

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise da Eficiência da Faixa Granulométrica da Brita para ser Utilizada como Camada de Lastro

Ronderson Queiroz Hilário

Professor, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte, Brasil, ronderson@etg.ufmg.br

Hebert da Consolação Alves

Técnico de Laboratório, Escola de Minas - UFOP, Ouro Preto, Brasil, hebertalvesa@yahoo.com.br

Talita Caroline Miranda

Professora, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte, Brasil, talita@etg.ufmg.br

Gilberto Fernandes

Professor, Escola de Minas - UFOP, Ouro Preto, Brasil, gilberto@gorceix.org.br

RESUMO : A faixa granulométrica utilizada tem influência direta na vida útil da camada de lastro quando submetido ao carregamento gerado pelo tráfego ferroviário. Entretanto, no Brasil, temos apenas duas faixas granulométricas a serem utilizadas. As faixas preconizadas pelas entidades normativas brasileiras são muito uniformes. A influência da granulometria do lastro foi objeto de estudo, no intuito de se verificar o comportamento mecânico e sua influência na vida útil da via, mitigando a geração de finos e mantendo a eficiência da drenagem. Para isso, foram escolhidas duas faixas granulométricas: Faixa 3 da AREMA (Faixa A NBR ABNT 5564/2021) e a Faixa 50 Australiana. No estudo foi utilizado um Equipamento de Ensaio Dinâmico de Lastro para simular o tráfego ferroviário, composto por uma caixa metálica cúbica, com 1,00 m de aresta, e um pistão que aplica uma carga máxima de 20 t/roda, simulando uma via com capacidade de carga de 40 t/eixo. Foi calculado o recalque de camada ao final de cada ciclo com a finalidade de se verificar qual granulometria apresentou uma melhor eficiência. Foi comparada a quebra dos materiais das duas faixas estudadas e com os valores encontrados de Cc, CNU e, módulo de finura e diâmetro máximo, com a finalidade de verificar qual faixa granulométrica é a mais eficiente, para a carga aplicada e o material pétreo utilizado.

PALAVRAS-CHAVE: Comportamento mecânico de lastro ferroviário, faixa granulométrica, Equipamento de Ensaio Dinâmico de Lastro.

ABSTRACT: The particle size range takes advantage of the direct influence on the life of the ballast layer when subjected to the load generated by rail traffic. However, in Brazil, we only have two particle size ranges to be used. The ranges recommended by Brazilian regulatory bodies are very uniform. The influence of ballast granulometry was the object of study, in order to verify the mechanical functioning and its influence on the useful life of the road, mitigating the generation of fines and maintaining the drainage efficiency. For this, two granulometric bands were chosen: AREMA Band 3 (Band A NBR ABNT 5564/2021) and Australian Band 50. In the study, a Dynamic Ballast Test Equipment was used to simulate railway traffic, consisting of a cubic metal box, with 1.00 m of edge, and a piston that applies a maximum load of 20 t/wheel, simulating a track with 40 t/axle load capacity. The layer settlement was completed at the end of each cycle with a high level of checking which particle size showed the best efficiency. The breakage of materials in the two studied ranges was compared and with the values found for Cc, CNU and, fineness modulus and maximum diameter, to verify which particle size range is the most efficient, for the applied load and the stone material used.

KEYWORDS: Mechanical behavior of railway ballast, particle size range, Dynamic Ballast Test Equipment.

1 Introdução

Um pavimento ferroviário é dividido entre infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura consiste em terraplenagem, bem como todos os serviços necessários para ser realizada abaixo da terraplenagem. A



superestrutura é composta pelas seguintes elementos principais: sub-lastro, lastro, travessas e trilhos. Este último constitui o suporte e a superfície de rolamento dos veículos ferroviários (Brina, 1988). Em relação à faixa granulométrica a ser utilizada como lastro, o cascalho não pode ter grandes dimensões, pois podem funcionar como “cunhas” e nivelamento da estrada não duraria muito tempo. No entanto, dimensões excessivamente pequenas podem causar a contaminação, fazendo com que uma de suas funções, a drenagem, ficasse prejudicada (Brina, 1988).

Segundo Paiva (2016), lastro tem as seguintes funções: para garantir boa drenagem, impedindo travessas de estar imerso em água; garantir boa elasticidade à pista, atuando como amortecedor de vibrações dos trens, permitindo assim um trânsito tranquilo e confortável; garantir um suporte firme e estável para os dormentes, absorvendo e transmitindo o carga para as camadas abaixo; prevenir travessas de se mover, seja no sentido longitudinal ou direção transversal; e garantir velocidade e eficiência na manutenção de estradas, seja mecânico ou manual no nivelamento e traçando a ferrovia.

Segundo Fernandes (2005), as deformações em um pavimento ferroviário podem ser: elástico ou resiliente (deflexões) e plástico ou permanente (afundamento). Tradicionalmente, é considerada deformação permanente como sendo mantidos nas estradas, uma vez que são responsáveis pelo desnível da estrada sem a presença de tráfego. Para a determinação de tensões e deformações em todos os elementos de uma trilha,

De acordo com Selig e Waters (1994), o surgimento de finos na camada de lastro não depende apenas do matriz de rocha que está sendo usada como lastro, também depende do propósito a faixa está sendo usada. Análises foram realizadas em materiais de lastro em várias ferrovias dos Estados Unidos, e verificou-se que aproximadamente 76% dos finos presentes na via, viram da degradação do lastro. Dos outros 24%, 13% eram partículas de camadas abaixo do lastro, como sub-lastro ou uma camada de lastro antiga, 7% de outras fontes, que entraram na camada de lastro através superfície, 3% da camada de subleito e 1% do desgaste natural do dormente. Quando estudamos faixas usadas em outros países, descobrimos que existem muitos mais faixas de uso. Isso significa que para cada tipo de material e carga, o comportamento e a vida útil do lastro tornam-se diferente.

No Brasil importamos faixas granulométricas usadas em outros países, especialmente nos Estados Unidos, embora saibamos que as características dos materiais são diferentes. É por isso que este estudo é importante. O objetivo geral da pesquisa era desenvolver uma metodologia e procedimento técnico para análise o comportamento mecânico de balastros ferroviários, usando o teste de reator dinâmico Equipamento, e usando como um fundamento critério para o estudo, otimização e desenvolvimento de testes reproduzindo o escala real da área de foco, a fim de verificar o efeito da granulometria usada como lastro em seu comportamento mecânico, através de um carregamento cíclico. Do objetivo descrito acima, as especificações são para analisar o comportamento mecânico do lastro por meio de testes Equipamento de Ensaio Dinâmico de Lastro - EEDL, para analisar os parâmetros de deformabilidade e o índice de quebra de lastro para a partícula tamanho estudado.

2 Materiais e Métodos

O presente estudo se desenvolveu de forma experimental visando comparar duas faixas granulométricas utilizadas nos Estados Unidos/Brasil e Austrália, e a partir dos resultados apresentados, propor uma faixa granulométrica adequada para a brita de gnaiss utilizada no estudo, com uma menor geração de finos.

Com os resultados do índice de quebra do lastro, foi possível verificar a vida útil da camada, quando submetidos a uma carga cíclica de 20 toneladas por roda. Esses dados de quebra do material são importantes para projetar uma nova faixa granulométrica para o material em estudo.

O material de lastro utilizado neste estudo foi coletado em uma pedreira na cidade de Santa Bárbara - MG. Sua coleta se deu na pilha de lastro que se localiza dentro empresa. A coleta foi feita de acordo com o Anexo G da Norma ABNT NBR 5564/2014, que preconiza como deve ser feita a coleta em pilhas de lastro.

2.1 Ensaios Realizados no Material de Lastro

Os ensaios realizados na brita foram os preconizados pelo ANBT NBR 5564/2012 (foi feita uma atualização da norma no ano de 2021), que estão listados a seguir: índice de tenacidade treton, forma das



partículas, resistência à intempérie, resistência à Abrasão Los Angeles, massa específica, porosidade, absorção, carga pontual, fragmentos macios e friáveis e torrões de argila. As granulometrias utilizadas foram: Faixa 3 da AREMA (A faixa A da ABNT NBR 5564/2021 se enquadra nessa faixa) e a 50 Australiana.

2.1.1 Equipamento de Ensaio Dinâmico de Lastro - EEDL

Cada faixa foi colocada no EEDL, para verificar a eficiência da granulometria, estudando seu índice de quebra e o lastro útil vida. Com este estudo, foi possível verificar se a vida útil da camada de lastro e seu índice de quebra são diretamente influenciados por a faixa granulométrica usada. É por isso que a análise do equipamento é importante. Solicitações típicas (em termos de tensões) de uma estrutura ferroviária foram reproduzidas usando uma caixa de metal para modelar as camadas de o que geralmente é projetado na ferrovia. O equipamento de aplicação de carga foi projetado e construído para investigar a resistência, deformação e características de degradação de lastro, sub-lastro, subleito, dormente e trilhos sob carregamento cíclico. A sequência de a espessura da camada é descrita abaixo.

A escolha dessas espessuras foi baseada em uma seção tipo de uma ferrovia real: Subleito: 35 cm; Sub-lastro: 20 cm; Lastro: 30 cm abaixo da parte inferior do dormente.

Após a compactação a camada de subleito, as hastes de assentamento foram posicionadas nos locais apropriados. Essas duas hastes são usadas para medir o recalque da camada de subleito. Evitar atrito entre a haste/solo, tubos de PCV foram colocados em cada haste. Depois desse processo, o sub-lastro foi compactado, e mais duas hastes foram posicionadas. Estes são para fins de medição o recalque da camada de sub-lastro. Para ter certeza de que a camada estava pronta e compactado corretamente, dois testes foram realizado: Speedy e o Frasco de Areia. O padrão usado para certificar os valores foram ISF-207/2017 e a infraestrutura Especificação de Serviços - Aterro (VALEC, 2017). Depois das duas camadas prontas, o lastro foi peneirado de acordo com o granulometria a ser analisada. Foi homogeneizado e colocado dentro do equipamento. Assim que o lastro foi posicionado, foi realizada a socaria manual do. Depois de nesta sequência, os extensômetros foram posicionados nas quatro hastes e duas nas o dormente. Os medidores posicionados no dormente são usados para medir o quanto a camada de lastro recalcou. No simulador, com dispositivo para carga cíclica, tem-se uma frequência de aproximadamente, 4,0 Hz, e seu NCM (número de ciclos por minuto) de aproximadamente 240 ciclos/min (14400 ciclos/hora e 345600 ciclos/dia). Mas para esse estudo específico, foi utilizado uma frequência 1 Hz. Para analisar a quebra do material de lastro, foram realizados ciclos de 500.000 batidas. A brita era colocada na altura já especificada, era feito a socaria manual. Antes de começa a contagem dos ciclos, era feito um condicionamento, realizando 100 batidas com o pistão. A cada 100.000 ciclos, o material de lastro era retirado e realizado a sua análise granulométrica. E o processo de colocação, socaria manual e condicionamento do material era repetido antes do início de cada ciclo. Para a contagem de batidas de aplicação de carga, foi instalado um sensor. A Figura 1 apresenta o equipamento.



Figura 1. Sequência da montagem do Equipamento para realização do ensaio.

3 Resultados e Análises

3.1 Resultados da Caracterização do Material de Lastro

A Tabela 1 a seguir apresenta os resultados da caracterização do material utilizado como.



Tabela 1. Resultados da caracterização do lastro.

Ensaio	Resultados
Forma das partículas	Cúbico
Partículas não cúbicas	1%
Massa específica aparente	2640 kg/cm ³
Absorção	0,30%
Porosidade	0,78%
Resistência à intempérie	1.65%
Resistência à compressão axial	164,56 MPa
Resistência ao choque	15,18%
Fragmentos macios e friáveis	0,10%
Material pulverolento	0%
Torrão de argila	0,05%
Limite de massa unitária	1,33 g/cm ³
Abrasão Los Angeles	22,20%

Com os resultados apresentados, o material pode ser utilizado em camada de lastro.

3.2 Equipamento de Ensaio Dinâmico de Lastro

A Figura 2 apresenta o gráfico das curvas iniciais das duas faixas estudadas.

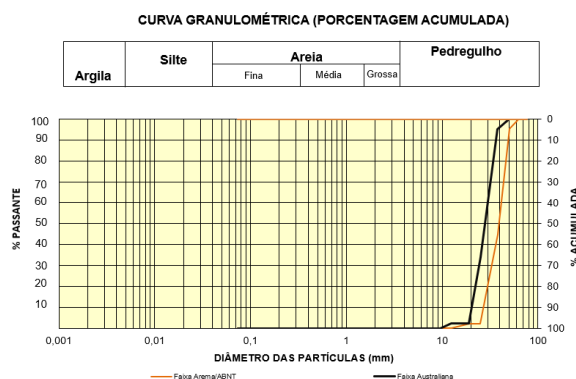


Figura 2. Granulometrias Iniciais das Duas Faixas Estudadas.

De acordo com a Figura 4.31, foi observado que a faixa da AREMA/ABNT estudada é mais graúda do que a faixa Australiana. Isso fica evidenciado pelo Módulo de Finura inicial das curvas. A Faixa AREMA/ABNT o valor é de 8,53 e da faixa Australiana o valor é de 8,03.

Ao final dos ciclos, foi observada uma quebra significativa na curva granulométrica da faixa da AREMA/ABNT, como mostrado na Figura 3.

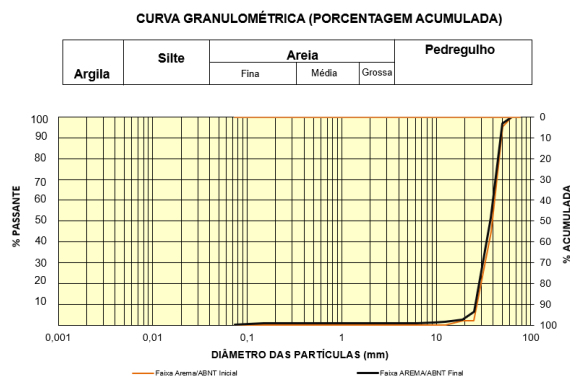


Figura 3. Comparação da Curva Inicial e Final da Faixa AREMA/ABNT.



Deslocamento da curva granulométrica evidenciado pela granulometria que se enquadra na faixa AREMA/ABNT não é tão evidente quando comparamos com a faixa Australiana, como mostrado na Figura 4.

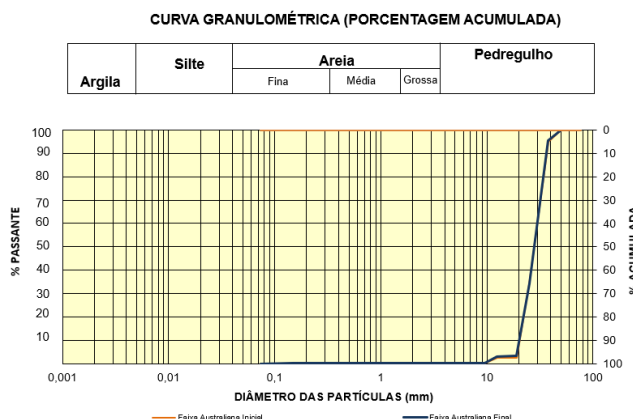


Figura 4. Comparação da Curva Inicial e Final da Faixa 50 Australiana.

Como observado na Figura 4, houve uma sobreposição das curvas analisadas. O valor do Módulo de Finura teve uma pequena redução, iniciando com o valor de 8,03 passando para 7,99. E o percentual de quebras foi menor quando se comparando com a faixa AREMA/ABNT. Isso mostra que com um módulo de finura menor, o imbricamento dos grãos é menor, consequentemente sua quebra é menor.

Isso fica evidenciado quando é feita a comparação das curvas granulométrica das duas faixas analisadas (Figura 5).

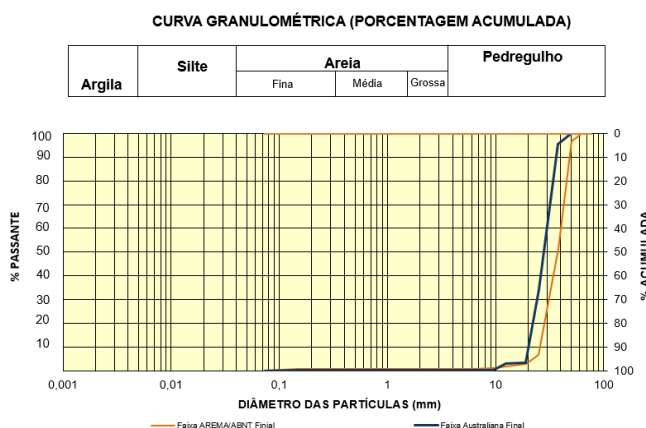


Figura 5. Comparação da Granulometria Final - AREMA/ABNT e Australiana.

A curva granulométrica da faixa AREMA/ABNT ainda continuou uniforme, assim como a da Faixa Australiana.

Em relação ao valor de C_c , houve uma melhora nas duas faixas, mas a faixa Australiana se tornou bem graduada. Apesar da melhora no valor do C_c da faixa da AREMA/ABNT, a curva continuou mal graduada.

O valor do CNU da faixa Australiana se manteve em comparação com o valor inicial, que foi de 1,50. Na faixa AREMA/ABNT houve uma melhora significativa desse padrão. O valor inicial foi de 1,45, e o valor final foi de 1,54.

Porém Buddhima Indraratna e Salim (2005) preconizam que o valor ideal para o CNU deve estar entre 2,3 e 2,6. Esses valores proporcionam uma redução da deformação permanente e de sua quebra, não comprometendo a drenagem da via. Usualmente os valores de CNU variam entre 1,7 e 2,0. Sabendo-se disso, comparando-se o valor de CNU encontrado na granulometria inicial e final, o resultado se manteve o mesmo. O valor ainda está distante do preconizado por Buddhima Indraratna e Salim (2005).

O índice de contaminação das granulometrias analisadas está apresentado na Tabela 2.



Tabela 2. Comparação dos Índices de Contaminação.

Faixa Granulométrica	Índice de Contaminação
Faixa 3 AREMA (A ABNT)	1,1
Faixa 50 Australiana	0,5

O resultado do Índice de Contaminação apresenta uma granulometria para lastro, com a presença de materiais menos graúdos, com um módulo de finura menor, proporciona um menor índice de quebra. Reduzindo esse índice de quebra, a vida útil do lastro tende a aumentar. Isso faz com que a deformação permanente fique menor, com uma menor quebra do material.

De acordo com o índice de contaminação, foi possível realizar-se uma projeção da vida útil do material. Para isso, foi feito o cálculo de índice de contaminação (FI) ao final de cada ciclo, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Índices de Contaminação (FI) ao final de cada ciclo.

Granulometria	0	100 mil	200 mil	300 mil	400 mil	500 mil
AREMA/ABNT	0	0,21	0,38	0,63	0,93	1,17
Australiana	0	0,12	0,20	0,23	0,29	0,47

A partir dos dados da Tabela 2, foi feito um gráfico para estipular a vida útil do material utilizado em cada faixa granulométrica. As Figuras 6 e 7 apresentam os gráficos da variação do FI para o material da AREMA/ABNT e australiana, respectivamente.

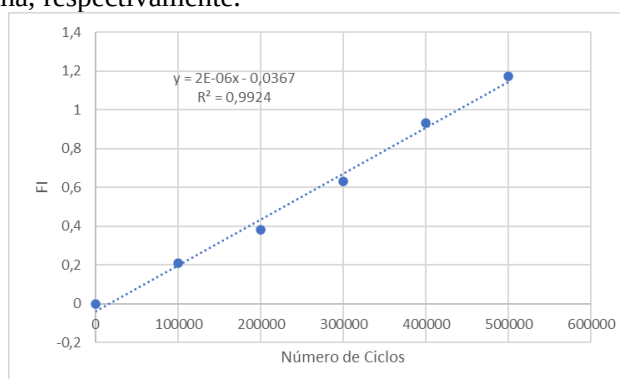


Figura 6. Gráfico número de ciclos x FI – AREMA/ABNT.

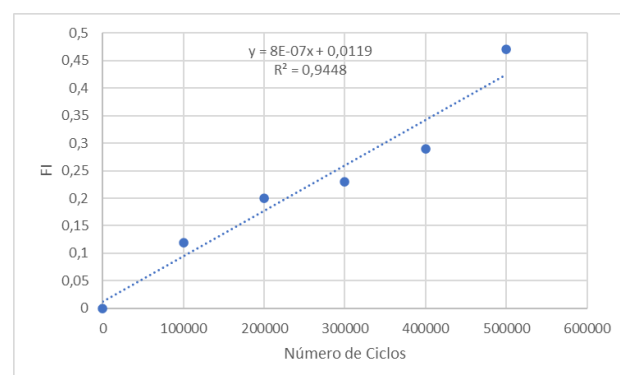


Figura 7. Gráfico número de ciclos x FI – Australiana.

Foi utilizada outra metodologia para se considerar a contaminação do lastro. Foi feita uma análise considerando-se o material passante na peneira de 3/8" como material contaminante. A Tabela 4 apresenta esse quantitativo ao final de cada ciclo.

Tabela 4. Índices de Contaminação ao final de cada ciclo considerando-se material passante na peneira 3/8"

Granulometria	0	100 mil	200 mil	300 mil	400 mil	500 mil
AREMA/ABNT	0	0,20	0,40	0,70	1,0	1,2
Australiana	0	0,14	0,23	0,30	0,36	0,51



A partir dos dados da Tabela 3, foi feito um gráfico para mostrar a variação da porcentagem passante na peneira 3/8". A Figura 8 apresenta o gráfico da granulometria da AREMA/ABNT e a Figura 9 o gráfico da granulometria Australiana.

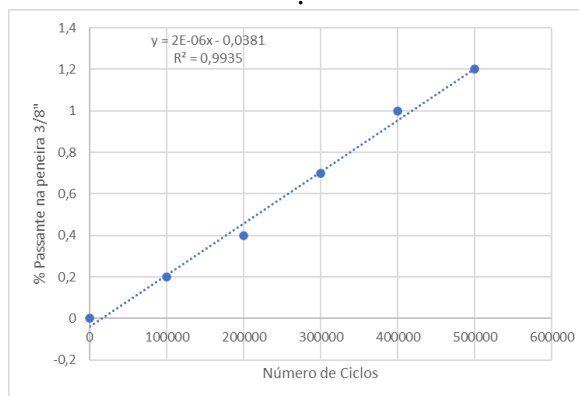


Figura 8. Gráfico número de ciclos x passante 3/8" – AREMA/ABNT

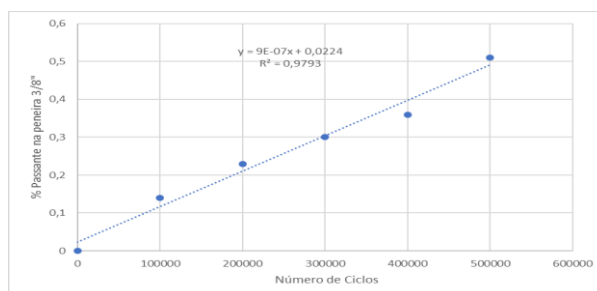


Figura 9. Gráfico número de ciclos x passante 3/8" – Australiana.

Por meio das equações geradas pelos gráficos da Figuras 4.34 e 4.35, podemos fazer uma projeção de ciclos de desgarnecimento. Considerando a geração de 50% de finos, temos os seguintes valores do número de ciclos, por metodologia utilizada (Tabela 5).

Tabela 5. Número de ciclos para gerar 50% de finos.

Granulometria	FI	% Passante peneira 3/8
AREMA/ABNT	25.018.350	25.019.050
Australiana	62.485.125	55.530.667

Para chegar ao resultado da produção de 50% de finos, tanto para a análise do FI quanto para o passante na peneira de 3/8", foi feito uma extrapolação. O crescimento foi linear, mas para um número de 500.000 ciclos. Seria interessante em estudos futuros, ser feito uma maior quantidade de ciclos para verificar a tenência dessa curva, se será linear ou não.

O uso de um material com o módulo de finura menor não compromete uma das funções do lastro que é a drenagem. Muito pelo contrário, com um módulo de finura menor, ocorreu uma menor quebra do material, produzindo uma menor quantidade de finos, reduzindo-se o nível de colmatação do lastro. Isso fez com que a vida útil do material aumentasse. Isso fica evidente quando é feita a projeção do número de ciclos suficientes para gerar 50% de finos.

Em relação ao coeficiente de permeabilidade, a faixa australiana teve uma redução de aproximadamente 5% na permeabilidade. Já a faixa AREMA/ABNT teve uma redução de aproximadamente 8,2%.

5 Conclusão

O material de lastro preconizado pela ABNT NBR 5564/2014 se mostrou menos eficiente quando comparado ao material da faixa 50 australiana. Mesmo sendo mais graúda, com DMC e Módulo de Finura



maiores, ele teve um percentual de quebra muito maior do que a outra faixa. Isso porque o encaixe (imbricamento dos grãos) foi menos eficiente.

Em relação aos resultados das curvas granulométricas do material de lastro, foi verificada a necessidade do uso de um material com uma curva menos uniforme e melhor graduada, com a finalidade de melhorar o imbricamento dos grãos, proporcionar uma melhor elasticidade da via, um menor índice de quebra, que, por consequência, aumenta a vida útil do lastro. A faixa A, preconizada pela ABNT 5564/2014, se mostrou muito uniforme e mal graduada. Para a carga aplicada e o material pétreo utilizado, a granulometria não se mostrou eficiente, tendo uma quebra muito maior que a faixa 50 australiana.

Muniz (2002) questionou a faixa para lastro utilizada no Brasil, precisando fazer estudos para usar uma curva mais bem graduada.

Constatou-se que as normas americana, australiana e europeia apresentam mais possibilidades de faixas para serem utilizadas nas vias férreas. O Brasil tem uma extensão territorial um pouco menor em relação aos Estados Unidos e à Europa, e maior em relação à Austrália. Nessas regiões, como no Brasil, há uma grande quantidade de materiais pétreos para serem utilizados, assim como ferrovias com diferentes valores de eixos padrão de carga, mas, neste país, são preconizadas apenas duas faixas granulométricas, sendo que a de uso maior é a Faixa A, que é para linhas principais.

Deste modo, a faixa A é a recomendada para ser utilizada na grande maioria das vias brasileiras. Não é razoável isso acontecer. Como dito anteriormente, a faixa indicada pela ABNT não é eficiente para ser utilizada para camada de lastro, como mostrado no estudo, pois não considera o tipo de carga e a matriz rochosa do agregado. Devem-se realizar estudos mais detalhados para aumentar as faixas que podem ser utilizadas, assim como diferentes matrizes rochosas. Essas faixas devem ser menos uniformes e mais bem graduadas, diferente das preconizadas hoje pela ABNT.

O número de faixas preconizadas pela ABNT (duas faixas para serem utilizadas no Brasil) é muito pouco pela vasta quantidade de matrizes rochosas que podem ser utilizadas como lastro ferroviário. Cada matriz tem suas características de resistência, e isso deve ser levado em consideração, assim como a carga passante pela via.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao NUGEO, à Universidade Federal de Ouro Preto, à Universidade Federal de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 5564/2014 – Via Férrea – Lastro Ferroviário – Requisitos e Métodos de Ensaio, 2014

Brina, H. L. Estradas de Ferro. Rio de Janeiro, 1988.

Fernandes, G. Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2005.

Indraratna, B. Salim, W. Modelling of particle breakage of coarse aggregates incorporating strength and dilatancy. Geotechnical Engineering. Proc. Institution of Civil Engineers, London, Vol. 155, Issue 4, 2005.

Instrução de Serviço Ferroviário – ISF-207: Estudos Geotécnicos, 2015.

Instrução de Serviço Ferroviário – ISF-212: Projeto de Superestrutura da Via Permanente – Lastro e Sublastro, 2015, 2015.

Muniz, L. F. M. Fundamentos Teórico-Experimentais da Mecânica dos Pavimentos Ferroviários e Esboço de um Sistema de Gerência Aplicado à Via Permanente, tese de Doutorado, UFRJ, 2002.

Paiva, C. E. E. L. Super e Infraestrutura de Ferrovias – Critérios para Projetos. Elsevier Editora, 2016.

Selig, E. T. Waters, J. M. Track Technology and Substructure Management. Thomas Telford, London, 1994.