

Comparação dos Módulos de Elasticidade e de Resiliência de Matrizes Rochosas e Escória de Aciaria Usadas Como Lastro Ferroviário

Lucas Fernando Vieira Gomes
UFOP, Ouro Preto, Brasil, lucasfvgomes@gmail.com

Jéssika Cosme
UFOP, Ouro Preto, Brasil, jessikacosme@hotmail.com

Adriane Dorninger Feitosa
UFOP, Ouro Preto, Brasil, dri_dorninger@hotmail.com

Wanessa Damião da Silva
UFOP, Ouro Preto, Brasil, wanessafdsilva@gmail.com

Gilberto Fernandes
UFOP, Ouro Preto, Brasil, gilberto@em.ufop.br

RESUMO: O presente trabalho visa por objetivo traçar uma comparação entre três dos mais comuns tipos de matrizes rochosas existentes e passíveis de uso como lastro ferroviário no Brasil e também de uma amostra de escória de aciaria, obtida a partir da produção de aço. As rochas naturais mais utilizadas são: basalto, gnaiss e granito. A norma técnica que preconiza o uso de um determinado lastro é a NBR 5564 de 12/2011, no entanto, não há exigência quanto a origem da rocha ou da escória utilizada. Além dos ensaios requeridos pela norma, foram realizados outros com o uso do aparelho GeoGauge™, que mensura o módulo de rigidez e o módulo de Young dos materiais. O objetivo é se comparar os valores encontrados para os quatro materiais dentro de uma mesma faixa granulométrica e com isso, espera-se obter uma importante avaliação do comportamento futuro do lastro de acordo com o tipo do componente de rocha utilizado e desta feita, verificar se há alguma matriz rochosa ou se a escória é a mais adequada para uso como lastro.

PALAVRAS-CHAVE: Lastro Ferroviário, Módulo de Rigidez, Módulo de Young, GeoGauge, Escória.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca no cenário mundial pela vasta extensão de seu território, o que pode acarretar dificuldades logísticas em função disto. Para tal, se faz necessário um ajuste na matriz de transportes, uma vez que num mundo de economia competitiva, os custos com transportes devem ser minimizados. Diante deste cenário, o desenvolvimento da utilização de transportes mais eficientes, com baixo custo

e com menor impacto ambiental quanto possível é mais que uma necessidade, é quase uma obrigação. Uma alternativa para este cenário são os transportes ferroviários. De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, existem no país aproximadamente 28.190 km de ferrovias, equivalente a aproximadamente 24% da matriz de transportes; valor considerado baixo, principalmente ao se comparar com outros países de extensões semelhantes, como a

Rússia, China, Estados Unidos, Canadá e Austrália, que possuem aproximadamente 45% cada. No caso da Rússia, tal cenário é ainda mais volatizado, com mais de 80% do transporte sendo feito através de ferrovias. Em 2007, o Governo Federal criou o PNLT – Plano Nacional de Logística e Transporte, que visa a um planejamento estratégico das políticas de transporte, levando-se em conta as diferenças encontradas em cada uma das cinco macrorregiões brasileiras: Norte, Nordeste, CentroOeste, Sudeste e Sul. Atualmente o programa encontra-se em sua 3ª fase. Posteriormente, em 2012, houve o lançamento do PIL – Programa de Investimentos em Logística: Rodovias e Ferrovias, o qual, através de parcerias público privadas (PPPs), busca dotar o Brasil de um sistema de transporte mais adequado a sua realidade e também de criar as bases para o crescimento sustentável do país nos próximos 50 anos. É esperado que o PNLT esteja completamente implementado até o ano de 2023. No PIL 2015 os investimentos projetados em ferrovias são da ordem de R\$ 86 bilhões, com destaque para a Ferrovia Bioceânica, que ligará a região Centro-Oeste, importante produtora de grãos, ao Oceano Pacífico, no litoral do Peru. A 2ª etapa do projeto buscará a continuação da via até o Porto de Açu, no Rio de Janeiro. O prazo para a conclusão dos estudos preliminares está previsto para maio de 2016 e a extensão em território nacional será em torno de 3.5 mil quilômetros a um custo estimado de R\$ 40 bilhões. Viu-se nos últimos 20 anos, desde 1996 especificamente, durante a desestatização pela qual passou o setor, que houve um incremento médio de 26% na quantidade de carga movimentada, diminuição da quantidade de acidentes e a construção de quase 2 mil novos quilômetros de ferrovias, entre 1995 a 2014. No momento, o cenário é favorável. Através de investimentos e incentivos constantes, o setor ferroviário atrai cada vez mais novos clientes e aumenta sua importância na economia nacional, seja facilitando o transporte de mercadorias ou gerando novas fontes de emprego. As ferrovias em uso no país possuem 3 tipos de bitolas: a de 1m (métrica), a de 1.6m (larga) e a mista, com os dois tipos. Diferentemente dos outros países

que possuem bitola unificada, o que poderá se tornar um agravante para o processo de expansão, tanto para o transporte de cargas quanto para o de passageiros. O transporte de passageiros é suplantado pelo de cargas por larga margem, quase na totalidade e os trechos estão concentrados nas regiões Sul e Sudeste. Porém, o estado de conservação das vias é insatisfatório. Seja por falta de interesse governamental ou anos por vários anos de economia estagnada e outros fatores, o que se viu desde os fins da década de 1970 até meados de 1995 foi o desaparecimento de quase 20 mil quilômetros de ferrovias no Brasil. Trechos com dormentes e trilhos removidos, crescimento desordenado da vegetação, desaparecimento de placas de sinalização, as ações provenientes do intemperismo e a falta de manutenção contribuíram de maneira drástica para esse quadro. Uma manutenção adequada é necessária a fim de que se garanta a preservação e a vida útil estabelecida em projeto para uma via ferroviária. Uma das etapas do dimensionamento do projeto é a escolha do lastro ferroviário a ser utilizado na via, das condições locais e a qual tipo de uso estará submetida. A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT possui normas que regulam as diretrizes para projetos. Especificamente para o lastro, tem-se a norma NBR 5564/2011 – Lastro Ferroviário – Requisitos e Métodos de Ensaio, que fornece todos os ensaios e procedimentos pelos quais o material deverá passar antes de ser considerado apto para uso como lastro ferroviário. Devido ao aumento substancial que o setor vem passando nos últimos vinte anos, novas metodologias e métodos se fazem necessários. Diversos estudos tem buscado incorporar a análise do resultado dos módulos de resiliência e de rigidez segundo o módulo de Young das camadas quando se analisa um pavimento rodoviário ou ferroviário, o que não ocorre de forma mais rotineira nos países menos desenvolvidos. Tendo este fato em mente, o presente trabalho buscou incorporar essas análises na avaliação de três matrizes rochosas facilmente encontradas em vias ferroviárias no país (granito, basalto e gnaiss) e também de uma escória de aciaria, usada em alguns trechos experimentais da

Estrada de Ferro Vitória-Minas, com resultados bastante satisfatórios.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Objetivos do Trabalho

A pesquisa consistiu na análise, via ensaios de laboratório e na simulação do comportamento do lastro num recipiente unicamente construído para esse fim e dos valores encontrados para os módulos de Young e da rigidez dos quatro diferentes materiais utilizados. Após os ensaios de caracterização exigidos pela norma é que se realizou o uso do aparelho GeoGauge sobre o material colocado no recipiente que visava simular a atuação do lastro numa via férrea comum. Com isso, evitou-se o uso de algum material que não atendesse aos requisitos exigidos pela norma. O recipiente onde o material foi depositado para análise com o GeoGauge é uma caixa circular de concreto com 62 centímetros de diâmetro e 40 centímetros de profundidade. Com isso, obteve-se uma folta de aproximadamente 5 cm até o topo da caixa, pois foram usadas camadas com aproximadamente 35 cm de altura, algo fácil de se averiguar em ferrovias reais. Os ensaios com o aparelho exigem pouco tempo entre cada uma das medidas, aproximadamente 75 segundos e ficam armazenados internamente para posteriormente serem analisados num software próprio fornecido pelo fabricante. Finalizadas essas duas etapas do processo, teve início a etapa final do trabalho, que consistiu em se comparar os valores do módulo de elasticidade de cada um dos materiais e também se fazer uma correlação com a granulometria da amostra em questão. Por fim, verificou-se se alguma matriz rochosa ou a escória tiveram um desempenho mais notável em relação aos demais.

2.2 O Aparelho Humboldt GeoGauge

Este equipamento possui formato cilíndrico com 28 cm de diâmetro e 25,4 cm de altura, pesando cerca de 10kg. É constituído por uma base metálica em forma de anel, com diâmetro

exterior de 114mm e diâmetro inferior de 88mm, que mede pequenas deflexões sob ação de cargas muito pequenas. Na figura 1 abaixo, há uma vista do equipamento sendo usado em um dos ensaios realizados.



Figura 1. GeoGauge durante medições.

O aparelho é equipado com um vibrador mecânico que gera uma carga dinâmica baixa em 25 frequências que variam no escopo de 100 até 196Hz, atuando diretamente no substrato a ser analisado. A força é transmitida através do anel acoplado ao fundo do aparelho e o deslocamento resultante, que é usado para o cálculo do módulo de rigidez, é medido por dois sensores de velocidades localizados no interior do aparelho. O valor de cada um desses módulos de rigidez para todas as frequências é calculado para se obter uma rigidez média para as 25 frequências realizadas por leitura. Após a realização do ensaio, foram usadas as seguintes equações para a obtenção dos valores do módulo de elasticidade e resiliência de cada material analisado, respectivamente:

$$E_{GEO} = H_{sg} \frac{(1-\nu^2)}{1,77R} \quad (1)$$

onde:

E_{GEO} = módulo de elasticidade em MPa

ν = coeficiente de Poisson

R = raio do anel externo

H_{sg} = módulo de rigidez lida pelo GeoGauge em MN/m.

Para a determinação do módulo de resiliência, a equação usada foi:

$$M_r = 22,69(e^{0,12K_{ssg}}) \quad (2)$$

Onde:

M_r = módulo de resiliência, em MPa

K_{ssg} = módulo de rigidez detectada pelo aparelho (MN/m)

Por se tratar da camada de lastro, o valor do coeficiente de Poisson (ν) foi de 0,35 para todas as amostras.

2.3 Caracterização dos Lastros

Todos os materiais foram ensaiados conforme os preceitos da ABNT NBR 5564/2011, que versa sobre a caracterização de amostras para possível uso como lastro ferroviário. Cada matriz rochosa e também a escória tiveram que passar por uma extensa campanha de ensaios a fim de que se garantisse uma adequação ao exigido por norma. Com base desses valores e dados, é que se deu a posterior análise com o aparelho GeoGauge. Os ensaios realizados consistem nos seguintes: granulometria; abrasão Los Angeles; índice de tenacidade Treton; ensaio de macio e friável; ensaio de forma; ensaio de carga pontual; massa específica, porosidade e absorção; teor de argila em torrões e por fim, resistência a intempéries. Cada material deve obedecer a valores e faixas correlatas em cada um desses ensaios para que possa ser considerado apto para uso como lastro ferroviário. Na referida norma encontram-se as características e procedimentos inerentes aos ensaios especificados, da mesma forma os valores limítrofes.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados dos Ensaios

Após a realização de todos os ensaios e medições, a parte final do trabalho consistiu em se analisar e comparar os resultados obtidos. Houve um notável desempenho da escória de aciaria no que se refere aos índices físicos de resistência, fato explicado devido à presença de teores consideráveis de aço em sua composição. Quanto às análises feitas a partir dos resultados

obtidos pelo aparelho GeoGauge, a mesma tendência pôde ser observada. Nas figuras a seguir, há algumas etapas dos ensaios de caracterização dos materiais.



Figura 2. Ensaio de forma da amostra de granito.



Figura 3. Ensaio de granulometria da amostra de gnaiss.



Figura 4. Ensaio de absorção da amostra de basalto.



Figura 5. Quarteamento da escória de aciaria.

Agora, vê-se nas duas tabelas seguintes os valores obtidos destes materiais a partir do GeoGauge para os módulos de resiliência e de elasticidade, respectivamente.

Tabela 1. Módulo de Resiliência.

Material	σ (MPa)
Basalto	234,11
Escória	256,06
Gnaisse	239,12
Granito	247,67

Tabela 2. Módulo de Elasticidade.

Material	E(GPa)
Basalto	50,0
Escória	87,0
Gnaisse	38,0
Granito	63,0

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme visto, os valores obtidos pela escória foram superiores aos obtidos pelas matrizes naturais. Houve ainda uma campanha adicional de ensaios somente para aquele material, visto se tratar de um rejeito da produção industrial e potencialmente danoso ao meio ambiente. No entanto, nenhuma ressalva pôde ser aplicada, pois se comprovou tratar de material inerte e não condutor de eletricidade, o que poderia causar danos quando usado nas linhas ferroviárias. Uma outra consideração deve ser feita nos custos de aquisição de cada um destes materiais. Enquanto as matrizes possuem um

custo médio de R\$45,00/m³ nas pedreiras consultadas, a escória analisada fica em torno de R\$12,00/m³ para venda, de acordo com o fabricante. Ou seja, a escória de aciaria utilizada, além de ser mais resistente que as principais matrizes obtidas no mercado, tem um preço de aquisição menor e impacto ambiental quase nulo em relação às demais.

Ao produzir aço, as empresas geram coprodutos e resíduos. As escórias de alto-forno e aciaria são utilizadas na fabricação de cimento e pavimentação de vias, por exemplo. Já os pós e lamas coletados nos sistemas de controle de efluentes líquidos e atmosféricos são reciclados no processo, gerando benefício ambiental adicional, devido à redução do consumo de recursos naturais, como minério de ferro e carvão. O parque produtor de aço instalado no país é composto de 29 usinas, com uma capacidade instalada de 48,9 milhões de toneladas/ano de aço bruto ao final de 2015, sendo o 8º maior produtor mundial. De acordo com o Instituto Aço Brasil, em 2013, cada tonelada de aço produzido resultou em 594kg de coprodutos e resíduos, perfazendo-se um total de 17,7 milhões de toneladas. Destes, 29% foram resíduos de escória de aciaria, cujas maiores aplicações foram em bases de estradas (62%) e nivelamento terrestre (20%). Os demais usos são como aditivos agrícolas, cimento e lastro ferroviário (em torno de 5%). Vale observar ainda que quase 10% do total de escória produzido, em torno de 2 milhões de toneladas, é armazenado pelas indústrias, devido à falta de destinação ambiental adequada ou a ausência de compradores, evidenciando o potencial de uso como lastro ferroviário, uma vez que permitiria reduzir os estoques e áreas de armazenagem das empresas produtoras, diminuir a degradação ambiental oriunda da atividade extrativa de pedras britadas e também reduzir os custos para a produção de lastro, pois o metro cúbico da escória já britada é quase 4 vezes menor que a da rocha natural.

Com esta pesquisa, pôde-se observar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso da escória como lastro ferroviário. Existem diversas outros tipos de escória que eventualmente poderiam ter o mesmo uso. No entanto, cabe ressaltar que somente o aspecto

econômico não deve ser levado em conta, visto as implicações sócio-ambientais que uma escória não devidamente caracterizada possa vir a causar, sendo necessárias mais pesquisas a longo prazo com este tipo de material e posterior normatização das mesmas. Um exemplo passível de citação foi uma amostra de escória com altos teores de cal e magnésio em um trecho experimental de via ferroviária analisado pelos autores que, em períodos chuvosos, se ionizava e acabava por interferir nos sinais elétricos atuantes na via. Com uma norma mais abrangente e rigorosa que cobrisse o uso de escórias, é possível que problemas desse tipo não viessem a ocorrer.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a toda equipe do Laboratório de Ferrovias e Asfalto, aos professores Gilberto Fernandes e Fernando Abecê, à Fundação Gorceix, ao corpo docente de engenharia civil da Universidade Federal de Ouro Preto e aos seus familiares.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5564. Lastro Padrão Via Férrea. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 26p. (2011).
- BATISTA, L.C.M. (2007) *Determinação de Parâmetros de Deformabilidade de Camadas de um Pavimento a partir de Ensaio de Campo*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 197 p.
- FERNANDES, G (2005) *Comportamento de Estruturas de Pavimentos Ferroviários com Utilização de Solos Finos e/ou Resíduos de Mineração de Ferro Associados a Geossintéticos*, Dissertação de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 282 p.
- GOMES, E.C.A (2012) *Influência da não Saturação no Comportamento Mecânico de Camadas de Aterro*, Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Funchal, Região Autónoma da Madeira, Portugal, 113p.
- http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/Relatorio%20de%20Sustentabilidade_2014_web.pdf. Instituto Aço Brasil, acessado em 22/07/2016.
- <http://www.ccabril.org.br/estatisticas.asp>. Centro de Coprodutos Aço Brasil. Fonte:Relatório de Sustentabilidade 2012 do Instituto Aço Brasil.

- Acessado em 22/07/2016.
- http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder_Sustentabilidade_AcoBrasil_2016.pdf Instituto Aço Brasil, acessado em 22/07/2016.
- HUMBOLDT MFG. CO (2002). *H4140 Product Manual*, 875 Tollgate Road, Elgin, Illinois 60123 USA.
- VIANNA, A.A.D (2002) *Contribuição para o Estabelecimento de um Material Padrão e de Metodologia para a Calibração de Equipamentos de Ensaio Dinâmicos*, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.