UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

RONY SOUZA DOS SANTOS

Lastro ferroviário de granitos e rocha básica em regiões tropicais: relações entre petrografia, propriedades físico-mecânicas e de alterabilidade

São Carlos
2021

RONY SOUZA DOS SANTOS

Lastro ferroviário de granitos e rocha básica em regiões tropicais: relações entre petrografia, propriedades físico-mecânicas e de alterabilidade

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP – como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú

São Carlos
2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

S2311

SANTOS, RONY SOUZA DOS
LASTRO FERROVIÁRIO DE GRANITOS E ROCHA BÁSICA EM REGIÕES TROPICAIS: RELAÇÕES ENTRE PETROGRAFIA, PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS E DE ALTERABILIDADE / RONY SOUZA DOS SANTOS; orientador ROGÉRIO PINTO RIBEIRO; coorientador ANTENOR BRAGA PARAGUASSÚ. São Carlos, 2021.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Lastro de ferrovia. 2. Propriedade das rochas. 3. Análises petrográficas. 4. Ensaios tecnológicos. 5. Alterabilidade. 6. Imersão em etilenoglicol. 7. Câmara UV. 8. Micro-Deval. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Geólogo **RONY SOUZA DOS SANTOS.**

Título da dissertação: "Lastro ferroviário de granitos e rocha básica em regiões tropicais: relações entre petrografia, propriedades físico-mecânicas e de alterabilidade".

Data da defesa: 19/01/2021.

Comissão Julgadora	Resultado
Prof. Dr. **Rogério Pinto Ribeiro** **(Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)	Aprovado
Profa. Dra. **Denise Balestrero Menezes** (Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)	Aprovado
Profa. Dra. **Rosângela dos Santos Motta** (Escola Politécnica/EP-USP)	Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade de podermos investigar sua grande obra – a Terra.

Agradeço também pelo presente trabalho ter sido realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Minha gratidão às escolas pelas quais passei e que foram a minha base de educação, SESI-417; Geologia – UFPR e Geotecnia da USP de São Carlos.

Agradeço aos funcionários do departamento de Pós-Graduação da Geotecnia EESC-USP: Oscar dos Santos Neto, Álvaro Luis Nery, Herivelto Moreira dos Santos, Maristela Aparecida Batissaco, Benedito Osvaldo de Souza, Damiana e Benê pelos “bons dias” que me davam com alegria. Também ao Décio Aparecido Lourenço, pelo suporte na preparação dos corpos de provas e amostras, bem como no suporte na realização de alguns ensaios.

Aos Professores da banca de qualificação do mestrado: Professor Antonio Carlos Artur (UNESP) e Professor Leomar (SET-EESC), pelas importantes observações e sugestões.

Às parcerias acadêmicas: Professor Max e Vareda (SET-EESC), Professor Danilo (IQSC-USP) e Professora Maria Olimpia (IQSC-USP), Professor Gustavo Xavier (LECIV-UENF) e Geóloga Monica Perrota (CPRM-São Paulo), pelo apoio e suporte laboratorial na realização dos experimentos e análises.

Agradeço de todo o meu coração ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro, por acreditar em mim e me dar o suporte para finalizar esta dissertação de mestrado. Da mesma forma, agradeço ao meu co-orientador e amigo de longas conversas, o Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassú.

Ao meu amigo Geólogo, João Antonio Curtis, por todo apoio e ajuda em nossas batalhas diárias.

DEDICATÓRIA

Agradeço a toda minha família pela compreensão de tantas ausências. Vocês fazem parta desta conquista.

À minha irmã Katia, pelo acompanhamento e conversas.

Ao meu irmão Alex, que foi meu exemplo de dedicação.

À minha amada Lili, pelo companheirismo, por me ajudar a ter mansidão no coração e a encontrar felicidade e alegrias do dia a dia.

Ao meu pai Pedro, que me ensinou o valor da educação e o quanto ela nos liberta.

Sinta-se em mim o seu sonho de estudar realizado.

À minha mãe, Márcia, mulher guerreira, que me ensinou acreditar e lutar por meus sonhos.

Sem vocês, nada disso seria possível.

Quando olhamos para trás, depois de tudo que passamos, podemos dizer hoje: Vencemos!

RESUMO

SANTOS, R.S. Lastro ferroviário de granitos e rocha básica em regiões tropicais: relações entre petrografia, propriedades físico-mecânicas e de alterabilidade. 2021. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

A importância da correta escolha do tipo de rocha para compor um lastro ferroviário está em reduzir os onerosos custos de manutenção, causados pela sua degradação devido ao tráfego e o intemperismo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é avaliar, de modo comparativo, a evolução dessa degradação de três materiais rochosos, sendo dois granitoides e um microgabro que, eventualmente, poderiam ser empregados como lastro, pela proximidade das pedreiras com o traçado de uma ferrovia a ser construída entre São Paulo e entorno de Campinas, região sudeste do Brasil. Essas rochas apresentam propriedades mecânicas excelentes e com base em análises petrográficas detalhadas, foram submetidas a ensaios de alterabilidade com água, imersão em soluções de sulfato de sódio e de etilenoglicol, todos com secagem água-estufa. Quanto ao ensaio de etilenoglicol, mostrou-se que deve ser obrigatório na caracterização de qualquer rocha básica. No caso do microgabro, não é indicado para a função de lastro de ferrovia em regiões de clima tropical, devido a facilidade de alteração de seus minerais nestas condições climáticas. Em relação aos ensaios de abrasão por Micro-Deval mostraram-se importantes para a caracterização de abrasividade da rocha em estado saturado uma vez que o ensaio de abrasão *Los Angeles* submete as partículas ao impacto, descaracterizando a abrasividade da rocha e sendo realizado a seco. Já o *Slake Durability Index*, realizado com ciclos de saturação em etilenoglicol e secagem em estufa evidenciou intensa degradação das partículas rochosas do microgabro. Desta forma, estes ensaios mostraram-se importantes para o estudo da degradação dos agregados rochosos e são capazes de prever o comportamento dos materiais para obras de engenharia, notadamente na utilização em lastros de ferrovias. Rochas com baixa tenacidade tendem a criar materiais mais finos devido a quebra dos contatos das partículas gerando a colmatação nos vazios dos lastros. Assim, o ensaio de resistência ao choque (Impacto Treton) mostra-se importante na qualificação da tenacidade da rocha do lastro mesmo apresentando alta resistência mecânica. Porém, a sua preparação e graduação pode não retratar fielmente a tenacidade à fratura do material ensaiado, tornando-se oportuno a construção de aparatos de maior porte para ensaios de lastros de ferrovias ou a utilização de ensaios não usuais no Brasil, bem como o *Impact Fragmentation* e *Aggregate Crushing Value Test* mencionados neste trabalho. Adicionalmente, foram realizados mil horas de ciclagens por condensação e emissão de raios UV através do equipamento *Weather-Ometer*, evidenciando uma notável modificação macroscópica em respeito ao aspecto de coloração e das características superficiais dos minerais máficos especialmente no microgabro. Através da Espectroscopia de Reflectância, corroborou-se juntamente com uma descrição de petrografia detalhada a presença de argilominerais expansivos. Cabe destacar, no entanto, que os materiais pétreos utilizados como agregado para lastro de ferrovias ficam sujeitos à exposição constante das intempéries, estando sob maior influência do meio em termos da decomposição dos minerais por reações químicas. Portanto, estudos envolvendo alterabilidade se tornam tão importantes quanto os de caracterização geomecânica das rochas visando este tipo de uso.

Palavras-Chave: Lastro ferroviário. Propriedades das rochas. Análises petrográficas. Ensaios tecnológicos. Alterabilidade. Imersão em etilenoglicol. Câmara UV. Micro-Deval.

ABSTRACT

SANTOS, R.S. Railway ballast using granites and basic rock in tropical regions: relationships between petrography, physical-mechanical and alterability properties. 2021. 94 p. Dissertation (Master in Geotechnics) - School of Engineering of São Carlos, Graduate Program in Geotechnics, University of São Paulo, São Carlos, 2021

The importance of the right choice of rock for railway ballast is to reduce the costly maintenance costs, caused by degradation due to traffic and weathering. Thus, the objective of this study was to comparatively evaluate the evolution of this degradation in three rocky materials, two granitoids and a microgabbro that, eventually, could be used as ballast, given the short distance of the quarries to the route of a railroad to be built between São Paulo and the surroundings of Campinas, southeastern Brazil. These rocks have excellent mechanical properties and, based on detailed petrographic analysis, were subjected to water alterability tests, immersion in sodium sulfate and ethylene glycol solutions, all after oven drying. As for the ethylene glycol test, it should be mandatory for characterization of any basic rock. In the case of microgabbro, it is not indicated for use in railroad ballast in tropical regions, due to the ease of alteration of minerals in these climatic conditions. Regarding the Micro-Deval abrasion tests, they proved to be important for characterization of rock abrasiveness in saturated state, once the Los Angeles abrasion test subjects the particles to impact, decharacterizing the abrasiveness of the rock and is carried out dry. The Slake Durability Index, carried out with cycles of saturation in ethylene glycol and oven drying, showed intense degradation of rocky microgabbro particles. In this way, these tests proved to be important for the analysis of the degradation of rock aggregates and are capable of predicting the behavior of materials for engineering works, notably for use as railway ballast. Rocks with low tenacity tend to create thinner materials due to the breakage of particle contacts causing clogging of ballast voids. Thus, the Treton toughness index (impact test) proved to be important for qualification of the ballast rock tenacity, even with high mechanical strength. However, its preparation and graduation may not faithfully indicate the fracture tenacity of the material tested, making it opportune to build larger apparatuses for testing railroad ballasts or the use of unusual tests in Brazil, as well as the *Impact Fragmentation* and *Aggregate Crushing Value Test* mentioned in this study. Additionally, 1,000 hours of cycling by condensation and emission of UV rays were carried out using the Weather-Ometer equipment, evidencing a notable macroscopic change in terms of color and the surface characteristics of mafic minerals, especially in the microgabbro. Through Reflectance Spectroscopy, the presence of expansive clay minerals was corroborated together with a detailed petrographic description. Importantly, stone materials used as aggregates in railway ballast are subjected to constant exposure to weather, being under stronger influence of the environment in terms of chemical mineral decomposition. Therefore, studies involving alterability become as important as the geomechanical characterization of rocks aimed at this use.

Keywords: Railroad ballast. Rock properties. Petrographic analysis. Technological testing. Alterability. Immersion in ethylene glycol. UV chamber. Micro-Deval.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....11

1.1 OBJETIVOS.....12

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....13

2.1 BREVE CONTEXTO HISTÓRICO SOBRE MALHA FERROVIÁRIA BRASILEIRA.....13
2.2 AGREGADOS ROCHOSOS: DADOS ESTATÍSTICO, PRODUÇÃO E APLICAÇÃO.....17
2.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS ROCHOSOS.....22
2.3.1 Análises petrográficas e mineralógicas.....24
2.3.2 Britagem, forma dos fragmentos e granulometria.....24
2.3.3 Índices físicos.....27
2.3.4 Propriedades mecânicas.....28
2.3.4.1 Ensaio de resistência à compressão pontual e compressão uniaxial.....28
2.3.4.2 Abrasão *Los Angeles*.....28
2.3.4.3 Ensaio de abrasão Micro-Deval.....29
2.3.4.4 Ensaio de resistência ao impacto Treton.....31
2.3.4.5 Resistência ao esmagamento dos agregados rochosos.....32
2.3.5 Alterabilidade de rochas.....32
2.3.5.1 Ensaio de sanidade por sulfato de sódio.....32
2.3.5.2 Ensaio de saturação de rochas em água e secagem em estufa.....33
2.3.5.3 Ensaio de ciclagem acelerada com etilenoglicol.....33
2.3.5.4 Ensaio de intemperismo artificial com equipamento *Weather-Ometer*.....34

3. METODOLOGIA.....36

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....36
3.2 NORMALIZAÇÕES E PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....40

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....47

4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO E PETROGRAFIA DAS ROCHAS ESTUDADAS.....47
4.1.1 Complexo Morungaba (MOR).....47
4.1.1.1 Material.....47
4.1.1.2 Aspectos gerais.....48
4.1.1.3 Composição mineralógica e detalhes microscópicos.....48
4.1.2 Granito Cantareira (CAN).....50
4.1.2.1 Material 51
4.1.2.2 Aspectos gerais.....51

4.1.2.3 Composição mineralógica e detalhes microscópicos.....52
4.1.3 Intrusivas básicas (GAB).....54
4.1.3.1 Material..... 55
4.1.3.2 Aspectos gerais.....55
4.1.3.3 Composição mineralógica e detalhes microscópicos.....56
4.1.4 Síntese das análises petrográficas.....58
4.2 ÍNDICES FÍSICOS.....60
4.3 FORMA DOS FRAGMENTOS.....62
4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS..... 66
4.4.1 Resistência da rocha intacta.....66
4.4.2 Resistência do agregado graúdo.....67
4.4.3 Síntese das propriedades mecânicas.....68
4.5 ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA.....72
4.5.1 Saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa.....72
4.5.2 Saturação em água e etilenoglicol com secagem em estufa.....73
4.5.3 Relações entre petrografia e ensaios de alterabilidade.....76
4.5.4 Ensaios de intemperismo artificial acelerado em câmara UV – *Weather-Ometer*.....77

5. CONCLUSÕES.....83

REFERÊNCIAS.....87

1. INTRODUÇÃO

Ferrovia é um meio de transporte essencial e estratégico que desempenha papel vital na economia de um país. Nos últimos anos o Brasil tem realizado pesquisas para implementação de novas ferrovias lastradas para a distribuição de diversos tipos de mercadorias produzidas em grande escala, como produtos agrícolas e minérios extraídos no interior dos Estados, para serem distribuídos entre as cidades, indústrias e portos.

As pesquisas de ferrovias também estão voltadas ao transporte de passageiros interligando os principais aeroportos do país por meio de trens de média e alta velocidade (CONSTANCIO, 2020; REVISTA FERROVIÁRIA, 2019; CAGNON et al., 2015).

Majoritariamente as ferrovias lastradas são utilizadas em todo o mundo por diversas razões, dentre elas, economia na implantação, facilidade na drenagem das águas pluviais e fácil manutenção.

Merece destaque que, aliado ao notável avanço tecnológico que vem ocorrendo na manufatura de trilhos e dormentes, também é de fundamental importância o conhecimento das propriedades tecnológicas de rochas mais apropriadas para uso como agregado nos lastros de ferrovias. Isto inclui os aspectos petrográficos (FRASCÁ, 2019; GANESHA et al., 2016; POMONIS et al., 2007), tanto para suportar as solicitações mecânicas impostas (ESFAHANI et al., 2019; WU et al., 2018; PAIVA et al., 2018; PIRES et al., 2017) quanto a sua alterabilidade (APAYDIN e YILMAZ, 2019; CELIK e AYGUN, 2019; VAN BLERK et al., 2017; SADEGHI; ZAKERI; NAJAR, 2016), principalmente considerando as condições intempéricas que estes materiais rochosos estarão expostos predominantemente em clima tropical.

Estas constatações motivaram o Grupo de Tecnologia de Rochas (GTR) da Área de Pós-Graduação em Geotecnia da EESC-USP a retomar estudos de caracterização de agregados para uso em lastros de ferrovia, dando continuidade a pesquisas que há mais de quatro décadas vêm sendo desenvolvidas sobre materiais pétreos para construção civil.

Os estudos vêm sendo alicerçados dentro de dois enfoques distintos: as relações entre as propriedades tecnológicas das rochas e suas utilizações como maciço de fundação (RIBEIRO et al., 2019; PARIZOTTO et al., 2014) e agregados (SANTOS et al., 2021; (SANTOS et al., 2019; CURTIS NETO et al., 2018; REMÉDIO et al., 2018).

Dentro destas perspectivas, o tema central da presente pesquisa de mestrado envolve estudos que enfatizam as importantes relações entre as propriedades físico-mecânicas, químico-mineralógicas e texturais de rochas num contexto geotécnico do desempenho dos materiais de construção nas obras de engenharia, mais especificamente do uso de agregado graúdo como lastro de ferrovia.

Este estudo foi realizado por meio de trabalhos de campo em exposições

representativas de pedreiras e minuciosos procedimentos de coleta e preparação de amostras para ensaios de laboratório.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do presente estudo é adquirir conhecimentos a respeito da degradação de materiais pétreos que são comumente usados como agregados para concreto e pavimentação, mas ainda pouco estudados na utilização em lastro de ferrovias.

Para tanto, de modo comparativo, estes materiais serão submetidos a processos de alteração acelerada conjugados a ensaios mecânicos, visando o estudo das solicitações mecânicas (impacto, atrito, esmagamento etc.) e do intemperismo a que estará sujeito o lastro em uma ferrovia exposta a um clima tropical.

Indiretamente, em função da abrangência metodológica proposta na pesquisa, alguns objetivos específicos foram delineados:

a) Dar continuidade a estudos envolvendo alteração acelerada de rochas por meio de secagem e saturação em água, solução de sulfato de sódio e etilenoglicol;

b) Verificar a adequabilidade de estudos de alterabilidade de rochas (brita) por meio de ensaio de intemperismo acelerado em câmara ultravioleta (*Weather-Ometer*);

c) Realizar a caracterização tecnológica de diferentes rochas envolvendo a comparação entre ensaios (resistências à compressão uniaxial, puntiforme, *Los Angeles* e Micro-Deval) para determinação da resistência mecânica dos materiais em termos dos esforços compressivos e de abrasão impostos aos lastros de ferrovias;

d) Dar contribuição para o aprimoramento da norma NBR 5564 (ABNT, 2021) que foi revisada recentemente pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BREVE CONTEXTO HISTÓRICO SOBRE MALHA FERROVIÁRIA BRASILEIRA

A primeira ferrovia brasileira foi construída e concedida a pedido do Barão de Mauá no período do Império, sob a regência de Dom Pedro II. Inaugurada em 1854 essa via férrea tinha 14,5 km de extensão e ligava Baía de Guanabara até Petrópolis no Rio de Janeiro. A via permitiu a primeira operação de transporte intermodal do Brasil, possibilitando integração dos meios de locomoção por vias hidroviária e ferroviária no país.

A partir da Proclamação da República em 1889, houve maior investimento na construção e ampliação das linhas férreas devido, principalmente, ao transporte de commodities (produtos agrícolas e bens minerais, por exemplo) brasileiras em direção aos principais portos do país. Já na década de 1930, o Brasil tinha mais de 29 mil km de extensão de uma malha ferroviária consideravelmente desenvolvida quando comparada a outros países de mesma economia e dimensão territorial.

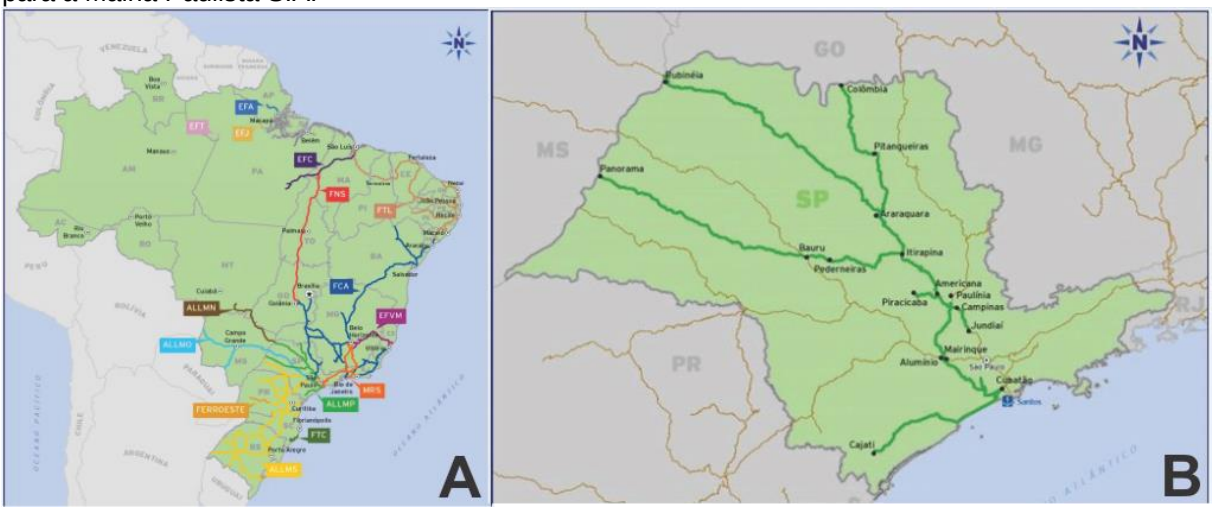
No período conhecido como os “Anos Dourados”, na década de 1950, houve o processo de industrialização e urbanização. Nessa conjuntura econômica favorável, as ferrovias foram perdendo investimentos para o transporte rodoviário o que predomina até os dias atuais.

Nos anos de 1996 a 1998, iniciou-se o processo de concessão para exploração e investimento da iniciativa privada no sistema ferroviário do Brasil, sendo que as empresas vencedoras das licitações detêm o direito de explorar comercialmente as ferrovias geralmente por trinta anos.

Conforme o Tribunal de Contas da União (TCU, 2019), apesar da grande maioria das ferrovias terem sido concedidas para exploração, a atual malha ferroviária brasileira é a mesma do século passado. Segundo o Ministério da Infraestrutura (2018), o Brasil transporta por trem somente 15% de toda a carga movimentada internamente no país, sendo considerada baixa quando comparada a outros países, de dimensões continentais similares, como a Rússia (81%), EUA (37%) e a China (19%).

Com base na Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2015), a atual abrangência da malha ferroviária brasileira permite a conexão das principais regiões produtoras agrícolas e de minérios com os diversos portos do litoral do país. As ferrovias brasileiras possuem importância estratégica, inclusive para a integração de todo o território nacional. Na atualidade, totalizam 28.218 km de extensão e em grande parte são operadas por empresas privadas, sendo que a Ferrovia Norte-Sul esteve sob o controle estatal até março de 2019. As principais ferrovias brasileiras são mostradas na Figura 1.

Figura 1: (A) Principais ferrovias brasileiras. (B) Concessão ferroviária no Estado de São Paulo, cedida para a Malha Paulista S.A.



Fonte: Modificado de CNT (2015).

Segundo o TCU (2019), no ano de 2017, o total de cargas transportadas em ferrovias no Brasil foi superior a 539 milhões de toneladas, utilizando-se 3.043 locomotivas e 102.024 vagões em circulação pelo país. Entre os principais produtos estão: minério de ferro, soja, açúcar, carvão mineral, milho, óleo diesel, produtos siderúrgicos e ferro gusa.

Apesar da aparente pujança dos números supracitados, estudos realizados pela Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2018) e (CNT, 2015) sobre a expansão da malha ferroviária e o desenvolvimento econômico do país, identificaram que apenas 7,6% (US$ 62 milhões) dos recursos investidos no setor ferroviário no período de 2006 a 2013 foram destinados à sua ampliação (Figura 2).

Estas entidades, também mostraram que 1/3 das ferrovias brasileiras encontram-se inutilizadas, sendo 30,6% (8,6 mil km) da extensão de trilhos ferroviários com baixo aproveitamento e 23,1% (6,5 mil km) de alta ociosidade das vias sem condições operacionais, frutos da falta de competitividade e de investimentos na expansão e conexão entre os sistemas ferroviários que possibilitariam em um escoamento mais eficiente da produção nacional.

Mesmo com pouco investimento na malha ferroviária brasileira, destaca-se uma delas: a Ferrovia Norte-Sul (FNS), gerida até março de 2019 totalmente com recursos públicos, foi leiloado e concedido à iniciativa privada um total de 1.537 km da ferrovia que interliga o Porto Nacional (TO) à Estrela do Oeste (SP). Atualmente, o trecho Porto Nacional a Anápolis já está concluída pela Valec e o trecho de Ouro Verde (GO) até Estrela do Oeste (SP) está com 96,5% de obras concluídas. Essa ferrovia é considerada como um dos principais projetos de escoamento da produção agrícola do país, a qual os investimentos devem ser de R$ 2,7 bilhões e com estimativas que a capacidade operacional chegue a 22,73 milhões de toneladas (G1 GLOBO, 2019; TCU, 2019).

Figura 2: Investimento em ferrovias brasileiras.

Fonte: Valec, 2013.

Por sua localização estratégica, a Ferrovia Norte-Sul (FNS) pode se tornar a espinha dorsal do transporte ferroviário no Brasil chegando até o Rio Grande, no extremo sul do Estado do Rio Grande do Sul (Tabela 1). Levando-se em conta a demanda de aportes financeiros consideráveis, essa grande obra de infraestrutura de transporte vem sendo auditada pelo TCU. Notadamente, no ano de 2015, esse órgão de fiscalização detectou, junto aos estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental, irregularidades e inconsistências nos contratos de construção da FNS que estavam sob a gestão da Valec.

De acordo com o TCU (2019 e 2017), em um trecho de 145 km de extensão da FNS, especificamente nos lotes 4S e 5S foram utilizadas britas (lastros de ferrovias) de baixa qualidade que não garantiriam o bom funcionamento dos trens, o que aumentaria a necessidade de manutenções mais frequentes (e mais custosas) da ferrovia. Os lastros utilizados nas vias pouco atendiam às especificações dos procedimentos internos normalizados pela própria empresa Valec. As auditorias realizadas pelo TCU nas obras da FNS em 2015, verificaram problemas desde a licitação para a construção dos trechos até casos de sobrepreços e superfaturamento atingindo cifras próximas a R$ 128 milhões (O GLOBO, 2017).

Segundo o CNI (2018), um sistema ferroviário eficiente e bem conectado é um diferencial de competividade no transporte de cargas e para o Brasil superar os atuais gargalos logísticos é fundamental aumentar o tamanho da malha ferroviária brasileira, assim como a velocidade média dos comboios e a conectividade do sistema.

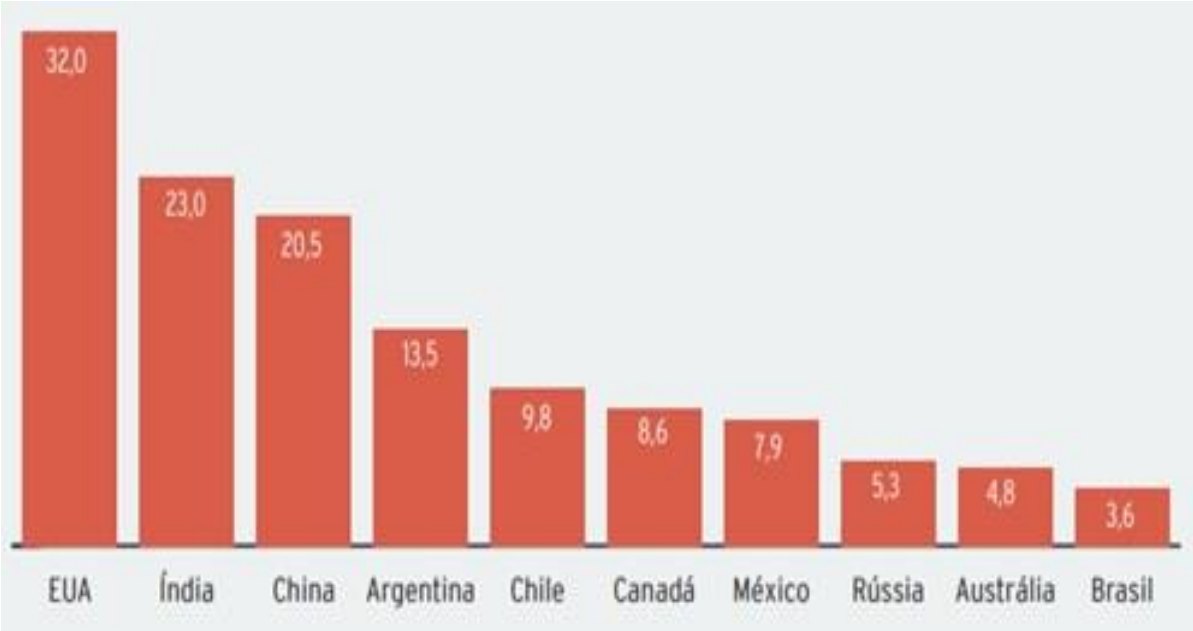
Tabela 1: Projetos ferroviários de destaque no Brasil.

Projeto	Estados atendidos (Extensão aproximada em km)	Investimento mínimo (1)
Construção da FNS (de Açailândia/MA a Barbacena/PA ao porto de Espadarte/PA, e de Porto Nacional/TO a Rio Grande/RS) (2)	GO, MA, MG, PA, PR, SC, SP e TO (3.746)	21,48
Construção da FNS (de Açailândia/MA a Barbacena/PA e ao porto de Espadarte/PA, e de Porto Nacional/TO a Rio Grande/RS) (2)	GO, DF, MG e RJ (1.706)	20,31
Construção da Ferrovia Cuiabá-Santarém	PA e MT (1.800)	11,88
Construção da Ferrovia de Integração Centro-Oeste (FICO) (de Campinorte/GO a Comodoro/MT)	GO e MT (1.630) (3)	10,07
Construção da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) (de Figueirópolis/TO a Ilhéus/BA)	TO e BA (1.527)	8,54
Construção da Ferrovia Nova Transnordestina (de Eliseu Martins/PI aos portos de Pecém/CE e Suape/PE)	PE, CE e PI (1.632) (3)	5,46
Construção da ligação entre a FNS e a Nova Transnordestina (de Eliseu Martins/PI a Porto Franco/MA)	PI e MA (620)	2,89
Construção do Corredor Ferroviário de Santa Catarina (de Itajaí a Dionísio Cerqueira)	SC (862)	7,55
Construção da conexão ferroviária PR-MS (de Cascavel/PR a Maracaju/MS)	PR e MS (500)	3,07
Construção da ferrovia RJ-ES (do Rio de Janeiro/RJ a Vitória/ES)	RJ e ES (572)	7,8

Fonte: Modificado de CNT (2015).
Notas: (1) Estimativa em bilhões de reais; (2) O Trecho de Porto Nacional/TO a Anápolis/GO já se encontra construído; (3) A extensão apresentada corresponde à estimativa feita no âmbito do Plano CNT de Transporte e Logística 2014.

Na mesma perspectiva de abordagem, pesquisa realizada por CNT (2015) indica que a densidade da malha ferroviária no Brasil é extremamente baixa quando comparada com outros países (Gráfico 1) e reforça a necessidade de investimentos na ordem de R$ 282 bilhões em 213 obras e projetos ferroviários. No ritmo que o país se encontra seriam necessários mais de 54 anos para concluir os projetos previstos no Plano CNT de Transporte e Logística.

Gráfico 1: Densidade do transporte ferroviário (km de infraestrutura por 1.000 km² de área terrestre).



Fonte: CNT, (2015) por ANTT e CIA The World Factbook
Nota 1: Para o cálculo da densidade do transporte ferroviário, foram utilizados os dados de área terrestre de cada país analisado. Nota 2: Destacou-se, entre os países analisados, a China, que no período de 2011 a 2014, apresentou crescimento de 122% em sua malha ferroviária.

2.2 AGREGADOS ROCHOSOS: DADOS ESTATÍSTICO, PRODUÇÃO E APLICAÇÃO

Os materiais rochosos na forma granular utilizados na construção civil são chamados de agregados, podendo também ser sedimentos provenientes de areias e cascalhos (CETEM, 2012) são utilizados para diversas finalidades, principalmente em obras de construção civil (Tabela 2).

Os agregados são matérias-primas minerais mais consumidas no mundo. O seu consumo per capita medido por m³/habitante/ano pode ser considerado como indicador de qualidade de vida urbana, principalmente nos quesitos de moradia, saneamento básico, abastecimento de água, energia elétrica, pavimentação, construções de escolas e hospitais (IPT, 2003).

São materiais granulares, de forma e volume diversos, encontrados na natureza ou proveniente da fragmentação mecânica que possuem dimensões e propriedades necessárias para a utilização em obras de engenharia civil com dimensão nominal máxima inferior a 100mm e de dimensão nominal mínima igual ou superior a 0,075mm (FRASCÁ; PARAGUASSÚ, 2018).

De acordo com a dimensão (Tabela 3), podem ser classificados em graúdos (pedra britada e pedregulho), miúdo (areia natural ou artificial). Em relação à densidade, o agregado pode ser classificado em pesado (barita, magnetita etc.), normal (pedrada britada e

pedregulho), leve (argila expandida, vermiculita etc.). Quanto ao modo de obtenção podem ser naturais (cascalho e areia) e artificiais (pedra britada e areia artificial).

Tabela 2: Classificação dos agregados conforme granulometria.

Agregado	Granulometria (mm)	Uso geral
Areia artificial e Areia natural	0,074 a 4,8	Assentamento de bloquetes, tubulações em geral, composição de concreto e asfalto.
Pó de pedra	< 4,8	Confecção de pavimentação asfáltica, lajotas, jateamento de túneis e acabamento em geral.
Brita 0 ou pedrisco	4,8 a 9,5	Massa asfáltica.
Brita 1	4,8 a 12,5	Estruturas de concreto armado.
Brita 2	12,5 a 25	
Brita 3	25 a 50	Também denominada de pedra lastro utilizada nas ferrovias.
Brita 4	50 a 76	Produto destinado a obras de drenagem, como drenos sépticos e fossas.
Rachão (1)	Material retido na #75mm	Fabricação de gabiões, muros de contenção e bases.
Brita graduada	-	Em base e sub-base, pisos, pátios, galpões e estradas.
Bica corrida (2)	-	Massa asfáltica, aterro.

Fonte: Modificado de CETEM (2012).
(1) Rachão é o material obtido diretamente do britador primário e que é retido na peneira de 75mm. (2) Bica corrida se refere ao conjunto de pedra britada, pedrisco e pó de pedra, sem graduação definida, obtido diretamente do britador, sem separação por peneiramento.

Tabela 3: Terminologia de agregado.

Nomenclatura	Definição
Agregado graúdo	Pedra britada, brita ou pedregulho muito grosso e médio, de dimensões entre 100 e 4,8mm.
Agregado miúdo	Pedregulho fino, pedrisco grosso, médio e fino, areia grossa, média e fina, de dimensões entre 4,8 e 0,075mm.
Pedra britada	Material proveniente de britagem de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 100mm e de dimensão igual ou superior a 4,8mm.
Pedrisco	Material proveniente de britagem de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 4,8mm e de dimensão igual ou superior a 0,075mm.
Areia	Material natural, de propriedades adequadas, de dimensão nominal máxima inferior a 2,0mm e de dimensão igual ou superior a 0,075mm.
Pó de pedra	Material proveniente de britagem de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075mm.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9935 (2011).

Segundo a ANEPAC (2016), grande parte da produção dos agregados se destina para construtoras e concreteiras (Tabela 4). O lastro de ferrovias está dentro do grupo “outros” em que se enquadram além do lastro, enrocamentos e filtros.

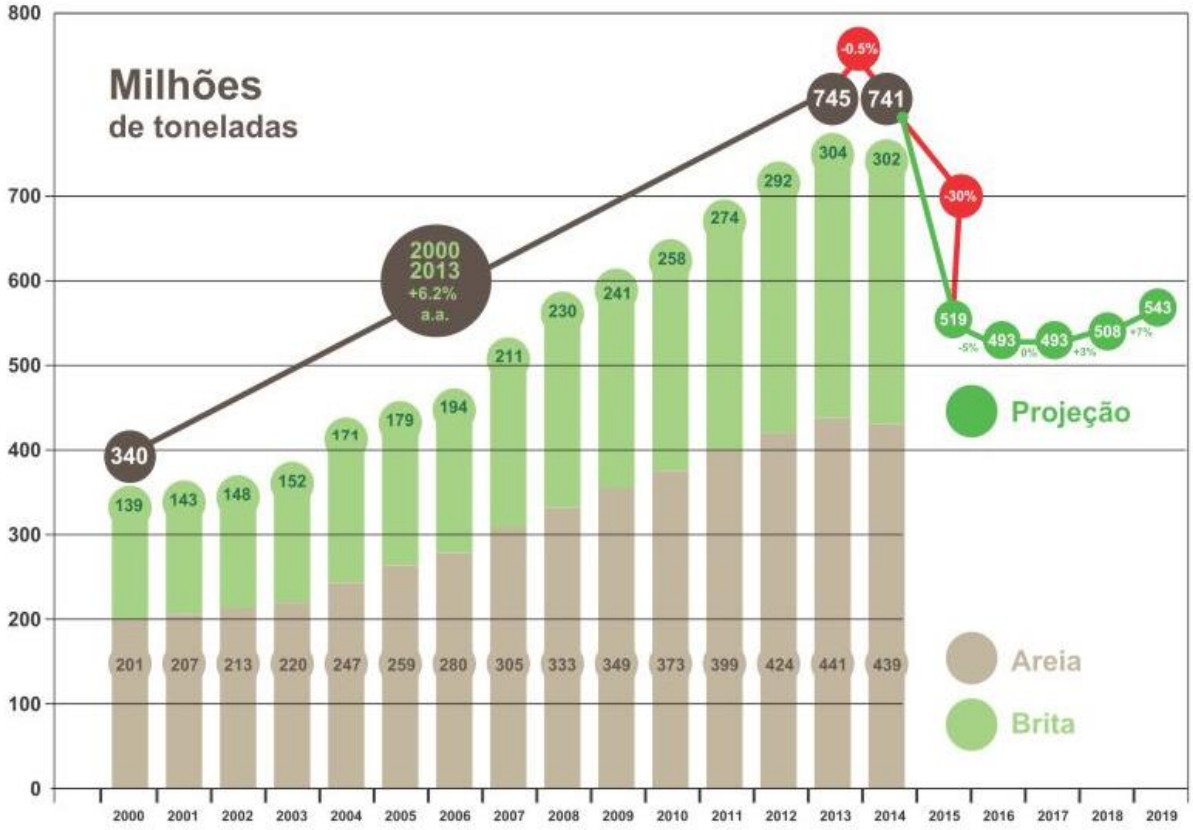
Tabela 4: Consumo de agregados por segmento de mercado.

Consumo de agregado por segmento	Areia (%)	Brita (%)
Argamassas	35	-
Concreteiras	20	32
Construtoras	15	24
Produção de pré-fabricados	10	14
Revendedores	10	10
Usinas de asfalto	5	9
Órgãos Públicos	3	7
Outros (lastro de ferrovia, enrocamento etc.)	2	4

Fonte: ANEPAC (2016).

Em contrapartida, a produção de agregadas no país sofreu forte queda nos períodos de 2015 a 2019, devido à situação desafiadora que o Brasil tem enfrentado na atual conjuntura econômica (Gráfico 2).

Gráfico 2: Perspectiva do setor de agregados no período de 2015 a 2019.



Fonte: ANEPAC/Sindpedras-SP (2019).

Segundo IBRAM (2012), no Brasil existem cerca de 2.500 empresas produtoras de areia e 600 de brita. O Estado de São Paulo é o principal consumidor e produtor de agregados com 900 portos de areia e 350 pedreiras (ANEPAC, 2016).

Conforme ABDI (2012), a explotação mineral de areia e brita é uma das atividades extrativistas mais importantes no mercado brasileiro, principalmente quando comparada ao volume explotado de minério de ferro, sendo esse o principal produto interno. Em 2009, registrou-se a maior produção de agregados com 481 milhões de toneladas, enquanto a do ferro foi de 30 milhões de toneladas.

Esses insumos se caracterizam pelo baixo valor unitário, explotação e transporte em grandes volumes, acarretando, dessa maneira, uma melhor rentabilidade quando próximo dos grandes centros consumidores. Por outro lado, segundo CETEM (2012), o consumo de agregado no Brasil é de apenas 2,5 toneladas/habitante, considerado baixo quando comparado aos países desenvolvidos, onde o consumo per capita está entre 5 e 15 toneladas. Esse baixo consumo no Brasil é atribuído a uma demanda reprimida pela inexistência de obras adequadas de infraestrutura e de habitação.

As projeções do Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM, 2030) é que haja um crescimento de 4,6% entre os anos de 2023 – 2030 nas áreas de infraestrutura, saneamento e habitações, conforme Tabela 5:

Tabela 5: Previsão da produção de agregados até 2030, segundo (PNM-2030).

Agregado	Unidade	2008	2015	2015/ 2008	2022	2022/ 2015	2030	2030/ 2022
Areia para construção civil	Mt	279	409	5,60%	598	5,60%	857	4,60%
Brita	Mt	217	318	5,60%	465	5,60%	667	4,60%

Fonte: Modificado de (PNM, 2030).

Ferrovias lastradas, majoritariamente, são utilizadas em todo o mundo por diversas razões, dentre elas, economia durante a implantação, drenagem e fácil manutenção. Tratam-se de trilhos metálicos suportados por dormentes (de concreto, madeiras, de aço ou até plástico) nos quais são embutidos em camadas de lastros dispostos geralmente no mínimo da ordem de 30 cm de espessura (Figura 3). O termo lastro é usado na Engenharia Ferroviária para designar um agregado rochoso grosso (Tabela 2, brita 3 – até 50 mm) colocado sobre o sublastro (agregados finos) e subleito (material terroso), com a função de fornecer estabilidade aceitável aos dormentes contra as tensões verticais, longitudinais e laterais geradas pela carga, temperatura e velocidade dos trens convencionais. Além disso, precisa também fornecer resistência adequada contra esmagamento, atrito, degradação mecânica e intemperismo, principalmente em regiões tropicais.

Adicionalmente, Frascá e Paraguassú (2018) enfatizam as funções do lastro:

a) Constituir suporte elástico para a via;

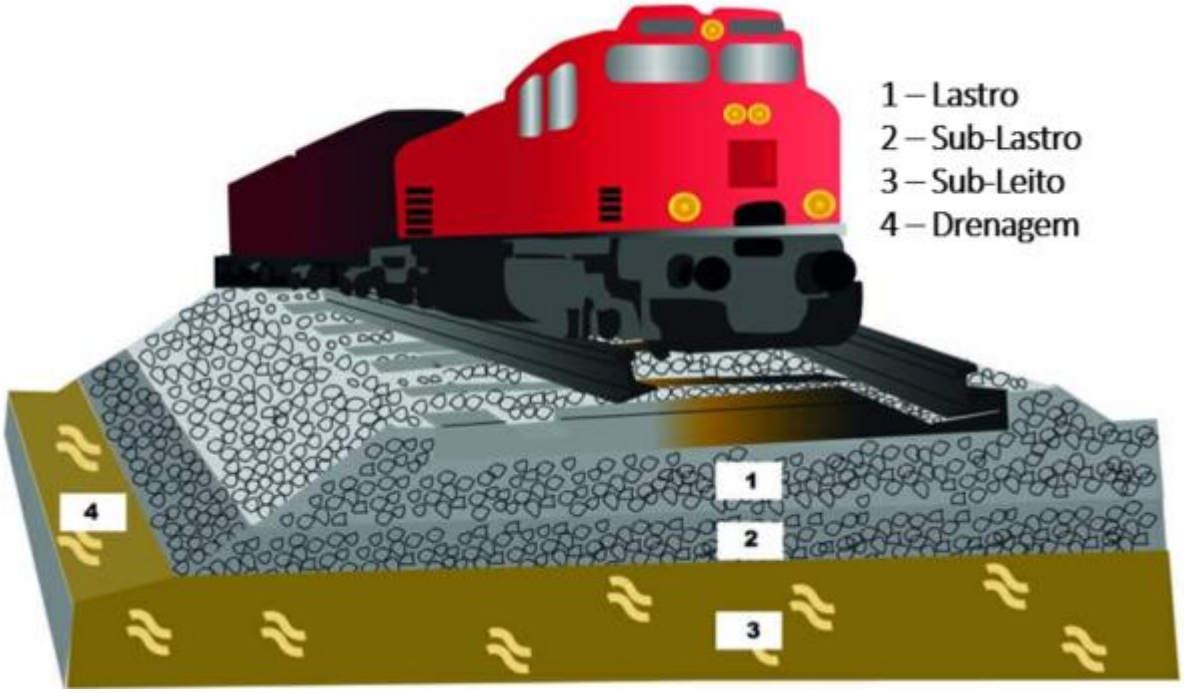
b) Dificultar a subida de lama da plataforma;

c) Dificultar o crescimento de vegetações na via;

d) Permitir uma base sólida aos dormentes;

e) Distribuição uniforme de cargas à superfície da plataforma férrea.

Figura 3: Seção esquemática de uma via férrea.



Fonte: O Autor (2021).

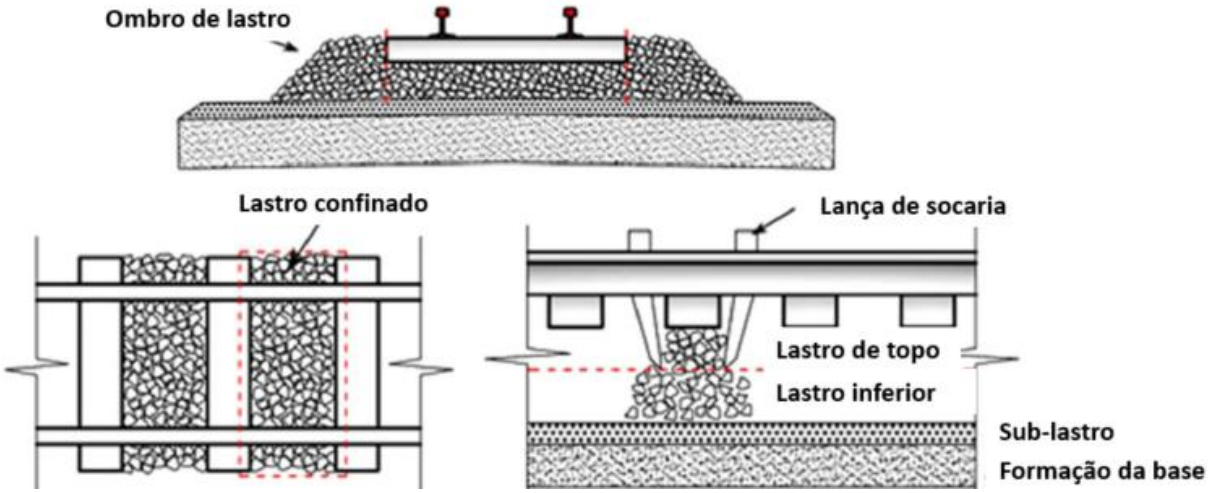
Um dos principais problemas com a utilização de ferrovias lastradas é a progressão da deterioração e durabilidade dos lastros principalmente em regiões de clima tropical (FRAZÂO, 1987). Dentre vários fatores, além dos climáticos, estão: aumento do carregamento cíclico provocado pela passagem do trem com a roda/trilho que ocasionam a quebra dos cantos das superfícies dos agregados.

Portanto, a frequência e o peso através das cargas dos trens acarretam o quebramento das partículas rochosas, reduzindo a qualidade dos agregados do lastro, proporcionando a sua fragmentação, o esmagamento e a moagem por desgaste de atrito repetido das partículas mais fracas. O atrito dessas partículas proporciona a redução da angularidade da brita e consequentemente, diminui o ângulo de atrito interno do lastro que está relacionado a tensão cisalhante que por sua vez contribui na instabilidade da via (INDRARATNA e SALIM, 2005).

Para Sadeghi et al. (2016), conforme a Figura 4, a camada do lastro pode ser dividida em quatro porções: 1. Crib: lastros que ficam entre os dormentes; 2. Ombreira: lastros que ficam na zona entre os dormentes e o sublastro; 3. Lastro superior: Região superior da camada do lastro que é exposta a socaria/compactação; 4. Lastro inferior: região inferior da

camada do lastro que suporta toda a superestrutura. A função que cada porção da camada de lastro desempenha é apresentada na Tabela 6.

Figura 4: Seções esquemáticas das zonas da camada do lastro em uma via férrea.



Fonte: Modificado e tradução adaptada de SADEGHI et al., (2016).

Tabela 6: Contribuição das porções da camada do lastro para um desempenho adequado na via.

Funções do Lastro	LC	OL	LI	LT
Compressão Uniaxial			●	●
Compressão lateral	●	●		●
Compressão Longitudinal	●			●
Resiliência			●	●
Ajuste e nivelamento da via	●		●	●
Drenagem	●	●	●	●
Distribuição e dispersão do carregamento			●	●
Prevenção do crescimento de plantas	●		●	●
Absorção de choque	●	●	●	●
Resistividade elétrica	●			●
Proteção da camada do sublastro	●	●	●	●

Fonte: Modificado e tradução adaptada de SADEGHI et al., (2016).
Legenda: (LC) Lastro confinado. (OL) Ombro de lastro. (LI) Lastro inferior. (LT) Lastro de topo.

2.3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE AGREGADOS ROCHOSOS

O estudo da caracterização tecnológica e a realização de ensaios de alterabilidade em rochas para uso como material de construção civil, principalmente no uso de lastro ferroviário, é um procedimento que permite conhecer as propriedades dos materiais rochosos em conjunto ou isoladamente, com o objetivo de se determinar os parâmetros químicos, físicos-mecânicos e petrográficos que ajudarão na compreensão e estimativa da durabilidade e do comportamento das rochas em campo. Sadeghi et al. (2016) compila os principais ensaios realizados para lastro de ferrovias (Tabela 7).

Tabela 7: Ensaios realizados em lastros de ferrovias.

Propriedade	Características	Tipo de Ensaio	Objetivo
Mecânica	Dureza	Micro Deval	Ensaio de abrasividade
	Dureza	Ensaio Deval (seco e úmido)	Ensaio de abrasividade
	Dureza	Dureza ao Risco (Mohs)	Produção de finos a partir da superfície abrasiva
	Dureza	Abrasão Dorry	Produção de finos a partir da superfície abrasiva
	Dureza	Abrasão Mill	Produção de finos a partir da superfície abrasiva
	Dureza / Impacto	*Los Angeles*	Abrasão, atrito e fragmentação
	Tenacidade	Ensaio de Esmagamento	Fragmentação e resistência ao esmagamento
	Tenacidade	Ensaio de Carga Pontual	Fragmentação
	Tenacidade	Impacto Treton	Resistência ao choque e fraturamento
	Estimativa de dureza, tenacidade e sanidade	Análise petrográfica (partículas intactas / finos)	Mineralogia e alteração química
Físico	Gradação	Distribuição Granulométrica	Energia de compactação e capacidade de drenagem
	Gradação	Material fino	Drenagem
	Estabilidade	Massa Específica	Estabilidade e tenacidade indireta
	Estabilidade	Densidade Aparente	Estabilidade da via e drenagem
	Índice de forma	Forma da Partícula	Fragmentação e drenagem
Alterabilidade	Sanidade	Absorção de Água	Saturação e Resistência ao Intemperismo
	Sanidade	Porosidade	Durabilidade e Resistência ao Intemperismo
	Sanidade	Ensaio de Sulfato de Sódio / Magnésio	Durabilidade e Resistência ao Intemperismo
	Sanidade	Água - Estufa	Durabilidade e Resistência ao Intemperismo
	Sanidade	Congelamento e Degelo	Durabilidade e Resistência ao Intemperismo
	Sanidade	Material pulverulento e torrões de argila	Durabilidade e abrasividade preliminar

Fonte: Modificado de SADEGHI et al. (2016).

2.3.1 Análises petrográficas e mineralógicas

Para Frazão (2002), a análise petrográfica permite a identificação da composição mineralógica, bem como os minerais essenciais, acessórios e secundários e suas quantidades, assim como textura (forma e arranjo dos minerais), estrutura (arranjo macroscópico), estado de alteração dos minerais (tipo de alteração), grau e tipo de microfissuração (intracristalinas, abertas e/ou preenchidas).

Realizando-se estudos da rocha microscopicamente, através de uma descrição petrográfica detalhada, é que será possível a observação de minerais sãos ou até mesmo alterados intempéricamente ou microfissurados por eventos tectônicos.

O estudo petrográfico fornece informações relevantes sobre a composição mineralógica de uma rocha, através de amostras macroscópicas (a olho nu) ou por meio da microscopia óptica, utilizando lâminas petrográficas ou seções delgadas da rocha. Somente analisando a amostra de rocha macroscopicamente não é suficiente para a determinação das alterações dos minerais.

Frazão (1987) enfatiza que os minerais secundários, bem como os sulfetos de ferro presentes nas rochas tendem a se oxidarem, diminuindo a resistência da rocha, assim como rochas que apresentam elevada quantidade de argilominerais expansíveis que absorvem água em sua estrutura cristalina provocando a desagregação da rocha. Dessa maneira, os agregados para lastro devem provir de rochas sãs, nas quais apresentarão uma quantidade mínima de minerais secundários ou alterados que, caso contrário, refletirão na diminuição da qualidade do material rochoso ao longo do tempo.

2.3.2 Britagem, forma dos fragmentos e granulometria

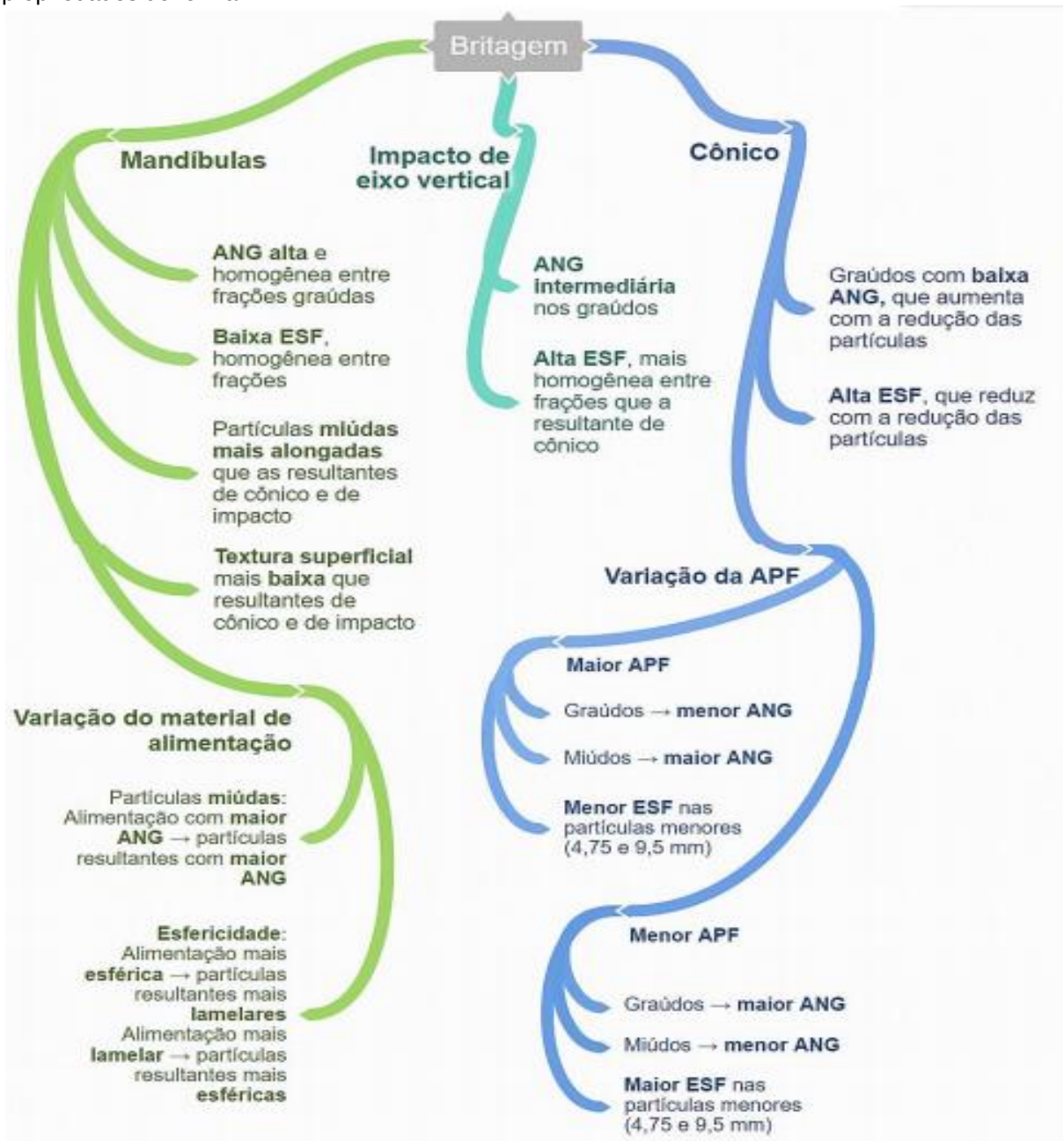
Segundo Chaves (2009), nos britadores de mandíbulas, a energia aplicada às partículas rochosas é do tipo compressão, fazendo com que as fraturas dos blocos rochosos se desenvolvam nas direções preferenciais de cisalhamento gerando britas com predisposição a serem cúbicas e de faces planas, dependendo do tipo de rocha.

Por esse motivo, as mandíbulas dos britadores manuais possuem placas de desgaste feitas de aço Hadfield. Esse tipo de aço é produzido com ligante de Manganês (12 – 14%) por tratamento térmico como a têmpera, através do qual ocorre o aquecimento e resfriamento do aço muito rápido. O aquecimento do aço proporciona a organização e realinhamento dos cristais do metal, sendo essa fase chamada de austenitização. O aço austenítico promove às

superfícies das mandíbulas elevada tenacidade (capacidade de resistir aos esforços mecânicos, bem como o impacto e compressão) e alta dureza (resistência abrasiva).

Diógenes (2018) observou que durante o processo de britagem, o britador de mandíbulas tanto de pedreiras quanto para uso de laboratório produziu para as suas amostras (granitos, gnaisses, fonolitos, entre outras) partículas rochosas com formas mais alongadas e angulares quando comparadas com as mesmas rochas em britadores do tipo cônico e de impacto (Figura 5).

Figura 5: Fluxograma com as principais relações obtidas entre os diferentes tipos de britagens e propriedades de forma.

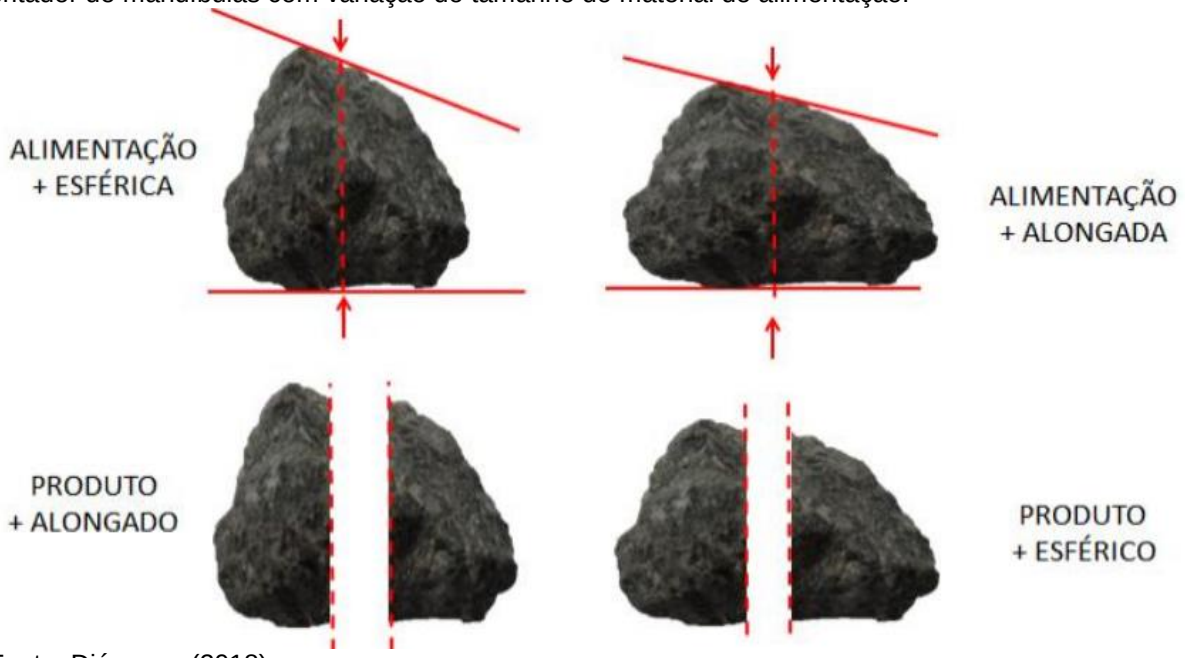


Fonte: Diógenes (2018).

Outro ponto interessante, mencionado por Diógenes (2018) é que uma das interpretações do aumento da esfericidade dos agregados deve-se à variação do tamanho original do material antes do processo de britagem. Assim, partículas mais lamelares foram fragmentadas em partículas mais esféricas, enquanto partículas mais esféricas geraram fragmentos mais alongados, conforme Figura 6.

Segundo Frazão (2002), quando uma rocha passa pelo processo de britagem, a sua fragmentação será constituída de formas e dimensões variadas.

Figura 6: Interpretação para o resultado do aumento de esfericidade dos agregados produzidos pelo britador de mandíbulas com variação do tamanho do material de alimentação.



Fonte: Diógenes (2018).

A forma do agregado é uma propriedade importante. Os tipos de formas que caracterizam os fragmentos das partículas rochosas são: cúbica, lamelar, alongada e alongada-lamelar. São influenciadas principalmente pela estrutura da rocha e em menor proporção pela textura.

Espera-se que no final do processo de britagem os agregados tenham a forma cúbica, em que o fragmento deve ter alto grau de cubicidade, ou seja, a largura, altura e espessura aproximadamente iguais. De acordo com a norma NBR 5564 (ABNT, 2021), os agregados para lastros devem ter a percentagem máxima de partículas não cúbicas de 15%.

Para Frazão (1987), a forma cúbica dos lastros propicia o aumento da resistência das solicitações de cargas entre trilho e trem. Da mesma forma, a alta rugosidade e angulosidade permitirão menor movimentação devido às forças de atrito e, consequentemente, redução das quebras das partículas.

Caso contrário, haverá o favorecimento da geração de materiais finos ocasionadas pelas quebras de fragmentos e até mesmo por abrasividade dos materiais rochosos que acarretarão menor permeabilidade do lastro e consequentemente maior será a sua rigidez, permitindo uma maior aceleração da degradação dos lastros e dos dormentes resultando no menor tempo de vida útil destes elementos, além dos materiais metálicos (trilhos) e da plataforma. (FRAZÃO, 1987; DIÓGENES, 2016).

Os limites granulométricos para os lastros de ferrovias são estabelecidos pela norma vigente NBR 5564 (ABNT, 2021) e apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Distribuição granulométrica do lastro ferroviário.

Abertura das peneiras de malhas quadradas (mm)	Percentagem em massa acumulada (%)	
	Padrão A	Padrão B
76,2	–	0 – 0
63,5	0 – 0	0 – 10
50,8	0 – 10	–
38,0	30 – 65	40 – 75
25,4	85 – 100	–
19,0	–	90 – 100
12,0	95 – 100	98 – 100

Fonte: Modificado de NBR 5564 (ABNT,2021).
Nota 1: Padrão A, refere-se a lastro para aplicação em linhas principais. Padrão B, lastro para aplicação em linhas de pátios. Nota 2: Na falta das letras A ou B, entende-se como sendo A.

2.3.3 Índices físicos

São propriedades índices das rochas, categorizadas em densidade ou massa específica, porosidade e absorção de água. Trabalhos de correlações desses temas são apresentados em Frazão (2002); Frazão (2012) e Paraguassú et al. (2014).

Para Frazão (1987), a aplicação do uso de rochas que apresentam elevada densidade para lastro de ferrovias tende a apresentar maior resistência às solicitações mecânicas produzidas pelo trem e trilho. Em contrapartida, a rocha que apresentar a característica de alta porosidade, consequentemente terá elevada predisposição de absorção de água, refletindo ao longo do tempo da utilização na via lastrada uma desagregação dos materiais rochosos devido, além das solicitações mecânicas, às interferências principalmente ocasionadas pelo clima com verões quentes e chuvosos que os lastros estarão expostos.

2.3.4 Propriedades mecânicas

As utilizações das propriedades mecânicas realizadas por ensaios laboratoriais são importantes para escolha dos materiais rochosos, desde que atendam um nível de qualidade mínimo exigidos, pela Engenharia Civil.

2.3.4.1 Ensaio de resistência à compressão pontual e compressão uniaxial

Em relação à resistência, a compressão pontual trata-se de um ensaio que tem por finalidade estimar o valor de carregamento até atingir a ruptura das rochas, obtendo-se o índice de resistência à carga pontual (Is).

Já o ensaio de compressão uniaxial, com amostras submetidas a uma tensão de ruptura tanto no estado seco quanto saturado é possível prever segundo Paraguassú et al. (2014) e (Frazão, 1987) o comportamento mecânico da rocha em relação às resistências das solicitações das tensões que o lastro irá suportar na via férrea. Assim, no estado saturado os corpos de provas apresentam condições menos favoráveis e terão suas resistências de rupturas menores quando comparadas ao estado seco e o seu valor poderá ser mais influenciado quando maior for o índice de absorção de água da rocha.

Os mesmos autores enfatizam também que o tamanho dos cristais porfiríticos presentes em uma rocha, por exemplo, tendem a apresentar menores resistências a compressões uniaxiais quando comparadas a rochas isotrópicas e equigranulares.

2.3.4.2 Abrasão *Los Angeles*

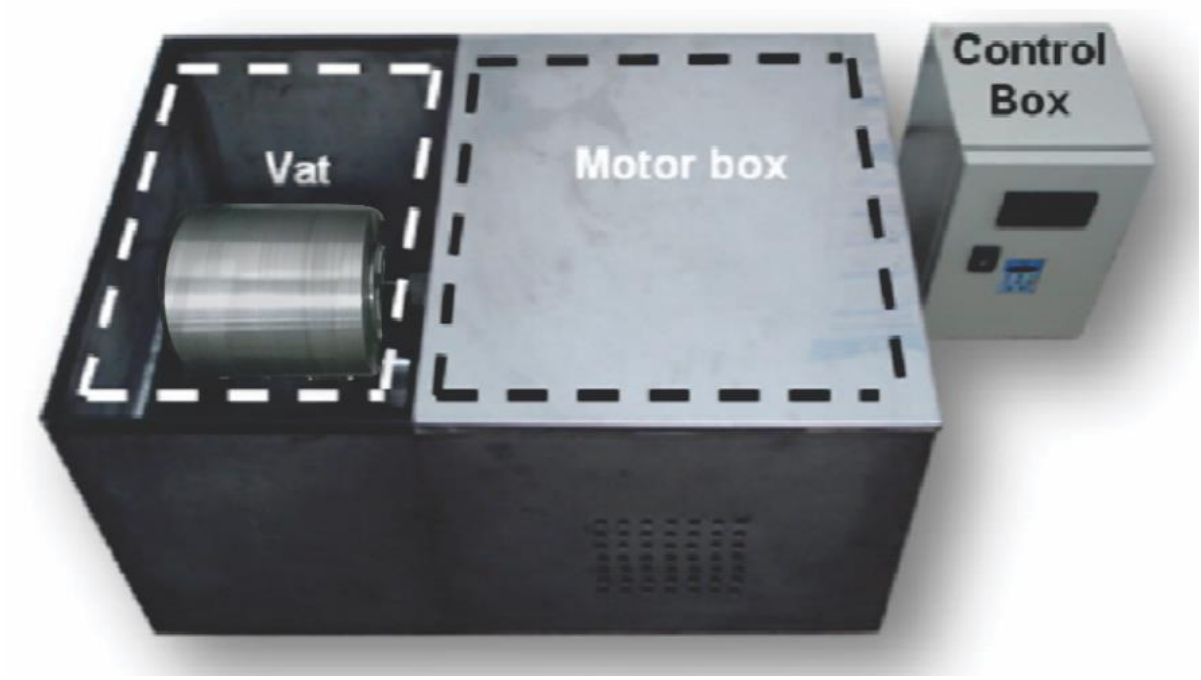
Segundo Frazão (2002), quando a rocha se destina para a finalidade de uso de lastro, esse material rochoso pode receber influência de resistência mecânica de impacto e estará sujeito a um desgaste abrasivo proveniente das intensas demandas do tráfego de ferrovias.

O melhor método de verificação dessa resistência é feito pelo ensaio de abrasão *Los Angeles*. Esse ensaio é influenciado pelo grau de coerência ou compacidade da rocha e pela forma das partículas. Dessa maneira, a amostra graduada de agregado é submetida a diversas ações físicas, que vão determinar a sua resistência ao impacto, forças de atrito e quedas dos materiais presentes no tambor giratório que ocorrem simultaneamente, bem como atrito e queda dos fragmentos do próprio material rochoso e das esferas de aço.

2.3.4.3 Ensaio de abrasão Micro-Deval

O Micro-Deval (MD) foi desenvolvido na década de 1960 na França. É um ensaio relativamente simples e rápido no que diz respeito à execução, a qual leva duas horas para ser realizado. Tem por objetivo qualificar e quantificar a resistência a abrasão e durabilidade dos agregados rochosos, resultantes da combinação de ações de esferas de aço (carga abrasiva) na presença de água, proporcionando conjuntamente abrasão e esmerilhamento das partículas rochosas (Figura 7).

Figura 7: Equipamento Micro-Deval, experimento realizado na UENF.



Fonte: Dias Filho et al. (2015).

Os resultados provenientes deste ensaio abrasivo são úteis para avaliar a tenacidade agregada, durabilidade e resistência do agregado graúdo, acarretando, no final do processo, o polimento dessas partículas rochosas. Sendo assim, quanto menor for o valor do resultado do coeficiente de MD (perda de massa) melhor é a resistência do agregado rochoso em relação ao desgaste por abrasão a úmido, intemperismo e degradação TxDOT (2016) e D6928 (ASTM, 2017).

Conforme Richard (1997), a razão da aparente superioridade do ensaio Micro-Deval, quando comparado aos outros ensaios, bem como o Abrasão *Los Angeles* (ALA), deve-se ao fato de ser realizado na presença de água, enquanto o ALA é realizado a seco.

Segundo Ballivy et al. (1976 e 1978) a energia superficial específica da rocha é menor na presença de água do que na presença de ar. Os autores observaram através de diversos ensaios de Micro-Deval, uma menor resistência à tração para rochas saturadas com água não

destilada devido a presença de eletrólitos. Para os ensaios de abrasividade com água destilada, verificou-se que a energia liberada da superfície da partícula é reduzida e menos atenuações dos fraturamentos são observados.

A normalização do ensaio é estabelecida por duas instituições internacionais de padronização de procedimentos de ensaios, ASTM e EN, havendo algumas diferenças entre elas.

Em relação ao método EN 1097-1 (AENOR, 2011), é muito utilizado pelos países membros da União Europeia. Os tamanhos das peneiras utilizadas para este ensaio vão de 1,6 – 14mm, e as esferas de aço (carga abrasiva) devem ter tamanhos de (10 ± 0,5) mm de diâmetro. Para lastros de ferrovias, não se utilizam as cargas abrasivas, e as peneiras utilizadas são de 31,50mm, 40mm e 50mm. As amostras de lastros devem totalizar (10.000 ± 0,1) kg e consequentemente o diâmetro do tambor é maior e sua rotação dever ser de (14.000 ± 10) revoluções.

Já a ASTM D6928 (2017) é muito usada nos Estados Unidos e Canadá (com diferentes versões dependendo da região) com o objetivo de qualificar os agregados graúdos e miúdos para a utilização em pavimentos asfálticos, sendo inclusive adotado como alternativa no ensaio de sanidade por meio do sulfato de magnésio para areia de concreto (Rogers, 1998).

No Brasil, existem trabalhos utilizando ambas as padronizações internacionais e até mesmo adaptações delas, sendo a Universidade Estadual Norte Fluminense (UENF) a primeira a introduzir esse ensaio no Brasil e realizar diversos trabalhos comparativos de abrasividade (DIAS FILHO et al., 2015 e FILHO et al., 2014) e mais recentemente a Universidade Federal do Ceará (UFC) com Diógenes (2018) que realizou adaptações do ensaio Micro-Deval.

Com foco em estudos de caracterização tecnológica, a utilização do ensaio Micro-Deval tem sido realizada no departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), em parceria com a UENF, (SANTOS et al., 2019; REMÉDIO, 2017), com o objetivo de qualificar os agregados rochosos que serão utilizados como lastros para ferrovias convencionais e de alta velocidade.

Com base em Deiros et al. (2016), as partículas de agregados rochosos de lastro se desgastam como resultado do intenso tráfico dos trens e das operações de manutenção (compactação/socaria), reduzindo constantemente a angulosidade dos agregados e produzindo partículas muito finas (d < 0,5 mm) que refletirão na perda do desempenho, estabilidade e permeabilidade da via. O mesmo autor enfatiza a importância de estudos dos agregados e cita um exemplo em que o lastro não provou ser suficientemente resistente nas ferrovias de alta velocidade da França por apresentar uma degradação muito mais rápida do que estava planejada, sendo exigido assim, a substituição de todo o lastro da via.

Para simular as mesmas condições de campo, o ensaio MD quando realizado, faz com que os inúmeros contatos das rochas dentro do tambor com água produzam um processo de desgaste acelerado que causa mudanças na morfologia das partículas dos agregados similares aos produzidos na via (BALLIVY e MICHEL, 1984), STENLID, 1996; ERICHSEN et al., 2011) acrescentam ainda que a degradação abrasiva em rochas utilizando o ensaio MD é proporcional ao tamanho dos agregados rochosos (lastros) sem a presença de cargas abrasivas (esferas de aço) ou seja, a degradação abrasiva é mais ativa em partículas rochosas muito grossas e por isso a importância da distribuição granulométrica do lastro.

2.3.4.4 Ensaio de resistência ao impacto Treton

Esse ensaio, segundo Paraguassú et. al. (2014), tem por objetivo determinar a resistência ao choque através da queda livre de um cilindro utilizando o aparelho Treton sobre os materiais rochosos, obtendo-se o índice de tenacidade dos agregados. Este índice é a resistência ao impacto ou choque de um material sólido sobre uma rocha. Trata-se de uma propriedade importante para a caracterização tecnológica do agregado, principalmente quando utilizado para lastro.

Trabalhos desenvolvidos por Remédio (2017) e Remédio et al. (2018) mostraram resultados satisfatórios da perda ao choque para rochas intrusivas básicas (BAS), rochas graníticas (MOR) e CAN-L, com exceção para o monzogranito (CAN-O). O monzogranito identificado por CAN-O excede ao limite de 25% indicando a inaptidão para o uso como lastro de ferrovia, de acordo com o estabelecido pela norma NBR 5564 (ABNT, 2011) de tenacidade Treton máximo conforme Tabela 9, podendo influenciar desta maneira, na importância da escolha e/ou seleção das rochas para uso em obras de ferrovias.

Tabela 9: Resultados de resistência ao choque.

Massa / Tenacidade	ROCHAS											
	BAS			MOR			CAN-L			CAN-O		
	Grupo			Grupo			Grupo			Grupo		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
mi (g)	207,2	235,1	222,2	202,2	198,3	182,0	174,7	185,1	198,5	165.1	165,8	165,1
mf (g)	184,4	210,8	200,0	175,3	167,8	148,4	147,3	154,4	169,7	129,8	130,8	132,8
T (%)	12,4	11,7	11,1	15,3	18,2	22,6	18,5	19,9	17,0	27,2	26,7	24,3
Tm (%)		11,7			18,7			18,5			26,1	

Fonte: Modificado de Remédio (2017).

2.3.4.5 Resistência ao esmagamento dos agregados rochosos

Trata-se de um ensaio que permite avaliar o comportamento do material sob uma compressão constante induzindo um desgaste por esmagamento das partículas provocado pelo atrito interno entre os grãos, proporcionando, dessa maneira, a desagregação dos agregados rochosos.

Tanto a norma brasileira para lastro NBR 5564 (ABNT, 2021) quanto a norma da comunidade europeia EN 13450 (DIN, 2013) não exigem, tampouco recomendam a realização de ensaios de resistência ao esmagamento de agregados para a utilização de lastro ferroviário. Já Frazão (1987) enfatiza que, embora a fração granulométrica não seja representativa para as gradações do lastro, os resultados obtidos através do experimento permitem avaliar o comportamento prévio dos agregados para lastros que poderão ser utilizados em uma via férrea, nos quais estarão constantemente submetidos a tensões compressivas provocadas entre o trilho e a roda do trem.

2.3.5 Alterabilidade de rochas

Agregados de diferentes naturezas, diferentes formas e dimensões são usados como material de construção, sendo a resistência e a durabilidade as principais propriedades para esta utilização e que podem se alterar ao longo do tempo em decorrência da intensidade do intemperismo sofrido (FRAZÃO, 2007).

Os mecanismos de alteração de uma rocha por intemperismo se manifestam pela desagregação e pela decomposição, este ultimo segundo o referido autor, é o mais predominante em climas tropicais ou subtropicais. Pode-se inferir que estes processos quando atuantes em material rochoso e disposto de maneira a permitir uma boa drenagem, no caso dos lastros de ferrovias, tornam-se ainda mais importantes o conhecimento da qualidade do material a ser utilizado neste tipo de obra. Trata-se de um tema sempre atual e devidamente contextualizado por Frascá e Paraguassú (2018).

2.3.5.1 Ensaio de sanidade por sulfato de sódio

O ensaio de sanidade por sulfato de sódio tem por objetivo avaliar a durabilidade dos agregados rochosos verificando se estes são capazes de resistir à simulação de ciclos de congelamento e degelo através da cristalização interna de sais nos poros destas rochas.

Segundo Frazão (2012), o ensaio é realizado pela imersão de cinco ciclos de 18 horas em solução saturada de sulfato de sódio e, no mínimo, oito horas em estufa. A amostra imergida nessa solução, e após a sua secagem em estufa (105 °C), proporciona uma força

interna de expansão derivada da dilatação dos minerais, devido principalmente da cristalização dos sais presentes nos vazios da rocha, bem como os poros e microfissuras dos cristais que variam em pressão de 2 a 20 MPa.

Estudos recentes de Koken et al. (2018) demonstram a importância da investigação da durabilidade dos agregados para ferrovias usando ensaios de sanidade e enfatizam ainda que, caso a qualidade do lastro não seja satisfatória, os agregados de baixa qualidade poderão facilmente se desintegrar pela transmissão do carregamento cíclico entre roda e trilho.

2.3.5.2 Ensaio de saturação de rochas em água e secagem em estufa

A metodologia é regida pela NBR 12696 (ABNT, 1992) e, até o presente trabalho, essa norma encontra-se cancelada e em revisão. Este ensaio tem por objetivo verificar a presença de argilominerais expansivos (grupo da ilita ou montmorilonita), submetendo os agregados rochosos à saturação em água permitindo a hidratação dos minerais por um período de 48 horas. A secagem por estufa de 105 (± 5) °C por 24 horas proporciona a dilatação dos minerais e consequentemente a desagregação das partículas pelo aquecimento, podendo este processo de quebra do material ser facilitado, pela composição mineralógica da rocha.

Segundo Frazão (1987), o número de ciclos para lastros é variável, mas não deve ser menor do que 30. Para a NBR 12696 (ABNT, 1992), as durações dos ensaios devem ser de 120 ciclos ou até que nenhuma partícula fique retida na peneira de 19 mm e, portanto, o ensaio estará concluído.

Preferiu-se utilizar os procedimentos deste ensaio por acreditar que se trata de um método importante e que reflete as características sofridas em campo pelo agregado para lastro principalmente quando estas rochas serão expostas ao clima predominantemente tropical com forte atuação dos raios solares permitindo o aquecimento dos agregados e a saturação dos materiais devido às chuvas intensas no verão.

2.3.5.3 Ensaio de ciclagem acelerada com etilenoglicol

Este ensaio tem por objetivo avaliar o comportamento dos agregados rochosos que possam ter a presença de argilominerais expansivos através da saturação em etilenoglicol. Este método é regido pela NBR 12697 (ABNT, 1992) a qual enfatiza que o ensaio serve de estimativa do comportamento das rochas expostas ao longo do tempo que serão expostas a estados de saturação e secagem, congelamento e degelo do material em campo.

Até o presente momento, esta norma encontra-se cancelada pelo motivo de não ser mais utilizada pelo setor/comitê de cimento, concreto e agregados. Mas preferiu-se utilizar

este ensaio no presente estudo para a avaliação da qualidade das rochas em que já foram verificados a presença de argilominerais expansivos, já seguindo-se as recomendações da NBR 5564 (ABNT, 2021), Anexo C.

Segundo Frazão (1987), os ensaios de ciclagem acelerada por etilenoglicol são mais severos e altamente influenciados pela porosidade e absorção de água das amostras de rochas, desde que haja a interação de minerais secundários e argilominerais expansíveis em presença de líquidos.

Em escala microscópica, as moléculas do álcool são adsorvidas entre as lamelas dos argilominerais, provocando a expansão e consequentemente, a geração de tensões de tração nos espaços vazios e intergranulares da rocha. Macroscopicamente, o material amostrado apresentará fissuramento, lascas de minerais, rachaduras e até mesmo desintegração da rocha (FRAZÃO, 2002).

2.3.5.4 Ensaio de intemperismo artificial com equipamento *Weather-Ometer*

Outro ensaio importante é o de envelhecimento acelerado por intemperismo artificial através do equipamento do tipo *Weather-Ometer*, que simula as emissões de raios solares (UV) e condensação (gotas de orvalho) sendo possível controlar a temperatura destas variáveis e sua periodicidade permitindo uma ciclagem controlada de umedecimento e secagem por calor.

Esse tipo de ensaio é relativamente difundido na indústria, com ênfase na verificação da qualidade de produtos manufaturados, em termos de sua sensibilidade à exposição solar e umidade que, por vezes, pode acarretar diminuição significativa do tempo de vida útil de um determinado material.

No campo geotécnico, o equipamento *Weather-Ometer* tem sido utilizado frequentemente para estudos de alterabilidade de materiais geossintéticos (Fratassi et al. 2019 e Filho, 2016) e de rochas ornamentais e de revestimento (SANTOS e RIBEIRO, 2019; SANTOS e CARANASSIOS, 2007; SOUZA et al., 2007).

Essas amostras na forma de placas decimétricas são posicionadas adequadamente em dispositivos no interior da câmara, como exemplificado na Figura 8. Exemplos da literatura envolvendo partículas rochosas são escassas e tratam, respectivamente, de agregados com ligantes para pavimentação e concreto em (ZHOU et al., 2016; KHATRI et al., 2008).

No caso das rochas ornamentais e de revestimento, Chiodi Filho e Rodrigues (2020) e Frascá (2017) tecem comentários a respeito dos ensaios de intemperismo artificial com ciclos de umedecimento e secagem em câmaras de condensação e radiação de luz ultravioleta, sendo indicados para se verificar possível fotodegradação de resinas aplicadas na superfície de placas rochosas a serem usadas em revestimentos externos e fachadas.

Com base em Chiodi Filho e Rodrigues (2020), utilizando-se o equipamento *Weather-Ometer*, os efeitos da alteração de minerais deletérios presentes na rocha são avaliados após um período de exposição igual ou superior a 300 horas, simulando condições pré-fixadas de sol, chuva e temperatura controlada (simulação foto-hidrotérmica) que estão fortemente atuantes em resinas e corantes em rochas de revestimentos, aplicadas com o objetivo de promover a proteção da superfície e realçar o aspecto estético diferenciado dos materiais rochosos utilizados.

Cabe frisar que os materiais pétreos utilizados como agregado para lastro de ferrovias ficam sujeitos à exposição constante das intempéries, estando sob maior influência do meio em termos da decomposição dos minerais por reações físico-químicas.

Especialmente nestas condições (agregados sem ligantes), estudos envolvendo alterabilidade se tornam tão importantes quanto os de caracterizações geomecânicas das rochas visando a esse tipo de uso.

Figura 8: Placas de granito sendo avaliadas após o ensaio de intemperismo artificial.

Fonte: Modificado de Chiodi Filho e Rodrigues (2020).
Nota: Observar que a terceira placa da esquerda para a direita é mais escura que as demais por não ter sido ensaiada. As placas ensaiadas se tornaram levemente mais claras devido à reação com a radiação UV que incidiu sobre elas.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho se insere em uma linha de pesquisa de caráter multidisciplinar, envolvendo temas da Geologia de Engenharia e da Engenharia de Transportes.

Além da qualificação físico-mecânica, se avalia neste estudo a evolução da degradação de três materiais rochosos (sienogranito, monzogranito e microgabro) que são explotados em pedreiras situadas no município de São Paulo e no entorno da cidade de Campinas (região sudeste do Brasil). Esta avaliação utiliza ensaios não rotineiros (Micro-Deval, *Slake Durability* e entre outros) que são pouco difundidos em estudos de caracterizações tecnológicas de agregados no país.

Estes materiais rochosos foram escolhidos por razões diversas, dentre elas: os agregados para concreto e pavimentação são utilizados há décadas, mas ainda são pouco estudados para lastros de ferrovias. Consequentemente, por questões logísticas e pela proximidade e possibilidade da implantação do traçado do Trem Inter Cidades (TIC) (REVISTA FERROVIÁRIA, 2019).

Para tanto, com base em análises petrográficas detalhadas (mineralogia, textura, grau de alteração, microfissuramento etc.), foram realizados testes físico-mecânicos e de alterabilidade conjugados ou não aos ensaios de abrasão Micro-Deval e *Slake Durability Index*, em amostras coletadas nas porções dos maciços que apresentavam melhores qualidades.

Qualidades estas, adotadas como parâmetros para quantificar a degradação mecânica das rochas estudadas. Entende-se que, as caracterizações propostas no presente trabalho, do ponto de vista tecnológico, muito bem representam as solicitações mecânicas (compressão, desgaste abrasivo, esmagamento e tenacidade) assim como, as intempéries em regiões de clima tropical impostas aos lastros de uma ferrovia em serviço.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Das litologias estudadas por Remédio (2017) para compor os lastros ferroviários, três delas foram selecionadas para o presente trabalho: Complexo Morungaba (MOR), Granito Cantareira (CAN) e Intrusivas Básicas da Formação Serra Geral (GAB).

Elas foram escolhidas devido a suas qualidades tecnológicas e proximidade do possível projeto do Trem Inter Cidades (TIC) que ligará a capital paulista à cidade de Americana no interior do Estado de São Paulo.

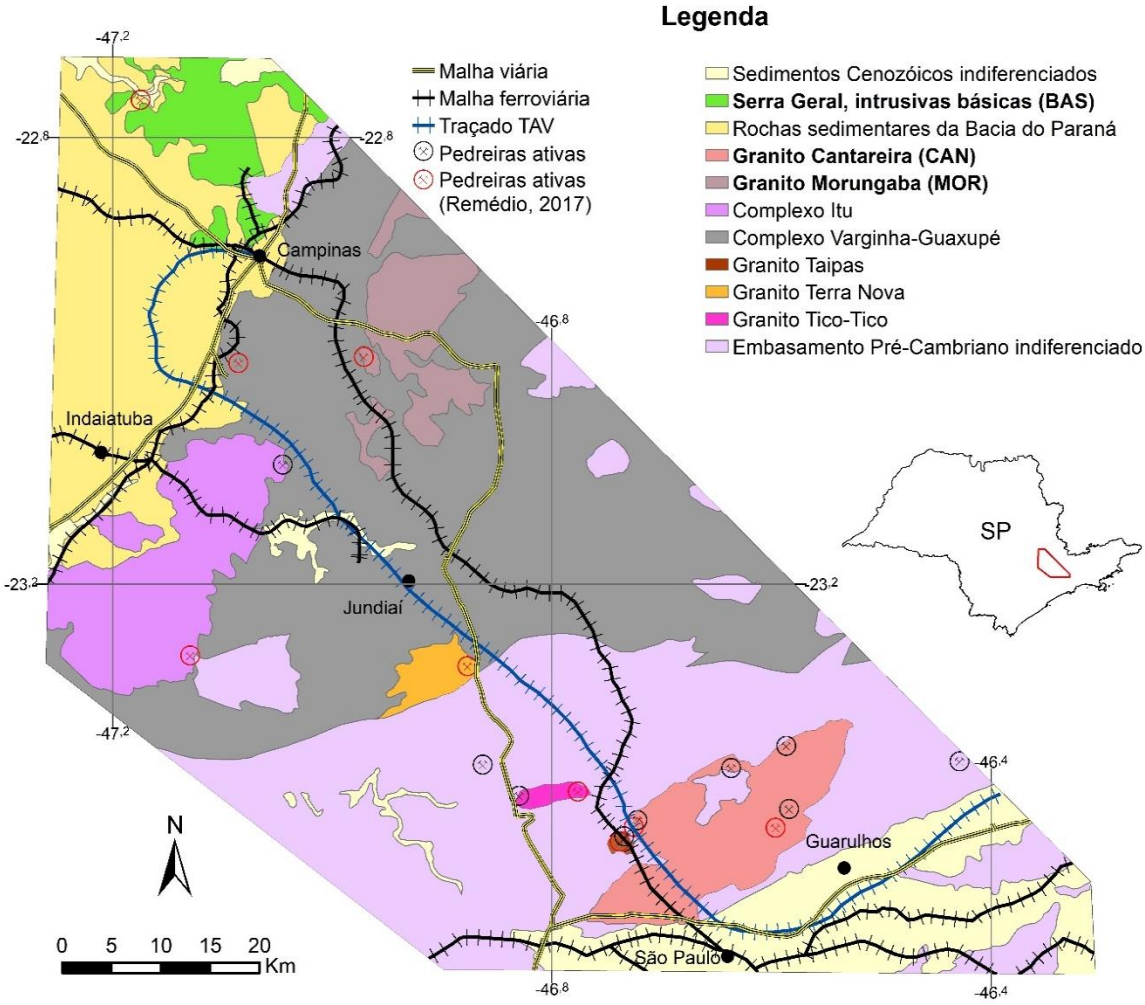
Estas rochas são explotadas há décadas em várias pedreiras ativas próximas a ferrovias existentes e impulsionam o crescimento das regiões metropolitanas de Campinas e São Paulo, Brasil (Figura 9).

Um aspecto fundamental que deve ser destacado (mas geralmente negligenciado na prática da engenharia brasileira) é que, no caso do lastro de ferrovia, a análise de uma jazida deve preceder as etapas de amostragem e, obviamente, dos ensaios tecnológicos.

Desta maneira, não existe um maciço rochoso homogêneo, mas sim com maior ou menor variabilidade geológica. Em outras palavras, todo estudo deve começar por descrição geológica detalhada da pedreira, caracterizando especialmente todas as heterogeneidades dos maciços rochosos em termos das rochas explotáveis dentre as existentes.

Trata-se, inclusive, de procedimento explícito na norma NBR 5564 (ABNT, 2021).

Figura 9: Localização das áreas de estudos, destacando em negrito na legenda, as três unidades geológicas que integram o presente estudo.



Fonte: Do autor (2021).

Com base nestas premissas, antes da amostragem, foram efetuadas observações geológicas e descrições petrográficas nas frentes dos desmontes das pedreiras em que são extraídas rochas para as diversas aplicações na engenharia para definir as porções do maciço com melhor qualidade.

Nessas porções seriam extraídas as rochas para lastro onde o agregado é requerido por suas qualidades mecânicas e, especialmente, pela maior resistência ao intemperismo. As outras porções do maciço ficariam para extração das rochas usadas em outras demandas, como concreto, brita graduada e pavimentação, que utilizam o agregado como ligantes ganhando relevância outras propriedades como, por exemplo, a reatividade álcali-agregado e a adesividade ao asfalto.

Posteriormente, novas observações foram realizadas, em termos da integridade verificada nas várias dimensões dos materiais desmontados nas pedreiras, bem como a coleta de blocos e fragmentos irregulares de rochas (Figura 10).

Já em relação a obtenção dos agregados graúdos foram britados em laboratório, através de um britador de mandíbula, relacionando assim, a exata procedência do material, diferentemente do que ocorre na britagem feita na pedreira, que poderá conter a contaminação de rochas com qualidades diferentes devido às heterogeneidades apresentadas de cada maciço rochoso.

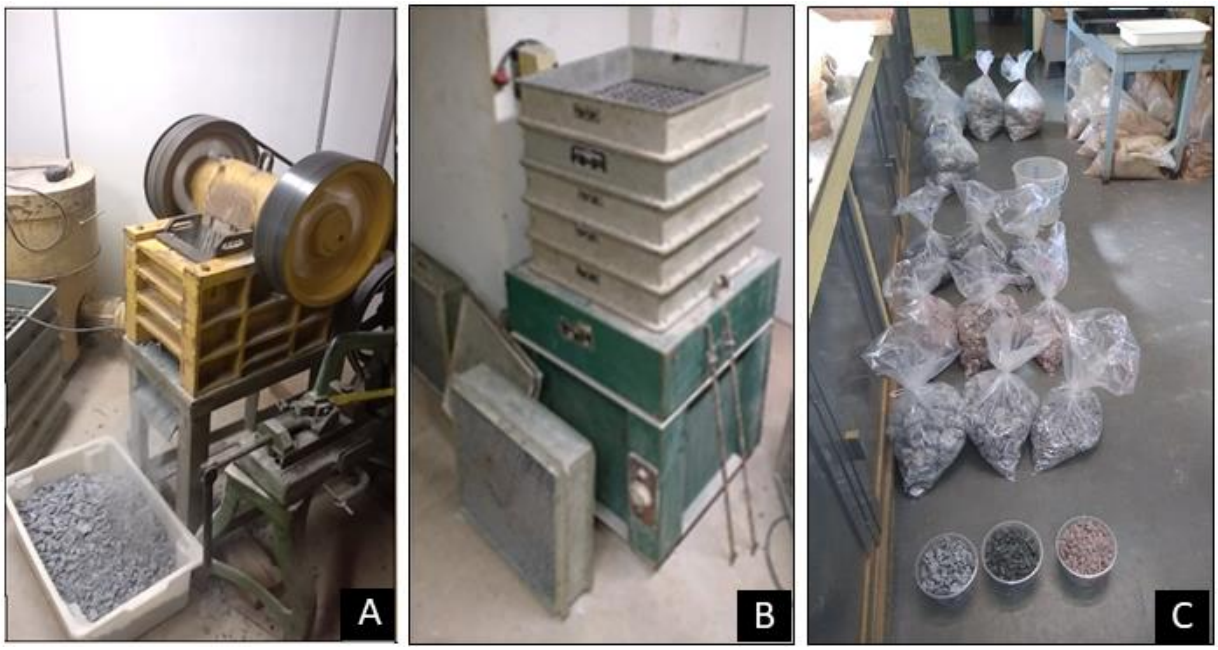
Figura 10: Coleta e inspeção cuidadosa de material rochoso desmontado em termos da representatividade amostral para realização de ensaios tecnológicos.

Fonte: Do autor (2021).
Nota: Observar ao fundo, a bancada da pedreira expondo o maciço rochoso do microgabro e a presença de fraturas pouco a medianamente persistentes, em geral fechadas e com espaçamento decimétrico. No topo em vermelho, solo saprolítico produto de alterações intempéricas na rocha.

Quanto aos processos de cominuição dos fragmentos das rochas amostradas, para compor as amostras de britas necessárias para os ensaios físicos, mecânicos e de alterabilidade previstos para agregados graúdos, utilizou-se um mini britador de mandíbulas marca Briterpa com 100 x 200mm de abertura, que possibilitou a obtenção de todas as faixas granulométricas de britas (63 a 9,5mm) requeridas pelas diretrizes dos ensaios.

Após a britagem, todo o material foi peneirado mecanicamente por meio de um agitador de peneiras da marca Produtest, passando por um grupo de peneiras metálicas com dimensões 500 x 500mm e aberturas de 63,5mm, 50,8mm, 38,1mm, 25,4mm, 19,1mm, 12,7mm e 9,5mm para agregado graúdo. Procedeu-se então a homogeneização e o quarteamento dos materiais, seguidos das separações das alíquotas para os ensaios físicos, mecânicos e de alterabilidade (Figura 11).

Figura 11: (A) Vista geral do britador de mandíbula. (B) Agitador mecânico para peneiramento e separação das diferentes faixas granulométricas de agregados graúdos das rochas estudadas. Observar em (C), parte do material que foi britado está devidamente acondicionado em recipientes e sacos plásticos. Ensaios realizados no Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC/USP.



Fonte: Do autor (2021).

O roteiro metodológico (Figura 12) é apresentado a seguir:

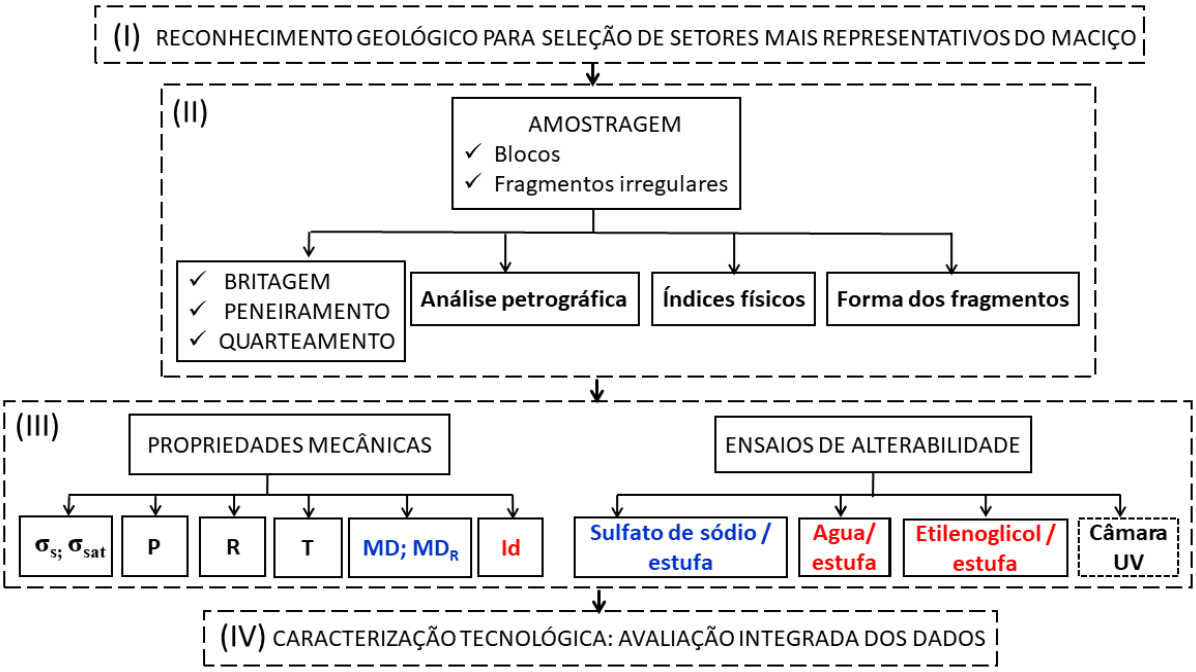
(I) Reconhecimento geológico de campo para definição do maciço rochoso da pedreira a ser estudado;

(II) Coleta de amostras em frente ao desmonte de rochas (blocos e fragmentos irregulares). Depois de britados, os materiais foram peneirados, homogeneizados e quarteados, com a separação das alíquotas para os ensaios propostos; análise petrográfica e determinação dos índices físicos e do índice de forma;

(III) Determinação dos valores das resistências à compressão uniaxial (σ_s e σ_{sat}); abrasão *Los Angeles* (P); esmagamento (R); Impacto Treton (T); desgaste abrasivo Micro-Deval e Micro-Deval Residual (MD e MD_R); *Slake Durability Index* (Id). Estes dois últimos índices serviram de referência para avaliar a degradação mecânica conjugada das rochas nos ensaios de alteração acelerada: (MD) no qual está associado ao ensaio de sanidade (sulfato de sódio) e (Id) assim como, aos ensaios de água-estufa e etilenoglicol; Realização do ensaio complementar e pioneiro de intemperismo artificial acelerado em câmara UV (*Weather-Ometer)*;

(IV) Avaliação integrada dos dados obtidos nos ensaios de caracterização tecnológica.

Figura 12: Roteiro experimental da pesquisa.



Fonte: Do autor (2021).

3.2 NORMALIZAÇÕES E PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Conforme a Tabela 10, as análises petrográficas, os ensaios físicos (índices físicos e forma dos fragmentos) e mecânicos (resistências à compressão uniaxial, abrasão *Los Angeles*, esmagamento, Impacto Treton, desgaste por abrasão Micro-Deval e *Slake Durability Index*) somados aos ensaios de alterabilidade (resistência à intempérie, água-estufa, etilenoglicol e intemperismo artificial acelerado em câmara UV) todos eles foram realizados nos laboratórios abaixo.

Departamento de Geotecnia (SGS), Departamento de Engenharia de Estruturas (SET) e Departamento de Engenharia de Transportes (STT), os três da Escola de Engenharia de

São Carlos (EESC-USP); Instituto de Química de São Carlos (IQSC/USP); Serviço Geológico do Brasil - CPRM, nas cidades de Araraquara (SP) e São Paulo; Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual Norte Fluminense (LECIV/UENF) em Campos dos Goytacazes (RJ).

Todos os procedimentos seguiram as diretrizes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da American Standard Testing Machines (ASTM) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). As Tabelas 10 e 11 apresentam uma síntese dos ensaios e as respectivas normas técnicas, tipo/quantidade de amostras e procedimentos de execução.

Tabela 10: Tipos e condição dos ensaios com agregados para uso em lastros ferroviários

Ensaio	Norma	Observações gerais
Análise petrográfica	NBR 7389 (ABNT, 2009) NBR 15845 (ABNT, 2015)	(A) Microscopia óptica em sessões delgadas obtidas de fragmentos representativos das rochas.
Massa específica aparente Porosidade aparente Absorção de água	NBR 5564 (ABNT, 2021)	(A) Medições das massas secas, saturadas e submersas de 10 corpos de provas (CPs) escolhidos aleatoriamente dentre os fragmentos de rochas amostrados em campo.
Forma dos fragmentos	NBR 5564 (ABNT, 2021)	(A) 50 fragmentos coletados aleatoriamente entre as frações de 76mm a 19mm
Resistência à compressão uniaxial	NBR 5564 (ABNT, 2021)	(A) (B) CPs cilíndricos, diâmetro de 76mm, relação altura/diâmetro 2/1; ensaios nas condições secas e saturadas.
Abrasão *Los Angeles*	NM 51 (ABNT, 2001)	(C) Grad. “F”: 10.000 ± 75g partículas 50 a 25mm; carga abrasiva: 5.000 ± 25g; velocidade tambor: 30-33rpm; 1.000 rotações. Massa final é a retida na peneira de abertura 1,7mm. Ensaios a seco.
Abrasão Micro-Deval (1)	D6928 (ASTM, 2017)	(D) Grad. “A” 1.500 ± 5g partículas 19 a 9,5mm; carga abrasiva: 5.000 ± 25g; velocidade tambor: 100 ± 1rpm; 12.000 rotações. Massa final é a retida na peneira de abertura 1,19mm. Ensaio com água.
Resistência ao Choque (Impacto Treton)	NBR 5564 (ABNT, 2021)	(A) Três conjuntos de 20 fragmentos de 19 a 16mm cada; massa final da amostra de ensaio é a retida em peneira de abertura 1,7mm.
Resistência ao esmagamento	NBR 9938 (ABNT,2013)	(A) Cerca de 10.000g de partículas 12,7 a 9,5mm; carga de 40 ton por amostra; taxa 4 ton/min. Massa final da amostra é a retida em peneira de abertura 2,4mm.
Slake Durability Index (2)	D4644 (ASTM, 2016)	(A) Cerca de 500g de partículas 19,5 a 9,5mm; duas etapas padrões de umedecimento e de secagem. No presente estudo, foram realizados 5 ciclos completos para cada rocha.

Fonte: Do autor (2021).
Notas: (1) Ensaio mecânico conjugado ao ensaio de alteração acelerada com solução de sulfato de sódio; (2) Ensaio mecânico conjugado aos ensaios de imersão em água e secagem em estufa e alteração acelerada com imersão em etilenoglicol. Locais de realizações dos ensaios: (A) SGS/EESC, (B) SET/EESC, (C) STT/EESC, (D) LECIV/UENF.

Deu-se ênfase ao detalhamento das análises petrográficas (mineralogia primária e secundária, grau e tipo de alteração dos minerais, microfissuramentos etc.), para melhor

estabelecer as relações com as propriedades físico-mecânicas, químico-mineralógicas e texturais das rochas estudadas num contexto geotécnico de aplicação em obra.

Os ensaios de resistência à compressão uniaxial foram efetuados em corpos de prova secos em estufa a 110º C e saturados em água, para avaliar o possível enfraquecimento hidráulico de cada rocha em relação aos esforços nelas exercidos.

O coeficiente de enfraquecimento hidráulico *R* (Kowalski, 1970 *apud* Mesquita, 2002 e Mattos et al., 2013), relaciona a resistência de um material seco e saturado, permitindo avaliar o efeito da água na resistência dos materiais rochosos, sendo calculado pela Equação 1.

$$R = \frac{\sigma_{sat}}{\sigma_s} . 100 \quad (1)$$

Onde:

- *R:* Coeficiente de enfraquecimento hidráulico;
- σ_s e σ_{sat}: Correspondem à tensão de ruptura do material em estados seco e saturado, respectivamente.

Tabela 11: Tipos e condição dos ensaios de alteração acelerada adotados na pesquisa

Ensaio	Norma	Observações gerais
Saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa	C88 (ASTM, 2018) DNER-ME 089/94	(E) Mesma graduação e quantidade da amostra utilizada no ensaio de abrasão Micro-Deval; 05 ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio (18hs) e de secagem em estufa (8hs). Massa final da amostra é a retida em peneira de abertura 9,5mm.
Saturação em água e secagem em estufa	NBR 12696* (ABNT, 1992)	(A) Idem anterior; 30 ciclos de imersão em água destilada (14 ± 1hs) e secagem em estufa (8 ± 1h). Massa final da amostra é a retida em peneira de abertura 9,5mm.
Saturação em etilenoglicol e secagem em estufa	NBR 12697* (ABNT, 1992)	(A) Idem anterior; 06 ciclos de imersão em etilenoglicol (48 ± 1h e 72 ± 1h) secagem em estufa (4hs ou mais). Massa final da amostra é a retida em peneira de abertura 9,5mm.
Intemperismo artificial em câmara UV **	G151 (ASTM, 2019)	(A) Ciclos de 4hs de radiação UV a 75° C alternados com ciclos de 4hs de condensação a 50°C; total programado de 1.000hs de degradação em amostras do álcali-feldspato granito (MOR) e do microgabro (GAB).

Fonte: Do autor (2021)

Notas: * Em se tratando de estudos comparativos, foram considerados os processos de degradações em que se baseiam as normas para verificar a alterabilidade das rochas estudadas; ** Ensaio complementar. Locais de realizações dos ensaios: (A) SGS/EESC e (E) IQSC/USP.

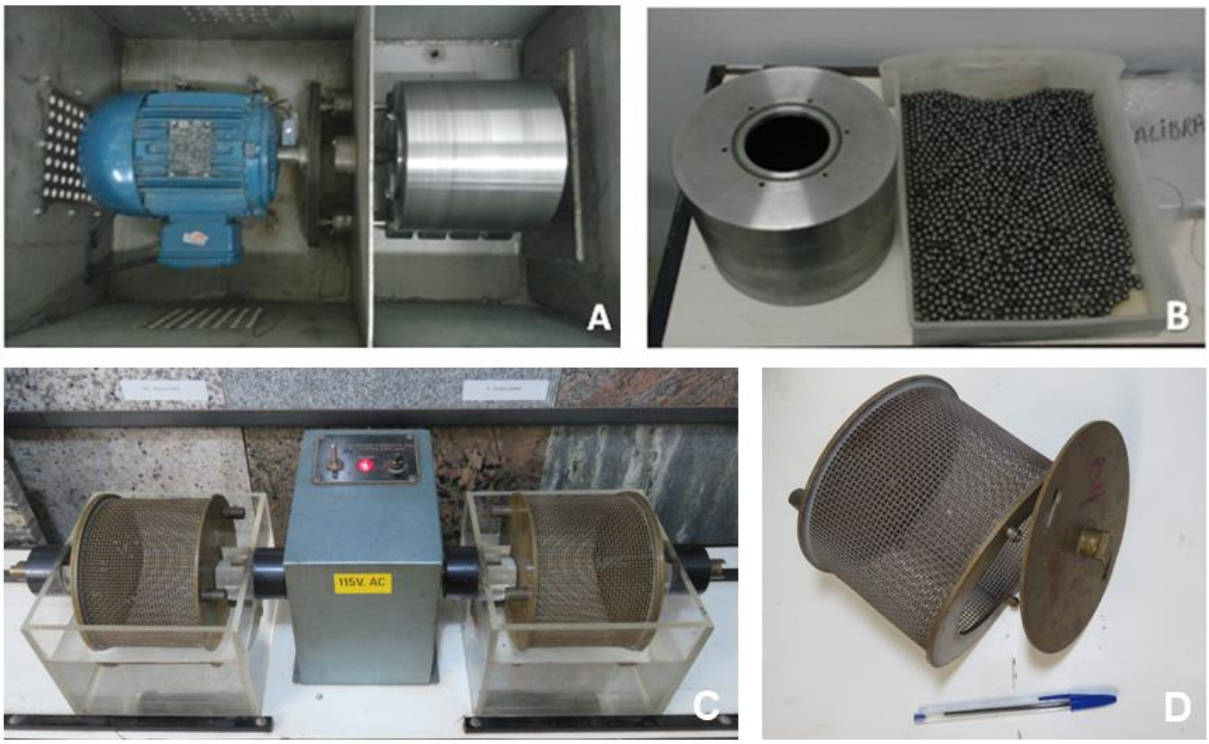
Com o objetivo de se obter informações a respeito das alterações intempéricas das rochas na forma de fragmentos (lastro), foram realizados três tipos de ensaios de alterabilidade, todos com secagem em estufa: (I) solução de sulfato de sódio; (II) imersão em etilenoglicol e (III) saturação em água destilada.

No decorrer destas ciclagens procedeu-se avaliações qualitativas e quantitativas de todas as amostras, feitas pela mensuração das perdas de massas, por exames visuais e registros fotográficos dos eventuais danos (fissuras, trincas, oxidação, desagregação etc.) nos

corpos de provas.

Adicionalmente, os ensaios Micro-Deval (MD) e *Slake Durability Index* (Id) (Figura 13), que não são rotineiros em estudos de caracterização de agregados no Brasil, foram adotados como parâmetros auxiliares para quantificar a desagregação das partículas rochosas, pelo fato de se tratar de ensaios de desgastes abrasivos a úmido das rochas onde o material alterado é descartado da massa inicial da amostra.

Figura 13: (A) Equipamento de desgaste Micro-Deval: motor de acionamento e cilindro; (B) Detalhe exibindo cilindro e as cargas abrasivas (esferas com diâmetro de 9,5 mm) existente no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV) da UENF - Campos dos Goytacazes/RJ. (C) Equipamento de desgaste *Slake Durability Index.* (D) Detalhe mostrando tambor e tampa de vedação utilizados no ensaio. Laboratório de Geologia de Engenharia do Departamento de Geotecnia da EESC/USP.



Fonte: Do autor (2021).

Com base nas diretrizes da norma D6928 (ASTM, 2017), o ensaio MD foi utilizado para quantificar a resistência à abrasão e à durabilidade dos agregados rochosos, sendo um teste de uso difundido internacionalmente, mas ainda pouco usado no Brasil.

Para cada amostra de ensaio foram preparadas em torno de 1.500g de fragmentos com diâmetros passantes na abertura de 19,50mm e retidos na peneira 9,50mm.

Foi calculado também o índice Micro-Deval Residual (MD_R), proposto por Benediktsson (2015) que é obtido pela razão entre a soma das massas retidas na peneira da menor fração da graduação escolhida do ensaio e a massa inicial da amostra.

No caso do ensaio Id, apesar de originalmente utilizado em rochas brandas e pouco resistentes, com caráter expansivo e de elevada desagregação quando umedecida (Franklin

e Chandra, 1972), são vários os exemplos de aplicação deste ensaio em pesquisas envolvendo a alterabilidade de rochas ígneas e seus comportamentos em maciços geológicos utilizados pela engenharia (MOMENI et al., 2017; GUPTA e AHMED, 2007; AREL e TUGRUL, 2001).

Para fins comparativos entre as rochas, foram estabelecidas adequações das diretrizes da norma D4644 (ASTM, 2016), sendo utilizadas aproximadamente 500g de fragmentos com diâmetros entre 19,5mm e 9,5mm (mesma graduação do ensaio MD) antes e depois dos ensaios de alteração acelerada. No presente estudo, foram realizados 5 ciclos completos para cada rocha.

A Tabela 12 apresenta a classificação de durabilidade de rochas proposta por Gamble (1971), levando-se em conta os valores de Id obtidos nos ensaios, sendo que cada amostra retida no tambor deve ser categorizada visualmente em comparação aos padrões estabelecidos na norma D4644 (ASTM, 2016), a saber:

Tipo I: amostras retidas permanecem praticamente inalteradas;

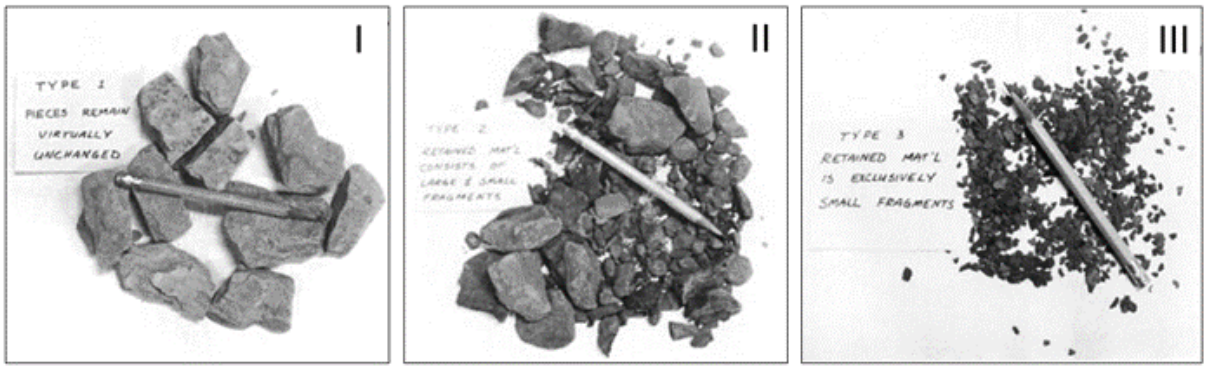
Tipo II: amostras retidas consistem em fragmentos grandes e pequenos;

Tipo III: amostras retidas são exclusivamente fragmentos pequenos;

Tabela 12: Classificações de durabilidade

Slake Durability Index (GAMBLE, 1971)		
Id (%)	Classificação	Símbolo
100-98	Muito alto	MA
98-95	Alto	A
95-85	Médio a alto	M-A
85-60	Médio	M
60-30	Baixo	B
30-0	Muito baixo	MB

Aspecto visual de amostras submetidas aos ensaios “Id”. Norma D4644 (ASTM, 2016)



Fonte: Modificado de (GAMBLE, 1971).

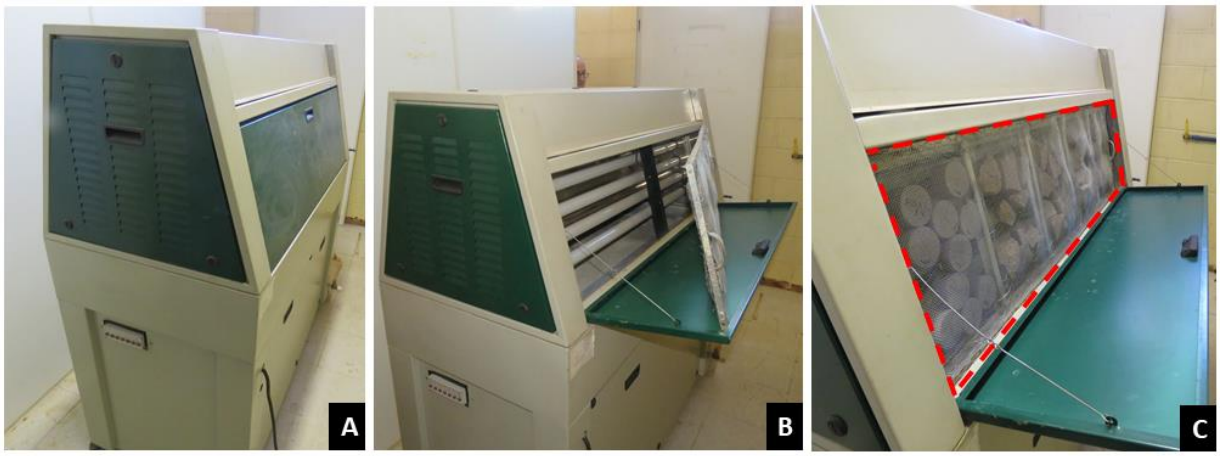
Cabe frisar que os materiais pétreos utilizados como agregados para lastros de ferrovias ficam sujeitos à exposição constante das intempéries, estando sob maior influência do meio em termos da decomposição dos minerais por reações físico-químicas.

Ou seja, os estudos envolvendo alterabilidade se tornam tão importantes quanto os de caracterizações geomecânicas das rochas visando este tipo de uso.

Com base nestas premissas e, de modo complementar aos três tipos de ensaios de alteração acelerada já mencionados na presente pesquisa, foi também realizado um estudo piloto de intemperismo artificial em câmera UV, utilizando-se um equipamento do tipo *Weather-Ometer*, que simula condições intempéricas do sol (raios UV) e condensação, consequentemente tem-se o controle da temperatura interna da máquina e periodicidade destas variações.

No protocolo experimental foi empregada uma câmara de envelhecimento acelerado da marca EQUILAM, modelo EQUV Série 003, dotada de um conjunto de oito lâmpadas do tipo UVA-351, com a metade delas dispostas em cada uma das faces laterais do equipamento (Figura 14 A/B).

Figura 14: (A) Vista lateral de umas das faces da câmara EQUILAM existente no Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. Notar em (B) a disposição das lâmpadas UVA e, em (C), limites (tracejados em vermelho) do painel com gaiolas teladas contendo as amostras das rochas devidamente posicionadas para a realização dos ciclos de intemperismo artificial.



Fonte: Do autor (2021).

Trata-se de uma simulação foto-hidrotérmica, cuja avaliação dos efeitos sobre a rocha é feita após um período de exposição geralmente igual ou superior a 300 horas (CHIODI FILHO e RODRIGUES, 2020).

O equipamento do tipo *Weather-Ometer,* tem sido frequentemente utilizado em estudos de alterabilidade de materiais geossintéticos e de rochas ornamentais (durabilidade de películas) em amostras na forma de placas decimétricas que são posicionadas adequadamente em dispositivos no interior da câmara.

Para utilização do *Weather-Ometer* na presente pesquisa foi necessário adaptar gaiolas de telas metálicas juntos aos painéis laterais para acondicionar as amostras de rochas de modo a garantir o distanciamento padronizado do conjunto de lâmpadas UVA (Figura 14C).

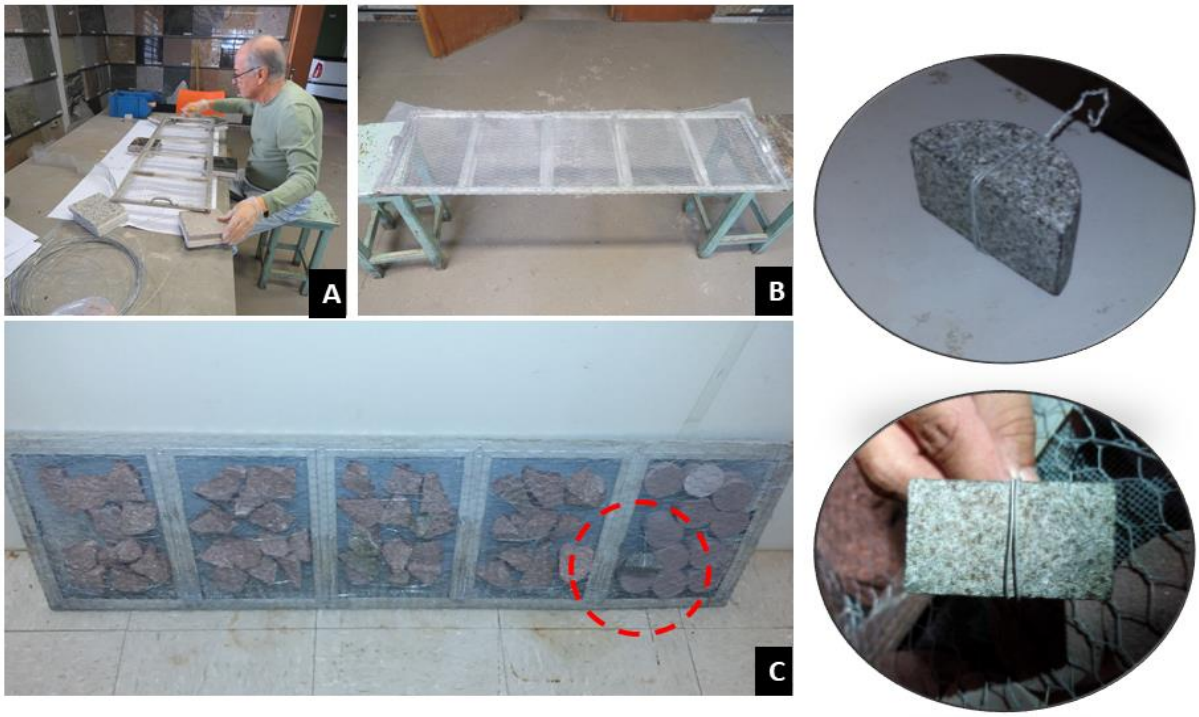
Com base nas diretrizes da norma G151 (ASTM, 2019), definiu-se um roteiro alternando ciclos de 4 horas de radiação UV a 75ºC e 4 horas de condensação a 50°C, com um total programado de 1.000 horas de ciclagem em dois tipos de rochas: Álcali-feldspato granito (MOR) e microgabro (GAB).

Para cada tipo de rocha, foram acondicionados cerca de 5 kg de partículas de fragmentos irregulares (brita) com diâmetro entre 50 e 32 mm e 10 discos cilíndricos de 54 mm de diâmetro, com o objetivo de se verificar a degradação nas amostras cicladas por meio de ensaios mecânicos com as britas e da resistência à tração indireta nos corpos de provas cilíndricos.

Cabe ainda destacar um tipo adicional de amostra que também foi preparada: para cada rocha, um corpo de prova cilíndrico de 54 mm foi serrado ao meio, onde uma metade foi ciclada juntamente com as demais amostras (Figura 15) a outra parte (sã) foi guardada para servir de amostra referência (espelho) para efeito comparativo da degradação.

Especificamente para estas amostras, previu-se uma avaliação qualitativa, por meio da inspeção visual dos CPs gêmeos, além de um método não destrutivo (espectrometria de massa). Estas determinações foram realizadas nos laboratórios do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, unidade São Paulo/SP).

Figura 15: (A, B) Colaboração do Prof. Antenor Braga Paraguassú na confecção das “gaiolas” metálicas para disposição das amostras irregulares (britas) e corpos cilíndricos das rochas estudadas (C). Observar, no detalhe (circulado em vermelho) um corpo de prova cilíndrico cortado ao meio e então preso à gaiola para, juntamente com grupo de amostras, ser ciclado na câmara UV utilizada. Esta amostra foi utilizada para posterior avaliação qualitativa da degradação ocorridas nas rochas por inspeção visual e espectrometria de massa.



Fonte: Do autor (2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONTEXTO GEOLÓGICO E PETROGRAFIA DAS ROCHAS ESTUDADAS

A contextualização geológica das rochas estudadas é apresentada de forma resumida, levando-se em conta a literatura consultada e os estudos prévios de Remédio (2017) e Remédio et al. (2018).

Conforme já mencionado, nos casos em que rochas na forma de fragmentos estarão expostas às intempéries especialmente em regiões de clima tropical, a resistência à alteração é uma das condições principais para a previsibilidade de manutenção do lastro que é de alto custo em ferrovias lastradas.

Isto requer estudos petrográficos bem coesos e grande detalhamento de informações macro e microscópicas de modo a possibilitar uma interpretação mais aprofundada em termos da durabilidade do material pétreo quando em uso.

Assim sendo, inicialmente são apresentadas as descrições pormenorizadas dos três materiais estudados (MOR, CAN e GAB) em seguida, uma síntese das informações petrográficas obtidas.

4.1.1 Complexo Morungaba (MOR)

De acordo com as descrições de Vlach (1985) o material produzido na pedreira visitada em Valinhos (SP) englobaria dois fácies: o microgranítico róseo hololeucocrático (biotita muscovita granada monzogranito) e o róseo leucocrático de granulação média, raramente fina (biotita muscovita monzogranito).

O material coletado em frente de lavra previamente selecionada pelo acesso a uma bancada da face leste da pedreira visitada (Figura 16) condiz com esta descrição, que é apresentada a seguir.

4.1.1.1 Material

Sienogranito róseo, hololeucocrático, com biotita e moscovita ou álcali-feldspato granito róseo, em função dos teores de albita do Complexo Morungaba.

4.1.1.2 Aspectos gerais

Rocha com estrutura maciça, compacta e textura equigranular hipidiomórfica a alotriomórfica, com granulação média a média-fina. A granulação oscila de submilimétrica a aproximadamente 5,0mm ou mais, com predominância entre 0,5 e 2,0mm, caracterizada por bom entrelaçamento mineral. O aspecto geral rosado da rocha é quebrado pela presença de pequenos e raros glomérulos de biotita e/ou mais comumente de micro agregados de cristais de quartzo esfumaçados, com dimensões máximas de 2,0 a 2,5mm, que imprimem um discreto aspecto mosqueado à rocha. Os cristais com maiores dimensões correspondem ao feldspato potássico, que podem atingir dimensões que superam 5,0mm, e a coloração marcadamente rósea da rocha estaria relacionada ao elevado grau de oxidação do ferro, associados a ações deutéricas e mesmo intempérica.

Figura 16: (A) Vista panorâmica das bancadas da pedreira localizada na região de Valinhos/SP. (B) Inspeção cuidadosa de material desmontado em bancada expondo maciço granítico relativamente tectonizado. (C) Aspecto de alguns dos blocos amostrados para a confecção de corpos de provas cilíndricos e transportados para o pátio do departamento de Geotecnia da EESC/USP.

Fonte: Do autor (2021).

Na amostra de mão observam-se fraturas contínuas, com pelo menos duas diferentes orientações, com planos preenchidos por fina massa de minerais filossilicáticos esverdeada (epidoto e talvez sericita). Também são observados microfaixas blastomiloníticas com espessuras milimétricas (1 a 3mm de espessura) destacadas pela presença de minerais alongados e recristalizados orientados segundo os planos deformacionais. A boa recristalização mineral indicaria que esta fase deformacional teria ocorrido em estágios de elevada plasticidade da rocha.

4.1.1.3 Composição mineralógica e detalhes microscópicos

A composição mineralógica do álcali-feldspato granito Morungaba (MOR) é apresentada na Tabela 13.

A amostra analisada corresponde a uma rocha granítica petrograficamente bastante evoluída, com domínio de feldspato potássico (ortoclásio) sobre o plagioclásio ácido (em boa parte albítico) e pobreza em minerais máficos (biotita, muscovita, opacos), indicativos de cristalização de magma residual. Efeitos hidrotermais tardios são relativamente significativos, evidenciados através de certa albitização do oligoclásio, muscovitização da biotita, e pela presença de raros cristais de fluorita intersticial.

Tabela 13: Composição mineralógica do álcali-feldspato granito Morungaba (MOR)

Composição mineralógica	% modal
Quartzo	31,0
Feldspato potássico (ortoclásio parcialmente microclinizado)	44,0
Plagioclásio (oligoclásio / albita)	19,5
Biotita	1,0
Muscovita	2,0
Acessórios: opacos, apatita, zircão, fluorita	0,5
Minerais secundários: muscovita, sericita, epidoto, clorita, carbonatos, argilominerais, óxidos/hidróxidos de ferro	<2,0

Fonte: Do autor (2021).

O feldspato potássico também estaria afetado pela ação hidrotermal tardia, tendo em vista os aspectos gerais de “sujidade” dos referidos cristais em virtude de significativa quantidade de micro-inclusões pulverulentas de difícil identificação sob o microscópio, provavelmente representadas por minúsculos cristais de sericita e de óxidos e hidróxidos de ferro difusamente disseminados no interior dos cristais. O feldspato potássico está representado pelo ortoclásio, sendo que alguns cristais se encontram parcialmente microclinizados e pertitizados. As pertitas, quando presentes, são do tipo filmes, manchas e venulares. O microfissuramento dos cristais é bastante discreto, do tipo intragrão e normalmente fechados.

O plagioclásio forma cristais subedrais a anédricos, neste caso em posições intersticiais, e basicamente representado pela albita, assim caracterizada por apresentar índice de refração menor que o índice dos cristais de quartzo. Os cristais maiores, normalmente subedrais, parecem exibir núcleos com composição do oligoclásio, mas quando em contato com o quartzo apresentam bordas com índice de refração correspondente a da albita. Esta constatação poderia indicar dois estágios de cristalização do plagioclásio, uma mais precoce com a formação do oligoclásio e uma mais tardia de natureza residual, ou mesmo devido a efeitos hidrotermais de líquidos residuais. Os cristais maiores apresentam fina geminação polissintética, por vezes associada ao tipo periclíneo, e no geral fracamente saussuritizados. Destaca-se a frequente presença de agregados carbonáticos (calcita) que se alojam intersticialmente aos cristais de plagioclásio. O grau de microfissuramento dos cristais de plagioclásio é igualmente discreto, descontínuos, predominantemente intragrão.

A presença do plagioclásio sódico, essencialmente albítico, classificaria a amostra analisada como correspondendo a um álcali-feldspato granito com biotita e muscovita. Essa consideração seria corroborada pelos baixos teores de minerais máficos (biotita e opacos), inferiores a 2%, e pela presença de muscovita e fluorita, situações comuns para álcali-feldspato granitos.

O quartzo ocorre tanto intersticialmente aos cristais de feldspatos, forma mais comum, quanto constituindo cristais anédricos isolados ou formando pequenos agregados pouco alongados ou ovalados, nestes casos com dimensões máximas observadas ao redor de 2,5 mm. Os cristais são límpidos, com discreta extinção ondulante nos cristais de maiores dimensões. Os contatos com outros minerais são interpenetrados no caso dos grãos intersticiais e lobulados a côncavo-convexos em relação aos cristais maiores e nos agregados. O microfissuramento é raro, do tipo intragrão fechado.

Em relação aos acessórios, a biotita exibe pleocroísmo verde e encontra-se fortemente muscovitizada e parcialmente cloritizada, com bordas frequentemente corroídas e com discreta presença de óxidos e hidróxidos de ferro distribuídos nos planos de clivagem. A muscovita, pouco mais frequente que a biotita, ocorre tanto como cristais lamelares submilimétricos individualizados, de aspecto límpido, quanto gerado muscovitização da biotita. Os opacos são pouco frequentes, normalmente como minúsculos cristais associados ou próximos às lamelas de biotita alterada. A apatita é rara e ocorre como pequenos cristais prismáticos esparsamente distribuídos pela rocha ou associada à biotita. O zircão é extremamente raro e praticamente restrito a pequenas inclusões na biotita. A fluorita se limita a alguns poucos cristais intersticiais.

Dentre os minerais secundários destaca-se, além da muscovitização da biotita, a frequente presença de carbonatos que ocorrem em pequenos agregados intersticiais, principalmente associados aos de cristais plagioclásio, dos quais provavelmente se originam. Sericita e epidoto são pouco frequentes e basicamente relacionados à discreta saussuritização do plagioclásio. A sericita, pelo menos em parte, deve integrar as microinclusões pulverulentas (“sujidade”) exibidas pelo feldspato potássico, descrita acima.

O microfissuramento mineral é incipiente, essencialmente do tipo intragrão, com planos normalmente fechados. Entretanto, observa-se, em amostra de mão fraturas contínuas preenchidas por minerais secundários de natureza filossilicática, o que, inclusive, facilitaria o processo de britagem da rocha.

4.1.2 Granito Cantareira (CAN)

Este corpo ígneo compreende um batólito de forma ligeiramente triangular e alongada segundo a direção NE-SW e ocupa uma área de cerca de 320 km². De acordo com Dantas

(1990), trata-se de um maciço heterogêneo, de caráter porfiróide e textura granular hipidiomórfica. Termos equigranulares e inequigranulares ocorrem subordinadamente, enquanto o acúmulo localizado de megacristais pode definir feições pegmatóides. A estrutura é maciça a orientada e dentre as várias pedreiras ativas neste domínio geológico, destaca-se a localizada na borda oeste do batólito, situada em Perus, região norte do município de São Paulo, SP (Figura 17).

Figura 17: (A) Bancada da pedreira com o desmonte de blocos rochosos. (B) Maciço rochoso bastante fraturado. (C) Monzogranito com megacristais de microclínio predominante nas exposições da pedreira localizada na região de Perus (São Paulo/SP).

Fonte: Do autor (2021).

4.1.2.1 Material

Biotita Monzogranito com titanita.

4.1.2.2 Aspectos gerais

Rocha de coloração cinza claro com estrutura maciça, de aspecto visual homogêneo, com textura fanerítica discretamente porfirítica, do tipo serial, caracterizada pela presença de esparsos megacristais de microclínio que atingem dimensões entre 2 e 2,5 cm. A matriz é granodiorítica com textura hipidiomórfica inequigranular de granulação média a média-grossa, predominantemente entre 2,0mm e cerca de 7,0mm, composta por massa quartzo-feldspática com biotita, opacos, titanita, apatita e zircão, além de correspondentes minerais secundários. Os megacristais estão representados essencialmente pelo feldspato potássico (microclínio) róseo claro com formatos retangulares, quadráticos e por vezes irregulares, com dimensões seriais que oscilam desde a cerca de 1cm até ao redor de 2,5cm. Megacristais de plagioclásio são raros e quando presentes são de dimensões inferiores aos do microclínio.

4.1.1.3 Composição mineralógica e detalhes microscópicos

A composição mineralógica da biotita monzogranito com titanita Cantareira (CAN) é apresentada na Tabela 14.

Microscopicamente, observam-se discretos efeitos deformacionais protomiloníticos evidenciados pela forte extinção ondulante de cristais de quartzo microfraturados parcial a totalmente recristalizados, bem como de cristais tabulares/prismáticos de plagioclásio encurvados e de agregados de lamelas de biotita desplacadas e contorcidas, por vezes com textura simplictítica, indicando boa recristalização concomitante ao processo deformacional.

Efeitos deutéricos e/ou hidrotermais são bastante pronunciados, sobretudo em cristais de plagioclásio que foram afetados por intensa saussuritização. As lamelas de biotita exibem aspecto pulverulento devido à expressiva quantidade de microcristais de opacos e de epidoto disseminados, sendo relativamente discretos sobre cristais de microclínio, marcados por fraca sericitização superimposta.

Tabela 14: Composição mineralógica do monzogranito Cantareira (CAN)

Composição mineralógica	% modal
Quartzo	29,0
Feldspato potássico (microclínio)	24,0
Plagioclásio (oligoclásio)	30,0
Biotita	8,5
Titanita	0,4
Apatita	0,1
Opacos	1,5
Zircão	Traço
Minerais secundários: sericita, clorita, epidoto, carbonatos, argilominerais, óxidos/hidróxidos de ferro	6,5

Fonte: Do autor (2021).

A relação dos contatos interminerais é predominantemente do tipo engrenado, interpenetrados, tendendo a lobulados nas porções mais quartzosas, que no conjunto resulta em bom imbricamento mineral.

O estado microfissural geral é de baixa densidade, mas bastante evidente principalmente em cristais de quartzo mais desenvolvidos. Os agregados de cristais de quartzo que podem atingir dimensões próximas de 1,0cm, provavelmente resultantes da microgranulação de monocristais maiores, apresentam moderado a elevado microfissuramento tanto intragrãos como transgralunares com fissuras fechadas ou abertas, nestes casos preenchidas por minerais secundários como epidoto e por vezes carbonatos. Os cristais de feldspatos, ao contrário do quartzo, apresentam microfissuramento incipiente, e basicamente do tipo intragrãos.

O plagioclásio (oligoclásio) é o mineral mais frequente da matriz da rocha, podendo, inclusive, constituir raros megacristais, mas com dimensões inferiores aos do microclínio. Na matriz forma cristais subédricos com dimensões desde submilimétrica a cerca de 6 a 7mm na maior extensão do prisma, na média predominantemente entre 3 e 5mm. Os cristais maiores de plagioclásio são subédricos, repiformes, comumente com bordas corroídas, com geminações polissintética mais ou menos evidente, Carsbald e por vezes periclíneo, e exibem zoneamentos regulares com núcleos que atingem composição da andesina ácida que gradam em direção à borda para o oligoclásio. Estes cristais maiores de plagioclásio, e principalmente seus raros megacristais, contém frequentes inclusões de cristais subédricos de plagioclásio mais básico (andesina ácida a intermediária), de minerais opacos, de biotita e raros de zircão, de apatita e de titanita. Efeitos da saussuritização são marcantes, mais intensas nos núcleos e em cristais precoces, portanto mais cálcicos, com geração de epidoto, sericita (por vezes muscovita), carbonatos e argilominerais que podem, inclusive, migrarem e se concentrarem ao longo dos planos de clivagens do próprio plagioclásio, nas interfaces minerais e em microfissuras de minerais vizinhos, principalmente dos cristais de quartzo. O microfissuramento em cristais de plagioclásio é incipiente, dominantemente intragrãos. Alguns cristais tabulares mais longos exibem efeitos deformacionais como deslizamento ao longo de microplanos (microfalhas) e planos de geminação ondulados a contorcidos.

Os cristais de microclínio da matriz são dominantemente anedrais, com contatos ameboides a interpenetrados, muitas vezes tipicamente intersticiais em relação aos cristais de plagioclásio. Os megacristais, que visualmente apresentam formas retangulares e em alguns casos quadráticas, ao nível microscópico exibem certo zoneamento composicional e bordas irregulares, corroídas, e às vezes de aspecto microgranulado devido à concentração de fino agregado interpenetrado constituído por minúsculos cristais de quartzo, de oligoclásio e de microclínio de cristalização mais tardia. É frequente, nestes casos, a presença de texturas granofíricas em suas interfaces com os demais minerais. A geminação em grade e a Carsbald são mais evidentes nos megacristais e nos cristais da matriz com maiores dimensões. Os megacristais podem conter inclusões de cristais de plagioclásio subédrico, de quartzo, de biotita e de titanita. A sericitização é pouco desenvolvida, pouco mais pronunciada nos megacristais, fato este que facilita a distinção entre cristais de feldspato potássico e de plagioclásio devido ao aspecto mais límpido exibido pelo primeiro. A pertitização é essencialmente dos tipos fios, filmes e filetes, com alguns grãos mostrando fraca transformação para argilominerais. O grau de microfissuramento é baixo, com predomínio do tipo intragrãos com fissuras fechadas e menos comumente abertas e preenchidas por minerais secundários.

O quartzo ocorre tanto em posições intersticiais quanto constituindo cristais isolados ou em agregados monominerálicos ovalados a pouco alongados com forte extinção

ondulante. Os agregados apresentam tamanhos variados, podendo ultrapassar 1,0 cm na maior extensão, provavelmente resultantes do fraturamento de cristais originalmente maiores submetidos a esforços tectônicos em condições dúctil-rúptil. Conforme acima mencionado, apresentam grau de microfissuramento moderado a elevado com microfissuras tanto fechadas quanto abertas dos tipos intragrãos e transgranulares preenchidas por epidoto e carbonatos. Os contatos com outros minerais são interpenetrados no caso dos grãos intersticiais e lobulados a côncavo-convexos em relação aos cristais maiores e nos agregados.

A biotita ocorre predominantemente como agregados lamelares com dimensões submilimétricas a cerca de 3 a 4 mm, com predomínio entre 1 e 2 mm, homogeneamente distribuídas pela rocha. Apresenta pleocroísmo castanho esverdeado, cujos agregados são enriquecidos em microinclusões de opacos disseminados e hidróxido de ferro que se concentram ao longo dos planos de clivagens, microfraturas e nas bordas. Também são frequentes microinclusões de cristais de epidoto (clinozoisita), além de mais raramente titanita, zircão e apatita. A cloritização é discreta. Efeitos deformacionais são mais ou menos evidentes, realçadas pela ocorrência de lamelas sob forma de “fiapos” e/ou desplacadas, contorcidas e com extinção ondulante, além de planos de clivagens abertos e preenchidos por fina massa disseminada de opacos, hidróxido de ferro, epidoto e sericita.

Os demais minerais acessórios são representados pelos opacos, titanita, apatita e zircão que ocorrem predominantemente associados aos agregados de lamelas de biotita. Os opacos, tanto de origem primária quanto derivados de ações deutéricas, apresentam formas arredondadas, irregulares, por vezes esqueléticas, e pontos disseminados. A titanita, relativamente frequente, ocorre em cristais submilimétricos a até 2,0 mm de dimensões com hábitos desde euédrico (losangulares) e subedral a irregulares, por vezes bastante fraturadas. A apatita apresenta formas de bastonetes e pseudohexagonais de dimensões submilimétricas, associadas à biotita ou dispersas pela massa quartzo-feldspática. O zircão constitui minúsculos cristais quase sempre inclusos ou associados às lamelas de biotita, na maioria das vezes identificáveis através dos halos pleocróicos produzidos na biotita.

Dentre os minerais secundários destacam-se os relacionados à saussuritização do plagioclásio como sericita/muscovita, epidoto, carbonatos e argilominerais e os relacionados aos efeitos deutéricos sobre a biotita com a geração de opacos, hidróxidos de ferro, clorita e epidoto.

4.1.3 Intrusivas básicas (GAB)

De acordo com Marques e Ernesto (2004), Piccirillo e Melfi (1988); Almeida et al. (1986), e esta unidade é essencialmente composta pelos equivalentes intrusivos das rochas

vulcânicas, sendo representada por soleiras e diques de diabásio, podendo ocorrer, em algumas localidades, dioritos e microdioritos pórfiros, lamprófiros, andesitos, monzonitos pórfiros e traquiandesitos. Por suas características mineralógicas e texturais, os diabásios são rochas de boa condição geomecânica, mas em geral mais susceptíveis ao intemperismo (FRAZÃO e FRASCÁ, 2002; FRAZÃO, 2007; SQUISATO et al., 2009).

Assim sendo, a caracterização deste material para uso como lastro ferroviário é de extrema importância, uma vez que ele ficará exposto às ações intempéricas, diferentemente da aplicação do agregado em pavimentação asfáltica e concreto hidráulico.

A pedreira estudada está localizada no município de Paulínia/SP e os detalhes da frente de lavra selecionada é mostrada na Figura 18.

Figura 18: (A) Escavação de blocos rochosos de um desmonte recente. (B) Detalhe do maciço rochoso onde foram coletados os blocos de rochas para os ensaios laboratoriais. (C) Bloco de rocha intacta do microgabro coletados na pedreira da região de Paulínia para confecção de corpos de provas cilíndricos para determinação da resistência à compressão uniaxial.

Fonte: Do autor (2021)
Nota: (C) Sacos brancos contendo amostras irregulares de rochas destinadas à britagem laboratorial para obtenção do agregado graúdo requerido na presente pesquisa.

4.1.3.1 Material

Diabásio de granulação média a fina ou microgabro.

4.1.3.2 Aspectos gerais

Rocha de coloração cinza escuro com estrutura isótropa, maciça e compacta. Apresenta aspecto geral homogêneo com textura fanerítica média/fina, fracamente inequigranular, com granulação oscilando entre submilimétrica a aproximadamente 2,5 mm, com predominância entre 0,5 mm e 1,0 mm.

4.1.3.3 Composição mineralógica e detalhes microscópicos

Microscopicamente, a textura é predominantemente subofítica caracterizada por bom entrelaçamento entre os diversos grãos minerais, os quais exibem contatos interpenetrados entre si. Os cristais de plagioclásio ocupam mais de 50% da massa rochosa, sendo, desta forma, responsável pela matriz propriamente dita da rocha. Os minerais máficos, predominantemente representados pelos clinopiroxênios, olivina e opacos, se distribuem de forma mais ou menos homogênea na massa feldspática, onde constituem tanto cristais individualizados quanto agrupados em pequenos agregados. Também são comuns pequenas manchas com texturas granofíricas localizadas intersticialmente aos cristais de plagioclásio. Esses agregados granofíricos apresentam dimensões submilimétricas, sempre de forma intersticial, e são constituídas por complexo intercrescimento de quartzo vermiforme com feldspato alcalino (provavelmente feldspato potássico e/ou albita) resultantes da cristalização final de líquidos residuais. A composição mineralógica do micro-gabro (GAB) é mostrada na Tabela 15.

Tabela 15: Composição mineralógica do microgabro (Intrusivas básicas).

Composição mineralógica	% Modal
Olivina (parcial ou totalmente alterada)	1,5
Clinopiroxênios: augita (25%) / pigeonita (2%)	27,0
Opacos (magnetita / titano-magnetita / hematita / ilmenita)	8,5
Plagioclásio (labradorita)	53,0
Feldspato Alcalino / Quartzo granofíricos	1,7
Apatita	0,3
Titanita	Traço
Minerais secundários: Clorita, clorofeíta, biotita verde, epídoto, anfibólios fibrosos, óxidos/hidróxidos de ferro, sericita, argilo-minerais (celadonita? / nontronita) e carbonatos.	8,0

Fonte: Do autor (2021).

Os cristais de plagioclásio são predominantemente prismáticos alongados com dimensões variadas, de submilimétricos a até 2 mm, na média entre 0,5 mm e 1,0 mm, com característica geminação polissintética, periclíneo e Carsbald. Os cristais com as maiores dimensões são quase sempre fortemente zonados, com núcleos de composição labradorítica que gradam para andesina e que, localmente, podem culminar com delgada borda de oligoclásio, ocasiões em que podem conter pequenas manchas intersticiais granofíricas. Alterações hidrotermais/deutéricas são discretas, caracterizadas por fraca saussuritização (sericita, epídoto, albita e, por vezes, carbonatos) praticamente restritas aos cristais de labradorita mais cálcica e que se manifesta por manchas irregulares, difusas e de aspecto

pulverulento, normalmente concentrado nos núcleos dos cristais maiores. Exibem baixo grau de microfissuramento, com microfissuras descontínuas, do tipo intergranular, e normalmente fechadas.

Os minerais máficos ocorrem tanto como pequenas concentrações de cristais de olivina, clinopiroxênios e opacos, quanto isoladamente na matriz feldspática, neste caso representado essencialmente por clinopiroxênios e opacos. Dentre os clinopiroxênios, a augita é amplamente predominante em relação à pigeonita.

As concentrações/agregados de minerais máficos (olivina; opacos; clinopiroxênios) são relativamente frequentes e aleatoriamente dispersos pela massa rochosa. Apresentam formas/contornos irregulares e que chegam a atingir dimensões ao redor de 5 mm. Esses agregados normalmente contêm cristais de olivina com dimensões de até 2,5 mm associados à augita, pigeonita e opacos, provavelmente originados na fase mais precoce da cristalização, e correspondem às porções das rochas cujos minerais se mostram mais intensamente alterados hidrotermalmente pelos efeitos tardios da cristalização do magma.

Os minerais secundários assim gerados afetam parcialmente os minerais máficos, na maioria das vezes de forma pulverulenta, e estão representados pela clorita (principalmente sobre a olivina), biotita fibrosa com pleocroísmo acastanhado e esverdeado (bastante discreta, ocorre tanto na olivina quanto nos clinopiroxênios), anfibólios fibrosos associados aos clinopiroxênios, clorofeíta, que representaria fino agregado esverdeado e possivelmente composto por clorita, anfibólios fibrosos, biotita esverdeada e argilominerais como celadonita e nontronita (principalmente sobre os clinopiroxênios, mas também em alguns cristais de olivina), opacos secundários e óxidos/hidróxidos de ferro que se concentram nas bordas ou como micro-inclusões e preenchendo microfraturas principalmente associados à olivina e, menos comumente, também aos clinopiroxênios.

A olivina é o mineral mais intensamente alterado, por vezes com cristais totalmente cloritizados e enriquecidos em pontuações de minerais opacos. Também são os mais intensamente microfraturados, com sistema de microfissuras abertas e preenchidas por fina massa de minerais secundários como opacos, clorita, anfibólios fibrosos e alguma argila (celadonita / nontronita).

Os opacos representados pela magnetita, titano-magnetita, hematita e ilmenita ocorrem dispersos pela rocha, preferencialmente associados aos cristais de augita e, especialmente, aos de olivina. Formam cristais com formatos quadráticos a alongados, irregulares e mesmo esqueléticos com dimensões desde submilimétrica a até 1,5 mm, bem como em minúsculos cristais inclusos na olivina e clinopiroxênios.

A apatita é pouco frequente e ocorre como minúsculos cristais prismáticos a sub-hexagonais dispersos pela lâmina. A titanita é rara e ocorre principalmente associada aos clinopiroxênios.

O grau de microfissuramento geral da rocha é baixo, predominantemente do tipo intragrão, inerentes às respectivas naturezas dos minerais constituintes. Assim, são relativamente intensas nos cristais de olivina, baixa a moderada nos clinopiroxênios e baixa no plagioclásio. Os planos de microfraturas dos cristais de olivina são predominantemente abertos e nos clinopiroxênios parcialmente abertos e fechados. Quando abertos são invariavelmente preenchidos por minerais secundários, normalmente salpicados por minúsculos pontos de minerais opacos e por óxidos e hidróxidos de ferro.

4.1.4 Síntese das análises petrográficas

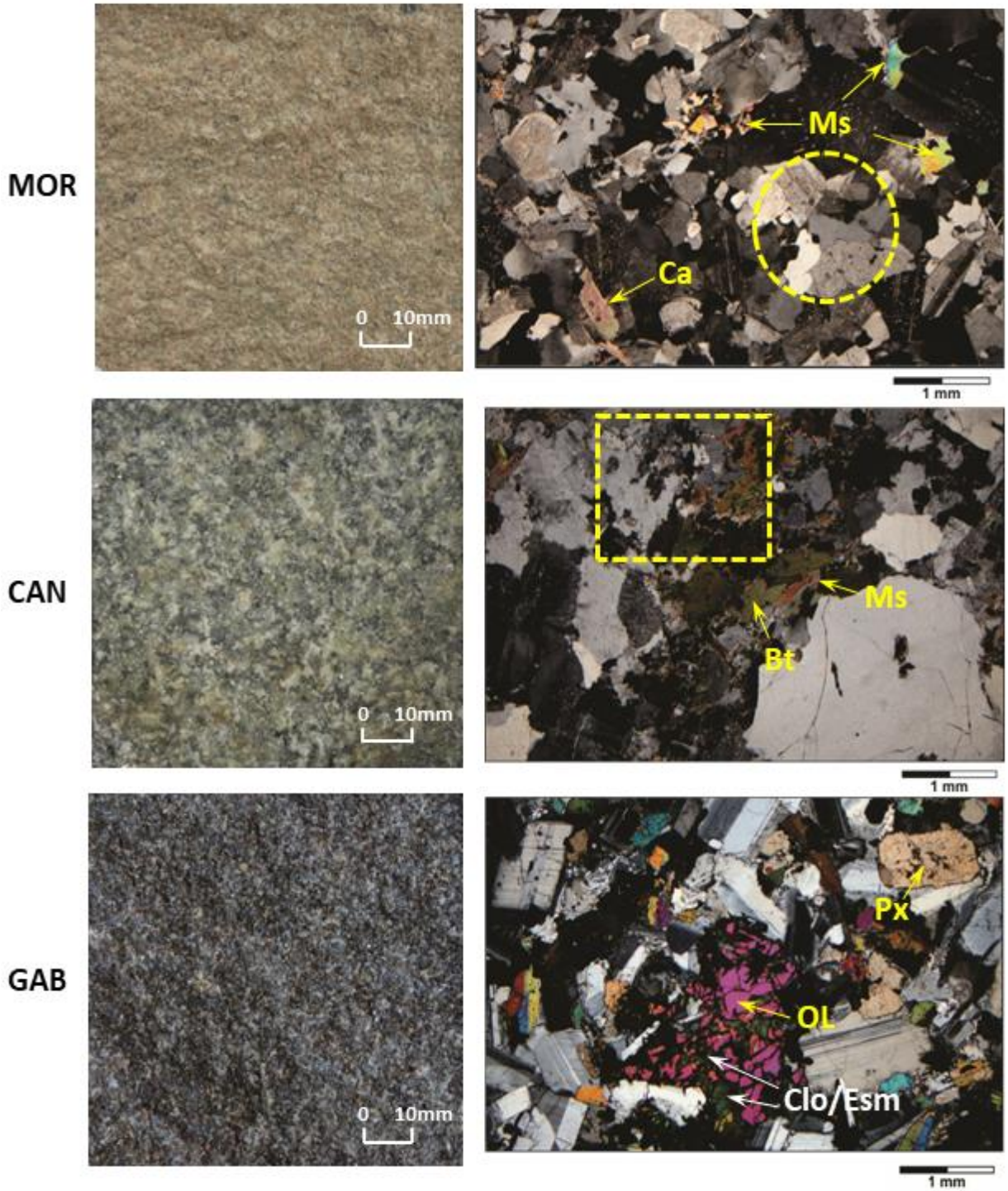
As informações relativas aos graus de microfissuramento e de alteração das rochas são resumidas na Tabela 16 e evidenciadas na Figura 19.

Tabela 16: Análises petrográficas por microscopia óptica

Material	**MOR**		**CAN**		**GAB**	
Textura	Equigranular hipidiomórfica a alotromórfica		Fanerítica a discretamente porfirítica		Subofítica	
Contatos minerais	Contatos interpenetrados		Contatos interpenetrados		Bom entrelaçamento mineral e contatos serrilhados	
Mineralogia	Ortoclásio	44,0%	Plagioclásio	30%	Plagioclásio	53,0%
	Quartzo	31,0%	Quartzo	29%	Augita	27,0%
	Plagioclásio	19,5%	Microclínio	24%	Opacos	8,5%
	Biotita	0,5%	Biotita	8,5%	Ortoclásio	1,7%
	Muscovita	2,0%	-	-	Olivina	1,5%
	Acessórios	0,5%	Acessórios	2,0%	Acessórios	0,3%
	Secundários	<2,0%	Secundários	6,5%	Secundário	8,0%
Microfissuramento	Incipiente (intragrão)		Baixo (intragrão)		Baixo (intragrão)	
	Discreto e fechado (ortoclasio/plagioclásio); fechado (quartzo		Moderado a alto (quartzo); Intensa saussuritização (plagiclásio). baixa sericitização em microclinio		Baixo a moderado (olivina/augita). baixo (plagioclásio)	
Alteração mineral	Sericitização moderada (ortoclasio); fraca cloritização (biotita) e saussuritização (plagioclásio)		Elevada extinção ondulante (quartzo); Intensa saussuritização (plagiclásio). baixa sericitização em microclinio		Moderada à intensa (olivina/augita/opacos) Fraca saussutização (plagioclásio/epidoto)	
Classificação	Álcali-feldspato granito		Monzogranito		Microgabro	

Fonte: Do autor (2021).

Figura 19: Documentação fotográfica da petrografia



Fonte: Do autor (2021).
Nota 1: ESQUERDA: Aspecto macroscópico de superfícies naturais das rochas; DIREITA: Fotomicrografias (nicóis cruzados). Nota 2: Álcali-feldspato granito MOR- observar arranjo equidimensional, alteração incipiente e forte entrelaçamento da matriz quartzo-feldspática (detalhe na circunferência em tracejado). Nota 3: Monzogranito CAN- notar alteração relativamente mais intensa nos cristais de plagioclásio e dos feldspatos alcalinos (exemplo no retângulo em tracejado). Nota 4: Micro-gabro GAB exibindo textura subofítica e minerais secundários (clorita e esmectitas) preenchendo fraturas especialmente nos cristais de olivina. Nota 5: Legenda dos minerais: Px- piroxênio; Ol- olivina; Clo/Esm- agregados de clorita e esmectitas (argilominerais expansivos); Bt- biotita; Ms- Muscovita; Ca- carbonato.

Resumindo as análises petrográficas, os materiais estudados se referem a rochas intrusivas que apresentam aspectos homogêneos, estruturas maciças em geral isotrópicas com texturas faneríticas equigranulares a inequigranulares (discretamente porfiríticas).

Em termos composicionais, trata-se de dois granitoides: o primeiro, designado como Granito Morungaba (MOR), um álcali-feldspato granito de granulação fina e coloração rosa; o segundo, Granito Cantareira (CAN), um monzogranito de granulação grossa, porfirítico e poiquilítico, de cor cinza claro; A outra rocha é um microgabro (GAB) de granulação média a fina, de cor cinza escuro (vide Figura 19).

O grau de microfissuramento dos três materiais é incipiente a baixo, essencialmente intragrão e relativamente mais intenso nos minerais máficos (olivina e clinopiroxênio) do microgabro.

A alteração desta rocha é mais intensa junto às concentrações/agregados dos minerais máficos. Os minerais secundários predominantes ocorrem de forma pulverulenta e coloração esverdeada, representada por clorita, biotita, anfibólio fibroso e clorofeíta, além de argilominerais (celadonita e nontronita) e opacos, sendo mais frequentes nas olivinas, que são os minerais mais intensamente microfraturados.

4.2 ÍNDICES FÍSICOS

Os dados básicos e a determinação dos valores dos índices físicos são apresentados na Tabela 17, e ilustrados na Figura 20, sendo que as informações da análise petrográfica explanada anteriormente, permitem estabelecer algumas correlações com os valores dos índices físicos.

Uma breve comparação entre os materiais estudados indica o microgabro (GAB) como a rocha com valores relativamente mais expressivos de absorção d'água (αa = 0,59%) e porosidade aparente (ηa = 1,73%). No último caso, conforme ilustrado na Figura 20, extrapola o valor máximo de 0,8 % recomendado pela NBR 5564 (ABNT, 2021).

Estes valores maiores de αa e ηa parecem estar ligados à granulação mais grossa da rocha e a uma maior comunicabilidade de sua rede porosa. Eles dependem das condições de alteração mineralógica (especialmente dos plagioclásios) e do padrão de microfissuramento apresentando o predomínio das fissuras intragranulares com algumas transgranulares.

Quanto aos valores de massa específica aparente (ρa) as três rochas atendem aos quesitos da NBR 5564 (ABNT, 2021), que recomenda o valor mínimo de 2.500 kg/m³.

Como esperado, o microgabro foi a rocha com ρa mais elevada (2.940 kg/m³), apresentando o teor de 37% de minerais pesados (augita, opacos e olivina).

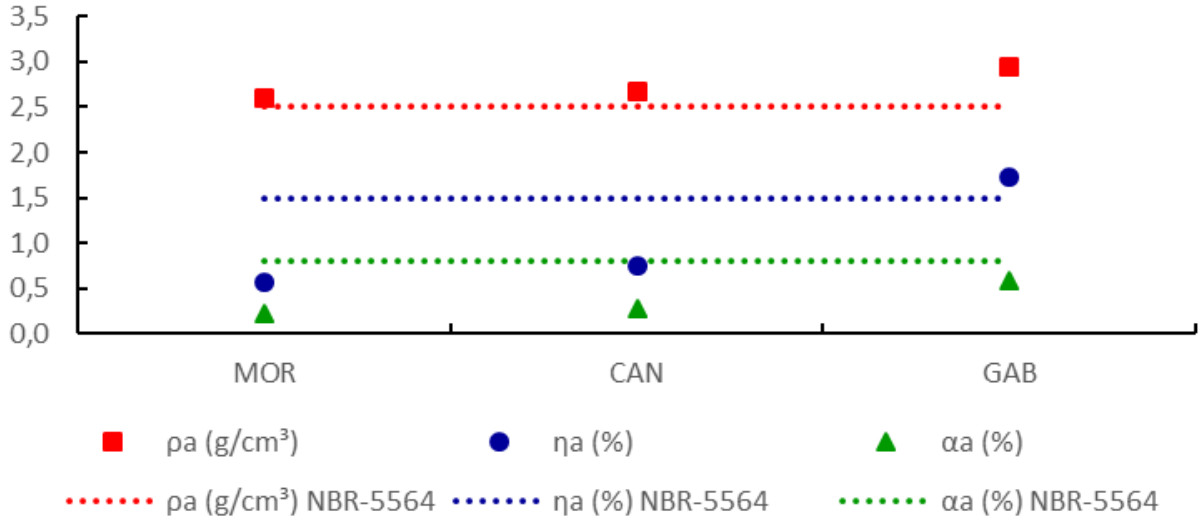
Tabela 17: Massas e resultados dos índices físicos

Material	CP	m_{sec} (g)	m_{sub} (g)	m_{sat} (g)	ρ_a (g/cm³)	αa (%)	η_a (%)
MOR	1	323,03	199,8	323,75	2,606	0,22	0,58
	2	176,81	109,41	177,26	2,606	0,25	0,66
	3	77,60	48,00	77,78	2,606	0,23	0,60
	4	164,26	101,53	164,65	2,602	0,24	0,62
	5	81,58	50,50	81,73	2,612	0,18	0,48
	6	64,09	39,59	64,26	2,598	0,27	0,69
	7	102,86	63,68	103,05	2,613	0,18	0,48
	8	78,93	48,85	79,07	2,612	0,18	0,46
	9	202,26	124,98	202,68	2,603	0,21	0,54
	10	97,56	60,32	97,76	2,606	0,21	0,53
	Média	136,90	84,67	137,20	2,606	0,22	0,57
CAN	1	262,70	165,38	263,25	2,684	0,21	0,56
	2	127,68	80,37	127,97	2,682	0,23	0,61
	3	161,73	101,67	162,11	2,676	0,23	0,63
	4	128,65	80,66	129,22	2,649	0,44	1,17
	5	256,07	160,98	256,64	2,677	0,22	0,60
	6	219,83	138,50	220,51	2,681	0,31	0,83
	7	84,05	52,84	84,41	2,662	0,43	1,14
	8	145,37	91,48	145,75	2,679	0,26	0,70
	9	221,55	139,44	222,01	2,683	0,21	0,56
	10	284,09	178,69	284,88	2,675	0,28	0,74
	Média	189,17	119,00	189,68	2,675	0,28	0,75
GAB	1	253,12	169,06	253,97	2,981	0,34	1,00
	2	221,81	147,27	222,97	2,930	0,52	1,53
	3	170,09	113,04	170,84	2,943	0,44	1,30
	4	201,08	132,60	203,97	2,817	1,44	4,05
	5	198,66	132,61	199,82	2,956	0,58	1,73
	6	179,59	119,72	180,46	2,957	0,48	1,43
	7	198,53	132,35	199,71	2,947	0,59	1,75
	8	158,04	104,94	158,93	2,927	0,56	1,65
	9	245,05	162,79	246,15	2,940	0,45	1,32
	10	149,56	100,45	150,32	2,999	0,51	1,5
	Média	197,55	131,48	198,71	2,940	0,59	1,73

Fonte: Do autor (2021).

Legenda: (MOR) Álcali-feldspato granito. (CAN) Monzogranito Cantareira. (GAB) Microgabro - Intrusivas básicas (CP) Corpo de prova. (m_{sec}) Massa seca. (m_{sub}) Massa submersa. (m_{sat}) Massa saturada. (ρ_a) Massa específica aparente. (αa) Absorção de água. (η_a) Porosidade aparente.

Figura 20: Resultados médios dos ensaios de índices físicos.



Fonte: Do autor (2021).
Nota: As linhas pontilhadas em vermelho, azul e verde indicam, respectivamente, os limites mínimos de massa específica aparente, máximo de porosidade aparente e absorção de água, recomendados pela NBR 5564 (ABNT, 2011).

4.3 FORMA DOS FRAGMENTOS

Os dados básicos das medições e forma dos fragmentos do álcali-feldspato granito (MOR) são apresentados na Tabela 18 e Figura 21. Em média, os fragmentos são lamelares, com a seguinte distribuição: lamelar (76%) e cúbica (24%).

Para o monzogranito Cantareira (CAN), os dados básicos das medições e forma dos fragmentos são apresentados na Tabela 19 e Figura 22. Em média, os fragmentos são cúbicos, com a seguinte distribuição: cúbica (56%), lamelar (32%) e alongada (12%).

Já para o microgabro (GAB) - Intrusivas básicas, os dados das medições e forma dos fragmentos são apresentados na Tabela 20 e Figura 23. Em média, os fragmentos são cúbicos, com a seguinte distribuição: cúbica (60%), lamelar (38%) e alongada (2%).

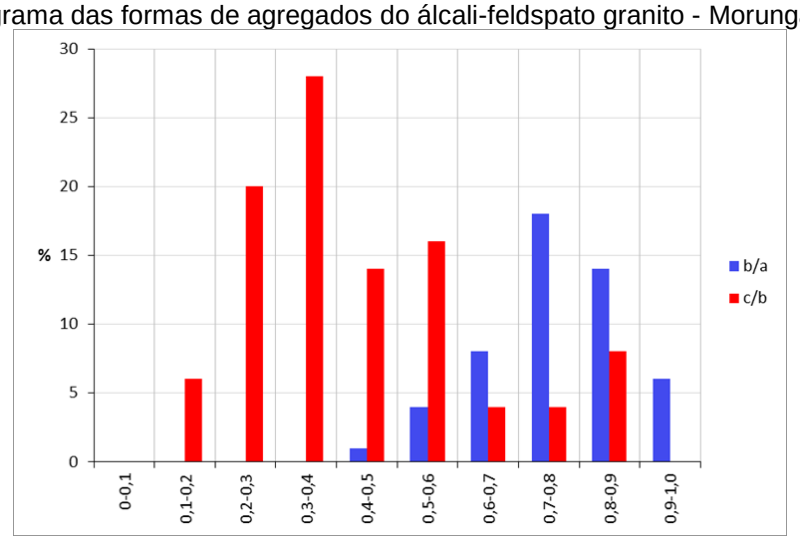
Em termos comparativos, verifica-se que o álcali-feldspato granito (MOR) é a rocha que apresenta o material britado menos cúbico. Trata-se de uma rocha mais resistente e de granulação mais fina entre os tipos estudados, sendo que a disposição e leve orientação das micas favoreceu a obtenção de partículas mais lamelares na britagem laboratorial, cujos procedimentos foram iguais para todos os litotipos.

Tabela 18: Dimensões dos fragmentos do álcali-feldspato granito Morungaba (MOR). Legenda: CP- corpo de prova, “a”- eixo maior, “b”- eixo intermediário; “c”- eixo menor. Forma: L- lamelar, C- cúbica.

CP	a	b	c	b/a	c/b	Forma	CP	a	b	c	b/a	c/b	Forma
	(mm)							(mm)					
1	87,28	63,30	20,44	0,73	0,32	L	26	72,47	30,31	20,94	0,42	0,69	C
2	97,29	62,92	25,88	0,65	0,41	L	27	50,65	40,45	20,80	0,80	0,51	C
3	56,55	54,53	7,20	0,96	0,13	L	28	50,79	33,17	28,36	0,65	0,85	C
4	58,57	41,82	17,43	0,71	0,42	L	29	37,85	23,45	16,85	0,62	0,72	C
5	61,68	52,75	16,64	0,86	0,32	L	30	68,92	45,50	24,90	0,66	0,55	C
6	75,23	59,60	12,72	0,79	0,21	L	31	46,41	26,04	18,20	0,56	0,70	C
7	78,96	56,05	5,63	0,71	0,10	L	32	68,87	54,83	18,64	0,80	0,34	L
8	70,00	59,56	20,85	0,85	0,35	L	33	59,66	53,17	22,00	0,89	0,41	L
9	69,51	54,72	15,47	0,79	0,28	L	34	75,29	58,11	16,47	0,77	0,28	L
10	58,19	41,68	24,11	0,72	0,58	L	35	78,48	44,92	24,19	0,57	0,54	L
11	47,59	27,00	18,38	0,57	0,68	L	36	63,76	48,40	21,77	0,76	0,45	L
12	68,13	64,08	17,76	0,94	0,28	L	37	82,38	60,84	17,17	0,74	0,28	L
13	72,39	60,34	6,34	0,83	0,11	L	38	58,59	44,31	16,67	0,76	0,38	L
14	76,32	65,23	20,90	0,85	0,32	L	39	37,70	31,28	25,34	0,83	0,81	C
15	59,67	56,21	14,61	0,94	0,26	L	40	57,11	46,64	25,84	0,82	0,55	C
16	37,52	31,90	11,35	0,85	0,36	L	41	68,12	44,30	14,29	0,65	0,32	L
17	48,91	29,94	13,36	0,61	0,45	L	42	71,48	66,38	18,43	0,93	0,28	L
18	81,85	54,27	14,75	0,66	0,27	L	43	59,36	53,65	21,17	0,90	0,39	L
19	46,55	37,98	15,58	0,82	0,41	L	44	54,05	27,52	16,17	0,51	0,59	L
20	53,14	42,98	14,04	0,81	0,33	L	45	75,01	48,47	14,51	0,65	0,30	L
21	58,35	41,39	15,09	0,71	0,36	L	46	40,65	34,62	27,98	0,85	0,81	C
22	70,72	52,64	26,60	0,74	0,51	C	47	65,14	45,98	25,67	0,71	0,56	C
23	45,39	32,51	26,45	0,72	0,81	C	48	91,02	65,37	15,85	0,72	0,24	L
24	64,60	52,61	11,01	0,81	0,21	L	49	84,81	60,14	18,50	0,71	0,31	L
25	81,70	60,40	18,77	0,74	0,31	L	50	62,42	61,47	26,28	0,98	0,43	L
							média	64,14	48,11	18,57	**0,75**	**0,42**	**L**

Fonte: Do autor (2021).

Figura 21: Histograma das formas de agregados do álcali-feldspato granito - Morungaba (MOR).



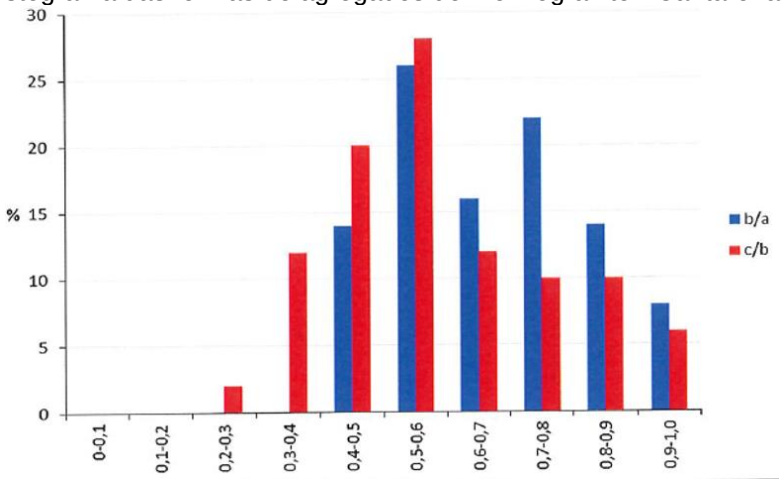
Fonte: Do autor (2021).

Tabela 19: Dimensões dos fragmentos do monzogranito Cantareira (CAN). Legenda: CP- corpo de prova, “a”- eixo maior, “b”- eixo intermediário; “c”- eixo menor. Forma: L- lamelar, C- cúbica, A- alongada.

CP	a	b	c	b/a	c/b	Forma	CP	a	b	c	b/a	c/b	Forma
	(mm)							(mm)					
1	72,38	58,65	18,97	0,81	0,32	L	26	78,59	52,20	40,00	0,66	0,76	C
2	68,76	59,21	30,73	0,86	0,51	C	27	90,99	58,00	24,01	0,63	0,41	L
3	111,95	80,78	28,00	0,72	0,34	L	28	77,59	58,46	22,41	0,75	0,38	L
4	65,74	55,64	25,65	0,84	0,46	L	29	80,58	37,69	21,01	0,46	0,55	A
5	66,43	61,82	31,36	0,93	0,50	C	30	75,39	58,75	29,16	0,77	0,49	C
6	100,66	61,28	23,07	0,60	0,37	L	31	95,68	48,14	28,11	0,50	0,58	C
7	94,07	55,43	26,77	0,58	0,48	L	32	64,14	34,56	22,70	0,53	0,65	C
8	68,33	52,87	26,22	0,77	0,49	C	33	75,99	61,63	28,21	0,81	0,45	L
9	79,38	61,96	27,30	0,78	0,44	L	34	45,72	45,05	39,74	0,98	0,88	C
10	113,18	56,51	28,25	0,49	0,49	C	35	56,58	40,80	28,67	0,72	0,70	C
11	112,92	50,34	29,06	0,44	0,57	A	36	76,29	44,89	19,94	0,58	0,44	L
12	78,02	43,33	21,01	0,55	0,48	C	37	96,42	48,66	30,10	0,50	0,61	C
13	49,74	20,93	20,66	0,42	0,98	A	38	59,13	51,45	28,09	0,87	0,54	C
14	76,12	63,55	18,22	0,83	0,28	L	39	86,36	52,51	20,07	0,60	0,38	L
15	89,99	59,97	48,10	0,66	0,80	C	40	62,73	34,05	29,90	0,54	0,87	C
16	88,68	58,96	33,66	0,66	0,57	C	41	61,62	42,84	23,58	0,69	0,55	C
17	99,68	48,56	34,57	0,48	0,71	A	42	63,63	59,70	41,01	0,93	0,68	C
18	64,34	45,33	17,73	0,70	0,39	L	43	53,07	51,02	50,31	0,96	0,98	C
19	110,18	61,56	28,60	0,55	0,46	L	44	51,94	23,75	11,67	0,45	0,49	L
20	80,11	54,14	42,90	0,67	0,79	C	45	76,18	37,72	31,17	0,49	0,82	C
21	82,94	40,11	29,37	0,48	0,73	A	46	66,28	36,58	33,57	0,55	0,91	C
22	72,83	52,52	33,10	0,72	0,63	C	47	68,94	39,83	16,59	0,57	0,41	L
23	86,33	67,28	38,57	0,77	0,57	C	48	40,00	33,62	19,94	0,84	0,59	C
24	88,96	51,58	32,00	0,57	0,62	C	49	43,63	21,50	18,64	0,49	0,86	A
25	80,94	61,77	32,24	0,76	0,52	C	50	38,31	23,26	15,08	0,60	0,64	C
							média	75,77	49,61	28,00	**0,66**	**0,58**	**C**

Fonte: Do autor (2021).

Figura 22: Histograma das formas de agregados do monzogranito - Cantareira (CAN).



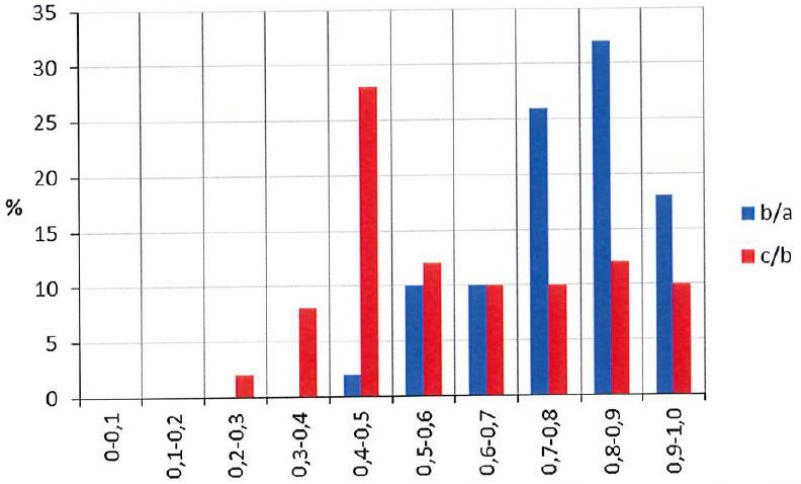
Fonte: Do autor (2021).

Tabela 20: Dimensões dos fragmentos do microgabro – Intrusivas básicas (GAB). LEGENDA: CP- corpo de prova, “a”- eixo maior, “b”- eixo intermediário; “c”- eixo menor. Forma: L- lamelar, C- cúbica, A- alongada.

CP	a	b	c	b/a	c/b	Forma	CP	a	b	c	b/a	c/b	Forma
		(mm)							(mm)				
1	78,69	69,83	24,91	0,89	0,36	L	26	62,32	53,26	43,14	0,85	0,81	C
2	63,79	59,71	27,11	0,94	0,45	L	27	55,80	41,17	35,22	0,74	0,86	C
3	82,87	65,54	27,60	0,79	0,42	L	28	77,62	57,36	52,62	0,74	0,92	C
4	72,98	57,71	27,63	0,79	0,48	L	29	72,58	57,56	27,12	0,79	0,47	L
5	54,12	50,00	29,26	0,92	0,59	C	30	59,10	39,04	20,85	0,66	0,53	C
6	79,17	64,06	29,81	0,81	0,47	L	31	70,43	57,11	38,02	0,81	0,67	C
7	67,27	51,50	24,04	0,77	0,47	L	32	79,56	44,51	43,73	0,56	0,98	C
8	74,22	52,02	39,74	0,70	0,76	C	33	58,64	29,24	16,20	0,50	0,55	C
9	62,71	51,50	24,04	0,82	0,47	L	34	56,04	45,58	18,80	0,81	0,41	L
10	72,98	61,72	28,07	0,85	0,45	L	35	45,04	36,74	18,05	0,82	0,49	L
11	72,73	54,87	23,58	0,75	0,43	L	36	47,91	32,70	20,91	0,68	0,64	C
12	69,55	64,74	30,30	0,93	0,47	L	37	47,76	28,20	18,60	0,59	0,66	C
13	49,32	42,77	21,18	0,87	0,50	C	38	47,52	37,70	28,72	0,79	0,76	C
14	78,04	60,43	18,53	0,77	0,31	L	39	56,78	33,32	26,89	0,59	0,81	C
15	81,20	65,15	26,20	0,80	0,40	L	40	41,10	27,31	13,87	0,66	0,51	C
16	83,50	71,04	25,39	0,85	0,36	L	41	55,07	51,36	30,89	0,93	0,60	C
17	73,32	61,87	38,38	0,84	0,62	C	42	43,92	43,28	29,52	0,99	0,68	C
18	59,27	55,33	43,97	0,93	0,79	C	43	80,66	77,03	42,13	0,95	0,55	C
19	50,60	42,61	32,14	0,84	0,75	C	44	62,61	46,32	30,00	0,74	0,65	C
20	59,01	57,09	27,34	0,97	0,48	L	45	45,31	40,14	31,31	0,89	0,78	C
21	79,76	73,07	21,87	0,92	0,30	L	46	58,15	25,00	21,10	0,43	0,84	A
22	69,98	34,78	28,77	0,50	0,83	C	47	37,87	33,33	22,26	0,88	0,67	C
23	61,36	56,56	55,69	4,98	0,98	C	48	52,04	40,20	26,61	0,77	0,66	C
24	89,77	73,68	18,01	0,82	0,24	L	49	51,31	33,68	30,40	0,66	0,90	C
25	62,32	53,26	43,14	0,85	0,81	C	50	39,00	25,32	25,07	0,65	0,99	C
							média	61,70	49,36	28,70	**0,87**	**0,61**	**C**

Fonte: Do autor (2021).

Figura 23: Histograma das formas de agregados do microgabro (GAB).



Fonte: Do autor (2021)

4.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Inicialmente, são apresentados os resultados pormenorizados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial, abrasão *Los Angeles*, resistência ao choque (Impacto Treton) e ao esmagamento, dos três materiais estudados. Em seguida, uma síntese crítica das propriedades mecânicas.

4.4.1 Resistência da rocha intacta

Com base nas diretrizes do Anexo D da NBR 5564 (ABNT, 2021), as determinações da resistência à compressão uniaxial foram realizadas a partir de corpos de prova cilíndricos com diâmetros próximo a 75 mm, nas condições saturadas e secas. Os resultados dos ensaios válidos dos três materiais estão dispostos na Tabela 21, podendo se observar as excelentes condições das rochas para este tipo de solicitação mecânica. Maiores detalhes serão abordados no item 4.4.2.

Tabela 21: Dados dos ensaios e valores de resistência à compressão uniaxial das rochas

Material	Condição	CP	Área (cm²)	Força de ruptura (kN)	σ (MPa)	$\sigma_{MÉDIO}$ (MPa)
MOR	Saturada	1	41,62	1220,0	293,09	264,82
		2	41,62	797,9	191,69	
		3	41,62	1289,0	309,67	
	Seca	4	41,62	1.275,0	306,31	281,92
		5	41,62	1.192,0	284,80	
		6	41,62	1.060,0	254,66	
CAN	Saturada	1	41,62	770,46	185,12	188,23
		2	41,62	735,21	176,65	
		3	41,62	783,05	188,14	
		4	41,62	783,42	188,23	
		5	41,62	845,87	203,24	
	Seca	7	41,62	766,71	184,22	197,13
		8	41,62	859,14	206,42	
		9	41,62	842,98	202,54	
GAB	Saturada	6	43,59	794,2	182,19	175,87
		7	43,59	703,5	161,38	
		8	43,59	790,6	181,37	
		9	43,59	767,0	175,95	
		10	43,59	777,9	178,45	
	Seca	1	43,59	831,8	190,82	189,05
		2	43,59	799,3	183,36	
		3	43,59	831,1	190,66	
		4	43,59	840,7	192,86	
		5	43,59	817,5	187,54	

Fonte: Do autor (2021).
Legenda: (MOR) Álcali-feldspato granito – Morungaba. (CAN) Monzogranito – Cantareira. (GAB) Microgabro - Intrusivas básicas. (CP) Corpo de prova. ($\sigma/\sigma_{MÉDIO}$) Valores individuais e médio da resistência à compressão uniaxial.

4.4.2 Resistência do agregado graúdo

De forma conjunta, os dados básicos e resultados dos ensaios de abrasão *Los Angeles*, resistências ao choque e esmagamento dos três materiais estudados são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22: Resultados dos ensaios do Abrasão *Los Angeles*, resistência ao choque e esmagamento.

Abrasão *Los Angeles*				
Material	m (g)	m1 (g)	P (%)	Referência
MOR	10.040	8.285	17,5 (+4,9%)	(1) Este estudo
CAN	10.090	7.705	23,6 **(+93,4%)**	
GAB	10.035	8.380	16,5 (+23,1%)	
MOR	10.015	8.394	16,2	(2) Remédio (2017)
CAN	10.031	8.809	12,2	
GAB	10.022	8.677	13,4	
Resistência ao esmagamento				
Material	mi (g)	mf (g)	R (%)	R_m (%)
(1) MOR	2.645,0	2.109,4	20,3	19,5 (+7,7%)
	2.644,8	2.146,5	18,8	
(1) CAN	2.759,9	2.249,3	18,5	19,3 (+10,3%)
	2.791,2	2.230,0	20,1	
(1) GAB	2.897,7	2.366,4	18,3	17,6 **(+44,3%)**
	2.904,0	2.413,3	16,9	
(2) MOR	2.757,6	2.262,4	18,0	18,1
	2.782,2	2275,9	18,2	
(2) CAN	2.829,4	2.346,1	17,7	17,5
	2.863,6	2.348,6	18,0	
(2) GAB	3.105,1	2.725,3	12,2	12,2
	3.064,4	2.692,0	12,2	
Resistência ao choque (índice de tenacidade Treton)				
Material	mi (g)	mf (g)	T (%)	T_m (%)
(1) MOR	140,84	108,95	29,3	26,7 **(+42,8%)**
	156,35	124,21	25,9	
	150,54	120,44	25,0	
(1) CAN	155,90	124,67	25,1	27,5 (+5,4%)
	162,88	134,17	21,4	
	140,97	103,72	35,9	
(1) GAB	166,92	139,44	19,7	19,5 **(+66,7%)**
	163,62	134,61	21,6	
	187,09	159,69	17,2	
(2) MOR	202,22	175,34	15,3	18,7
	198,32	167,82	18,2	
	181,98	148,38	22,6	
(2) CAN	165,11	129,79	27,2	26,1
	165,80	130,83	26,7	
	165,13	132,84	24,3	
(2) GAB	207,21	184,35	12,4	11,7
	235,45	210,84	11,7	
	222,23	200,04	11,1	

Fonte: Do autor (2021).
Legenda: (MOR) Álcali-feldspato granito - Morungaba. (CAN) Monzogranito – Cantareira. (GAB) Microgabro - Intrusivas básicas. (m ou mi) massa inicial. (m1 ou mf) massa final dos ensaios. Notar: Destaque entre parênteses e em vermelho, as diferenças verificadas neste estudo (1) e em Remédio (2017) (2).

Como pode ser percebido, na Tabela 22 foram comparados os valores médios de abrasão *Los Angeles* e das resistências ao esmagamento e ao choque (índice de tenacidade Treton) obtidos no presente estudo em relação aos mesmos experimentos e amostras coletadas nas mesmas jazidas no decorrer do mestrado de Remédio (2017).

Levando-se em conta que os experimentos foram realizados em condições iguais quanto aos procedimentos metodológicos baseados em normas técnicas específicas, aos equipamentos e ao pessoal técnico envolvidos, uma rápida avaliação das diferenças destacadas em vermelho na tabela acima referida é um indicativo claro do que deve ser evitado em termos de considerar um ensaio pontual como representativo de uma jazida inteira.

Com uma defasagem estimada entre 3 e 4 anos e no tipo de amostragem (diretamente nas pilhas de britagem ou coleta de material para produção de brita em laboratório), aparentemente as amostras utilizadas na presente pesquisa constituem trechos dos maciços escavados com qualidade pouco ou relativamente inferior em comparação ao que estava sendo desmontado e beneficiado quando do desenvolvimento dos estudos de Remédio (2017).

Em se tratando das perdas de massa analisadas nos ensaios, observa-se algumas situações peculiares. No ensaio de abrasão *Los Angeles*, a diferença mais significativa (quase o dobro; + 93,4 %) verifica-se na amostra do monzogranito Cantareira (CAN), cuja variação da perda por abrasão “P” de 12,2 % para 23,6 % pode envolver aspectos texturais ou variações faciológicas deste granito inequigranular (porfirítico) ou mesmo envolver um domínio geológico-estrutural da pedreira mais tectonizado, com presença mais marcante de descontinuidades pouco espaçadas (como mostrado previamente no item 4.1.2; Figura 17.

De certo modo, situações parecidas também se observam nos valores das resistências ao esmagamento do microgabro (+44,3% de 12,2 para 17,6%) especialmente nos ensaios de tenacidade Treton do álcali-feldspato granito (MOR) (+42,8 % de 18,7 para 26,7%) que neste caso, excede o limite máximo recomendado na NBR 5564 (ABNT, 2021) e do microgabro (+66,7% de 11,7 para 19,5%).

Uma síntese dos resultados obtidos na presente campanha de investigação, bem como algumas discussões mais específicas sobre os ensaios de esmagamento e de choque (tenacidade Treton) são apresentados no item 4.4.3, a seguir.

4.4.3 Síntese das propriedades mecânicas

No tocante à resistência à compressão uniaxial (*R)*, tanto sob condições secas quanto saturadas em água, todas as rochas apresentaram valores que superam com boa margem os 100 MPa requeridos pela NBR 5564 (ABNT, 2021) para uso em lastro ferroviário.

Apresentam resistências muito altas (superiores a 170 MPa) a extremamente alta

(superior a 260 MPa) no caso do álcali-feldspato granito Morungaba (MOR), rocha de estrutura maciça, homogênea, compacta e de granulação fina.

Observa-se ainda, que os valores de σ_{sat} diminuem para as três rochas estudadas, apresentando índices (*R*) que variam de 95,2% (CAN) a 93,0% (GAB), indicando, respectivamente, um decaimento da resistência mecânica da ordem de 4,8% a 7,0% (Tabela 23). O decaimento levemente mais pronunciado é do microgabro GAB e se relaciona, em grande parte, aos seus maiores valores de porosidade, absorção d'água, condições de microfissuramento e da alteração mineral que, conjuntamente, são responsáveis por conduzirem ao enfraquecimento relativo da rocha.

Table 23: Síntese dos valores médios nas propriedades físico-mecânicas

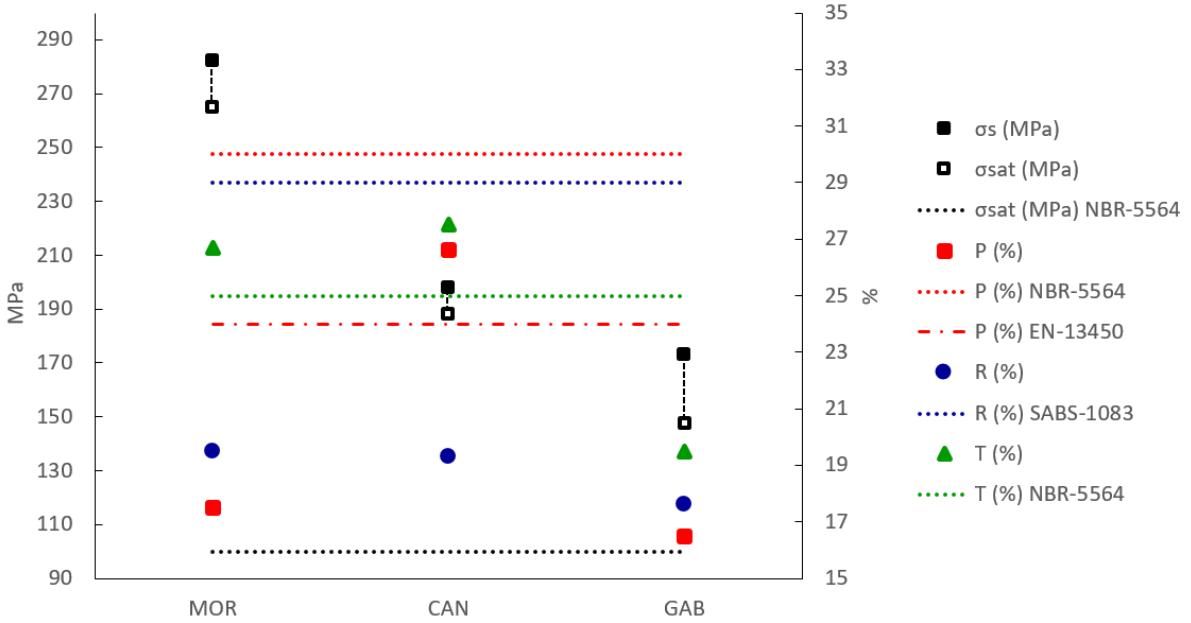
Propriedades	Recomendação	MOR	CAN	GAB
ρa (kg/m³)	2.500 (Min.) [(1)]	2.600	2.670	2.940
ηa (%)	1,5 (Max.) [(1)]	0,57	0,75	1,73
αa (%)	0,8 (Max.) [(1)]	0,22	0,28	0,59
σ_s (MPa)	n.e.	281,92	197,73	189,05
σ_{sat} (MPa)	100 (Min.) [(1)]	264,82	188,28	175,87
R (%)	n.e.	93,9	95,2	93,0
P (%)	30 (Max.) [(1)]; 6 a 24 [(2)]	17,5	23,6	16,5
R (%)	29 (Max.) [(3)]	19,5	19,3	17,6
T (%)	25 (Max.) [(1)]	26,7	27,5	19,5

Fonte: Do autor (2021).
Legenda: (*ρa*) Massa específica aparente. (*ηa*) Porosidade aparente. (*αa*) Absorção de água. (σs e σsat) Resistência à compressão uniaxial nas condições seca e saturada, respectivamente. (*R*) Coeficiente de enfraquecimento hidráulico (Mesquita, 2002; Mattos et al., 2013). (P) Perda por abrasão *Los Angeles*. (R) Resistência ao esmagamento. (T) Índice de tenacidade Treton. [(1)] NBR 5564 (ABNT, 2021). [(2)] EN 13450 (DIN, 2013). [(3)] SABS 1083 (2014). (n.e.) Não especificado.

Ainda na Tabela 23 e Figura 24 são apresentados os resultados médios de todas as propriedades mecânicas das rochas estudadas. Levando-se em conta os dados obtidos no presente estudo, pode ser verificado que o álcali-feldspato granito (MOR) e o monzogranito (CAN) extrapolam o requisito de resistência ao impacto Treton de 25% recomendado pela NBR 5564 (ABNT, 2021).

Todavia, considerando os ensaios de abrasão *Los Angeles* e de resistência ao esmagamento serem os mais representativos e realizados com amostras de volumes maiores, as três rochas estudadas atendem aos requisitos normativos, incluindo os limites mais conservadores da norma EN13450 (DIN, 2013) que especifica uma perda por abrasão *Los Angeles* máxima de 24% para trens de passageiros, índice mais bem relacionado ao presente estudo.

Figure 24: Resultados dos ensaios mecânicos.



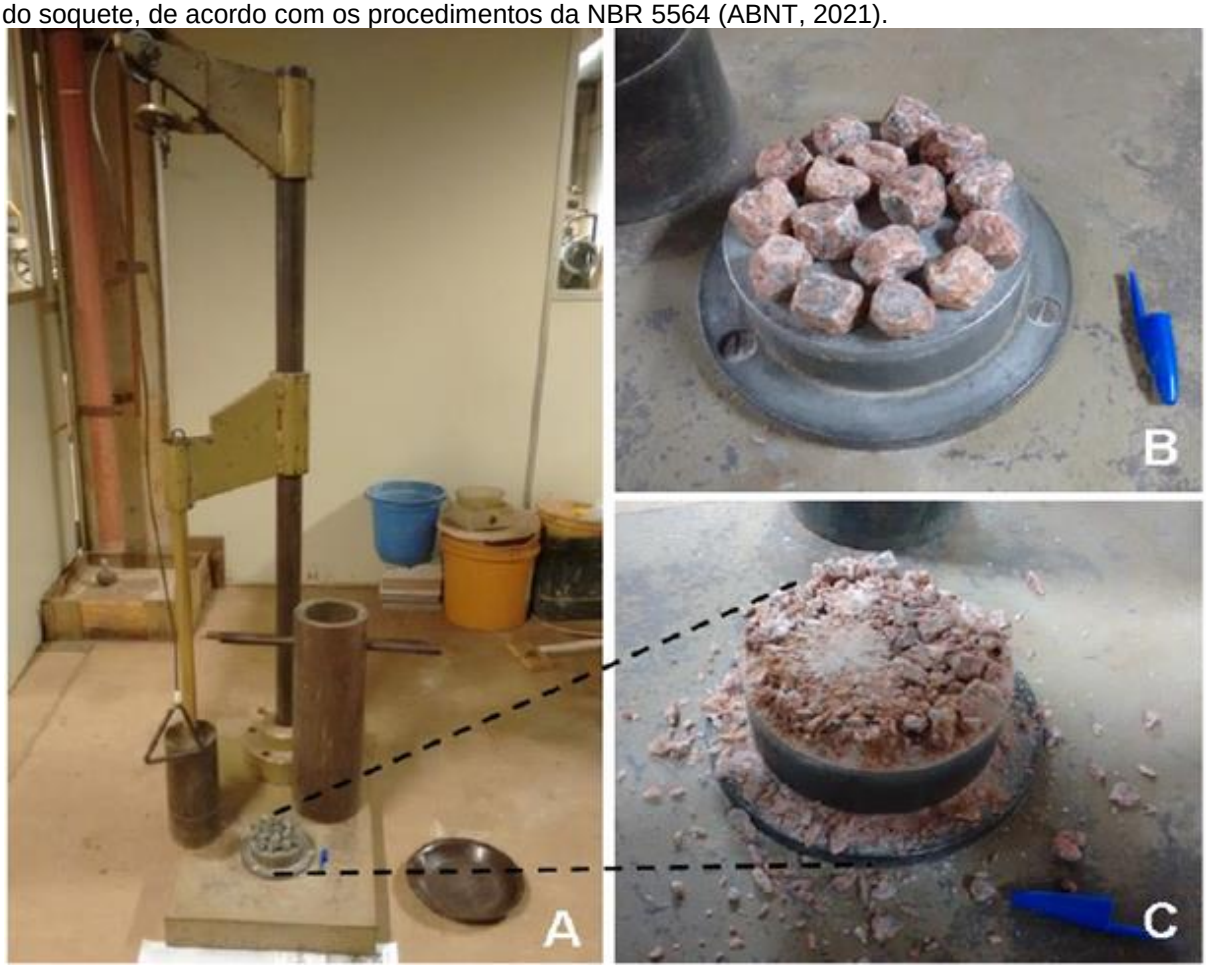
Fonte: Do autor (2021).
Nota: As linhas pontilhadas (ou tracejadas) em preto, vermelho, azul e verde indicam os limites mínimos da resistência à compressão uniaxial; máximos da abrasão *Los Angeles*; resistências ao esmagamento e ao choque (índice de tenacidade Treton), respectivamente, recomendados pelas normas NBR 5564 (ABNT, 2021), EN 13450 (DIN, 2013) e SABS 1083 (2014).

Quanto ao Impacto Treton, uma limitação deste ensaio se refere à preparação "artesanal" para retirar as arestas e evitar eixos alongados, para se aproximar da forma equidimensional e se adequar à graduação de ensaio (12,5 a 9,5mm). Pequenas diferenças na forma dos fragmentos que compõem a amostra padrão podem fazer com que o impacto do soquete do ensaio seja, mesmo que parcialmente, absorvido por fragmentos pouco mais salientes (Figura 25). Ou seja, pode não retratar fielmente a tenacidade à fratura do material ensaiado. Uma ilustração esquemática deste ensaio é apresentada a seguir.

Neste sentido, torna-se oportuno mencionar um ensaio contemplado na EN 13450 (DIN, 2013) para se avaliar a resistência mecânica de agregados pétreos para lastro em relação ao impacto.

A referida norma descreve as condições amostrais e de realização do ensaio *Impact Fragmentation* (IF): cerca de 3kg de fragmentos entre as frações 40 e 31,5mm são submetidos a 20 golpes em um aparato estimado em mais de 500 kg algo similar ao aparato do Treton nacional, mas com dimensionamento obviamente maior. Trata-se de um equipamento inexistente no Brasil.

Figura 25: (A) Equipamento Treton utilizado na determinação da resistência ao impacto do sienogranito MOR; (B, C). Detalhes exibindo, respectivamente, conjunto de fragmentos antes e depois dos impactos do soquete, de acordo com os procedimentos da NBR 5564 (ABNT, 2021).



Fonte: Do autor (2021).

Outras referências internacionais reforçam a necessidade de se utilizar a graduação efetivamente em uso no lastro para especificar rochas para esta finalidade. Em outras palavras, o “efeito escala” ganha relevância onde aspectos texturais da rocha devem ser estudados nas dimensões efetivas de aplicação visando melhor conhecer as solicitações mecânicas em escala real de serviço.

Tais aspectos foram temas de doutorados na Inglaterra (Lim, 2004) e Áustria (Bach, 2013) que, resumidamente, mostraram que os índices de quebra (fraturamento) dos fragmentos se relacionam muito mal com os do teste de esmagamento convencional (ou seja, com partículas pequenas). Em contrapartida, os melhores resultados foram obtidos nos ensaios do *Aggregate Crushing Value Test* (ACV), realizados em aparatos maiores.

Deve ser destacado que a resistência ao esmagamento de agregados graúdos é uma outra propriedade mecânica importante em termos das solicitações reais de campo impostas ao lastro em uma ferrovia em serviço. Provavelmente por especificar partículas com dimensões entre 12,5mm - 9,5mm, fora da especificação granulométrica para lastro.

A NBR 9938 (ABNT, 2013) ainda não contempla as normativas para lastro no Brasil, sendo necessário um equipamento de maior porte para a realização do ensaio.

Trata-se de informações oportunas que abrem perspectivas para a continuidade de pesquisas com equipamentos mais robustos de modo a se estabelecer parâmetros mais efetivos das rochas brasileiras a serem utilizadas como lastro de ferrovias convencionais ou mesmo para transporte de passageiros.

Finalmente, cabe mencionar que os resultados dos ensaios de desgaste Micro-Deval (MD) e *Slake durability Index* (Id), não convencionais na normativa brasileira em estudos de agregados e que foram utilizados como referência da degradação mecânica nos ensaios de alterabilidade, são discutidos conjuntamente no item 4.5 a seguir.

4.5 ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA

Os ensaios de alteração acelerada foram realizados levando-se em conta a exequibilidade dos experimentos e para verificar também a sua adequação em testar condições laboratoriais que procuram retratar as condições dos materiais pétreos estudados em serviço.

4.5.1. Saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa

Embora as diferenças texturais entre os dois granitóides (MOR e CAN) sejam pronunciadas, não foram suficientes para se obter resultados significativos nas perdas de massa. Também os baixos graus de alterações apresentados por estas rochas contribuiu para a pequena degradação laboratorial observada, apresentando valores médios de perdas de massa de 0,53% e 0,47%, respectivamente.

Em relação ao microgabro (GAB), com perda de massa ligeiramente maior (0,67%), esperava-se um efeito maior da cristalização do sulfato de sódio no interior da rocha ao longo dos ensaios de sanidade, por apresentar uma porosidade (1,73%) acima da especificação da NBR 5564 (ABNT, 2021), uma vez que ela possui granulação fina a média e textura subofítica.

Em termos composicionais, o mineral mais intensamente alterado por cloritização é a olivina que também se apresenta como o mineral mais intensamente microfraturado, com preenchimento de minerais secundários que correspondem a 8% do total da rocha, dentre eles opacos, clorita, anfibólios fibrosos e argilas (celadonita e nontronita).

Isto acarretaria maior fissuramento dos materiais submetidos à ciclagem, o que não ocorreu, possivelmente pelo padrão de microfissuramento descontínuo e intragrão como mostrado nas análises petrográficas.

Quando as amostras rochosas foram submetidas a ciclagens de sanidade e conjugado com o ensaio MD, os resultados da degradação supreendentemente se apresentaram menores quando comparados às rochas sãs (Tabela 24), com exceção ao granitóide (CAN) que mostrou um aumento de apenas de 1% do seu valor.

A baixa degradação das rochas por alteração acelerada com Na_2SO_4, se deve ao fato de que os ciclos de tensão de tração, exercida pela cristalização e dilatação dos sais nos vazios das rochas (poros e fissuras), não foram suficientes para provocar fragmentações significativas durante o ensaio Micro-Deval.

Tabela 24: Resultados dos ensaios Micro-Deval com rochas sãs e degradadas pela ciclagem com sulfato de sódio.

Material	Condição da rocha	M_i (g)	M_f (g)	M_R (g)	MD (%)	MD_R (%)
MOR	Sã	1.501,51	1.437.21	1.331,41	4,3	88,7
	Degradada	1.492,45	1.429.59	1.326,47	4,2	88,9
CAN	Sã	1.501,36	1.391,95	1.211,82	7,3	80,7
	Degradada	1.493,49	1.373.94	1.170,41	8,0	78,4
GAB	Sã	1.501,39	1.347.16	1.188,15	10,3	79,1
	Degradada	1.490,46	1.348.39	1.174,17	9,5	78,8

Fonte: Do autor (2021).
Legenda: (M_i) Massa inicial. (M_f) Massa final (retida na peneira 1,19mm). (M_R) Soma das massas retidas na peneira da menor fração da graduação de teste (9,5mm).

4.5.2. Saturação em água e etilenoglicol com secagem em estufa

A exemplo do verificado nos ensaios de sanidade com sulfato de sódio, nos trinta ciclos de saturação em água e secagem em estufa das amostras, também ocorreram apenas fragmentações incipientes e quase que nulas nas três amostras estudadas. Em termos quantitativos, o maior valor de perda de massa foi de 0,59%, verificado no microgabro (GAB) (Tabela 25).

Como descrito previamente, a análise petrográfica do microgabro indicou nas microfissuras a ocorrência de argilas expansivas (celadonita e nontronita) dentre os minerais secundários que, na presença de água, produzem tensões internas na rocha levando à sua degradação.

Isto motivou a realização de ensaios de ciclagem com etilenoglicol, um composto orgânico de fácil penetração nas micro descontinuidades da rocha, que por forças expansivas levam à sua fragmentação.

Utilizando frações granulométricas entre 19,00 e 9,52 mm, os ensaios comparativos com etilenoglicol indicaram as seguintes perdas de massa: 0,39% (MOR); 0,69% (CAN) e um

valor expressivo de 41% para o (GAB), com notáveis evidências de danos (fissuramento, rachadura, lasqueamento e fragmentação) nas amostras desta última rocha (Figura 26 B/C).

Tabela 25: Resultados dos ensaios de saturação em água e secagem em estufa.

Material	Mi (g)	M_{10} (g)	PM_{10} (%)	M_{20} (%)	WL_{20} (%)	M_{30} (g)	WL_{30} (%)
MOR	1.687,57	1.687,35	0,01	1.687,19	0,02	1.687,06	0,03
CAN	1.681,01	1.680,23	0,05	1.679,18	0,11	1.678,47	0,15
GAB	1.690,34	1.687,38	0,18	1.683,42	0,41	1.680,45	0,59

Fonte: Do autor (2021).
Legenda: (MOR) Álcali-feldspato granito – Morungaba. (CAN) Monzogranito – Cantareira. (GAB) Microgabro - Intrusivas básicas. (Mi- massa inicial, M_{10} a M_{30}- massa final depois dos ciclos 10, 20 e 30). (PM_{10} a PM_{30}- perda de massa depois dos ciclos 10, 20 e 30) NBR 12696 (ABNT, 1992).

Figura 26: (A) Aspecto das partículas do microgabro. Em (B e C) depois dos testes com saturação em etilenoglicol e secagem em estufa, mostrando rachaduras e fragmentação intensa, respectivamente.

Fonte: Do autor (2021).

Levando-se em conta a quantidade de material disponível dos materiais degradados pelo etilenoglicol, optou-se pela realização de ensaios por *Slake Durability Index* (SDI) para quantificar a degradação mecânica dos materiais saturados, tanto em água como em etilenoglicol, comparando-se a amostras das rochas sãs como referência.

Os dados da Tabela 26 confirmam a excelente condição mecânica e baixa alterabilidade dos granitóides, sempre com valores de Id muito altos (> 98,6%) e amostras do tipo I em todas as condições de ensaios. No caso do microgabro (GAB), a resistência é relativamente menor nas solicitações de ensaio: tanto na rocha sã como na amostra degradada água-estufa, os valores de Id são altos (> 98%) mas em especial, na amostra degradada no etilenoglicol o valor do Id5 é de 84,3% (médio), sendo o único caso dos ensaios onde as amostras são classificadas como do tipo II (fragmentos maiores misturados com bastante material mais fino), como mostrado na Figura 27.

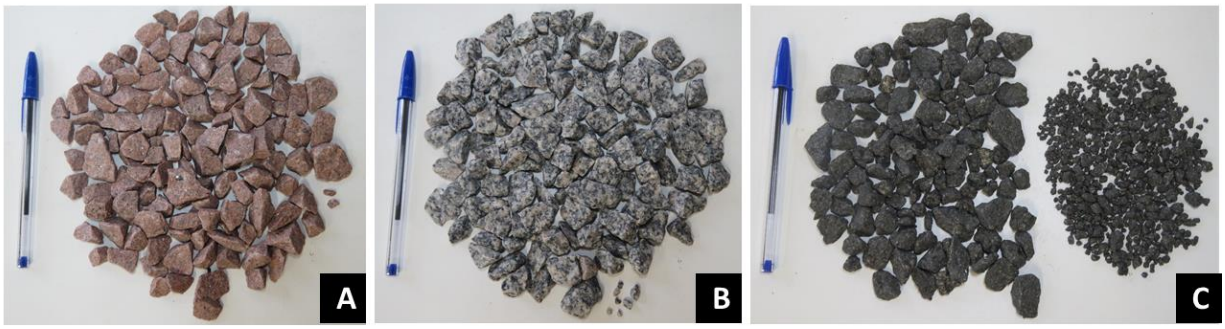
Tabela 26: Resultados dos ensaios *Slake durability index* (Id) em amostras de rochas sã e degradadas por saturação em água ou etilenoglicol e secagem em estufa do álcali-feldspato granito Morungaba (MOR), monzogranito Cantareira (CAN) e microgabro GAB (Intrusivas básicas).

Álcali-feldspato granito Morungaba (MOR) [(A)]									
Id[a]	Rocha sã			Água-estufa			Etilenoglicol-estufa		
	Mi (g)	Mf (g)	% Classe	Mi (g)	Mf (g)	% Classe	Mi (g)	Mf (g)	% Classe
1	462,65	462,64	100,0	467,99	465,20	99,4	466,79	465,70	99,8
2		461,89	99,8		464,10	99,2		465,30	99,7
3		461,32	99,7		463,99	99,1		464,55	99,5
4		461,11	99,7		463,80	99,1		464,00	99,4
5		460,60	99,6		463,33	99,0		463,31	99,3
Monzogranito Cantareira (CAN) [(B)]									
Id[b]	Rocha sã			Água-estufa			Etilenoglicol-estufa		
	Mi (g)	Mf (g)	% Classe	Mi (g)	Mf (g)	% Classe	Mi (g)	Mf (g)	% Classe
1	460,72	460,56	100,0	467,69	464,37	99,3	468,14	466,09	99,6
2		459,24	99,7		463,66	99,1		464,40	99,2
3		458,77	99,6		462,59	98,9		463,49	99,0
4		458,50	99,5		462,41	98,9		462,17	98,7
5		457,84	99,4		461,10	98,6		461,72	98,6
Microgabro GAB (Intrusivas Básicas)									
Id	Rocha sã			Água-estufa			Etilenoglicol-estufa		
	Mi (g)	Mf (g)	% Classe	Mi (g)	Mf (g)	% Classe	Mi (g)	Mf (g)	% Classe
1	453,39	453,33	100,0 MA(I)	462,13	454,90	98,4 MA(I)	462,13	416,76	90,2 M-A(II)
2		450,45	99,4 MA(I)		454,50	98,4 MA(I)		404,74	87,6 M-A(II)
3		447,75	98,8 MA(I)		453,10	98,0 A(I)		398,38	86,2 M-A(II)
4		444,68	98,1 MA(I)		451,49	97,7 A(I)		392,84	85,0 M(II)
5		443,24	97,8 A(I)		450,19	97,4 A(I)		389,69	84,3 M(II)

Fonte: Do autor (2021).

Nota 1: (M_i) Massa inicial. (M_f) Massa final - retida na peneira 2,0mm. Classes de durabilidade por (Gamble, 1971): MA- muito alto. Tipos de fragmentos retidos no tambor de teste (I), norma D4644 (ASTM, 2016). [(A) (B)] MA (I): classes obtidas em todos os testes MOR e CAN. Nota 2: (M_i) Massa inicial. (M_f) Massa final - retida na peneira 2,0mm. Classes de durabilidade por (Gamble, 1971): MA- muito alto, A- alto, M-AM médio à alto e M- médio, (I) e (II): tipos de fragmentos retidos nos tambores de teste, norma D4644 (ASTM, 2016).

Figura 27: Aspecto visual das amostras degradadas pelo etilenoglicol e posterior realização dos ensaios *Slake durability index* (Id): (A, B) fragmentos tipo I do álcali-feldspato granito MOR e do monzogranito CAN, respectivamente; (C) fragmentos tipo II do microgabro GAB.



Fonte: Do autor (2021).

4.5.3. Relações entre petrografia e ensaios de alterabilidade

De modo geral, as informações e evidências apresentadas pelos três tipos de ensaios de alterabilidade podem ser corroboradas pelas seguintes características mineralógicas das três rochas estudadas, em parte já discutidas por Santos et al. (2019 e 2021):

a) O álcali-feldspato granito Morungaba (MOR) apresenta fraturas contínuas em duas diferentes orientações preenchidas por fina massa de minerais secundários (muscovita, carbonatos, argilominerais, dentre outros). O microfissuramento dos cristais de quartzo que correspondem a 31% dos minerais constituintes são raros e fechados. Estas características refletem no menor coeficiente MD (4,2%) da rocha quando comparada as outras duas estudadas. Observa-se também menor quantidade de material fragmentado quando utilizado o índice MDR (88,67%). Este coeficiente representa, portanto, maior resistência da rocha na produção de partículas retidas na peneira 9,50 mm. Os aspectos petrográficos conduzem também aos menores valores de perdas de massa verificados nos ensaios água-estufa e etilenoglicol-estufa;

b) Para o monzogranito Cantareira (CAN), a média dos coeficientes MD (7,3%) e MDR (80,7%) são intermediárias em relação às outras duas rochas MOR e GAB não cicladas com solução de sulfato de sódio, comportamento similar verificado nos outros dois ensaios de alterabilidade. O efeito da degradação por desgaste abrasivo pode ser explicado devido à sua textura fanerítica discretamente porfirítica, caracterizada por megacristais de microclínio. Microscopicamente os cristais de quartzo correspondem a 29% do total da rocha e possuem elevado grau de microfissuramento, preenchido por minerais secundários (epidoto e carbonatos). O estudo petrográfico mostra também uma recristalização evidenciada pela forte extinção ondulante dos cristais de quartzo, porque foram submetidos a condições de esforços tectônicos do tipo dúctil-rúptil;

c) O micro-gabro GAB (Intrusivas básicas) é constituído por 27% de augita e 8% de minerais secundários (óxidos e hidróxidos de ferro e argilominerais do tipo celadonita e nontronita). Estes minerais possuem resistências abrasivas inferiores e consequentemente, refletem na sua menor resistência, principalmente quando comparados às rochas graníticas onde a percentagem de cristais de quartzo ultrapassam em 20%, resultando assim, na maior média do coeficiente MD (10,3%) e MDR (79,1%) das rochas estudadas. Tendências similares verificadas nos ensaios água-estufa e etilenoglicol-estufa, onde a presença mesmo

subordinada de minerais de alteração expansivos levam à degradação e fragmentação muito intensas das amostras do microgabro.

4.5.4. Ensaio de intemperismo artificial acelerado em câmara UV – *Weather-Ometer*

Do total programado de 3.000 horas de ciclagens de amostras do álcali-feldspato granito (MOR) e do microgabro (GAB) utilizando uma câmara de envelhecimento acelerado por UV, foram realizadas apenas 1.000 horas de degradação em amostras irregulares (MOR) e alguns corpos de provas cilíndricos de ambas as rochas. O não atingimento do objetivo de ciclagens de 3.000 horas foi devido sobretudo a alguns problemas técnicos verificados no equipamento *Weather-Ometer* e especialmente, às restrições impostas pela pandemia do Covid-19.

Mesmo assim, foi possível obter importantes resultados sobre a alterabilidade destas rochas em ensaio com condições semelhantes às que ocorrem em clima tropical.

Após a ciclagem de 1.000 horas de intemperismo acelerado com intercalações de 4 horas de condensação e 4 horas de emissão de raios UV, tais amostras foram retiradas cuidadosamente das telas e demarcadas para uma melhor análise comparativa das degradações verificadas de forma qualitativa, tanto pelas inspeções tácteis visais quanto pelas informações advindas da espectrometria de massa.

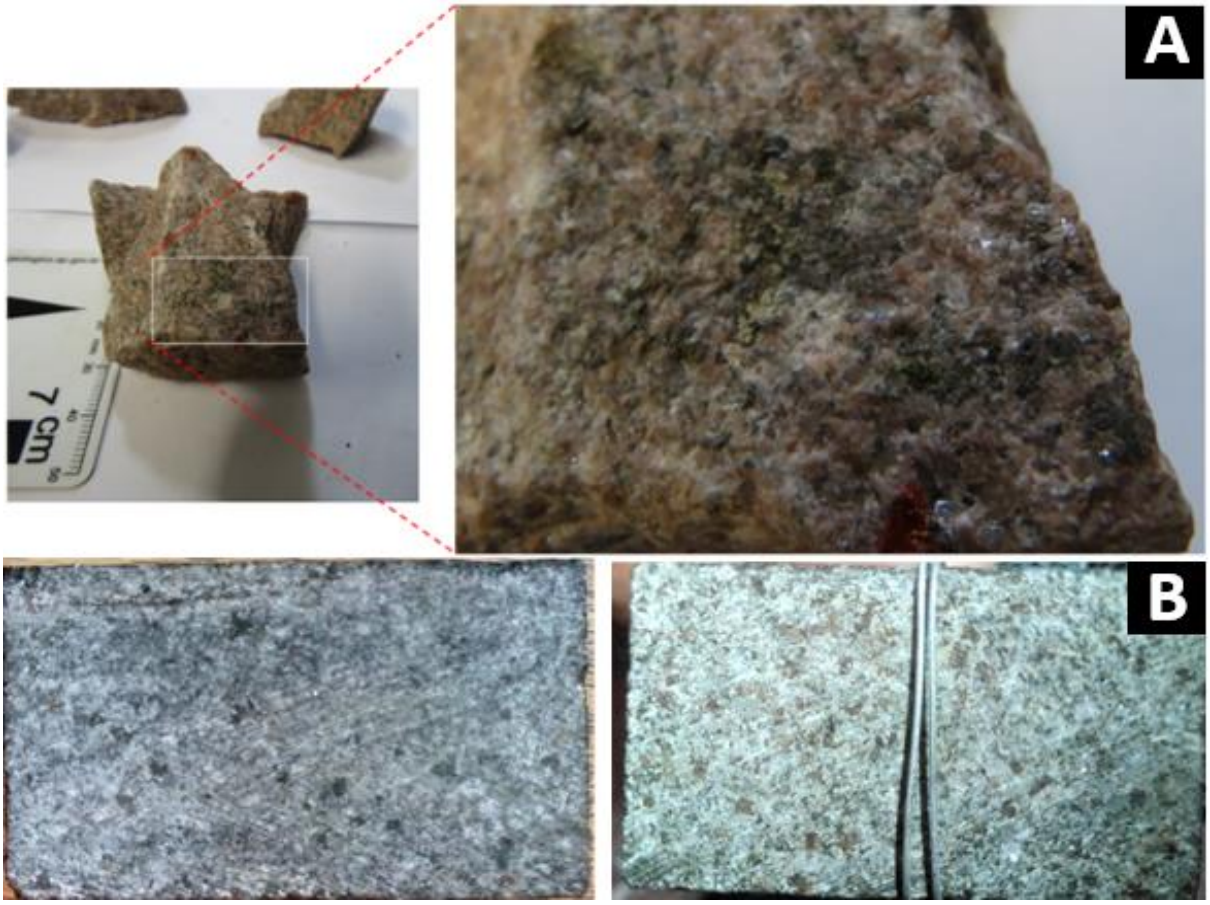
Em amostras do tipo (MOR), notadamente nas faces dos CPs expostas à radiação UV, verificou-se uma diminuição do brilho dos minerais e o surgimento de uma tonalidade esverdeada em porções de maior concentração de minerais máficos (biotitas) e preliminarmente, alteração pouco mais pronunciada nos feldspatos esbranquiçados, conferindo nestes locais um aspecto de sujidade (pó) em torno dos minerais, conforme verificado em algumas ocasiões (Figura 28A). Pirita ocorre subordinadamente no álcali-feldspato granito (MOR) e após a ciclagem de mil horas, observou-se em torno do mineral evidências de oxidação, com colorações avermelhadas.

Quanto às amostras do microgabro (GAB), verificou-se que a alteração se mostrou relativamente mais pronunciada, com perda expressiva do brilho dos minerais e surgimento de uma coloração marrom médio com tonalidades esverdeadas (provável efeito da cloritização dos minerais máficos) quando comparada, em especial, à amostra espelho do disco cilíndrico de rocha sã, não ciclada (Figura 28B).

Foram então realizadas mensurações não destrutivas por meio de análises espectrais por reflectância utilizando-se o espectrorradiômetro de modelo ASD FIELDSPEC 3 HI-RES existente no Laboratório de Sensoriamento Remoto e Espectroscopia Mineral (LABSERGEM) da CPRM de São Paulo. Estas análises laboratoriais foram conduzidas pela Geóloga Thaís Danielle Gasparim e as interpretações espectro-mineralógicas pela Dra. Mônica Mazzini

Perrota e pelo MSc. João Luiz Carneiro Naleto. Esquemas com identificação das amostras do álcali-feldspato granito Morungaba e do microgabro (GAB), bem como da visualização do posicionamento das leituras feitas no espectrorradiômetro em cada corpo de prova são mostrados, respectivamente nas Figuras 29 e 30.

Figura 28: Ensaios de alteração acelerada no equipamento “Weather-Ometer”.

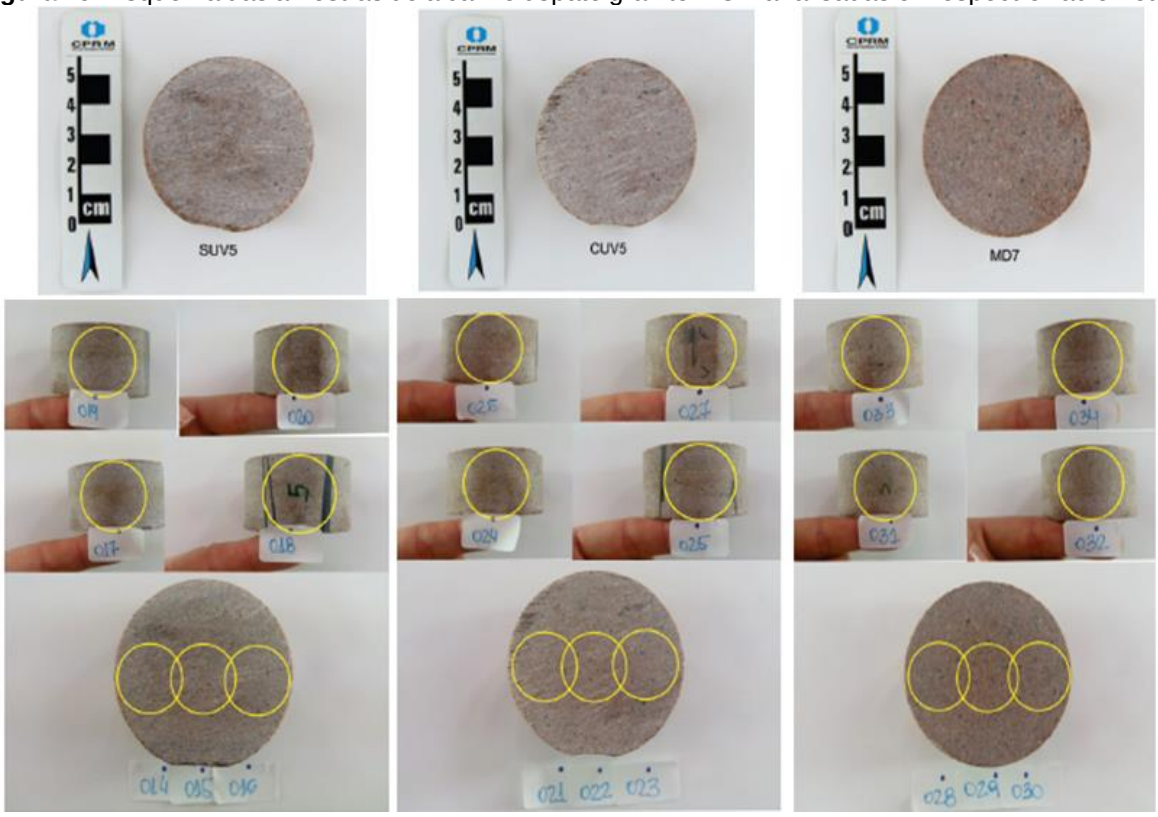


Fonte: Do autor (2021).
Note: (A) No granito (MOR), sujidade dos plagcioclásios com leve esfarelamento da amostra e alteração das biotitas com tons esverdeados. (B) À esquerda da imagem trata-se de um corpo de prova não ciclado e à direita amostra gêmea ciclada, exibindo notável perda de brilho e colorações esverdeadas (cloritização?) do material ensaiado.

Em linhas gerais, a interpretação espectro-mineralógica das curvas espectrais indica pouca variação espectral identificada entre a amostra sã e as amostras do álcali-feldspato granito MOR submetidas ao ensaio de alteração intempérica no equipamento *Weather-Ometer.*

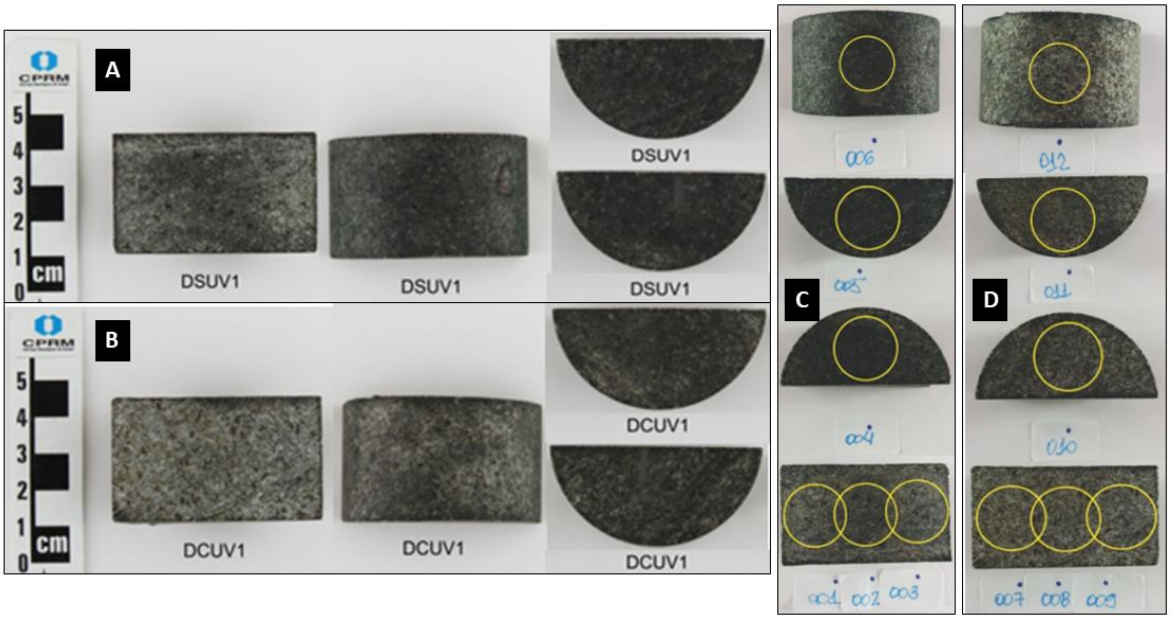
Conforme ilustrado na Figura 31A, as curvas espectrais mostram valores de reflectância intermediários, com picos de reflexão na região do visível relacionados à cor rosa avermelhado (amostras CUV5 e MD7) e rosa (SUV5).

Figura 29: Esquema das amostras do álcali-feldspato granito MOR analisadas em espectrorradiômetro.



Fonte: Do autor (2021).
Nota: Canto superior esquerda: Rocha sã: código “SUV5”. Centro: Rocha ciclada: código “CUV5” que é o espelho da amostra “SUV5”. Direita: Rocha ciclada: cógigo “MD7”. Abaixo: Círculos em amarelo representam as posições das leituras realizadas através da espectroscopia de reflectância nas faces laterais e frontais das três amostras do (MOR) (“SUV5”, “CUV5” e “MD7”).

Figura 30: Esquema das amostras do microgabro GAB analisadas em espectrorradiômetro.

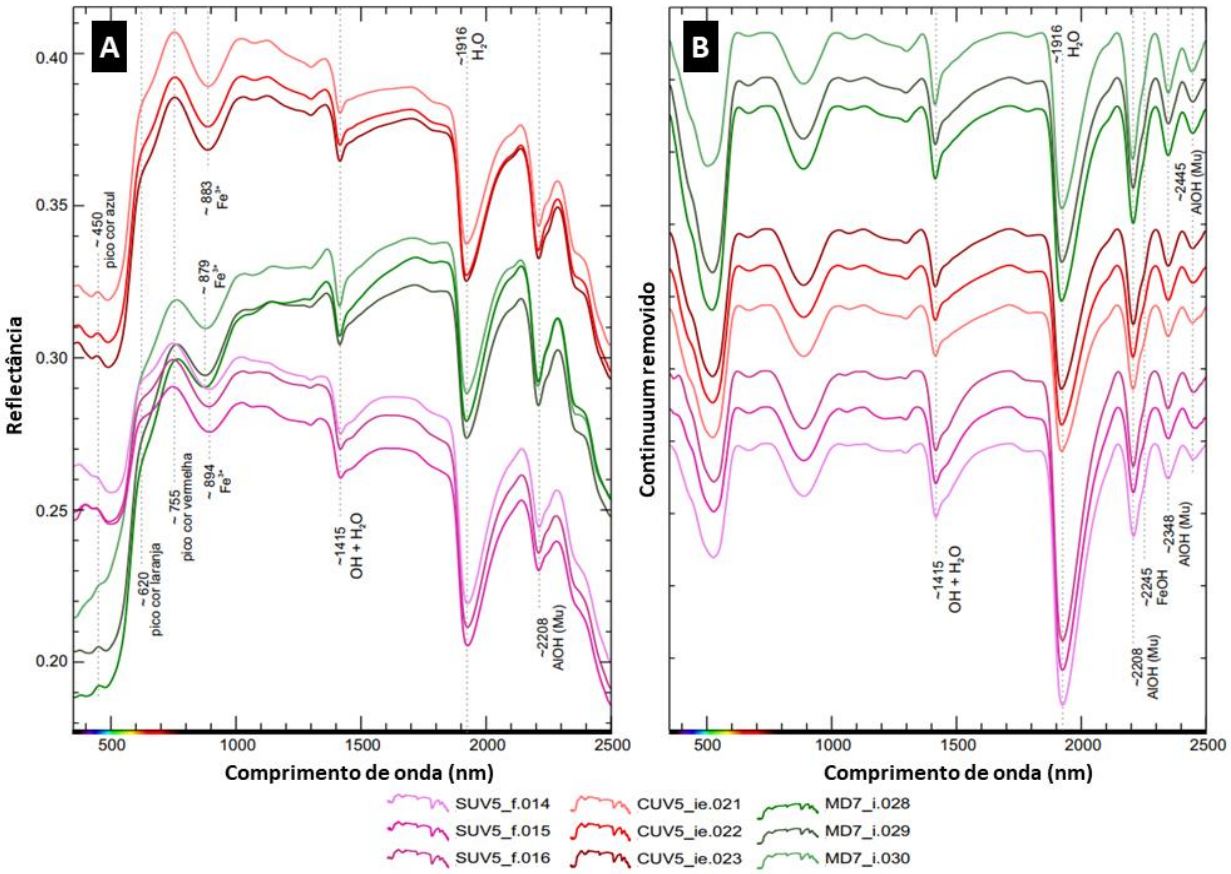


Fonte: Do autor (2021).
Nota: (A) Corpo de prova de rocha sã. (B) Amostra gêmea ciclada (1.000 horas) no equipamento do tipo *Weather-Ometer*. (C) e (D) Círculos em amarelo representam as posições das leituras realizadas através da espectroscopia de reflectância nos corpos de prova do microgabro são e ciclado, respectivamente.

Nota-se no infravermelho próximo deslocamento da feição de absorção relacionada ao Fe férrico, de comprimentos de onda de ~894 nm para comprimentos de onda mais baixos (~880 nm) nas amostras submetidas a processos intempéricos.

Feições de absorção nestes comprimentos de onda, associadas a picos de reflexão em ~750 a 760 nm, podem estar relacionadas a presença de óxidos/hidróxidos de ferro. Observa-se, profunda feição arredondada em ~1916 nm, mais profunda na amostra sã, não compatível com curvas espectrais de rochas graníticas pouco ou não intemperizadas. Esta feição indica presença de água livre e pode estar relacionada a inclusões fluidas em quartzo e/ou feldspato ou mesmo umidade na amostra.

Figura 31: Assinaturas espectrais obtidas na amostra fresca do álcali-feldspato granito MOR (“SUV5”) e submetidas às simulações de processos intempéricos (“CUV5” e “MD7”).



Fonte: Do autor (2021).
Nota: (A) Curvas de valores em reflectância relativos ao padrão de referência branca, do tipo spectralon. (B) Curvas com remoção da envoltória de contínuo para realce de feições de absorção. Mu = muscovita.

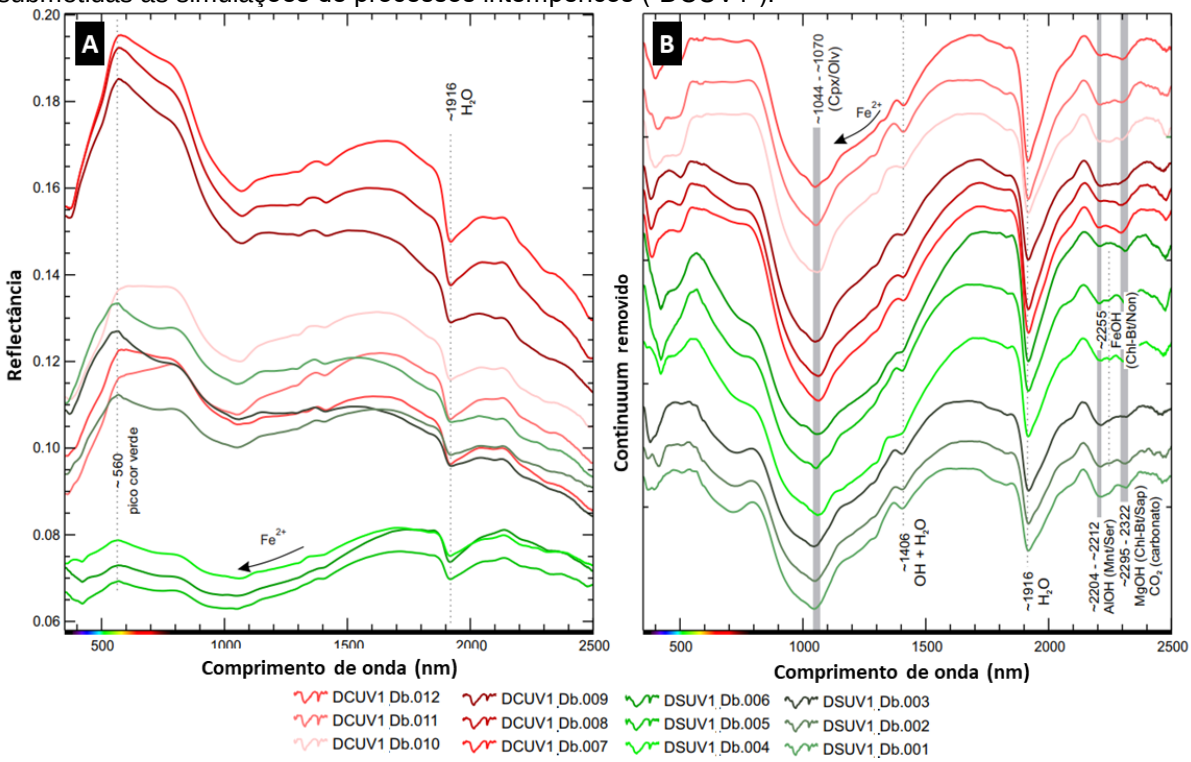
Quanto à Figura 31B, as curvas apresentadas com o contínuo removido a feição de absorção em ~2208 nm associada às feições em ~2348 nm e em ~2445 nm está relacionada à presença de mica branca de composição potássica (muscovítica). Leve feição em ~2245 nm indica presença de molécula Fe-OH, que pode estar na estrutura da própria mica branca

ou, mais provavelmente, devido ao conteúdo (ainda que baixo) de biotita e/ou clorita na amostra.

Quanto ao microgabro (GAB), como resposta ao ensaio de intemperismo acelerado no equipamento *Weather-Ometer* as análises espectrais sugerem aumento na proporção de moléculas de água em estrutura mineral e cristalização ainda incipiente de argilominerais do grupo das esmectitas, confirmando as observações petrográficas em nível microscópico e o comportamento deste material pétreo quando submetido ao ensaio de saturação em etilenoglicol e secagem em estufa previamente conhecidos.

Em observação aos dados da Figura 32A, as curvas espectrais obtidas nas amostras de microgabro apresentam baixos valores de reflectância, devido à composição rica em máficos e cor cinza-escura das amostras, principalmente nas curvas correspondentes à amostra sã.

Figura 32: Assinaturas espectrais obtidas nas amostras do microgabro GAR fresco (“DSUV1”) e submetidas às simulações de processos intempéricos (“DCUV1”).



Fonte: Do autor (2021).
Nota: (A) Curvas de valores em reflectância relativos ao padrão de referência branca, do tipo spectralon. (B) Curvas com remoção da envoltória de contínuo para realce de feições de absorção. Bt = biotita; Chl = clorita; Cpx = clinopiroxênio, Mnt = montmorilonita, Non = nontronita, Olv = olivina, Sap = saponita.

Observa-se padrão de albedo similar entre as curvas obtidas na face serrada vertical interna da amostra sã (análises SUV1_Db.001 a 003) e nas faces externas e de corte horizontal do cilindro da amostra submetida ao intemperismo (análises CUV1_Db.010 a 012). Na região do visível, pico de reflectância em 560 nm indica predominância de cor verde nos

minerais. Além de valores mais altos de albedo e maior amplitude das feições nas curvas da face serrada vertical interna da amostra intemperizada (análises DCUV1_Db.007 a 009), a principal diferença espectral entre elas e as curvas obtidas na amostra sã (análises DSUV1_Db.001 a 006) está na feição assimétrica associada à presença de moléculas de água em estrutura mineral (em ~1916 nm), indicando alteração por processos de hidratação dos minerais primários na formação de minerais secundários, mais hidratados.

Nota-se que mesmo a amostra sã de microgabro apresenta esta feição, porém menos pronunciada. Não se pode descartar a possibilidade da presença de água na forma de inclusões fluidas em minerais primários, mas nesse caso a feição de absorção típica da água livre deveria ter forma arredondada. Assim, aparentemente, algum processo de desestabilização de minerais primários na amostra sã também ocorreu. A feição em aproximadamente 1400 nm, associada a moléculas de OH e de água na estrutura mineral, está presente, mas é sempre pouco profunda e apresenta variação menor que a de 1900 nm. É também mais pronunciada no caso das assinaturas da amostra intemperizada.

Pela observação da Figura 32B, as curvas espectrais apresentadas com remoção do contínuo mostram pouca variação na posição, forma e profundidade das feições espectrais de absorção, exceto pela feição aguda e assimétrica da água na estrutura mineral em aproximadamente 1916 nm, mais profunda nas curvas extraídas da amostra intemperizada.

Feição similar nesta região do espectro, associada a feições bem menos profundas em ~2200 nm, ou ~2270 nm, ou em ~2300 nm seria típica de minerais do grupo das esmectitas (respectivamente, montmorilonita, nontronita e saponita), mas a feição em ~1400 nm pouco pronunciada parece indicar que ainda é incipiente a cristalização destes argilominerais secundários.

Na região do infravermelho próximo uma rampa descendente entre ~1350 nm e ~1050 nm está ligada à presença de Fe2+ nos minerais ferromagnesianos, e a feição aberta e grosseiramente simétrica em comprimentos de onda entre 1044 nm e 1070 nm é diagnóstica de clinopiroxênio e de olivina.

As fracas feições espectrais na região do infravermelho de ondas curtas também podem estar associadas à presença de sericita (feição em ~2200 nm, relativa à ligação Al-OH), de clorita +/- biotita +/- epidoto +/- anfibólio (feições em ~2255 nm, relativa à ligação Fe-OH, e em ~2300 nm, relativa à ligação Mg-OH), e de carbonatos (feição em ~2300 nm).

5. CONCLUSÕES

As ferrovias lastradas, majoritariamente utilizadas em todo o mundo, têm seu custo de manutenção fortemente atrelado à qualidade do lastro, de modo a garantir as condições de segurança exigidas nas vias, a velocidade adequada dos trens e até mesmo o conforto dos passageiros. Trata-se de um indicador fundamental na escolha e manutenção dos agregados rochosos, tanto nas condições brasileiras como internacionais. A título de exemplo, Indraratna e Salim (2005) reportam o gasto de centenas de milhões de dólares a cada ano para a construção e manutenção de ferrovias nos Estados Unidos, Canadá e Austrália.

Sendo assim, parte dos recursos destinados à viabilidade da obra e sua implantação devem fazer parte dos estudos detalhados da gênese da rocha e sua contextualização em termos da significância dos ensaios de caracterização tecnológica para previsão das características petrográficas, dos aspectos físico-mecânicas e da alterabilidade das rochas visando o seu uso como lastro ferroviário.

Por contemplar tanto as solicitações mecânicas como as intempéries em regiões de clima tropical impostas ao lastro de uma ferrovia em serviço, o conhecimento aprofundado da qualidade do agregado pétreo (material que não tem controle tecnológico na sua formação) é que poderá subsidiar a redução ou otimizar os custos de manutenção da via férrea.

As três rochas estudadas no presente trabalho apresentam qualidades físico-mecânicas em grande parte adequadas para compor lastro de ferrovias.

Entretanto, as regiões estudadas dessas rochas, ficam expostas em clima tropical de altitude, sendo assim, o microgabro (GAB) não é recomendado, pela maior facilidade da alteração de seus minerais nessas condições climáticas.

Fica evidente, portanto, a importância do conhecimento petrográfico detalhado, que deve ser sempre representativo dos materiais geológicos mapeados nos trabalhos de campo e preceder os testes de caracterização tecnológica de rochas para um uso particular como materiais em obras de engenharia.

No caso dos dois granitóides estudados (MOR e CAN), para a correta aplicação, deverão ser realizados os ensaios necessários, considerando o caráter pontual dos resultados obtidos no presente estudo, que são das porções de melhor qualidade do maciço.

Para utilização dos agregados em ferrovias lastradas, as informações tecnológicas já obtidas dessas rochas são bastante detalhadas e podem servir de subsídios aos órgãos governamentais responsáveis pela tomada de decisões quanto ao emprego dos materiais pétreos disponíveis nas regiões estudadas.

Convém destacar que estes resultados são válidos para as condições e sítios de amostragem nas pedreiras visitadas e não devem ser utilizados como critério de aceitação ou rejeição destas rochas para uso como agregado no lastro de ferrovias, sendo que todos os

materiais são explotados e comercializados para outras finalidades, notadamente para uso em concreto com cimento Portland e em pavimentação.

Além disto, quanto mais extensa for a área de estudo, mais importante se tornará a qualificação geotécnica do maciço. Na prática, como já ressaltado por Remédio et al. (2018) e Santos et al. (2021), é fundamental que se realizem estudos nos locais de extração para otimizar as operações de desmonte e britagem, atendendo aos rígidos critérios de seleção para uso como lastro em uma obra de engenharia de grande monta, como pode ser o caso do Trem Inter Cidades (TIC).

De qualquer modo, reitera-se que o escopo deste trabalho foi o de desenvolver estudos comparativos entre diferentes tipos de agregados pétreos, discutindo suas aptidões e limitações visando seu uso como lastro ferroviário, mas não os especificando e evitando qualquer tipo de conotação comercial em termos das pedreiras estudadas.

Quantos aos ensaios, destacam-se ainda os seguintes aspectos:

a) As três rochas (MOR, CAN e GAB) apresentam propriedades mecânicas excelentes e com base em análises petrográficas detalhadas, foram submetidas a ensaios de alterabilidade com água, imersão em soluções de sulfato de sódio e de etilenoglicol, todos com secagem água-estufa. Quanto ao ensaio de etilenoglicol, mostrou-se que deve ser obrigatório na caracterização de qualquer rocha básica. No caso do microgabro, não é indicado para a função de lastro de ferrovia em regiões de clima tropical, devido a facilidade de alteração de seus minerais nestas condições climáticas;

b) O ensaio de abrasão Micro-Deval (MD) é muito difundido, especialmente na Europa, Estados Unidos e Canadá. É capaz de fornecer informações importantes sobre o comportamento de agregados rochosos para obras de engenharia, notadamente na utilização em lastros de ferrovias. Trata-se de um ensaio recomendado na norma NBR 5564 (ABNT, 2021) que foi recentemente revisada. No presente trabalho, os ensaios de MD mostraram-se importantes para a caracterização de abrasividade da rocha em estado saturado uma vez que o ensaio de abrasão *Los Angeles* submete as partículas ao impacto, descaracterizando a abrasividade da rocha e sendo realizado em meio seco;

c) Impacto Treton: apesar da sua preparação “artesanal” dos fragmentos rochosos requeridos para determinar a resistência ao choque, a qualificação da tenacidade do lastro torna-se necessária, pois fornece bons indicadores do

comportamento da rocha intacta, considerando, por exemplo, as solicitações no processo de socaria mecanizada que consiste em compactar o lastro sob os dormentes. Rochas com baixa tenacidade tendem a criar materiais mais finos devido a quebra dos contatos das partículas gerando a colmatação nos vazios dos lastros. Assim, o ensaio de resistência ao choque (Impacto Treton) mostra-se importante na qualificação da tenacidade da rocha do lastro mesmo apresentando alta resistência mecânica. Porém, a sua preparação e graduação pode não retratar fielmente a tenacidade à fratura do material ensaiado, tornando-se oportuno a construção de aparatos de maior porte para ensaios de lastros de ferrovias ou a utilização de ensaios não usuais no Brasil, bem como o *Impact Fragmentation* e *Aggregate Crushing Value Test* mencionados neste trabalho;

d) O ensaio conjugado de *Slake Durability Index* com ciclos de saturação em etilenoglicol e secagem em estufa mostraram intensa degradação das partículas rochosas do microgabro. Esse ensaio deve ser obrigatório na caracterização de qualquer rocha básica (basaltos, diabásios e gabros), notadamente, em termos do potencial de uso como agregado sem ligantes. Trata-se de uma importante constatação do estudo de degradação, uma vez que esse ensaio é mais um que, provavelmente constará na atualização da NBR 5564 (ABNT, 2021) atualmente em revisão;

e) Nos ensaios de intemperismo artificial acelerado, utilizando-se equipamento *Weather-Ometer,* verificou-se uma nítida modificação das rochas, mais intensa no microgabro (GAB), constatada especialmente por meio da técnica de espectrometria de massa que corroborou a presença de argilas expansivas do tipo esmectita, celadonita e saponita. Trata-se, portanto, de um método inovador e pioneiro em estudos comparativos de rochas para lastro ferroviário exposto principalmente em clima tropical;

Considerando as experiências adquiridas no presente estudo, em continuidade aos que têm sido desenvolvidos pelo Grupamento de Tecnologia de Rochas (GTR) da EESC/USP, seguem abaixo, sugestões para pesquisas futuras:

a) Dar continuidade a estudos com equipamentos do tipo abrasão Micro-Deval de maior porte que possibilitem ensaios em agregados nas dimensões que compõem o lastro de ferrovias. Pois, com a granulometria utilizada no presente estudo, já foi possível obter importantes resultados, sobre desgaste abrasivo a

úmido das rochas que melhor representam as condições de campo, principalmente quando são usadas em regiões de climas tropicais;

b) Igualmente importante, a mesma abordagem deve ser considerada no tocante ao desenvolvimento de equipamentos de grande porte para realização de ensaios de tenacidade (Impacto Treton) e de esmagamento, designados na literatura internacional como IF- *Impact Fragmentation* e ACV- *Aggregate Crushing Value*, respectivamente;

c) No tocante aos ensaios de intemperismo artificial acelerado de agregados pétreos em equipamento do tipo *Weather-Ometer*, uma possibilidade interessante seria a de usar amostras de um só tipo de rocha e fazer o controle da solução química do material.

Com base nos itens acima listados, cabe finalmente destacar que os materiais pétreos utilizados como agregado para lastro de ferrovias ficam sujeitos às exposições constantes das intempéries, estando sob maior influência do meio em termos da degradação dos minerais por reações físico-químicas.

Portanto, pesquisas envolvendo a alterabilidade das rochas se tornam tão importantes quanto os ensaios de caracterizações geomecânica das rochas. Isto somente será possível com projetos, cujas iniciativas acadêmicas que, pelo alcance multidisciplinar e pela importância de revigorar a realidade brasileira em termos de estudos com rochas visando seu emprego como lastro ferroviário.

Deve-se buscar a intensificação dos contatos com outras instituições e centros de pesquisas, entidades e empresas ligadas ao setor ferroviário, no sentido de viabilizar o custeio para aquisição ou construção dos equipamentos acima referidos, bem como modernização de laboratórios.

REFERÊNCIAS

ABNT **NBR 5564:** Via Férrea – Lastros ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT **NBR 9935:** Agregados – Terminologia – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT **NBR 7389**: Agregados – Análise petrográfica de agregados para concreto. Parte 2: Agregado graúdo – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT **NBR 9938:** Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT **NBR 12696**: Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT **NBR 12697**: Avaliação do comportamento mediante a ciclagem acelerada com etilenoglicol – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT **NBR 15845-2:** Rochas para revestimento – Métodos de ensaio– Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT **NBR NM 51:** Agregado graúdo – Ensaio de abrasão. *Los Angeles* – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2000.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). Dez. 2012. **Análise da Cadeia Produtiva de Agregados Minerais para Obras de Construção Civil e de Infraestrutura**. Brasília. Disponível em: http://www.anepac.org.br/agregados/artigos/item/122-relatorio-da-abdi. Acesso em: 18 jun. 2019.

ALMEIDA, F.F.M.; FERREIRA, F.J.F.; CARNEIRO, C.D.R.; STEFANI, F.L. Aspectos evolutivos da geossutura Tocantins-Araguaia. Sociedade Brasileira de Geologia, Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia. **Anais**, 3:1269-1285, 1986.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C88:** Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. West Conshohocken, p. 6. 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D6928:** Standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus. West Conshohocken, p. 6. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D4644:** Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Other Similar Weak Rocks. West Conshohocken, p. 4, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **G151:** Standard practice for exposing nonmetallic materials in accelerated test devices that use laboratory light sources. West Conshohocken, p. 10, 2019.

APAYDIN, O.F.; YILMAZ, M. Correlation of petrographic and chemical characteristics with strength and durability of basalts as railway aggregates determined by ballast fouling.

https://doi.org/10.1007/s10064-019-01654-4. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2019.

AREL, E.; TUGRUL, A. Weathering and its relation to geomechanical properties of Cavusbasi granitic rocks in northwestern Turkey. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment,** v. 60, n. 2, p. 123-133, 2001.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO (ANEPAC/Sindpedras). Perspectivas para o Setor de Agregados. Disponível em: http://www.anepac.org.br/agregados/mercado/item/101-perspectivas-para-o-setor-de-agregados. Acesso em: 18 jun. 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO (ANEPAC). **Revista areia & brita**. Edição 66, Janeiro – Março, 2016. Disponível em: http://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita/item/213-edicao-66-2016-jan-fev-mar. Acesso em: 29 maio 2019.

ASSOCIATIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (AENOR). **EN 1097-1:** Ensayos para determinar las propriedades mecânicas y físicas de los áridos – Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval). Madrid, España. 2011.

BACH, H. (2013). **Evaluation of attrition tests for railway ballast**. 2013. 108 p. MSc Dissertation. Graz University of Technology, Graz/Austria, 2013.

BALLIVY G., MICHEL. D., Correlations entre les proprietes physico-mecaniques des roches et le comportement des granulats manufactures. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**, v. 29, n. 1, p. 339-342, 1984.

BALLIVY G.; GILL D. E., LADANYI. Effect of water saturation history on the strength of low-porosity rocks. **Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing**, ASTM STP 599, p. 4-20. 1976.

BALLIVY G.; GILL D. E., LADANYI. Variations des caractéristiques mécaniques des roches fissurées en fonction de l'humidité ambiante. **Proc. III International Congress IAEG**, Madrid, sec. II, vol. 2, p. 7-16. 1978.

BENEDIKTSSON, S. **Effects of particle shape on mechanical properties of aggregates**. 2015. MSc Dissertation - Norwegian University of Science and Technology, Trondheim/Norway, 2015.

CAGNON; F.A.; JÚNIOR, M.L.; ALVES, C.F.C.; BARBOSA, A.O.; FAGUNDES, M.G. **Implantação de ferrovias de alta velocidade:** contribuição metodológica para o gerenciamento ambiental de obras lineares em áreas contaminadas e potencialmente contaminadas. **Transportes**, v. 23, n. 2, p. 117-123, 2015.

CELIK, M.Y.; AYGUN, A., The effect of salt crystallization on degradation of volcanic building stones by sodium sulfates and sodium chlorides. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment** , v. 78, n. 5, p. 3509-3529, 2019.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). LUZ, A. B. **Manual de Agregados para Construção Civil**, 2ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. 4121p. 2012.

CHAVES, A. P.; **Teoria e prática do tratamento de minérios**: Britagem, Peneiramento e Moagem. Vol. 3. 4ª Ed. São Paulo: Sigmus Editora, 235p. 2009.

CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, E.D.P. **Guia de Aplicação de Rochas em Revestimentos**. Brasília, 2 ed. ABIROCHAS, 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). Transporte Ferroviário: Colocando a competitividade nos trilhos / Confederação Nacional da Indústria. CNI, (Proposta da Indústria – eleições 2018. Brasília. v. 23, p. 42, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Pesquisa CNT de Ferrovias. Brasília: CNT, p. 234, 2015.

CONSTANCIO, T. Indústria aguarda retomada. **Revista Ferroviária**, p. 52-54, 30 de outubro de 2020.

CURTIS NETO, J.A.; RIBEIRO, R.P.; WATASHI, D.B.; PARAGUASSÚ, A.B.; SANTOS, R.S.; XAVIER, G.C. Comparação Estatística entre Ensaios Mecânicos de Agregados Pétreos. In: **Anais do 8º Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas**. Salvador: ISRM (International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, p.1-9, 2018.

DANTAS, A.S.L. **Geologia da Faixa São Roque e intrusivas associadas na região entre São Paulo e Mairiporã, Norte de São Paulo – SP**. 1990. 217p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

DEIROS, I.; VOIVRET, C.; COMBE, G.; EMERIAULT, F. Quantifying Degradation of Railway Ballast Using Numerical Simulations of Micro-Deval Test and In-situ Conditions. **Procedia engineering**, v. 143, p. 1016-1023, 2016.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNGEN – DIN. **EN 13450:** Aggregates for railway ballast. Berlin, p.35. 2013.

DIAS FILHO, J. L. E.; SANTOS, V. G. P.; MAIA, P. C. A.; XAVIER, G. D. C. Study of Relationship Between Wear Tests on Rocks by Slake Durability, Micro-Deval and Los Angeles Abrasion Tests. In: **ISRM Regional Symposium-8th South American Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering,** 2015.

DIÓGENES, L.M. **Avaliação das relações entre propriedades de agregados minerais com base nas características do processo de britagem e da rocha de origem.** Mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2018.

DIÓGENES, D. F., **Avaliação das propriedades de forma de agregados utilizados em lastro ferroviário a partir do uso do processamento digital de imagens.** Mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2016.

DNER **ME 089:** Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1994.

ESFAHANI, M.K., KAMANI, M.; AJALLOEIAN, R. An investigation of the general relationships between abrasion resistance of aggregates and rock aggregate properties. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 78, n. 60, p. 3959-3968, 2019.

ERICHSEN, E.; ULVIK, A.; SAEVIK, K. Mechanical degradation of aggregate by the Los angeles, the micro-deval and the Nordic test methods. **Rock mechanics and rock engineering**, v. 44, n. 3, p. 333, 2011.

FILHO, J. L. E. D. **Comportamento geomecânico e de durabilidade de formas têxteis tubulares aplicadas em obras hidráulicas**. 2016. Tese de Doutorado - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016.

FILHO, J. L. E. D.; Maia, P. C. D. A.; Xavier, G. D. C. Critical Analysis of Laboratory Testing Procedures for Setting Properties of Rock Materials. **ISRM Conference on Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure** – SBMR 2014. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014.

FRANKLIN, J.A.; CHANDRA, R. The slake-durability test. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics**, v. 9, p. 325-328, 1972.

FRASCÁ, M.H.B.O. Assessment of alterability of basalt used for riprap by petrographic examination. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, p. 208-213, 2019.

FRASCÁ, M. H. B. O.; PARAGUASSÚ, A.B. **Geologia de Engenharia e Ambiental,** ABGE – V. 2. 2018.

FRASCÁ, M.H.B.O. Rocha como Material de Construção. ISAIA.G.C. ed. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, (Parte III, Capítulo 15). 2017.

FRATASSI. G.C.; CARNEIRO. N.F.; VALENTIN. C.A.; SILVA. J.L. Durabilidade de Geotêxteis Não Tecidos de PET e PP Expostos a Intempéries e Câmara de Envelhecimento Acelerado por UV. VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos (Geossintéticos 2019). São Carlos, São Paulo, Brasil. IGS-Brasil/ABMS, 2019.

FRAZÃO, E. B. **Alteração de rochas como critério de seleção de agregados**. 2ª Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2012.

FRAZÃO, E.B. **Tecnologia para a produção e utilização de agregados**. In: TANNUS, M.B.; DO CARMO, J.C.C. (orgs.). Agregados para a construção civil no Brasil: contribuição para formulação de políticas públicas. Belo horizonte: CETEC. Cap. 1. p. 27-73, 2007.

FRAZÃO, E.B.; FRASCÁ, M.H.B.O. Características tecnológicas de agregados de pedreiras do Estado de São Paulo e proposta de especificação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 10, 2002, Ouro Preto. **Anais.** Ouro Preto: ABGE, 8p, 2002.

FRAZÃO, E.B. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil**. São Paulo, ABGE. 2002.

FRAZÃO, E. B. A Importância das Características Tecnológicas da Pedra Para Lastro Ferroviário**. Revista Solos e Rochas**, Vol. 10, N° 3, 11-20, dez. 1987.

GAMBLE, J.C. **Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks**. 1971. 171p. Doctoral Thesis. University of Illinois, Champaign/USA, 1971.

GANESHA, A.V.; KRISHNAIAH, C.; PRAKASH NARASIMHA, K.N.; Petrographic and physico-mechanical studies on granitic rocks around Bidadi, Ramanagaram Taluk, Karnataka State. **International Jornal of Advances in Mechanical and Civil Engineering**, v. 3, n. 2, p. 36-40, 2016.

G1 – GLOBO. Rumo vence trecho de 1,5 mil quilômetros da Ferrovia Norte-Sul. 28 mar. 2019. Disponível em: https://g1.globo.com/economia/noticia/2019/03/28/rumo-vence-leilao-de-trecho-da-ferrovia-norte-sul.ghtml. Acesso em: 10 jun. 2019.

GUPTA, V.; AHMED, I. The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India. **Engineering Geology**, v. 95, n. 3, p. 79-87, 2007.

INDRARATNA, B., SALIM, W., **Mechanics of ballasted rail tracks: a geotechnical perspective**. CRC Press, 2005.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINEIRAÇÃO (IBRAM). **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. Dez. 2012. Disponível em: http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf. Acesso em: 18/06/2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Mineração & Município – Bases para planejamento e gestão dos recursos minerais**. 177 p. São Paulo. 2003.

KHATRI, R.P.; QUICK. G.W.; SIRIVIVATNANON. V. Durability of concrete containing siderite-bearing microsyenite and trachyte aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n.4, p. 307-315, 2007.

KÖKEN, E.; ÖZARSLAN, A.; BACAK, G. An experimental investigation on the durability of railway ballast material by magnesium sulfate soundness. **Granular Matter**, v. 20, n. 2, p. 29, 2018.

LIM, W.L. **Mechanics of railway ballast behaviour**. 2004. PhD Thesis. University of Nottingham, Nottingham/England, 2004.

MARQUES, L.S.; ERNESTO, M. **O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná**. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B.B. (coords.), Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, Editora Beca, São Paulo, p.245-263. 2004.

MATTOS, I.C.; ARTUR, A.C. Caracterização Petrográfica e Tecnológica de Granitos Ornamentais do Stock Granítico Serra do Barriga, Sobral/CE. **Geociências** (São Paulo), v. 32, n. 2, p. 247-268, 2013.

MESQUITA, M.P.S. **Composição, Estruturas, Propriedades Tecnológicas e Alterabilidade dos Granitos Ornamentais do stock Morrinho, Santa Quitéria (CE)**. 2002. 171p. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Governo e empresas falam sobre as vantagens das ferrovias e como elas podem ser melhor utilizadas. 21 dez. 2018. Disponível em: http://infraestrutura.gov.br/component/content/article/17-ultimas-noticias/8140-governo-e-empres%C3%A1rios-falam-sobre-vantagens-das-ferrovias-e-como-elas-podem-ser-melhor-utilizadas.html. Acesso em: 11 jun. 2019.

MOMENI A.; HASHEMI, S.S.; KHANLARI, G.R.; HEIDARI, M. The effect of weathering on durability and deformability properties of granitoid rocks. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 76, p. 1037–1049, 2017.

O GLOBO. Ferrovia Norte-Sul: Longo histórico de corrupção. 25 maio 2017. Disponível em: https://oglobo.globo.com/brasil/ferrovia-norte-sul-longo-historico-de-corrupcao-21392482. Acesso em: 10 jun. 2019.

PAIVA, C.E.L., PEREIRA, M.L., RIBEIRO, R.P., SANTOS, R.S. Evaluation of ballast materials used in Brazilian railways based on their resistance to wear. In: **Proceedings of the 5th International Conference on Road and Rail Infrastrucutre**. Zadar: International Road Federation, p. 1-8. 2018.

PARAGUASSÚ, A. B.; RODRIGUES, J. E.; RIBEIRO, R. P.; FRAZÃO, E. B. **Indústria da Pedra: da Extração à aplicação final**. São Carlos: EESC-USP, p. 130, 2014. Disponível em: http://www.geotecnia.eesc.usp.br/images/Industria_da_ pedra/Livro_Industria_da_Pedra.pdf. Acesso em: 29/05/2019.

PARIZOTTO, J.C.V., RIBEIRO, R.P., PARAGUASSÚ, A.B. Soft Rocks: Relevant Aspects to the Resumption of the Studies in Brazilian Geotechnics. In: **VI Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas**, 2014, Goiânia. VI Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, 2014.

PICCIRILLO, E.M.; MELFI, A.J. The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects. Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico. 1988.

PIRES, J.; COSTA, R.; BERNUCCI, L.; MOTTA, R.; MOURA, E. Degradação do lastro ferroviário – principais aspectos e estudos de caso. **Transportes**, v. 25, n. 3, p. 62-74, 2017.

PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO 2030 (PNM). Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2010. Disponível em: http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/destaques-do-setor-de-energia/plano-nacional-de-mineracao-2030. Acesso em: 18 jun. 2019.

POMONIS, P.; RIGOPOULOS, I.; TSIKOURAS, B.; HATZIPANAGIOTOU, K. Relationships between petrographic and physicomechanical properties of basic igneous rocks from the Pindos Ophiolitic Complex, NW Greece. In: **Proceedings of the 11th International Congress**. Athens: Bulletin of the Geological Society of Greece, p. 947-958, 2007.

REMÉDIO, M. J.; RIBEIRO, R.P.; CURTIS NETO, J. C. Correlações entre petrografia e propriedades tecnológicas de materiais pétreos: utilização como agregado em obras de engenharia. **Revista Geociências**, v. 37, n. 3 p. 669-681, UNESP, São Paulo. 2018.

REMÉDIO, M.J. **Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de Trem de Alta Velocidade – Trecho Campinas / São Paulo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

REVISTA FERROVIÁRIA. Expansão em passageiros. Maior parte das obras ferroviárias no Brasil é voltada para mobilidade urbana. **Revista Ferroviária**, v.149, p. 52-69. 2019.

RIBEIRO, R.P.; PARIZOTTO, J.C.V.; PARAGUASSÚ, A.B. Metodologias de preparação de corpos de prova para estudos geológico-geotécnicos de siltitos laminados (Grupo Itararé). **Geociências**, v. 38, p. 269-278, 2019.

RICHARD, J. A.; SCARLETT, J. R. A Review and Evaluation of the Micro-Deval Test. Report ATR-024. Public Works and Government Services, Canada, 1997.

ROGERS, C. Canadian Experience with the Micro-Deval Test for Aggregates. **Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications**, v. 13, n. 1, p. 139 – 147, 1998.

SADEGHI, J. M.; ZAKERI, J. A; NAJAR, M. Developing track ballast characteristic guideline in order to evaluate its performance. **International Journal of Railway**, v. 9, n. 2, p. 27-35, 2016.

SANTOS, R.S.; RIBEIRO, R.P.; PARAGUASSÚ, A.B.; XAVIER, G.C. Railroad ballast of granites and basic rocks in tropical regions: relationships between petrography, physical mechanical properties and alterability. **Transportes**, 2021.

SANTOS, R.S.; RIBEIRO, R.P.; PARAGUASSÚ, A.B; CURTIS NETO, J.; XAVIER. G.C.; REMÉDIO. J. M. Abrasion tests combined with accelerated alteration cycles in different rock materials for railway ballast. In: **Proceedings of ISRM 14th International Congress of Rock Mechanics.** Foz do Iguassu: ISRM, p. 2042-2048. 2019.

SANTOS, M. T. C. C.; RIBEIRO, R. C. C. Ação das intempéries em quartzitos que foram limpos com ácido oxálico. **Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM, 8.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019.

SANTOS, E. S.; CARANASSIOS, A. Ensaios de caracterização tecnológica e alterabilidade de um granito denominado comercialmente Tycoon Blue. **Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2007.

SOUTH AFRICAN BUREAU STANDARDS (SABS). **SABS 1083**: Aggregates from natural sources - Aggregates for concrete. Pretoria. 2014.

SOUZA, L.R.; RIBEIRO, R.C.D.C.; CARRISO, R.C.; SILVA, L.P.; VISCONTE, L.L.; PACHECO, E.B. Emprego de resíduos de mármore na indústria de plástico. **Jornada do Programa de Capacitação Institucional do CETEM**, Rio de Janeiro: CETEM, 2007.

SQUISATO, E.; NARDY, A.J.R.; MACHADO, F.B.; J MARQUES, L.S.; JUNIOR, E.R.V.R.; OLIVEIRA, M.A.F. Litogeoquímica e aspectos petrogenéticos dos basaltos da província magmática do Paraná na porção centro-norte do estado de São Paulo. **Geociências**, v. 28, n. 1, p. 27-41, 2009.

STENLID, L. **Klassificering av bergarter med Los Angeles-trumma**. Skanska Mellansverige AB, 1996.

Texas Department of Transportation (TXDOT). Manual of Test Procedure for Degradation of Coarse Aggregate by Micro-Deval Abrasion, Tex-461-A, 2016.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO (TCU). #EuFiscalizo – Ferrovias. 01 fev. 2019. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=oTx99q76eS4&t=3s. Acesso em: 11/06/2019.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO (TCU). RELATÓRIO DE FISCALIZAÇÃO. TC n. 13.167/2017-0. Fiscalização n.150 / 2017. Disponível em: https://www.camara.leg.br/internet/comissao/index/mista/orca/orcamento/OR2018/Fiscobras2017/anexo/SINTETICOS/Sint%C3%A9tico_2017_150.pdf. Acesso em: 16 jun. 2019.

VALEC – Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. Audiência Pública – Trilhos para ESUL e FIOL. 20 jun. 2013. Disponível em: http://valec.gov.br/audiencia/Audiencia200613.pdf. Acesso em: 29 jun. 2019.

VAN BLERK, P.G.L.; FLETCHER, E.; COSTELLO, S.B.; HENNING, T.F.P. Ethylene Glycol Accelerated Weathering Test: An Improved, Objective Aggregate Durability Test Method. **Transportation Research Record**, v. 2655, n. 1, p. 27-35, 2017.

VLACH, S.R.F. **Geologia, petrografía e geocronologia das partes meridional e oriental do Complexo de Morungaba, SP.** 1985. 253p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

ZHOU, X.X.; WU, S.P.; LIU, G. Surface and interface of fine aggregate mixture under the condition of UV-ageing and moisture-treatment. **Materials Science Forum.** Trans Tech Publications Ltd. V. 847, p. 431-436, 2016.

WU, J.; Hou, Y.; Wang, L; Guo, M; Meng, L.; Xiong, H. Analysis of coarse aggregate performance based on the modified Micro Deval abrasion test. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 11, n. 2, p. 185-194, 2018.