



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA

FERNANDO AUGUSTO CORRÊA

**Contribuição aos estudos de rochas brasileiras visando uso como lastro ferroviário:
ênfase em correlações geomecânicas e ensaios de alterabilidade**

São Carlos

2022

FERNANDO AUGUSTO CORRÊA

**Contribuição aos estudos de rochas brasileiras visando uso como lastro ferroviário:
ênfase em correlações geomecânicas e ensaios de alterabilidade**

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro

VERSÃO CORRIGIDA

Original se encontra disponível na unidade que aloja o Programa

São Carlos
2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA 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).

C824c Corrêa, Fernando Augusto
 Contribuição aos estudos de rochas brasileiras
 visando uso como lastro ferroviário: ênfase em
 correlações geomecânicas e ensaios de alterabilidade /
 Fernando Augusto Corrêa; orientador Prof. Dr. Rogério
 Pinto Ribeiro. São Carlos, 2022.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de
 Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2022.

 1. Lastro ferroviário. 2. Propriedades das rochas.
 3. Compressão uniaxial. 4. Compressão pontual. 5.
 Alterabilidade. 6. Imersão em sulfato de sódio e
 etilenoglicol. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **FERNANDO AUGUSTO CORRÊA**.

Título da dissertação: "Contribuição aos estudos de rochas brasileiras visando uso como lastro ferroviário: ênfase em correlações geomecânicas e ensaios de alterabilidade".

Data da defesa: 30/09/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Rogério Pinto Ribeiro**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Gustavo de Castro Xavier**
(Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro/UENF)

Aprovado

Profa. Dra. **Rosângela dos Santos Motta**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha**

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

RESUMO

CORRÊA, F. A. **Contribuição aos estudos de rochas brasileiras visando uso como agregado para lastro ferroviário: ênfase em correlações geomecânicas e ensaios de alterabilidade**. 2022. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

O lastro é uma camada de agregados rochosos considerado como um dos mais importantes elementos da infraestrutura ferroviária. Algumas das principais funções exercidas pelo lastro é de distribuição das tensões entre trem-trilho-dormente e permitir uma boa drenagem das águas pluviais. A importância da correta escolha do tipo de rocha para compor o lastro está em reduzir os onerosos custos de manutenção, causados pela degradação do material devido ao tráfego e ao intemperismo. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar, comparativamente, a qualidade, durabilidade e o desempenho das propriedades tecnológicas de materiais rochosos com base em correlações diante das solicitações de ensaios físicos e mecânicos, químico-mineralógicos petrográficos de diversos tipos de rochas, de modo a realizar a caracterização tecnológica, visando indicar os materiais mais adequados na aplicação como agregado para lastro ferroviário. Nesse sentido, será dada continuidade aos trabalhos que vêm sendo realizados pelo Grupamento de Tecnologia de Rochas (GTR) da área de Pós-Graduação em Geotecnia da EESC-USP, envolvendo a compilação crítica de estudos prévios; complementação da base de dados com a realização de ensaios adicionais e amostragens e incorporação de novos dados e materiais de interesse, totalizando 5 tipos de rochas básicas (basaltos, diabásio e microgabro), um monzodiorito e outras três variedades de granitos utilizadas na forma britada para lastro ferroviário ou com aptidão para tal finalidade. Com base nas características petrográficas mais relevantes, a pesquisa trata-se de um estudo científico aplicado a um problema da indústria mineral de agregados, que explora maciços rochosos, sendo centrada em duas vertentes principais: a) caracterização físico-mecânica das rochas com ênfase nas correlações entre compressão uniaxial e compressão pontual e b) estudos de alterabilidade com ensaios de intemperismo acelerado (laboratorial) com ciclagens de imersão em solução de sulfato de sódio ou etilenoglicol e secagem em estufa, contando ainda com a retomada de estudos utilizando extratores Soxhlet para lixiviação contínua. Desta forma, entende-se como contribuição efetiva deste trabalho ampla divulgação nos meios técnicos e acadêmicos no sentido de disponibilizar informações bastante consistentes de vários tipos rochas utilizadas como agregado graúdo para lastro ferroviário ou com aptidão para tal finalidade. Em consequência, tais informações poderão ser úteis à formatação de um banco de dados mais amplo em termos dos materiais pétreos empregados como lastro em território nacional e, de modo indireto, colaborar ao contínuo aperfeiçoamento de normas técnicas relacionadas ao tema, notadamente a NBR-5564 (ABNT, 2021) que trata de lastro e foi recentemente revisada pela referida entidade.

Palavras-chave: Lastro ferroviário. Propriedades das rochas. Compressão uniaxial. Compressão pontual. Alterabilidade. Imersão em sulfato de sódio e etilenoglicol.

ABSTRACT

CORRÊA, F. A. Contribution to studies on Brazilian rocks for use as railway ballast aggregate: emphasis on geomechanical correlations and alterability tests. 2022. Dissertation (Master in Geotechnics) – School of Engineering of São Carlos, Graduate Program in Geotechnics, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

Ballast is a rock aggregate layer considered as one of the most important elements of the railway infrastructure. Some of the main functions performed by the ballast are to distribute stresses between train-rail-sleepers and allow good drainage of rainwater. The importance of the correct choice of rock for railway ballast is to reduce maintenance costs, caused by its degradation due to traffic and weathering. The main objective of this study was to comparatively evaluate the quality, durability and performance of technological properties of rocky materials based on correlations considering the requests of physical-mechanical, chemical-mineralogical petrographic tests of different types of rocks, for their technological characterization aiming to indicate the most suitable material in the application as aggregate for railway ballast. In this sense, this study continues research carried out by the Rock Technology Group (GTR), Graduate Program on Geotechnics, EESC-USP, involving the critical compilation of previous studies; complementation of the database with additional tests and sampling and incorporation of new data and material of interest, totaling 5 types of basic rocks (basalt, diabase and microgabbro), a monzodiorite and three other varieties of granites, used in the crushed form, for railway ballast or suitable for such purpose. Based on the most relevant petrographic characteristics, this study is a scientific study applied to a problem of the mineral aggregate industry, which exploits rocky massifs, being centered on two main aspects: a) physical-mechanical characterization of rocks with emphasis on the correlations between uniaxial compression strength and point load tests and b) alterability analysis with accelerated weathering tests (laboratory) with immersion cycles in sodium sulfate or ethylene glycol solution and oven drying, also using Soxhlet extraction for continuous leaching. In this way, the effective contribution of this study is the dissemination in technical and academic circles in order to provide very consistent information on various types of rocks used as coarse aggregate for railway ballast or for such purpose. As a result, such information may be useful to compose a larger database in terms of stone materials used as ballast in the national territory and, indirectly, collaborate in the continuous improvement of technical standards related to the subject, notably NBR-5564 (ABNT, 2021) which deals with ballast and was recently revised by the aforementioned entity.

Keywords: Railroad ballast. Rock properties. Uniaxial compressive strength. Point load test. Alterability. Immersion in sodium sulfate and ethylene glycol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Síntese dos procedimentos metodológicos.	28
Figura 2 - Mapa geológico simplificado dos locais de estudo.	30
Figura 3 - Vista parcial da face Leste da pedreira dos basaltos BAS1 e BAS2 - Quirinópolis (GO). 32	
Figura 4 – Vista parcial da face da cava principal da pedreira do basalto BAS3 - Santa Helena de Goiás (GO).	32
Figura 5 - Vista parcial da face oeste da cava principal da pedreira do monzogranito ITU - Campinas (SP).	33
Figura 6 – (A) Equipamento de ensaio de compressão uniaxial; (B, C) detalhe da prensa servo-controlada em contato com o corpo de prova instrumentado.	36
Figura 7 - (A) Equipamento de ensaio de compressão pontual; (B, C, D) detalhe das ponteiros cônicas em contato com os corpos de prova nas três formas ensaiadas: tabular, Ø76 mm e Ø56 mm, respectivamente.	36
Figura 8 - (A, B, C) Equipamento e sequência de procedimentos de ensaio de ciclagem em etilenoglicol; (D) detalhe da amostra imersa em etilenoglicol.	38
Figura 9 - Equipamento Soxhlet modificado.	39
Figura 10 – Registros microscópicos - basaltos BAS1 , BAS2 e BAS3	42
Figura 11 – Registros microscópicos - diabásio DIA , monzodiorito MON e microgabro GAB	44
Figura 12 – Registros microscópicos - granitos MOR , CAN e ITU	46
Figura 13 - Síntese dos resultados do ensaio de índices físicos.	49
Figura 14 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial. Detalhes exibindo corpos de prova antes e após o rompimento, nas formas cilíndricas e tabular saturadas, amostras BAS1 , BAS2 e ITU , respectivamente.	50
Figura 15 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial (σ_{SEC}) - condição seca.	54
Figura 16 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial (σ_{SAT}) - condição saturada.	54
Figura 17 - Resultados do ensaio de resistência à compressão pontual. Detalhes exibindo corpos de prova antes e após os rompimentos, nas formas cilíndricas e tabular, amostras BAS1 , BAS2 e BAS3 , respectivamente.	55
Figura 18 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à compressão pontual ($I_{s(50) SEC}$) - condição seca.	56
Figura 19 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à compressão pontual ($I_{s(50) SAT}$) - condição saturada.	56
Figura 20 – Síntese das equações de correlações de resistência - todas as amostras - condição seca.	58

Figura 21 – Síntese das equações de correlações de resistência - todas as amostras - condição saturada.	58
Figura 22 - Síntese das equações de correlações de resistência - rochas básicas (BAS1, BAS2, BAS3, DIA, GAB) e o monzodiorito (MON) - condição seca.....	59
Figura 23 - Síntese das equações de correlações de resistência - rochas básicas (BAS1, BAS2, BAS3, DIA, GAB) e o monzodiorito (MON) - condição saturada.	59
Figura 24 - Síntese das equações de correlações de resistência - granitos (MOR, CAN, ITU) - condição seca.	60
Figura 25 - Síntese das equações de correlações de resistência - granitos (MOR, CAN, ITU) - condição saturada.....	60
Figura 26 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à abrasão <i>Los Angeles</i>	63
Figura 27 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência ao impacto Treton.....	64
Figura 28 - Resultados do ensaio de resistência ao impacto Treton. Detalhes exibindo conjunto de fragmentos antes e após os impactos do soquete, amostras BAS1, BAS2, BAS3 e ITU , respectivamente.	65
Figura 29 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência ao esmagamento.	66
Figura 30 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à intempérie por ciclagem em solução de sulfato.	68
Figura 31 - Amostra de basalto BAS2 , (A, C) em condição natural e (B, D) após ciclagem em solução de sulfato.....	69
Figura 32 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à intempérie por ciclagem em etilenoglicol.	70
Figura 33 - Conjunto de partículas da amostra BAS2 submetidas ao ensaio de ciclagem em etilenoglicol.	70
Figura 34 – Conjunto de partículas da amostra BAS3 submetidas ao ensaio de ciclagem em etilenoglicol.	71
Figura 35 - Conjunto de partículas da amostra GAB submetidas ao ensaio de ciclagem em etilenoglicol.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio e parâmetros para agregados de lastro de ferrovia, segundo as normas NBR 5564 (ABNT, 2021), EN 13450 (DIN, 2013) e AREMA (2020).....	17
Tabela 2 - Relação dos litotipos e respectivas formações geológicas e procedências.	29
Tabela 3 - Síntese dos ensaios abordados e respectivas normas e referências.....	34
Tabela 4 - Síntese das análises petrográficas.	47
Tabela 5 - Síntese dos resultados do ensaio de índices físicos.....	48
Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial - BAS1, BAS2 e BAS3	51
Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial - DIA, MON e GAB	52
Tabela 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial - MOR, CAN e ITU	53
Tabela 9 - Síntese dos resultados médios do ensaio de resistência à compressão uniaxial (MPa).	54
Tabela 10 – Síntese dos resultados dos ensaios de compressão pontual (MPa).....	55
Tabela 11 – Síntese do valor do parâmetro “K” de correlação entre $I_{s(50)} \times \sigma_c$ - condição seca.	57
Tabela 12 – Síntese do valor do parâmetro “K” de correlação entre $I_{s(50)} \times \sigma_c$ - condição saturada....	57
Tabela 13 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à abrasão <i>Los Angeles</i>	62
Tabela 14 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência ao impacto Treton.	64
Tabela 15 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência ao esmagamento.	65
Tabela 16 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência a intempérie por ciclagem em solução de sulfato.	67
Tabela 17 – Síntese dos resultados do ensaio de resistência à intempérie por ciclagem em etilenoglicol.	69
Tabela 18 - Valores médios de EDXRF (% m/m) dos ensaios iniciais de lixiviação e da água utilizada no sistema	72
Tabela 19 - Síntese dos resultados dos ensaios físico-mecânicos e de alteração.	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	TRANSPORTE FERROVIÁRIO E O AGREGADO PARA LASTRO	13
2.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	16
2.2.1	Análise Petrográfica.....	18
2.2.2	Granulometria, Forma dos Agregados e Índices Físicos	19
2.2.3	Propriedades da Rocha Intacta.....	20
2.2.4	Propriedades do Agregado.....	22
2.2.5	Alteração e Alterabilidade	23
3	METODOLOGIA	27
3.1	CONTEXTO GEOLÓGICO DOS MATERIAIS E AMOSTRAGEM.....	29
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	40
4.1.1	Rochas Básicas e o Monzodiorito.....	40
4.1.2	Granitos	45
4.2	ÍNDICES FÍSICOS	48
4.3	PROPRIEDADES DA ROCHA INTACTA	49
4.4	PROPRIEDADES DO AGREGADO	62
4.5	ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE.....	66
4.6	SÍNTESE DOS RESULTADOS FÍSICO-MECÂNICOS E DE ALTERABILIDADE.....	73
5	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o Brasil tem realizado pesquisas para implementação de novas ferrovias lastradas e/ou readequação das já existentes, em geral para o essencial e estratégico transporte e escoamento de produtos entre regiões produtoras e portos, desempenhando uma importante contribuição na economia do país. Os estudos estão também relacionados ao transporte de passageiros interligando, por exemplo, algumas das principais cidades do país (SANTOS, 2021; REVISTA FERROVIÁRIA, 2019; CAGNON et al., 2015).

As ferrovias lastradas predominam principalmente pela economia na implantação, facilidade na drenagem das águas pluviais e fácil manutenção. Portanto, simultaneamente ao avanço tecnológico na manufatura de trilhos e dormentes, também torna-se necessário intensificar estudos sobre as propriedades tecnológicas compatíveis com as solicitações impostas em serviço para materiais pétreos utilizados como agregado, sem ligantes, nos lastros de ferrovias, relacionando aspectos petrográficos (FRASCÁ, 2019; GANESHA et al., 2016; POMONIS et al., 2007), físico-mecânicos (DIÓGENES et al., 2020; ESFAHANI et al., 2019; WUM et al., 2018; PAIVA et al., 2018; PIRES et al., 2017) e de alterabilidade (APAYDIN & YILMAZ, 2020; CELIK & AYGUN, 2019; VAN BLERK et al., 2017; SADEGUI et al., 2016), visto as condições intempéricas que estes materiais rochosos estarão expostos em clima tropical, predominante em grande extensão do território brasileiro, podendo resultar na decomposição e desagregação da rocha.

Portanto, a demanda existente e os interesses governamentais e da indústria em alavancar investimentos e avanços tecnológicos no setor ferroviário no sentido de ampliar a infraestrutura brasileira em transportes impulsionaram o Grupo de Tecnologia de Rochas (GTR) da área de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) a avançar em estudos de caracterização tecnológica de agregados de diferentes tipos de rochas para as principais aplicações como lastro de ferrovia, dando continuidade a pesquisas que vêm sendo desenvolvidas neste setor (CORRÊA et al., 2022; SANTOS, 2021; SANTOS et al., 2019, 2021; CURTIS NETO, 2019; CURTIS NETO et al., 2018; REMÉDIO et al., 2018; REMÉDIO, 2017).

1.1 OBJETIVOS

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

O objetivo principal é avaliar, de modo comparativo e em escala laboratorial, as propriedades tecnológicas de nove materiais pétreos já utilizados como agregado, sem ligantes, para lastro ferroviário, ou então, com aptidão para tal finalidade, com base em análises petrográficas detalhadas, propriedades físicas, mecânicas e de alterabilidade, de modo a realizar a caracterização tecnológica e analisar a evolução da degradação desses materiais, representando as solicitações físico-mecânicas e

de exposição constante às intempéries impostas ao lastro de uma ferrovia em serviço em região de clima tropical.

De modo mais detalhado, o presente estudo tem seus objetivos específicos centrados em duas vertentes principais:

- a) Caracterização física e mecânica de diferentes rochas, com ênfase na determinação da resistência à compressão uniaxial e correlações entre suas estimativas por meio do ensaio de compressão pontual;
- b) Estudos de alterabilidade com ensaios de intemperismo acelerado (laboratorial) de rochas, com ciclagens de imersão em solução de sulfato de sódio ou etilenoglicol e secagem em estufa.

Desta forma, entende-se como contribuição efetiva deste trabalho, ampla divulgação nos meios técnicos e acadêmicos no sentido de disponibilizar informações bastante consistentes e abrangentes de diferentes tipos de rochas utilizadas como agregado graúdo para lastro ferroviário ou com possível aptidão para tal finalidade. Em consequência, tais informações poderão ser úteis à formação de um banco de dados mais amplo em termos dos materiais pétreos empregados como lastro em território nacional e, de modo indireto, colaborar ao contínuo aperfeiçoamento de normas técnicas relacionadas ao tema, notadamente a NBR 5564 (ABNT, 2021) que foi revisada recentemente pela referida entidade e contribuir para a previsibilidade de manutenção do lastro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir é apresentada a revisão bibliográfica realizada sobre o tema de estudo do trabalho.

2.1 TRANSPORTE FERROVIÁRIO E O AGREGADO PARA LASTRO

O crescimento econômico está evidentemente atrelado ao transporte e aumento da demanda de bens e serviços. O território brasileiro possui grandes centros de geração de desenvolvimento e por ser um país de grande extensão territorial, e estes se fazerem distantes uns dos outros, torna-se necessário o uso do transporte terrestre como um meio para que produtos de diversos segmentos alcancem seus destinos, exigindo desta forma, cada vez um maior volume de tráfego e uma maior eficiência e qualidade de transporte. Baseando-se nisto, nos últimos anos o Brasil tem aumentado o número de pesquisas e projetos de implementação de novas obras ferroviárias, uma vez que o transporte ferroviário vem se tornando fundamental para o desenvolvimento econômico do país, por possibilitar a distribuição em grande escala de diversos tipos de produtos, mercadorias e passageiros, interligando Estados, cidades, indústrias e portos (CONSTANCIO, 2020; SANTOS et al., 2019).

O transporte ferroviário e o desempenho das vias férreas resultam de uma adequada qualidade e interação dos diversos elementos e camadas do sistema convencional (trilhos, dormentes, lastro, sublastro e plataforma), em resposta às solicitações impostas pelo trem. O objetivo da estrutura ferroviária é fornecer estabilidade, segurança e uma base eficiente para que os trens funcionem em velocidades e cargas por eixo diferentes, proporcionando um transporte econômico, confiável e confortável, bem como a economicidade do modelo construtivo e de manutenção. Para atingir estes objetivos, a geometria da via deve ser mantida e cada componente da estrutura deve desempenhar suas funções e exigências de forma satisfatória, sob diferentes condições ambientais e operacionais.

Desta forma, considerando o material pétreo que irá compor o lastro, analisados os critérios geológicos e econômicos para seleção da área para instalação do empreendimento mineral e da forma de exploração de rochas, e definidas a finalidade econômica, o mercado consumidor, a demanda, e considerada a distância das áreas favoráveis para prospecção, a presença de vias de acesso, disponibilidade de energia dentre outros, devem-se iniciar as etapas de exploração e produção mineral. Posteriormente prepara-se o terreno para iniciar as operações de lavra e as perfurações no maciço, por meio de métodos percussivos ou rotativos, e carregados com explosivos objetivando efetuar desmontes dos blocos para, conseqüentemente, prosseguir com carregamento, transporte, britagem e separação das frações granulométricas do agregado em pilhas de estoque (ZHANG, 2016; ALMEIDA, 2003).

Na indústria mineral no Brasil, geralmente os agregados constituem bem mineral de produção e comercialização expressivas. São largamente utilizados na presença de ligantes (concreto e pavimento) e sem a presença de ligantes (*in natura*, em enrocamentos e no lastro ferroviário, tema deste trabalho). Sendo que propriedades particulares, físicas, mecânicas ou químicas, podem ser

influenciadas por algumas características petrográficas como a composição mineralógica e textura, de modo que alguns limites de aplicações previstos e recomendados por normas sejam críticos ou até mesmo ultrapassados.

Existem dois tipos de estruturas ferroviárias comumente utilizadas: as vias apoiadas sobre placas sólidas de concreto (via em laje) onde são assentados os trilhos, e as vias convencionais (via lastrada) que é a mais comumente utilizada. O lastro ferroviário é resumidamente a camada resiliente formada por material pétreo granular, geralmente obtido por fragmentação mecânica (britagem), com distribuição granulométrica conveniente, que é inserida onde será construída a linha férrea, sobre o qual se assentam os dormentes que, por sua vez, suportam os trilhos.

O agregado do lastro fica exposto, sem ligantes, e sujeito à ação constante de intempéries, pela presença de minerais potencialmente reativos e de baixa resistência ao intemperismo, fazendo com que estudos tecnológicos envolvendo alterabilidade sejam tão importantes quanto os de caracterização geomecânica, por assegurar durabilidade, segurança e conforto à via, desde que atenda à uma criteriosa seleção para uso (REMÉDIO, 2017; KOPPE & COSTA, 2012; FRAZÃO, 2002).

Frasca & Paraguassú (2018) definem as principais funções do lastro em: dar uma base sólida aos dormentes e distribuir as cargas, de maneira uniforme, na superfície da plataforma; assegurar boa drenagem; preencher os vazios entre os dormentes, assegurando a manutenção em suas posições, para opor resistência aos deslocamentos laterais e longitudinais; impedir o crescimento de vegetação nas vias; facilitar o trabalho durante estações chuvosas e constituir suporte elástico para a via.

As primeiras ferrovias não utilizavam lastro para suportar os dormentes, de maneira que os trilhos que constituíam a via, eram apoiados em uma base rígida formada por maciços rochosos ou grandes blocos de rocha, e isso era um dos principais causadores da falta de nivelamento e da pequena durabilidade da própria via e dos equipamentos. As adversidades foram minimizadas quando utilizada uma base resiliente, composta por material granular, capaz de absorver os impactos decorrentes das solicitações, e permitir o nivelamento da via, a transmissão dos esforços e de cargas de forma homogênea ao solo e uma drenagem eficiente. No entanto, a disponibilidade e o custo, foram os fatores significativos para a seleção do material. O agregado utilizado não sofria seleção criteriosa de propriedades e se deteriorava, demandando a recomposição ou substituição em pequenos intervalos de tempo, provocando a busca por materiais de melhor qualidade para compor o lastro (KLINCEVICIUS, 2011; CLAISSE & CALLA, 2006).

No entanto, nem toda rocha apresenta qualidades adequadas para aplicação como lastro. Alguns materiais até se mostram adequados no quesito de propriedades físico-mecânicas para tais solicitações, porém, devido às intempéries, eles sofrem alteração e, conseqüentemente, perdem suas propriedades originais, justificando a necessidade de caracterização do material em função da intempérie. A degradação ocorre devido à passagem dos veículos, impondo carregamentos cíclicos e vibrações em diferentes frequências e intensidades, e devido a fatores ambientais que podem acelerar essa degradação. O comportamento mecânico da via, ligado à rigidez vertical, é fortemente influenciado

pelas propriedades mecânicas. Essas propriedades alteram-se ao longo do tempo, com os vazios entre as partículas sendo preenchidos com materiais mais finos. Conseqüentemente, o módulo de resiliência do lastro é alterado, diminuindo a porosidade e a capacidade de drenagem (SELIG & WATERS, 1994).

Para que o desempenho ideal da via ocorra é necessário que cada componente do sistema realize suas funções adequadamente, diante das condições climáticas e dos carregamentos impostos pelo tráfego. Por esses motivos, a existência de uma camada de lastro elástica, não cimentada, resistente e bem construída, apoiada sobre um subleito estável e compactado, a compreensão do comportamento mecânico do agregado e dos fatores que contribuem para sua degradação são essenciais para garantia da qualidade de rolagem da via, para a economia e redução de manutenções de uma ferrovia.

Como requisitos desejáveis para uso em lastros ferroviários, os agregados devem ser selecionados ao ponto de apresentarem as seguintes propriedades: capacidade de manter suas características geomecânicas inalteradas ao máximo com o decorrer do tempo; alta tenacidade, para resistir ao impacto dos instrumentos de compactação; alta resistência ao desgaste, para evitar a moagem devido à passagem dos veículos e à movimentação horizontal dos trilhos; alta resistência à compressão, para suporte das cargas solicitantes e distribuí-las eficientemente sobre o leito; alta resistência à alteração, para suportar as ações intempéricas, impedir a formação de finos e evitar a redução do índice de vazios necessários a uma boa drenagem e forma adequada das partículas após britagem, para propiciar tanto um bom imbricamento dos grãos como garantir uma adequada resistência mecânica (FRASCÁ & PARAGUASSÚ, 2018; RAYMOND, 1985).

Nas fases iniciais de pesquisa mineral em maciços rochosos a serem explorados e empregados como agregado, o reconhecimento litológico é essencial, assim como o detalhamento das propriedades geotécnicas, de modo a empregar-se métodos investigativos e amostragens adequados, levando em conta as variedades geológicas. Entretanto, nem sempre o detalhamento necessário é reproduzido, gerando incertezas nos produtos de um empreendimento mineral.

Para uma exploração mineral adequada, testes avaliativos devem ser rotineiros, sendo que a variabilidade em termos tecnológicos se deve às diferenças de cunho geológico do maciço. Com base nestas premissas, Remédio (2017), por exemplo, selecionou diferentes tipos de rochas (microgabro, migmatito e granitos) tanto por apresentarem reconhecidas competências geomecânicas, quanto por produzirem britas em pedreiras ativas no trecho Campinas-São Paulo. Em seu trabalho, o autor destaca a importância do estudo de caracterização dos materiais pétreos a serem empregados neste tipo de ferrovia. Rangel et al. (2016) ao analisarem o uso de agregados basálticos de um mesmo maciço para serem empregados como lastro, notaram a distinção entre os litotipos, de acordo com a presença de amígdalas e profundidades relacionadas a cada rocha, sendo a porosidade aparente de um dos materiais muito superior à do basalto denso, porém, em relação a resistência e a forma, os dois litotipos apresentaram resultados satisfatórios de acordo com os padrões normativos para uso.

Portanto, estudos de caracterização tecnológica dos materiais pétreos a serem empregados neste tipo de ferrovia lastrada são de fundamental importância, influenciando na exequibilidade do projeto, na segurança da via e na qualidade do serviço.

2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Os métodos investigativos, complementares às etapas iniciais, são essenciais para seleção, caracterização e previsão do comportamento dos agregados rochosos. As propriedades físico-mecânicas, petrográficas e de alteração e alterabilidade são obtidas por meio de ensaios laboratoriais em corpos de prova e amostras de britas para classificação adequada do material, de acordo com as exigências de normas técnicas empregadas, trazendo resultados evidentes para a escolha apropriada dos agregados diante das aplicações requeridas (FRAZÃO, 2002).

A norma NBR 7217 (ABNT, 1987), assim como Farias & Palmeira (2007) e Frascá & Paraguassú (2018) definem os agregados como materiais rochosos produzidos na forma granular (fragmentos) que devem ter dimensões e propriedades específicas para as devidas aplicações, podendo ser classificados em função da sua natureza de obtenção (naturais: extraído em forma de fragmentos, artificiais: que passam por algum processo de fragmentação); densidade: (leves, pesados e normais); granulometria (grãos e miúdos); massa específica; porosidade; permeabilidade; absorção de água; dureza; calor específico; resistências à compressão, à tração (direta ou indireta), ao cisalhamento, ao impacto, à deformabilidade (ou elasticidade), à abrasividade, dentre outras.

Nas rochas, os minerais são cimentados uns aos outros por uma matriz ou por uma ligação mecânica entre os contatos. Por isso, a classificação genética das rochas, obtida pela gênese ou processo que as originou, não é suficiente para avaliar a qualidade do lastro. A matriz ou ligação entre minerais e a existência ou não de vazios e poros é o que determina a resistência da rocha. Quanto maior for o tamanho do cristal na matriz, maior será a influência dos planos de clivagem dos cristais no início e na propagação de trincas (BOUCHER & SELIG, 1987).

Visando avaliar materiais pétreos empregados como agregados em lastro ferroviário, diretrizes e informações condizentes de normas brasileiras e internacionais que tratam desta aplicação, tais como a NBR 5564 (ABNT, 2021): Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio, que foi revisada recentemente e separou a caracterização dos materiais e os valores limites de acordo com o tipo de rocha; os métodos de ensaios do IPT (1980), a norma européia EN 13450 – *Aggregates for railway ballast*, e; a norma americana AREMA - *American Railway Engineering and Maintenance of Way Association*, entre outras, preconizam alguns ensaios e valores mínimos e máximos de referência para diferentes propriedades do material (Tabela 1).

Tabela 1 - Ensaios e parâmetros para agregados de lastro de ferrovia, segundo as normas NBR 5564 (ABNT, 2021), EN 13450 (DIN, 2013) e AREMA (2020).

Características	NBR 5564 (ABNT, 2021)						EN 13450 (DIN, 2013)	AREMA (2020)
	Granito	Basalto	Calcário Calcítico	Calcário Dolomítico	Demais Litologias	Verificado conforme		
Granulometria - mm	76,2 – 12,5					NBR NM 248 (ABNT)	63 – 22,4 (EN933-1)	(ASTM-C136)
Análise Petrográfica	-					-	Padrão	Padrão
Forma média das partículas – Paquímetro ou Calibre	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Anexo A ou I	Cúbica e lamelares < 4	Cúbica
Partículas não cúbicas – Paquímetro ou Calibre (máx.) - %	15	17	15	15	15	Anexo A ou I	-	-
Massa específica aparente (mín.) - kg/m ³	2600	2700	2600	2650	2500	Anexo B	(EN 1097–2)	2600 (ASTM-C127)
Porosidade aparente (máx.) - %	2	2	2	2	2	Anexo B	-	-
Absorção de água (máx.) - %	1	1	2	2	2	Anexo B	(EN 1097–6)	2 (ASTM-C127)
Resistência à intempérie (máx.) - % *	10	10	10	10	10	Anexo C	(EN 1367–2)	5 (ASTM-C88)
Limite de massa unitária no estado solto (mín.) - kg/m ³	1250	1250	1250	1250	1250	NBR 16972 (ABNT)	-	-
Material pulverulento (máx.) - %	1	1	1	1	1	NBR 16973 (ABNT)	-	-
Torrões de argila (máx.) - %	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	NBR 7218 (ABNT)	-	-
Resistência à abrasão Los Angeles (máx.) - %	35	30	30	30	30	NBR NM 51 (ABNT)	12 - 24 (EN 1097-2)	25 – 40 (ASTM-C535-C131)
* Resistência à compressão axial - saturado (mín.) – MPa	100	100	100	100	100	Anexo D	-	-
Resistência ao choque - Treton (máx.) - % *	25	25	25	25	25	Anexo E	-	-
Teor fragmentos macios e friáveis (máx.) - % *	5	5	5	5	5	Anexo F	-	0,5 (ASTM-C142)
Resistência ao desgaste - Micro Deval (máx.) - % *			n.a.			Anexo J	5 - 15 (EN 1097-1)	-
Resistência à compressão pontual – Point load (mín.) – kg			n.a.			Anexo K	-	1200 (seco) 800 (saturado)

Fonte: Modificado de NBR 5564 (ABNT, 2021)

Nota 1: (*) Ensaios opcionais da norma NBR 5564 (ABNT, 2021). O não atendimento aos valores de referência não implica na rejeição do agregado, ficando a critério do comprador a tomada de decisão quanto à sua aceitação.

Nota 2: Algumas das faixas recomendadas podem ainda variar de acordo com os tipos de lastro e de rocha.

Os valores mínimos e máximos de referência para diferentes propriedades do material de lastro ferroviário variam de acordo com as geologias locais e os ambientes climáticos de origem da rocha, dentre outras peculiaridades de cada região/país. A diferenciação entre as normas NBR 5564 (ABNT, 2021), EN 13450 (DIN, 2013) e a AREMA (2020), ocorre, principalmente, em relação à exigência do ensaio Micro-Deval, que junto com o ensaio de resistência a abrasão são, segundo a norma européia, os ensaios necessários e mais significativos para caracterização da qualidade do agregado pétreo para lastro. Adicionalmente, a norma brasileira permite um índice de até 30% ou 35% de perda de massa por abrasão *Los Angeles*, a depender do tipo de rocha, similar a norma americana com índice de até 40%, enquanto a norma européia determina um limite mais conservador de 24% (GUO et al., 2022; FATHALI et al., 2021; SADEGUI et al., 2016).

A seguir é apresentada uma breve revisão bibliográfica dos principais procedimentos laboratoriais empregados para determinar as propriedades dos materiais pétreos, sendo as propriedades aqui listadas e descritas de extrema importância à caracterização dos agregados no emprego como lastro ferroviário.

2.2.1 Análise Petrográfica

A análise petrográfica faz parte do conjunto de recursos empregados para caracterização de rochas visando o uso como agregado, sendo uma ferramenta importante na correlação direta com outros ensaios tradicionais e eventuais valores de propriedades tecnológicas, sendo as comparações geralmente referenciadas com a petrografia. A análise possibilita identificar e detalhar características, tais como composição mineralógica (minerais principais, acessórios e secundários e sua quantificação), tipos de estrutura e textura (forma e arranjo dos minerais), granulção, feições de deformação e de alteração (minerais sãos, alterados e o tipo de alteração), presença de minerais deletérios, padrão de microfissuramento (intercristalina ou intracristalina), entre outras que podem influenciar diretamente no comportamento físico-mecânico e na durabilidade sob as condições de exposição que o material será submetido (FRASCÁ, 2007; FRAZÃO, 2002).

No caso de aplicações de materiais pétreos como lastro, as análises petrográfica podem restringir o uso de agregados graúdos caso sejam encontradas características como mineralogias com altas quantidades de micas e sulfetos, texturas com baixa consolidação, alta porosidade ou friabilidade, e estruturas minerais com fraquezas como foliação, juntas e planos de estratificação entre outras.

A análise petrográfica é realizada por descrição de sessões delgadas de rochas, utilizando-se de técnicas de microscopia óptica, que refinam as caracterizações prévias obtidas por descrições macroscópicas. As composições mineralógicas e textuais de uma rocha não são características unicamente para classificação petrogenética. Estes parâmetros são decisivos para muitas propriedades de engenharia, de modo que este tipo de análise possa ser uma ferramenta para exploração, caracterização, seleção e controle dos agregados (ANATASIO et al., 2016).

Uma desvantagem dos métodos microscópicos em relação aos ensaios convencionais físico-mecânicos é devido a estes não responderem quantitativamente aos problemas. Entretanto, para identificação de minerais secundários expansivos a petrografia é essencial, pois estes podem absorver uma quantidade de água ainda que inexpressiva, provocando em rochas de baixa porosidade (< 1%) microfissuramentos, culminando na redução de resistência, durabilidade e aumento deformabilidade dos materiais.

Keikha e Keykha (2013) realizaram um estudo petrográfico de dois granitos, indicando correlações significativas entre resistência à compressão uniaxial, à compressão pontual e resistência à tração, em função de parâmetros petrográficos, incluindo o tamanho do grão, a composição mineralógica quando comparados aos valores de compressão uniaxial, destacando que: a composição mineralógica é uma das principais propriedades que controlam a resistência da rocha; a percentagem de minerais “fortes” (quartzo, ortoclásio e granada) e minerais fracos (plagioclásio, biotita e muscovita) pode ter efeitos opostos sobre os parâmetros de resistência; o grão (mineral) tamanho médio tem impacto na resistência da rocha; a resistência aumenta à medida que diminui o tamanho de grão; a resistência aumenta à medida que o quartzo e o ortoclásio aumentam; pelo contrário, a abundância de plagioclásio provoca uma redução na resistência.

Nagalli et al. (2016) ao desenvolverem pesquisas experimentais em basaltos com o objetivo de determinar o grau de correlação entre análise petrográfica com resultados de ensaios de abrasão *Los Angeles*, densidade e absorção de água, concluíram que a granulação e a proporção de alguns minerais mais significativos, influem consideravelmente nos resultados físicos e mecânicos.

2.2.2 Granulometria, Forma dos Agregados e Índices Físicos

A distribuição granulométrica e a forma adequada das partículas (gradação ótima) é uma das propriedades fundamentais, sendo a granulometria do agregado determinada através de peneiramentos e pesagens, de modo a construir uma curva granulométrica. Conforme visto, no caso do lastro, a norma NBR 5564 (ABNT, 2021) especifica que a distribuição granulométrica deve situar-se entre 12 e 76,2 mm. Deve-se considerar e proporcionar ao material: o preenchimento de vazios para garantir a distribuição uniforme de cargas, uma boa drenagem, permitindo o escoamento da água, mantendo a permeabilidade e a rigidez da camada, estando relacionada à facilidade de manutenção e à maior resistência à deformação permanente.

Agregados são partículas irregulares de difícil representação, tornando-se adequado utilizar índices para determinar a classificação da forma dos fragmentos referente a sua geometria tridimensional, que consiste na média das relações entre o comprimento e a espessura para cada fragmento do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe. A forma dos fragmentos é classificanda como cúbica, alongada, lamelar e alongada-lamelar (FARIAS & PALMEIRA, 2007).

Devido à grande variação nas propriedades das rochas, podem-se utilizar, como referência para descrevê-las, algumas medições básicas. Por serem relativamente fáceis de serem medidas, são muito úteis neste aspecto e podem ser designadas como propriedades-índice das amostras de rocha, refletindo a estrutura, a composição, o arranjo espacial e o comportamento mecânico do material, como: densidade, teor de umidade, porosidade, capacidade de absorção, permeabilidade, durabilidade e resistência (AZEVEDO & MARQUES, 2006).

A determinação dos índices físicos é um método simples, em rocha intacta, não destrutivo e essencial para a caracterização de rochas e identificação dos graus de alteração, de modo a proporcionar a seleção para uso como agregado. Utilizando-se de relações entre massas (seca, saturada e submersa em água) são obtidas as propriedades de massas específicas, porosidade e absorção de água, sendo possível realizar correlações entre estas mesmas e outras propriedades e comportamento dos materiais. Dentre os índices físicos, os mais importantes são o peso específico e a porosidade, pois são os mais influentes nas propriedades mecânicas das rochas. A presença de porosidade reduz a resistência dos materiais, ao passo que aumenta a capacidade de sofrer deformação. Informações sobre a porosidade natural das rochas são frequentemente ignoradas em descrições petrológicas, mas estas informações são muito importantes quando esta descrição da petrografia é utilizada para fins de avaliação de comportamento mecânico (PARAGUASSÚ et al., 2014; FRAZÃO, 2012).

2.2.3 Propriedades da Rocha Intacta

Dentre as propriedades de resistência mecânica da rocha amplamente exploradas, o ensaio de resistência à compressão uniaxial (σ_c) trata de um método antigo, conveniente e usual, difundido principalmente para estudos de caracterização e classificação geomecânica, mas que também traz certas correlações para estudos de rochas britadas. O método é preconizado pelas diretrizes das normas NBR 5564 (ABNT, 2021), NBR 10341 (ABNT, 2006) e ISRM (1979) e consiste na avaliação da tensão de ruptura de materiais rochosos quando submetidas a esforços físicos de compressão paralelamente a seu eixo longitudinal e deformabilidade, podendo ser determinada isoladamente ou associada à determinação do módulo de deformação estático e do coeficiente de Poisson.

Neste ensaio os corpos de prova cilíndricos, por exemplo, são preparados por meio de testemunhos extraídos de blocos de rochas ou de sondagem e moldados levando em consideração as relações de diâmetro, forma, faces, altura e base. Posteriormente, são levados a uma prensa que realiza aplicações de carga crescentes e constantes, até que ocorra a ruptura em função da taxa de carregamento e velocidade da carga aplicada. Após o rompimento, é obtida a tensão de ruptura da rocha por compressão uniaxial (σ_c) através da relação da força máxima de ruptura atingida (carregamento máximo) sobre a área do topo do corpo de prova.

Cabe destacar que através do ensaio de resistência a compressão uniaxial realizado em corpos de prova nas condições seca e saturada é possível avaliar o coeficiente (R) de enfraquecimento

hidráulico de cada rocha em relação aos esforços nelas exercidos, permitindo relacionar o efeito da água na resistência do material (MATTOS et al., 2013; MESQUITA, 2002).

O método para determinar a propriedade de resistência à compressão uniaxial da rocha requer procedimentos complexos, morosos e onerosos para preparação significativa das amostras e execução dos ensaios, além de exigir equipamentos muito mais específicos. No entanto, em alguns casos, quando são necessários testes extensivos e/ou informações oportunas e preliminares de reconhecimento, ou então que a resistência e o comportamento tensão-deformação não necessitam ser obtidos em detalhe, é possível recorrer a métodos alternativos, mais simples, rápidos e econômicos para reduzir o tempo e o custo e aferir a resistência à compressão de materiais rochosos.

O ensaio de resistência à carga pontual ($I_{s(50)}$), *point load test*, foi proposto em 1985 (ISRM) como um ensaio para determinar, de modo destrutivo, indireto, expedito e pouco oneroso, o índice de resistência à compressão das rochas, podendo ser correlacionado com a resistência à compressão uniaxial (σ_c) e outros índices de resistência. Atualmente o método é preconizado pelas diretrizes das normas NBR 5564 (ABNT, 2021), D5731 (ASTM, 2016) e ISRM (1985). O equipamento de ensaio possui uma configuração mais simples, portátil, de custo relativamente baixo e de rápida e fácil execução, o que possibilita que os procedimentos possam ser realizados em inúmeras amostras, tanto em laboratório quanto em campo, com preparação de amostras de fragmentos de rochas ou com amostras irregulares diretamente *in loco*, respectivamente.

De forma geral, uma amostra de rocha em tamanho variável e de forma cilíndrica, prismática ou irregular, é submetida a um carregamento concentrado crescente axialmente ou diametralmente (P) entre duas ponteiros cônicas, padronizadas, de aço, até a ruptura, rompendo a amostra, por tração normal ao eixo de carga e um sistema de medição da distância (D) entre os dois pontos de contato da amostra no início do teste e após o rompimento.

A partir dos resultados de ensaio de resistência à compressão pontual, por meio de fatores sugeridos de conversão variando dependendo do grau de alteração das amostras, do tipo litológico, da taxa de umidade, da forma da amostra, entre outros, é possível obter uma estimativa dos valores de ensaio de resistência à compressão uniaxial.

Tais dados podem ser usados para tomar decisões oportunas e mais informadas em diferentes situações, por exemplo, durante as fases de exploração, para uma seleção mais eficiente, rápida e econômica de amostras para ensaios de laboratório mais precisos e caros.

Em estudos pioneiros, D'Andrea et al. (1965, apud Attewell e Farmer, 1976) e Franklin et al. (1971, apud Attewell e Farmer, 1976) e Franklin (1985), definiram relações entre o índice de resistência à compressão uniaxial (σ_c) e à carga pontual ($I_{s(50)}$) considerando um fator de correlação em comum para as rochas. Neste contexto, uma série de correlações entre resultados de propriedades geotécnicas obtidas nos dois ensaios de resistência citados tem sido propostas na literatura, buscando uma convergência entre equações que permitam a obtenção de parâmetros desta resistência com

correlação para diferentes tipos de rochas. Em geral, são apresentadas correlações empíricas lineares entre σ_c e $I_{s(50)}$ com dado fator de conversão: $\sigma_c = K \times I_{s(50)}$.

2.2.4 Propriedades do Agregado

O ensaio de resistência à abrasão *Los Angeles* segue as diretrizes da norma NBR NM 51 (ABNT, 2001). Este método qualifica a resistência dos agregados, miúdos ou graúdos, por ações de atrito com a queda mútua e impacto entre os fragmentos de rocha e uma carga abrasiva composta de esferas metálicas em um tambor cilíndrico em rotação. Os resultados são utilizados como parâmetro para aplicações de britas em concreto, lastro, pavimentos e até mesmo enrocamentos. Como resultado do ensaio é obtido o coeficiente P, através das relações de massa inicial e massa retida após abrasão, representando a perda de massa por abrasão.

A representatividade do ensaio de abrasão *Los Angeles* está ligada à granulometria do material ensaiado, influenciada pelo grau de coesão (ou coerência) dos fragmentos e pelo seu formato, executado com amostras no estado seco. O resultado do ensaio não representa uma propriedade intrínseca do material. As granulometrias do agregado devem ser similares as de uso e aplicação do material, no caso de lastros de ferrovia, por exemplo, a graduação da amostra deve ser entre 12 e 76,2 mm (ABNT NBR 5564, 2021).

Diversos trabalhos tratam da importância e do controle de qualidade do ensaio em função da forma do agregado, da composição mineralógica e petrogenética das rochas. Segundo a norma, quando este método de ensaio é aplicado em amostras constituídas de fragmentos escolhidos entre os de forma mais aproximada da cúbica, provenientes de britamento manual a partir de blocos de pedra, os resultados da abrasão são, em geral, numericamente menores que os obtidos em agregados da mesma rocha, proveniente de britamento mecânico. É recomendado ainda, que a interpretação do resultado deve-se levar em conta a composição mineralógica, a estrutura e a respectiva aplicação do agregado.

Hofer et al. (2013) ao comparar os resultados do ensaio de abrasão em função da geometria e características petrográficas de dolomito, calcário, granulito e diabásio comenta que o ensaio é um dos poucos métodos mecânicos que apontam a qualidade do lastro ressaltando que, devido aos fatores antes mencionados, os resultados estão sujeitos a uma grande variabilidade no que diz respeito à petrografia, enquanto a geometria do agregado teria pouca influência quando comparada a anterior. Já Nalsund (2014) ensaiou diversas rochas (gnaiesses, gabros, milonitos, calcários, granitos etc.) e encontrou baixas correlações deste método com o uso de agregados para lastro ferroviário, mesmo que o teste categorize bem as propriedades mecânicas de uma rocha.

O ensaio de resistência ao choque no equipamento Treton, descrito pela norma NBR 5564 (ABNT, 2021), é outro método muito tradicional utilizado para determinação da resistência do agregado. O equipamento é de certa forma, simples e portátil, possibilitando uso em campo. Em resumo, a amostra de agregado a ser ensaiada, seca ou saturada, é composta por fragmentos, divididos

em três conjuntos, que devem ser o mais cúbicos possível, de modo que os corpos de prova podem ser preparados por meio de golpes manuais de martelo petrográfico. Em seguida, a amostra é inserida em um cilindro metálico oco, onde é submetida a solicitação de impacto (choque) por um soquete que cai de uma altura livre sobre o material. O resultado do ensaio é representado pela perda ao choque (T).

Al-Harthi (2001) em seus trabalhos analisando amostras de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas de diferentes tipos, idades e graus de alteração, encontrou correlações estatísticas entre as propriedades mecânicas de resistência à compressão pontual (I_s) com resistência ao impacto Treton (T), ao esmagamento (R_m) e à abrasão *Los Angeles* (P) indicando graus de correlação, conforme o índice I_s aumenta, os valores de T, R_m e P diminuem.

Quanto ao ensaio de resistência ao esmagamento, apesar de não ser previsto pelas normas NBR 5564 (ABNT, 2021) e EN 13450 (DIN, 2013), o ensaio parece pertinente para aplicações como lastro ferroviário, visto que parte das solicitações impostas à camada, podem induzir ao esmagamento do agregado (SABS 1083, 2014, ABNT NBR 9938, 2013 e FRAZÃO, 2002).

2.2.5 Alteração e Alterabilidade

Os maciços rochosos naturalmente são afetados por processos intempéricos que envolvem a ação da atmosfera, biosfera e hidrosfera, através de agentes físico-químicos que dependendo da intensidade do intemperismo sofrido, da mineralogia dos grãos, do grau de exposição climático, da água da chuva e da poluição atmosférica, podem causar danos e alterações significativas nas propriedades e características naturais das rochas, como: composição mineralógica (constituintes minerais); grau de microfissuramento; diminuição e variações nos valores de resistência e índices físicos; variação nas características de deformação, deformabilidade e permeabilidade, e diminuição de adesividade em ligantes, levando em conta a presença ou não de descontinuidades, bem como a cota topográfica e exposição a superfície (APAYDIN & YILMAZ, 2020; CELIK & AYGUN, 2019).

A alteração por intemperismo nas rochas ocorre, naturalmente, num intervalo geológico de tempo, em agregados de diferentes naturezas e diferentes formas e dimensões, manifestando-se pela desagregação (predominante em climas áridos e semiáridos) que é um mecanismo físico que leva à separação dos minerais da rocha (perda de coesão) e à progressiva individualização de seus constituintes minerais, sem implicar modificação na natureza; e pela decomposição (predominante em climas tropicais ou subtropicais) que é um mecanismo físico-químico que implica modificações progressivas na natureza dos minerais, sem implicar desagregação. A combinação desses dois mecanismos é frequente e a predominância depende principalmente das condições ambientais climáticas (VAN BLERK et al., 2018; SADEGUI et al., 2016).

Portanto, torna-se necessário o estudo dos processos superficiais, da mineralogia e do reconhecimento de minerais com baixa estabilidade nos materiais pétreos, de modo a avaliar o nível de alteração inicial e a taxa de degradação ao longo do tempo, principalmente no uso sem ligantes,

como no caso de lastro ferroviário, em que ficam sujeitos à exposição dos processos intempéricos que contribuem para a alteração, de natureza física ou química, estando relacionados à interação entre os minerais dos agregados e o clima da região, fazendo com que estudos envolvendo alterabilidade sejam tão importantes quanto os de caracterização geomecânica, especialmente em regiões de clima tropical.

As normas internacionais para caracterização de agregados para uso com lastro ferroviário são muito parecidas com as normas brasileiras, no entanto, deve-se atentar às peculiaridades, como localização, parâmetros climáticos, entre outras. Estes ensaios de resistências às intempéries permitem observar, por exemplo, a susceptibilidade da rocha a processos em que há presença de argilominerais expansivos para o caso de ambientes tropicais, diferentemente da Europa onde se sugere este tipo de ensaio como auxiliar nos resultados dos ciclos de congelamento e degelo.

Comparando o efeito da alterabilidade em diferentes tipos de rochas, por exemplo, graníticas e basálticas em geral, a presença de vesículas e amígdalas nos basaltos, bem como fraturas, aceleram processos de alteração e decomposição com maior facilidade em circunstâncias de exposição a climas quentes e úmidos, causando variação no comportamento geotécnico e tecnológico e à diminuição da resistência mecânica da rocha. Caso estas cavidades e fissuras apresentem materiais expansivos, o potencial de desagregação se eleva consideravelmente, sendo efeito dos basaltos apresentarem composição mineral principalmente por plagioclásios e piroxênios, menos estáveis se comparados a mineralogia de granitos (FRAZÃO, 2012; GOMES, 2001; SOUZA, 1992).

O grau de alteração e a alterabilidade podem também ser avaliados por análises petrográficas e mineralógicas e por ensaios físicos e mecânicos. Segue alguns dos procedimentos sugeridos por diversos autores para a avaliação dos índices de alterabilidade de rochas: análises petrográficas, pode-se qualificar e quantificar os minerais sãos e alterados, avaliar o estado microfissural e também determinar os teores e tipos de minerais secundários; variação dos valores de índices físicos, a massa específica aparente de uma rocha diminui à medida que a alteração aumenta, enquanto cresce a porosidade e a capacidade de absorção d'água, e; variação da resistência se dá quando uma rocha se altera e ocorre a redução de sua resistência mecânica. Estes índices variam, atribuindo às rochas classificações que vão desde sãs até muito alteradas (FRAZÃO, 2012).

Nesta perspectiva, uma variedade de ensaios foi desenvolvida objetivando avaliar e caracterizar o estado de alteração ou a alterabilidade dos materiais rochosos, com a intenção de simular, em laboratório, as condições intempéricas e os efeitos da desagregação causada pelo intemperismo físico, como, por exemplo, a cristalização de sais e a expansão de argilas por adsorção de água. Seguem alguns exemplos representativos mais recentes da literatura: saturação em água, nas condições ambientais do laboratório e secagem em estufa; lixiviação contínua em extratores Soxhlet; saturação em solução de sulfato de sódio ou de magnésio e secagem em estufa, e; saturação em etilenoglicol.

Qualquer um desses ensaios pode ser acompanhado com medidas da variação das propriedades físicas ou físico-mecânicas das rochas. Diversas referências utilizaram com sucesso estes ensaios para caracterizar o estado de alteração ou a alterabilidade de diferentes tipos de rochas. Destacam-se aqui

os trabalhos da literatura: Corrêa, (2022); Santos et al. (2021, 2019); Apaydin & Yilmaz, (2020); Celik; Aygun, (2019); Czinder & Torok, (2019); Curtis Neto et al. (2018); Koken et al. (2018); Van Blerk et al. (2018); Remédio, (2017); Guzzi (2017); Sadegui et al. (2016); Meurer et al. (2016); Dias Filho et al. (2016); Leyland et al. (2014); Oliveira et al. (2013, 2015); Loannou et al. (2013), Paige-Green, (2007); Gomes (2001); Frazão & Frascá (1999); Marrano & Paraguassú (1998); Frazão (1993); Farjallat (1971).

O ensaio de resistência a intempérie por solução de sulfato de sódio, decaidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ou anidro (Na_2SO_4), por exemplo, é realizado dissolvendo-se uma quantidade predeterminada de reagente por litro de água, tal que, assegure não só a saturação, mas também a presença de excesso de cristais na solução, após preparação. Este procedimento de saturação na solução e secagem na estufa é repetido por crescentes vezes/ciclos. Como resultado do ensaio são realizados exames visuais dos corpos de prova, acompanhados de fotografias, para verificação de eventuais danos (fissuras, trincas, escamações, oxidação de minerais, desagregação e outros) e calculada a resistência à intempérie.

Já o ensaio mediante ciclagem acelerada utilizando o etilenoglicol, recentemente incorporado pela NBR 5564 (ABNT, 2021) como ensaio recomendado, por exemplo, que é um dos produtos que reagem com as argilas expansivas do grupo das montmorilonitas (quando presentes), para formar um complexo organoargiloso de maior volume que dependendo da quantidade e distribuição de argila expansiva e da capacidade de absorver o etilenoglicol, pode causar a desintegração expansiva da amostra. Ocorrendo a desintegração do material submetido ao ensaio, é esperado que este ocorra com amostras da mesma rocha expostas por longo tempo, à molhagem e secagem e ao congelamento e degelo em uma condição de serviço em meio saturado. Os resultados deste ensaio devem ser tomados como base para comparação da resistência de diferentes tipos de materiais considerados para o mesmo uso. Porém, os resultados deste ensaio por si só, não fornecem base para conclusão de que o material seja satisfatório ou insatisfatório, a menos que a amostra não tenha sofrido qualquer forma de ataque ou tenha sofrido completa desintegração.

O ensaio utilizando o extrator de lixiviação contínua Soxhlet, por exemplo, de grande porte, trata-se de outro método que já foi muito utilizado no passado para estudos da alterabilidade dos materiais (GOMES, 2001; LADEIRA & MINETTE, 1984; HYPOLITO & VALARELLI, 1972; FARJALLAT, 1971), porque procura simular condições naturais de alteração com velocidades de percolação e temperaturas muito maiores das que ocorrem na natureza, removendo constituintes iônicos e podendo provocar hidratações de minerais secundários que podem sofrer expansões gerando tensões internas nas microfissuras das rochas. O ambiente climático no interior do extrator assemelha-se ao clima tropical úmido, marcado por altas temperaturas e altos índices pluviométricos. Em aplicações como lastro de ferrovias, por exemplo, o agregado deve suportar tanto as solicitações mecânicas impostas, quanto apresentar mínima degradação possível frente às condições intempéricas que estes materiais rochosos estarão expostos predominantemente em clima tropical.

Aparelhos do tipo Soxhlet possuem normalmente 2,6 m de altura, constituídos de manta aquecedora, balão para aquecimento de água, tubo extrator e um condensador. A água presente no balão se evapora devido ao aquecimento controlável, o vapor gerado é conduzido até a unidade de condensação precipitando-se sobre a amostra. Quando a água atinge o nível do sifão, é sifonada de volta para o balão, iniciando um novo ciclo. O condensador normalmente é formado por um helicóide em formato espiral, onde um fluxo de água corrente é constantemente inserido para permitir a troca de calor dos vapores oriundos da base do equipamento. Este processo de refrigeração gera o descarte de grandes volumes de água durante os vários ciclos necessários do ensaio (CORRÊA, 2022).

3 METODOLOGIA

Há alguns anos, o Grupo de Tecnologia de Rochas (GTR) da Área de Pós-Graduação em Geotecnia da EESC-USP vêm retomando desde estudos mais abrangentes de caracterização de agregados (CORRÊA et al., 2022; SANTOS et al., 2019; CURTIS NETO, 2019; CURTIS NETO et al., 2018) como alguns mais específicos voltados ao uso de rocha britada em lastros de ferrovia (SANTOS, 2021; SANTOS et al., 2021, 2019; REMÉDIO et al., 2018; REMÉDIO, 2017).

Com base nestas premissas, os principais aspectos desta pesquisa se inter-relacionam com propriedades físico-mecânicas, químico-mineralógicas petrográficas de diversos tipos de rochas visando uma avaliação abrangente da qualidade, do desempenho (propriedades tecnológicas) e também da gênese dos materiais em termos de sua caracterização para emprego como lastro ferroviário. Para tanto, foram utilizados diferentes níveis de informações:

- a) compilação crítica da base de dados acima referidos;
- b) complementação desta base com a realização de ensaios adicionais, quando necessários;
- c) fontes oriundas de outros trabalhos técnicos desenvolvidos pelo GTR; e, ainda,
- d) incorporação de dados de um “novo” material rochoso, mas ainda não qualificado para lastro.

Nos casos de materiais de pesquisas anteriores, utilizou-se o acervo remanescente de amostras disponíveis no Departamento de Geotecnia (EESC) que, uma vez conhecida sua procedência, garantiu o manuseio de material exatamente igual ao qualificado nos estudos prévios.

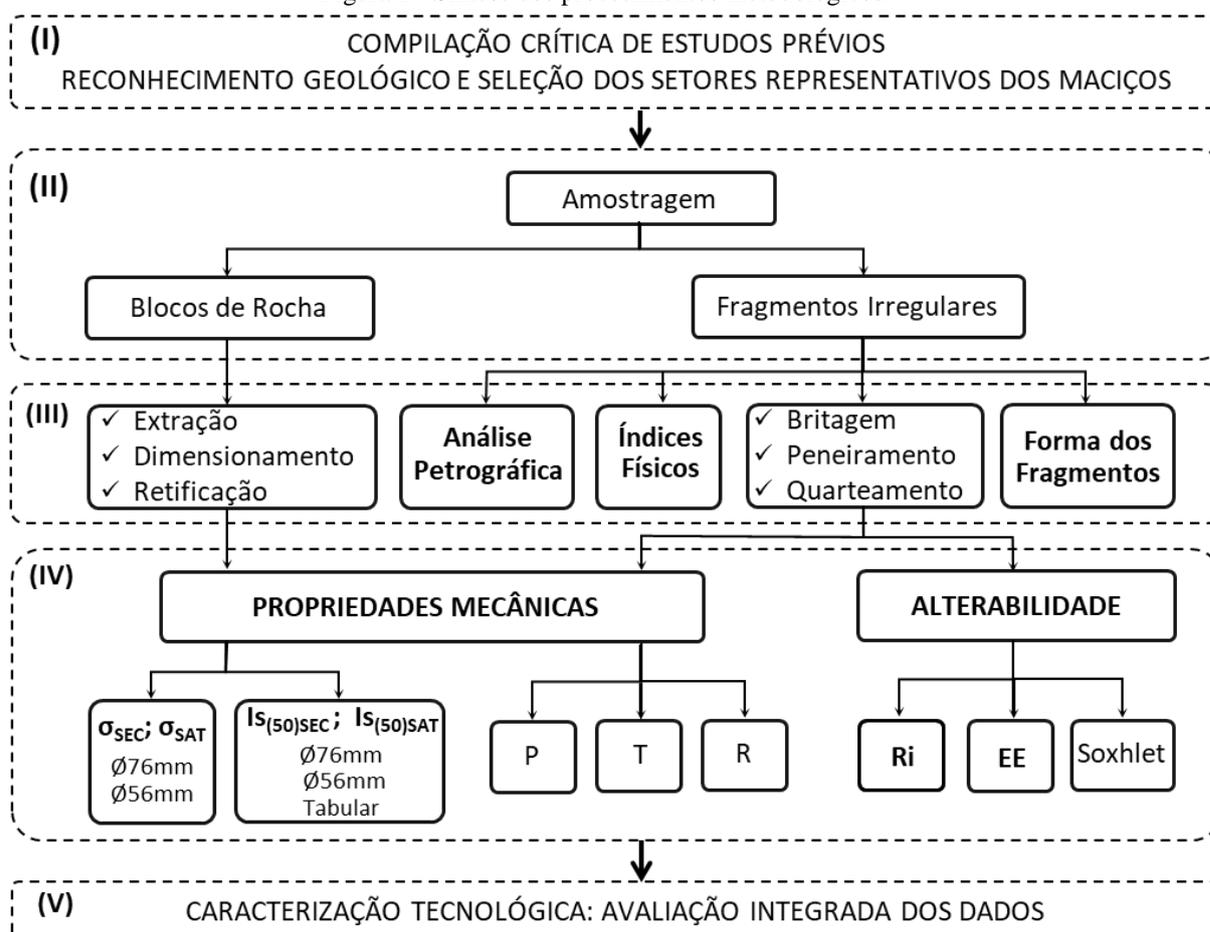
Em linhas gerais, o roteiro metodológico consistiu das seguintes etapas (Figura 1):

- (I) Compilação de dados e informações obtidas em estudos prévios desenvolvidos no âmbito do GTR, além de etapas de campo em exposições das unidades geológicas estudadas e descrições petrográficas nas frentes de desmonte das pedreiras para reconhecimento geológico de campo e seleção dos setores representativos dos maciços;
- (II) Amostragem criteriosa de blocos e de fragmentos irregulares de material rochoso para realização de ensaios laboratoriais tradicionais e/ou que estão sendo normatizados para caracterização de diferentes litotipos;
- (III) Realização da análise petrográfica, da determinação dos índices físicos e da forma dos fragmentos; além da preparação das amostras para ensaios físicos-mecânicos e de alterabilidade, por meio da obtenção e extratificação das amostras cilíndricas e posterior dimensionamento e retificação dos corpos de prova para ensaios na rocha em sua forma intacta. No caso do agregado graúdo, envolveu etapas laboratoriais de britagem, de

peneiramento, de homogeneização e de quarteamento para obtenção das frações granulométricas e alíquotas requeridas pelas diretrizes de cada ensaio;

- (IV) Os materiais foram ensaiados e obtidos os valores das resistências: à compressão uniaxial - σ_{SEC} e σ_{SAT} (nas dimensões $\varnothing 76$ e 56 mm, nas condições secas e saturadas); à compressão pontual - $Is_{(50)SEC}$ e $Is_{(50)SAT}$ (amostras tanto cilíndricas com $\varnothing 76$ e 56 mm quanto tabulares, nas condições secas e saturadas), à abrasão *Los Angeles* (P), ao impacto Treton (T), ao esmagamento (R), à intempérie por ciclagem em imersão em solução de sulfato de sódio (Ri) ou em etilenoglicol (EE), ambos com secagem em estufa, além de ensaio complementar de lixiviação contínua em equipamento extrator Soxhlet e, finalmente;
- (V) Avaliação integrada dos dados obtidos nos ensaios de caracterização tecnológica.

Figura 1 - Síntese dos procedimentos metodológicos.



Fonte: Do autor (2022).

Nota: σ_{SEC} e σ_{SAT} : resistência à compressão uniaxial e pontual na condição seca e saturada, respectivamente; $Is_{(50)SEC}$ e $Is_{(50)SAT}$: resistência à compressão pontual na condição seca e saturada, respectivamente; **P**: resistência à abrasão *Los Angeles*; **T**: resistência ao impacto Treton; **R**: resistência ao esmagamento; **Ri**: resistência à intempérie por ciclagem em solução de sulfato; **EE**: resistência à intempérie por ciclagem em etilenoglicol; **Soxhlet**: resistência à intempérie por ciclagem em aparelho Soxhlet.

3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO DOS MATERIAIS E AMOSTRAGEM

A presente pesquisa contempla a conjugação de dados de seis tipos de rochas básicas (basaltos, diabásio, monzodiorito e microgabro) e de três variedades de granitos utilizadas na forma britada para lastro ferroviário ou com aptidão para tal finalidade. Todos estes materiais foram ou estão sendo explotados em várias pedreiras próximas a trechos de ferrovias nos estados de Goiás e de São Paulo, Regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2 - Relação dos litotipos e respectivas formações geológicas e procedências.

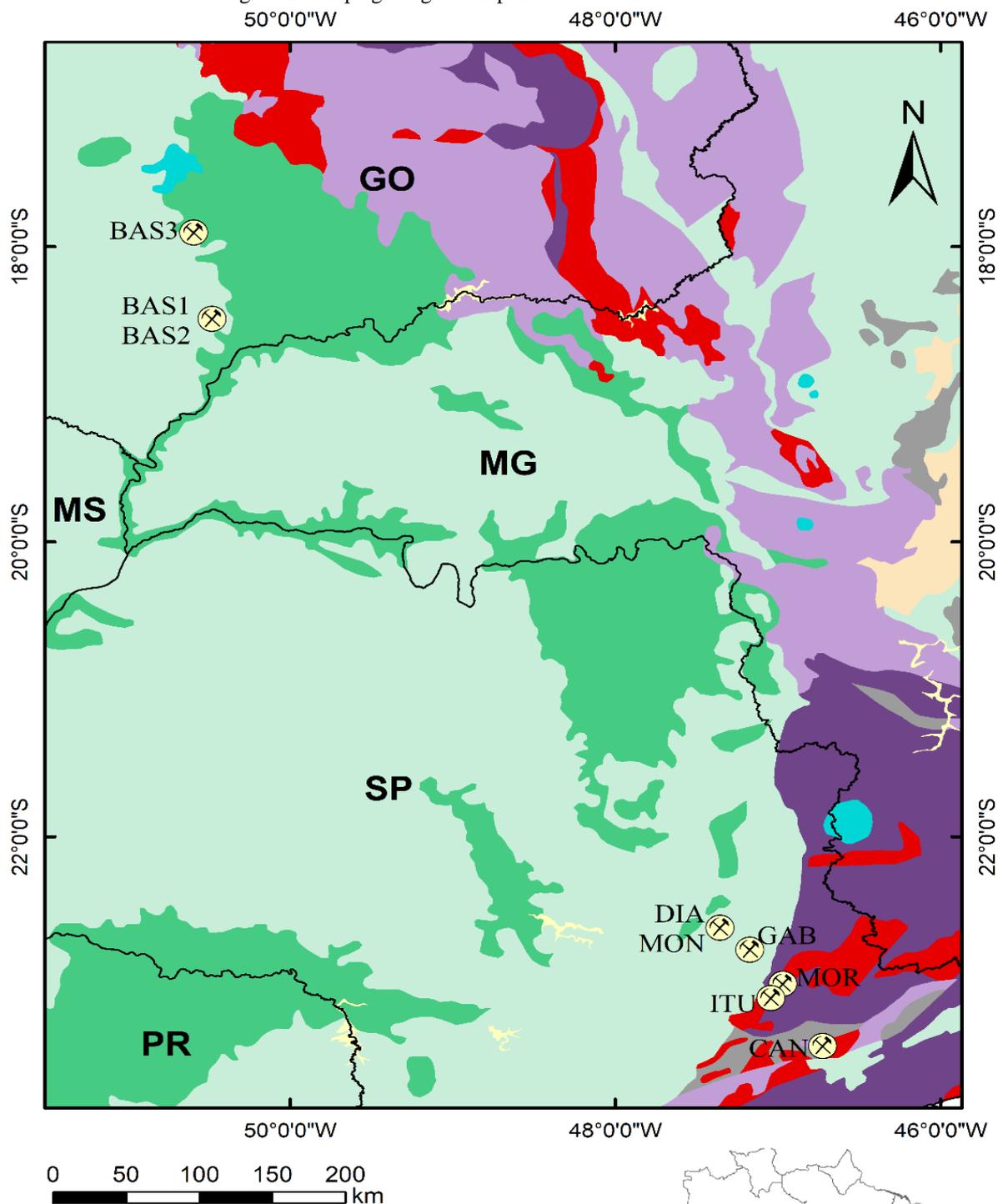
Simbologia	Litotipo	Formação geológica	Município
BAS1 ⁽¹⁾			Quirinópolis - GO
BAS2 ⁽¹⁾	Basalto	Formação Serra Geral	
BAS3 ⁽¹⁾			Santa Helena de Goiás - GO
DIA ⁽²⁾	Diabásio	Intrusivas básicas correlacionáveis à	Limeira - SP
MON ⁽²⁾	Monzodiorito	Formação Serra Geral	
GAB ⁽³⁾⁽⁴⁾	Microgabro	Complexo Morungaba	Paulínia - SP
MOR ⁽³⁾⁽⁴⁾	Álcali-feldspato granito	Granito Cantareira	Valinhos - SP
CAN ⁽³⁾⁽⁴⁾	Monzogranito	Complexo Itu	São Paulo - SP
ITU ⁽⁵⁾	Monzogranito		Campinas - SP

Fonte: Do autor (2022).

Nota: ⁽¹⁾ Estudos prévios do âmbito do GTR (SGS-EESC); ⁽²⁾ Curtis Neto, (2019), Curtis Neto et al., (2018); ⁽³⁾ Santos, (2021), Santos et al., (2019, 2021); ⁽⁴⁾ Remédio et al., (2018), Remédio, (2017); ⁽⁵⁾ Presente estudo.

Com base no mapa da Figura 2, a contextualização geológica das rochas estudadas é apresentada resumidamente a seguir, levando-se em conta a literatura consultada e os estudos prévios de Santos, (2021); Santos et al., (2019, 2021); Curtis Neto, (2019); Curtis Neto et al., (2018); Remédio et al., (2018); Remédio (2017).

Figura 2 - Mapa geológico simplificado dos locais de estudo.



Legenda

	Sedimentos inconsolidados		Rochas vulcano-sedimentares
	Basaltos Formação Serra Geral		Granitos indiferenciados
	Rochas carbonáticas indiferenciadas		Rochas metamórficas de grau baixo a médio
	Rochas sedimentares indiferenciadas		Rochas metamórficas de grau médio a alto
	Rochas alcalinas indiferenciadas		Áreas de coleta (pedreiras)

Nota: **BAS1**, **BAS2**, **BAS3**: Basalto; **DIA**: Diabásio; **MON**: Monzodiorito; **GAB**: Microgabro; **MOR**: Álcali-feldspato granito; **CAN**: Monzogranito; **ITU**: Monzogranito.

Os basaltos, oriundos de pedreiras da região sudeste do estado de Goiás, fazem parte da Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE), na qual é constituída predominantemente por basaltos e andesitos e, subordinadamente, por riolitos (PEATE, 1997; MILNER et al., 1995). Podem ser encontradas na América do Sul, sob a denominação Província Ígnea do Paraná (PIP), correspondem a 95% da PMPE; pertencendo à Formação Serra Geral no Brasil e Argentina, Formação Arapey no Uruguai e Suite Magmática Alto Paraná-Sapucai no Paraguai (LICHT, 2018). Os 5% restantes encontram-se na África, pertencendo à Província Ígnea Etendeka, na Angola e Namíbia (MARSH et al., 2001). Na região, além dos basaltos, ocorrem rochas do Grupo Bauru (Formações Marília e Vale do Rio do Peixe) e do Grupo São Bento (Formação Botucatu), além de depósitos sedimentares cenozóicos.

O fator de maior impacto no custo de agregados é a distância da fonte em relação à obra. No caso dos basaltos da Formação Serra Geral, estes são as únicas rochas presentes em superfície em uma vasta área. Além disso, no seu entorno encontram-se rochas sedimentares da Bacia do Paraná, as quais não atendem aos requisitos para o uso como lastro. Isso se reflete nas reservas aprovadas para exploração. Rochas basálticas corresponderam a 23% do total no Estado de São Paulo até 2013, e a 35% no Estado de Santa Catarina até 2015 (ANM, 2019). Tal cenário suscita uma caracterização detalhada do material.

Nas frentes de lavra das pedreiras estudadas em Quirinópolis e em Santa Helena de Goiás, Estado de Goiás, foram efetuados levantamentos de campo com reconhecimento de perfis geológicos detalhados. Em Quirinópolis (GO), ocorrem, no mínimo, 4 diferentes tipos de basaltos, que parecem constituir um derrame vulcânico de espessura considerável:

- (a) camada basal de basalto marrom escuro são, muito resistente, compacta e pouco alterável, situada na parte inferior da jazida;
- (b) camada de "basalto" acinzentado, mais clara, e com pequenas cavidades (microvesículas) disseminadas na rocha. Material mais alterável e menos resistente do que o basalto "a";
- (c) acima ocorre uma camada guia de basalto escuro, preto, afanítico e muito compacto, apesar de intensamente diaclasado; e
- (d) topo de derrame: camada de basalto vesicular/amigdaloidal, de baixa resistência mecânica, alta alterabilidade e com presença de minerais deletérios.

Os tipos (a) e (b) equivalem, respectivamente, aos materiais **BAS1** e **BAS2** (Figura 3B), que foram as camadas mais significativas em termos dos volumes explorados e aproveitados como agregado para lastro.

Figura 3 - Vista parcial da face Leste da pedreira dos basaltos **BAS1** e **BAS2** - Quirinópolis (GO).

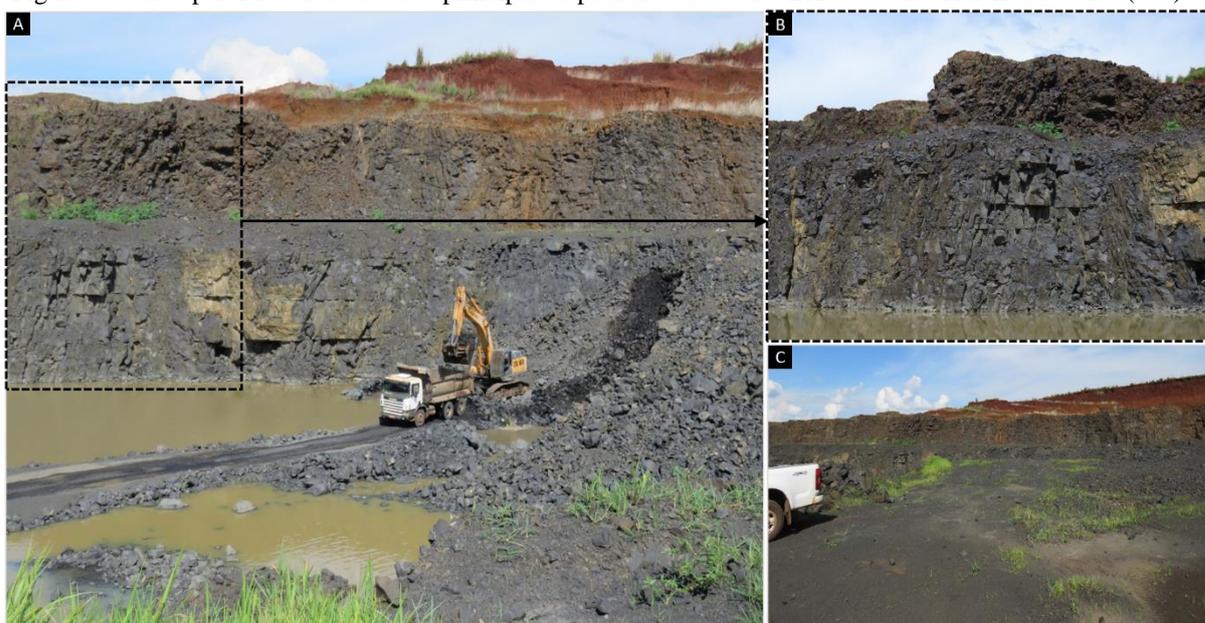


Fonte: Do autor (2022).

Nota: (A) Detalhe do trecho selecionado no presente estudo para amostragem. (B) Em (a) e (b) camadas inferiores que correspondem aos materiais basálticos designados como **BAS1** e **BAS2**; (C) Material coletado.

Já na pedreira em Santa Helena de Goiás, o maciço basáltico é bem mais homogêneo, tendo sido caracterizado um único tipo de basalto, aqui denominado tipo **BAS3**: basalto preto, maciço, afanítico, muito compacto e resistente (Figura 4).

Figura 4 – Vista parcial da face da cava principal da pedreira do basalto **BAS3** - Santa Helena de Goiás (GO).



Fonte: Do autor (2022).

Das litologias estudadas previamente por Curtis Neto et al., (2018) e Curtis Neto (2019) na Intrusão de Limeira-SP, constituída de uma notável variação composicional (desde rochas básicas até

termos ácidos) decorrente dos processos de cristalização fracionada de um *sill* de considerável espessura e encaixado em siltitos/arenitos paleozóicos do Grupo Itararé, foram selecionados o diabásio e o monzodiorito de granulação mais fina, aqui designados como **DIA** e **MON**, respectivamente. Tais materiais apresentam excelentes qualidades geomecânicas como agregado para concreto e pavimentação e são as mais representativas nas exposições rochosas da pedreira situada na cidade homônima, mas não foram estudados detalhadamente visando seu uso sem ligantes.

Quanto aos materiais já estudados por Remédio (2017), Remédio et al. (2018), Santos (2021) e Santos et al., (2019, 2021) para compor lastros ferroviários, três deles foram selecionados por suas qualidades tecnológicas e aqui considerados como representativos das seguintes unidades geológicas: Complexo Morungaba (álcali-feldspato granito), Granito Cantareira (monzogranito) e Intrusivas Básicas da Formação Serra Geral (microgabro), aqui designados, respectivamente, como, **MOR**, **CAN** e **GAB**. Estas rochas são explotadas em pedreiras em atividade, próximas a ferrovias em atividade nas regiões metropolitanas de São Paulo (SP) e de Campinas (SP), Brasil.

Em relação ao monzogranito **ITU**, foram efetuadas observações geológicas nas frentes de desmonte de uma pedreira ativa localizada nas imediações de Campinas (SP), próxima da Rodovia dos Bandeirantes e com acesso pela estrada SP-324. O material beneficiado atende demandas comerciais das regiões de Campinas, Jundiaí e Indaiatuba (SP) e foi, por alguns anos, utilizado exclusivamente nas ampliações do Aeroporto Internacional de Viracopos. Definidas as porções do maciço (Figura 5), com as melhores condições geotécnicas visando sua aplicação para lastro, procedeu-se a coleta de blocos e fragmentos irregulares de rocha.

Figura 5 - Vista parcial da face oeste da cava principal da pedreira do monzogranito **ITU** - Campinas (SP).



Fonte: Do autor (2022).

Nota: (A) Detalhe do trecho selecionado no presente estudo para amostragem; (B) Notar o maciço granítico cortado por fraturas pouco medianamente persistentes, por vezes preenchidas por material esverdeado (epidoto); (C, D), Aspecto macroscópico da rocha, coloração rosada, granulação grossa e textura fanerítica equigranular.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A caracterização tecnológica dos materiais pétreos é fundamental para se estabelecer relações entre a qualidade e a durabilidade, principalmente quando empregados na forma de fragmentos sem ligantes em que são expostos às condições climáticas, sendo à análise petrográfica e os ensaios físicos e mecânicos conjugados com os de alterabilidade, ferramentas importantes no conhecimento, num contexto geotécnico, da seleção de rochas com as propriedades mais adequadas, influenciando na exequibilidade do projeto, na segurança, assim como na economia e durabilidade.

A Tabela 3 organiza e apresenta uma síntese dos métodos de ensaios abordados e suas respectivas normas técnicas consultadas.

Tabela 3 - Síntese dos ensaios abordados e respectivas normas e referências.

Ensaio	Norma Técnica	Procedimentos de Ensaio
Análise Petrográfica	NBR 7389 (ABNT, 2009) NBR 15845 (ABNT, 2015)	^(A) Descrição macroscópica à olho nu e/ou lupa e por microscopia óptica com luz transmitida, em seções delgadas obtidas de fragmentos representativos da rocha.
Índices Físicos	NBR 5564 (ABNT, 2021)	^(A) Saturação e secagem em estufa; pesagens das massas seca, saturada e submersa de 10 corpos de prova escolhidos aleatoriamente dentre os fragmentos irregulares de rocha amostrados em campo.
Forma dos fragmentos	NBR 5564 (ABNT, 2021)	^(A) Medições da geometria tridimensional e relações entre dimensões de comprimento e espessura de fragmentos coletados aleatoriamente.
Resistência à Compressão Uniaxial	ISRM (1979) NBR 5564 (ABNT, 2021)	^(A, B) Corpos de prova cilíndricos, com diâmetros de 76 e 56 mm; ensaios realizados nas condições seca e saturada; determinação da resistência à compressão uniaxial e do coeficiente de enfraquecimento hidráulico.
Resistência à Compressão Pontual	NBR 5564 (ABNT, 2021) D5731 (ASTM, 2016)	^(A) Corpos de prova cilíndricos (diâmetros de 76 e 56 mm) e tabulares; ensaios realizados nas condições seca e saturada.
Resistência à Abrasão <i>Los Angeles</i>	NBR NM 51 (ABNT, 2001)	^(C) Grad. F: 10.000±75 g partículas entre 50,8-25,4 mm; carga abrasiva 5.000±25 g; 1.000 rotações; calculada a massa final retida na peneira de abertura 1,7 mm. Ensaios a seco.
Resistência ao Impacto Treton	NBR 5564 (ABNT, 2021)	^(A) 03 conjuntos de 20 fragmentos de 19-16 mm cada; 10 quedas do soquete; calculada a massa da amostra retida na peneira de 1,7 mm.
Resistência ao Esmagamento	NBR 9938 (ABNT, 2013)	^(A) Compressão de partículas entre 12,7-9,5 mm; carga de 40 ton por amostra; taxa 40 kN/min. Calculada a massa final da amostra retida na peneira de abertura 2,4 mm.
Ciclagem em Solução de Sulfato	NBR 5564 (ABNT, 2021) C88 (ASTM, 2018)	^(D) Grads. A (63,5–38 mm); B (38–19 mm); C (19-9,5 mm); mín. 05 ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio (18h) e de secagem em estufa (8h); calculada a massa final da amostra retida.
Ciclagem em Etilenoglicol	NBR 12697 (ABNT, 1992)	^(A) Mín. 06 ciclos de imersão em etilenoglicol (48±1h e 72±1h) e secagem em estufa (mín. 4h); calculada a massa final da amostra retida na peneira de abertura 9,5 mm.
Ciclagem em aparelho Soxhlet	Não Normatizado	^(A) Prevê-se realizar um mín. de 30 ciclos contínuos; inicialmente foram realizados ensaios pilotos de 03 ciclos de lixiviação e análises químicas de fluorescência de raios X por energia dispersiva ao final da ciclagem.

Fonte: Do autor (2022).

Nota: Locais de realização dos ensaios: ^(A) SGS/EESC, ^(B) SET/EESC, ^(C) STT/EESC, ^(D) LAQ-IQSC/USP.

A seleção dos ensaios tecnológicos foi realizada de acordo com ensaios usuais em mecânica das rochas e alguns métodos consagrados para agregados, seguindo as diretrizes de normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), da European Standard (EN), da American Standard Testing Machines (ASTM), do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e recomendações de referências bibliográficas.

De modo a estabelecer relações com as propriedades físico-mecânicas, químico-mineralógicas e texturais das rochas estudadas, possibilitando uma interpretação mais aprofundada em termos da qualidade e durabilidade, as análises petrográficas visaram conhecer e descrever as principais características e aspectos petrográficos e mineralógicos utilizados para o reconhecimento dos materiais rochosos, abrangendo: aspectos geológico-geotécnicos e de campo, a cor, a granulação; a composição mineralógica (minerais essenciais, acessórios e secundários, hábito, forma e suas quantidades e porcentagens); ocorrência de minerais deletérios; a estrutura (arranjo macroscópico), a textura (forma e arranjo dos minerais); o estado de alteração dos minerais (sãos ou alterados e, se alterados, tipo de alteração) e o grau e tipo de microfissuração cristalina (intercristalina ou intracristalina, fissuras abertas ou preenchidas) e, por fim, a natureza da rocha (ígneas, sedimentar ou metamórfica).

Em relação aos métodos de esforços compressivos, ensaio de resistência à compressão uniaxial e pontual, os procedimentos foram realizados em corpos de prova cilíndricos, obtidos pela extração em blocos representativos coletados em campo, utilizando-se a perfuratriz nos diâmetros 76 mm, que atende às dimensões requeridas na norma NBR 5564 (ABNT, 2021) e com diâmetro de 56 mm, diâmetro de corpo de prova mais difundido em estudos geomecânicos, acrescida também da amostra em forma tabular no ensaio de compressão pontual. Além dos diferentes tipos de diâmetro, ambos procedimentos foram efetuados em corpos de prova nas condições secas (estufa a 110° C) e também saturadas. Desta forma, foram avaliadas as possíveis correlações entre os dois ensaios, além do enfraquecimento hidráulico (R) de cada rocha em relação aos esforços exercidos.

Para execução do ensaio de resistência à compressão uniaxial, utilizou-se da prensa servocontrolada MTS 815 disponível no Laboratório de Mecânica das rochas do Departamento de Geotecnia da EESC-USP (Figura 6), sendo realizado o rompimento de dezenas de corpos de prova.

Já em relação ao ensaio de resistência à compressão pontual, com medidas prévias de diâmetro e altura, centenas de corpos de prova foram rompidos axialmente pela aplicação de uma carga concentrada a partir de duas ponteiras cônicas de um equipamento de configuração mais simples (Figura 7), sendo então calculado e obtido o índice $I_{S(50)}$. Cabe ressaltar que este ensaio foi recentemente contemplado como recomendado na atualização da norma NBR 5564 (ABNT 2021).

De maneira a complementar a representatividade de resultados anteriormente obtidos em algumas literaturas técnicas, sobre relações e parâmetros de resistência mecânica para os mesmos tipos de rochas, através de métodos alternativos, indiretos, mais simples, rápidos e menos onerosos que quando comparado ao convencional ensaio de resistência à compressão uniaxial, foram estabelecidas

e propostas, neste trabalho, algumas correlações e equações para estimar a resistência à compressão uniaxial do material a partir dos valores obtidos no ensaio de resistência à compressão pontual.

Figura 6 – (A) Equipamento de ensaio de compressão uniaxial; (B, C) detalhe da prensa servo-controlada em contato com o corpo de prova instrumentado.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 7 - (A) Equipamento de ensaio de compressão pontual; (B, C, D) detalhe das ponteiras cônicas em contato com os corpos de prova nas três formas ensaiadas: tabular, $\varnothing 76$ mm e $\varnothing 56$ mm, respectivamente.



Fonte: Do autor (2022).

Com o objetivo de se obter informações a respeito da resistência à intempérie das rochas, foram realizados ensaios de alterabilidade (alteração acelerada), com ciclagens em solução de sulfato de sódio (Ri) e em etilenoglicol (EE), ambos procedimentos com secagem em estufa. Tais ensaios foram selecionados levando-se em conta a exequibilidade dos experimentos e, também, por verificar a adequação destes ensaios normatizados em testar condições laboratoriais que podem retratar as solicitações impostas aos materiais pétreos expostos às intempéries, especialmente em regiões de clima tropical.

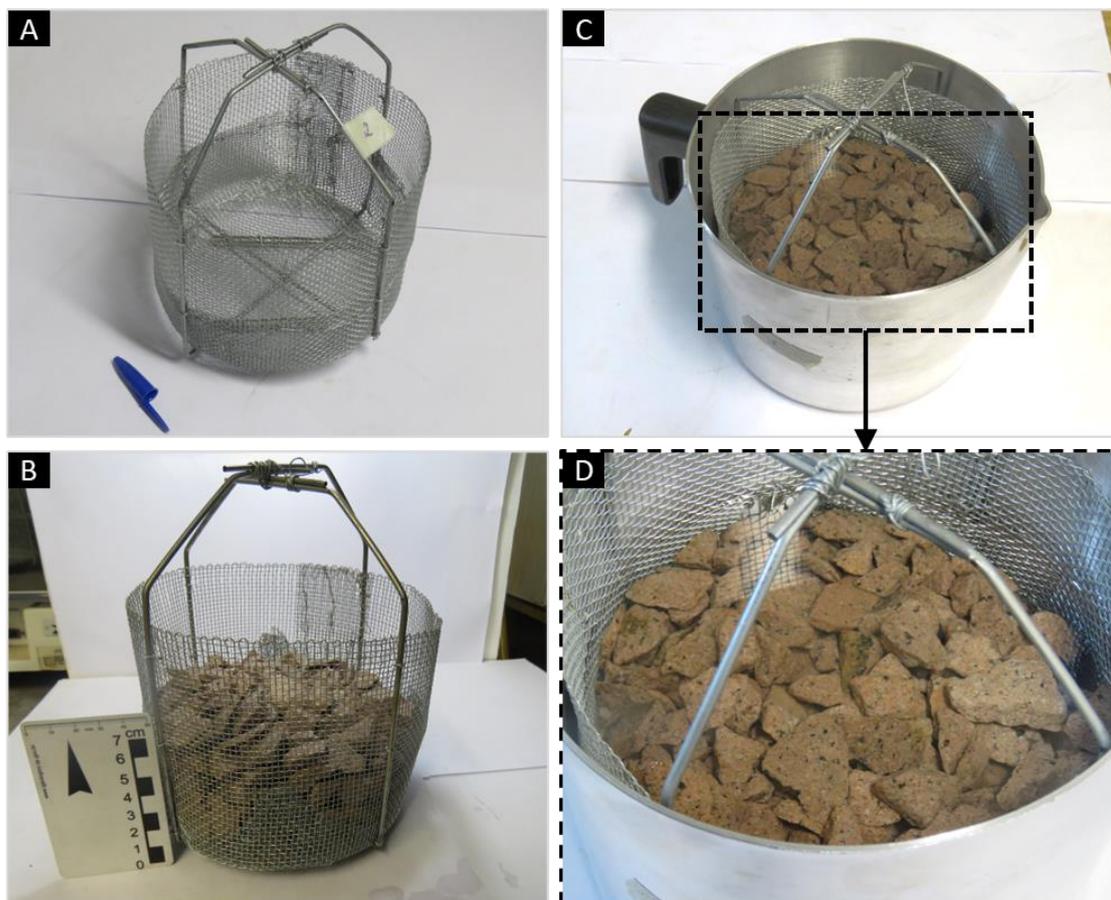
No decorrer das ciclagens procedeu-se avaliações quantitativas, via pesagem do material retido na peneira, e qualitativas, por inspeções visuais e registros fotográficos de cada amostra, em sua condição natural e após cada ciclo, para verificação de eventuais danos nas partículas, como: perda de coesão dos grãos da rocha associada, ou não, à alteração (desintegração); formação de discontinuidades em uma face do agregado (fissuração); extensão da fissuração por mais de uma dimensão do fragmento (rachadura); separação do fragmento através de rachaduras (fragmentação); escamações, oxidação etc.

O método de ensaio de resistência à intempérie (durabilidade) pelo emprego e ciclagem em saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa foi empregado pelo seu amplo uso na caracterização de agregados, de modo a obter uma caracterização mais representativa e abrangente dos materiais em relação à alterabilidade.

Já o ensaio com ciclagens em etilenoglicol (Figura 8), recentemente incorporado na revisão da norma NBR 5564 (ABNT, 2021), foi adotado por se tratar de um aspecto importante para qualificação de rochas básicas (basalto, diabásio e gabro) que estarão expostas à ação intempérica em condições de clima tropical como da região estudada, uma vez que os ensaios de ciclagem com etilenoglicol, que é um reagente orgânico, de fácil penetração nas microdescontinuidades da rocha pode por forças expansivas levar à fragmentação. Cabe ressaltar que optou-se por estender a duração do ensaio para 21 dias, uma vez que, conforme observado por Van Blerk et al. (2017), a degradação da rocha pode ocorrer nos primeiros 7 dias, mas, em alguns casos, um efeito considerável de perda de massa pode se manifestar entre 15 e 21 dias.

Reitera-se que os testes de sanidade com sulfato e etilenoglicol simulam fenômenos intempéricos distintos. Ambos provocam desagregação da rocha, por forças de tração, no entanto, o primeiro é causado pela cristalização de sais, enquanto o segundo reage com as argilas expansivas podendo ocasionar a desintegração expansiva da amostra. Ou seja, a adoção destes ensaios depende do tipo de rocha a ser usada e do ambiente ao qual será exposta.

Figura 8 - (A, B, C) Equipamento e sequência de procedimentos de ensaio de ciclagem em etilenoglicol; (D) detalhe da amostra imersa em etilenoglicol.



Fonte: Do autor (2022).

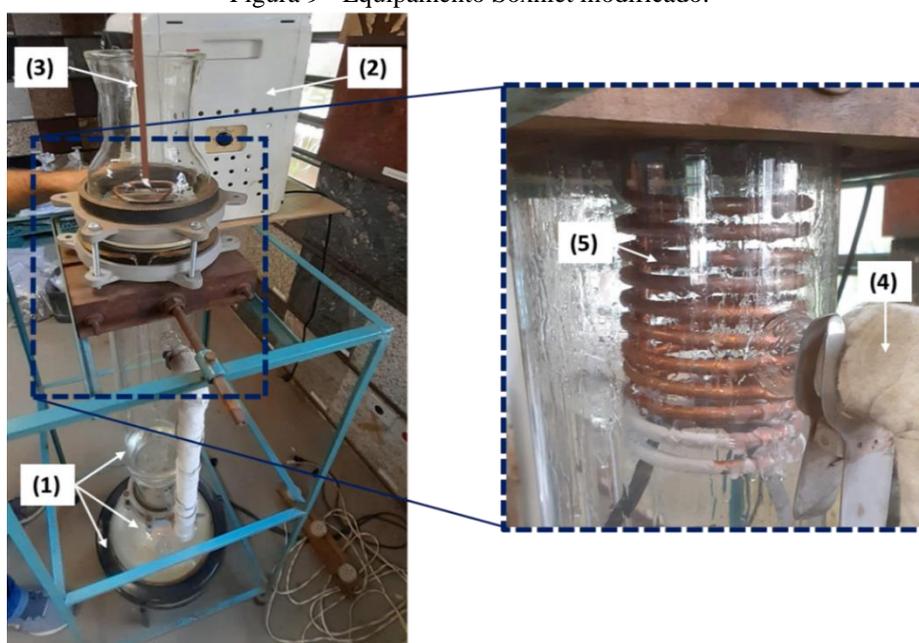
Quanto aos ensaios de lixiviação contínua utilizando o equipamento Soxhlet, aparelhos de grande porte, como o utilizado nesta pesquisa, normalmente possuem um condensador formado por um helicóide em formato espiral, onde um fluxo de água corrente é constantemente inserido para permitir a troca de calor dos vapores oriundos da base do equipamento. Este processo de refrigeração ocasiona um descarte constante da água, gerando o desperdício de grandes volumes durante os vários ciclos necessários para a realização do ensaio (GOMES, 2001; LADEIRA & MINETTE, 1984; HYPOLITO & VALARELLI, 1972; FARJALLAT, 1971). Por este motivo, um novo sistema de condensação foi concebido nesta pesquisa, de modo a garantir uma execução de maior velocidade na obtenção dos resultados, mais eficiente e acrescido de uma configuração mais sustentável do ensaio, evitando o descarte constante de água.

Inicialmente foi estudada a aplicação de um sistema fechado de circulação de água, que seria resfriada por meio de um processo termoelétrico, realizado por pastilhas Peltier (placas cerâmicas). A água então resfriada passaria por uma pequena bomba de sucção, sendo novamente inserida no elemento de troca de calor, que produziria a condensação dos vapores no interior do aparelho. Entretanto, para se obter maior velocidade no processo de condensação, mantendo ainda a

característica sustentável de evitar o descarte de água no processo de refrigeração, o sistema foi substituído por outro de configuração com maior potência.

Este equipamento Soxhlet modificado contempla um sistema fechado de refrigeração a gás (R134a), semelhante aos usados em pequenos bebedouros de água, constituído por um compressor com 0,1 Hp de potência, aproximadamente 600 BTU/h, em que foi adaptada uma serpentina de cobre com diâmetro de ¼”, para ser inserida na parte superior do Soxhlet, onde são condensados os vapores. A utilização deste novo sistema de refrigeração sem perda de água (Figura 9), além de expressiva redução do tempo de ciclagem, permite a sua reintegração aos equipamentos existentes para estudo da alterabilidade de rochas no Departamento de Geotecnia da EESC-USP.

Figura 9 - Equipamento Soxhlet modificado.



Fonte: Do autor (2022).

Nota: (1) Manta, balão de aquecimento e tubo extrator; (2) Compressor a gás e (3) Condutor para o resfriamento da serpentina. No detalhe, à direita, tubo de saída do vapor (4), que condensa na serpentina (5).

Diante desta nova configuração, o aparelho foi submetido a análises de desempenho, tais quais: rendimento; temperatura; tempo de duração dos ciclos (tempo que a água evapora, condensa, cobre toda a amostra, e é sifonada retornando ao balão de aquecimento para reiniciar o ciclo). Levando-se em conta o caráter preliminar dos experimentos, este novo sistema foi utilizado para o estudo da alterabilidade de rochas. A rocha inicialmente estudada se refere ao microgabro **GAB**. Para efeito de um estudo comparativo, foram realizadas análises químicas (triplicatas) de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF). Foram considerados dois tipos de amostras dessa mesma rocha, coletadas em diferentes pontos: (I) diretamente na pilha de britagem da planta de beneficiamento (PB); e (II) em trechos selecionados na frente de desmonte da pedreira, (FD). Nestas últimas, a britagem foi produzida em laboratório, relacionando a exata procedência do material, diferente do que ocorre na brita corrida, que pode conter misturas de diferentes porções do maciço.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios realizados, seguindo a ordem da metodologia utilizada no trabalho e, em seguida, uma síntese crítica das propriedades obtidas.

4.1 ANÁLISE PETROGRÁFICA

As análises macro e especialmente microscópica permitiram estabelecer algumas correlações com os valores dos ensaios tecnológicos (índices físicos, ensaios mecânicos e de alteração e alterabilidade), que serão abordadas a seguir, sendo conhecido, por exemplo, que a porosidade e/ou absorção d'água é maior em rochas mais alteradas. De modo comparativo, no presente caso, valores relativamente maiores destas propriedades parecem estar relacionados à granulação da rocha e a níveis de alteração mais pronunciados nos feldspatos, aliados ao grau de microfissuramento que ocorre preferencialmente em dois modos: transgranular, onde as fissuras ignoram os limites dos minerais e, intragranular onde os limites coincidem ou não ultrapassam os dos minerais.

A seguir, inicialmente são apresentadas as descrições pormenorizadas dos materiais estudados, a documentação fotográfica de feições representativas verificadas em microscópio de luz transmitida, distribuídos de acordo com os tipos de rocha e em seguida, uma síntese das informações petrográficas.

4.1.1 Rochas Básicas e o Monzodiorito

Pode ser observado na petrografia que o grau de alteração, tanto intempérico quanto hidrotermal (quando presente), não são muito avançados o que permitiu classificar estas amostras com baixo grau de alteração (localmente moderado) e considerar, com relação ao intemperismo, como rochas sãs. Esta condição retrata fielmente o verificado em campo e nas exposições (bancadas) dos maciços rochosos. A estrutura apresentada por todas as rochas é maciça. Em relação à textura, são afaníticas nos basaltos (e faneríticas nas demais litologias), variando de fina até grossa, equigranular a inequigranular e, por vezes, discretamente porfirítica.

O basalto **BAS1** representa a camada basal de derrame com considerável espessura na pedreira visitada em Quirinópolis (GO). Trata-se de rocha maciça e muito compacta, com superfície de coloração marrom escura, e interior preto a cinza, holocristalina a hipocristalina, textura afanítica, subofítica a intersertal, com granulação microporfirítica, matriz < 0,5 mm e microfenocristais 0,5 a 1,5 mm. Quanto ao microfissuramento, predominam fissuras intraminerais e pseudoperlíticas. Em termos da condição da alteração hidrotermal cita-se a argilização de alguns plagioclásios.

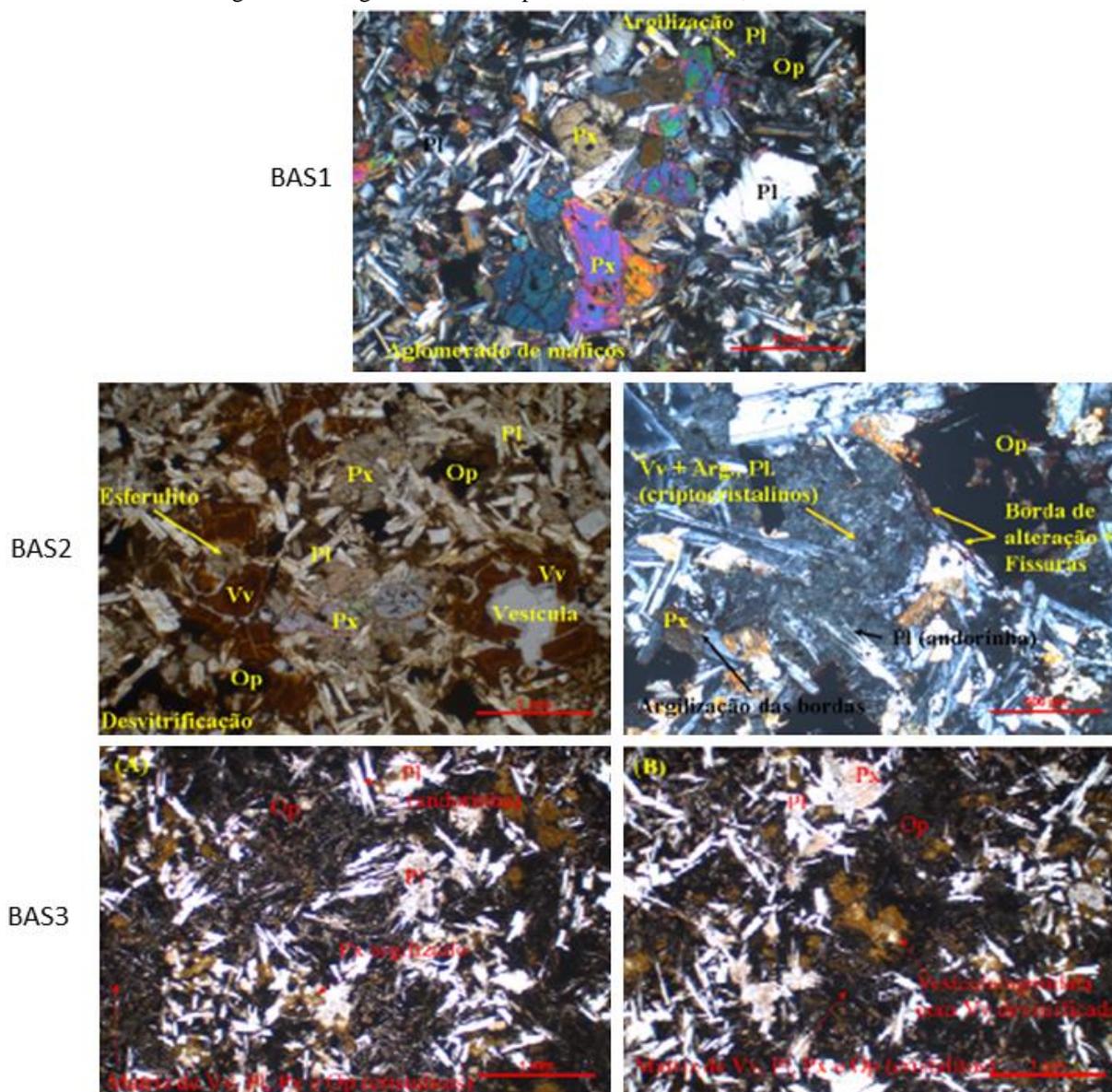
Já a camada do basalto **BAS2** foi diferenciada na amostragem em duas partes, sendo a parte mais basal, no contato com basalto **BAS1** e a segunda mais distante do contato. Este material demonstrou ser menos compacto, com superfície de coloração marrom a preta, e interior preto a cinza,

hipocristalino, rico em vesículas/amígdalas disseminadas na matriz; estrutura maciça (vesículo-amigdaloidal), textura afanítica, vesíc.-agmidaloidal, subofítica a intersertal, granulação muito fina (< 1 mm), vesículas/agmídalas < 2mm, microporfirítica, matriz < 0,5 mm, microfenocristais 0,5 a 1,5 mm. Observações tátil-visuais indicam rocha pouco resistente aos golpes de martelo. Quanto ao microfissuramento predominam fissuras intraminerais e pseudoperlíticas, ocorrendo ainda fissuras inter e transminerais. A alteração hidrotermal é moderada, destacando a argilização de plagioclásios e piroxênios; condição dos vazios vesículas variando 0,5 a 2 mm, sendo a rocha classificado como basalto vesicular (amigdaloidal).

Por outro lado, a amostra **BAS2** apresenta um claro enriquecimento em opacos e vidro vulcânico, que na textura intersertal e na forma de acumulações, se diferenciam formando-se argilominerais cripto a microcristalinos, que muitas vezes ocorrem na forma de vesículas/agmídalas. Além disso, os minerais principais (plagioclásio e piroxênio) ocorrem com suas bordas argilizadas ou completamente argilizadas, quando em contatos com os microsistemas formados por vidro + opacos. Tais aspectos evidenciam a alteração hidrotermal tardi-magmática dessas camadas para o derrame basáltico inspecionado na pedreira. Essa amostra é notoriamente de menor qualidade entre todas as variedades de rochas estudadas.

A camada de basalto **BAS3** apresenta ser bastante homogênea ao longo da pedreira de Santa Helena de Goiás (GO), podendo se tratar de uma única porção de um derrame. Caraterizado como uma rocha maciça, compacta, de coloração preta a cinza, textura afanítica, subofítica a intersertal, granulação muito fina (< 1 mm), microporfirítica, matriz < 0,5 mm, microfenocristais 0,5 a 1,5 mm. Rocha muito resistente aos golpes de martelo; cristalinidade holocristalina a hipocristalina. Com raras fissuras intraminerais e pseudoperlíticas e, em termos de alteração hidrotermal, destaca-se a argilização de alguns piroxênios. Classificada como basalto denso a vítreo.

A Figura 10 apresenta os registros microscópicos dos basaltos **BAS1**, **BAS2** e **BAS3**.

Figura 10 – Registros microscópicos - basaltos **BAS1**, **BAS2** e **BAS3**.

Fonte: Modificado de Monticelli (2019).

Nota 1: Legenda- Pl: plagioclásio, Px: piroxênio, Op- opacos, Vv: vidro vulcânico, Arg: argilização.

Nota 2: “**BAS1**” - textura subofítica e intersertal com cristais ripiformes de andesina e aglomerados de máficos. “**BAS2**” - fissuras intra transminerais associadas aos processos de devitrificação e alteração hidrotermal tardimagmática. Notar, à direita, aglomerado de esferulitos criptocristalinos (calcedônia e celadonita/esmectitas) e provável clorita junto aos cristais de augita/pigeonita alterados. “**BAS3**” - rocha holo a hipocrystalina, textura subofítica e intersertal, exibindo piroxênios frequentemente argilizados e agregados criptocristalinos em vesículas/amígdalas e de clorita sobrecrecidos à augita/pigeonita.

Nota 3: Minerais mais abundantes nas rochas: Pl (32 a 47%), Px (18 a 22%).

Da pedreira estudada que integra a “Intrusão de Limeira”, fazem parte o diabásio **DIA** e o monzodiorito **MON** referidos nesta presente pesquisa.

O diabásio **DIA** ocorre como um material de transição entre o basalto e o núcleo monzodiorítico, distante da borda por cerca de 2 a 3 m. A amostragem destes materiais foi realizada em uma frente de decapeamento no ponto de uma nova bancada da cava. Apesar da proximidade ao perfil intemperismo, o grau de alteração das amostras é imperceptível, e pouco penetrativo, representando condições típicas da intrusão. Apresentam coloração cinza a cinza escuro, estrutura maciça e textura fanerítica, com

granulação fina, entre 0,5 e 1 mm, entretanto há aumento gradativo da granulação de acordo com o afastamento da borda (zona de contato).

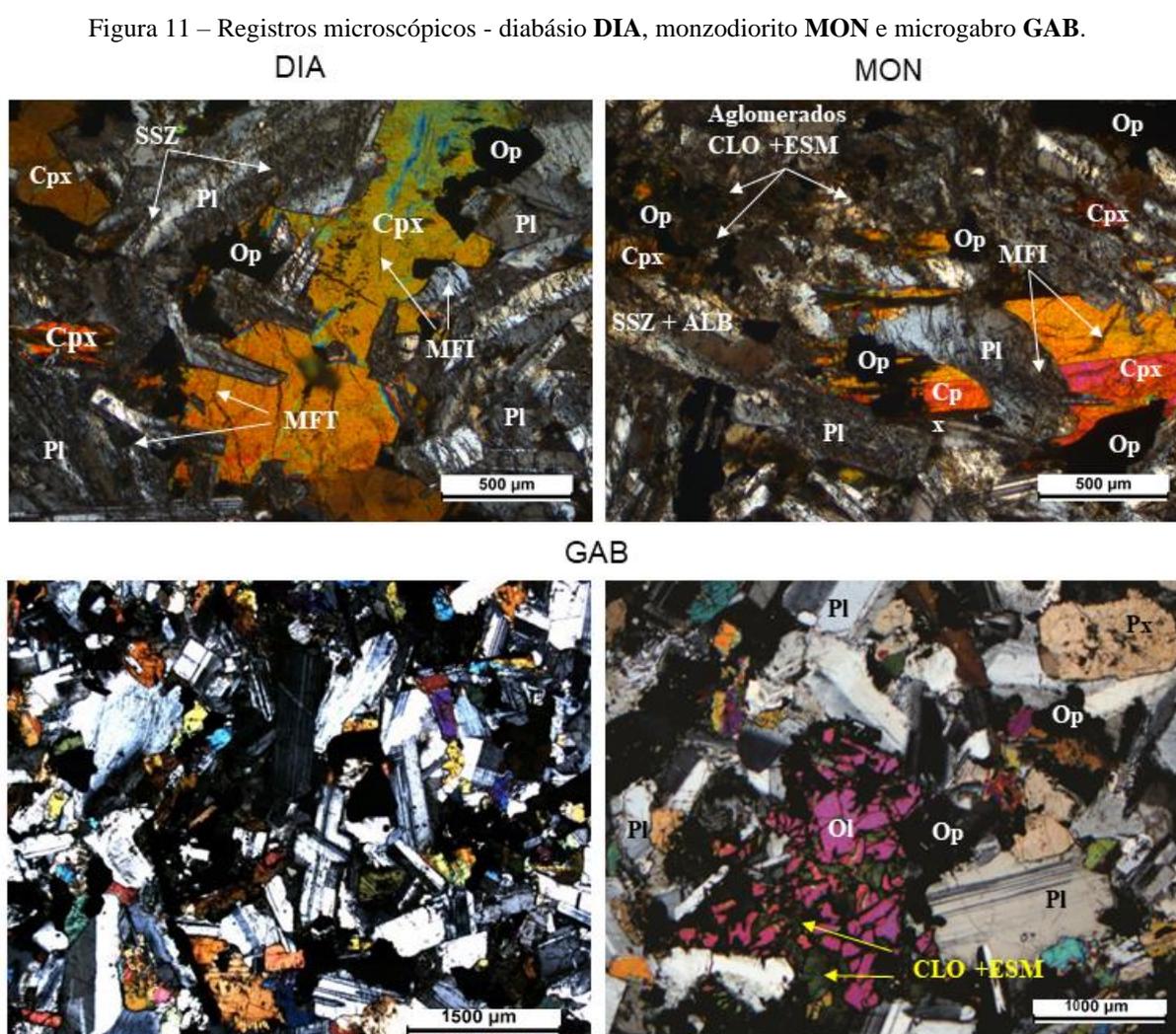
Microscopicamente o diabásio é de caráter holocristalino, sendo composto essencialmente por plagioclásio, clinopiroxênio (augita), opacos e agregados de clorita/esmectita e apatita. Os cristais euédricos a subeuédricos de plagioclásio (labradorita), dominantes na matriz da rocha, possuem hábito tabular e zoneamento composicional, além de apresentarem outros minerais entre seus interstícios, configurando a textura intergranular. O clinopiroxênio tem hábito prismático a granular, euédrico a subeuédrico, e quando associados aos plagioclásios apresentam a textura ofítica a subofítica. Os minerais opacos ocorrem com hábito granular euédrico a subeuédrico frequentemente associados aos clinopiroxênios. Os plagioclásios e clinopiroxênios são encontrados fissurados, variando de fissuras do tipo intra a transminerais. Nesses locais quando associados aos opacos apresentam bordas de alteração formando material alaranjando com aglomerações de clorita/esmectita. Diferentemente do basalto, a alteração hidrotermal no diabásio é menos intensa, porém ainda marcada pela substituição parcial do clinopiroxênio por agregados de clorita/esmectita, e saussuritização e exsoluções de albita nos plagioclásios.

O monzodiorito **MON** ocorre como litologia principal, na porção central da intrusão de Limeira, são rochas de coloração cinza escuro a branco, com estrutura maciça e textura fanerítica e com granulação fina a grossa. No caso do material amostrado, a granulação é fina a média, cerca de 0,5 a 5 mm. Diferentemente do diabásio, os cristais de plagioclásio apresentam tanto a textura intergranular como de fluxo magmático. E os clinopiroxênios (augita e pigeonita) com plagioclásios formam textura ofítica a subofítica frequentemente associados aos minerais opacos que ocorrem com hábito granular euédrico a subeuédrico. Os piroxênios apresentam um aumento da granulação associado a um fissuramento intramineral a transmineral. Nas sessões onde os plagioclásios se encontram em processos de saussuritização e albitização ocorrem localmente, piroxênios sofrendo um processo de cloritização formando agregados de clorita/esmectita em suas bordas e microfissuras.

O maciço do microgabro **GAB** aparenta ser bastante homogêneo na pedreira visitada em Paulínia (SP), sendo que o material amostrado apresenta uma coloração cinza escuro e, quando em porções de rocha alterada, adquire uma coloração amarelo escuro. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação fina (entre 0,5 e 1,5 mm) e textura equigranular, sendo classificado como microgabro. Seus minerais essenciais são plagioclásio, augita e opacos (magnetita); como acessórios apatita, epidoto e quartzo e predominam os minerais secundários que ocorrem de forma pulverulenta, representados pela sericita e/ou saussurita, clorita, biotita, anfibólios fibrosos e a clorofeita que representaria fino agregado esverdeado e possivelmente composto por clorita, anfibólios fibrosos, biotita esverdeada e argilominerais como celadonita e nontronita (principalmente sobre os clinopiroxênios e as olivinas). As olivinas são os minerais mais intensamente microfraturados, com sistemas de microfissuras abertas e preenchidas por fina massa de minerais secundários como opacos, clorita, anfibólios fibrosos e algum argilomineral (celadonita/nontronita).

Em nível microscópico, exibe grau de alteração incipiente a baixo, do tipo intempérico, quanto à alteração, junto às concentrações/agregados de minerais máficos (olivina, minerais opacos e clinopiroxênios) é mais intensa, condicionado pelo grau de cristalinidade. O grau de microfissuramento é baixo, predominantemente do tipo intragrão e transgranular, inerentes às respectivas naturezas dos minerais. Assim é relativamente intenso nos cristais de olivina, baixo a moderado nos clinopiroxênios e baixo no plagioclásio. Os planos de microfraturas dos cristais de olivina são predominantemente abertos e nos clinopiroxênios parcialmente abertos e fechados.

A Figura 11 apresenta os registros microscópicos do diabásio **DIA**, do monzodiorito **MON** e do microgabro **GAB**.



Fonte: Modificado de Curtis Neto (2019), Remédio (2017) e Santos et. al. (2021).

Nota 1: Legenda - Pl: plagioclásio, Cpx/Px: clinopiroxênio/piroxênio, Op: opacos, Ol: olivina, MFT/MFI: microfissuras trans e intraminerais, SSZ- Saussurização dos plagioclásios; CLO+ESM: clorita e esmectitas.

Nota 2: **DIA** - Matriz mineralógica da rocha afetada pela alteração hidrotermal nos cristais de clinopiroxênio e de plagioclásio. **MON** - textura intergranular com microfissuras preferencialmente intraminerais. **GAB**: Esquerda - microgabro exibindo textura subofítica e, no detalhe, a Direita, notar a presença de minerais secundários (clorita e esmectitas) preenchendo fraturas especialmente nos cristais de olivina.

Nota 3: Minerais mais abundantes nas rochas: **DIA** (45% Pl e 30% Cpx), **MON** (45% Pl e 34% Cpx).

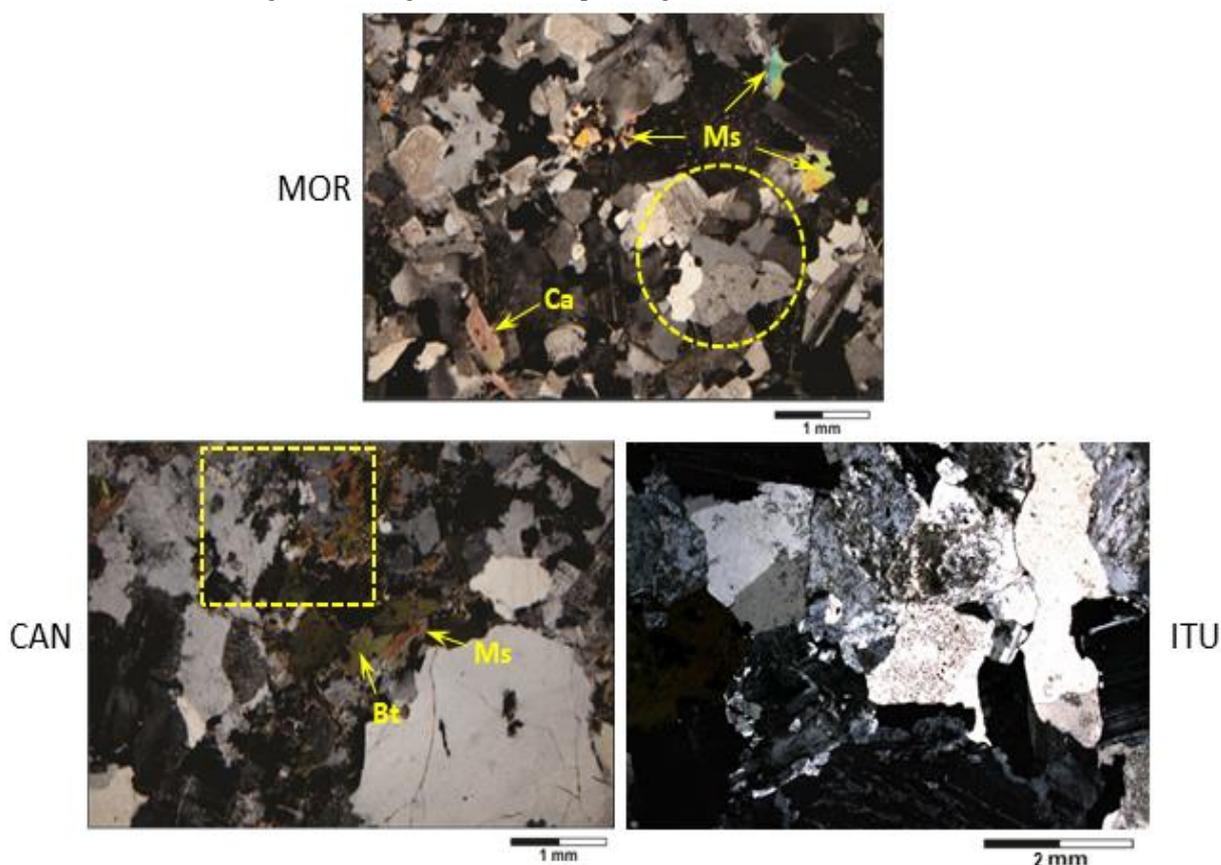
4.1.2 Granitos

O álcali-feldspato granito **MOR** é o tipo litológico representativo na pedreira em atividade no município de Valinhos (SP), geologicamente relacionado ao Complexo Morungaba (VLACH, 1985). A rocha apresenta coloração rósea nas porções sã e alterada, estrutura maciça e textura fanerítica equigranular, sendo classificado como biotita monzogranito de granulação fina a média, entre 0,5 e 1,5 mm. No granito Morungaba o grau de microfissuramento é baixo, do tipo intragranular, o microfissuramento mineral é incipiente, essencialmente do tipo intragrão, com planos em geral fechados. Todavia, observam-se em amostras de mão fraturas contínuas preenchidas por minerais secundários de natureza filossilicática, fato que possivelmente vem a facilitar o processo industrial de britagem da rocha. Seus minerais essenciais são feldspato alcalino, plagioclásio, quartzo, biotita e muscovita; como acessórios zircão, titanita e opacos e minerais secundários sericita, saussurita e óxidos. 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 de plagioclásio, dos quais provavelmente se originam. Sericita e epidoto são mais relacionados à discreta saussuritização do plagioclásio, sendo que a mica deve, em parte, integrar as microinclusões pulverulentas (“sujidade”) exibidas pelo feldspato potássico. Em nível microscópico, exibe grau de alteração incipiente a baixo, do tipo intempérico.

O Granito Cantareira **CAN** trata-se de um maciço de grande diversidade, onde a feição dominante é o seu caráter porfiróide, com megacristais subcentimétricos a centimétricos de feldspato alcalino imersos em matriz fanerítica, definindo, em geral, uma textura granular hipidiomórfica. A rocha predominante na pedreira situada na borda oeste do batólito é classificada como um sienogranito. Em amostra de mão apresenta uma coloração cinza e, quando em porções de rocha alterada, adquire uma coloração cinza amarelada. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação grossa (até 15 mm) e textura inequigranular. Seus minerais essenciais são quartzo, microclínio, plagioclásio e biotita, como acessórios opacos (pirita e magnetita), muscovita, zircão, apatita e epidoto e minerais secundários óxidos. Em nível microscópico, exibe grau de alteração incipiente a baixo, do tipo intempérico. O grau de microfissuramento é baixo, do tipo transgranular e com microfissuras geralmente preenchidas por sericita. 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. Tipos faciológicos equigranulares e inequigranulares ocorrem subordinadamente, enquanto o acúmulo localizado de megacristais pode definir feições pegmatóides. A estrutura é maciça a orientada, com claro zoneamento do centro para as bordas. Por vezes, a concentração diferencial de megacristais combinada com o fluxo primário origina tipos levemente acamadados, próximos às zonas de contato.

Quanto ao monzogranito **ITU**, trata-se da rocha predominante na pedreira ativa visitada nas imediações de Campinas (SP). Quanto ao material amostrado, apresenta uma coloração rósea e, quando em porções de rocha alterada, adquire uma coloração rósea esbranquiçada. Apresenta estrutura maciça granular, com granulação grossa (entre 2 e 5 mm) e textura fanerítica equigranular, sendo classificado como monzogranito. Seus minerais essenciais são quartzo (40%), feldspato alcalino (30%), plagioclásio (20%), hornblenda (5%) e biotita (2%); como acessórios (2%) zircão, titanita e óxidos e minerais secundários (1%) sericita, saussurita e óxidos. Em nível microscópico, exibe grau de alteração baixo a moderado, do tipo intempérico. Nota-se maior incidência de sericitização e/ou saussuritização nos cristais de feldspato alcalino (por vezes microclínio) dando um aspecto “sujo” a amostra (Figura 12). Os opacos ou óxidos ocorrem associados aos minerais máficos, principalmente hornblenda. O grau de microfissuramento é baixo, principalmente do tipo intragranular.

Figura 12 – Registros microscópicos - granitos **MOR**, **CAN** e **ITU**.



Fonte: Modificado de Santos et al. (2021) e do autor (2022).

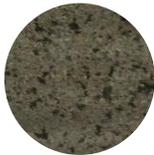
Nota 1: Legenda- Pl: plagioclásio, FK: feldspato alcalino, Qz: quartzo, Bt: biotita; Ms: muscovita, Ca: carbonato.

Nota 2: **MOR** - observar arranjo equidimensional, alteração incipiente e forte entrelaçamento da matriz quartzo-feldspática (círculo tracejado). **CAN** - notar alteração relativamente mais intensa nos plagioclásios e feldspatos alcalinos (retângulo tracejado). **ITU** - monzogranito exibindo granulação grossa dos minerais e alteração intempérica mais pronunciada nos feldspatos (plagioclásio e microclínio).

Nota 3: Minerais mais abundantes: FK (44%, 24%, 30%), Pl (19%, 30%, 20%), Qz (40%, 30%, 20%) para as rochas **MOR**, **CAN**, **ITU**, respectivamente.

Uma síntese com os principais aspectos macro e microscópicos dos materiais estudados são organizados e apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Síntese das análises petrográficas.

Imagem Macroscópica									
Amostras	BAS1 ⁽¹⁾	BAS2 ⁽¹⁾	BAS3 ⁽¹⁾	DIA ⁽²⁾	MON ⁽²⁾	GAB ^{(3), (4)}	MOR ^{(3), (4)}	CAN ^{(3), (4)}	ITU ⁽⁴⁾
Cor	Preta a cinza	Preta a cinza	Preta a cinza	Cinza escura	Cinza escuro a branco	Cinza escuro a amarelo escuro	Rosa	Cinza a cinza amarelado	Rosa
Forma	Cúbica	Cúbica	Cúbica	Lamelar	Cúbica	Cúbica	Lamelar	Cúbica	Cúbica
Granulação	Muito fina (< 1 mm)	Muito fina (< 1 mm); vesículas/amígdalas (< 2 mm)	Muito fina (< 1 mm)	Fina (0,5 - 1 mm)	Fina a Média (0,5 - 5 mm)	Fina (0,5 - 1,5 mm)	Fina a Média (0,5 - 1,5 mm)	Grossa (< 15 mm)	Grossa (2 - 5 mm)
Estrutura	Maciça	Maciça (vesículo-amigdaloidal)	Maciça	Maciça	Maciça	Maciça	Maciça	Maciça	Maciça
Textura	Afanítica, subofítica a intersertal	Afanítica, vesículo amigdaloidal, subofítica a intersertal	Afanítica, subofítica a intersertal	Intergranular, ofítica e subofítica	Intergranular, ofítica, subofítica, de fluxo magmático	Equigranular Subofítica	Equigranular, hipidomórfica a alotriomórfica	Inequigranular, Fanerítica (porfírica)	Equigranular
Estado Microfissural	Intragranular	Intramineral e transmineral	Transmineral e intramineral	Intramineral e transmineral	Intramineral e transmineral	Baixo intragranular	Intragranular	Transgranular	Intragranular
Mineralogia (%)	Pl 47,3	Pl 31,5	Pl 37,8	Pl 45	Pl 45	Pl 53 46	Qz 31 25	Qz 29 40	Qz 40
	Px 22,7	Px 17,6	Px 22,2	Op 15	Op 12	Px 27 36	Pl 19,5 29	Pl 30 20	FK 30
	Op 18,2	Op 37,1	Op 33,1	Au 30	Cl 34	Op 8,5 16	FK 44 39	FK 24 35	Pl 20
	Ag 7,4	Ag 3,7	Ag 6,3	CL 30	Ct/Et 7	Ot 1,7 -	Bt 0,5 6	Bt 8,5 5	Hb 5
				Ct/Et 9		Ol 1,5 -	M 2		Bt 2
Classificação	Basalto	Basalto	Basalto	Diabásio	Monzodiorito	Micrograbro	Álcali-feldspato granito	Sienogranito	Monzogranito

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - **Qz**: Quartzo; **Pl**: Plagioclásio; **FK**: Feldspato alcalino; **Bt/M**: Biotita Muscovita; **Px**: Piroxênio; **Hb**: Hornblenda; **Op**: minerais opacos; **Ag**: Argilominerais; **Au**: augita; **Ot**: ortoclásio; **Ol**: olivina; **Mc**: Microclínio; **Cl**: Clinopiroxênio; **Ct/Et**: Clorita Esmectita.

Nota 2: Fonte dos dados - **(1)** Estudos prévios do GTR (SGS-EESC); **(2)** Curtis Neto et al. (2018) e Curtis Neto (2019); **(3)** Santos et al. (2019, 2021) e Santos (2021); **(4)** Remédio (2017) e Remédio et al. (2018).

4.2 ÍNDICES FÍSICOS

As informações das análises petrográficas permitiram estabelecer correlações com os resultados dos ensaios de índices físicos. De modo geral, considerando os requisitos de propriedades da NBR 5564 (ABNT, 2021) para uso em lastro, as médias calculadas dos índices físicos mostraram que as rochas apresentam um peso específico alto, e porosidades variando de 0,42 a 8,00% (valores mais elevados referentes aos basaltos com micro vesículas/amígdalas), o que deve guardar relação, principalmente, ao baixo grau de alteração e das condições de micro fissuramento dos materiais pétreos estudados.

Resultados importantes também são notados na variação da massa específica aparente seca (ρ_a) entre os litotipos ensaiados (Tabela 5 e Figura 13). Apesar da variação, todas as rochas atendem aos requisitos e parâmetros da norma NBR 5564 (ABNT, 2021), que recomenda o valor mínimo entre 2.500 e 2.700 kg/m³ (a depender do tipo de rocha). Isto se deve, principalmente à densidade dos materiais pétreos, visto que as operações de mineração não levam em conta as diferentes rochas no mesmo maciço, há uma imprecisão nos valores utilizados para dosagem dos materiais.

Ao comparar os materiais estudados, como esperado, o microgabro **GAB** foi a rocha com ρ_a mais elevada, apresentando o teor de minerais pesados (augita, opacos e olivina). Em relação aos valores de porosidade aparente (η_a) e absorção de água (α_a), o microgabro **GAB** apresentou valores significativos, porém ainda dentro dos parâmetros normativos. Já os basaltos foram os litotipos com valores relativamente mais expressivos, extrapolando, por exemplo, com exceção da absorção de água da amostra **BAS3**, os parâmetros máximos recomendados pela NBR 5564 (ABNT, 2021). Estes valores elevados de η_a e α_a podem provavelmente estar ligados à granulação da rocha e à uma maior comunicabilidade de sua rede porosa e dependem das condições de alteração mineralógica (principalmente dos plagioclásios) e de microfissuramento, apresentando o predomínio das fissuras intragranulares com algumas transgranulares.

Tabela 5 - Síntese dos resultados do ensaio de índices físicos.

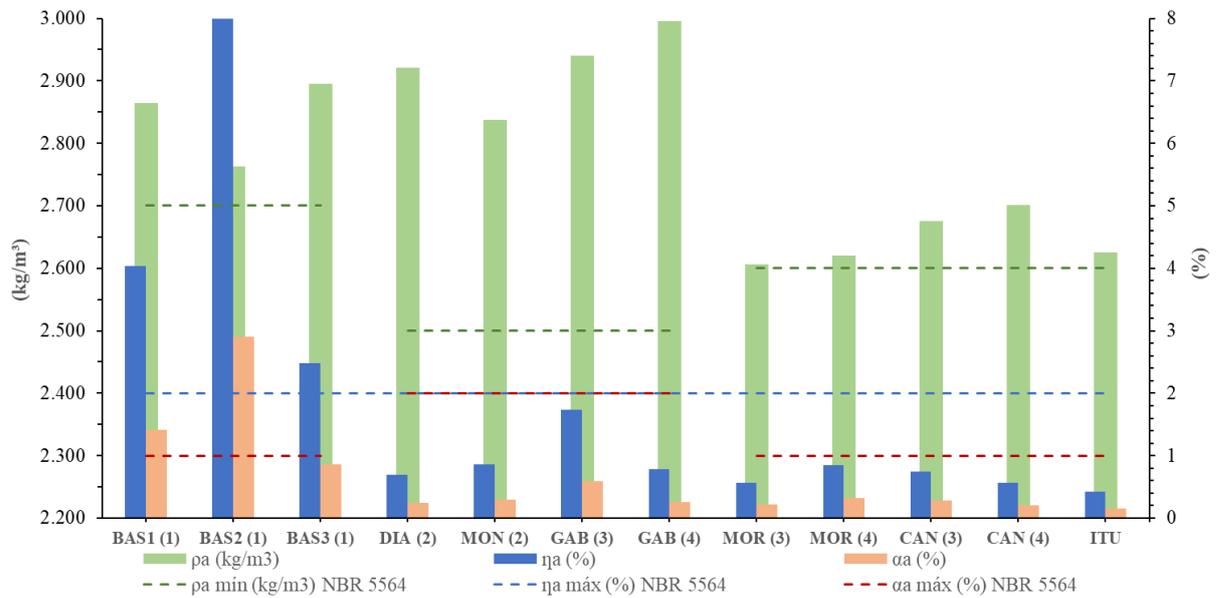
Amostra	M _{SEC} (g)	M _{SAT} (g)	M _{SUB} (g)	ρ_a (kg/m ³)	η_a (%)	α_a (%)
BAS1 ⁽¹⁾	236,68	240,00	157,39	2.865,08	4,04 *	1,41 *
BAS2 ⁽¹⁾	198,12	203,04	132,09	2.763,34	8,00 *	2,90 *
BAS3 ⁽¹⁾	243,76	245,64	161,54	2.894,88	2,48 *	0,86
DIA ⁽²⁾	380,59	381,47	251,25	2.921,40	0,69	0,24
MON ⁽²⁾	319,08	320,03	207,46	2.837,34	0,86	0,30
GAB ⁽³⁾	197,55	198,71	131,48	2.940,00	1,73	0,59
GAB ⁽⁴⁾	140,61	140,97	94,03	2.996,09	0,78	0,26
MOR ⁽³⁾	136,90	137,20	84,67	2.606,36	0,57	0,22
MOR ⁽⁴⁾	136,85	137,30	85,02	2.620,00	0,85	0,32
CAN ⁽³⁾	189,17	189,68	119,00	2.675,00	0,75	0,28
CAN ⁽⁴⁾	88,60	88,78	55,97	2.701,00	0,56	0,21
ITU	213,40	213,75	132,48	2.626,03	0,42	0,16

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - M_{SEC}: massa seca; M_{SAT}: massa saturada; M_{SUB}: massa submersa; ρ_a : massa específica aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água; *valores que não atenderam aos limites normativos.

Nota 2: Fonte dos dados - ⁽¹⁾ Estudos prévios do GTR (SGS-EESC); ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2019, 2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018).

Figura 13 - Síntese dos resultados do ensaio de índices físicos.



Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - pa: massa específica aparente; ηa: porosidade aparente; αa: absorção de água.

Nota 2: Fonte dos dados - ⁽¹⁾ Estudos prévios do GTR (SGS-EESC); ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2019, 2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018).

4.3 PROPRIEDADES DA ROCHA INTACTA

Analisando os valores obtidos com as três amostras de basaltos, no geral, o **BAS1** apresentou resistências elevadas, com exceção do CP com diâmetro de 76 mm na condição saturada, que apesar de satisfatório ficou próximo dos limites recomendados. Entretanto, nota-se um desvio padrão e coeficiente de variação relativamente altos, provavelmente em função da heterogeneidade do material que apresenta microfissuras, relacionadas à fases mineralógicas hidrotermais. Já a amostra **BAS2** apresentou valores de resistências muito baixas, abaixo dos parâmetros normativos, relacionados, conjuntamente, aos seus altos valores de porosidade, absorção d'água, condições de micro fissuramento e da alteração mineral. A amostra **BAS3** apresentou valores de resistência baixa na condição diâmetro de 76 mm saturada, porém ainda acima dos limites recomendados, e resistências elevadas com o diâmetro de 56 mm.

Já os resultados obtidos com as amostras de diabásio **DIA**, monzodiorito **MON**, microgabro **GAB** e com as amostras de granito, **MOR**, **CAN** e **ITU**, no geral, apresentaram valores de resistência elevados, condizentes com o esperado, pois os materiais são rochas de granulação fina a média.

Em resumo, tanto sob condições secas quanto saturadas em água, todas as rochas, com exceção do **BAS2**, que demonstrou resistências muito abaixo do limite e do **GAB** no diâmetro de 76 mm na condição saturada, apresentaram resistências muito altas (superiores a 170 MPa) e extremamente altas (superior a 260 MPa), valores que superam os 100 MPa requeridos pela NBR 5564 (ABNT, 2021), como, por exemplo, no caso do álcali-feldspato granito **MOR** que apresentou valores mais expressivos, rocha de estrutura maciça, homogênea, compacta e de granulação fina a média.

Destaca-se, ainda, que os valores das amostras ensaiadas na condição saturada (σ_{SAT}) são inferiores aos da condição seca (σ_{SEC}), comportamento já esperado, apresentando índices de enfraquecimento hidráulico (R) que variam consideravelmente, relacionados, em grande parte, aos maiores valores de porosidade, absorção d'água, condições de microfissuramento e da alteração mineral que, conjuntamente, são responsáveis por conduzirem ao enfraquecimento da resistência mecânica da rocha, como no caso dos basaltos e do decaimento levemente mais pronunciado do **GAB**.

A Figura 14 apresenta imagens de alguns dos corpos de prova rompidos pelo ensaio de compressão uniaxial.

Figura 14 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial. Detalhes exibindo corpos de prova antes e após o rompimento, nas formas cilíndricas e tabular saturadas, amostras **BAS1**, **BAS2** e **ITU**, respectivamente.



Fonte: Do autor (2022).

As Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8 apresentam para cada amostra e por cada corpo de prova, nas formas cilíndricas com diâmetros de 76 e 56 mm, nas condições secas e saturadas, os resultados e médias de resistências a compressão uniaxial; os valores de carregamentos máximos; os coeficientes de enfraquecimento hidráulico; o desvio padrão e o coeficiente de variação.

Tabela 6 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial - **BAS1, BAS2 e BAS3.**

	F Ø76 mm	σ_{SEC} Ø76 mm	F Ø76 mm	σ_{SAT} Ø76 mm	F Ø56 mm	σ_{SEC} Ø56 mm	F Ø56 mm	σ_{SAT} Ø56 mm	
BAS1	1°	948,80	217,66	455,40	103,08	421,40	177,37	452,10	183,56
	2°	896,10	205,57	432,00	97,78	501,80	209,68	409,20	172,23
	3°	840,00	192,70	588,60	133,23	533,70	223,01	494,00	207,93
	4°	869,30	199,42	636,40	144,05	476,10	198,94	490,40	206,41
	5°	-	-	-	-	526,60	218,46	493,20	203,87
	Méd.	888,55	203,84	528,10	119,54⁽¹⁾	491,92	205,49	467,78	194,80
	R	58,64%				94,80%			
	DP	46,24	10,61	99,85	22,60	45,47	18,21	37,16	16,01
CV	5,20%		18,91%		9,24%	8,86%	7,94%	8,22%	
BAS2	1°	478,80	108,38	215,80	48,85	176,14	73,60	104,50	42,43
	2°	460,60	104,26	172,80	39,11	182,16	76,12	114,90	48,01
	3°	423,80	95,93	167,70	37,96	132,80	55,49	116,20	48,56
	4°	386,30	87,44	160,90	36,42	132,40	53,76	96,80	40,45
	5°	-	-	138,90	31,44	-	-	108,20	45,21
	Méd.	437,38	99,00	171,22	38,76⁽¹⁾	155,88	64,74	108,12	44,93
	R	39,15%				69,40%			
	DP	41,02	9,29	28,08	6,36	26,99	11,75	7,95	3,50
CV	9,38%		16,40%		17,31%	18,15%	7,35%	7,79%	
BAS3	1°	720,20	165,22	559,60	126,67	687,30	279,05	511,70	207,75
	2°	700,60	160,72	450,60	101,99	509,80	206,98	416,90	169,26
	3°	678,53	155,66	563,10	127,46	564,60	229,23	540,50	219,45
	4°	622,14	142,72	434,70	98,40	-	-	-	-
	5°	-	-	-	-	-	-	-	-
	Méd.	680,37	156,08	502,00	113,63⁽¹⁾	587,23	238,42	489,70	198,82
	R	72,80%				83,39%			
	DP	42,39	9,72	68,85	15,59	90,89	36,90	64,67	26,26
CV	6,23%		13,72%		15,48%		13,21%		

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legenda - F: força (kN) máx. de ruptura; σ_{SEC} e σ_{SAT} : resistência (MPa) a compressão uniaxial na condição seca e saturada, respectivamente; R: enfraquecimento hidráulico; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.Nota 2: Fonte dos dados - ⁽¹⁾ Estudos prévios do GTR (SGS-EESC).

Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial - DIA, MON e GAB.

	F Ø76 mm	σ_{SEC} Ø76 mm	F Ø76 mm	σ_{SAT} Ø76 mm	F Ø56 mm	σ_{SEC} Ø56 mm	F Ø56 mm	σ_{SAT} Ø56 mm	
DIA	1°	1003,00	230,09	980,40	224,91	552,54	223,43	446,00	181,08
	2°	938,60	215,32	971,30	222,82	569,25	229,64	463,70	188,27
	3°	1021,00	234,22	873,20	200,31	548,73	220,58	514,00	207,21
	4°	981,30	225,11	725,20	166,36	544,13	219,25	463,10	186,69
	5°	-	-	-	-	590,18	237,24	433,50	174,75
	Méd.	985,98	226,18	887,53	203,60	560,97	226,03⁽²⁾	464,06	187,60
	R	90,01%				83,00%			
	DP	35,51	8,15	118,60	27,21	18,88	7,44	30,64	12,18
CV	3,60%		13,36%		3,37%	3,29%	6,60%	6,49%	
MON	1°	886,60	203,40	898,20	206,06	525,77	210,20	519,60	209,16
	2°	865,50	198,55	835,80	191,74	521,75	209,24	497,90	200,43
	3°	890,20	204,22	760,50	174,47	543,95	217,01	486,70	195,71
	4°	856,10	196,40	-	-	513,50	205,39	-	-
	5°	-	-	-	-	506,03	201,88	-	-
	Méd.	874,60	200,64	831,50	190,75	522,20	208,74⁽²⁾	501,40	201,77
	R	95,07%				96,66%			
	DP	16,46	3,78	68,95	15,82	14,35	5,68	16,73	6,83
CV	1,88%		8,29%		2,75%	2,72%	3,34%	3,38%	
GAB	1°	831,80	190,82	794,20	182,19	433,34	179,73	372,53	154,51
	2°	799,30	183,37	703,50	161,38	372,96	154,69	290,58	120,52
	3°	831,10	190,66	790,60	181,37	412,51	171,09	369,64	153,31
	4°	840,70	192,87	767,00	175,95	420,96	174,60	364,33	151,11
	5°	817,50	187,54	777,90	178,45	434,93	180,39	380,77	157,93
	Méd.	824,08	189,05⁽³⁾	766,64	175,87⁽³⁾	414,94	172,10	355,57	147,48
	R	93,03%				85,69%			
	DP	16,14	3,70	36,90	8,47	25,21	10,46	36,81	15,27
CV	1,96%		4,81%		6,08%		10,35%		

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas- F: força (kN) máx. de ruptura; σ_{SEC} e σ_{SAT} : resistência (MPa) a compressão uniaxial na condição seca e saturada, respectivamente; R: enfraquecimento hidráulico; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.Nota 2: Fonte dos dados- ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2020), Santos (2021).

Tabela 8 - Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial - MOR, CAN e ITU.

	F	σ_{SEC}	F	σ_{SAT}	F	σ_{SEC}	F	σ_{SAT}	
	Ø76 mm	Ø76 mm	Ø76 mm	Ø76 mm	Ø56 mm	Ø56 mm	Ø56 mm	Ø56 mm	
MOR	1°	1275,00	306,30	1220,00	293,09	727,40	301,80	690,10	282,20
	2°	1192,00	284,80	797,90	191,69	723,10	300,00	607,80	253,98
	3°	1060,00	254,70	1289,00	309,67	611,6	257,40	772,9	322,96
	4°	-	-	-	-	701,3	288,80	687,5	287,28
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Méd.	1175,67	281,93⁽³⁾	1102,30	264,82⁽³⁾	690,85	287,00	689,58	286,61
	R	93,93%				99,86%			
DP	108,43	25,92	265,87	63,87	54,05	20,55	67,42	28,32	
CV	9,22%	9,19%	24,12%		7,82%	7,16%	9,78%	9,88%	
CAN	1°	766,71	184,22	770,46	185,12	431,32	178,90	392,35	162,73
	2°	859,14	206,42	735,21	176,65	441,05	182,93	404,30	167,69
	3°	842,98	202,54	783,05	188,14	377,54	156,56	429,30	178,06
	4°	-	-	783,42	188,23	477,65	198,11	451,18	187,13
	5°	-	-	845,87	203,24	-	-	424,08	175,89
	Méd.	822,94	197,73⁽³⁾	783,60	188,28⁽³⁾	431,89	179,13	423,26	175,55
	R	95,22%				98,01%			
DP	49,37	11,86	39,98	9,60	41,36	17,17	22,84	9,47	
CV	6,00%		5,10%		9,58%		5,40%		
ITU	1°	1156,00	264,48	1098,00	248,54	707,60	285,25	639,20	255,85
	2°	1069,00	244,57	979,00	221,60	655,20	264,13	547,40	219,11
	3°	1034,00	234,05	936,60	212,00	661,50	266,67	475,80	193,18
	4°	1140,00	258,04	-	-	573,30	231,11	469,10	187,77
	5°	-	-	-	-	665,20	268,16	-	-
	Méd.	1099,75	250,29	1004,53	227,38	652,56	263,06	532,88	213,98
	R	90,85%				81,34%			
DP	57,89	13,64	83,67	18,94	48,88	19,71	79,25	31,09	
CV	5,26%	5,45%	8,33%		7,49%		14,87%	14,53%	

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - F: força (kN) máx. de ruptura; σ_{SEC} e σ_{SAT} : resistência (MPa) a compressão uniaxial na condição seca e saturada, respectivamente; R: enfraquecimento hidráulico; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.Nota 2: Fonte dos dados: ⁽³⁾ Santos et al. (2020), Santos (2021).

A Tabela 9 e a Figura 15 e Figura 16 apresentam uma síntese dos resultados obtidos com o ensaio:

Tabela 9 - Síntese dos resultados médios do ensaio de resistência à compressão uniaxial (MPa).

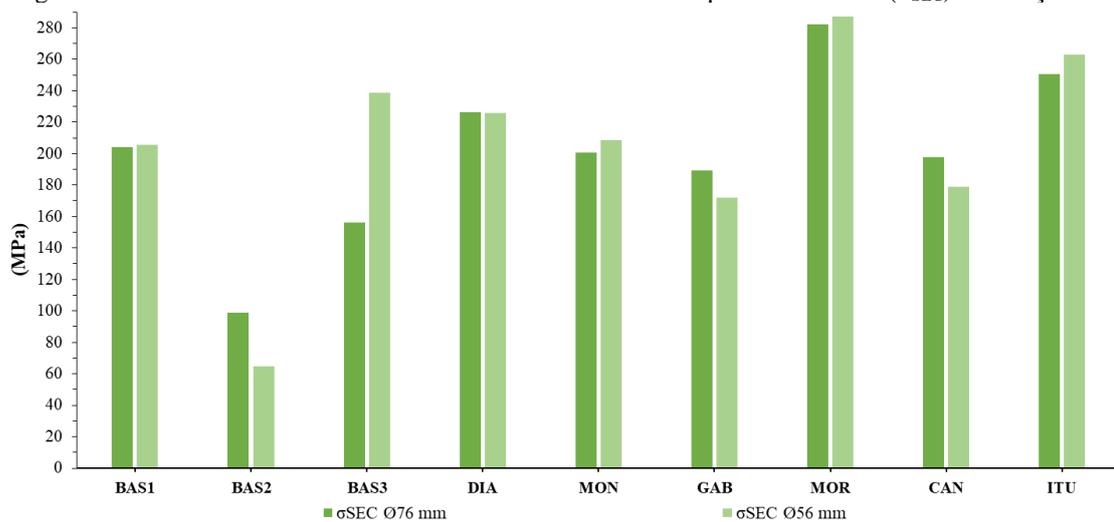
Amostra	σ_{SEC} Ø76 mm	σ_{SEC} Ø56 mm	σ_{SAT} Ø76 mm	σ_{SAT} Ø56 mm
BAS1	203,84	205,49	119,54 ⁽¹⁾	194,80
BAS2	99,00 *	64,74 *	38,76 ^{(1),*}	44,93 *
BAS3	156,08	238,42	113,63 ⁽¹⁾	198,82
DIA	226,18	226,03 ⁽²⁾	203,60	187,60
MON	200,64	208,74 ⁽²⁾	190,75	184,39
GAB	189,05 ⁽³⁾	172,10	175,87 ⁽³⁾	147,48
MOR	281,93 ⁽³⁾	287,00	264,82 ⁽³⁾	286,61
CAN	197,73 ⁽³⁾	179,13	188,28 ⁽³⁾	175,55
ITU	250,29	263,06	227,38	213,98

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - σ_{SEC} e σ_{SAT} : resistência a compressão uniaxial na condição seca e saturada, respectivamente.

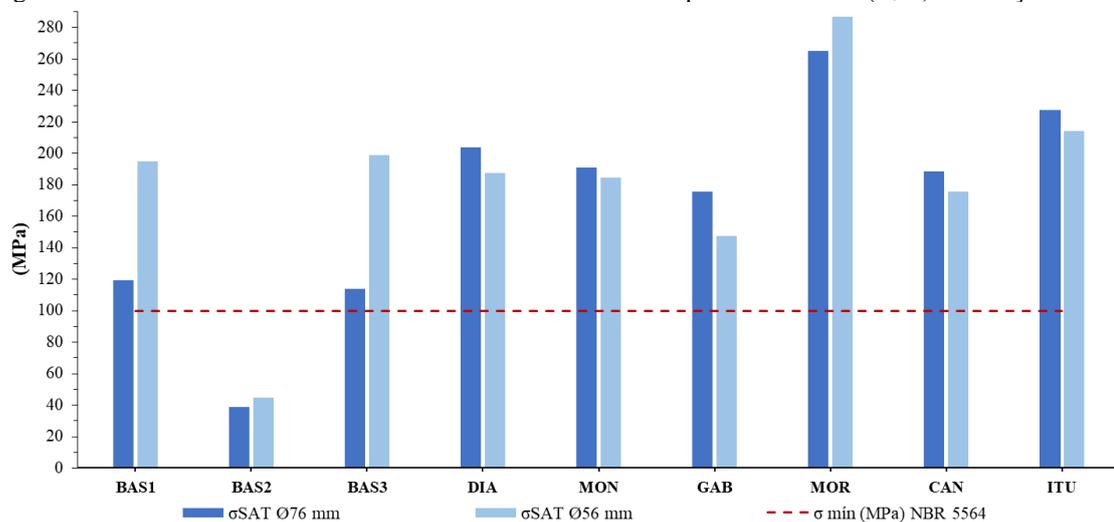
Nota 2: Fonte dos dados - ⁽¹⁾ Estudos prévios do GTR (SGS-EESC); ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2021), Santos (2021); *valores que não atenderam aos limites normativos da NBR 5564 (ABNT, 2021).

Figura 15 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial (σ_{SEC}) - condição seca.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 16 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial (σ_{SAT}) - condição saturada.



Fonte: Do autor (2022).

Assim como esperado e também verificado no ensaio de compressão uniaxial, a análise dos resultados obtidos no ensaio de compressão pontual mostrou o enfraquecimento hidráulico na resistência do material mediante a presença de água, comportamento observado em todos as amostras. Reforçando a necessidade de sempre especificar o estado de saturação do corpo de prova (seco, saturado ou com um determinado teor em água).

A Figura 17 apresenta imagens de alguns dos corpos de prova rompidos pelo ensaio de compressão pontual, cabendo comentar que os valores de $Is_{(50)}$ nas condições seca e saturada para amostras tabulares (TAB) foram superiores para 6 das 9 rochas estudadas (Tabela 10, Figura 18 e Figura 19). Isso significa que vai a favor da segurança do lastro, visto que a forma tabular se aproxima a do lastro britado e a rocha, nessa forma, responde melhor ao efeito punção.

Figura 17 - Resultados do ensaio de resistência à compressão pontual. Detalhes exibindo corpos de prova antes e após os rompimentos, nas formas cilíndricas e tabular, amostras **BAS1**, **BAS2** e **BAS3**, respectivamente.



Fonte: Do autor (2022).

A Tabela 10 e a Figura 18 apresentam uma síntese dos resultados obtidos com o ensaio de resistência à compressão pontual.

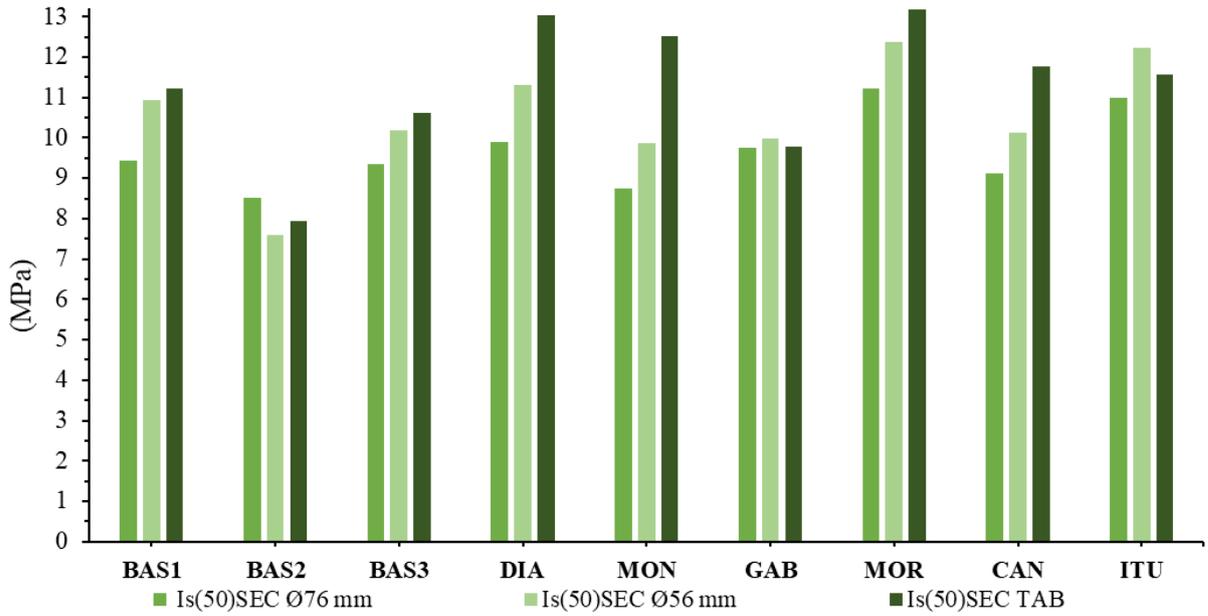
Tabela 10 – Síntese dos resultados dos ensaios de compressão pontual (MPa).

Amostra	$Is_{(50)}$ SEC Ø76 mm	$Is_{(50)}$ SEC Ø56 mm	$Is_{(50)}$ SEC TAB	$Is_{(50)}$ SAT Ø76 mm	$Is_{(50)}$ SAT Ø56 mm	$Is_{(50)}$ SAT TAB
BAS1	9,43	10,92	11,22	8,78	10,90	11,20
BAS2	8,52	7,60	7,94	4,01	6,47	3,95
BAS3	9,36	10,18	10,62	9,11	9,99	10,52
DIA	9,91	11,30	13,04	9,83	11,12	12,79
MON	8,74	9,88	12,51	8,61	9,84	11,86
GAB	9,76	9,98	9,78	9,23	9,58	9,74
MOR	11,22	12,38	13,18	11,10	12,35	12,43
CAN	9,12	10,12	11,78	9,06	10,10	10,73
ITU	10,98	12,22	11,57	10,91	12,16	11,45

Fonte: Do autor (2022).

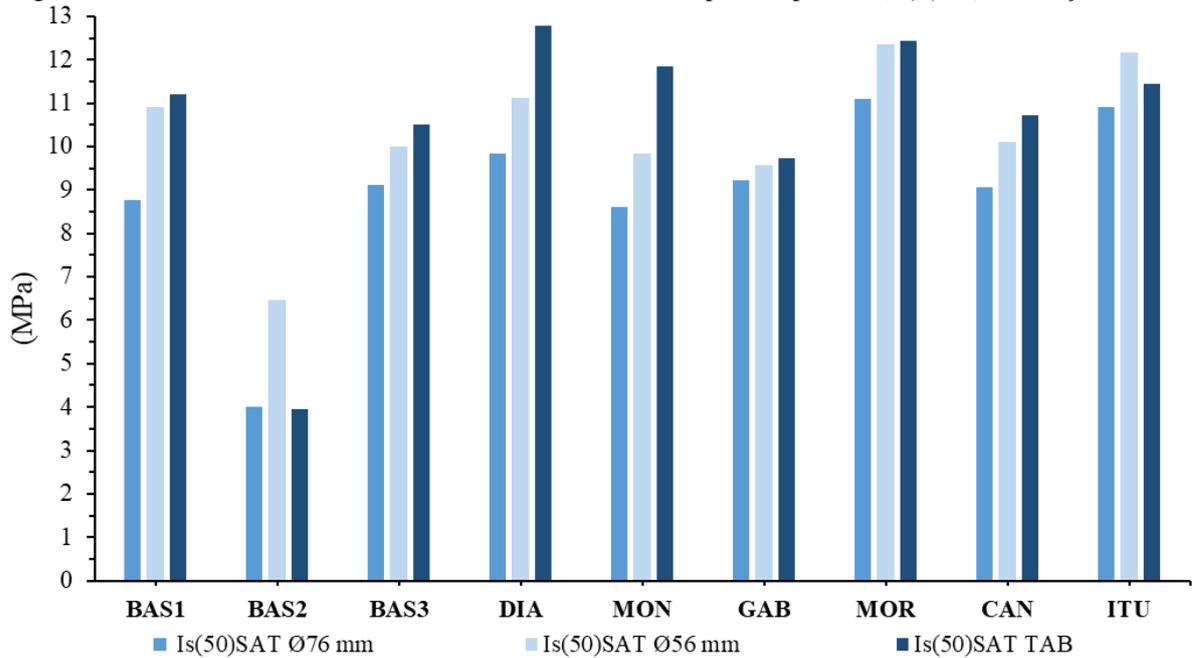
Nota 1: Legendas - $Is_{(50)SEC}$ e $Is_{(50)SAT}$, índice de resistência à compressão pontual, na condição seca e saturada, respectivamente, e nas formas Ø76 mm, Ø56 mm e tabular.

Figura 18 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à compressão pontual ($I_{s(50)SEC}$) - condição seca.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 19 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à compressão pontual ($I_{s(50)SAT}$) - condição saturada.



Fonte: Do autor (2022).

A partir dos resultados obtidos do ensaio de resistência à carga pontual ($I_{s(50)}$) e de resistência à compressão uniaxial (σ_c), determinou-se o valor do parâmetro “K” de correlação entre estas duas resistências, de acordo com os valores cada amostra. Obteve-se correlações para os resultados destes ensaios considerando a forma Ø76 mm, Ø56 mm e tabular e a condição seca e saturada dos materiais, conforme Tabela 11 e Tabela 12.

Tabela 11 – Síntese do valor do parâmetro “K” de correlação entre $I_{s(50)} \times \sigma_c$ - condição seca.

Amostra	$K = \frac{\sigma_{SEC \text{ } \varnothing 76\text{mm}}}{I_{s(50)} \text{ SEC } \varnothing 76\text{mm}}$	$K = \frac{\sigma_{SEC \text{ } \varnothing 56\text{mm}}}{I_{s(50)} \text{ SEC } \varnothing 56\text{mm}}$	$K = \frac{\sigma_{SEC \text{ } \varnothing 76\text{mm}}}{I_{s(50)} \text{ SEC TAB}}$	$K = \frac{\sigma_{SEC \text{ } \varnothing 56\text{mm}}}{I_{s(50)} \text{ SEC TAB}}$
BAS1	21,62	18,82	23,22	23,40
BAS2	11,62	8,52	24,69	16,14
BAS3	16,68	23,42	17,13	26,17
DIA	22,82	20,00	23,01	22,99
MON	22,96	21,13	23,30	24,24
GAB	19,37	17,24	20,48	18,65
MOR	25,13	23,18	25,40	25,86
CAN	21,68	17,70	21,82	19,77
ITU	22,80	21,53	22,94	24,11

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - σ_{SEC} e $I_{s(50)SEC}$: resistência a compressão uniaxial e pontual, na condição seca; nas formas $\varnothing 76$ mm, $\varnothing 56$ mm e tabular; **K**: fator de correlação.

Tabela 12 – Síntese do valor do parâmetro “K” de correlação entre $I_{s(50)} \times \sigma_c$ - condição saturada.

Amostra	$K = \frac{\sigma_{SAT \text{ } \varnothing 76\text{mm}}}{I_{s(50)} \text{ SAT } \varnothing 76\text{mm}}$	$K = \frac{\sigma_{SAT \text{ } \varnothing 56\text{mm}}}{I_{s(50)} \text{ SAT } \varnothing 56\text{mm}}$	$K = \frac{\sigma_{SAT \text{ } \varnothing 76\text{mm}}}{I_{s(50)} \text{ SAT TAB}}$	$K = \frac{\sigma_{SAT \text{ } \varnothing 56\text{mm}}}{I_{s(50)} \text{ SAT TAB}}$
BAS1	13,62	17,87	10,97	17,87
BAS2	9,67	6,94	5,99	6,94
BAS3	12,47	19,90	11,37	19,90
DIA	20,71	16,87	18,31	16,87
MON	22,15	18,74	19,39	18,74
GAB	19,05	15,39	18,36	15,39
MOR	23,86	23,21	21,44	23,21
CAN	20,78	17,38	18,64	17,38
ITU	20,84	17,60	18,70	17,60

Fonte: Do autor (2022).

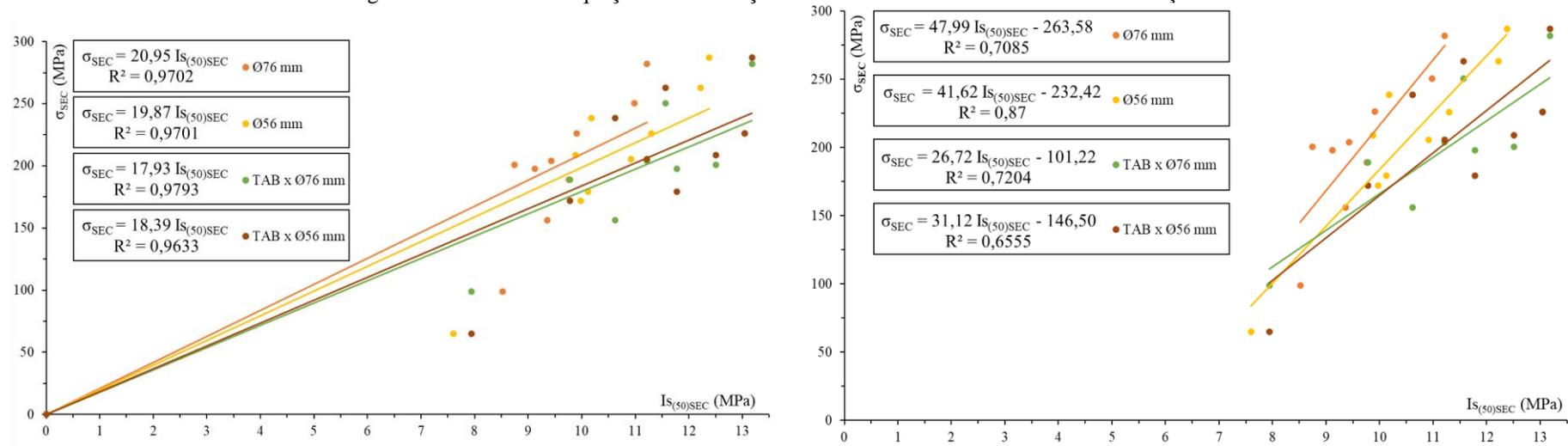
Nota 1: Legendas - σ_{SAT} e $I_{s(50)SAT}$: resistência a compressão uniaxial e pontual, na condição saturada; nas formas $\varnothing 76$ mm, $\varnothing 56$ mm e tabular; **K**: fator de correlação.

Destaca-se os parâmetros obtidos para o basalto **BAS2**, afetado por defeitos mineralógicos e estruturais, confirmando a baixa resistência do material, podendo essa única amostra influenciar significativamente em análises de correlações realizadas, por exemplo, em conjunto por tipo de material.

Visando obter equações lineares que melhor representassem as correlações entre os ensaios de resistência à carga pontual e de resistência à compressão uniaxial, assim como em exemplos da literatura, foram elaboradas tentativas utilizando as amostras do presente estudo.

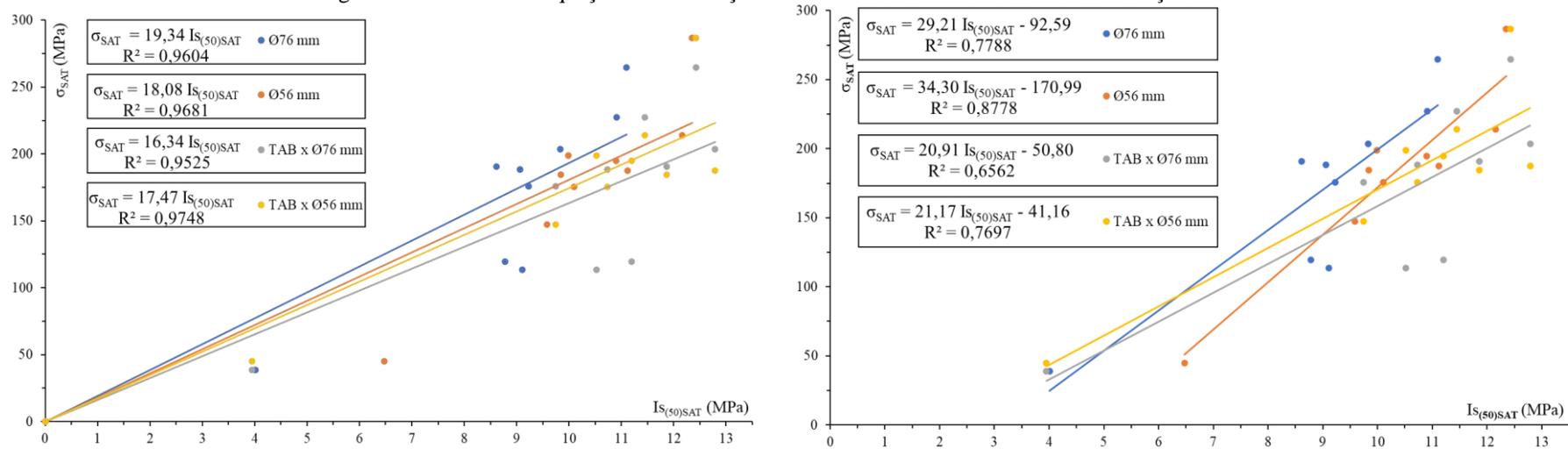
As equações e os coeficientes (R^2) obtidos, apresentados a seguir, foram analisadas considerando a forma de $\varnothing 76$ mm, $\varnothing 56$ mm e tabular e as condições secas e saturadas dos materiais. Inicialmente, realizou-se correlações envolvendo todas as amostras (Figura 20 e Figura 21). Posteriormente, elaborou-se correlações de conjuntos do mesmo tipo de rocha, envolvendo dados apenas das rochas básicas **BAS1**, **BAS2**, **BAS3**, **DIA**, **GAB** e do monzodiorito **MON** (Figura 22 e Figura 23) e, também, apenas dos granitos **MOR**, **CAN** e **ITU** (Figura 24 e Figura 25). Ressalta-se que as avaliações foram realizadas considerando tanto a metodologia do gráfico com origem em zero (0) quanto com a reta a passar pela origem.

Figura 20 – Síntese das equações de correlações de resistência - todas as amostras - condição seca.



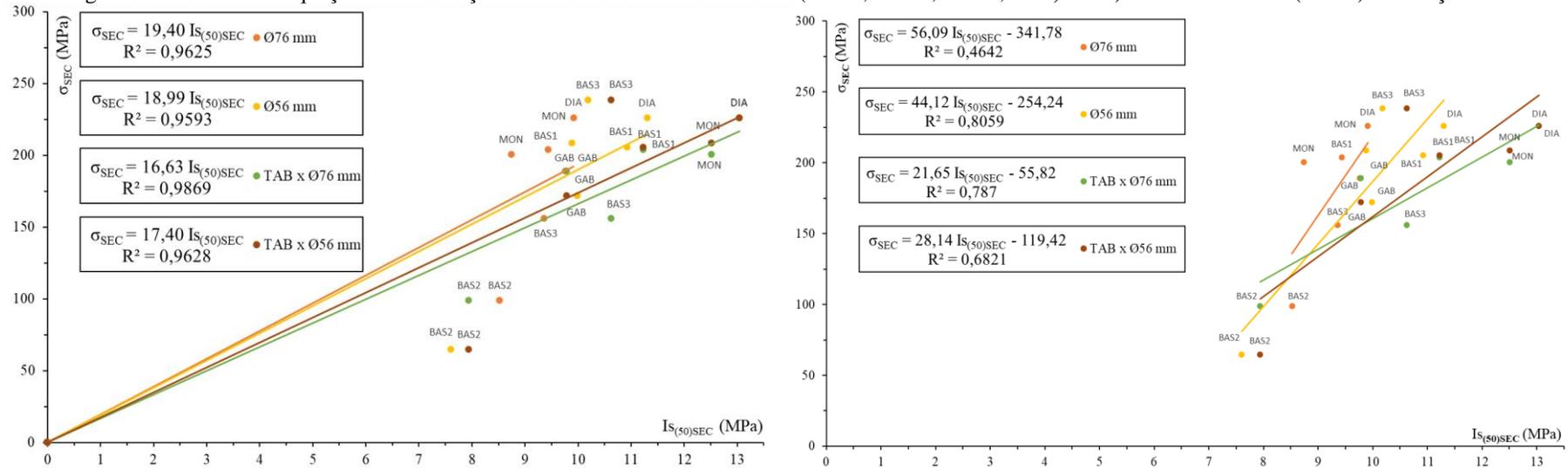
Fonte: Do autor (2022).

Figura 21 – Síntese das equações de correlações de resistência - todas as amostras - condição saturada.



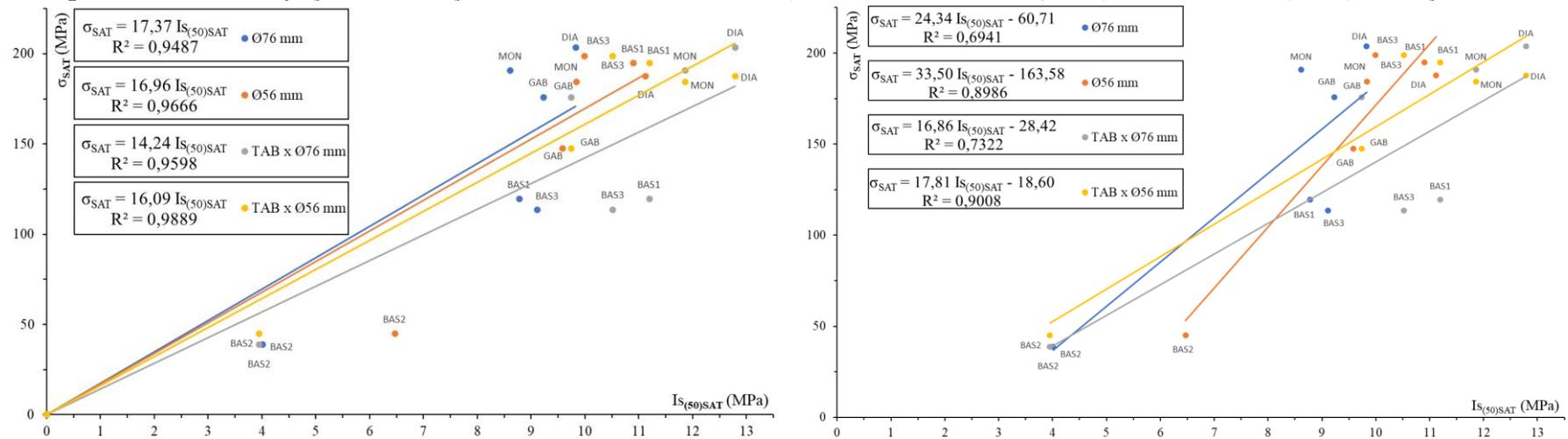
Fonte: Do autor (2022).

Figura 22 - Síntese das equações de correlações de resistência - rochas básicas (BAS1, BAS2, BAS3, DIA, GAB) e o monzodiorito (MON) - condição seca.



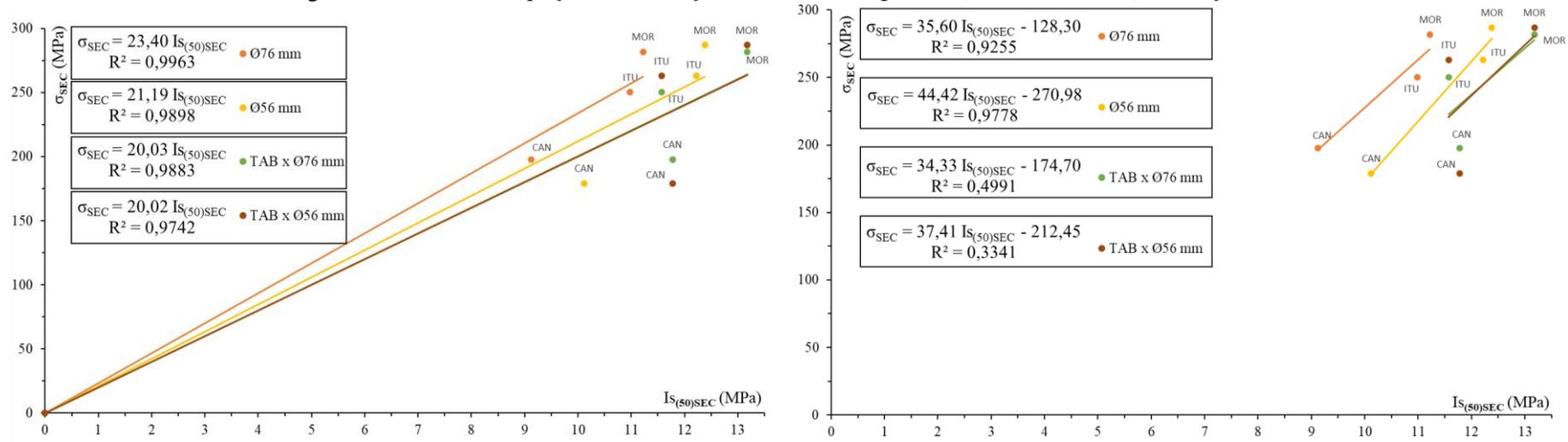
Fonte: Do autor (2022).

Figura 23 - Síntese das equações de correlações de resistência - rochas básicas (BAS1, BAS2, BAS3, DIA, GAB) e o monzodiorito (MON) - condição saturada.



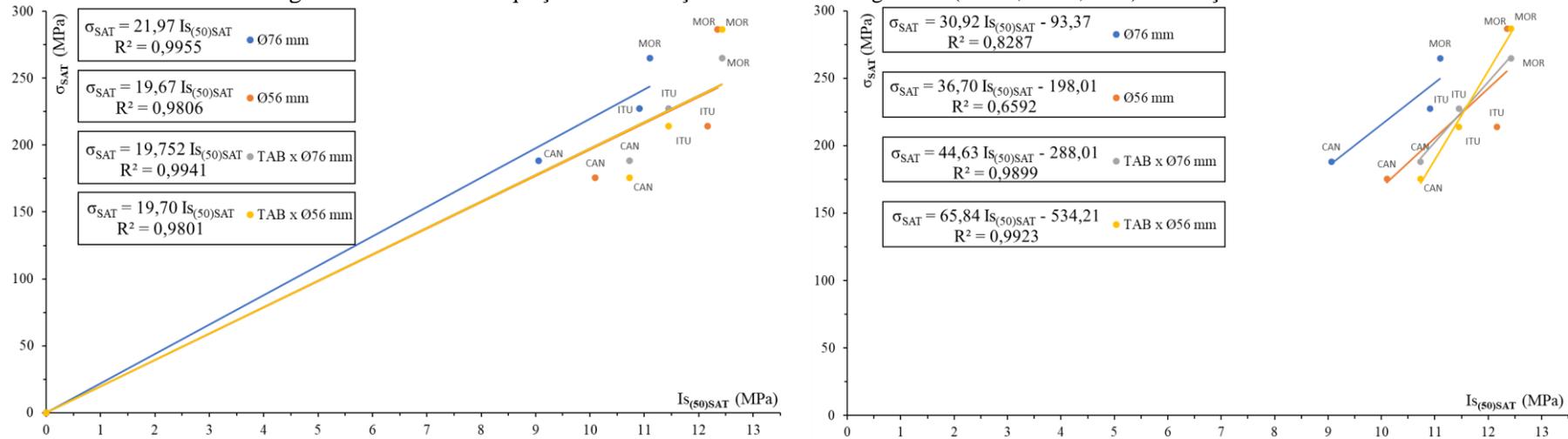
Fonte: Do autor (2022).

Figura 24 - Síntese das equações de correlações de resistência - granitos (MOR, CAN, ITU) - condição seca.



Fonte: Do autor (2022).

Figura 25 - Síntese das equações de correlações de resistência - granitos (MOR, CAN, ITU) - condição saturada.



Fonte: Do autor (2022).

Diversos estudos buscam convergências em valores de parâmetro relacionadas as propriedades mecânicas das rochas cada vez mais reais e aplicáveis à prática profissional. Por meio de correlações entre os valores de resistência à compressão uniaxial e à compressão pontual considerando, por exemplo, apenas as amostras deste estudo, como resultado, obtiveram-se equações lineares e valores de parâmetro “K” em comum satisfatórios, com origem em zero, entre 16 e 20 envolvendo todas as amostras, entre 14 e 19 envolvendo dados apenas das rochas básicas e do monzodiorito e entre 19 e 23 envolvendo apenas os granitos, com representatividade estatística da ordem de grandeza das correlações apresentadas anteriormente na literatura.

A pesquisa permitiu uma contribuição no estudo de correlações de propriedades de resistência mecânica, possibilitando uma ampliação no banco de dados de literatura técnica. Todavia, as relações observadas entre os valores de resistência determinados pelos dois ensaios levam a considerar a existência de fatores de conversão diferenciados, em função principalmente do tipo e região da rocha. A análise feita à variabilidade dos ensaios de compressão uniaxial e pontual, mostrou uma maior dispersão em razão dos valores significativamente baixos ou altos de resistência nas amostras, denotando a necessidade de estudos específicos, visto que o parâmetro variou significativamente à medida que variou-se os critérios e os conjuntos de tipos de rocha.

Deve-se ressaltar que, apesar da alta quantidade de dados e avaliações, por se tratar de apenas alguns materiais, e estes apresentarem comportamento e propriedades diferentes, não é recomendado generalizar um valor médio único que possa ser utilizado para todos os tipos de rocha, como algumas referências sugerem. As correlações e parâmetros aqui propostos só são válidos e devem ser aplicados para estes materiais. Pelo contrário, reforça-se a necessidade de análise prévia e da determinação de parâmetros específicos para cada localidade e tipo de material, de modo a obter dados representativos e validar a utilização de outros litotipos de acordo com os respectivos fatores de conversão.

De modo conservador, pode-se afirmar que os valores mínimos de resistência à compressão uniaxial estimados na literatura, por meio de correlações com os respectivos índices $I_{s(50)}$ indicam que todas as amostras, com exceção do basalto **BAS2**, apresentaram valores de parâmetro de correlação satisfatórios, atendendo aos requisitos mínimos como característica importante de agregado para uso como lastro ferroviário prevista na norma NBR 5564 (ABNT, 2021).

4.4 PROPRIEDADES DO AGREGADO

Os ensaios de resistência à abrasão *Los Angeles* foram realizados em agregados na faixa granulométrica F (50 a 25 mm). Outra vez comprova-se a qualidade de alguns dos materiais analisados, visto que os valores obtidos representaram, no geral, pequenas perdas de massa. Cabe salientar que este ensaio é um dos mais difundidos na caracterização de agregados, que avalia a durabilidade de fragmentos rochosos em solicitações de atrito e impacto, representando o desempenho dos materiais frente a essas condições impostas em serviço, como do lastro.

Os resultados dos ensaios de resistência, bem como valores em porcentagem de perdas de massa por abrasão *Los Angeles* (Tabela 13 e Figura 26) indicam que, considerando a norma brasileira NBR 5564 (ABNT, 2021), todas as rochas, com exceção do basalto **BAS2**, atendem ao limite máximo de perda de massa (P) de 30% ou 35% (a depender do tipo de rocha). Considerando também o índice de até 40% da AREMA (2020) e os valores e as recomendações pouco mais conservadores requeridos pela norma EN 13450 (DIN, 2013) para ferrovias, com limites máximos de perda de massa por abrasão (P) que variam entre 12% para trens de carga e 24% para trens de passageiros, pode-se observar que o mesmo acontece, todas as rochas, com exceção do basalto **BAS2** no caso da norma européia, atendem ao limite máximo de perda por abrasão, cabendo ainda destacar que os valores de algumas das amostras ficaram com margens afastadas do limite máximo. Ressalta-se que o comportamento do basalto **BAS2**, em particular, visto a maior quantidade de opacos e vidro vulcânico, com argilização mais intensa dos minerais primários e presença sistemática de micro vesículas/amígdalas.

A perda de massa significativa, mas ainda abaixo do limite normativo, observada no monzogranito **CAN**, considerando a variação dos valores de perda de massa por abrasão (P) obtidos por Santos (2021) e Remédio (2017), pode envolver aspectos texturais ou variações faciológicas deste granito inequigranular (porfírico) ou mesmo envolver um domínio geológico-estrutural da pedreira mais tectonizado, com presença mais marcante de descontinuidades pouco espaçadas.

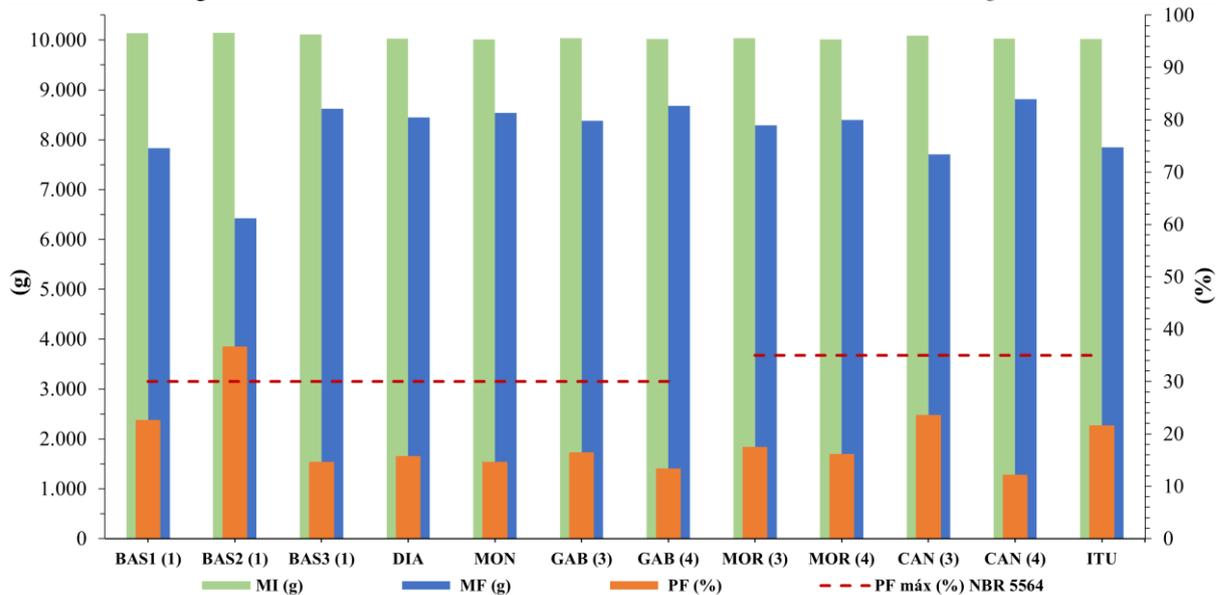
Tabela 13 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à abrasão *Los Angeles*.

Amostra	M _I (g)	M _F (g)	P _F (%)
BAS1 ⁽¹⁾	10.135,0	7.835,0	22,70
BAS2 ⁽¹⁾	10.145,0	6.425,0	36,70*
BAS3 ⁽¹⁾	10.115,0	8.625,0	14,70
DIA	10.024,0	8.445,0	15,80
MON	10.014,0	8.540,0	14,70
GAB ⁽³⁾	10.035,0	8.380,0	16,50
GAB ⁽⁴⁾	10.022,0	8.677,0	13,40
MOR ⁽³⁾	10.040,0	8.285,0	17,50
MOR ⁽⁴⁾	10.015,0	8.394,0	16,20
CAN ⁽³⁾	10.090,0	7.705,0	23,60
CAN ⁽⁴⁾	10.031,0	8.809,0	12,20
ITU	10.016,0	7.850,0	21,60

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - M_I e M_F: massa inicial e final; P_F: perda de massa por abrasão *Los Angeles* na graduação F.

Nota 2: Fonte dos dados - ⁽¹⁾ Estudos prévios do GTR (SGS-EESC); ⁽³⁾ Santos et al. (2020), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018); *valores que não atenderam os limites normativos.

Figura 26 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à abrasão *Los Angeles*.

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - M_i e M_f : massa inicial e final; PF: perda de massa por abrasão *Los Angeles* na graduação F.

Nota 2: Fonte dos dados - ⁽¹⁾ Estudos prévios do GTR (SGS-EESC); ⁽³⁾ Santos et al. (2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018).

O ensaio de resistência ao choque, impacto Treton, ensaio relevante em termos de critério de seleção de rochas para lastro, foi selecionado para qualificar os materiais, pois trata-se de um método que fragmenta os agregados com quedas sucessivas de um martelo. Nesta pesquisa, no geral, foi o ensaio que denotou maior influência da textura e granulação das amostras nos resultados.

Dos materiais estudados, três deles: basalto **BAS2** e granitos **MOR** e **CAN** não atenderam ao limite máximo de 25% recomendado pela norma NBR 5564 (ABNT, 2021) para o índice de impacto Treton (T), excedendo pouco acima o limite, classificando estes materiais, neste ensaio, como inapropriados para aplicação como lastro ferroviário. Destaca-se o resultado obtido com o granito **MOR**, que, de outro modo, apresentou um excelente comportamento nos outros ensaios.

Porém, cabe mencionar algumas limitações deste ensaio, referente às diferenças na preparação “manual” da forma dos fragmentos para remover as arestas e evitar eixos alongados, e à pequena fração granulométrica das partículas a serem ensaiadas (12,5 a 9,5 mm), podendo fazer com que o impacto do soquete de ensaio seja, mesmo que parcialmente, absorvido por fragmentos pouco mais salientes, além efetivamente do “efeito escala”, ao não se utilizar amostras com dimensões em escala real de aplicação como lastro, ou seja, não retratando adequadamente as solicitações e a resistência mecânica em relação ao impacto do material ensaiado para esta finalidade.

As massas iniciais (M_i) e finais (M_f , após as solicitações de impacto e peneiramento) e os cálculos dos resultados individuais (T) dos ensaios realizados para todos os litotipos estudados, bem como os valores médios da resistência ao choque (T_m) são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Figura 28 e Tabela 14.

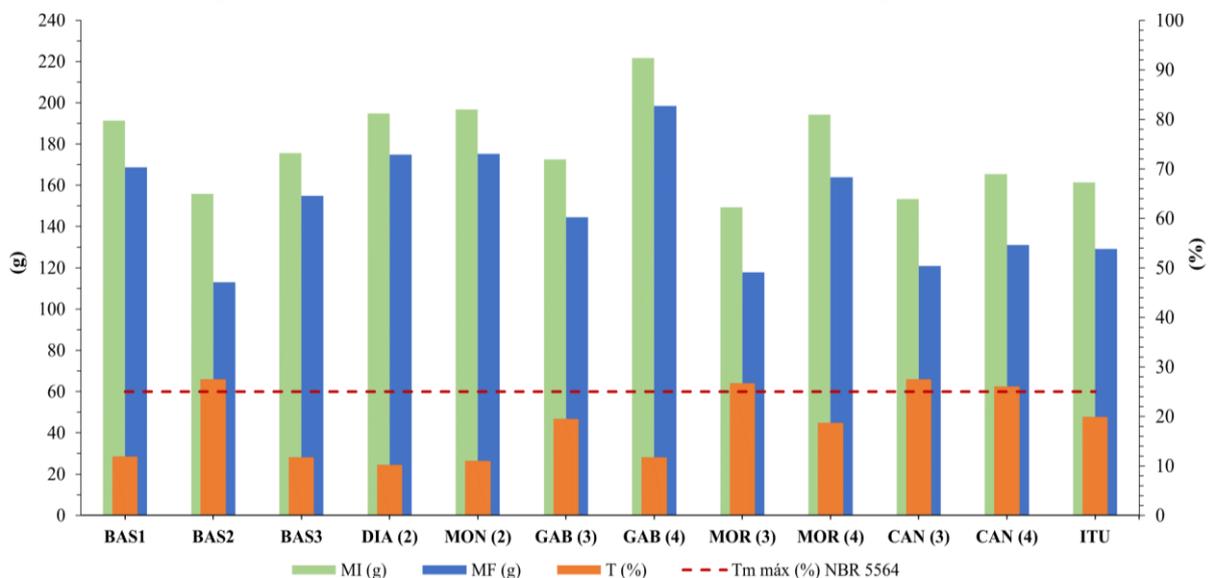
Tabela 14 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência ao impacto Treton.

Amostra	1 ^a			2 ^a			3 ^a			T _m (%)
	M _I (g)	M _F (g)	T (%)	M _I (g)	M _F (g)	T (%)	M _I (g)	M _F (g)	T (%)	
BAS1	198,67	174,50	12,17	193,86	172,85	10,84	181,75	158,70	12,68	11,90
BAS2	151,00	106,84	29,25	163,73	119,82	26,82	152,72	112,20	26,53	27,53*
BAS3	177,51	159,58	10,10	176,54	153,74	12,91	172,63	151,50	12,24	11,80
DIA ⁽²⁾	193,92	173,83	10,36	192,61	172,60	10,39	197,73	178,33	9,81	10,20
MON ⁽²⁾	192,59	171,62	10,89	196,62	174,45	11,28	201,04	179,33	10,80	11,00
GAB ⁽³⁾	166,92	139,44	19,70	163,62	134,61	21,60	187,09	159,69	17,20	19,50
GAB ⁽⁴⁾	207,21	184,35	12,40	235,45	210,84	11,67	222,23	200,04	11,09	11,70
MOR ⁽³⁾	140,84	108,95	29,30	156,35	124,21	25,90	150,54	120,44	25,00	26,70*
MOR ⁽⁴⁾	202,22	175,34	15,33	198,32	167,82	18,17	181,98	148,38	22,64	18,70
CAN ⁽³⁾	155,90	124,67	25,10	162,88	134,17	21,40	140,97	103,72	35,90	27,50*
CAN ⁽⁴⁾	165,11	129,79	27,21	165,80	130,83	26,73	165,13	132,84	24,31	26,10*
ITU	167,24	131,57	21,33	159,39	127,32	20,12	157,48	128,74	18,25	19,90

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - M_I e M_F: massa inicial e final; T e T_m: resistência e resistência média ao impacto Treton.Nota 2: Fonte dos dados - ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018); *valores que não antederam os limites normativos.

Figura 27 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência ao impacto Treton.



Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - M_I e M_F: massa inicial e final média; T ou T_m: resistência média ao impacto Treton.Nota 2: Fonte dos dados - ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018).

Figura 28 - Resultados do ensaio de resistência ao impacto Treton. Detalhes exibindo conjunto de fragmentos antes e após os impactos do soquete, amostras **BAS1**, **BAS2**, **BAS3** e **ITU**, respectivamente.



Fonte: Do autor (2022).

O ensaio de resistência ao esmagamento, determinado com base nas diretrizes da norma NBR 9938 (ABNT, 2013), apesar de ainda não estar contemplado pelas entidades normativas de lastro no Brasil, provavelmente, por não pertencer da faixa granulométrica de ensaios para lastro, avalia uma propriedade mecânica importante em termos das solicitações reais de campo impostas ao lastro.

Os valores médios do ensaio de resistência ao esmagamento, bem como as massas e resultados individuais dos ensaios realizados são apresentados na Tabela 15 e Figura 29. Conforme mencionado, utilizou-se o acervo de amostras disponíveis no Departamento de Geotecnia (EESC), garantindo o manuseio exatamente igual ao qualificado nos estudos prévios. Porém, em virtude da pequena disponibilidade de material remanescente, não foi possível realizar o ensaio de esmagamento para as amostras **BAS1** e **BAS2**, dada a grande quantidade de material requerida para ser ensaiada.

Tabela 15 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência ao esmagamento.

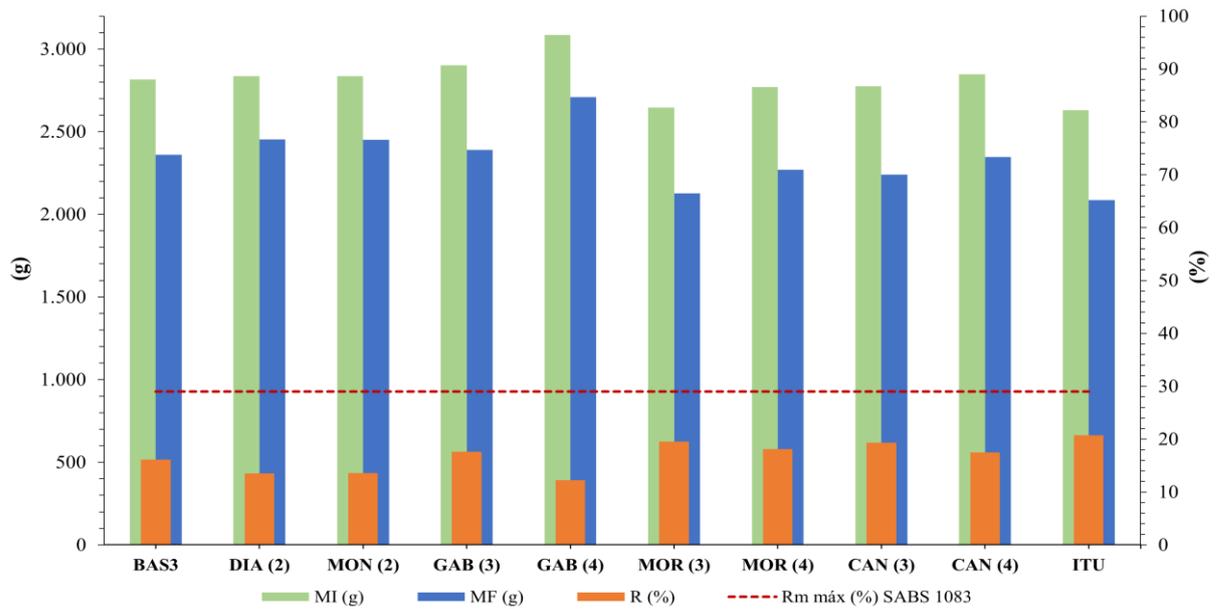
Amostra	1 ^a			2 ^a			R _m (%)
	M _I (g)	M _F (g)	R (%)	M _I (g)	M _F (g)	R (%)	
BAS3	2.760,00	2.305,10	16,50	2.870,00	2.416,90	15,80	16,10
DIA ⁽²⁾	2.849,00	2.456,30	13,80	2.822,40	2.448,70	13,20	13,50
MON ⁽²⁾	2.786,50	2.402,20	13,80	2.884,90	2.499,20	13,40	13,60
GAB ⁽³⁾	2.897,70	2.366,40	18,30	2.904,00	2.413,30	16,90	17,60
GAB ⁽⁴⁾	3.105,10	2.725,30	12,20	3.064,40	2.692,00	12,20	12,20
MOR ⁽³⁾	2.645,00	2.109,40	20,30	2.644,80	2.146,50	18,80	19,50
MOR ⁽⁴⁾	2.757,60	2.262,40	18,00	2.782,20	2.275,90	18,20	18,10
CAN ⁽³⁾	2.759,90	2.249,30	18,50	2.791,20	2.230,00	20,10	19,30
CAN ⁽⁴⁾	2.829,40	2.346,10	17,10	2.863,60	2.348,60	18,00	17,50
ITU	2.642,90	2.078,50	21,40	2.616,40	2.094,10	20,00	20,70

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - M_I e M_F: massa inicial e final; R e R_m: resistência e resistência média ao esmagamento.

Nota 2: Fonte dos dados - ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018).

Figura 29 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência ao esmagamento.



Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - M_i e M_f : massa inicial e final média; R: resistência média ao esmagamento.

Nota 2: Fonte dos dados - ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018).

Considerando o limite máximo de 29% recomendado pela norma SABS 1083 (2006) e por Frazão (2007), para a resistência do agregado ao esmagamento (R), observa-se que todas as rochas ensaiadas atendem este requisito. Os materiais rochosos ensaiados apresentam baixos índices de perda de massa, correlação direta com a granulação das rochas, ou seja, rochas com cristais mais finos demonstram ser mais resistentes, comprovando mais uma vez a excelente qualidade dos materiais. Dentre os materiais estudados nenhuma das amostras sequer apresentou valores de R relativamente mais expressivos e próximos ao parâmetro limite de qualificação tecnológica acima mencionado.

4.5 ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE

Frente aos processos laboratoriais de ensaios de alterabilidade, que procuram retratar às solicitações e condições de degradação impostas nos materiais pétreos em serviço, destaca-se a importância dos estudos petrográficos no sentido de fornecer informações detalhadas dos componentes mineralógicos (especialmente os de alteração e/ou de preenchimento das amígdalas).

Analisando os valores do ensaio de resistência à intempérie em ciclagem com saturação em solução de sulfato de sódio anidro conjugado a secagem em estufa a 110 °C, ainda que as diferenças texturais entre as amostras analisadas sejam pronunciadas, não foram obtidos resultados significativos de perdas de massa. De modo geral, os resultados foram relativamente baixos, exceto o comportamento mais pronunciado da amostra **BAS2**, com pequenas perdas de massa, inferiores ao valor máximo de 10% recomendado pela NBR 5564 (ABNT, 2021).

O processo de quebra dos fragmentos foi desenvolvido pela recristalização dos sais de sulfato de sódio que, enquanto solução e durante o processo de recristalização, preencheram as fissuras ou mesmo “vazios” mais expressivos como vesículas e amígdalas, por exemplo, localmente presentes e estruturais nas camadas basálticas, em geral de topos e bases de derrames. Destaca-se aqui o exemplo da amostra **BAS2**, com presença constante de vesículas e/ou amígdalas de dimensões milimétricas (< 2mm).

Também há uma relação direta no processo de quebra dos fragmentos com a capacidade de absorção de água, uma vez que neste ensaio há uma recristalização dos sais de sulfato de sódio que, enquanto solução, preenchem as fissuras e os poros do material.

Os resultados deste tipo de ensaio dependem muito do regime climático e das condições reais de campo e da geologia local onde se localiza a linha férrea. Pode-se inferir que o grau de microfissuramento mineral deve ter sido o responsável pela resposta das amostras às solicitações mais agressivas do envelhecimento acelerado estabelecidas na ciclagem com solução de sulfato de sódio.

Aliada à quantificação de perda de massa após a ciclagem, efetuou-se a avaliação qualitativa de todas as amostras por meio de exames dos aspectos visuais, com a verificação e documentação fotográfica dos eventuais danos (fissuras, trincas, escamações, oxidação, desagregação etc.).

As massas e os resultados calculados nos ensaios laboratoriais de resistência à intempérie em ciclagem com solução de sulfato de sódio são apresentados na Tabela 16 e Figura 30.

Tabela 16 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência a intempérie por ciclagem em solução de sulfato.

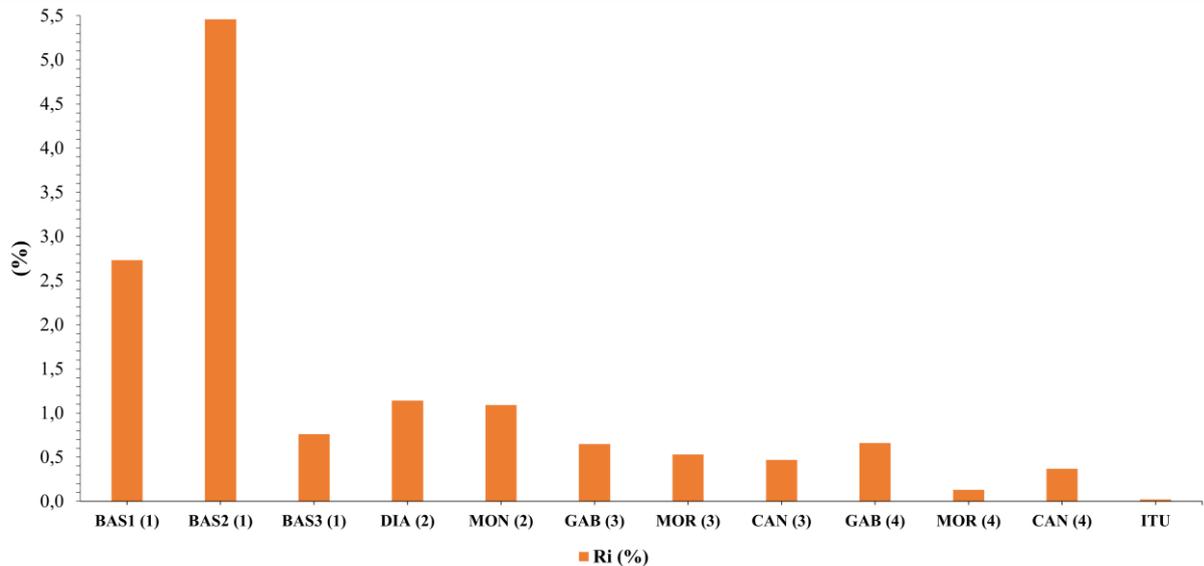
Amostra	M _I (g)	M _F (g)	Ri (%)	Observações
BAS1 ⁽¹⁾	2.992,19	2.910,00	2,73	Oxidação superficial e pouco pronunciada; rachadura e/ou partição localizadas e pontuais.
BAS2 ⁽¹⁾	3.053,40	2.886,76	5,46	Frequentes e intensos lasqueamentos; desintegração nos fragmentos.
BAS3 ⁽¹⁾	3.039,80	3.016,69	0,76	
DIA ⁽²⁾	1.308,93	1.294,04	1,14	
MON ⁽²⁾	1.305,21	1.290,99	1,09	
GAB ⁽³⁾	1.500,22	1.490,46	0,65	Oxidação superficial e pouco pronunciada.
MOR ⁽³⁾	1.500,47	1.492,45	0,53	
CAN ⁽³⁾	1.500,60	1.493,49	0,47	
GAB ⁽⁴⁾	1.580,90	1.570,43	0,66	Oxidação pouco pronunciada; fissuração e rachaduras evidentes, mas pouco pronunciadas.
MOR ⁽⁴⁾	1.318,17	1.316,5	0,13	Oxidação pouco pronunciada; localmente lixiviação, alteração pouco evidente de minerais máficos e/ou opacos.
CAN ⁽⁴⁾	1.335,74	1.330,74	0,37	Oxidação moderada a intensa; fissurações evidentes, mas pouco pronunciadas.
ITU	5.355,02	5.353,96	0,02	Oxidação superficial e pouco pronunciada.

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - M_I e M_F: massa inicial e final; Ri: resistência à intempérie por solução de sulfato.

Nota 2: Fonte dos dados - ⁽¹⁾ Estudos prévios do GTR (SGS-EESC); ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2019, 2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018).

Figura 30 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à intempérie por ciclagem em solução de sulfato.



Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legendas - Ri: resistência à intempérie por solução de sulfato.

Nota 2: Fonte dos dados - ⁽¹⁾ Estudos prévios do GTR (SGS-EESC); ⁽²⁾ Curtis Neto et al. (2018), Curtis Neto (2019); ⁽³⁾ Santos et al. (2019, 2021), Santos (2021); ⁽⁴⁾ Remédio (2017), Remédio et al. (2018).

Em termos da avaliação qualitativa dos danos ao longo dos ciclos de saturação em solução de sulfato de sódio e secagem em estufa, verificou-se a oxidação superficial e pouco ou média pronunciada dos fragmentos ensaiados, com algumas evidências mais localizadas e pontuais de rachadura e/ou partição de alguns fragmentos, como no caso do basalto **BAS1** que já se mostrava fraturado antes do início dos ensaios de sanidade.

No entanto, em observações mais significativas dos aspectos visuais das perdas de massa dos materiais, após cada ciclagem, verificou-se, caracterizada por um padrão pervasivo de microfissuras mais abertas e interconectadas, aliada à presença constante de vesículas e/ou amígdalas, a ocorrência de frequentes e intensos lasqueamentos e a desintegração expressiva nos fragmentos da amostra de basalto **BAS2**, que apresentou perda de 5,46% em massa total, de modo que o material perdido na peneira após o ensaio pôde ser observado com facilidade (Figura 31).

Esperava-se um efeito maior da cristalização do sulfato de sódio no interior do microgabro **GAB** ao longo dos ensaios de ciclagem com sulfato, por apresentar uma porosidade relativamente alta, uma vez que a rocha 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, dentre eles opacos, clorita, anfibólios fibrosos e argilas (celadonita e nontronita). Isto acarretaria no maior fissuramento dos materiais submetidos à ciclagem, o que não ocorreu, possivelmente pelo padrão de microfissuramento descontínuo e intragrão como mostrado nas análises petrográficas.

Figura 31 - Amostra de basalto **BAS2**, (A, C) em condição natural e (B, D) após ciclagem em solução de sulfato.



Fonte: Do autor (2022).

Nota: (A, B) amostras entre 63 e 50 mm em condição natural e após o 5º ciclo de alteração acelerada em sulfato, respectivamente. (C, D) amostras entre 50 e 38,5 mm em condição natural e após o 5º ciclo de alteração acelerada em sulfato, respectivamente.

Comparativamente ao observado nos ensaios de ciclagem com sulfato de sódio, nos ciclos de saturação com etilenoglicol (composto orgânico de fácil penetração nas microdescontinuidades da rocha, que por forças expansivas levam à sua fragmentação) e secagem em estufa, em termos quantitativos, valores expressivos de perdas de massa foram verificados nos basaltos **BAS2** e **BAS3** e no microgabro **GAB**, com notáveis evidências de danos, fissuramento, rachadura, lasqueamento e fragmentação (Tabela 17 e Figura 32). Portanto, espera-se que o mesmo ocorra com as amostras quando expostas por longo tempo à molhagem e secagem em uma condição de serviço em meio saturado.

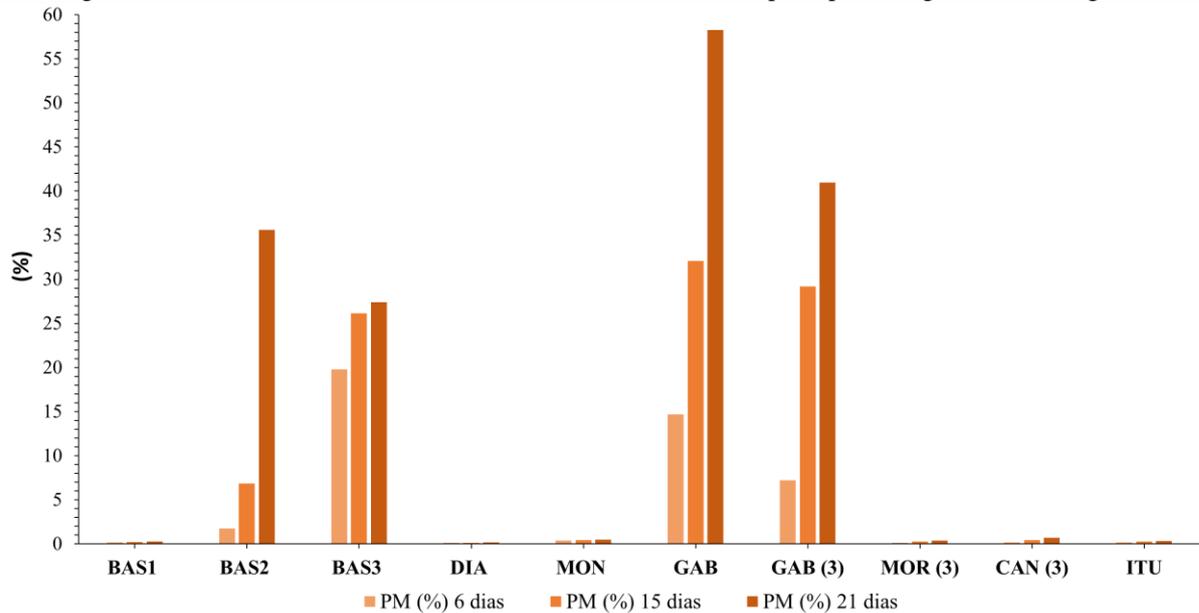
Tabela 17 – Síntese dos resultados do ensaio de resistência à intempérie por ciclagem em etilenoglicol.

Amostra	M _I (g)	M _F (g)	PM (%)	Observações
BAS1	3.077,19	3.068,76	0,27	Oxidação pouco pronunciada; rachaduras esporádicas.
BAS2	3.091,28	1.990,75	35,6	Oxidação e lixiviação mais intensas nas partículas com vesículas e/ou amígdalas; perda de massa mais expressiva no último ciclo.
BAS3	3.026,31	2.196,62	27,4	Rachaduras e partições consideráveis; desagregação perda de massa inicial considerável e progressiva ao longo dos ciclos.
DIA	3.047,55	3.041,98	0,18	Oxidação superficial e pouco pronunciada.
MON	3.061,63	3.046,66	0,49	Oxidação pouco pronunciada; rachaduras esporádicas.
GAB	3.107,21	1.297,05	58,3	Rachaduras e partições consideráveis e progressivas ao longo dos ciclos; pode-se observar perda de massa bem mais expressiva nas amostras de maior granulometria.
GAB ⁽³⁾	1.505,38	888,89	41,0	
MOR ⁽³⁾	1.501,32	1.495,46	0,39	
CAN ⁽³⁾	1.501,41	1.491,03	0,69	Oxidação pouco pronunciada; rachaduras esporádicas.
ITU	3.016,00	3.006,00	0,34	Oxidação superficial e pouco pronunciada.

Fonte: Do autor (2022).

Nota: M_I e M_F: massa inicial e final; P_M: perda de massa por ciclagem em etilenoglicol; ⁽³⁾ Santos et al. (2019, 2021), Santos (2021).

Figura 32 - Síntese dos resultados do ensaio de resistência à intempérie por ciclagem em etilenoglicol.



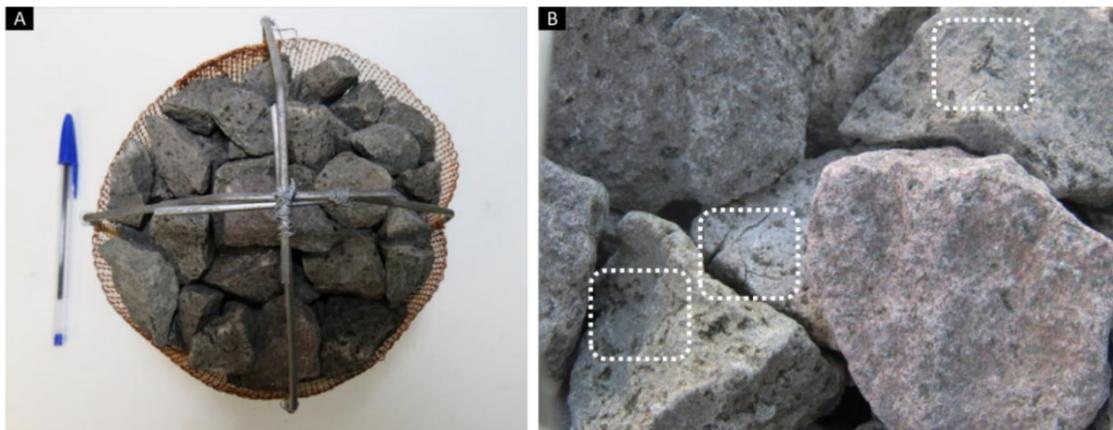
Fonte: Do autor (2022).

Nota: P_M: perda de massa por ciclagem em etilenoglicol; ⁽³⁾ Santos et al. (2019, 2021), Santos (2021).

Os dados obtidos com o **BAS2** confirmam que a duração de 21 dias de ensaio, indicada por Van Blerk et al. (2017), deve ser utilizada na caracterização da alterabilidade de basaltos, uma vez que este material teve um salto na perda de massa somente durante os últimos dias/ciclos de ensaio (Figura 33). Nota-se que a amostra **BAS3**, que seria considerada de baixa alterabilidade pelo ensaio com sulfato, apresentou perda de massa de 27% no ensaio com etilenoglicol (Figura 34). Esta constatação é importante, visto que o ensaio foi recentemente incorporado na revisão da NBR 5564 (ABNT, 2021).

O microgabro **GAB** apresentou a maior perda de massa neste ensaio. Conforme descrito previamente, a análise petrográfica deste material indicou nas microfissuras a ocorrência de argilas expansivas (celadonita e nontronita) dentre os minerais secundários que, na presença da solução, produziram tensões internas na rocha levando à sua degradação (Figura 35).

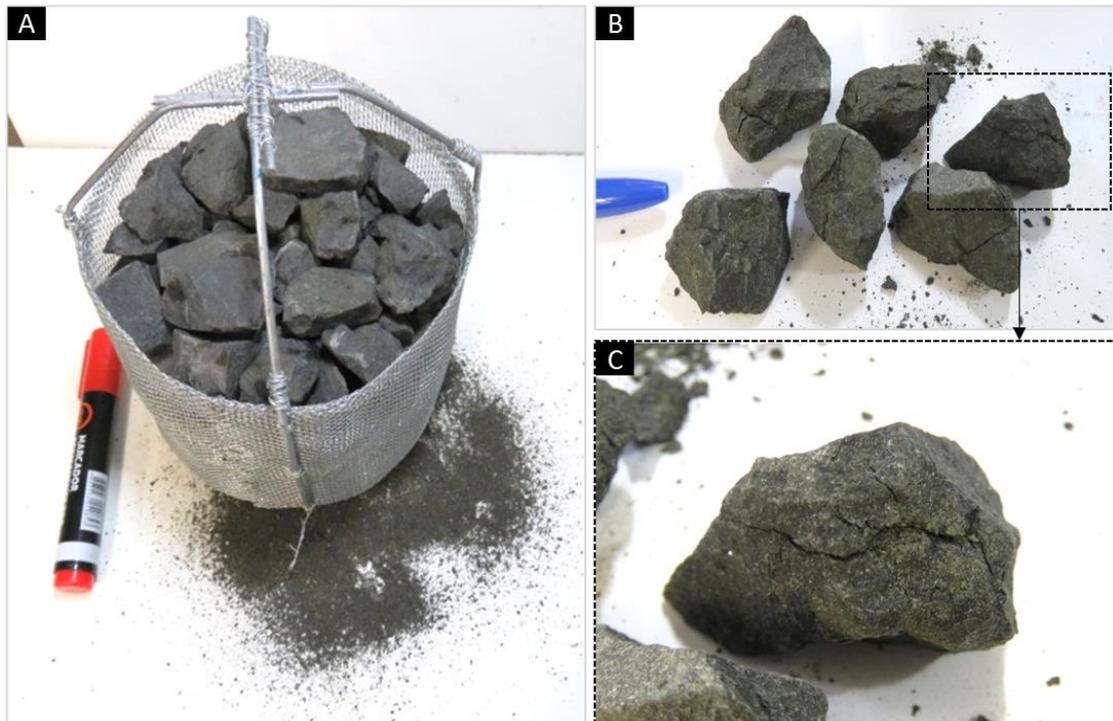
Figura 33 - Conjunto de partículas da amostra **BAS2** submetidas ao ensaio de ciclagem em etilenoglicol.



Fonte: Do autor (2022).

Nota: (A) Conjunto recipiente/amostra após ciclagem com etilenoglicol. (B) partículas com expressiva descoloração e fendilhamento.

Figura 34 – Conjunto de partículas da amostra **BAS3** submetidas ao ensaio de ciclagem em etilenoglicol.



Fonte: Do autor (2022).

Nota: (A) Conjunto recipiente/amostra de 63,5 a 50 mm após a ciclagem com etilenoglicol, com geração de finos observada. Em (B, C) partículas com notável fendilhamento e expressiva fragmentação.

Figura 35 - Conjunto de partículas da amostra **GAB** submetidas ao ensaio de ciclagem em etilenoglicol.



Fonte: Do autor (2022).

Nota: (A) Conjunto recipiente/amostra após a ciclagem com etilenoglicol. Observar, em (B), quantidade expressiva em perda de massa de fragmentos com diâmetros < 19,5 mm. Maior detalhe (C, D) na intensa fragmentação das partículas ao longo de todos os ciclos do ensaio.

Em relação ao ensaio de lixiviação contínua Soxhlet, problemas técnicos-operacionais ocorreram no balão de aquecimento do aparelho e a programação de atividades também sofreu restrições impostas pela pandemia do COVID-19. Foram realizados 3 ciclos com cada amostra, coletadas diretamente na pilha de britagem da planta de beneficiamento (PB); e na frente de desmonte da pedreira, (FD). Ao final, foram coletadas amostras da solução lixiviada (líquida) e do resíduo evaporado da solução lixiviada (sólida), e realizadas, em todas as amostras, incluindo as de água destilada utilizadas no sistema, análises químicas (triplicatas) de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF).

Considerando os testes preliminares na nova configuração do equipamento, ao ensaiar a amostra de microgabro **GAB** as análises químicas (triplicatas) de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF) indicaram um acréscimo dos íons solubilizados em decorrência da quebra das estruturas cristalinas dos minerais constituintes que são susceptíveis à lixiviação (plagioclásio, piroxênio e olivina), abrindo perspectivas de experimentos com maior número de ciclos para se obter uma base de dados mais significativa em termos da alterabilidade (Tabela 18).

Tabela 18 - Valores médios de EDXRF (% m/m) dos ensaios iniciais de lixiviação e da água utilizada no sistema

Elementos	Amostra da pilha de britagem (PB)		Amostra da frente de desmonte (FD)	
	Água Destilada	Resíduo seco da lixiviação	Água Destilada	Resíduo seco da lixiviação
Alumínio	0,149	2,036	0,152	2,744
Cálcio	1,755	12,983	0,236	2,876
Ferro	0,001	0,023	0,235	6,526
Potássio	0,046	0,160	-	0,861
Magnésio	0,005	0,096	-	-
Sódio	0,022	0,595	-	-
Silício	0,045	0,070	0,380	12,943

Fonte: Do autor (2022).

O Soxhlet modificado mostrou-se eficiente para o estudo de lixiviação de materiais pétreos, devendo ser também utilizado em pesquisas com os sub-produtos de britagem (pedrisco e pó de pedra) e as possibilidades do emprego na remineralização de solos (rochagem). O estudo da alterabilidade realizado com o novo sistema de condensação do extrator apresentou resultados satisfatórios quanto às análises químicas realizadas para o microgabro **GAB**, rocha submetida aos ciclos de lixiviação. Destacando-se também que foram executados em menor tempo e de uma forma mais sustentável nos dias atuais, evitando o descarte constante da água utilizada no processo contínuo de refrigeração.

A utilização deste “novo sistema de condensação sem perda de água”, além da redução do tempo de ciclagem neste extrator de grande porte, permitiu também a sua reintegração aos equipamentos existentes no Laboratório do Departamento de Geotecnia da EESC-USP nos estudos da alterabilidade para caracterização tecnológica de rochas.

4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS FÍSICO-MECÂNICOS E DE ALTERABILIDADE

Em relação as propriedades físicas, que apresentam influências e relações diretas com as características petrográficas, tais como composição mineralógica, textura, estruturas e tamanho de cristais, as rochas apresentaram peso específico, porosidade e absorção relativamente satisfatórios para aplicação como lastro, com exceção das amostras de basalto. São dados típicos de materiais rochosos cristalinos e de baixo grau de alteração intempérica, ou seja, materiais do ponto de vista físico bons para emprego como agregados em obras de engenharia. Ainda assim, há nuances já comentadas que afetam a seleção desses materiais para determinadas aplicações, portanto, estas propriedades tornam-se importantes no planejamento e operação da indústria, convergindo com a necessidade latente de um zoneamento geológico na pedreira, de modo a atender a um mercado consumidor cada vez mais exigente.

Em relação às propriedades mecânicas, as propriedades de rocha intacta refletem características de materiais de resistências e rigidez altas, com exceção do **BAS2**. De acordo com a classificação da ISRM (1979) que utiliza de valores de compressão uniaxial, algumas rochas foram classificadas como extremamente resistentes, enquanto outras foram considerados rochas muito resistentes. No entanto, há decréscimo da resistência em vista do aumento do tamanho dos cristais, ou seja, as maiores resistências estão associadas aos materiais mais finos. Não diferente dos resultados das propriedades geomecânicas de rocha intacta, os ensaios em agregados demonstraram a mesma excelência, visando as aplicações de estudo.

Com base nos valores obtidos para os nove litotipos estudados, totalizando dezenas de resultados de ensaios mecânicos, verifica-se que em apenas nove resultados não são atendidos os limites recomendados pelas normas que tratam de lastro:

- Quatro resultados do basalto **BAS2** no ensaio de resistência à compressão uniaxial, nos corpos de prova com diâmetros 76 e 56 mm, seco e saturado, com resistências abaixo do limite mínimo de 100 MPa recomendado pela NBR 5564 (ABNT, 2021).
- Um resultado do basalto **BAS2** no ensaio de resistência à abrasão *Los Angeles*, com perda de massa acima do limite máximo de 30% recomendado pela NBR 5564 (ABNT, 2021).
- Quatro resultados do basalto **BAS2** e dos granitos **MOR** e **CAN**, no ensaio de resistência ao impacto Treton; com perda de massa acima do limite máximo de 25% recomendado pela NBR 5564 (ABNT, 2021).

Porém, neste último caso, considerando os ensaios de resistência à abrasão *Los Angeles* e ao esmagamento, ensaios mais representativos para a aplicação como lastro por serem realizados com

amostras de volumes e frações maiores, as amostras de granito **MOR** e **CAN** atenderam aos requisitos normativos, inclusive os limites mais conservadores da norma EN 13450 (DIN, 2013), o que caracteriza que essas amostras devam ser analisadas com mais cautela e que apenas o resultado de um tipo ensaio não é representativo para tomada de decisão.

Em linhas gerais, analisando as amostras de basaltos, verificou-se que o **BAS1** e **BAS3** apresentam as melhores condições petrográficas, visando a utilização como agregado para lastro de ferrovia. No entanto, a presença de porções vítreas, com opacos e com argilominerais (minerais deletérios) pode restringir o uso caso esta quantidade ultrapassar as especificações técnicas.

Por outro lado, a amostra **BAS2** apresenta um claro enriquecimento em opacos e vidro vulcânico, que na textura intersertal e na forma de acumulações, se diferenciam formando-se argilominerais cripto a microcristalinos, que muitas vezes ocorrem na forma de vesículas/amígdalas. Além disso, os minerais principais (plagioclásio e piroxênio) ocorrem com suas bordas argilizadas ou completamente argilizadas, quando em contatos com os microsistemas formados por vidro + opacos. Tais aspectos evidenciam a alteração hidrotermal tardi-magmática dessas camadas para o derrame basáltico inspecionado da pedra, classificando, portanto, o **BAS2** como a rocha de pior qualidade e aptidão para emprego como lastro dentre as amostras estudadas.

Cabe destacar também que, o microgabro **GAB** não apresentou perda de massa significativa quando submetida aos ensaios de sanidade com solução de sulfato de sódio, mas quando solicitada em solução com etilenoglicol foram obtidos valores expressivos, com notáveis evidências de fissuramento, rachadura, lasqueamento e fragmentação nas amostras ensaiadas. Tais informações foram corroboradas por análises petrográficas prévias no microgabro, indicando a ocorrência de argilas expansivas (celadonita e nontronita) dentre os minerais secundários que, na presença de água, produziram tensões internas na rocha levando à sua degradação.

A síntese dos resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa, com relação as propriedades físico-mecânicas, (obtidos pelos ensaios de índices físicos, de resistências à compressão uniaxial, à compressão pontual, à abrasão *Los Angeles*, ao impacto Treton e ao esmagamento), e de alteração e alterabilidade (obtidos pelos ensaios de resistência a intempérie e de ciclagem em solução de sulfato e etilenoglicol) é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 - Síntese dos resultados dos ensaios físico-mecânicos e de alteração.

Propriedades	Parâmetros e Recomendações			Amostras											
	Basalto	Granito	Demais	BAS1	BAS2	BAS3	DIA	MON	GAB	MOR	CAN	ITU			
ρ_a (kg/m ³)	2700(mín) ^(A) 2600(mín) ^(C)	2600(mín) ^(A,C)	2500(mín) ^(A) 2600(mín) ^(C)	2865,08 ⁽¹⁾	2763,34 ⁽¹⁾	2894,88 ⁽¹⁾	2921,40 ⁽²⁾	2837,34 ⁽²⁾	2940,00 ⁽³⁾	2996,09 ⁽⁴⁾	2606,36 ⁽³⁾	2620,00 ⁽⁴⁾	2675,00 ⁽³⁾	2701,00 ⁽⁴⁾	2626,03
η_a (%)	2 (máx) ^(A)	2 (máx) ^(A)	2 (máx) ^(A)	4,04 ^{(1)*}	8,00 ^{(1)*}	2,48 ^{(1)*}	0,69 ⁽²⁾	0,86 ⁽²⁾	1,73 ⁽³⁾	0,78 ⁽⁴⁾	0,57 ⁽³⁾	0,85 ⁽⁴⁾	0,75 ⁽³⁾	0,56 ⁽⁴⁾	0,42
α_a (%)	1 (máx) ^(A) 2 (máx) ^(C)	1 (máx) ^(A) 2 (máx) ^(C)	2 (máx) ^(A,C)	1,41 ^{(1)*}	2,90 ^{(1)*}	0,86 ⁽¹⁾	0,24 ⁽²⁾	0,30 ⁽²⁾	0,59 ⁽³⁾	0,26 ⁽⁴⁾	0,22 ⁽³⁾	0,32 ⁽⁴⁾	0,28 ⁽³⁾	0,21 ⁽⁴⁾	0,16
σ_c (MPa)	σ_{SEC} Ø76mm	n.e.		203,84	99,00*	156,08	226,18	200,64	189,05 ⁽³⁾		281,93 ⁽³⁾		197,73 ⁽³⁾		250,29
	σ_{SAT} Ø76mm	100 (mín) ^(A)		119,54 ⁽¹⁾	38,76 ^{(1)*}	113,63 ⁽¹⁾	203,60	190,75	175,87 ⁽³⁾		264,82 ⁽³⁾		188,28 ⁽³⁾		227,38
	R (%)	n.e.		58,64	39,15	72,80	90,01	95,07	93,03		93,93		95,22		90,85
	σ_{SEC} Ø56mm	n.e.		205,49	64,74*	238,42	226,03 ⁽²⁾	208,74 ⁽²⁾	172,10		287,00		179,13		263,06
	σ_{SAT} Ø56mm	n.e.		194,80	44,93*	198,82	187,60	184,39	147,48		286,61		175,55		213,98
	R (%)	n.e.		94,80	69,40	83,39	83,00	88,33	85,69		99,86		98,01		81,34
	$I_{S(50)}$ (MPa)	$I_{S(50)SEC}$ Ø76mm			9,43	8,52	9,36	9,91	8,74	9,76		11,22		9,12	
$I_{S(50)SEC}$ Ø56mm		n.e.		10,92	7,60	10,18	11,30	9,88	9,98		12,38		10,12		12,22
$I_{S(50)SEC}$ TAB				11,22	7,94	10,62	13,04	12,51	9,78		13,18		11,78		11,57
$I_{S(50)SAT}$ Ø76mm				8,78	4,01	9,11	9,83	8,61	9,23		11,10		9,06		10,91
$I_{S(50)SAT}$ 56mm		n.e.		10,90	6,47	9,99	11,12	9,84	9,58		12,35		10,10		12,16
$I_{S(50)SAT}$ TAB				11,20	3,95	10,52	12,79	11,86	9,74		12,43		10,73		11,45
P (%)	30 (máx) ^(A) 12 – 24 ^(B) 25 – 40 ^(C)	35 (máx) ^(A) 12 – 24 ^(B) 25 – 40 ^(C)	30 (máx) ^(A) 12 – 24 ^(B) 25 – 40 ^(C)	22,69 ⁽¹⁾	36,67 ^{(1)*}	14,73 ⁽¹⁾	15,80	14,70	16,50 ⁽³⁾	13,40 ⁽⁴⁾	17,50 ⁽³⁾	16,20 ⁽⁴⁾	23,60 ⁽³⁾	12,20 ⁽⁴⁾	21,60
	T (%)	25 (máx) ^(A)	25 (máx) ^(A)	11,90	27,53*	11,75	10,19 ⁽²⁾	10,99 ⁽²⁾	19,50 ⁽³⁾	11,70 ⁽⁴⁾	26,70 ^{(3)*}	18,70 ⁽⁴⁾	27,50 ^{(3)*}	26,10 ^{(4)*}	19,90
	Rm (%)	29 (máx) ^(D)	29 (máx) ^(D)	29 (máx) ^(D)	-	-	16,10	13,50 ⁽²⁾	13,60 ⁽²⁾	17,60 ⁽³⁾	12,20 ⁽⁴⁾	19,50 ⁽³⁾	18,10 ⁽⁴⁾	19,30 ⁽³⁾	17,50 ⁽⁴⁾
Ri (%)	10 (máx) ^(A) 3 (máx) ^(B) 5 (máx) ^(C)	10 (máx) ^(A) 3 (máx) ^(B) 5 (máx) ^(C)	10 (máx) ^(A) 3 (máx) ^(B) 5 (máx) ^(C)	2,73 ⁽¹⁾	5,46 ^{(1)*}	0,76 ⁽¹⁾	1,14 ⁽²⁾	1,09 ⁽²⁾	0,65 ⁽³⁾	0,66 ⁽⁴⁾	0,53 ⁽³⁾	0,13 ⁽⁴⁾	0,47 ⁽³⁾	0,37 ⁽⁴⁾	0,02
	PM (%)	n.e.		0,27	35,6	27,4	0,18	0,49	41,0 ⁽³⁾	58,3	0,39 ⁽³⁾		0,69 ⁽³⁾		0,34

Fonte: Do autor (2022).

Nota 1: Legenda - ρ_a : peso específico aparente; η_a : porosidade aparente; α_a : absorção de água; σ_{SEC} , σ_{SAT} e $I_{S(50)SEC}$, $I_{S(50)SAT}$: resistência à compressão uniaxial e pontual, nas condições secas e saturadas, nos Ø76 e 56mm e tabular, respectivamente; P_f : perda de massa à abrasão *Los Angeles*; T : resistência ao impacto tregon; R_m : resistência ao esmagamento; R_i e PM : resistência a intempérie por ciclagem em sulfato e por ciclagem em etilenoglicol.

Nota 2: Fonte dos dados - (1) Estudos prévios no âmbito do GTR (SGS-EESC); (2) Curtis Neto et al. (2018) e Curtis Neto (2019); (3) Santos et al. (2019, 2021) e Santos (2021); (4) Remédio (2017) e Remédio et al. (2018).

Nota 3: Referências normativas - (A) NBR 5564 (ABNT, 2021); (B) EN 13450 (DIN, 2013); (C) AREMA (2020); (D) SABS 1083 (2006); n.e.: não especificado.

5 CONCLUSÃO

A qualidade do material pétreo usado como lastro influencia na exequibilidade do projeto, segurança da via, economia em manutenção, operação e também na qualidade do serviço prestado ao usuário do transporte ferroviário. Os problemas causados pelo uso de material inadequado podem superar, em muito, o tempo e dinheiro aplicados em investigações e consequente seleção criteriosa da rocha. Daí a importância do estudo da caracterização tecnológica dos materiais pétreos a serem empregados como lastro, sendo a análise petrográfica e os ensaios físicos e mecânicos conjugados com os de alterabilidade, ferramentas importantes na seleção das propriedades da rocha.

Tratando-se de um projeto abrangente que envolveu o conhecimento tecnológico e estudos comparativos das propriedades de diferentes rochas, num contexto geotécnico da produção de agregado, discutindo suas aptidões e limitações visando para aplicação como lastro de ferrovias, considerando a disponibilidade de materiais pétreos e a proximidade de, ou possíveis novos, traçados ferroviários, objetivou-se através da compilação de informações, de atividades de campo e amostragens, da preparação laboratorial e execução de ensaios, estabelecer comparações entre a resistência, a qualidade e durabilidade de agregados, para indicar os materiais com características mais apropriadas ao uso como lastro, evitando qualquer tipo de conotação comercial em termos das pedreiras estudadas.

Os dados obtidos representam amplamente uma contribuição aos estudos de caracterização tecnológica de algumas rochas brasileiras, sendo válidos para as condições e sítios de amostragem nas pedreiras visitadas, podendo subsidiar pesquisas sobre os comportamentos dos litotipos e maciços rochosos frente a escavações e desmontes, porém, somente estes resultados não devem ser utilizados como critério de aceitação ou rejeição destas rochas para uso como agregado no lastro de ferrovias.

Apesar de algumas amostras não atenderem aos requisitos, o simples descarte das amostras ainda deve ser analisado cuidadosamente, em função, por exemplo, do processo produtivo do agregado, onde o tipo de desmonte e especificações de britagem da rocha, podem influenciar positiva ou negativamente nestes dados ou condições.

Portanto, trata-se de uma contribuição científica para o setor de mineração e quanto mais extensas e expressivas forem as áreas de estudo, mais importante se tornará a qualificação geotécnica e controle dos materiais rochosos em escalas de maior detalhe. Na prática, como já ressaltado por Curtis Neto, (2019), Curtis Neto et al., (2018); Santos, (2021), Santos et al., (2019, 2021); Remédio et al., (2018), Remédio, (2017), é fundamental que se realizem estudos nos locais de extração para otimização das etapas de operação de desmonte e britagem nas pedreiras e, assim, com uma produção mais seletiva dos agregados pétreos atender os critérios de seleção para uso como lastro.

A seleção dos ensaios laboratoriais, alinhados as pesquisas geológicas realizadas, se focou nos principais métodos avaliativos, logo os materiais rochosos foram caracterizados fisicamente e mecanicamente em diversas solicitações. Sendo assim, uma série relevante de base de dados de controle avaliativo dos produtos foi obtida podendo servir de subsídios aos órgãos governamentais para uma

exploração mineral e seleção mais adequada e homogênea dos materiais, embora não substitua a frequente necessidade da realização de caracterizações de agregados.

Conforme observado, as características de uma rocha podem variar significativamente. Foram identificados em campo, por exemplo, em uma única face, quatro tipos de basalto, dos quais dois foram selecionados e submetidos a ensaios de laboratório. Verificou-se diferenças significativas tanto nos ensaios de caracterização mecânica quanto de alterabilidade. Enquanto a amostra **BAS1** apresentou valores satisfatórios, o **BAS2** teve valores de resistência à compressão baixos e perda de massa alta no ensaio de ciclagem com sulfato e com etilenoglicol. Estes resultados explicitam a importância de identificar e delimitar, em campo, rochas com propriedades distintas. Estas devem ser processadas e estocadas separadamente, para evitar que materiais de qualidade inferior sejam utilizados inadvertidamente. Tais etapas são cruciais e requerem um trabalho de descrição minucioso.

Com base em atividades de campo, amostragens e análises petrográficas, foi possível identificar a variabilidade (heterogeneidade) nos maciços rochosos, que pode causar incertezas em relação aos materiais. Portanto, acompanhar as etapas de operação minerária em pedreiras, notadamente o desmonte e a britagem, e o conhecimento petrográfico prévio (*in situ*) e aprofundado (laboratoriais) são fundamentais para compreensão do comportamento do material e dos resultados e correlações entre os ensaios de caracterização tecnológica, gerando dados mais consistentes de aplicabilidade.

De maneira geral, os ensaios das rochas analisadas para compor o lastro de ferrovias resultaram em índices relativamente e consideravelmente satisfatórios nos aspectos físicos, mecânicos e de alteração. No entanto, há variações nestes resultados que se relacionam principalmente com as características mineralógicas das rochas (granulação, textura, grau de alteração, condições de microfissuramento etc.). Na região de estudo e possível aplicação do agregado, por exemplo, as rochas estariam expostas em condições de clima tropical, sujeitas à ações intempéricas, podendo apresentar indicadores de degradação mais intensa, pela maior facilidade da alteração de seus de seus minerais, reforçando a necessidade (ainda pouco difundida no meio profissional), e até obrigatoriedade, de se realizar pesquisas científicas e ensaios laboratoriais para caracterização de qualquer rocha, principalmente básica, em termos de alterabilidade em vista do potencial de aplicação sem ligantes.

Quanto aos métodos de esforços compressivos, os ensaios de compressão pontual são mais rápidos e menos onerosos que a compressão uniaxial. No entanto, para uma abordagem mais segura, a execução de alguns ensaios de compressão uniaxial se fazem necessários para validar as estimativas de resistência obtidas pela carga pontual ou, se for o caso, definir um valor mais adequado para K de acordo com cada localidade e tipo de material.

Os resultados de alterabilidade também mostraram diferenças significativas. Enquanto os ensaios com sulfato resultaram em perdas de massa inferiores a 5,46%, estas chegaram a 58,3% para as amostras imersas em etilenoglicol. Tal resultado evidencia a importância de ensaios específicos, principalmente para maciços basálticos, frequentemente encontrados com horizontes ricos em argilominerais.

Ainda sobre o ensaio de ciclagem com etilenoglicol, foram obtidos e observados três comportamentos possíveis para este método: perda de massa desprezível, material são (**BAS1, DIA, MON, MOR, CAN, ITU**); perda significativa nos primeiros ciclos/dias e tendência a estabilidade a partir dos ciclos/dias seguintes (**BAS3**); perda acentuada entre os últimos ciclos/dias (**BAS2, GAB**), indicando que, apesar deste ensaio já apresentar resultados nos primeiros 7 dias, a imersão ao longo de pelo menos 21 dias é essencial.

Como já comentado previamente, considera-se que o principal objetivo desta pesquisa tenha sido alcançado com êxito, especialmente o fato de 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 pelo Grupo de Tecnologia de Rochas (GTR) da Área de Pós-Graduação em Geotecnia da EESC/USP.

Finalmente, conforme observado nos experimentos de alterabilidade, negligenciar ensaios para detectar a presença de argilas expansivas pode resultar na seleção de material inadequado e, conseqüentemente, prejuízos ao empreendimento. Na análise petrográfica das amostras foram observados indicativos de argilominerais expansivos recomendando-se, por exemplo, o ensaio de difratometria de raios X e MEV para as fases de estudos e/ou diagnósticos mais avançados.

“O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT **NBR 10341**: Agregado graúdo para concreto - Determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação em rocha matriz - método de ensaio. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2006.

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

ABNT **NBR 15845-1**: Rochas para revestimento. Parte 1: Análise petrográfica. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2015.

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

ABNT **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2021.

ABNT **NBR 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2021.

ABNT **NBR 5564**: Via Férrea – Lastro Ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2021.

ABNT **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1987.

ABNT **NBR 7218**: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1987.

ABNT **NBR 7389**: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 2: Agregado Graúdo. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2009.

ABNT **NBR 9938**: Agregados – Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos - Métodos de ensaio. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2013.

ABNT **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2006.

ABNT **NBR NM 46**: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT **NBR NM 51**: Agregados – Determinação da abrasão “*los angeles*”. Associação Brasileira De Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2001.

AL-HARTHI, A. A. A field index to determine the strength characteristics of crushed aggregate. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. v. 60, n. 3, p. 193-200. 2001. DOI: 10.1007/s100640100107.

ALMEIDA, A. S.; TANNO, L. C.; SINTONI, A. (coords). Métodos de mineração. **Mineração & Município: bases para planejamento e gestão dos recursos minerais**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas-Publicação IPT. v. 2850, p. 61-85. 2003.

ANATASIO, S.; FORTES, A. P. P.; SCIBILIA, E.; DANIELSEN, S. W. Relevant Petrological Properties and their Repercussions on the Final use of Aggregates. **Energy Procedia**. v. 97, p. 546-553. 2016. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.073.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Sumário Mineral 2017. Brasília: ANM. 2019.

APAYDIN, Ö. F.; YILMAZ, M. Correlation of petrographic and chemical characteristics with strength and durability of basalts as railway aggregates determined by ballast fouling. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. p. 1-9. 2020. DOI: 10.1007/s10064-019-01654-4.

AREMA. American Railway Engineering and Maintenance of Way Association. Manual for railway engineering, Lanham. 2020.

ASTM **C127**. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. American Society for Testing and Materials. 2015.

ASTM **C131**. Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. American Society for Testing and Materials. 2010.

ASTM **C136**. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. American Society for Testing and Materials. 2015.

ASTM **C142**. Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates. American Society for Testing and Materials. 2017.

ASTM **C535**. Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, 2016.

ASTM **C88**. Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, p. 6. 2018.

ASTM **D5731**. Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classifications. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA. 2016.

ATTEWELL, P. B.; FARMER, I. W. Principles of Engineering Geology. Chapman and Hall, London. 1976.

AZEVEDO, I. C. D. e MARQUES, E. A. G. Introdução à Mecânica das Rochas. Ed. UFV, Viçosa, 361 p. 2006.

BOUCHER, D. L.; SELIG, E. T. Application of Petrographic Analysis to Ballast Performance Evaluation. **Transportation Research Record**, Washington, D.C. n. 1131, p.15-25. 1987.

CAGNON, F. A.; LIEGGIO JUNIOR, M.; 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. DOI: 10.14295/transportes. v. 23, i2.746.

ÇELIK, 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. DOI: 10.1007/s10064-018-1354-y.

CLAISSE, P.; CALLA, C. **Rail ballast conclusions from a historical perspective**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 159. p. 69–74. 2006. DOI: 10.1680/tran.2006.159.2.69.

CONSTANCIO, T. Indústria aguarda retomada. Revista Ferroviária, p. 52-54, 2020.

CORRÊA, F. A.; RIBEIRO, J. C.; MONTICELLI, J. P.; RIBEIRO, R. P. Correlações geomecânicas e ensaios de alterabilidade em basaltos para lastro ferroviário: contribuição à norma NBR 5564. 17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental – CBGE. 2022.

CORRÊA, F. A.; RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSÚ, A. B. Estudo da Alterabilidade de Rochas em Extrator Soxhlet com Novo Sistema de Condensação Sem Perda de Água. COBRAMSEG. 2022.

CURTIS NETO, J. A. Estudos tecnológicos de rochas da intrusão de Limeira, visando aplicação como agregados em obras de engenharia. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019. DOI: 10.11606/D.18.2019.tde-18122019-095732.

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.

CZINDER, B.; TÖRÖK, A. Effects of long-term magnesium sulfate crystallisation tests on abrasion and durability of andesite aggregates. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. p. 1-11, 2019. DOI: 10.1007/s10064-019-01600-4

DIAS FILHO, J. L. E. D.; XAVIER, G. C.; MAIA, P. C. A.; SANTOS, V. G. P. Durability of Ornamental Gneisses from Pádua-RJ as Covering Stone. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. v. 21, p. 1957-1976, 2016.

DIN EN 13450. Aggregates for railway ballast. Deutsches Institut Für Normngn. Berlin. 35p. 2013.

DIÓGENES, D. F.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; MOTTA, L. M. G. Avaliação da relação entre comportamentos mecânico e hidráulico para lastro ferroviário. *Transportes*. v. 28, n. 3, p. 61-74. 2020.

DNER ME 399/99. Agregados - determinação da perda ao choque no aparelho Treton. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. 1999.

EN 1097-1. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 1: Determination of the resistance to wear (micro-Deval). 2011.

EN 1097-2. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation. 2010.

EN 1097-6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption. 2022.

EN 1367-2. Tests for thermal and weathering properties of aggregates - Part 2: Magnesium sulfate test. 2010.

EN 933-1. Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. 2012.

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. DOI: 10.1007/s10064-018-1366-7.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. *In: ISAIA, C. G. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON. v. 1, cap. 16, p. 481-523. 2007.

FARJALLAT, J. E. S. **Estudos experimentais sobre degradação de rochas basálticas. Basaltos da barragem de Capivara, Rio Paranapanema**. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Astronomia da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1971.

FATHALI, M., CHALABII, J., ASTARAKI, F., ESMAEILI, M. A new degradation model for life cycle assessment of railway ballast materials. **Construction and Building Materials**, v. 270, 121437. 2021.

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, n. 1. p. 208-213. 2019.

FRASCÁ, M. H. B. O. Rocha como material de construção. *In: ISAIA, C. G. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1. ed. São Paulo: IBRACON. v. 1, p. 437-479. 2007.

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

FRAZÃO, E. B. **Alteração de rochas como critério de seleção de agregados**. São Paulo: Associação Brasileira De Geologia De Engenharia – ABGE. 123 p. 2012.

FRAZÃO, E. B. **Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir de estudo experimental em amostras de basaltos da UHE de Três Irmãos**. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Carlos. 1993.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. São Paulo: Associação Brasileira De Geologia De Engenharia - ABGE. 132 p. 2002.

FRAZÃO, E. B.; FRASCÁ, M. H. B. O. Relação entre índice petrográfico e índices de alterabilidade na previsão da desagregabilidade de rochas basálticas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: Associação Brasileira De Geologia De Engenharia - ABGE. p. 253-263. 1999.

GANESHA, A. V.; PRAKASH NARASHIMHA, K. N.; KRISHNAIAH, C. 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.

GOMES, R. L. **Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da bacia do Paraná**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001. DOI: 10.11606/T.18.2001.tde-01072008-104439.

GUO, Y.; XIE, J.; FAN, Z.; MARKINE, V.; CONNOLLY, D. P.; JING, G. Railway ballast material selection and evaluation: A Review. *Construction and Building Materials*. v. 344. 128218. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128218>.

GUZZI, T. C. E. **Índices de alteração e de alterabilidade de rochas: aplicação para amostras de basalto da Pedreira Bandeirantes, São Carlos (SP)**. São Carlos. 2017.

HOFER, V.; BACH, H.; LATAL, C.; NEUBAUER, A. C. Impact of geometric and petrographic characteristics on the variability of LA test values for railway ballast. **Mathematical geosciences**. v. 45, n. 6, p. 727–752. 2013. DOI: 10.1007/s11004-013-9472-3.

HYPOLITO, R.; VALARELLI, J. V. Alteração experimental de diabásios. *In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA*, 4, 1972, **Anais [...]** São Paulo: Associação Paulista de Geologia - APGA. p. 103-122. 1972.

IPT RELATÓRIO 14.710: Características tecnológicas das rochas ornamentais utilizadas como materiais de como materiais de construção civil do estado de São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo. 1980.

ISRM. Suggested methods for determining point load strength. *In: International Journal on Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. International Society for Rock Mechanics. Great Britain. v. 22, n. 2, p. 51-60. 1985. DOI: 10.1016/0148-9062(85)92327-7

ISRM. Suggested methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials. International Society for Rock Mechanics. 1979.

ISRM. Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. International Society for Rock Mechanics. 1977.

KEIKHA, T.; KEYKHA, H. A. Correlation between mineralogical characteristics and engineering properties of granitic rocks. *In: Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. v. 18, n. 5, p. 4055-4065. 2013.

KLINCEVICIUS, M. G. Y. **Estudo de propriedades, de tensões e do comportamento mecânico de lastros ferroviários**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011. DOI: 10.11606/D.3.2011.tde-27032012-121114.

KOKEN, E.; ÖZARSLAN, A.; BACAK, G. An experimental investigation on the durability of railway ballast material by magnesium sulfate soundness. **Granular Matter**. v. 20, n. 29, p.1-11. 2018. DOI: 10.1007/s10035-018-0804-3.

KOPPE, J. C.; COSTA, J. F. C. L. Operações de lavra em pedreiras. **Manual de agregados para a construção civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. cap.7, p. 127-145. 2012.

LADEIRA, F. L.; MINETTE, E. A. quantificação da alteração e da alterabilidade de rochas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte. **Anais [...]** Belo Horizonte: Associação Brasileira De Geologia De Engenharia – ABGE. v. 3, p. 351-358. 1984.

LEYLAND, R. C.; PAIGE-GREEN, P.; MOMAYEZ, M. Development of the road aggregate test specifications for the modified ethylene glycol durability index for basic crystalline materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 26, n. 7, p. 04014028:1-8. 2014.

LICHT, O. A. B. A revised chemo-chrono-stratigraphic 4-D model for the extrusive rocks of the Paraná Igneous Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. v. 355, p. 32-54. 2018. DOI 10.1016/j.jvolgeores.2016.12.003

LOANNOU, I.; FOURNARI, R.; PETROU, M. F. Testing the soundness of aggregates using different methodologies. **Construction and Building Materials**. n. 40, p. 604-610. 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.047.

MARRANO, A.; PARAGUASSU, A. B. Caracterização tecnológica das rochas basálticas da Usina Hidrelétrica Canoas I, rio Paranapanema, SP/PR, Brasil. **Solos e Rochas**. v. 21, n. 3, p. 143-164. 1998.

MARSH, J. S.; EWART, A.; MILNER, S. C.; DUNCAN, A. R.; MILLER, S. C. The Etendeka Igneous Province: magma types and their stratigraphic distribution with implications for the evolution of the Paraná-Etendeka flood basalt province. *Bulletin of Volcanology*. v. 62, p. 464-486. 2001. DOI 10.1007/s004450000115

MATTOS, I. C.; ARTUR, A. C.; NOGUEIRA NETO, J. A. Caracterização petrográfica e tecnológica de granitos ornamentais do Stock Granítico Serra do Barriga, Sobral/CE. **Geociências**. 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)**. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 171 p. 2002.

MEURER, P.; SALGADO, B. B.; HEIDEMANN, M.; PÉREZ, Y. A. G. Influência da composição mineralógica de rochas matrizes nas propriedades físico-químicas e mecânicas de agregados beneficiados para a pavimentação. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, SBMR, MECÂNICA DAS ROCHAS E ENGENHARIA DE ROCHAS PARA INOVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO, ISRM. 2016.

MILNER, S.C.; DUNCAN, A.R.; WHITINGHAM, A.M.; EWART, A. Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic volcanic units within the Paraná-Etendeka igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal research*. v. 69, p. 137-157. 1995. DOI 10.1016/0377-0273(95)00040-2

MONTICELLI, J. P. Levantamento geológico-geotécnico de pedreiras do sudoeste goiano: mapeamento e análises petrográficas. Relatório Técnico. São Paulo. 2019.

MONTICELLI, J. P.; SÍGOLO, J. B.; FUTAI, M. M. O uso da Análise Petrográfica e Micromorfológica na Determinação dos Graus de Alteração de um Maciço Rochoso Gnáissico. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, SBMR, MECÂNICA DAS ROCHAS E ENGENHARIA DE ROCHAS PARA INOVAÇÃO E DESENVOLVIMENTO, ISRM. p. 8. 2016.

NAGALLI, B.; VASCONCELLOS, E. M. G.; NAGALLI, A. Correlation between petrographic and physico-mechanical variables of basalts of the Paraná Magmatic Province. **The Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. v. 21, p. 363-374. 2016.

NALSUND, R. **Railway Ballast Characteristics, Selection Criteria and Performance**. Norwegian university of science and technology, Faculty of engineering science and technology, Department of civil and transport engineering. 2014.

OLIVEIRA, P. C.; PATIAS, J.; ZUQUETTE, L. V. A study of the alterability of basaltic lithotypes from the Itaipu Dam site (southern Brazil). **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. v. 74, n. 4, p.1331-1348. 2015. DOI: 10.1007/s10064-014-0716-3.

OLIVEIRA, P. C.; PATIAS, J.; ZUQUETTE, L. V. Considerações sobre os ensaios de ciclagem acelerada (NBR 12696) aplicadas a litotipos basálticos da área da Usina Hidrelétrica de Itaipu. *In*: 29TH SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Porto de Galinhas: Comitê Brasileiro de Barragens. p. 1-20. 2013.

PAIGE-GREEN, P. Durability Testing of Basic Crystalline Rocks and Specification for Use as Road Base Aggregate. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. v. 66, n. 4, P. 431-440. 2007. DOI: 10.1007/s10064-007-0088-z.

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*: 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROAD AND RAIL INFRASTRUCTURE. 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**. 1. ed. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 130 p. 2014. Formato eletrônico.

PEATE D. W. The Paraná-Etendeka Province. *In*: MAHONEY J.J. & COFFIN M.F. (eds.) Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism. Geophys. Monogr., 100, AGU, p. 217-245. 1997. ISBN 0-87590-082-8.

PIRES, L.; 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

POMONIS, P.; RIGOPOULOS, I.; TSIKOURAS, B.; HATZIPANAGIOTOU, K. Relationships between petrographic and physico-mechanical properties of basic igneous rocks from the Pindos Ophiolitic Complex, NW Greece. *In*: 11TH INTERNATIONAL CONGRESS. **Proceedings** [...] Athens: Bulletin of the Geological Society of Greece. p. 947-958. 2007. DOI: 10.12681/bgsg.16778.

RANGEL, G. W. A.; ARAGAO, F. T. S.; MOTTA, L. M. G.; PONTES JUNIOR, C. L. Verificação da diferença entre agregados basálticos para lastro ferroviário oriundos de uma mesma jazida em diferentes profundidades. *In*: XXX ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. 10 p. 2016.

RAYMOND, G. P. **Railroad ballast specification and evaluation**. Queen's University, Lecture Notes, Kingston, Canada, 1985.

REMÉDIO, M. J. **Caracterização tecnológica de agregados para uso como lastro de trem de alta velocidade: trecho Campinas/São Paulo**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 152 p. 2017. DOI: 10.11606/D.18.2017.tde-10072017-104135.

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

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.

SABS SANS 1083: Aggregates from natural sources - Aggregates for concrete. South African Bureau Standards. Pretoria. 2014.

SADEGUI, J. M.; ZAKERI, J. A.; NAJAR, M. E. M. Developing track ballast characteristic Guideline in order to evaluate its performance. **International Journal of Railway**. v. 9, n. 2, p. 27-35. 2016. DOI: 10.7782/IJR.2016.9.2.027.

SANTOS, R. S. Lastro ferroviário de granitos e rocha básica em regiões tropicais: relações entre petrografia, propriedades físico-mecânicas e de alterabilidade. Master's Dissertation, Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos. 2021. DOI: 10.11606/D.18.2021.tde-19042022-163000.

SANTOS, R. S.; RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSÚ, A. B.; CURTIS NETO, J. A.; XAVIER, G. C.; REMÉDIO, M. J. Abrasion tests combined with accelerated alteration cycles in different rock materials for railway ballast. *In: 14TH INTERNATIONAL CONGRESS OF ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING, ISRM*. Foz do Iguaçu. p. 2042-2048. 2019.

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

SELIG, E. T.; WATERS, J. M. **Track geotechnology and substructure management**. Thomas Telford Services Ltd. 446p. 1994.

SOUZA JUNIOR, N. N. O “**Entablamento**” em Derrames Basálticos da Bacia do Paraná, Aspectos Genéticos e Caracterização Geotécnica. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1992.

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. DOI: 10.3141/2655-05.

VLACH, S. R. F. **Geologia, petrografia e geocronologia das partes meridional e oriental do Complexo de Morungaba, SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. São Paulo. 253p. 1985. DOI: 10.11606/D.44.1985.tde-29082013-164250.

WUM, 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, p. 185-194. 2018. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.10.007.

ZHANG, Z. X. **Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications**. Elsevier. 1. ed. 528 p. 2016.