

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

Atuação de agentes de intemperismo na degradação das propriedades do lastro ferroviário

Victor Antônio Moreira de Faria

Eng. Civil, Univ. Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), Brasil, victor.amf@aluno.ufop.edu.br

Tatiana Siman Magalhães

Graduanda, Univ. Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), Brasil, tatiana.magalhaes@aluno.ufop.edu.br

Júlia Amorim de Araújo

Graduanda, Univ. Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), Brasil, julia.araujo@aluno.ufop.edu.br

Daniela Antunes Lessa

Prof^a. DSc., Univ. Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), Brasil, daniela.lessa@ufop.edu.br

Hebert da Consolação Alves

M.Sc., Univ. Federal de Ouro Preto, Ouro Preto (MG), Brasil, alves@ufop.edu.br

RESUMO: Por ser um modo de transporte alternativo às rodovias e com alto potencial de eficiência em países de grande extensão territorial, estudos sobre a durabilidade de componentes da estrutura ferroviária são pertinentes, para prover mais segurança nas etapas de dimensionamento e escolha de materiais. Sendo o lastro uma das camadas mais importantes na estrutura da via, investigações sobre os agentes e fatores que influenciam em sua degradação são de extrema importância para de garantir uma vida útil adequada à via férrea. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de agentes de intemperismo físico e químico na alteração das propriedades de materiais de lastro, descritas na norma NBR 5564 (2011). Para isso, lastros de basalto, gnaiss e escória de aciaria LD foram submetidos a simulações cíclicas de intemperismos físico, por congelamento e degelo e químico, por imersão em solução de sulfato de sódio, tendo suas propriedades reavaliadas após os ciclos. Os resultados obtidos mostraram que o basalto apresentou aumentos expressivos do percentual de partículas finas após o intemperismo químico, mas manteve características mecânicas parecidas com as iniciais. O gnaiss e a escória apresentaram significativas alterações nas resistências, especialmente a escória, após as simulações de intemperismo químico. A avaliação da forma dos fragmentos dos três materiais indicou um aumento no percentual de partículas cúbicas, acompanhando o aumento da contaminação.

PALAVRAS-CHAVE: Ferrovias, Lastro Ferroviário, Intemperismo, Congelamento e Degelo, Cristalização, Escória de Aciaria.

ABSTRACT: As it is an alternative mode of transport to highways and with high potential for efficiency in countries with large territories, studies on the durability of components of the railroad structure are relevant, to provide more safety in the stages of design and selecting materials. As ballast is one of the most important layers in the track structure, investigations into the agents and factors that influence its degradation are extremely important to ensure an adequate useful life for the railway. Therefore, the objective of this work was to evaluate the influence of physical and chemical weathering agents in changing the properties of ballast materials, described at NBR 5564 (2011) specification. For this purpose, basalt, gneiss and LD steel slag ballasts were submitted to cyclical simulations of physical weathering, by freezing and thawing and chemical weathering, by immersion in sodium sulfate solution, having properties re-evaluated after the cycles. The results showed that basalt presents significant increases in the fine particles percentage after chemical weathering, but mechanical characteristics are similar to initials. The gneiss and slag presented significant resistance changes, especially the slag after chemical weathering simulations. The evaluation of the particles shape of the three materials indicates an increase in the percentage of cubic particles, following the increase in contamination.



KEYWORDS: Railroads, Railroad Ballast, Weathering, Freeze-Thaw, Crystallization, Steel Slag.

1 Introdução

Comparado ao modo rodoviário, o ferroviário apresenta maior eficiência no transporte de cargas em longos territórios e longas distâncias. O modo é adotado em vários países de extensão territorial semelhante ao Brasil, mas neste país, o percentual ativo da ferrovia no transporte de cargas é bem pequeno em comparação ao sistema rodoviário, de acordo com dados da ANTF (2019). Conforme exposto por Falcão (2013), o baixo investimento no setor ferroviário pode se tornar um gargalo para o crescimento econômico do país ligado às exportações.

O consumo de lastro por quilômetro de ferrovia é alto, representando uma demanda significativa de pedras britadas naturais, principal material constituinte do lastro. Nesse contexto, é importante a busca por alternativas mais sustentáveis de materiais para compor a via férrea. A maioria das pesquisas realizadas nas últimas décadas focam no uso da escória de aciaria como uma opção sustentável de substituição das pedras naturais do lastro. Fernandes (2010) por exemplo, aponta que a escória estabilizada (isto é, tendo seu processo expansivo já controlado) apresenta grande potencial para ser aplicada como lastro ferroviário.

A norma brasileira NBR 5564 (ABNT, 2011) estabelece os requisitos mínimos que um material britado natural deve atender para ser usado na função de lastro. A norma apresenta ensaios que avaliam características físicas e mecânicas dos materiais rochosos. Porém, a norma não estabelece ensaios para verificar a alteração dessas propriedades ao longo da vida útil do material na ferrovia. Agentes de intemperismo como o congelamento e degelo, estudado por Nurmikolu (2005), Park et al. (2020) e Santos et al. (2018) provocaram alterações significativas nas propriedades de materiais rochosos. Outros agentes que provocam a degradação das rochas são os químicos, presentes na natureza em cursos d'água poluídos e chuvas ácidas. Gonçalves e Brito (2014) e Frascá e Yamamoto (2014) observaram alterações em materiais rochosos após simulações desse tipo de intemperismo.

O objetivo do trabalho foi submeter materiais utilizados como lastro ferroviário a simulações de intemperismo e avaliar o grau de alteração de suas propriedades físicas e mecânicas. Os materiais utilizados foram britas de basalto e gnaiss e uma escória de aciaria LD, os quais foram submetidos a ciclos de congelamento e degelo, e imersão em solução de sulfato de sódio.

2 Lastro ferroviário

2.1 Materiais utilizados

O lastro ferroviário, conforme Brina (1988) é a parte da via férrea composta por material granular e transmite os esforços aplicados pelos dormentes às camadas inferiores da estrutura da via. Além de resistir ao carregamento imposto pelos dormentes, o lastro deve prover absorção de energia à linha e prover drenagem imediata da água que cair sobre a via (Selig & Waters, 1994). Brina (1988) classifica as pedras britadas de rochas naturais como o melhor tipo de lastro, com destaque os lastros graníticos. O autor ainda cita materiais alternativos, como a escória gerada na produção do aço, que, de acordo com Polese et al. (2006), podem ser utilizadas em vários setores da construção civil.

De acordo com dados de Pereira (1994), são gerados de 70 a 170 kg de escória para cada tonelada de aço produzida, o que no caso do Brasil, representa um grande impacto ambiental devido ao fato de o país ser um dos maiores produtores mundiais de aço. A maior limitação para o uso de escórias de aciaria é a sua expansibilidade, devido à presença principalmente de óxidos de cálcio e de magnésio (periclásio) livres (Polese, Carreiro, Silva, & Silva, 2006).

2.2 Requisitos

No Brasil, a norma NBR 5564 (ABNT, 2011) estabelece algumas exigências de tamanho, forma e resistência de britas naturais destinadas ao uso como lastro. Alguns parâmetros de interesse nesse trabalho estão descritos na Tabela 1, assim como alguns dos seus respectivos ensaios de avaliação.



Tabela 1. Algumas características necessárias ao lastro (ABNT, 2011).

Característica	Valor	Verificado
Forma média das partículas	Cúbica	Anexo A
Partículas não cúbicas (máximo)	15 %	Anexo A
Massa específica aparente (mínima)	2500 kg/m ³	Anexo B
Absorção de água (máxima)	0,8 %	Anexo B
Porosidade aparente (máxima)	1,5 %	Anexo B
Resistência à compressão axial (mínima)	100 MPa	Anexo D
Resistência ao choque (índice e tenacidade <i>Treton</i> máximo)	25%	Anexo E
Limite de massa unitária no estado solto	1,25 g/dm ³	NBR NM 45
Resistência ao desgaste (abrasão Los Angeles máxima)	30 %	NBR NM 51

2.3 Degradação do lastro

Selig e Waters (1994), Nurmikolu (2005) relacionam diretamente a degradação do lastro com o aumento do percentual de materiais finos. Selig e Waters (1994) aponta como contaminação total o percentual de 30% de finos (estimativa de engenheiros ferroviários britânicos), indicando o fim da vida útil do lastro segundo Pires et al. (2017). Além de alguns valores de diâmetros adotados como referência na classificação de materiais finos, existem também alguns índices de contaminação. Um dos mais utilizados, é o *Fouling Index* - F_I , apresentado por Selig e Waters (1994). Ele é calculado a partir da soma de $P_{4,75}$ com $P_{0,075}$, que correspondem aos percentuais de massa de material passantes nas peneiras de 4,75 e 0,075 mm respectivamente.

Assim como as próprias solicitações do tráfego provocam a degradação progressiva do lastro, agentes de intemperismo também podem ser os responsáveis por esse fenômeno. Um dos intemperismos que merecem atenção é o congelamento e degelo. Ao decair de 4 para 0 graus celsius, a água apresenta aumento de volume, ao contrário da maioria dos materiais. No interior de poros de materiais rochosos, esse aumento de volume, na ordem de 9% (Ondrášek & Kopecký, 2014) provoca um aumento da pressão hidráulica que pode conduzir a uma ruptura imediata do poro ou fissuração progressiva por fadiga ao longo de ciclos. O efeito desse fenômeno tem sido estudado em rochas utilizadas na construção civil, com destaque para os trabalhos de Karaca et al. (2010), Park et al. (2020) e Demirdag (2013). Nurmikolu (2005) e Santos et al. (2018), de forma mais específica, estudaram os efeitos do congelamento e degelo em materiais de lastro.

A respeito dos agentes químicos de intemperismo, destaca-se o sulfato de sódio (Na_2SO_4), que além de sua ação química direta sobre matrizes rochosas, produz um efeito secundário bastante degradante em solução aquosa, a cristalização salina. Em casos de mudanças de temperatura, a solubilidade da maioria dos sais também muda, e dessa forma, uma solução de Na_2SO_4 no interior de poros de rocha pode promover a formação de cristais. Segundo Gonçalves e Brito (2014), a formação desses cristais produz tensões internas e pode até desagregar o material. Dados sobre a degradação de rochas devido a esse processo podem ser encontrados em Ruiz Agudo et al. (2007), Rodrigues-Navarro e Doehne (1999), e Çelik e Aygün (2018). Santos et al. (2018) estudaram a alteração das propriedades do lastro considerando também essa forma de degradação.

3 Metodologia

Foram utilizados nesse trabalho três materiais de lastro: basalto, proveniente de Quirinópolis (GO), basalto de Santa Bárbara (MG) e escória de aciaria LD da cidade de Serra (ES).

3.1 Determinação dos parâmetros físicos e mecânicos

Os ensaios realizados para a obtenção dos parâmetros físicos foram: determinação da composição granulométrica, conforme a norma NBR NM 248 (ABNT; AMN, 2003); determinação da forma das partículas e determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água, conforme respectivamente o Anexo A e o Anexo B da norma NBR 5564 (ABNT, 2011) e determinação da massa unitária em estado solto seguindo o Método C da norma NBR NM 45 (2006).

Já os parâmetros de resistência mecânica foram determinados a partir dos seguintes ensaios: determinação da resistência ao choque conforme o Anexo E da norma NBR 5564 (ABNT, 2011), determinação



da resistência à abrasão como prescrito na norma NBR NM 51 (ABNT; AMN, 2001) e determinação da resistência à carga pontual, a partir da norma D-5731 (ASTM, 2016).

3.2 Simulações de intemperismo

O intemperismo físico por congelamento e degelo foi simulado a partir de uma adaptação do procedimento descrito na norma NBR 15845-4 (ABNT, 2015). Foram realizadas baterias de 25, 50 e 75 ciclos em amostras padrão de 30 kg de cada material, sendo um ciclo constituído do congelamento do material em estado de saturação por 16 h a uma temperatura de -15°C , seguido do descongelamento em estado submerso a temperatura ambiente por 8 h. Foi optado por descongelar os materiais no estado submerso para manter os poros preenchidos por água.

Para simular o intemperismo químico e provocar a cristalização, foram realizadas baterias de 20 e 40 ciclos de imersão das amostras padrão dos lastros em uma solução de sulfato de sódio (35% m/m). Os ciclos, adaptados do procedimento descrito no Anexo C da norma NBR 5564 (ABNT, 2011).

Os parâmetros físicos e químicos dos materiais foram avaliados antes das simulações a ao final de cada bateria de ciclos.

4 Resultados e discussão

4.1 Parâmetros físicos

4.1.1 Composição granulométrica

As curvas granulométricas dos materiais após ciclos de congelamento e degelo não apresentaram alterações visíveis em nenhum dos materiais. Em contrapartida, a imersão em solução de sulfato de sódio provocou alterações consideráveis na granulometria do basalto (Figura 1), que ultrapassou os limites do Padrão A da norma NBR 5564 (ABNT, 2011) especificado para linhas principais de ferrovia.

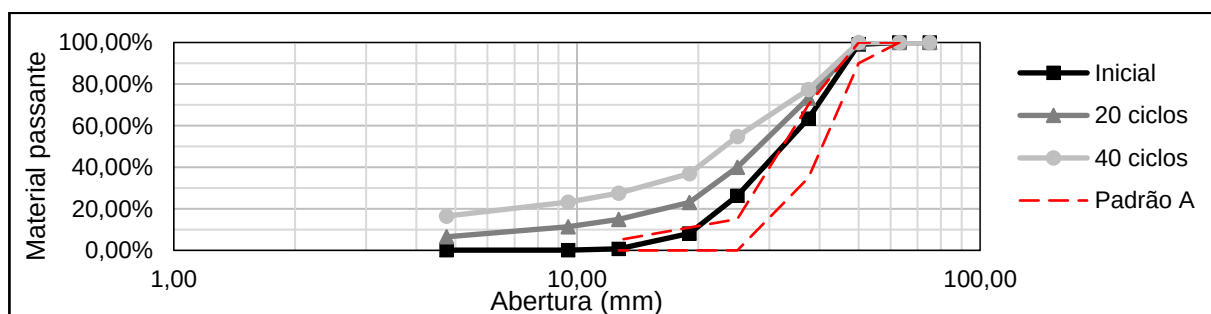


Figura 1. Alteração da curva granulométrica do basalto após ciclos de intemperismo químico.

4.1.2 Índice de contaminação (F_1)

Segue na Figura 2 e na Figura 3, os resultados dos índices de contaminação dos lastros.

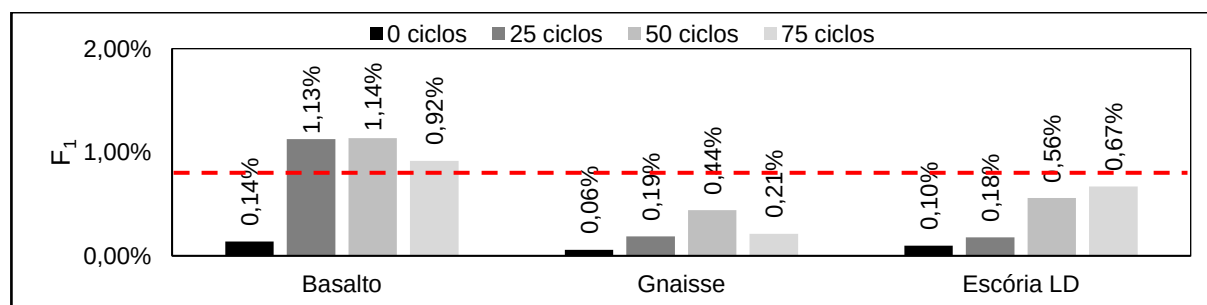


Figura 2. Alteração do índice de contaminação (F_1) após ciclos de intemperismo físico.

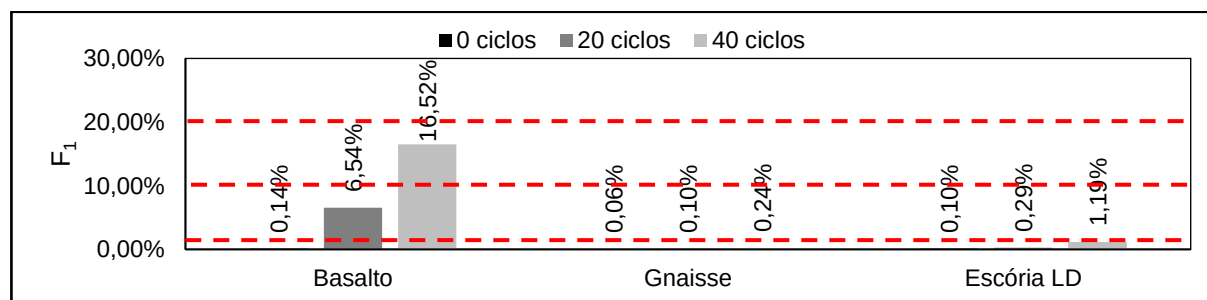


Figura 3. Alteração do índice de contaminação (F_1) após ciclos de intemperismo químico.

Os três lastros apresentaram uma tendência de aumento da contaminação após os ciclos de intemperismo físico. A incoerência entre os valores de contaminação dos materiais nos ciclos 50 e 75 é resultado de um provável desvio de amostragem. No que tange os ciclos de intemperismo químico, apenas no basalto apresentou um aumento significativo.

4.1.3 Forma das partículas

As simulações realizadas provocaram a diminuição no percentual de partículas não cúbicas no basalto e no gnaiss (Figura 4 e Figura 5), indicando a quebra dos materiais em partículas mais cúbicas. A escória não apresentou porcentagem significativa de fragmentos não cúbicos.

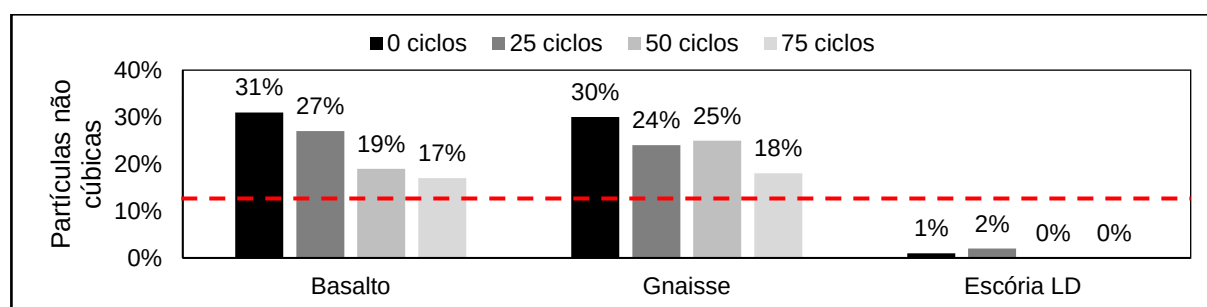


Figura 4. Alteração do número de partículas não cúbicas após ciclos de intemperismo físico.

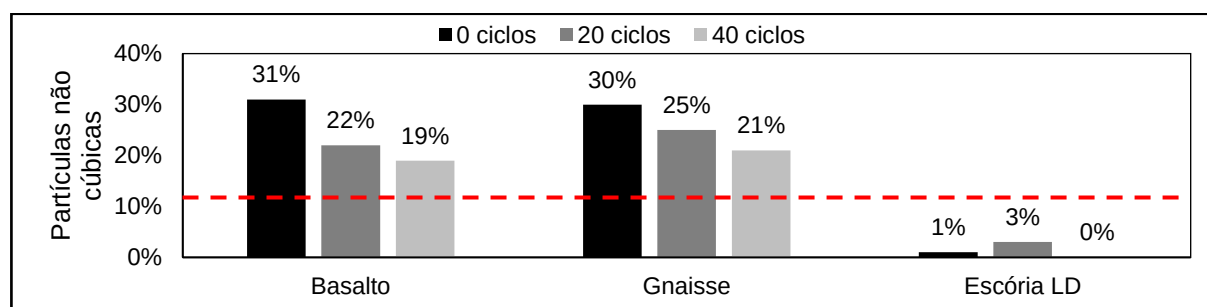


Figura 5. Alteração do número de partículas não cúbicas após ciclos de intemperismo químico.

4.1.4 Porosidade aparente

Seguem os gráficos com os valores de porosidade aparente obtidos na pesquisa:

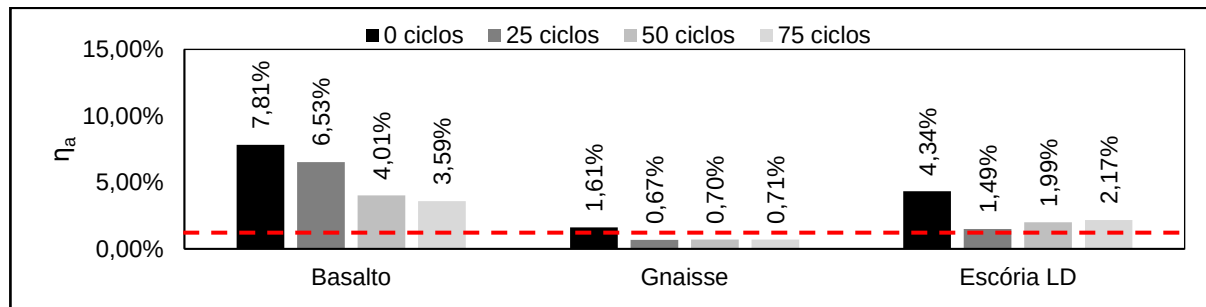


Figura 6. Alteração da porosidade aparente após ciclos de intemperismo físico.

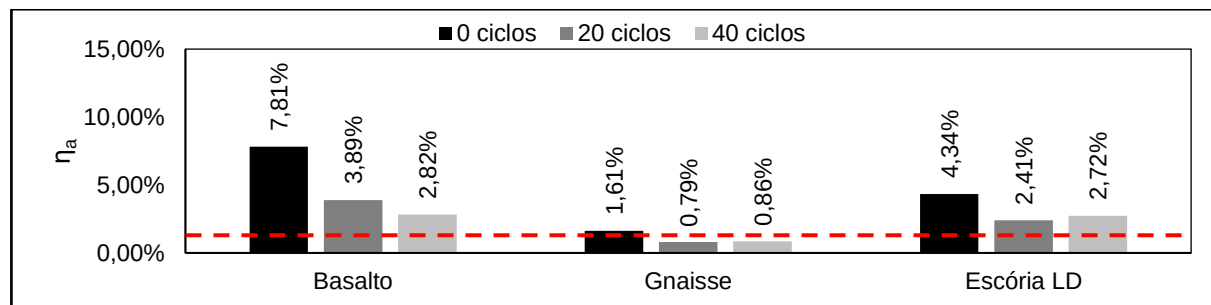


Figura 7. Alteração da porosidade aparente após ciclos de intemperismo químico.

Assim como Ruiz Agudo et al. (2007) verificou ao utilizar partículas de calcário, é possível observar a diminuição da porosidade dos materiais após os ciclos de intemperismo químico devido a precipitação dos cristais de sulfato de sódio nos poros do agregado. Porém, como verificou Demirdag (2013), era esperado o aumento na porosidade após os ciclos de intemperismo físico, o que não ocorreu.

4.2 Parâmetros mecânicos

4.2.1 Resistência à abrasão

Os gráficos com os resultados de desgaste por abrasão são mostrados na Figura 8 e na Figura 9.

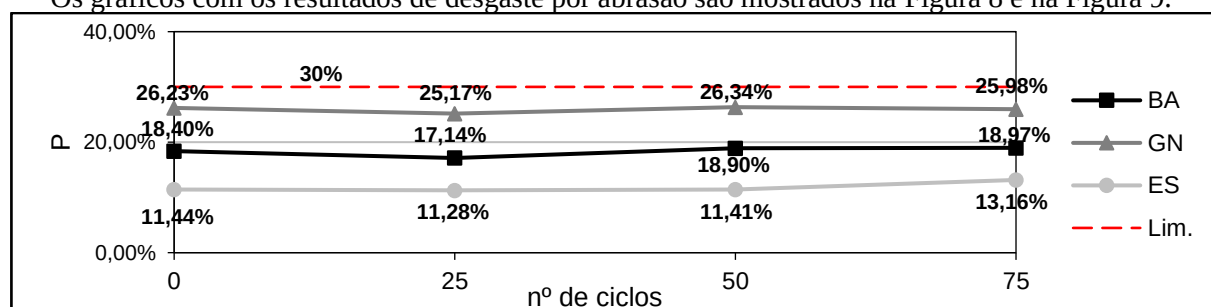


Figura 8. Alteração do desgaste por abrasão após ciclos de intemperismo físico.

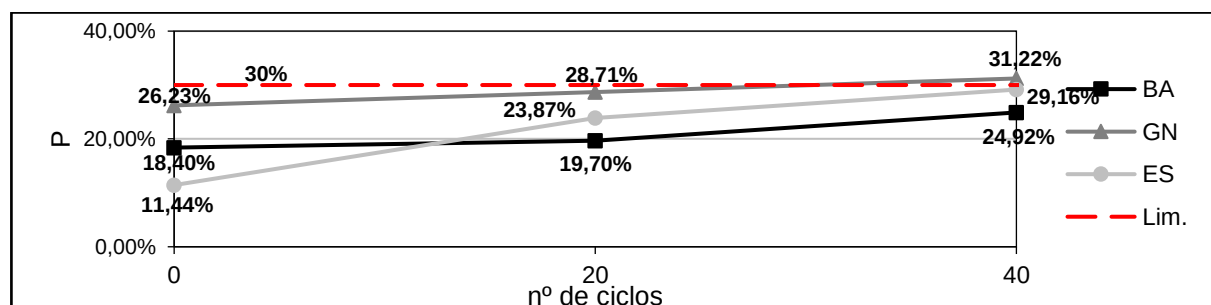


Figura 9. Alteração do desgaste por abrasão após ciclos de intemperismo químico.

Através dos gráficos é possível verificar que não houve alteração significativa no desgaste por abrasão após ciclos de congelamento e degelo, contrariando o que foi observado em Karaca et al. (2010), onde um aumento no desgaste é percebido. Após os ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio, houve o aumento do desgaste nos três materiais, destacando o gnaiss que, inclusive, ultrapassou o limite máximo de 30% da norma NBR 5564 (ABNT, 2011) ao final dos 40 ciclos. Santos et al. (2018) obtiveram tendências semelhantes de aumento no desgaste por abrasão do gnaiss e escória após ciclos de imersão em sulfato de sódio.

4.2.2 Resistência à carga pontual

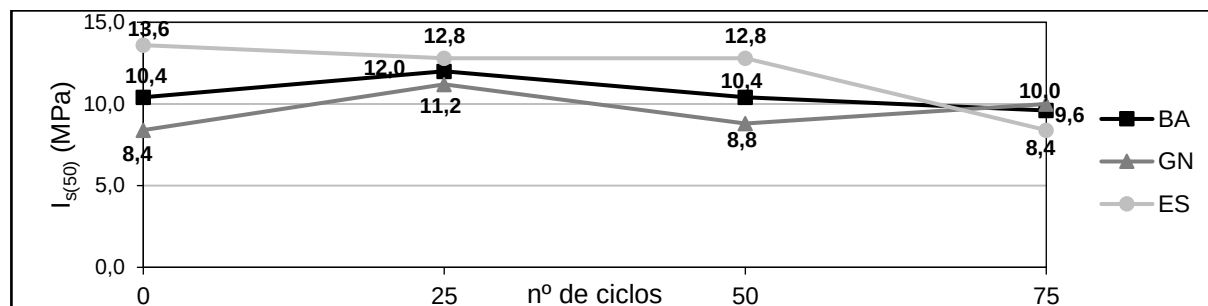


Figura 10. Alteração do Índice de Resistência à Carga Pontual Corrigido Para o Tamanho após ciclos de intemperismo físico.

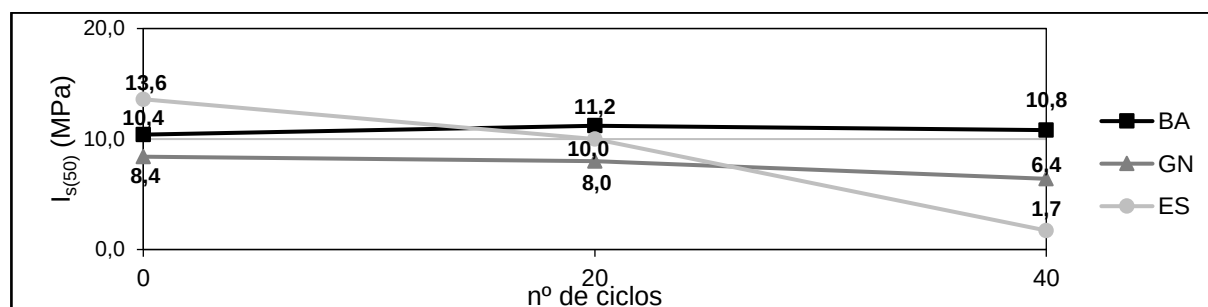


Figura 11. Alteração do Índice de Resistência à Carga Pontual Corrigido Para o Tamanho após ciclos de intemperismo químico.

Através da Figura 10 é possível verificar que a escória foi a única a apresentar decréscimo significativo em sua resistência após ciclos de intemperismo físico. Demirdag (2013), também observou pouca variação na resistência à carga pontual após ciclos de congelamento e degelo. Analisando os resultados da simulação de intemperismo químico (Figura 11), apenas o basalto não apresentou queda em sua resistência. Já a escória apresentou uma diminuição bastante expressiva, até o valor de 1,7 MPa ao final de 40 ciclos. Çelik e Aygün (2018) também verificaram perda de resistência mecânica após imersão em solução de sulfato de sódio.

5 Considerações finais

A cristalização se mostrou um mecanismo de degradação mais eficiente tomando como base as metodologias de simulação de intemperismo. O basalto foi o material que mais se alterou ao serem levados em conta as propriedades físicas, em especial, granulometria e contaminação. Apesar disso, se mostrou estável quanto a alterações nos valores de resistência mecânica. O gnaiss apresentou grandes perdas por abrasão após as simulações de intemperismo químico. Já a escória se mostrou estável quanto à alteração das propriedades físicas, mas se mostrou vulnerável à ação da cristalização em suas propriedades mecânicas, especialmente na resistência à carga pontual. A diminuição da porosidade observada após o congelamento e degelo precisa se confirmada com uma análise por adsorção de nitrogênio (BET) ou uma análise por porosimetria de mercúrio.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UFOP e ao pessoal do Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Escola de Minas pela ajuda indispensável na realização desse trabalho.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (2011). *NBR 5564: Lastro ferroviário: Requisitos e métodos de ensaio*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (2015). *NBR 15845-4: Rochas para revestimento - Parte 4: Determinação da resistência ao congelamento e degelo*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT; AMN. (2001). *NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT; AMN. (2003). *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT; AMN. (2006). *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ANTF. (2019). *Informações gerais - O setor ferroviário de carga brasileiro*. Obtido em 06 de Dezembro de 2021, de <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>
- ASTM. (2016). *D5731-16: Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials.
- Brina, H. L. (1988). *Estradas de ferro* (2ª ed.). Belo Horizonte: Editora UFMG.
- Çelik, M., & Aygün, A. (2018). The effect of salt crystallization on degradation of volcanic building stones by sodium sulfates and sodium chlorides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78.
- Demirdag, S. (2013). Effects of freezing–thawing and thermal shock cycles on physical and mechanical properties of filled and unfilled travertines. *Construction and Building Materials*, pp. 1395-1401.
- Falcão, V. A. (2013). A Importância do Transporte Ferroviário de Carga para a Economia Brasileira e suas Reais Perspectivas de Crescimento. *Modern Railway Track*, 45(2), 51-53.
- Fernandes, D. P. (2010). *Estudo de estabilização química, geo-mecânica e ambiental das escórias de aciaria LD para fins de aplicação como material de lastro ferroviário em vias sinalizadas*. Ouro Preto.
- Frasca, M. H., & Yamamoto, J. K. (2014). Deterioração de rochas graníticas em edificações e monumentos - Investigação por ensaios de alteração acelerada. *Revista Brasileira de Geologia de engenharia e Ambiental*.
- Gonçalves, T. D., & Brito, V. (2014). Alteration kinetics of natural stones due to sodium sulfate crystallization: can reality match experimental simulations? *Environmental Earth Sciences*.
- Karaca, Z., Deliormanli, A., Elci, H., & Pamukcu, C. (2010). Effect of freeze–thaw process on the abrasion loss value of stones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47, 1201211.
- Nurmikolu, A. (2005). *Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in structural layers of railway track*. Tampere.
- Ondrášik, M., & Kopecký, M. (2014). Rock pore structure as main reason of rock deterioration. *Studia Geotechnica et Mechanica*, XXXVI(1), 79-88.
- Park, K., Lee, K. K., & Kim, D. (2020). Analysis of Effects of Rock Physical Properties Changes from Freeze–Thaw Weathering in Ny-Ålesund Region: Part 1-Experimental Study. *Applied Sciences*, 10.
- Pereira, E. A. (Novembro de 1994). Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas a coque. 25º *Seminário de redução e Matérias-primas Siderúrgicas ABM*.
- Pires, J., Costa, R., Bernucci, L., Motta, R., & Moura, E. d. (2017). Degradação do lastro ferroviário – principais aspectos. *Transportes*, 62-74.
- Polese, M. d., Carreiro, G. L., Silva, M. G., & Silva, M. R. (2006). Caracterização Microestrutural da Escória de Aciaria. *Revista Matéria*, 11(4), 444-454.
- Rodriguez-Navarro, C., & Doehne, E. (1999). Salt Weathering; Influence of Evaporation Rate, Supersaturation and Crystallization Pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*(24), 191-209.
- Ruiz-Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P., & Rodriguez-Navarro, C. (2007). The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental Geology*(52).
- Santos, J. G., Pereira, T. C., Campos, F. A., Alves, H. d., Magalhães, T. S., & Faria, V. M. (2018). Análise da Influência da Porosidade e do Intemperismo na Resistência das Rochas Utilizadas Como Agregados Para Lastro Ferroviário. *COBRAMSEG 2018*, 120-126.
- Selig, E. T., & Waters, J. M. (1994). *Track geotechnology and substructure management*. New York: Thomas Thelford.