



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



MARCOS VINICIUS FELISBERTO MARTINS

**INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ESCÓRIA DE ACIARIA
LD E ROCHA DE GNAISSE UTILIZADAS COMO LASTRO
FERROVIÁRIO**

OURO PRETO

2024

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE ESCÓRIA DE ACIARIA LD E ROCHA DE GNAISSE UTILIZADAS
COMO LASTRO FERROVIÁRIO

Marcos Vinícius Felisberto Martins

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 14/10/2024

Área de concentração: Infraestrutura de Transportes e Materiais de Construção

Orientador: Eng. M. Sc. Hebert da Consolação Alves - UFOP

OURO PRETO

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M386i Martins, Marcos Vinicius Felisberto.
Influência da variação de temperatura no comportamento mecânico de Escória de Aciaria LD e rocha de Gnaiss utilizadas como Lastro Ferroviário. [manuscrito] / Marcos Vinicius Felisberto Martins. - 2024.
51 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Me. Hebert da Consolação Alves.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Escória (Metalurgia)- Aciaria LD. 2. Mecânica - Resistência de materiais. 3. Lastro (Ferrovias). 4. Deformações (Mecânica) - Estresse térmico. I. Alves, Hebert da Consolação. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcus Vinícius Felisberto Martins

Influência da temperatura no comportamento mecânico de escória de aciaria LD e rocha de gnaiss utilizadas como lastro ferroviário

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em 14 de outubro de 2024

Membros da banca

Engº M.Sc - Hebert da Consolação Alves - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto/MG
ProfºD.Sc - Mário Luís Cabello Russo - Instituto Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-Campus Ouro Preto/MG
Engº M.Sc - Whilson Marques Mendonça- Universidade Federal de Ouro Preto/MG

Hebert da Consolação Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/12/2024



Documento assinado eletronicamente por **Hebert da Consolacao Alves, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 12/12/2024, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0827187** e o código CRC **E9024E58**.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus pais, Mário e Madalena, que não mediram esforços ao longo desta caminhada, e a minha família.

V

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, pela força, foco e determinação. Aos meus pais, Mario e Madalena, que não mediram esforços ao longo desta caminhada, sem eles nada seria possível.

Ao Laboratório de Ferrovias e Asfalto da UFOP por todo apoio, disponibilidade e ideia fornecidas ao decorrer do trabalho.

Ao meu orientador Hebert, que sempre me apoiou no desenvolvimento do tema, com total disponibilidade, interesse e aprendizados.

A Ouro Preto e a UFOP, pelo ensino ao longo desta trajetória e diversos momentos que serão lembrados.

RESUMO

O uso do modal ferroviário de transporte em larga escala é uma das melhores opções a se estudar para a substituição do trânsito de caminhões e carretas das rodovias e diminuir a dependência desse meio de transporte. No Brasil, surgiram propostas para expandir a malha ferroviária após décadas sem investimento. Uma das principais camadas estruturais da ferrovia é o lastro, normalmente construído com pedra britada de rochas naturais, podendo também ser constituído de coprodutos industriais. A escória de aciaria surge como uma alternativa, por ser um dos subprodutos de maior volume gerados nas usinas siderúrgicas, tendo grande potencial de aplicação na construção civil. Entretanto, a sua aplicação como lastro ferroviário requer estudo detalhado de suas características físicas e mecânicas e comportamento às ações de agentes climáticos. No Brasil, britas de lastro devem atender às exigências prescritas na norma técnica ABNT NBR 5564 (2021), que estabelece valores limites para o seu uso como lastro. Porém, vários processos de degradação do lastro, não analisados em norma, podem diminuir a vida útil do material. Estes processos de degradação, como a fadiga por estresse térmico das rochas, associado às tensões oriundas das passagens das composições pode gerar a quebra progressiva dos agregados, aumentando a quantidade de partículas finas, alterando significativamente a curva granulométrica do lastro e causando a instabilidade da plataforma. O objetivo do estudo foi avaliar a degradação do lastro devido ao aumento de temperatura simulada de forma acelerada em laboratório. Foram analisados lastro de rocha natural de gnaiss e um lastro de escória de aciaria LD britada para essa função. Os insumos foram submetidos a ciclos de variação de temperatura, tendo sido inseridos em estufa em temperatura específica e avaliadas suas propriedades físicas e mecânicas antes e depois desses processos. Em geral, a escória se mostrou bastante constante com relação às características mecânicas, já o gnaiss se mostrou mais vulnerável quanto submetido aos ensaios mecânicos após ciclos térmicos.

Palavras-chaves: Escória de aciaria LD; Estresse térmico; Resistência mecânica; Lastro de ferrovias.

ABSTRACT

The use of rail transport on a large scale is one of the best options to be studied to replace the transit of trucks and trailers on highways and reduce dependence on this means of transport. In Brazil, proposals have emerged to expand the rail network after decades of lack of investment. One of the main structural layers of the railway is the ballast, normally constructed with crushed stone from natural rocks, but it can also be made up of industrial by-products. Steel slag is an alternative because it is one of the largest byproducts generated in steel mills and has great potential for use in civil construction. However, its use as railway ballast requires a detailed study of its physical and mechanical characteristics and its resistance to the effects of climatic agents. In Brazil, ballast crushed stone must meet the requirements set forth in technical standard ABNT NBR 5564 (2021), which establishes limit values for its use as ballast. However, several ballast degradation processes, not analyzed in the standard, can reduce the useful life of the material. These degradation processes, such as thermal stress fatigue of rocks, associated with stresses arising from the passage of compositions, can generate progressive breakage of aggregates, increasing the amount of fine particles, significantly altering the ballast granulometric curve and causing platform instability. The objective of the study was to evaluate the degradation of ballast due to the accelerated increase in temperature simulated in the laboratory. Ballast made of natural gneiss rock and a ballast made of crushed LD steel mill slag for this function were analyzed. The inputs were subjected to temperature variation cycles, having been placed in an oven at a specific temperature and their physical and mechanical properties were evaluated before and after these processes. In general, the slag was shown to be quite constant in relation to mechanical characteristics, while the gneiss was shown to be more vulnerable when subjected to mechanical tests after thermal cycles.

Keywords: Steel slag LD; Thermal stress; Mechanical strength; Railway ballast.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil de uma via férrea - vista transversal.	18
Figura 2 - Entrosamento entre partículas.	20
Figura 3 - Mapa ferroviário de Minas Gérias.	24
Figura 4 - Rocha utilizada no estudo.	26
Figura 5 - Sequência de operação de um conversor a oxigênio.	29
Figura 6 - Detalhamento processo de refino.	29
Figura 7 - Escória de aciaria LD.	30
Figura 8 - Distribuição de poros antes e depois da degradação.	37
Figura 9 - Fluxograma da metodologia aplicado no trabalho.	41
Figura 10 - Agregados utilizados para os ensaios.	42
Figura 11 - Estufas usadas para armazenamento das amostras.	43
Figura 12 - Sistema de pesagem hidrostática.	44
Figura13 - Mecanismo utilizado nas pesagens secas e saturadas.	44
Figura 14 - Aparelho treton.	45
Figura 15 - Corpos de prova antes da realização do ensaio.	46
Figura 16 - Amostras após realizadas todas as etapas.	46
Figura 17 - Máquina “Los Angeles”.	47
Figura 18 – Cargas abrasivas usadas na determinação da abrasão.	47
Figura 19 – Amostras separadas para o procedimento.	48
Figura 20 – Gnaisse após ensaio.	48
Figura 21 – Escória após ensaio.	49
Figura 22 – Rochas separadas para realização do ensaio.	49
Figura 23 – Aparelho carga pontual no momento de aplicação da carga.	50

Figura 24 – Modo de ruptura da escória.

50

Figura 25 – Modo de ruptura do gnaisse.

51

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Fórmula de resistência à compressão uniaxial.	51
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação da massa específica aparente.	52
Gráfico 2 – Variação da porosidade aparente.	53
Gráfico 3 – Variação da absorção de água.	54
Gráfico 4 – Variação do Índice de Tenacidade Treton.	55
Gráfico 5 – Variação da resistência ao desgaste por abrasão.	56
Gráfico 6 – Variação do Índice de Resistência à Carga Pontual Corrigido.	57
Gráfico 7 – Variação da resistência à compressão uniaxial.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação da produção ferroviária 4 ^º T de 2022 e 2023.	17
Tabela 2 - Composição química escória de aciaria LD.	30
Tabela 3 - Classificação Fouling Index.	32
Tabela 4 - Caracterização após ensaio de névoa salina	34
Tabela 5 - Resumo dos resultados dos ensaios mecânicos.	35
Tabela 6 - Resultados dos ensaios do experimento.	38
Tabela 7 - Índices para o fator de correção de resistência (K)	51

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Objetivo	22
1.1.1	Objetivos Específicos	22
2	Revisão Bibliográfica	23
2.1	Importância do modal ferroviário brasileiro	23
2.2	Contexto da malha ferroviária de Minas Gerais	23
2.3	Principais rochas utilizadas como lastro de ferrovias no Brasil	25
2.3.1	Rochas Metamórficas	25
2.3.2	Rochas Ígneas	27
2.3.3	Escória de Aciaria	27
2.4	Degradação das rochas utilizadas como lastro de ferrovias	32
2.4.1	Intemperismo físico	35
2.4.2	Intemperismo químico	39
3	Metodologia	41
3.1	Intemperismo por estresse térmico	42
3.2	Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água	43
3.3	Resistência ao choque	45
3.4	Resistência à abrasão	46
3.5	Resistência à carga pontual e resistência à compressão uniaxial	46
4	Resultados e Discussão	52
4.1	Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água	52
4.2	Resistência ao choque	54
4.3	Resistência à abrasão	56
4.4	Resistência à carga pontual e resistência à compressão uniaxial	57
5	Conclusão	59
	Referências	61

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF, 2023), a produção ferroviária das concessionárias associadas, apresentou um crescimento de 11,22% no quarto trimestre de 2023, se comparado ao mesmo período do ano anterior.

Os setores de grãos agrícolas, minério de ferro e demais cargas tiveram um crescimento de 12,5%, 11,7% e 9,0% respectivamente. A Tabela 1 nos mostra a produção de cada grupo de mercadorias e o total geral em toneladas por quilômetro útil (TKU) no ano de 2022 e 2023.

Tabela 1 – Comparação da produção ferroviária 4ºT de 2022 e 2023.

Mercadorias	4ºT 2022 (mil TKU)	4ºT 2023 (mil TKU)	Varição (%)
Grãos Agrícolas	18.605.799	20.934.867	12,52
Minério de Ferro	65.379.688	73.043.126	11,72
Combustíveis	1.968.281	1.885.542	-4,20
Contêiner	1.161.872	1.187.931	2,24
Demais cargas	7.140.475	7.783.708	9,01
Total Geral	94.256.114	104.835.174	11,22

Fonte: ANTF, 2023, adaptado.

Apesar do transporte de cargas brasileiro ser majoritariamente feito pelo sistema rodoviário, o crescimento do transporte ferroviário citado anteriormente tem relação direta com a maior adesão da via férrea para realização desse tipo de transporte.

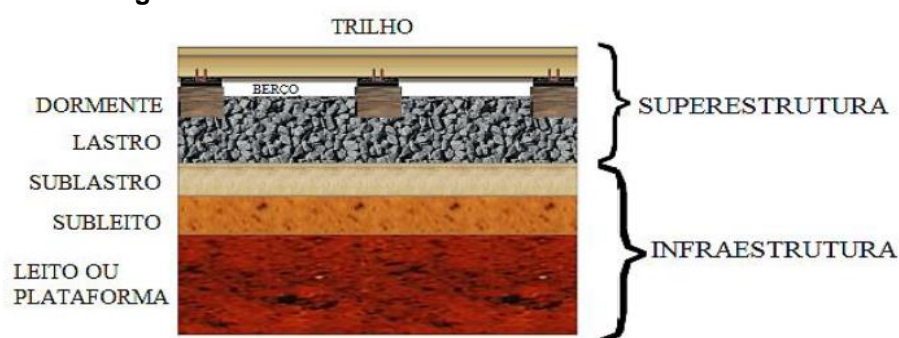
Ainda que o minério de ferro represente cerca de 70% do volume total transportado, segundo a ANTF (2023), tal aumento foi alavancado pelo aumento no

transporte de produtos relacionados à indústria siderúrgica, cimenteira e de construção civil. Ademais, cabe salientar que o modal ferroviário obteve participação importante na exportação, pois 49% do açúcar e 48% da celulose exportados chegaram aos portos do Brasil por ferrovia.

Com relação às ferrovias, existem dois tipos de material rodante que são a locomotiva e o “trem unidade”, basicamente a diferença entre os dois está onde a unidade de força se localiza. No primeiro tipo a força de tração está localizada em um elemento, no qual a locomotiva concentra toda força de tração, sendo capaz de puxar os vagões ao longo da linha férrea. A segunda, tem uma tração descentralizada, na qual ao longo do trem há pequenos motores em vez de um motor grande centralizado, com isso não tem necessidade de acoplar uma locomotiva nova no fim de um trem para realizar o transporte de volta (Railway Technical Web Pages, 2014). Vale ressaltar que para o transporte de cargas a mais utilizada é a tração por locomotiva, pois fornece uma liberdade de adicionar qualquer quantidade de vagões desde que a carga seja mantida no limite da locomotiva.

Para que o transporte seja realizado com segurança e eficiência, é importante que toda a infraestrutura da ferrovia esteja em boas condições para que cumpra os pré-requisitos estabelecidos na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 5564/2021. Segundo Selig e Waters (1994), os componentes ferroviários podem ser divididos em dois grupos: a superestrutura e a infraestrutura. A Figura 1 demonstra um pavimento habitual de uma via férrea onde, na parte de cima, refere-se a superestrutura, que contém os trilhos, o sistema de fixação e os dormentes. A parte inferior refere-se à infraestrutura compreendendo, o sublastro e o subleito.

Figura 1 – Perfil de uma via férrea – vista transversal.



Fonte: Oliveira, 2013.

Os trilhos têm finalidade de guiar as rodas do trem de maneira uniforme e contínua, são eles que transferem as cargas concentradas das rodas aos dormentes. Assim, para que as distribuições das ações sejam feitas de forma eficiente é necessário que os trilhos tenham uma alta rigidez e que fiquem limitadas as deflexões entre os apoios (SELIG e WATERS, 1994).

O sistema de fixação mantém os trilhos fixos aos dormentes e resiste a quatro movimentos: vertical, lateral, longitudinal e de torção. Vale salientar que, para que a distribuição de forças dos trilhos para a superfície de madeira seja feita de maneira correta, são necessárias placas de aço no sistema de fixação.

Os dormentes têm por função distribuir as cargas aplicadas pelo trilho ao lastro e conter os deslocamentos dos trilhos por meio da ancoragem da superestrutura no lastro (SELIG e WATERS, 1994).

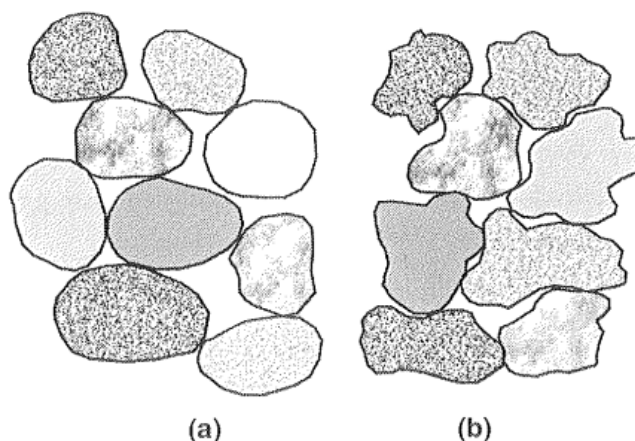
Por fim, temos o lastro que é um elemento de suma importância, pois oferece elevada resistência ao cisalhamento, proporciona estabilidade e redução nas deformações. Outra característica do lastro é a permeabilidade que o mesmo proporciona, são requeridas para essa camada faixas granulométricas que proporcionem uma drenagem adequada (INDRARATNA; SALIM, 2005).

A norma NBR 5564 (ABNT, 2021) apresenta condições físicas e mecânicas a serem atendidas para um material britado ser utilizado como lastro. Devido à grande demanda contínua que o setor vem sofrendo, se faz necessário novas metodologias para se avaliar a resistência do material que a compõe. Como exemplo pode-se citar que a norma não contempla avaliações da degradação das propriedades do lastro da via férrea quando submetidas a grandes variações de temperaturas no decorrer da sua vida útil.

Para que o material apresente todos esses atributos, é necessário que ele resista principalmente ao esforço provocado pela passagem dos vagões dos trens, e com o tempo não aconteça a degradação dos agregados, resultando na formação de partículas menores e arredondadas, pois assim ocorre menor entrosamento entre as partículas (DUTRA, 2020).

A figura 2(a) nos demonstra o entrosamento quando elas são arredondadas, 2(b) quando as rochas são angulares.

Figura 2 – Entrosamento entre partículas. (a) Partículas arredondadas. (b) Partículas angulares.



Fonte: Dutra, 2020.

As elevadas temperaturas não prejudicam apenas os materiais rochosos, de acordo com a fib Bulletin nº38 FIB (2007), quando o concreto é exposto à altas temperaturas pode apresentar problemas como, piora das propriedades mecânicas e ocorrência de fissuras e tensões térmicas e, conseqüentemente o deslocamento das camadas superficiais.

Rocha (2015) retrata sobre o mecanismo de degradação do concreto com os ciclos de congelamento e degelo, para isso, ele cita o aumento da porosidade e saturação dos poros por umidade como consequência desse fenômeno. Ele ainda afirma que ao expandir no interior dos poros e não ser drenada, a água cria uma tensão interna que pode causar um esforço mecânico na estrutura do material.

Ao submeter mármore, calcário e granito a 28 ciclos de congelamento e degelo, Karaca e Deliormanli e al. (2010) investigaram o desgaste por abrasão dos materiais rochosos através dos métodos de Bohme e o ensaio de Wide-wheel. Os ensaios mostraram significativa diferença antes e depois dos ciclos, entretanto verificou-se que o segundo exige uma maior quantidade de ciclos para analisar diferenças significativas.

Com relação à compressão uniaxial e absorção de água, Park e Kim et al. (2020) avaliaram essas características do quartzito e uma rocha dolomítica submetidas a cada 150 ciclos de congelamento e degelo. O estudo resultou em decréscimo da resistência à compressão e acréscimo da absorção de água

Demirdag (2013) investigou a alteração das propriedades de um travertino preenchido e não preenchido após 50 ciclos de congelamento e degelo e 50 ciclos de choques térmicos. De acordo com o autor, esse preenchimento é uma técnica para preencher os poros e reparar as fissuras das pedras. Foram avaliadas as propriedades de porosidade aparente, massa específica aparente e resistência à carga pontual. Os dois travertinos apresentaram perda de massa em percentual, diminuição da massa específica aparente, aumento da porosidade e diminuição da resistência à carga pontual nos dois processos de intemperismo. O travertino preenchido se mostrou com melhores propriedades, mas apresentou uma degradação mais acentuada. Além disso, Demirdag (2013) concluiu que o intemperismo por congelamento e degelo se mostrou mais degradante aos travertinos do que o intemperismo por choques térmicos.

Os estudos relacionados ao lastro de ferrovias buscam em sua maioria atribuir a degradação do lastro aos esforços mecânicos os quais é submetido, bem como à inserção de materiais externos, como derrames de vagão e infiltração de materiais subjacentes ao lastro. Porém há poucas pesquisas que buscam avaliar como o intenso fluxo de calor afeta as características do material. De acordo com Vasconcellos e Melo (2018), quando um material é exposto a uma mudança de temperatura suas dimensões tendem a sofrer variações, gerando fadigas no material e, assim, levando a fratura.

Com as altas temperaturas nas rochas, surge o estresse térmico e consequentemente origina as diversas microfissuras que tendem a se expandir, isto leva a uma diminuição ou perda da resistência mecânica e destruição gradual dos grãos (Piniyska 2007).

Piniyska (2007) nos aborda que os minerais componentes das rochas podem influenciar a resistência por meio da expansão térmica. Quando submetidos a alta

temperatura, dependendo do coeficiente de expansão térmica dos minerais, acontece aumento da superfície de contato entre as partículas e isso pode acarretar uma alteração estrutural.

A avaliação correta das condições ambientais do local de implantação da ferrovia contribui para a escolha correta do material a ser utilizado, desde que se conheça o comportamento quando exposto a determinada situação. A investigação da alteração das propriedades do lastro submetido ao aquecimento e resfriamento faz parte desse escopo. A partir do domínio sobre as características dos materiais, é possível otimizar processos de compra e destinação além da diminuição dos custos com manutenção da via.

1.1 Objetivo

O objetivo do estudo foi avaliar o comportamento mecânico do lastro devido a aumento de temperatura e posterior resfriamento, simulados de forma acelerada em laboratório, buscando desta forma causar um estresse térmico nas rochas analisadas.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Avaliar as características mecânicas iniciais das rochas analisadas e escória;
- Entender os efeitos do aquecimento nas propriedades do lastro e posteriormente analisar se podem ser usadas para tal demanda;
- Determinar os parâmetros de resistência mecânica dos materiais após os ensaios de simulação;
- Avaliar o comportamento da escória de aciaria LD para que seja reaproveitada em linhas férreas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância do modal ferroviário brasileiro

O Plano Nacional de Logística e Transportes (PLNT), desenvolvido pelo Ministério dos Transportes, nos mostra que nos próximos anos o Brasil deve priorizar o modal ferroviário para o transporte de cargas entre grandes distâncias e assim diminuir o uso das rodovias brasileiras para esse tipo de atividade, fazendo com que tenha menores custos para a exportação. Vale ressaltar que para o transporte de passageiros também há um planejamento para que cada vez mais esse tipo de meio de transporte esteja presente no dia a dia dos cidadãos (DNIT, 2021).

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), o custo com logística no Brasil é de aproximadamente 20% do PIB brasileiro, valor considerado alto se comparado com grandes potências mundiais, como Estados Unidos e Alemanha. Diante desse cenário, é imprescindível que seja concretizada a construção da ferrovia Norte-Sul para que a malha ferroviária brasileira se torne mais bem distribuída no território nacional (VALEC - 2020).

No contexto brasileiro como todo, a produção ferroviária é majoritariamente realizada para o transporte de minério de ferro, com destaque também para os grãos agrícolas como a soja e o milho, que tem um crescimento nos meses de safra (ANTF, 2022).

Para se ter uma base da participação ferroviária nos diferentes produtos exportados pelo Brasil, em 2022, em torno de 93% do minério de ferro, com ênfase na estrada de ferro de Carajás, 52% do açúcar e quase 50% da soja brasileira chegaram aos nossos portos por meio das ferrovias (ANTF, 2022), o que nos expõe que o crescimento do país passa diretamente pela priorização das vias férreas em detrimento do modal rodoviário.

2.2 Contexto da malha ferroviária de Minas Gerais

Como é sabido, Minas Gerais tem a maior malha ferroviária e está em busca de aumentar ainda mais a sua capacidade de escoamento de cargas através desse

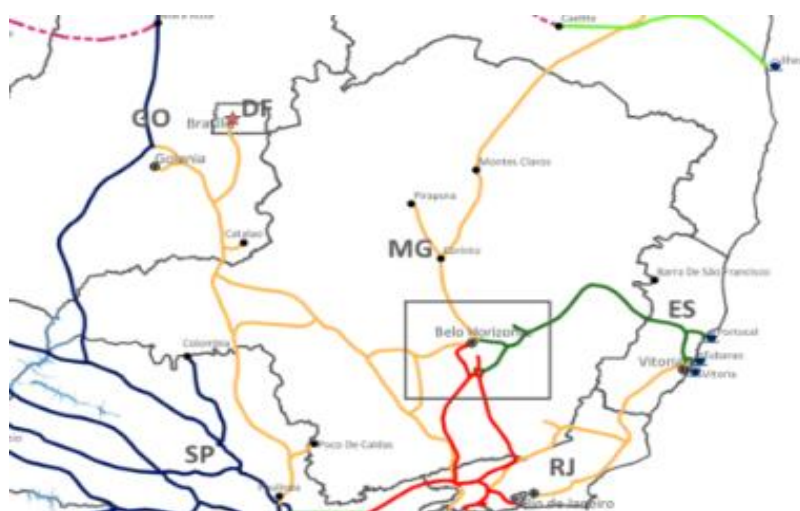
meio de transporte. Em 2022, o governo do estado foi o primeiro a lançar um Plano Estratégico Ferroviário (PEF), em que o principal objetivo é fomentar a participação desse modal no sistema de deslocamento das diversas matérias primas do estado (AGÊNCIA MINAS, 2022).

Ainda no presente ano, o governo assinou um protocolo com a Petrocicy Ferrovias, para construção de 3 trechos que irão ligar o Distrito Federal ao porto da empresa no Espírito Santo, esse complexo ferroviário poderá ser tornar um dos mais importantes do país no que tange a importação e exportação de produtos e vai implicar na criação de empregos diretos e indiretos.

Atualmente Minas Gerais possui três regiões com baixos indicadores de desenvolvimento, são elas: Vale do Jequitinhonha, do Mucuri e Rio Doce. Esses locais têm uma alta produção de blocos de rochas ornamentais que são transportadas por carretas de grandes dimensões pelo fato de não haver ferrovias para o transporte.

Ademais, no Vale do Jequitinhonha há maior presença de depósitos de lítio no Brasil, o que torna o investimento na malha ferroviária ainda mais importante para a região. A Figura 3 nos mostra o mapa ferroviário de Minas Gerais.

Figura 3 – Mapa ferroviário de Minas Gerais.



Diante desse cenário é de suma importância que as iniciativas governamentais citadas acima se concretizem para que os nossos produtos sejam

levados aos terminais portuários de forma mais rápida, segura e econômica

2.3 Principais rochas utilizadas como lastro de ferrovias no Brasil

No Brasil existem vários materiais utilizados para lastro, como solo, areia, cascalho, escória e pedras britadas. Segundo Brina (1988), solo e areia não são ideais por possuírem uma granulometria fina, ao contrário das outras que, em condições normais são bons tipos de lastro. As principais rochas britadas comumente utilizadas nas ferrovias de acordo com Brina (1988) e Borges Neto (2012) são: arenito, calcário, mármore, dolomito, granito, micaxisto, quartzito, diorito, diabásio e gnaisse, vale ressaltar que todas devem atender aos requisitos da norma regulamentadora ABNT (2021). No Brasil, cerca de 85% da brita produzida vem de granito/gnaisse, 10% de calcário/dolomito e 5% de basalto/diabásio (QUARESMA, 2009).

Brina (1988) afirma que algumas escórias de usinas siderúrgicas apresentam propriedades suficientes para o emprego como lastro e, normalmente, são aplicadas em linhas próximas às usinas. Segundo Fernandes (2010), a utilização de escórias de aciaria como pavimentação ferroviária se trata de uma solução técnica, rentável e sustentável, por utilizar materiais alternativos que proporcionam redução da demanda de extração e britagem de rochas. No presente estudo serão abordadas o gnaisse, que é a rocha mais comum na malha ferroviária brasileira, e escória de aciaria, que é um subproduto oriunda da produção do aço.

De acordo com Indraratna e Salim (2005), o agregado para o lastro ferroviário é extraído de pedreiras de rochas ígneas ou metamórficas, conforme o processo de formação, que será abordado adiante.

2.3.1 Rochas Metamórficas

Segundo Press F. et al (2006) as rochas metamórficas são rochas modificadas que sofreram mudanças em decorrência do calor interno da terra ou do excesso de pressão na sua mineralogia, na textura, na composição química ou nesses três aspectos. Ainda segundo o autor, a presença de alguns minerais como a

cianita, andaluzita e sillimanita nos indicam um forte indício de metamorfismo e, por consequência, uma rocha metamórfica.

O processo de formação das rochas metamórficas acontece em diferentes profundidades que podem ser desde a crosta superior até a crosta inferior e o processo da tectônica de placas que transportam rochas e sedimentos para as profundezas são os principais mecanismos para formação desse tipo de rocha. Pode-se ressaltar que a temperatura aumenta de forma diretamente proporcional à profundidade nas diferentes regiões terrestres, ou seja, quanto maior a altura maior será o calor (PRESS.F. ET AL, 2006).

Como abordado no início desta seção, a pressão interna também exerce um papel importante no processo de formação das rochas metamórficas, na qual existem dois tipos: pressão confinante, que de forma simples pode-se falar que é uma força igualmente aplicada em todas as direções do maciço e pressão dirigida na qual é uma força exercida em uma direção específica. A tensão, assim como a temperatura aumenta proporcionalmente com a profundidade. Entre as rochas metamórficas utilizadas como lastro, destacam-se as seguintes:

- Gnaisse

Os gnaisses são rochas de médio a alto grau metamórfico e que contém bandas espessas de minerais claros e escuros. As bandas claras resultam da segregação do quartzo e feldspato, já o bandamento escuro é resultado do desmembramento dos anfibólios e outros minerais máficos, isso faz com que ela tenha um caráter listrado com bandas alternadas. Figura 4 mostra a rocha em questão.

Figura 4 – Rocha utilizada no estudo.



Fonte: Autor, 2024.

2.3.2 Rochas Ígneas

Existem rochas ígneas que são formadas a partir do resfriamento e solidificação da lava quente que derrama do vulcão para o entorno da superfície e também existem rochas ígneas cujo processo de formação é intrusivo, ou seja, não há derramamento de magma, onde o resfriamento ocorre internamente à superfície, de forma lenta e, por isso, formam-se cristais "grossos".

A classificação com base na textura é feita observando as diferenças nos tamanhos dos cristais, que dividem-se em cristalinos finos ou grossos. Como exemplo podemos citar o granito como sendo uma rocha com cristais grossos e em contrapartida o basalto com cristais finos (PRESS.F. ET AL, 2006).

A divisão de acordo com a composição química e mineralógica é feita de acordo com as proporções de minerais silicosos que estão presentes em cada categoria, dentre esses minerais podemos citar os félsicos, que são ricos em sílica, e os máficos, que são pobres em sílica (PRESS. F. ET AL, 2006).

Segundo Press.F et al (2006), os minerais máficos se cristalizam em temperaturas mais elevadas e tem em sua composição química magnésio e ferro, com relação aos félsicos, eles apresentam feldspatos (Na, K, Si e Al) e sílica (SiO₂).

2.3.3 Escória de Aciaria

A escória de aciaria vem se tornando foco de diversos estudos para a aplicação em diferentes áreas de atuação. A produção média de escória de aciaria LD é de aproximadamente 120 a 140 kg por tonelada de aço produzido (GEYER, 2001). DAS et al. (2007) diz que essa produção pode chegar a 200 kg/t.

A partir da utilização de diferentes tecnologias para a produção de aço, escórias de aciaria de diferentes características são geradas, a Figura 5 ilustra como ocorre a produção do aço.

As escórias são resíduos da fusão de metais ou da redução de minérios,

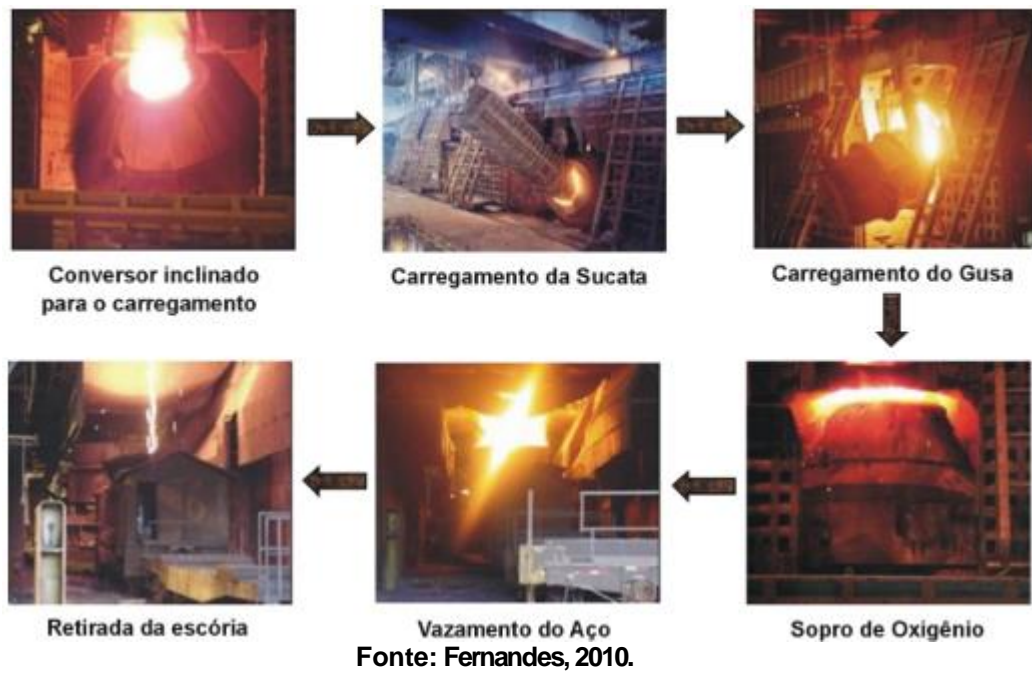
resultantes após a combustão ou tratamento industrial de uma substância. Na siderúrgica existem dois tipos deste material: a escória de alto forno, que é o resultado da fusão redutora dos minérios para obtenção do ferro gusa, esse tipo contém um alto teor de carbono e diversas impurezas, e a escória de aciaria, que é obtida em conversores de oxigênio através da conversão do ferro gusa em seu estado líquido e/ou sucata em aço (LEITE, 1997).

No Brasil pode-se destacar dois processos para produção e refino do aço: um é EAF (Eletric Arc Furnace) no qual utilizada forno de arco elétrico e o LD (Linz-Donawitz) ou BOF (Blast Oxygen Furnance) que necessita do conversor a oxigênio.

No processo de fabricação nos fornos elétricos, usam-se arcos elétricos de alta potência para produzir calor e conseqüentemente fundir a sucata de aço e convertê-la em um aço de acordo com os critérios de qualidade especificados (Castelo Branco, 2004).

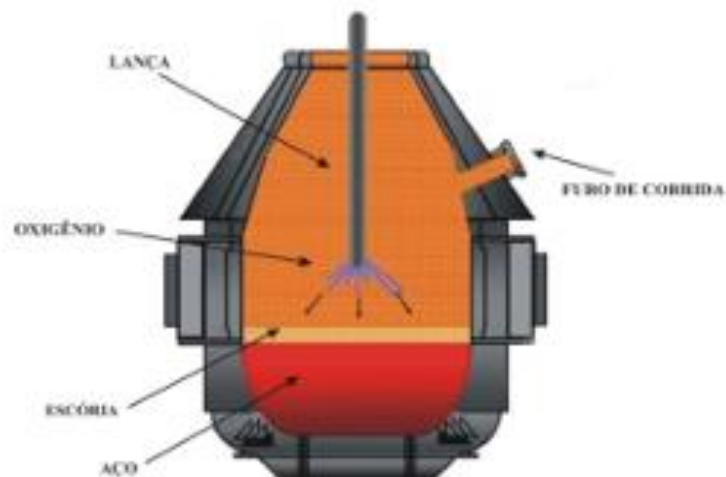
Na fabricação do aço em um conversor a oxigênio, juntamente da sucata e do ferro gusa líquido é introduzida uma lança injetando oxigênio gasoso em uma velocidade alta com isso, após a fusão do metal adiciona-se cal virgem e cal dolomítica para que se elimine componentes indesejados (CUNHA et.al, 2016). Como a escória e o aço possuem diferenças de densidade, após a introdução do oxigênio no ferro gusa, juntamente com cal os dois componentes se separam e então ela é recolhida para dar início ao processo de resfriamento no pátio (FERNANDES, 2018). Na Figura 5, temos a sequência de operação do método citado acima.

Figura 5 – Sequência de operação de um conversor a oxigênio.



A Figura 6 exemplifica em detalhe o processo de refino do aço primário, sendo possível verificar a etapa de retirada da escória de aciaria.

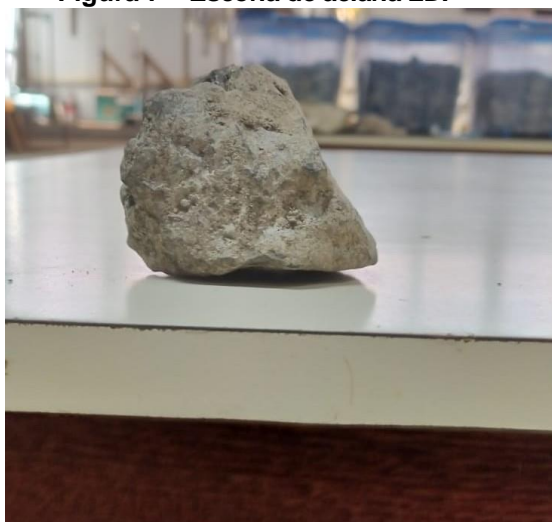
Figura 6 – Detalhamento processo de refino.



Fonte: Fernandes, 2010.

A Figura 7 nos mostra uma amostra de escória aciaria LD usada nos procedimentos.

Figura 7 – Escória de aciaria LD.



Fonte: Autor, 2024.

A composição química da escória tem predomínio dos elementos como o CaO, MgO, FeO e SiO₂, mas vale ressaltar que a composição desse material é variável pois elas podem ser oriundas de processos alimentados por diferentes especificações de minério, carvão e fundente (FERNANDES, 2018).

Os percentuais de cada composto químico presente na escória de aciaria LD está mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química escória de aciaria LD.

Componente	Composição (%)
CaO	6 - 45
SiO ₂	7 - 16
AlO ₃	1 - 4
MgO	1 - 9
FeO	8 - 30
MnO	3 - 7
CaO/SiO ₂	0,86 – 2,80

Fonte: Fernandes, 2018, adaptado.

No entanto, o emprego desse material para o lastro em linhas férreas tem um empecilho com relação à expansão volumétrica, visto que o CaO, MgO são volumetricamente instáveis e isso faz com que possam gerar tensões internas que por consequência podem causar trincas e até resultar na fragmentação do material gerando assim, um componente mais fino.

Ainda sobre a utilização do subproduto da siderurgia, Koh et.al (2018) em seu estudo aborda a escória básica a oxigênio (BOF), no trabalho em destaque ele usa três períodos de envelhecimento (0,3 e 6 meses). Como conclusão, o autor aborda que o experimento forneceu valores superiores aos permitidos pela norma coreana para peso unitário e compressão não confinada. O material apresentou uma média de 18% de desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles, sendo um valor menor que o limite máximo de 25% da norma.

Em diversas linhas férreas são utilizadas rochas de granito para compor o lastro ferroviário, no entanto, testes realizados por Delgado et.al (2022) demonstraram que a escória de forno a arco elétrico (EAF) superou o granito em diversas análises, sugerindo que esse material seja uma opção viável para o lastro ferroviário.

Hussain et.al (2022) em uma revisão da literatura abordou que escória tem sido considerada como uma alternativa para substituição do lastro convencional, visto que confere uma resistência à abrasão e ângulo de atrito entre partículas, possui maior densidade e menor deformação permanente sob carga cíclica. O emprego da escória em substituição aos materiais tradicionais pode reduzir o custo de construção de lastros/trilhos e diminuir a quantidade de manutenções nessa camada.

Ainda segundo o autor, o alto módulo resiliente da escória de aço pode melhorar o conforto ao dirigir, sua quebra reduzida contribui para minimizar os custos de conservação e a densidade desses subprodutos melhora a resistência lateral.

Entretanto, para usar a escória com este fim, é necessário vencer algumas

barreiras. Guo Y et al (2022) nos diz que a expansão volumétrica e os padrões incompletos (ou mesmo inexistentes) são alguns desafios que precisam ser melhor investigados para uma posterior utilização.

2.4 Degradação das rochas utilizadas como lastro de ferrovias

Um dos principais problemas que geram manutenção na linha férrea, segundo Selig e Waters (1994), é justamente a degradação do lastro, ou seja, o acúmulo de materiais finos no sistema. Ainda segundo o autor, o aumento desse elemento pode estar associado ao fim que a ferrovia tem na localidade. Pesquisa feita nos Estados Unidos nos mostra que o principal fator é a quebra da camada granular em fragmentos de menor diâmetro devido ao tráfego e/ou possíveis manutenções na geometria da via por meio de ações de socaria.

Selig e Waters (1994) propuseram uma forma de se quantificar o grau de colmatagem do lastro ferroviário por meio do Fouling Index (FI). Para definição deste parâmetro, os autores se basearam em classificações representativas de lastro limpo até altamente colmatado, definindo categorias conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação Fouling Index.

Categoria	FI (%)
Limpo	< 1
Moderadamente limpo	1 a < 10
Moderadamente colmatado	10 a < 20
Colmatado	20 a < 40
Altamente colmatado	≥ 40

Fonte: Selig e Waters, 1994, adaptado.

Raymond e Dyaljee (1979) afirmam que existem 3 principais maneiras de degradação do material granular da ferrovia, a primeira é a quebra, onde a partícula se rompe em duas partes similares, a segunda é o desgaste por abrasão, no qual o fragmento perde as suas características angulares, a última é o esmagamento /

moagem de pequenas asperezas. Vale ressaltar, que em torno de 30% do material fino presente é aceitável para vida útil da linha férrea, passado esse percentual a camada de lastro fica contaminada devendo assim, realizar a troca da camada granular (Lichtberger, 2005).

Como resposta ao aumento da quantidade de finos na camada tem-se um aumento da rigidez do lastro, e uma diminuição do índice de vazios, no qual é de extrema gravidade porque nos proporciona uma drenagem inadequada e assim não há a dissipação do excesso de pressão e esse acúmulo diminui as tensões efetivas (MOURA, E. et al. e INDRARATNA; SALIM, 2005).

Costa et al. (2014) avaliaram a contaminação do lastro ferroviário de um segmento da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). Inicialmente foi coletada na linha uma amostra de material e com isso, identificaram-se a presença da fração de argila. Tendo isso em vista, concluíram que as principais fontes de contaminação eram realmente oriundas da quebra e desgaste dos agregados do lastro e da queda de minério de ferro na via e essa colmatação alterava a resposta resiliente da via tornando-a mais rígida e aumentando os impactos dinâmicos entre via e veículo

Raymond (1985) aborda que as distribuições granulométricas bem graduadas e de grãos angulares, têm uma melhor resposta com relação a resistência ao cisalhamento e impedem que materiais do sublastro e subleito penetrem nos espaços vazios, uma vez que eles já estão preenchidos.

Diversos estudos foram feitos no intuito de avaliar a degradação das rochas aplicadas para diversas finalidades. Esses materiais continuamente vêm sofrendo alterações, seja por agentes naturais, como a água, radiação solar, variações de temperatura e umidade, vento e a ação dos seres vivos. Esses mecanismos podem vir a degradar as rochas por ação física ou química.

Zornoza et al. (2014) fez um estudo sobre as rochas calcárias utilizadas em monumentos, para isso, o fragmento recebeu um tratamento com consolidante na tentativa de melhorar a resistência aos processos de degradação. Para tal ensaio as

amostras foram expostas a uma solução salina que aumentavam as tensões e micro fissuramento nos poros, fissuras e fraturas do material, concluiu-se que houve aumento da porosidade aparente e conseqüentemente processo de degradação.

Carvalho et al. (2018) produziu estudo com rochas calcáreas oriundas de uma região litorânea de Portugal, feito através do ensaio de névoa salina. Na Tabela 4 abaixo têm-se demonstrado os resultados do estudo.

Tabela 4 – Caracterização após ensaio de névoa salina.

	Cabeça de Veada	Semi-Rijo do Arrimal	Creme Fátima	Moca Creme	Moleanos	Azul Cadoiço
Compressão uniaxial (MPa)	104	40	108	135	146	206
Absorção de água (%)	3,8	8,2	4,3	3,1	1,4	0,8
Porosidade aparente (%)	8,3	17	9,3	6,9	3,4	1,08
Densidade aparente (Kg/m ³)	2430	2160	2410	2480	2600	2650
Resistência flexão (MPa)	12,7	6,5	13,7	14,9	11,9	21,8

Fonte: Polinicóla, 2021, adaptado.

Como em regiões litorâneas o parâmetro de absorção torna-se ainda mais importante, pode-se identificar que apenas os tipos “Moleanos” e “Azul Cadoiço” são recomendados para aplicações externas em áreas expostas. Vale ressaltar que o limite para calcários de melhor qualidade é inferior a 3% (Polinicóla, 2021).

O “Moca Creme” possui absorção próximo de 3%, considera-se que o mesmo pode ser usado, mas em locais com pouca exposição à solução salina, ou seja, afastada das regiões litorâneas (Polinicóla, 2021).

Remédio (2014) utilizou procedimentos de saturação em água e secagem em estufa para observar o comportamento de nove tipos de rochas, para determinar os parâmetros mecânicos fez-se os ensaios de abrasão Los Angeles, Treton e Esmagamento. As rochas analisadas e seus respectivos resultados estão na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Resumo dos resultados dos ensaios mecânicos.

Rocha	Esmagamento (%)		Treton (%)		Abrasão Los Angeles (%)	
	Rnat	Rcic	Tnat	Tcic	Pnat	Pcic
BAS	12,2	15,2	11,7	12,5	13,4	19,6
CVG	14,7	14,6	17,6	20,5	16,2	19,3
MOR	18,1	17,3	18,7	19,9	16,2	17,4
ITU	20,7	27,5	54	35	31,3	38,8
TNO	26,5	20,6	32,5	24,4	23	31,8
TIC	22	25,4	44	29,2	29,2	36,3
TAI	17,5	21,9	28,3	22,4	20,9	23,7
CAN O	19,1	19,4	26,1	19,4	12,2	13,1
CAN L	12,2	18,5	18,5	21,2	12,9	13,3

Fonte: Polinicóla, 2021, adaptado.

Nos casos das discrepâncias observadas no treton e esmagamento, Remédio (2014) concluiu que podem ser devido às condições de preparação das amostras no caso do treton ou da compactação dos fragmentos no recipiente padrão no ensaio de esmagamento.

Com relação à Abrasão Los Angeles pode-se citar os materiais BAS, CVG, MOR, TAI, CAN-O E CAN-E como sendo as melhores opções para uso em lastro de ferrovia. Ponto de atenção ao TAI pois seu limite está muito próximo de 24% que é recomendado pela norma internacional EM 13450 (DIN, 2013) (Remédio, 2014).

2.4.1 Intemperismo físico

Segundo Nurmikolu (2005), a capacidade de um agregado resistir à degradação mecânica depende de sua resistência física, que é afetada pelas

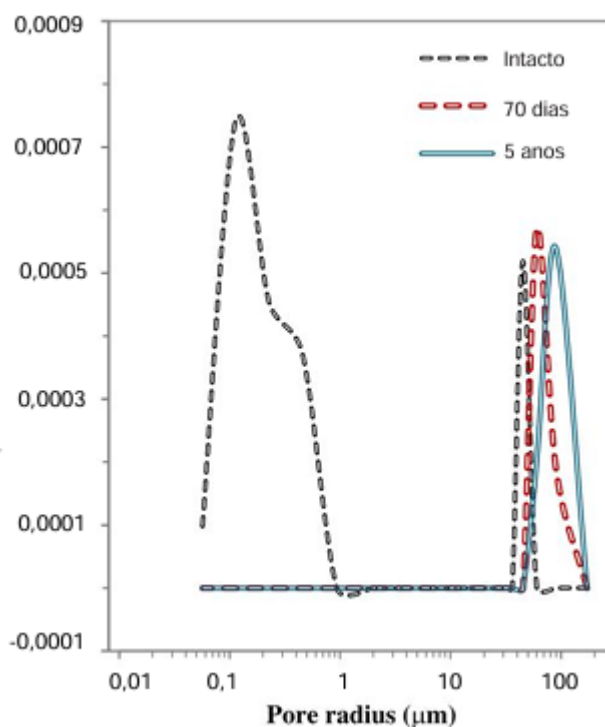
resistências internas dos minerais constituintes da rocha e do tipo de ligação desses minerais.

Para se abordar a respeito desse tipo de intemperismo, Press.F. et al. (2006) nos apresenta o congelamento da água em poros e/ou fissuras de rochas como um dos mecanismos de abertura de fissuras nos materiais. Vale ressaltar que esse intemperismo é típico de locais onde o clima é temperado ou montanhoso porque tem a possibilidade de ocorrer congelamento e degelo.

Um dos fatores que influenciam a degradação das rochas devido a esses ciclos de congelamento é a porosidade, porque quando a água se expande no interior dos poros e não tem tempo de ser drenada cria-se uma tensão interna no interior da cavidade que conseqüentemente causa um esforço na estrutura do material fazendo com que se perca parte da resistência e se degrade mais rapidamente (Rocha, 2015).

Em um estudo sobre o tempo de vida útil do gnaiss ornamental Olho de Pombo Rústico, na localidade de Pádua/RJ, Dias Filho et al. (2020), utilizou a porosimetria por intrusão de mercúrio para avaliar a distribuição de poros das amostras expostas ao processo de lixiviação contínua (70 dias), cujo equipamento simula condições semelhantes às de climas tropicais, envelhecimento em campo (5 anos) e intacta. A Figura 8 mostra a distribuição de poros.

Figura 8 – Distribuição de poros antes e depois da degradação.



Fonte: Dias Filho et al. 2020.

A partir da figura anterior, o autor concluiu que a amostra íntegra tem quantidades altas de microporos, entre 0,1 e 1 μm de raio e possui poros entre 35 e 60 μm . Por outro lado, após o procedimento de ensaio, os microporos desaparecem e dão lugar aos poros maiores, entre 45 e 170 μm para ambos os processos de degradação, com esse aumento, provoca aumento da absorção de água pela rocha que tem reflexo no aumento da porosidade do material.

Ainda sobre a porosimetria por intrusão de mercúrio, Yu et al. (2007) estudaram quatro tipos de rochas utilizadas no Japão, dentre elas estão as rochas calcárias, graníticas, arenito e dolomitas. Nesse experimento ambas foram expostas à névoa salina e posteriormente realizado o ensaio. Como conclusão, Yu et al. (2007) observaram que o processo de degradação acontece sempre que o material poroso encontra íons de sal solúveis e umidade, com isso, o sal se cristaliza podendo ser de forma destrutiva ou em algumas condições inofensivas.

Santos et al. (2021) caracterizaram 3 amostras para fins de lastro ferroviário, o primeiro, um granito de Morungaba (MOR), segundo granito de Cantareira (CAN) e uma rocha de microgabro (GAB). Para a degradação foram usados três testes de alterabilidade: com sulfato de sódio, etilenoglicol e água, todos com secagem em estufa, em seguida foi realizado ensaio de Micro-Deval. A Tabela 6 mostra os resultados dos ensaios.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios do experimento.

Rocha	Esmagamento (%)		Treton (%)		Abrasão Los Angeles (%)	
	Rnat	Rcic	Tnat	Tcic	Pnat	Pcic
BAS	12,2	15,2	11,7	12,5	13,4	19,6
CVG	14,7	14,6	17,6	20,5	16,2	19,3
MOR	18,1	17,3	18,7	19,9	16,2	17,4
ITU	20,7	27,5	54	35	31,3	38,8
TNO	26,5	20,6	32,5	24,4	23	31,8
TIC	22	25,4	44	29,2	29,2	36,3
TAI	17,5	21,9	28,3	22,4	20,9	23,7
CAN O	19,1	19,4	26,1	19,4	12,2	13,1
CAN L	12,2	18,5	18,5	21,2	12,9	13,3

Fonte: Santos et al., 2021.

Como percebe-se, a única amostra que apresentou resultados da degradação maior do que intacta foi o granito de Cantareira.

Lima et al. (2022) estudaram a resistência a flexão de dois tipos de rochas aglomeradas, o Branco Aldan e Branco Galaxy. Para isso ele verificou a resistência quando as rochas foram submetidas a diferentes ciclos de temperatura. Na determinação da resistência ao choque térmico seguiu-se o normativo europeu EN 14617-6. As amostras foram submetidas a 20 ciclos de temperatura, com aquecimento a 70°C durante 18 horas e resfriamento a 15°C no período de 6 horas. Inicialmente, o Branco Aldan apresentou uma resistência a flexão de 55,73 MPa e após ensaio 56,71 MPa, já o Branco Galaxy 39,56 MPa antes e 40,93 MPa depois.

Com esses dados, concluiu-se que a variação de temperatura não prejudicou a performance mecânica das rochas estudadas e que as mesmas podem ser aplicadas em baixo, alto e médio tráfego pois, segundo Chiodi Filho e Rodrigues (2009) o valor mínimo para serem útil seria de 10,34 Mpa.

2.4.2 Intemperismo químico

Esse tipo de intemperismo se relaciona diretamente com a capacidade de absorção de água das rochas britadas que estão expostas ao ambiente.

Os principais agentes do intemperismo químico estão presentes em corpos d'água e em chuvas. Medírcio (2004) apresenta que as empresas do setor metalúrgico e mineração utilizam muita água nos processos industriais, com isso, parte dos poluentes, principalmente o sulfato, são liberados nessa água residual. Abordando as chuvas, o principal infortúnio é a chuva ácida que é decorrente da emissão de CO₂ e outros agentes nocivos. Os componentes mais agressivos presentes nesse tipo de precipitação são: dióxido de enxofre (SO₂), aerossóis de sulfato, n-óxidos de nitrogênio (NO_x), e amônia (NH₃).

Em um estudo, Press. F. et al (2006) abordam a relação entre a composição mineralógica do feldspato quando ele entra em contato com o ar ou água. Como conclusão, eles exclamam que o feldspato é muito vulnerável ao ácido carbônico que é um componente da chuva ácida.

Os testes de solidez ao sulfato são usados para abordar os efeitos do intemperismo químico em materiais de lastro. Em sua análise, Rodriguez (2009) mostrou que a degradação de amostras de calcário sofreu uma perda de aproximadamente 20% da massa inicial.

Depois de realizar o intemperismo do sal por sulfato de sódio e magnésio, Ruiz-Agudo (2007) concluiu que inicialmente os cristais de sulfato foram responsáveis pelo desprendimento das camadas de rochas e o sulfato de magnésio induziu a formação de rachaduras nas amostras. Já a porosidade foi reduzida devido a cristalização do sulfato de sódio em grandes poros perto da superfície.

Alves e Gomes (2022), fizeram 75 ciclos de congelamento-degelo (FT) e 40 ciclos de solidez ao sulfato (SS) como resultado, eles abordam que tanto no processo de abrasão quanto choque, as perdas foram maiores quando se trata do intemperismo químico. A escória LD apresentou 13% de desgaste por abrasão após 75 ciclos FT e 29% para 40 SS.

Ainda com relação ao estudo anterior, a escória não atingiu uma resistência necessária após o intemperismo químico por solidez ao sulfato, pois perdeu 87% de resistência, atingindo 40 MPa de UCS.

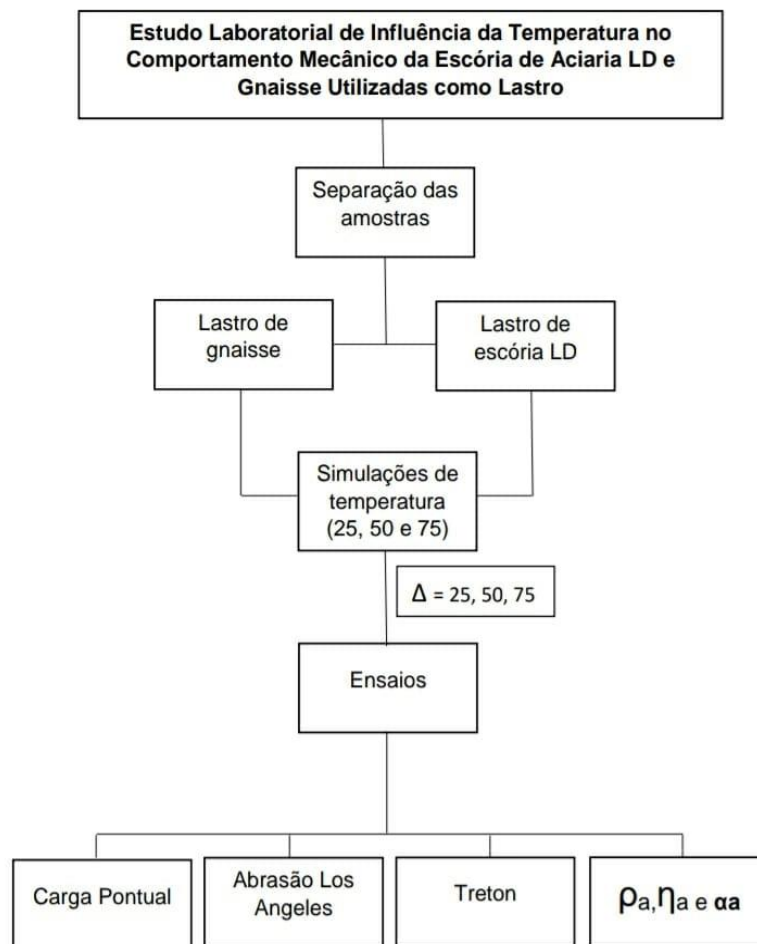
3 METODOLOGIA

Os materiais utilizados para ensaio são os fragmentos britados de gnaise, proveniente da pedreira de Santa Bárbara e escória de aciaria LD oriunda do Espírito Santo, vale ressaltar que os dois materiais devem atender a NBR 5564 (2021).

Ambas amostras não foram usadas in-natura, portanto já se encontravam em processo de degradação, pelo fato de estarem expostas ao ar livre.

A Figura 9 mostra o fluxograma com a metodologia utilizada no trabalho, todas etapas são mencionadas abaixo.

Figura 9 – Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho.



Fonte: Autor, 2024.

Conforme o fluxograma apresentado acima, as rochas foram inicialmente

separadas por tipo de material, e posteriormente submetidas as simulações de temperatura em estufa, depois foram feitos uma série de ensaios para determinação das suas características físicas e mecânicas. Para tal, avaliou-se os fragmentos no tempo 0 dia, logo após inseriu todo o material em uma estufa e em seguida, realizou-se outras baterias de ensaio no tempo 25 dias, 50 dias e 75 dias. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ferrovias e Asfalto da Escola de Minas da UFOP, em Ouro Preto - MG. As amostras são apresentadas na Figura 10.

Figura 10 – Agregados utilizados para os ensaios.



Fonte: Autor, 2024.

3.1 Intemperismo por estresse térmico

Atualmente não há uma norma brasileira para avaliar a perda de resistência de materiais de lastro ferroviário sob ação da temperatura, para isso, foi realizada uma adaptação da norma europeia EN 14617-6. As amostras foram submetidas a 20 ciclos de temperatura, com aquecimento e resfriamento. Neste normativo o indica que o material deve ser colocado em uma estufa a uma temperatura de 70°C durante o período de 18 horas, após o tempo as amostras foram submersas em água destilada a uma temperatura de 15°C durante 6 horas.

Para a avaliação da escória LD e gnaisse, a adaptação consistiu em inserir o

material em uma estufa a 80°C. Essa temperatura foi escolhida após observações laboratoriais de tempo de aquecimento e resfriamento totais dos materiais, uma vez que não se conseguiu dados oriundos das ferrovias brasileiras.

Com relação ao período dos ciclos, se optou por fazer de 0, 25, 50 e 75 dias pelo fato de haver estudos como o de Alves e Gomes (2023), em que a amostra ficou submetida ao gelo-degelo durante o mesmo período.

A Figura 11 nos mostra os materiais dentro da estufa no processo de resfriamento a temperatura ambiente.

Figura 11 – Estufas usadas para armazenamento das amostras.

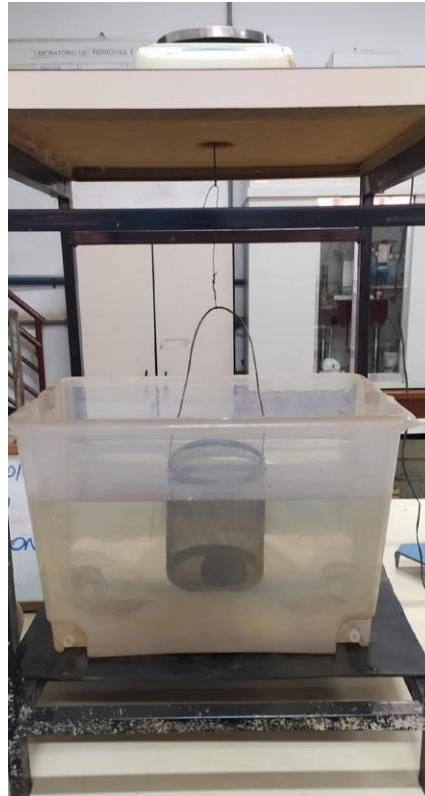


Fonte: Autor, 2024.

3.2 Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

Esse procedimento é feito de acordo com a NBR 5564 (2011). Para tanto, os corpos de prova foram pesados na condição de saturada (M_{sat}), seca (M_{sec}) e submerso (M_{sub}). Na Figura 12 nos mostra o mecanismo de pesagem hidrostática para aferição da massa submersa.

Figura 12 – Sistema de pesagem hidrostática.



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 13 traz o mecanismo de pesagem seca e saturada utilizado nos procedimentos.

Figura 13 – Mecanismo utilizado nas pesagens secas e saturadas.



Fonte: Autor, 2024.

3.3 Resistência ao choque

O ensaio foi realizado seguindo todos os procedimentos da norma NBR 5564 (ABNT, 2011). Para tal usou-se o aparelho de Treton (Figura 14), no qual após 10 choques em queda livre por 380 centímetros de um cilindro de 16 quilogramas, pode-se aferir a perda de massa do material em análise.

Figura 14 – Aparelho Treton.



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 15 nos demonstra os corpos de prova separadas de gnaisse e escória de aciaria antes de serem colocados no aparelho do ensaio. Logo após (Figura 16), têm-se a imagem depois de realizadas todas as etapas do procedimento.

Figura 15 – Corpos de prova antes da realização do ensaio.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 16 – Amostras após realizadas todas as etapas.



Fonte: Autor, 2024.

3.4 Resistência à abrasão

O ensaio de resistência à abrasão “Los Angeles” é estabelecido pela norma NBR 5564 (ABNT, 2011). Nesse ensaio, os materiais que se enquadram na graduação F da norma são colocados dentro da máquina Los Angeles (Figura 17) juntamente com as cargas abrasivas que são 12 esferas de aço (Figura 18), em seguida, o aparelho executa 1000 rotações conforme a massa do corpo de prova.

Figura 17 – Máquina “Los Angeles”.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 18 – Cargas abrasivas usadas na determinação da abrasão.



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 19 representa as amostras de cada material separadas em concordância com a NBR 5564 (ABNT, 2021) e que posteriormente foram levadas para o equipamento “Los Angeles”.

Figura 19 – Amostras separadas para o procedimento.



Fonte: Autor, 2024.

Após executada as devidas rotações, os materiais foram lavados sobre a peneira de malha 1,7 milímetros, secos em estufa e pesados (Figura 20) e (Figura 21).

Figura 20 – Gnaisse após ensaio.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 21 – Escória após ensaio.



Fonte: Autor, 2024.

3.5 Resistência à carga pontual e resistência à compressão uniaxial

Para esse procedimento foram selecionadas para cada tipo de amostra 20 fragmentos de acordo com a determinação da forma dos fragmentos explicitada na NBR 5564 (ABNT, 2011). Para o ensaio aqui abordado requer que os fragmentos tenham um formato que se aproximam do ideal para o uso em lastros, no caso cúbicos. A norma pede-se para realizar a medição de três dimensões, altura, comprimento e largura. A Figura 22 mostra os corpos de prova separados.

Figura 22 – Rochas separadas para realização do ensaio.

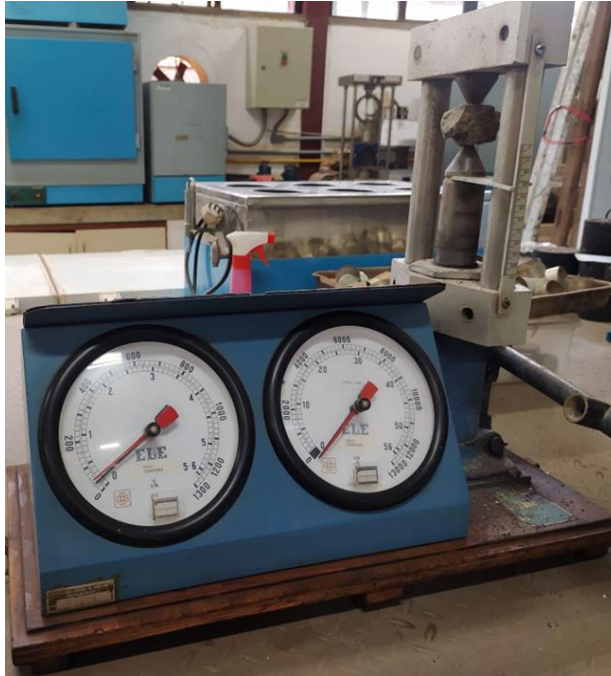


Fonte: Autor, 2024.

Após a seleção das amostras, foram submetidas a aplicação de carga pontual através do aparelho mostrado na Figura 23. A ponta mostrada na imagem abaixo é

responsável por aplicar a carga gradativamente até acontecer o rompimento do corpo de prova.

Figura 23 – Aparelho carga pontual no momento de aplicação da carga.



Fonte: Autor, 2024.

As figuras 24 e 25 mostram os modos de falha apresentados por alguns fragmentos de rochas, atendendo aos critérios de validade do ensaio.

Figura 24 – Modo de ruptura da escória.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 25 – Modo de ruptura do gnaiss.



Fonte: Autor, 2024.

Para obtenção da compressão uniaxial, estimou-se pela seguinte equação:

$$Sc = k \times Is \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

- Sc é a resistência à compressão uniaxial;
- K é o índice para o fator de conversão de força que depende da correlação específica entre Sc e Is;
- Is é o índice de força de carga pontual não corrigido de uma amostra.

Os valores de K indicados pela norma são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Índices para o fator de correção de resistência (K).

Tamanho da amostra (mm)	Valores de K generalizados
21,5	18
30	19
42	21
50	23
54	24
60	23,5

Fonte: Autor, 2024.

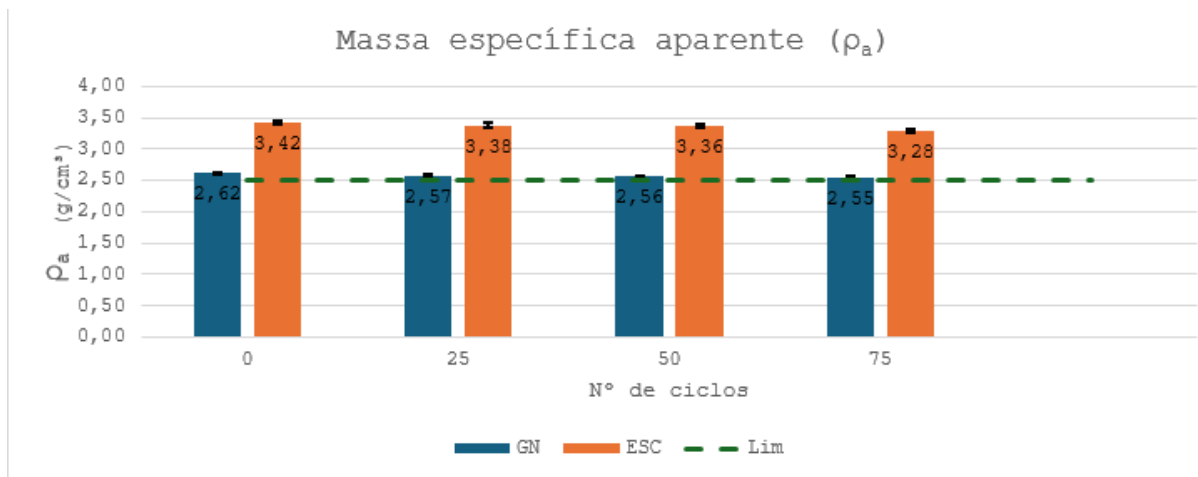
Dessa forma, por segurança e padronização, será adotado valor de k igual a 23 para os materiais em questão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água

Em primeiro momento, no Gráfico 1 é mostrado as massas específicas aparentes calculadas para os materiais analisados. ações e desafios enfrentados.

Gráfico 1 – Variação da massa específica aparente.



Fonte: Autor, 2024.

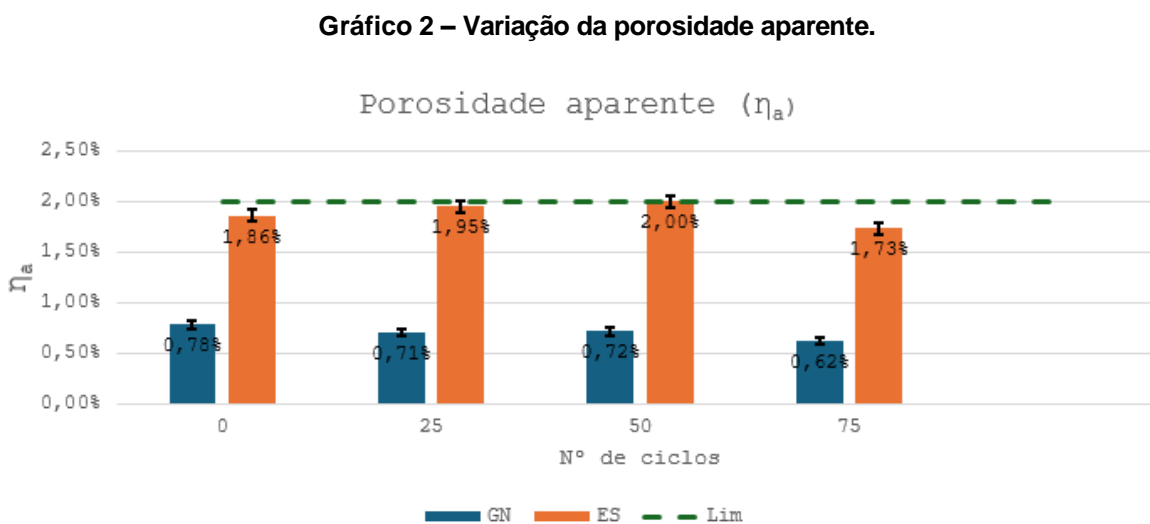
Em geral, o efeito do processo das duas amostras foi bem próximo em todos os ciclos, o gnaisse obteve uma redução de aproximadamente 2% no ensaio citado e a escória em torno de 5%. As duas amostras, em um primeiro momento, atenderam a massa específica mínima exigida pela NBR 5564 (ABNT, 2021) porém, percebe-se que o gnaisse apresentou um decréscimo neste parâmetro, ficando próximo ao valor mínimo estipulado. Já a escória vem reduzindo seus valores lentamente, se enquadrando acima de 2,5 g/cm³, talvez seja necessária uma maior quantidade de ciclos para fornecer um decréscimo.

Em comparação ao estudo realizado por Souza (2007) e Fernandes (2010) o resultado da massa específica da escória ficaram próximos do resultado obtido, visto que os valores foram 3,58 g/cm³ e 3,44 g/cm³ respectivamente, nos mostrando uma certa constância desse material.

Se comparada ao intemperismo físico estudado por Alves e Gomes (2023), temos que o parâmetro inicial para o gnaisse é o mesmo, porém, ao final do ciclo, a

amostra perde mais massa específica através do estudo feito por eles. Ainda sobre o estudo de Alves e Gomes (2023), tanto intemperismo físico quanto químico promoveu uma redução maior se comparada ao estudo feito neste trabalho.

A seguir, no Gráfico 2 é apresentado o gráfico referente à porosidade aparente calculada para os 4 ciclos de ensaios feitos.



Fonte: Autor, 2024.

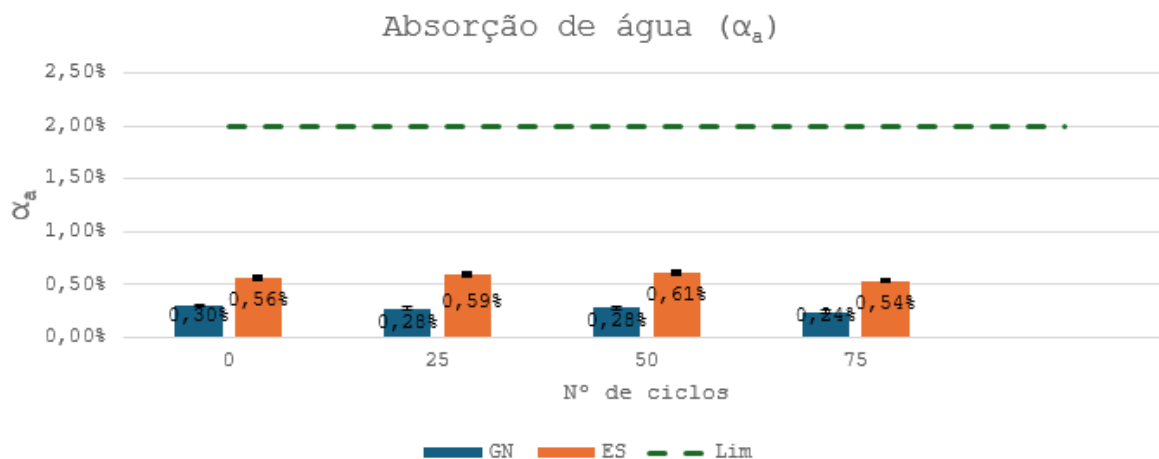
Em primeira avaliação, todas as amostras apresentaram porcentagem de porosidade abaixo do limite estabelecido em norma. Abordando o gnaïsse, percebe-se que o mesmo se manteve constante a partir do ciclo de 25 dias e havendo uma redução abaixo do valor inicial no ciclo de 75 dias, tornando adequado para uso em lastros de ferrovias. A escória, mostrou uma tendência de aumento até o ciclo de 50 dias, no entanto, o fato não se concretizou e no ciclo de 75 dias houve uma diminuição de aproximadamente 7,5% com relação à porosidade inicial.

Nos dois estudos de Alves e Gomes (2023) os materiais tiveram uma redução com relação ao valor inicial, embora não houvesse um padrão claro de redução da porosidade com o passar dos ciclos.

Segundo Ruiz-Agudo e Mees et al. (2007), é esperado que a porosidade aparente diminua até determinado ponto e depois alcance uma certa estabilização, fato que pode explicar a diminuição do gnaïsse e escória em 75 dias.

Por fim, no Gráfico 3 tem-se o gráfico com as variações da absorção de água das amostras.

Gráfico 3 – Variação da absorção de água.



Fonte: Autor, 2024.

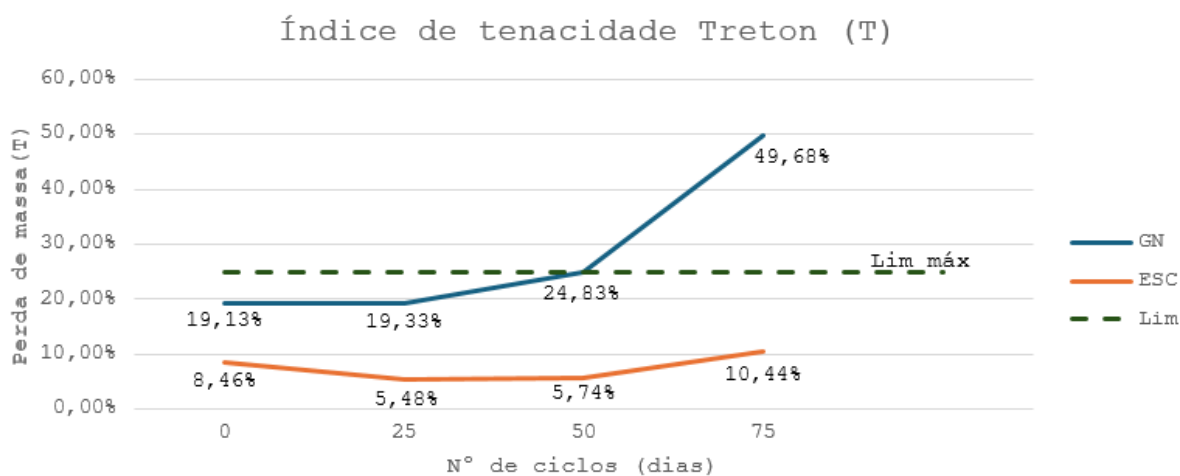
Com relação à absorção de água, todos os materiais se mantiveram bem abaixo do estipulado pelo normativo, que é 2,0%.

Embora os valores iniciais do experimento não sejam os mesmos, os valores ao fim dos ciclos para o gnaïsse ficaram próximos quando comparados ao estudo sobre gelo e degelo de Alves e Gomes (2023), vale ressaltar que ao longo deste estudo percebemos que o método de gelo e degelo aplicado por eles tem um maior poder de alteração do que a temperatura.

4.2 Resistência ao choque

O Gráfico 4 nos demonstra o gráfico de variação do Índice de Tenacidade Treton, vale ressaltar, que à medida que T aumenta, maior é a perda de massa obtida para a resistência ao choque da escória e gnaïsse.

Gráfico 4 – Variação do Índice de Tenacidade Treton.



Fonte: Autor, 2024.

Através das análises, pode-se citar que embora o gnaisse inicialmente apresentasse valores abaixo do limite estabelecido, a partir do ciclo de 50 dias é possível verificar uma tendência de aumento do índice à medida em que se progredem os ciclos de simulação, se tornando inviável seu uso para utilidade em lastro de ferrovias.

Um ponto a se destacar na rocha de gnaisse é a forte ascensão no quarto ciclo, indicando que talvez a influência da temperatura seja maior nas partículas retidas na peneira de 16mm, vale um posterior estudo a respeito de uma análise microestrutural desta amostra. No intemperismo químico de Alves e Gomes (2023), ao final dos ciclos, o gnaisse alcançou um índice de tenacidade de 42,1%, próximo ao que foi encontrado neste estudo, embora tenha partido de um valor inicial de 26,5%.

A escória LD, embora tenha apresentado uma flutuação nos resultados da tenacidade, se manteve dentro do limite estipulado de 25,00%, apesar que à medida que os dias avançam, mostra uma ascendência neste índice. Se realizar a comparação com o gnaisse nesse ensaio, mostra um melhor desempenho no quesito.

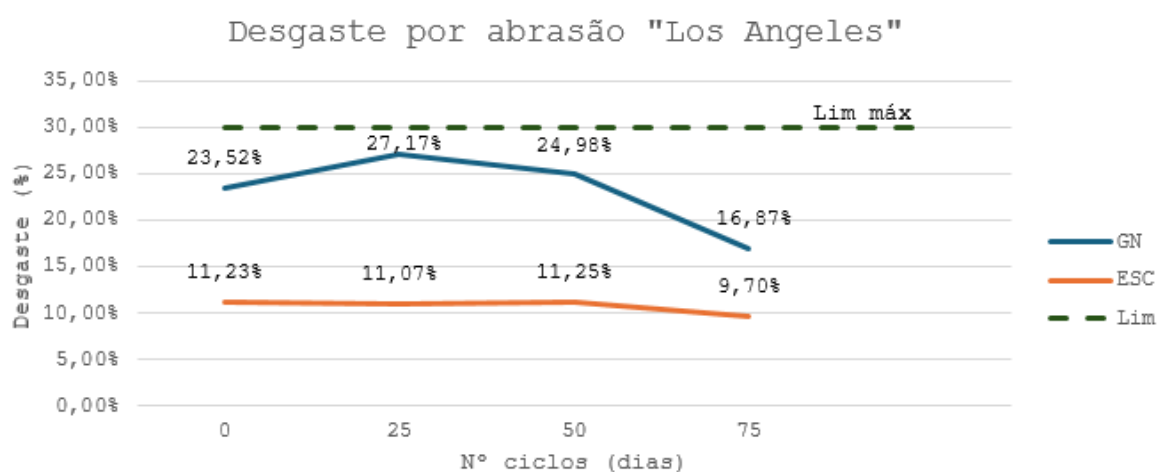
As pesquisas de Sousa (2007) e Fernandes (2010), forneceram valores que não se distanciaram dos obtidos neste trabalho, tendo como valores 10,20% e 7,74%

respectivamente. Vale ressaltar que os materiais muito provavelmente são provenientes de lotes e usinas diferentes com relação ao usado no presente estudo.

4.3 Resistência à abrasão

No Gráfico 5, estão os resultados do ensaio de resistência à abrasão. Um maior valor de desgaste indica uma maior perda de massa do material após o procedimento.

Gráfico 5 – Variação da resistência ao desgaste por abrasão.



Fonte: Autor, 2024.

No gnaisse as diferenças de resultados dos três primeiros ciclos são bastantes singelos, no último ciclo atinge seu valor mínimo de desgaste, fazendo com que se aproxime 17%. Já a escória embora também tenha se mantido com certa constância nos primeiros três ciclos, no último houve um ganho de resistência à abrasão de aproximadamente 15%.

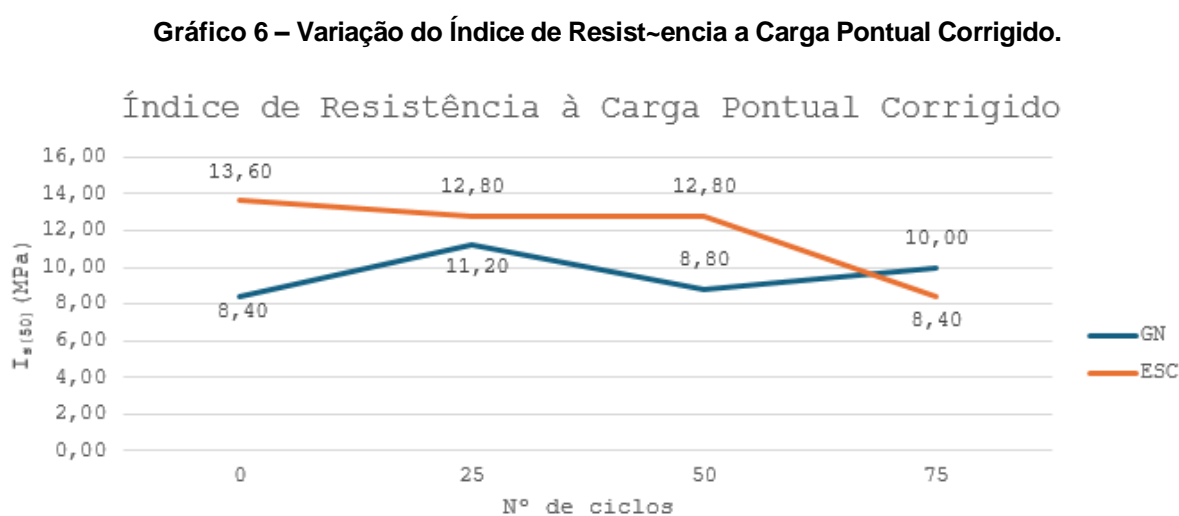
No estudo de Sousa (2007), a escória apresentou uma abrasão de 11,20% de uma amostra e 11,80% da outra amostra. Percebe-se que são valores próximos, concluindo que os ciclos de temperatura talvez não tenham sido suficientes para a perda de resistência da amostra.

Os resultados para o intemperismo físico de Alves e Gomes (2023) nos três primeiros ciclos foram aproximados com os obtidos neste trabalho e causando uma mudança no último ciclo, sendo que no primeiro trabalho alcançou 13,1% e neste

9,70%. Faz-se necessário uma continuação de ambos os experimentos para concluir se as amostras tomarão caminho inverso igual ao visto em 75 dias.

4.4 Resistência à carga pontual e resistência à compressão uniaxial

Abaixo no Gráfico 6, segue o resultado do Índice de Resistência à Carga Pontual Corrigido.



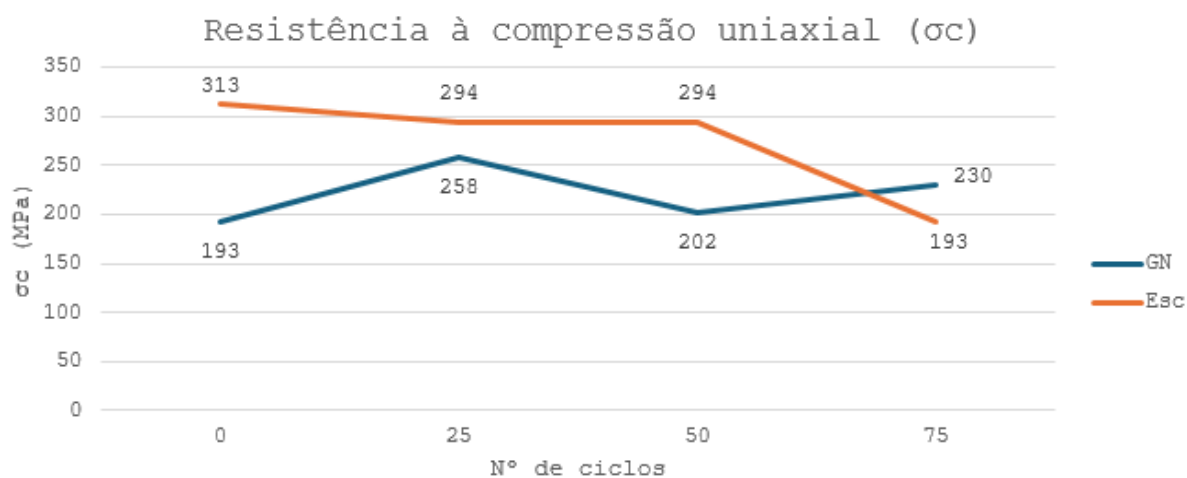
Fonte: Autor, 2024.

Como mostra o gráfico, há uma tendência de queda na resistência, apesar que no gnaisse a diminuição não é muito significativa. A escória apresentou um decréscimo mais constante que talvez possa ser associado a degradação provocada pela temperatura.

Para a escória LD, Fernandes (2010), em seu estudo achou valor de 11,79 MPa nos indicando que a temperatura pode fazer com que a amostra perca resistência, mesmo que de uma forma lenta.

Para avaliar a resistência à compressão da norma NBR 5564 (ABNT, 2021), segue no Gráfico 7 o gráfico com o resultado.

Gráfico 7 – Variação da resistência à compressão uniaxial.



Fonte: Autor, 2024.

Apenas a escória apresentou uma queda de resistência expressiva, há uma necessidade de investigação direta da resistência à compressão, devido a dispersão entre os corpos de prova da escória LD. Fernandes (2010) obteve um valor de 183 MPa para escória de aciaria LD, valor ligeiramente menor do que o presente estudo.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a alteração das características físicas e mecânicas de lastros de escória e gnaïsse após serem submetidos a temperatura em média de 80 graus Celsius.

Os estudos feitos demonstram que o calor pode provocar alterações na resistência das amostras, porém, para se ter uma melhor análise dos resultados é necessária uma quantidade maior de ciclos.

Abordando as características iniciais dos materiais estudados, a escória apresentou um maior valor de massa específica, porosidade e absorção frente ao gnaïsse. As avaliações iniciais de resistência mecânicas indicaram que o gnaïsse apresentou menor resistência ao choque e à abrasão, no entanto não extrapola o limite estabelecido pela referência normativa.

Nos resultados da massa específica, o gnaïsse merece um destaque, por ser o único que ficou com o valor em todos os 4 ciclos muito próximo do valor mínimo exigido pelo normativo.

Com relação à porosidade, como já era de se esperar, a escória forneceu valores altos, sendo que no ciclo de 50 dias atingiu o valor 2,00% seguido de uma redução. Com relação à absorção, não houve nenhum valor que chamasse atenção pois ambas se mantiveram constantes durante os 4 ciclos.

Abordando as características mecânicas, vale ressaltar o ocorrido no ensaio de tenacidade com a amostra de gnaïsse, embora tenha aumentado o índice no ciclo de 50 dias, no último demonstrou um forte aumento, não atendendo ao máximo exigido pela norma. Vale um estudo da análise microestrutural desse material.

No ensaio de Abrasão Los Angeles, gnaïsse demonstrou um comportamento irregular perante a temperatura, mas ao final do último ganhou em resistência a abrasão, fundamental a realização de outros ciclos para confirmar qual será a tendência da amostra quando submetida a maior quantidade de ensaios.

Quanto às propriedades aferidas no presente estudo, a escória aciaria LD mostrou ser uma boa alternativa para uso em lastro de ferrovias. Com relação aos parâmetros mecânicos a amostra esteve acima do estipulado no normativo em todos os ensaios mecânicos. Atenção especial se deve à porosidade, embora não tenha

ultrapassado o limite, se manteve muito próximo, necessário ter um ponto de atenção com essa característica.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 5564: **Via férrea - Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2021.
- ANTF. Informações gerais - O setor ferroviário de carga brasileiro. **ANTF**, 2023. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 16 maio 2023.
- BRINA, H. L. **Estradas de ferro**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 1, 1988.
- CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, E.P. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos**. ABIROCHAS, São Paulo, SP. 2009. 118p
- CORR, D. J. et al. **Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy**. Cement & Concrete Composites, v. 26, p. 1007–1012, 2004.
- DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, P.S.R.; MISRA, V.N. **An overview of utilization of slag and sludge from steel industries**. Resources, Conservation and Recycling, v. 50, p. 40-57. 2007.
- Delgado BG, Viana da Fonseca A, Fortunato E, Goretti da Motta LM. **Influência da morfologia das partículas no comportamento do lastro ferroviário de um agregado de escória de siderurgia**. Português Environ Geotech 2022;9(6):373–82.
- DEMIRDAG, S. **Effects of freezing–thawing and thermal shock cycles on physical and mechanical properties of filled and unfilled travertines**. Construction and Building Materials, 2013. 1395-1401.
- DIAS FILHO, J. L. E., XAVIER, G. C., MAIA, P. C. A. **Durability of Ornamental Gneiss Stones from Pádua, Rio De Janeiro, Brazil**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 32, p. 04020176-04020186, 2020.
- EN 14617-6. Agglomerated stone. Test methods. **Determination of thermal shock resistance**, 2012

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETÓN. CEB-FIP Bulletin 38. Fire Design of Concrete Structures – Material, Structures and Modeling. 106 p. Lausanne, Switzerland, 2007

FERNANDES, D. P. **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.** Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP-NUGEO. Ouro Preto. 2010.

GEYER, R.M.T. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto.** 2001. 187f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – 36 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre

Hussain A, Hussaini SKK. **Uso de escória de aço como lastro ferroviário: uma revisão.** Transporte Português Geotech 2022;35:100779.

INDRARATNA, B.; NIMBALKAR, S. S.; TENNAKOON, N. C. **The behaviour of ballasted track foundations: Track drainage and geosynthetic reinforcement.** Geotechnical Special Publication, 2010. 2378-2387.

INDRARATNA, B.; SALIM, W. **Mechanics of Ballasted Rail Tracks: A Geotechnical Perspective.** AK: Taylor & Francis/Baikema, 2005.
Journal of Geotechnical Engineering, 1979. 676-681.

KARACA, Z. et al. **Effect of freeze–thaw process on the abrasion loss value of stones.** International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010. 1207-1211.

Koh T, Moon SW, Jung H, Jeong Y, Pyo S. **Um estudo de viabilidade sobre a aplicação de escória de aço de forno de oxigênio básico (BOF) para material de lastro ferroviário.** Sustentabilidade 2018;10(2).

L.E. Vasconcellos, G.S.L.F. Melo, **Fases cerâmicas com expansão térmica nula ou negativa apresentando elevada resistência ao choque térmico** (2018) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LEITE, P.P.N., BUZATO, A., COSTA, L.R.T. **Uma contribuição para pesquisa e desenvolvimento da escória de aciaria da Companhia Siderúrgica de Tubarão.** 1997, Vitória, ES. p.12-70)

Lichtberger, B. (2005) **Track Compendium – Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics**, Eurail Press, 635 p. ISBN: 9783777103204

MEDÍRCIO, S. N. **Redução do teor de sulfato e de metais em águas pela utilização de bactérias redutoras de sulfato.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental/UFOP. Ouro Preto. 2004.

Merheb, Antonio Hamilton Michel. **Análise mecânica do lastro ferroviário por meio de ensaios triaxiais cíclicos.** Universidade de São Paulo, 19 de setembro de 2014. DOI.org (Crossref).

NURMIKOLU, A. **Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in structural layers of railway track.** Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere University of Technology. Tampere. 2005.

OLIVEIRA, R. W. H. **Caracterização da escória de ferro silício-manganês para a aplicação como agregado em pavimentação ferroviária.** Programa de Pós Graduação em Geotecnia da UFOP-NUGEO. Ouro Preto. 2013.

Pinińska J. (2007): **O efeito de um aumento da temperatura nas propriedades mecânicas das rochas,** Trabalhos Científicos do Instituto de Geotecnia e Hidrotecnia da Universidade de Ciência e Tecnologia de Wrocław No. 527–534.

PIRES, J. et al. **Degradação do lastro ferroviário – principais aspectos e estudos de caso**. Revista Transportes, v. 25.

PRESS, F. et al. **Para Entender a Terra**. 4^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

RAYMOND, G.. P.; DIYALJEE, V. A. J. **Railroad ballast sizing and grading**.

REMÉDIO, M. J. **Caracterização Tecnológica De Agregados Para Uso Como Lastro De Trem De Alta Velocidade – Trecho Campinas/São Paulo**. 2014. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2014.

REMÉDIO, M. J.; RIBEIRO, R. P.; CURTIS NETO, J. A. **Correlações Entre Petrografia e Propriedades Tecnológicas de Materiais Pétreos Visando Utilização Como lastro de Ferrovias**. Geociências, São Paulo, v. 37, n. 3, p.669-681, 2018.

ROCHA, B. D. S. **Manifestações patológicas e avaliação de estruturas de concreto armado**. Escola de Engenharia/UFMG. Belo Horizonte. 2015.

Rodriguez-Navarro C, Doehne E. **Intemperismo salino: influência da taxa de evaporação, supersaturação e padrão de cristalização**. Earth Surf Proc Land 1999;24(3): 191–209.

RUIZ-AGUDO, E. et al. The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. **Environmental Geology**, n. 52, p. 269-281, 2007.

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. **Track geotechnology and substructure management**. New York: Thomas Thelford, 1994.