliência, quebra de partículas e deformação permanente após os 150000 golpes, foi analisada a influência do coeficiente de não uniformidade, índice de vazios e coeficiente de curvatura no comportamento da granulometria. Além dos parâmetros citados também foi proposta a utilização de pontos específicos na curva granulométrica para prever o comportamento do material, sendo eles o percentual passante na peneira de 8 mm, retido acumulado na peneira de 16 mm e retido acumulado na peneira de 22,2 mm, com essas peneiras representando 25%, 51% e 70% do tamanho máximo utilizado, respectivamente.

#### 4. RESULTADOS

O material britado foi analisado no AIMS2 nas bandejas de 4,75 mm, 9,5 mm, 12,5 mm, 19 mm e 25 mm, abrangendo praticamente todos os tamanhos de partículas utilizados nos ensaios, ficando de fora apenas algumas partículas retidas na peneira de 26,5 mm, que não foram processadas pelo equipamento. Os resultados indicaram que as partículas maiores apresentaram menor angularidade e maior rugosidade, com a angularidade aumentando e a rugosidade diminuindo com a diminuição do tamanho das partículas. Quanto à esfericidade, as partículas tiveram característica predominantemente alta, sem variações significativas relacionadas ao

tamanho das partículas. Como neste artigo pretendeu-se analisar corpos de prova formados por partículas com características semelhantes, sendo todas britadas em laboratório, não será dada ênfase aos resultados obtidos do AIMS2, sendo os resultados apenas utilizados para controle.

Em resumo, as propriedades e parâmetros de cada curva analisados neste trabalho são apresentadas na Tabela 1. Onde “ $C_{nu}$ ” é o coeficiente de não uniformidade, “ $C_c$ ” o coeficiente de curvatura, “ $e$ ” o índice de vazios, “ $p.\#8$ ” o percentual passante na peneira de 8 mm, “ $r.\#16$ ” o percentual retido acumulado na peneira de 16 mm, “ $r.\#22,2$ ” o percentual retido acumulado na peneira de 22,2 mm, “ $\epsilon_p$ ” a deformação permanente específica ao final do ensaio, “MR” o módulo de resiliência, “ $B_g$ ” o índice de quebra de Marsal (1967) e “BBI” o índice de quantificação de quebra de Indraratna et al. (2005).

**Tabela 1:** Resumo de parâmetros das curvas granulométricas analisadas

Curva	$C_{nu}$	$C_c$	$e$ (%)	$p.\#8$	$r.\#16$	$r.\#22,2$	$\epsilon_p$ (%)	MR (MPa)	$B_g$ (%)	BBI (%)
1	2,2	0,92	0,66	0,094	0,499	0,205	4,23	266	0,093	0,123
2	2	0,84	0,72	0,053	0,471	0,183	3,25	211	0,068	0,774
3	2	0,82	0,69	0,020	0,484	0,197	2,16	229	0,093	0,353
4	1,9	1,35	0,70	0,053	0,718	0,157	3,80	264	0,049	0,212
5	1,7	0,99	0,74	0,053	0,477	0,150	4,08	289	0,060	0,334
6	1,6	1,00	0,69	0,046	0,398	0,168	2,49	170	0,079	0,641
7	2,5	1,16	0,67	0,103	0,582	0,269	3,49	249	0,120	0,182
8	2,6	1,07	0,63	0,101	0,587	0,349	1,67	180	0,086	0,257
9	2,3	1,27	0,68	0,101	0,597	0,157	4,87	240	0,073	0,178

Inicialmente foram realizadas correlações entre cada um dos parâmetros, das quais foram obtidos os coeficientes de correlação apresentados na Tabela 2. Essas correlações indicam o quão bem uma variável é correlacionada com outra, se feita uma regressão linear entre as duas. Quanto mais próximo de 1 indica que uma variável é diretamente proporcional e descreve melhor a outra, quanto mais próximo de -1 indica que as duas são inversamente proporcionais e também se descrevem bem. A aproximação de 0 indica que as variáveis não têm correlação, enquanto valores intermediários indicam que a variável é representativa, mas não por completo, sendo a variável dependente de outras variáveis além da analisada.

**Tabela 2:** Resultados de coeficientes de correlações entre os parâmetros analisados

Parâmetros	$C_{nu}$	$C_c$	$e$	$p.\#8$	$r.\#16$	$r.\#22,2$	$\epsilon_p$	MR	$B_g$	BBI
$C_{nu}$	1,00									
$C_c$	0,23	1,00								
$E$	-0,78	-0,20	1,00							
$p.\#8$	0,79	0,44	-0,65	1,00						
$r.\#16$	0,46	0,82	-0,31	0,38	1,00					
$r.\#22,2$	0,79	-0,03	-0,79	0,53	0,18	1,00				
$\epsilon_p$	-0,08	0,40	0,33	0,32	0,26	-0,59	1,00			
MR	-0,09	0,21	0,37	0,05	0,32	-0,41	0,73	1,00		
$B_g$	0,58	-0,24	-0,56	0,40	-0,19	0,60	-0,26	-0,17	1,00	
BBI	-0,53	-0,53	0,51	-0,57	-0,63	-0,25	-0,37	-0,55	-0,26	1,00

Na primeira etapa dos ensaios triaxiais, foi analisada a deformação permanente específica total ao final dos ciclos de carregamento, além de ter sido analisado o acomodamento do material ao atingir uma taxa de deformação permanente de  $10^{-7}$  milímetros por ciclo, limite utilizado no trabalho de Guimarães (2009) e na norma DNIT 179/2018-IE para verificar o acomodamento, considerado muito próximo de zero nas condições utilizadas para estes ensaios. Apenas a curva 3 atingiu a taxa de deformação adotada para o acomodamento, indicando que talvez seria necessário realizar um número maior de ciclos para ensaios triaxiais com lastro em escala reduzida, lembrando que o padrão adotado de 150000 golpes foi definido a partir dos ensaios triaxiais do contexto rodoviário. Na segunda etapa, o módulo de resiliência para os pares de tensão confinante de 40 kPa e desvio de 200 kPa de cada curva foi obtido a partir do modelo composto ajustado. Quanto aos índices de quebra, foram obtidos de acordo com metodologia explicada anteriormente.

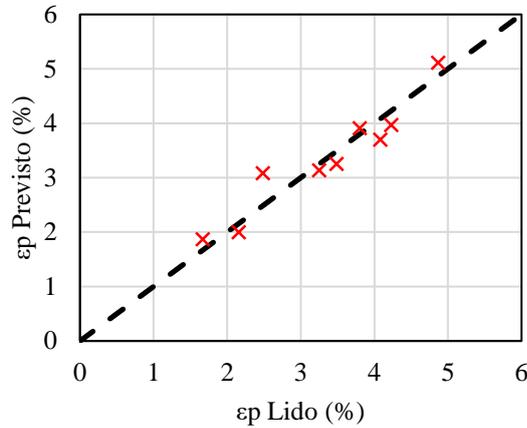
Em uma primeira análise, verificou-se a diminuição do índice de vazios com o aumento do coeficiente de não uniformidade, a relação linear apresentou  $R^2$  de 0,61, mas a tendência de redução do “e” com o aumento do “ $C_{nu}$ ” foi clara, indicando a proximidade da condição de compactação dos diferentes corpos de prova.

Quanto à deformação permanente específica ao fim do carregamento, não foi possível observar uma relação direta com o coeficiente de não uniformidade e com o índice de vazios, mas observou-se que houve um aumento da  $\epsilon_p$  com o aumento do coeficiente de curvatura. Sun et al. (2017) analisaram o comportamento de curvas granulométricas com coeficiente de não uniformidade variando entre 1,2 e 4,5, obtendo deformações permanentes específicas menores para coeficientes entre 1,5 e 2,5. Como no presente artigo foram variadas curvas apenas dentro de uma faixa granulométrica, a restrição de variações no coeficiente de não uniformidade podem ter levado a não observação da tendência citada por Sun et al. (2017). Em uma tentativa de realizar uma regressão múltipla utilizando a deformação permanente específica como variável dependente de “ $C_{nu}$ ”, “ $C_c$ ” e “e” não foi obtido sucesso, resultando que nenhuma das três variáveis se relacionou muito bem com a deformação permanente. Ressalta-se que as variáveis analisadas podem atuar de forma inversa na  $\epsilon_p$ , neste caso seus efeitos se sobrepõem. Para evitar este problema foram feitos testes considerando os três parâmetros juntos, cada um isoladamente e em conjuntos de 2 em 2.

Decidiu-se então testar a utilização de três parâmetros das curvas granulométricas para avaliar a sua relação com o comportamento do lastro. O percentual retido acumulado na peneira de 22,2 mm (r.#22.2) foi utilizado como indicativo da fração graúda, o percentual retido acumulado na peneira de 16 mm (r.#16) indicando a fração intermediária e o percentual passante acumulado na peneira de 8 mm (p.#8) indicando a fração fina de cada curva. Em uma visão geral da variação de cada parâmetro com relação à deformação permanente específica, foi possível observar que houve melhor correlação, principalmente da fração graúda. Realizando uma regressão múltipla considerando os três novos parâmetros como variáveis independentes e a deformação permanente específica como variável dependente, foi obtido que a fração fina e a fração graúda apresentam grande influência na  $\epsilon_p$ , com coeficiente de determinação de 0,87. A equação 1 foi obtida a partir da regressão múltipla e na Figura 4 são apresentados os valores de  $\epsilon_p$  previstos utilizando a equação pelos valores de  $\epsilon_p$  obtidos nos ensaios.

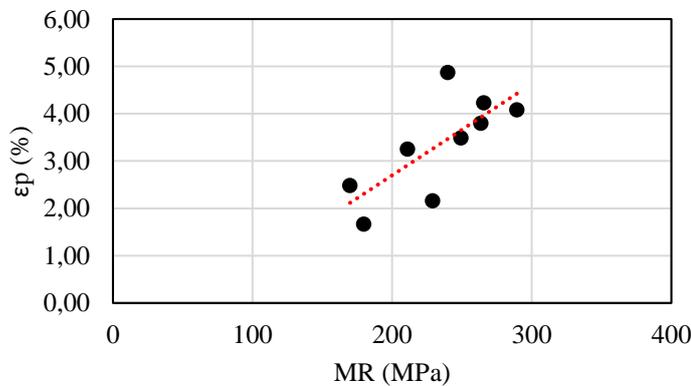
$$\varepsilon_p = 28,4 \times p.\#8 + 1,4 \times r.\#16 - 16,8 \times r.\#22.2 + 4,1 \quad (1)$$

em que  $\varepsilon_p$ : deformação permanente específica [%];  
 p. #8: percentual passante na peneira 8 mm [%];  
 r. #16: percentual retido acumulado na peneira 16 mm [%];  
 r. #22.2: percentual retido acumulado na peneira 22.2 mm [%];



**Figura 4:** Comparação dos valores de  $\varepsilon_p$  obtidos a partir da equação 1 e dos ensaios

A análise da variação do módulo de resiliência das diferentes curvas foi realizada inicialmente testando os parâmetros “ $C_{nu}$ ”, “ $C_c$ ” e “ $e$ ”. Não foi observada nenhuma tendência clara plotando o módulo variando com cada parâmetro isoladamente. Utilizou-se então os parâmetros “r. #22.2”, “r. #16” e “p.#8”, resultando também em comparações não conclusivas, apenas com a diminuição do parâmetro “r. #22.2” dando indícios de aumento do módulo de resiliência. Tentou-se então regressões múltiplas, que também não apresentaram boas correlações. A melhor correlação obtida para o módulo de resiliência foi com a deformação permanente específica, sendo as duas diretamente proporcionais como apresentado na Figura 5, com coeficiente de determinação de 0,54 para uma regressão linear. Uma possível causa da ausência de boas correlações para o módulo de resiliência pode ser novamente a variação das curvas granulométricas em uma faixa controlada, limitando as variações de módulo de resiliência numa faixa relativamente estreita também (170 a 290 MPa).



**Figura 5:** Relação entre deformação permanente específica e módulo de resiliência

A quebra das partículas após as duas etapas do ensaio triaxial foi avaliada a partir de parâmetros obtidos da comparação entre as curvas granulométricas antes e depois dos ensaios. O primeiro parâmetro de quantificação de quebra utilizado foi o  $B_g$ , que apresentou tendência contrária à encontrada na literatura (Sun et al., 2017 e Indraratna et al., 2011), com o índice crescendo para um índice de vazios menor. Essa tendência contrária a lógica de que partículas com maior número de contatos recebem tensões menores e por isso quebram menos. Uma possível justificativa para o erro na utilização do  $B_g$  é que por considerar individualmente cada peneira, sofre maior influência de erros inevitáveis de peneiramento. Deve ser considerado que o peneiramento não é perfeito, e que o aumento do número de peneiras aumenta o número de pontos de controle, mas pode aumentar o erro quando comparada porcentagem retida peneira por peneira antes e depois do ensaio, comprometendo a confiança nos valores de  $B_g$  obtidos.

Uma alternativa para quantificar a quebra foi a utilização do BBI, que considera a diferença de áreas das curvas granulométricas, além de ter um limite de quebra de material definido, fazendo com que seja impossível a existência de um valor maior que 1. Analisando o BBI, foi possível verificar de fato que as granulometrias com menor índice de vazios e maior coeficiente de não uniformidade apresentaram índices menores de quebra. As frações intermediárias e mais finas tiveram maior correlação com o BBI, indicando por uma relação inversa, que uma amostra com mais finos apresentará menor BBI. Além disso, foi verificado que a amostra com maior módulo de resiliência apresentou menos quebra.

## **5. CONCLUSÕES**

No presente trabalho foi avaliado o efeito da granulometria no comportamento de um material britado, utilizado para simular um arranjo de partículas de lastro com granulometrias inseridas na faixa AREMA 24 transladada, em ensaios triaxiais cíclicos de escala reduzida.

A deformação permanente específica na faixa utilizada nesta pesquisa mostrou ter pouca relação com o coeficiente de não uniformidade, o coeficiente de curvatura e o índice de vazios. Em contrapartida, a proposição para utilizar três peneiras de controle, com o uso do percentual passante na peneira 8 mm, percentual retido acumulado na peneira de 16 mm e percentual retido acumulado na peneira de 22.2 mm se mostrou muito útil para comparar diferentes curvas granulométricas quanto à deformação permanente correspondente.

Quanto ao módulo de resiliência, apesar de ter apresentado relação com o índice de vazios e com as maiores peneiras, não apresentou tendência clara, sendo possível identificar apenas uma relação diretamente proporcional à deformação permanente.

A quantificação da quebra das partículas utilizando o  $B_g$  resultou em relações bem diferentes das esperadas. Ao verificar ponto a ponto o material retido em cada peneira na granulometria antes e depois do ensaio foi percebido que o índice deve estar sendo influenciado por erros existentes de peneiramento, provavelmente amplificado pelo grande número de peneiras. A utilização do BBI faz com que esses erros diminuam, pois é considerada a diferença de área gerada pela curva granulométrica antes e depois. Os resultados de BBI observados estão de acordo com o esperado da literatura, com menos quebra para as granulometrias com menor índice de vazios e maior número de contatos entre partículas, evidenciado pela dependência da fração fina e intermediária da curva.

De modo geral, é esperado que como foram testadas curvas granulométricas dentro de uma faixa restrita, os valores obtidos do comportamento já estão até certo ponto controlados. No entanto, foi possível observar que mesmo na consideração apenas de uma faixa, a diferença da curva com maior deformação permanente para a com menor foi de quase 3 vezes, além da diferença de módulo do maior para o menor ter sido de 1,7 vezes e a quebra pelo BBI ter sido mais de 6 vezes maior. Apesar de terem sido obtidos em ensaios triaxiais com escala reduzida e por isso, não podendo ser utilizados para previsão em escala real, por enquanto os resultados indicam a necessidade de se fazer a análise da curva granulométrica a ser utilizada com a consideração de outros parâmetros, como os três parâmetros da curva utilizados neste trabalho, adaptados para o tamanho real das partículas de lastro.

#### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de mestrado fornecida para o desenvolvimento da presente pesquisa.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AREMA (2013) American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association, Lanham, Maryland.
- Bian, X.; J. Jiang; W. Jin; D. Sun; W. Li e X. Li (2016) Cyclic and Postcyclic Triaxial Testing of Ballast and Subballast. *American Society of Civil Engineers, Dept. of Civil Engineering, Zhejiang University, Yuhangtang.*
- DNIT (2017) 134-ME *Pavimentação – Solos – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2018) 179-IE *Pavimentação – Solos – Determinação da Deformação Permanente – Instrução de Ensaio.* Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- Guimarães, A. C. R. (2009) *Um Método Mecânico-Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos.* Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Indraratna, B.; W. Salim. (2003) Deformation and Degradation Mechanics of Recycled Ballast Stabilised with Geosynthetics. *Soils and Foundations*, v. 43, n. 4, p. 35-46.
- Indraratna, B.; Lackenby, J. e Christie, D. (2005) Effect of Confining Pressure on the Degradation of Ballast under Cyclic Loading. *Géotechnique*, v. 55, n. 4, p. 325-328.
- Indraratna, B.; W. Salim. e C. Rujikiatkamjorn (2011) *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track.* CRC Press, Leiden.
- Klincevicus, M. G. Y. (2011) *Estudo de Propriedades, de Tensões e do Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviários.* Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Lackenby, J.; B. Indraratna; G. McDowell e D. Christie (2007) Effect of Confining Pressure on Ballast Degradation and Under Cyclic Triaxial Loading. *Géotechnique* v. 57, n. 6, p. 527-536.
- Lowe, J. Shear Strength of Coarse Embankment Dam Materials. *Huitième Congress des Grands Barrages, Édimbourg*, p. 745-761.
- Macêdo, J. A. G. (1996) *Interpretação de Ensaio Defletométrico para Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis.* Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Marsal, R. J. (1967) Large Scale Testing of Rockfill Materials. *Journal of the Soil Mech. And Found. Div.* v. 1, n. SM2, p. 27-43.
- Merheb, A. H. M. (2014) *Análise Mecânica do Lastro Ferroviário por Meio de Ensaio Triaxiais Cíclicos.* Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Raymond, G. (1985) Research on Railroad Ballast Specification and Evaluation. *Track Design and Construction*, p. 1-8.
- Silva, F. H. P. (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.
- Skoglund, K. A. (2002) *A Study of some Factors in Mechanistic Railway Track Design.* Tese de Doutorado, Norwegian University of Science and Technology, Noruega.
- Sun. Y.; C. Chen e S. Nimbalkar (2017) Identification of Ballast Grading for Rail Track. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, n. 9, p. 945-954.
- Thakur, P. K.; J. S. Vinod e B. Indraratna (2013) Effect of Confining Pressure and Frequency on the Deformation of Ballast. *Géotechnique* v. 63, n. 9, p. 786-790.
- Vizcarra, G. I. C. (2015) *Efeito da Granulometria no Comportamento Mecânico de Lastro Ferroviário.* Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.