

Estudo das faixas granulométricas no comportamento e vida útil do lastro ferroviário utilizando equipamento de ensaio dinâmico

Study of granulometric ranges in the behavior and useful life of railway ballast using dynamic testing equipment

Ronderson Queiroz Hilário¹; Hebert da Consolação Alves²; Gilberto Fernandes³; Talita Caroline Miranda⁴; Marcelo Franco Porto⁵; Andreia Bicalho Henriques⁶; Maria Victoria Campos Corcini Pereira⁷; Ana Caroline da Cruz Reis⁸

- ¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: ronderson@etg.ufmg.br
- ² Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: hebertalvesa@yahoo.com.br
- ³ Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto/MG, Brasil. Email: gilberto@ufop.edu.br
- ⁴ Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: talita@etg.ufmg.br
- ⁵ Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: marcelo@etg.ufmg.br
- ⁶ Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Minas, Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: abicalho@demin.ufmg.br
- ⁷ Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: corcinimaria1@gmail.com
- ⁸ Centro federal de Educação Tecnológica – CEFET-MG, Departamento de Engenharia de Transportes, Belo Horizonte/MG, Brasil. Email: anacarolina.reis@cefetmg.br

Resumo: A faixa granulométrica influencia diretamente na vida útil da camada de lastro quando submetida às cargas geradas pelo tráfego ferroviário. Porém, no Brasil, temos apenas duas faixas granulométricas disponíveis para uso. As recomendadas pelos órgãos reguladores brasileiros são bastante uniformes, e publicações referentes a comportamento mecânico mais eficiente expressam a necessidade de uma faixa bem graduada, diferente das faixas normalmente utilizadas nas estradas brasileiras. Portanto, a influência da granulometria do lastro utilizado nas ferrovias foi objeto de estudo, com o objetivo de 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 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT) e Faixa Australiana 50. Para este estudo, utilizando equipamento dinâmico que simula o tráfego ferroviário, foram analisadas duas faixas granulométricas diferentes, e com os dados encontrados de Cc, CNU, módulo de finura e diâmetro máximo, foi proposta uma faixa granulométrica melhor graduada e uma distribuição granulométrica que se enquadrasse nesta nova faixa para ser utilizada, a fim de melhorar a sobreposição entre os grãos, reduzindo sua quebra, melhorando a deformabilidade, sem comprometer a permeabilidade.

Palavras-chave: Comportamento mecânico de lastro ferroviário; Faixa granulométrica; Equipamento de Ensaio Dinâmico de Lastro.

Abstract: The particle size range directly influences the useful life of the ballast layer when subjected to loads generated by railway traffic. However, in Brazil, we only have two particle size ranges to be used. Those recommended by Brazilian regulatory bodies are quite uniform, and publications referring to more efficient mechanical behavior express the need for a well-graded lane, different from the lanes normally used on Brazilian roads. Therefore, the influence of the particle size of the ballast used on railways was the object of study, with the aim of verifying the mechanical behavior and its influence on the useful life of the track, mitigating the generation of fines and maintaining drainage efficiency. For this, two granulometric ranges were chosen: Range 3 of AREMA (Range A of the Brazilian Association of Technical Standards - ABNT) and Australian Range 50. For this study, using dynamic equipment that simulates railway traffic, two different granulometric ranges were analyzed, and with the data found on Cc, CNU, fineness modulus and maximum diameter, a better graduated particle size range and a particle size distribution that fit into this new range were proposed to be used, in order to improve the overlap between the grains, reducing their breakage, improving deformability, without compromising permeability.

Keywords: Mechanical behavior of railway ballast ; Particle size range ; Ballast Dynamic Test Equipment.

1. Introdução

Segundo Brina (1988), o pavimento ferroviário é composto por infraestrutura e superestrutura. A terraplenagem é o leito da infraestrutura, como todos os outros serviços importantes a serem realizados abaixo do nível do solo. A superestrutura é composta por: sublastro, lastro, dormentes, trilhos e elementos de fixação.

O lastro, segundo Stopatto (1987), é um material britado colocado acima do subleito ferroviário com a finalidade de proporcionar uniformidade e deixar a grade na posição correta, além de amortecer impactos decorrentes do tráfego. Brina (1988) afirma que o material de lastro é um dos elementos da superestrutura ferroviária localizado entre as camadas de sublastro e dormente. Segundo Paiva (2016), o lastro tem as seguintes funções:

- Garantir uma boa drenagem, evitando que os dormentes fiquem imersos na água;
- Garantir a boa elasticidade à via, atuando como amortecedor impactos decorrentes do tráfego, permitindo assim um trânsito suave e confortável;
- Garantir suporte firme e estável aos dormentes, absorvendo e transmitindo cargas para as camadas inferiores;
- Impedir a movimentação dos dormentes, seja no sentido longitudinal ou transversal;
- Garantir rapidez e eficiência na manutenção da via, seja ela mecânica ou manual, no nivelamento e no traçado da via férrea.

As deformações em um pavimento ferroviário podem ser elásticas ou resilientes (deflexões) e plásticas ou permanentes (afundamentos). Tradicionalmente, considera-se que as deformações permanentes são mantidas nas estradas, uma vez que são responsáveis pelos desníveis da estrada sem a presença de tráfego (Fernandes, 2005).

Segundo Bathurst e Keer (1995), para a determinação de tensões e deformações em todos os elementos de uma via, é importante compreender o comportamento mecânico de uma ferrovia. Porém, não é um problema fácil de entender, pois o número de variáveis que não conhecemos é grande. Um exemplo disso é a grande variedade de propriedades dos meios granulares ao longo de todo o percurso. Para realizar a análise do comportamento mecânico da ferrovia, esta deve ser dividida em duas etapas. A primeira deve ser feita em trilhos com feixe de inércia constante. O próximo passo é analisar a resposta da base que sustenta o trilho, que é formada por placas de suporte, trilhos, travessas, lastro e sublastro (Bathurst, Keer, 1995).

Segundo Selig e Waters (1994), o aparecimento de finos na camada de lastro não depende apenas da matriz rochosa que está sendo utilizada como lastro na via, mas também da finalidade para a qual a via está sendo utilizada. Foram realizadas análises em materiais de lastro em diversas ferrovias do continente norte-americano, e constatou-se que aproximadamente 76% dos finos presentes na estrada, advieram da degradação do lastro. Dos outros 24%, 13% eram partículas de camadas abaixo do lastro, como sublastro ou camada de lastro antigo, 7% de outras fontes, que entraram na camada de lastro pela superfície, 3% da camada de lastro. subleito e 1% do desgaste natural do dormente.

Quando estudamos bandas utilizadas em outros países, descobrimos que existem muito mais bandas de utilização, isso significa que para cada tipo de material e carga, o comportamento e vida útil do lastro torna-se diferente. Em alguns casos, no Brasil, importamos bandas granulométricas utilizadas em outros países, principalmente nos Estados Unidos, mesmo sabendo que as características pétreas dos materiais são diferentes. Por isso este estudo é importante.

O principal objetivo deste trabalho foi apresentar uma nova faixa granulométrica para o agregado em estúdio, baseada no desenvolvimento de uma metodologia e procedimento técnico para análise de comportamento utilizando o Equipamento de Teste Dinâmico de Lastro.

Para isso, utilizou-se como critério fundamental deste estudo a otimização e/ou comportamento mecânico através do desenvolvimento de ensaios, reproduzindo a área de foco em escala real, ou seja, menor geração de finos, melhor intertravamento mecânico e boa deformabilidade.

O estudo foi desenvolvido utilizando equipamento que aplica carga de 20 toneladas, simulando o tráfego ferroviário. O nome do equipamento é: Ballast Dynamic Test Equipment (EEDL).

O estudo foi realizado entre os anos de 2016 e 2020, portanto para análise dos resultados, todos foram feitos com base na faixa granulométrica preconizada pela NBR ABNT 5564/2014

2. Metodologia

O presente estudo foi desenvolvido experimentalmente com o objetivo de comparar duas faixas granulométricas utilizadas nos Estados Unidos/Brasil e Austrália e, a partir daí, apresentar uma faixa granulométrica adequada para a brita de gnaiss utilizada no estudo, com menor índice de quadra do material. A faixa Australiana 50 e a faixa 3 da AREMA foram escolhidas (a Faixa A da ABNT se enquadra na Faixa 3 da AREMA).

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

O material de lastro utilizado foi coletado em uma pedreira na cidade de Santa Bárbara – MG. Sua coleta ocorreu na pilha de lastro que fica localizada no interior da empresa. A coleta foi realizada conforme Anexo G da NBR ABNT 5564/2014. Os materiais de sublastro e subleito também são provenientes da Ferrovia Norte-Sul (Hilário e Fernandes, 2021).

Os ensaios de caracterização do material de lastro foram os especificados pela NBR ABNT 5564/2014.

Com os valores encontrados de Cc, CNU, módulo de finura e diâmetro máximo, foi proposta uma faixa granulométrica melhor graduada e uma distribuição granulométrica que se enquadrasse nesta nova faixa para ser utilizada como lastro, para melhorar a sobreposição entre os grãos, reduzindo a quebra, melhorando a deformabilidade, sem comprometer a permeabilidade.

3. Preparação de amostras e serviços para análise no Equipamento de Ensaio Dinâmico de Lastro

A faixa granulométrica foi colocada no Equipamento Ensaio Dinâmico de Lastro, para verificar a eficiência granulométrica, estudando seu índice de quebra e a vida útil do lastro. Com este estudo foi possível verificar que a vida útil do lastro e seu índice de quebra são diretamente influenciados pela faixa granulométrica utilizada. É por isso que a análise do equipamento é importante.

Solicitações típicas (em termos de tensões) de uma estrutura ferroviária foram reproduzidas utilizando uma caixa metálica para modelar as camadas do que normalmente é projetado na infraestrutura ferroviária. Este equipamento de aplicação de carga cíclica de última geração foi projetado e construído para investigar as características de resistência, deformação e degradação de lastro, sublastro, subleito, dormente e trilhos sob carga cíclica. A sequência de espessuras de camada é descrita abaixo. A escolha destas espessuras baseou-se num tipo de troço de uma ferrovia real:

- Subleito: 35 cm;
- Sublastro: 20 cm;
- Lastro: 30 cm abaixo da parte inferior do dormente.

Para a preparação das camadas de subleito e sublastro, foi necessário deixar os materiais com teor de umidade ideal antes da compactação. Os materiais com teor de umidade ideal foram levados para serem compactados no equipamento, primeiro o subleito e depois o sublastro. Imediatamente após a compactação da camada de subleito, as hastes de assentamento foram posicionadas nos locais apropriados. Essas duas hastes são utilizadas para medir o recalque da camada de subleito. Para evitar atrito entre haste/solo, tubos de PVC foram colocados em cada haste. Após esse processo, o sublastro foi compactado e mais duas hastes foram posicionadas. Estes têm a finalidade de medir o recalque da camada de sublastro. Para garantir que a camada estava pronta e compactada corretamente, foram realizados dois testes: Speedy e Sand Jar. A norma utilizada para certificar os valores foi a ISF-207/2017 e a Especificação de Serviços de Infraestrutura – Aterro Sanitário (VALEC, 2017). Depois de prontas essas duas camadas, o lastro foi peneirado de acordo com a granulometria a ser analisada. Foi homogeneizado e colocado dentro da caixa metálica. Assim que o lastro foi posicionado, foi realizada a britagem manual da brita. Ao atingir 30 cm de altura, o dormente foi posicionado junto com o trilho e os fixadores. Após esta sequência, os extensômetros foram posicionados nas quatro hastes e dois no dormente. Os extensômetros posicionados no dormente são utilizados para medir o quanto o lastro está reprimindo.

Para estudar essas características, foram realizados uma série de testes em laboratório, utilizando o mesmo modelo de construção de via permanente (trilho, travessa, lastro, sublastro e subleito). As forças de ruptura dos grãos do lastro foram então estudadas em uma série de testes simples. Nas considerações do simulador, com dispositivo de carga cíclica, temos uma frequência de aproximadamente 4,0 Hz, e seu NCM (número de ciclos por minuto) de aproximadamente 240 ciclos/min (14.400 ciclos/hora e 345.600 ciclos/dia). Com essa frequência conseguimos simular um trem a uma velocidade de aproximadamente 29 km/h. Esta velocidade é a capacidade máxima que o equipamento pode simular. Para a contagem dos batimentos foi instalado um sensor que fazia essa contagem. A Figura 1 mostra a sequência da montagem de teste.

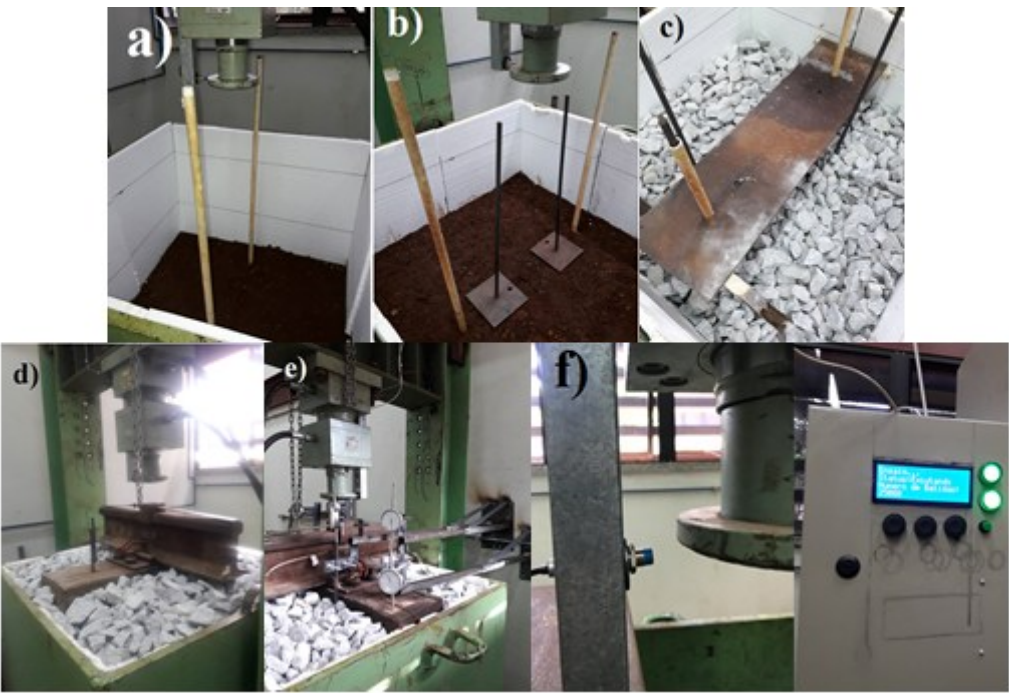


Figura 1 – a) Hastes de recalque posicionadas no topo da camada de subleito; b) Hastes de reforço posicionadas no topo da camada de sublastro; c) colocação da brita; d) instalação de travessa, trilho e elementos de fixação; e) extensômetros instalados; f) sensor de batimento e contador.

Fonte: Autores (2025).

4. Resultados e análises

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

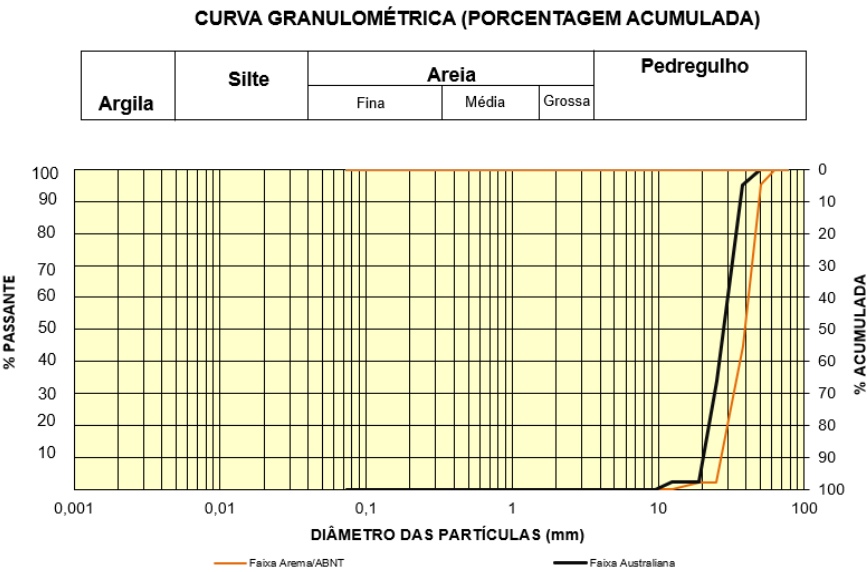


Figura 2 – Granulometrias Iniciais das Duas Faixas Estudadas.

Fonte: Autores (2025).

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.

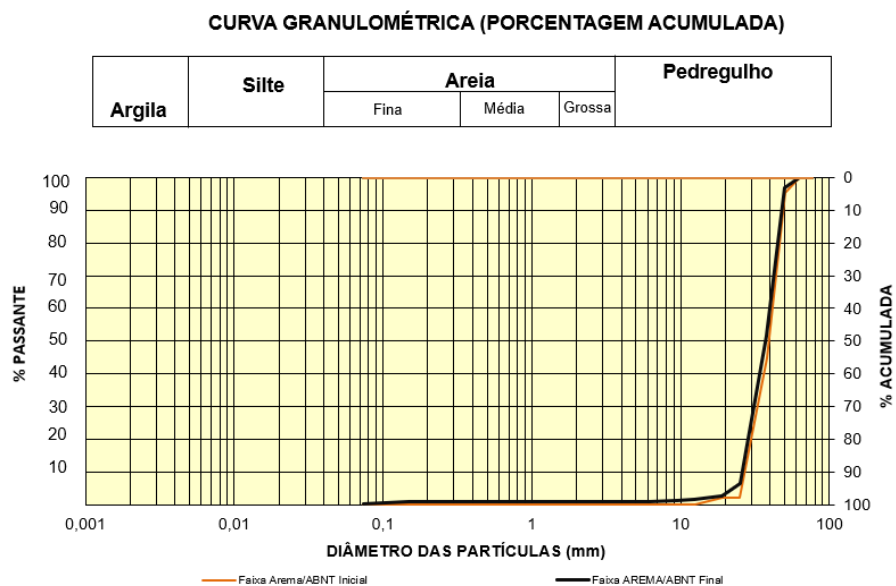


Figura 3 – Comparação da Curva Inicial e Final da Faixa AREMA/ABNT.
Fonte: Autores (2025).

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.

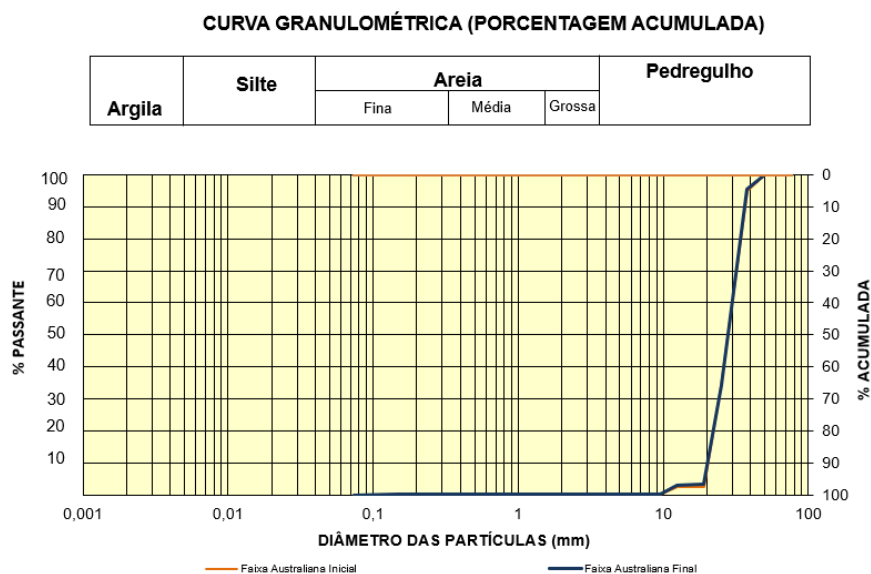


Figura 4 – Comparação da Curva Inicial e Final da Faixa 50 Australiana.
Fonte: Autores (2025).

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).

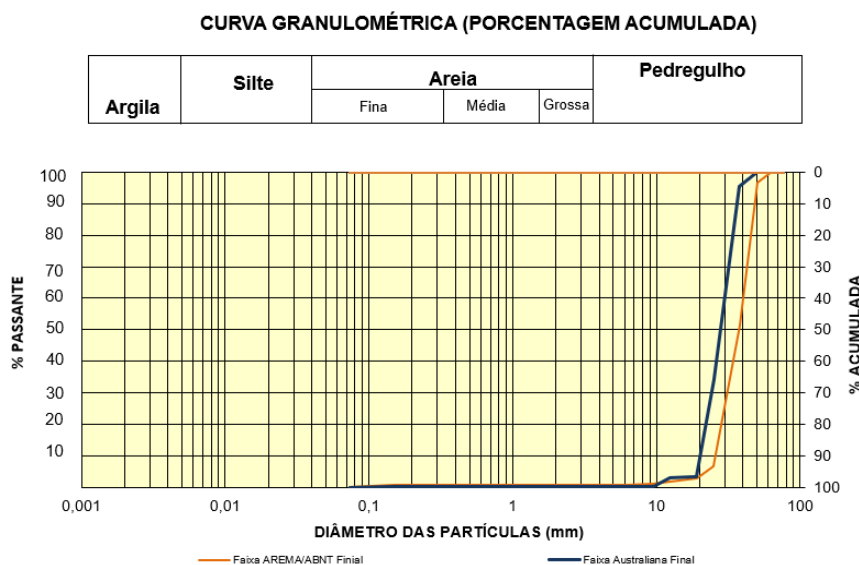


Figura 5 – Comparação da Granulometria Final - AREMA/ABNT e Australiana.

Fonte: Autores (2025).

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

Em relação ao valor de Cc, houve uma melhora nas duas faixas, mas a faixa Australiana se tornou bem graduada. Apesar da melhora no valor do Cc 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.

O índice de contaminação das granulometrias analisadas está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação dos Índices de Contaminação.

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

Fonte: Autores (2025).

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 2.

Tabela 2 – 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
-------------	---	------	------	------	------	------

Fonte: Autores (2025).

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.

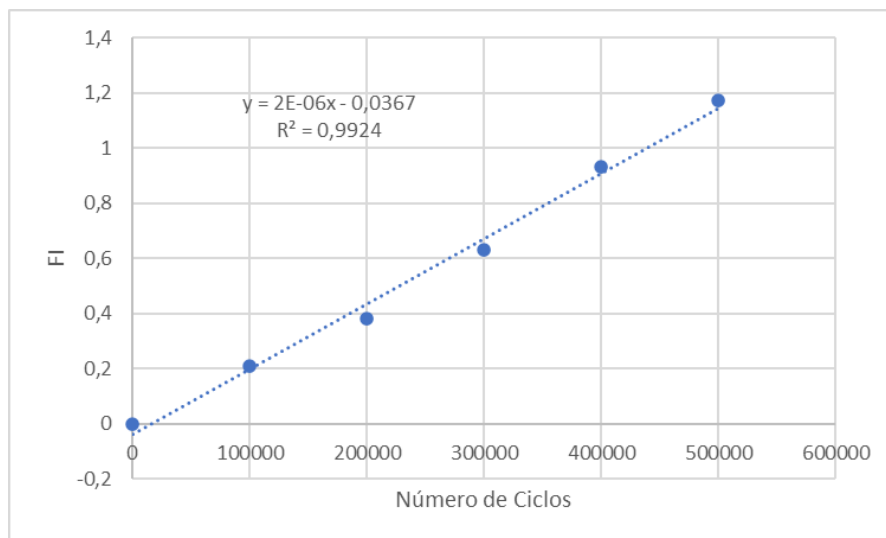


Figura 6 – Gráfico número de ciclos x FI – AREMA/ABNT.

Fonte: Autores (2025).

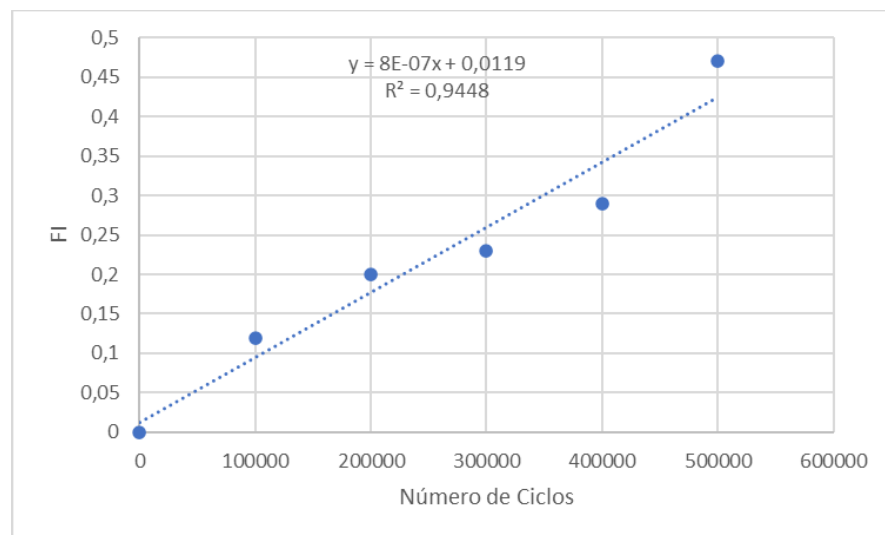


Figura 7 – Gráfico número de ciclos x FI – Australiana.

Fonte: Autores (2025).

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 3 apresenta esse quantitativo ao final de cada ciclo.

Tabela 3 – 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

Fonte: Autores (2025).

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.

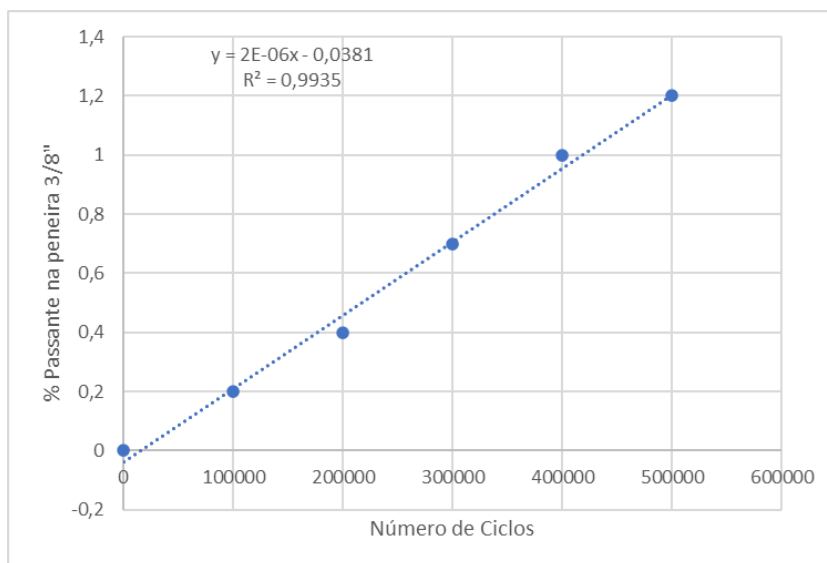


Figura 8 – Gráfico número de ciclos x passante 3/8" – AREMA/ABNT.

Fonte: Autores (2025).

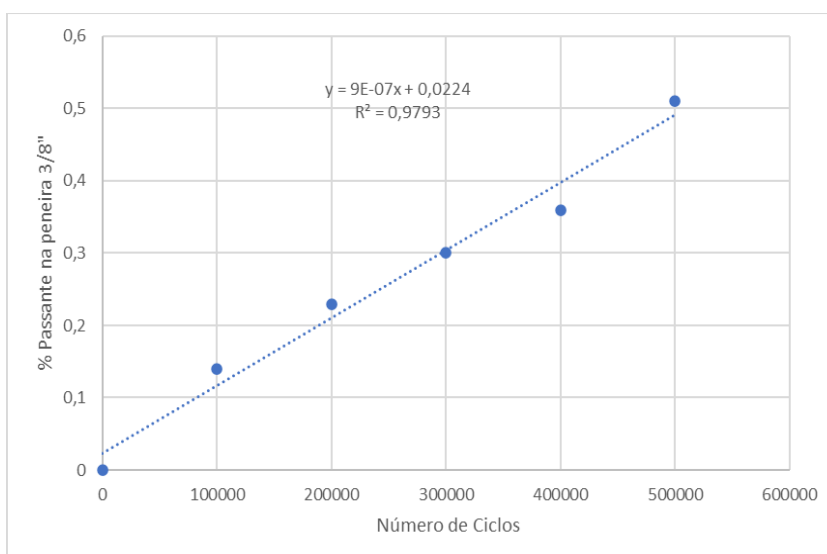


Figura 9 – Gráfico número de ciclos x passante 3/8" – Australiana.

Fonte: Autores (2025).

Por meio das equações geradas pelos gráficos da Figuras 8 e 9, 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 4).

Tabela 4 – 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

Fonte: Autores (2025).

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 colmatção 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%.

4.1 Análise dos Resultados de Geogauge H4140

A Tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de Geogauge H4140 para as faixas AREMA/ABNT e australiana.

Tabela 5 – Resultado do Ensaio de Geogauge H4140.

Material	Rigidez - K (MN/m)	Módulo de Rigidez Elástico - Egeo (MPa)	Módulo de Resiliência - MR (MPa)	Módulo de Cisalhamento - G (MPa)
AREMA/ABNT - Inicial	10,56	45,92	160,32	70,65
AREMA/ABNT - Final	10,75	46,74	161,86	71,91
Australiana – Inicial	11,71	50,91	169,50	78,32
Australiana – final	11,81	51,38	170,34	79,05
Nova Faixa Proposta	11,89	51,70	170,92	79,54

Fonte: Autores (2025).

De acordo com os resultados do Ensaio de Geogauge H4140, em relação à Rigidez da faixa da AREMA/ABNT, houve uma pequena melhora nos parâmetros do ciclo final em relação ao inicial. Em relação aos resultados do Módulo de Resiliência (MR), Módulo de Rigidez Elástico (Egeo) e Módulo de Cisalhamento (G), também houve uma melhora nos resultados. Isso se deu pelo fato do melhor imbricamento dos grãos do ciclo final em relação ao ciclo inicial.

Em relação aos resultados de Rigidez (K), Módulo de Resiliência (MR), Módulo de Rigidez Elástico (Egeo) e Módulo de Cisalhamento (G) da faixa Australiana, também houve uma melhora nos parâmetros, quando se faz a comparação do ciclo inicial em relação ao ciclo final. Com a quebra dos materiais, ocorreu um melhor encaixe das partículas que compõem o lastro, isto é, houve um melhor imbricamento do material, com isso reduzindo-se os vazios e ficando mais compacto.

Quando é feita uma análise dos resultados das faixas granulométricas utilizados no estudo, os melhores resultados foram da faixa Australiana. Em relação à quebra do material, fica evidente que o imbricamento dos grãos na faixa Australiana é melhor. Isso se mostra evidente quando é feita a análise dos resultados com o Geogauge H4140.

Os resultados abalizam a eficiência da faixa Australiana em relação a faixa AREMA/ABNT, para o material de gnaisses, e para uma ferrovia com capacidade de carga de 40 t/eixo. Ficando evidente que a norma ABNT NBR 5564/2014 precisa

passar por um estudo mais amplo em relação às faixas granulométricas a serem utilizadas como lastro e particularizando as matrizes rochosas.

Quando é feita a análise dos valores obtidos pelo Geogauge H4140 considerando-se a nova faixa proposta, é observado que os resultados são bem próximos aos da faixa Australiana. Corroborando que, mesmo tendo materiais retidos em uma quantidade maior de peneiras, a rigidez da camada não foi afetada significativamente.

4.2 Proposta de uma nova faixa granulométrica para material de lastro

Depois de feita as análises, levando em consideração os seguintes pontos:

- Cc;
- CNU;
- Módulo de Finura;
- Quebra dos materiais por peneira;
- Índice de Contaminação;
- Recalque da camada de lastro;
- Necessidade de uma faixa mais bem graduada;
- Melhor deformação permanente;
- Redução do número de vazios;
- Melhor imbricamento dos grãos.

Foi proposta uma faixa granulométrica ideal para o material em estudo, considerando-se que esse material é uma brita de gnaiss, e a carga solicitada é de 20 t/roda, simulando uma ferrovia com capacidade de carga de 40 t/eixo.

A Figura 10 apresenta essa nova faixa proposta.

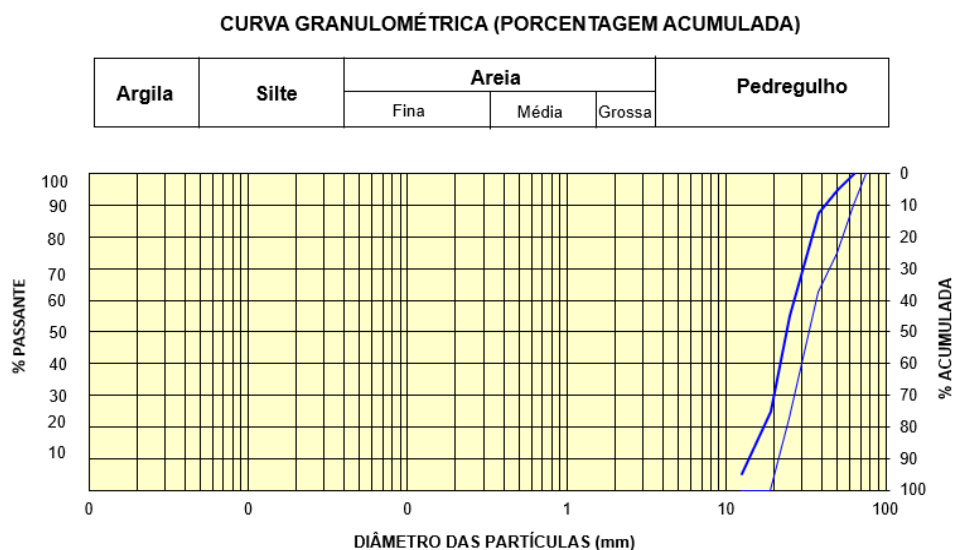


Figura 10 – Proposta de uma nova faixa granulométrica para o material em estudo.

Fonte: Autores (2025).

Essa nova faixa proporciona uma granulometria mais bem graduada, diferente da faixa da ABNT, que é muito uniforme. Com essa faixa mais bem graduada, há agregados de diferentes tamanhos com a finalidade de proporcionar um melhor imbricamento dos grãos. A Tabela 6 apresenta os limites dessa faixa.

Tabela 6 – Limites da Nova Faixa Proposta.

ABERTURA DE PENEIRAS (POLEGADAS)	% PASSANTE (EM MASSA)
----------------------------------	-----------------------

	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
3	-	-
2 ½	90	100
2	75	95
1 ½	62,5	87,5
1	22,5	55
¾	15	25
½	0	3

Fonte: Autores (2025).

Quando é utilizada uma granulometria onde há presença de agregados mais graúdos e menos graúdos, a camada trabalha melhor, isto é, tem uma menor deformação permanente.

Foi projetada uma curva granulométrica que se enquadra nessa nova faixa a fim de ter parâmetros de comparação com as granulometrias utilizadas. Essa granulometria está apresentada na Figura 11.

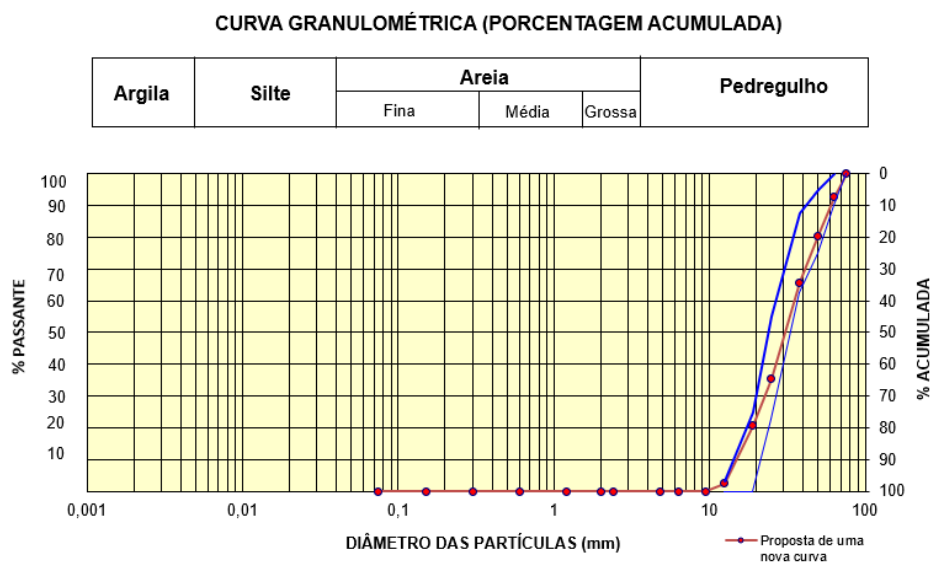


Figura 11 – Enquadramento da Granulometria à Nova Faixa Proposta.

Fonte: Autores (2025).

Quando foi realizada a comparação entre as 3 (três) granulometrias, temos a diferença de curva entre elas. Essa comparação está apresentada na Figura 12.

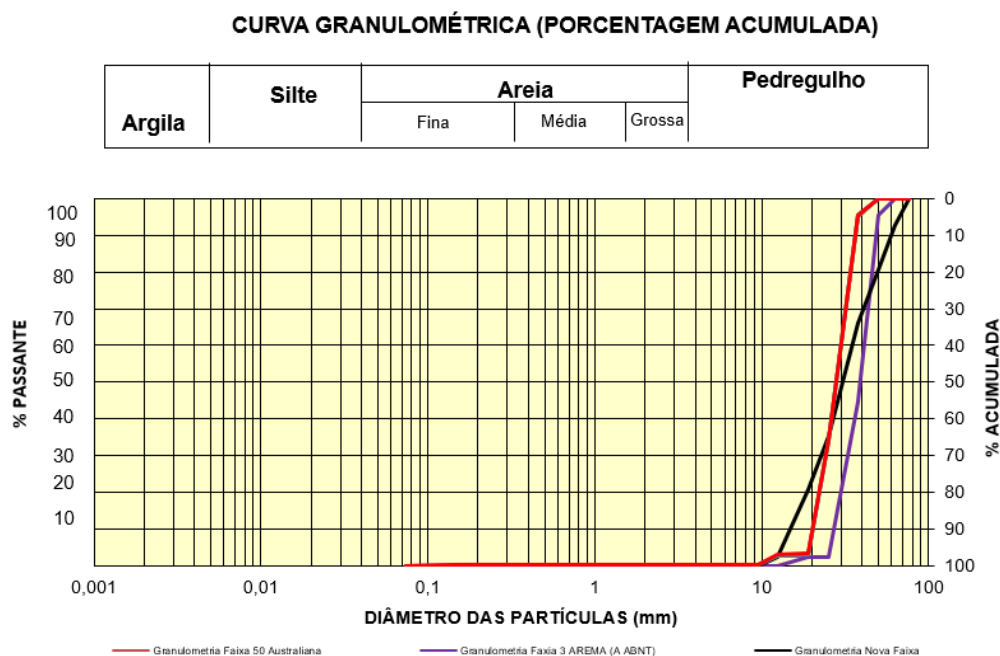


Figura 12 – Comparação Entre as Faixas Granulométricas.

Fonte: Autores (2025).

Comparando-se as 3 (três) curvas granulométricas, é possível se perceber que as curvas da faixa da AREMA/ABNT e Australiana são muito uniformes, diferente da granulometria baseada na faixa granulométrica proposta nesse estudo.

A nova curva é mais inclinada, um formato mais bem graduado, o que é abalizado por estudos já mencionados nesse trabalho.

Isso fica bem evidenciado quando é feita a comparação dos parâmetros de CNU e Cc das curvas, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores Comparativos de Cc e CNU.

	Cc	CNU
AREMA/ABNT	0,79	1,45
Australiana	0,96	1,50
Nova Granulometria	1,1	2,33

Fonte: Autores (2025).

Como observado na Figura 12e na Tabela 7, a curva granulométrica proposta pela nova faixa se tornou melhor graduada. Isso fica evidenciado pelo valor encontrado do Cc, que ficou entre 1 e 3, que indica uma curva bem graduada. Diferente do que foi encontrado para as faixas da AREMA/ABNT e australiana.

Em relação ao CNU, o valor encontrado se enquadra no intervalo proposto por Buddhima Indraratna e Salim (2002), que é de 2,3 a 2,6. Valores de CNU dentro desse intervalo são ideais para serem utilizados como lastro ferroviário, sem prejudicar a drenagem da via segundo os autores.

Utilizando-se a Fórmula de Alaymani e Sem (1993), tem-se um valor de k igual 2,69 cm/s. Esse valor é inferior aos das faixas AREMA/ABNT e 50 australiana.

Quando é feita a comparação entre o valor encontrado com o de referência de Terzagui (1967) apud Marchioni e Silva (2010), conclui-se que a nova faixa granulométrica não prejudica a drenagem da via.

Fernandes et al (2012) fizeram um estudo de teste de vazão utilizando faixa granulométrica da AREMA e australiana. O teste foi realizado utilizando um cilindro de PVC com diâmetro de 100 (cem) mm e comprimento de 350 (trezentos de

cinquenta) mm (equivalente à espessura da camada de lastro). Os valores de vazão foram 1,35 cm/s e 0,73 cm/s, para as faixas australiana e AREMA, respectivamente. Quando é feita a comparação dos valores encontrados no estudo com o valor da nova faixa, pode-se perceber que a drenagem não foi prejudicada.

Ferreira et al (2015) estudaram a capacidade drenante de diferentes tipos de materiais utilizados como lastro ferroviário. Em seu estudo utilizando a brita como lastro, que era classificado como razoavelmente limpo, o coeficiente de permeabilidade (k) médio foi de 0,0049 cm/s. No mesmo estudo, mas utilizando-se escória de aciaria como lastro (classificado como moderadamente limpo), o coeficiente de permeabilidade (k) médio foi de 0,0034 cm/s.

Raymond et al (1976) afirmaram que, para uma drenagem eficiente, o coeficiente de permeabilidade do lastro teria que ser maior que 10-5 m/s.

A condutividade hidráulica do lastro se reduz de acordo com o aumento do seu grau de contaminação, como apresentado na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Condutividade hidráulica para o lastro.

Grau de Contaminação	Índice de Contaminação	Condutividade Hidráulica (kh)	
		(in./sec.)	(cm/s)
Limpo	< 1	1 - 2	2,5 – 5,0
Moderadamente Limpo	1 - 9	0,1 - 1	0,25 – 2,5
Moderadamente Contaminado	10 - 19	0,06 - 0,1	0,15 – 0,25
Contaminado	20 - 30	0,0002 - 0,06	0,0005 – 0,15
Altamente Contaminado	> 39	< 0,0002	< 0,0005

Fonte: Selig et al (1994); Adaptado pelos autores (2025).

Pelo resultado do coeficiente de permeabilidade apresentado pela nova faixa granulométrica (2,69 cm/s), o valor se enquadra no especificado por Selig et al (1994).

O valor de k para a nova curva proposta foi menor em comparação aos valores encontrados para a AREMA/ABNT e Australiana. Mas de acordo com o intervalo para valores de CNU proposto por Buddhima Indraratna e Salim (2015), a nova granulometria proposta não prejudica a drenagem da via. E como a granulometria tende a fornecer um melhor imbricamento dos grãos, o mosaico da camada trabalhará melhor, proporcionando uma menor quebra do material, aumentando sua vida útil. Como terá uma quebra menor, a drenagem não fica prejudicada em longo prazo.

O DMC da nova curva foi de 63,0 mm. Mesmo com o DMC maior em relação aos valores da faixa AREMA/ABNT e australiana, o imbricamento do material se torna melhor, pois a curva é mais contínua e é bem graduada, fazendo com o encaixe das partículas de lastro se torne melhor.

Outro parâmetro que deve ser considerado é o Módulo de Finura. A comparação desse valor está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores Comparativos do Módulo de Finura.

	Módulo de Finura
AREMA/ABNT	8,53
Australiana	8,03
Nova Granulometria	8,13

Fonte: Autores (2025).

O módulo de finura da nova faixa ficou entre o valor da AREMA/ABNT e australiana. Isso porque a granulometria da AREMA/ABNT tem a presença maior de agregados nas peneiras mais graúdas, sem a presença na parte mais fina. A granulometria da faixa australiana tem pouco material nas peneiras mais graúdas e é mais bem distribuída a partir da peneira de 1”.

Já a nova faixa proposta, faz uma mescla de materiais mais graúdos com tamanhos de grãos menores, o que provoca uma melhor distribuição. O módulo de finura calculado mostra uma granulometria mais fina, mais bem distribuída, com a presença de agregados com tamanhos que variam de 2 ½” a ½”, formando um melhor mosaico entre os grãos, um melhor

imbricamento, possibilitando uma menor deformação permanente e uma redução da quebra dos materiais, e consequentemente uma maior vida útil da camada de lastro.

Quando é feita a análise dos resultados de Geogauge H4140, os parâmetros da faixa 50 australiana se mostraram mais eficientes que a AREMA/ABNT. Melhorando os parâmetros de curva granulométrica, com a nova faixa proposta, os resultados do Geogauge H4140 apresentaram uma rigidez um pouco maior do que a faixa australiana. Mas esse aumento não foi significativo. Mesmo com a rigidez da faixa australiana sendo maior do que a da AREMA/ABNT, a quebra do material foi bem menor. A tendência é que com a melhoria dos parâmetros de CNU, Cc, módulo de finura, rigidez e módulo de resiliência, a nova faixa tem a tendência de ser mais eficiente, com um índice quebra de lastro menor.

Uma granulometria mais bem graduada foi uma das postostas de estudo no trabalho de Muniz (2002). O questionamento foi o porquê de, no Brasil, se usar uma granulometria muito uniforme. A granulometria para lastro deveria ser mais bem graduada, isto é, menos uniforme. Além disso, mais bem graduada, diferente das usualmente utilizadas.

Como é preconizado pela ABNT, duas faixas para serem utilizadas no Brasil, não são suficientes pelas diferentes solicitações de carga e pela 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 que passa pela via.

4.3 Análise em relação à Norma ABNT NBR/2014

Pelos resultados apresentados, fica evidente que as concessionárias ferroviárias, precisam repensar e realizar estudos pensando e propondo faixas granulométricas mais eficientes para camada de lastro, levando em consideração não apenas a matriz rochosa que está sendo utilizada, mas também na carga que passa pela via. E posteriormente a ABNT abalizar esses estudos por meio de normas.

O número de faixas granulométricas preconizadas pela ABNT não é o suficiente pelos diferentes tipos de cargas, automaticamente pesos, transportados por nossas ferrovias (carga geral, minério e passageiros). Além dos diferentes tipos de cargas, outro fator são as diferentes matrizes rochosas que podem ser utilizadas como camada de lastro ferroviário (calcário, granito, gnaiss, entre outros).

A Norma Brasileira não considera que a matriz rochosa, que está sendo utilizada como material de lastro, tem relação direta com a resistência e vida útil da camada de lastro.

Além disso, as duas faixas preconizadas pela ABNT são muito uniformes, o que ocasiona uma maior quebra dos grãos, reduzindo a vida útil da camada, provocando um maior gasto com manutenção.

A norma australiana preconiza não apenas duas faixas, mas sim 6 (seis) faixas para serem utilizadas como lastro, assim como a norma europeia. Já a norma americana, preconiza 7 (sete) possíveis faixas para serem utilizadas.

Em relação a alguns ensaios, poderia ser analisado, se caso não tiver atendido alguns valores de norma, a possibilidade de se utilizar o agregado, caso tenha atendido outros quesitos (ensaios de resistência e forma, por exemplo). O ensaio de porosidade é um exemplo. Caso o material não tenha se enquadrado nos valores de norma, é descartado, pois é um dos ensaios de caráter impeditivo. Tal ensaio foi adotado pela ABNT em função de normas existentes nos Estados Unidos, onde se tem o efeito de congelamento do material, devido às baixas temperaturas.

Essas baixas temperaturas provocam o congelamento da água nos poros do agregado, fazendo com que ocasione fraturas, provocando a perda de resistência e consequentemente a quebra do material e diminuição da vida útil. Esse congelamento faz com que o comportamento mecânico do agregado utilizado como lastro fique comprometido. Esse problema de congelamento de amostra não ocorre em ferrovias brasileiras, pois o clima é predominantemente tropical.

Há estudos com materiais do lastro, que possuem valores de porosidade e absorção maiores que os valores de norma, mas apresentam altos valores de resistência, se enquadrando nos ensaios de Abrasão Los Angeles, Resistência ao Choque e Compressão Axial.

Estudos realizados por Oliveira (2013) e Fernandes (2010) mostraram que valores de porosidade e absorção fora dos preconizados pela norma não tiveram interferência nos resultados de caracterização mecânica. Os estudos foram feitos com escória de ferro-liga e escória de aciaria, respectivamente. A escória de aciaria utilizada no estudo passou por um processo de estabilização.

Faria et al (2019) fez um estudo de caracterização de agregados basálticos utilizados como lastro ferroviário na Ferrovia Norte-Sul. De acordo com resultados obtidos, dois materiais apresentaram o valor de porosidade e absorção acima do preconizado por norma, mas, em relação aos ensaios mecânicos, se enquadraram nos valores de referência.

Isso mostra que é preciso ser analisado não apenas os ensaios preconizados pela norma, mas, também, é preciso desenvolver estudos da petrografia do material, a fim de se analisar os reais parâmetros que respaldariam a sua utilização, ou não, como material de lastro.

5. Conclusões

O material de lastro especificado pela ABNT NBR 5564/2014 foi menos eficiente em comparação ao material da faixa 50 australiana. Embora o material da ABNT seja mais graúdo, com DMC e Módulo de Finura maiores, ele apresentou um percentual de quebra significativamente maior devido ao menor imbricamento dos grãos. Isso ocorreu porque o encaixe 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, especificada pela ABNT 5564/2014, mostrou-se muito uniforme e mal graduada, não sendo eficiente para as condições estudadas. 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.

As normas americana, australiana e europeia oferecem uma maior variedade de faixas granulométricas, permitindo uma melhor adaptação aos diferentes tipos de carga e materiais pétreos disponíveis. 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 na tese, 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.

A quantidade de faixas granulométricas especificadas pela ABNT (duas faixas) é insuficiente, considerando a diversidade de matrizes rochosas disponíveis no Brasil para uso como lastro ferroviário. Cada matriz tem suas características de resistência, e isso deve ser levado em consideração, assim como a carga passante pela via.

Considerando a alta taxa de quebra do material de lastro nas duas faixas estudadas, propõe-se uma nova faixa granulométrica que leva em conta a matriz rochosa de gnaiss e uma carga por eixo de 40 toneladas.

A faixa proposta foi pensada a partir de parâmetros obtidos dos resultados da granulometria do material que se enquadraram nas faixas AREMA/ABNT e Australiana.

Pelos resultados obtidos por meio dos ensaios com a nova faixa, pôde-se constatar que há uma tendência da granulometria que se enquadrar a ela tenha uma menor deformação de finos, uma menor deformação permanente e, por consequência, uma maior vida útil do material a ser utilizado como camada de lastro.

Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da Escola de Minas de Ouro Preto (UFOP). Ao Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia da Escola de Engenharia da UFMG. Ao GeoTrans (Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Transportes). Este trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e da Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE) - Processo PPE-00023-21, Governo de Minas Gerais - Seinfra-MG, Núcleo de Desenvolvimento Tecnológico Ferroviário do Estado de Minas Gerais - NDF e CNPq.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 5564/2014 – Via Férrea – Lastro Ferroviário – Requisitos e Métodos de Ensaio, 2014.
- Alyamani, M. S. e Sen, Z. Determination of Hydraulic Conductivity from Complete Grain-size Distribution Curves. Ground Water, 1993.
- Bathurst, L. A., Heer, A. D. An improved analysis for the determination of required ballast depth. Proceedings, American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 1995.
- Brina, H. L. Estradas de Ferro. Rio de Janeiro, 1988.

-
- Faria et al. Caracterização de agregados basálticos do Estado de Goiás para uso como lastro ferroviário no Lote 4S da Ferrovia Norte-Sul, 33 ANPET, 2019.
- 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.
- Fernandes, D.P. Metodologia para estabilização química do agregado siderúrgico para aplicação como lastro ferroviário., Dissertação de Mestrado, UOP, 2010.
- Fernandes, G. Oliveira, R. W. H. Hilário, R. Q. Senna, L. R. N. Alves, H. C. Cavalcante, J. H. F. Fernandes, D. P. Estudo Comparativo das Amostras de Agregados Britados nas Faixas Granulométricas da Arema e Australiana para Lastro Padrão, Cobramseg, 2012.
- 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, 2002.
- Instrução de Serviço Ferroviário – ISF-207: Estudos Geotécnicos, 2017.
- Marchioni, M. L. Silva, C. O. Sistemas Construtivos: Pavimentos Permeáveis – ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2010.
- 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.
- Oliveira, R.W.H. Caracterização da escória de ferro silício-manganês para aplicação como agregado em pavimentação ferroviária, Dissertação de Mestrado, UFOP, 2013.
- 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.
- Stopatto, S. Via Permanente ferroviária: conceitos e aplicações. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1987.