

**17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**

**CORRELAÇÕES GEOMECÂNICAS E ENSAIOS DE ALTERABILIDADE  
EM BASALTOS PARA LASTRO FERROVIÁRIO: CONTRIBUIÇÃO À  
NORMA NBR 5564**

Fernando Augusto Corrêa <sup>1</sup>; José Carlos Ribeiro <sup>2</sup>; João Paulo Monticelli <sup>3</sup>; Rogério Pinto Ribeiro <sup>4</sup>

**Resumo** – A seleção adequada dos agregados rochosos para compor a camada do lastro ferroviário, um dos principais elementos da infraestrutura ferroviária, visa reduzir os onerosos custos de manutenção, causados pela sua degradação devido ao tráfego e o intemperismo. Neste trabalho foram avaliadas 3 rochas basálticas da Formação Serra Geral, por meio de ensaios mecânicos e ensaios de intemperismo acelerado, visando avaliar seu potencial para uso como agregado sem ligantes. Sendo assim, o trabalho focou nas correlações entre compressão uniaxial e carga pontual, e na alterabilidade dos materiais, indicada pelos ensaios de imersão em solução de sulfato de sódio e etilenoglicol e secagem em estufa. Desta forma, entende-se como contribuição efetiva deste trabalho a divulgação das técnicas disponíveis e a caracterização das rochas básicas visando seu uso como lastro. Tais informações poderão contribuir com o aperfeiçoamento de normas técnicas relacionadas ao tema, notadamente a NBR-5564 (ABNT, 2012) que se encontra em revisão.

**Palavras-Chave** – lastro ferroviário; agregado; compressão uniaxial (RCU); carga pontual (CP); sulfato de sódio; etilenoglicol.

**Abstract** – The proper selection of rock aggregates to compose the railway ballast's layer, one of the main elements of the railway infrastructure, aims to reduce the high maintenance costs, caused by degradation due to traffic and weathering. In this work, 3 basaltic rocks of the Serra Geral Formation were evaluated, via mechanical tests, correlations between them and accelerated weathering lab tests, aiming to evaluate their potential as aggregate for railway ballast. Thus, we focused on the mechanical characterization of rocks with an emphasis on the correlations between uniaxial compressive strength (UCS) and point load test (PLT), also on the results of immersion in sodium sulfate or ethylene glycol solution and drying in an oven. Therefore, an effective contribution of this work is the dissemination of the available techniques and behavior of basic rocks aiming at their use as rail ballast. Such information may contribute to the improvement of technical standards related to the theme, notably the NBR-5564 (ABNT, 2012) which is under review by said entity.

**Keywords** – rail ballast; aggregate; uniaxial compressive strength (UCS); point load test (PLT); sodium sulfate; ethylene glycol.

---

<sup>1</sup> Eng., Pós-Graduando em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, fernandoaugustocorrea@usp.br

<sup>2</sup> Geól., Pós-Graduando em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, ribeirojc@usp.br

<sup>3</sup> Geól., Pós-Graduando em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, jpmonticeli@gmail.com

<sup>4</sup> Geól., PhD, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, rogerioprx@sc.usp.br

## 1. INTRODUÇÃO

Agregados são os insumos minerais mais consumidos no mundo (FERREIRA e FONSECA JR, 2012). Nos EUA, em 2020, a produção de rocha britada foi de 1,46 bilhões de toneladas, avaliadas em US\$17,8 bilhões (USGS, 2021). No Brasil, a produção em 2016 foi de 236,38 milhões de toneladas, avaliada em R\$ 6,65 bilhões (ANM, 2019). Apesar disso, este material, por vezes, é negligenciado quanto à sua caracterização geológica, geotécnica e tecnológica, o que pode resultar em perdas econômicas ou até mesmo vidas humanas. Fookes (1991) lista diversos casos históricos de problemas em obras de engenharia associados à degradação dos agregados e indica que todos têm em comum a presença de minerais secundários (formados por alteração hidrotermal ou intempérica).

Os materiais pétreos utilizados como agregados devem apresentar propriedades compatíveis com as solicitações impostas em serviço. No caso de lastro ferroviário, agregados sem ligantes, e foco deste trabalho, a rocha deve possuir alta resistência à compressão para suportar os esforços provocados pelo peso dos veículos e, forma e granulometria adequadas, para distribuir as tensões com eficiência para a plataforma. Além disso, deve-se considerar o comportamento do material frente às intempéries (alterabilidade) visto que, nestas condições de uso, a exposição é constante podendo resultar na decomposição e desagregação da rocha.

Ensaio de compressão uniaxial (RCU) são executados em corpos de prova cilíndricos ou retangulares para determinação da resistência da rocha. Esta propriedade pode ser estimada pelo ensaio de carga pontual, também denominado compressão puntiforme (CP), que possui uma configuração mais simples, de rápida execução e de baixo custo, permitindo analisar grandes quantidades de amostras, em campo ou laboratório. Neste caso, podendo ser utilizados em corpos de prova prismáticos como também em amostras irregulares com carregamento diametral e/ou axial (ASTM, 2016).

A avaliação da alterabilidade dos materiais rochosos é realizada por meio de ensaios que procuram simular, em laboratório, os efeitos da desagregação causada pelo intemperismo físico, como a cristalização de sais (ensaio de sanidade com sulfato) e expansão de argilas por adsorção de água (ensaio com etilenoglicol). Esses ensaios são tão importantes quanto a caracterização geomecânica, principalmente no caso das rochas básicas. Segundo Frazão (2012), a presença de vesículas e amígdalas nos basaltos, bem como fraturas, aceleram processos de alteração e decomposição quando expostos aos agentes intempéricos. Caso estas cavidades e fissuras apresentem materiais expansivos, o potencial de desagregação se eleva significativamente. Diversas referências utilizaram com sucesso estes tipos de ensaios, tais como Santos et al. (2019, 2021), Remédio et al. (2018), Dias Filho et al. (2015) e Oliveira et al. (2013, 2015), entre outros.

Este trabalho faz parte de pesquisas mais amplas desenvolvidas pelo Grupamento de Tecnologia de Rochas da EESC/USP e teve por objetivo avaliar as propriedades tecnológicas de 3 tipos de basalto, beneficiados na forma de brita, aplicados como lastro ferroviário.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

### 2.1. Contexto Geológico

As amostras estudadas constituem basaltos oriundos de pedreiras da região sudeste do estado de Goiás. Estas rochas fazem parte da Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE), gerada antes da abertura do Oceano Atlântico (PEATE, 1997; MILNER et al., 1995). Ela é constituída, predominantemente, por basaltos e andesitos e, subordinadamente, por riolitos.

Essas rochas se concentram na América do Sul (95%), onde recebem a denominação Província Magmática do Paraná (PIP), 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).

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 caracterização geológica e geomecânica detalhada do material.

Na região de estudo, 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 (Figura 1).

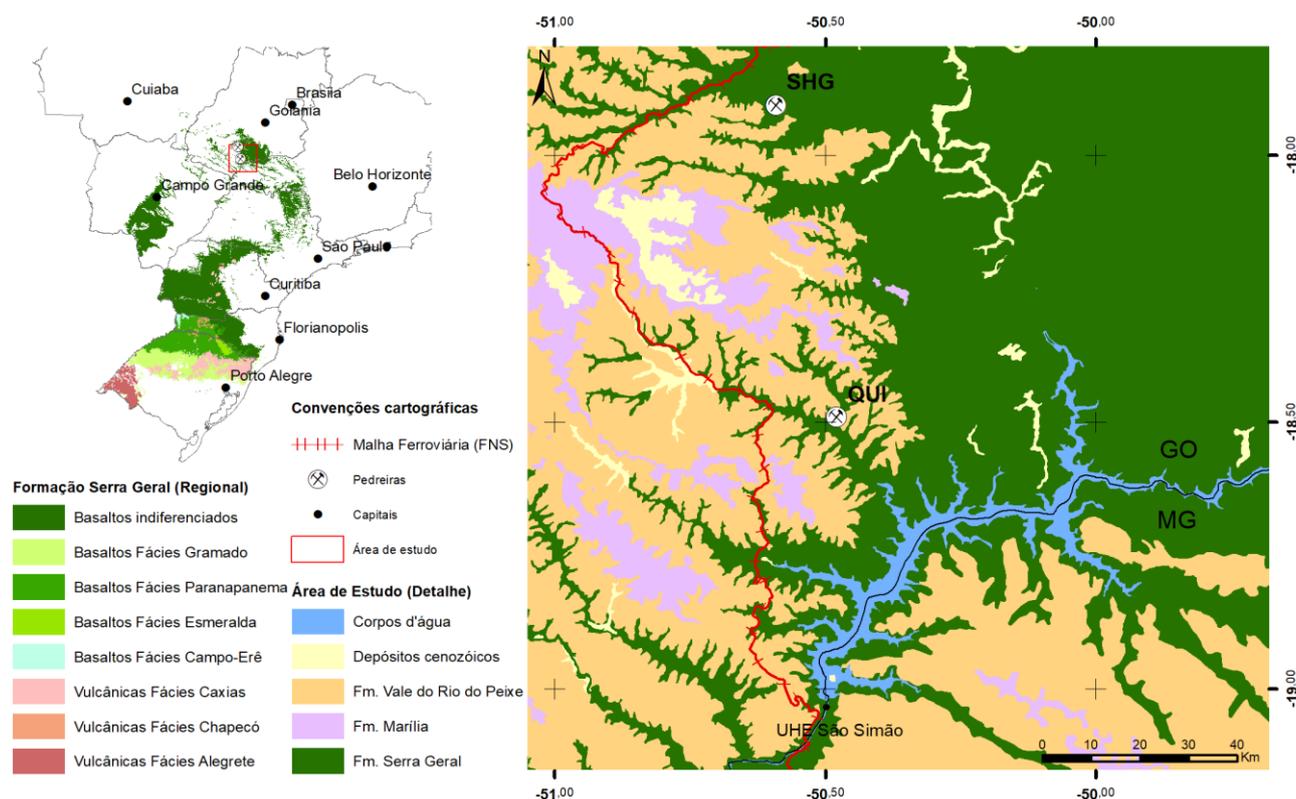


Figura 1. Mapa geológico simplificado dos locais de estudo. Onde: QUI-Quirinópolis/GO e SHG-Santa Helena de Goiás/GO. Modificado de CPRM (2004).

## 2.2. Caracterização geológica das rochas estudadas

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 concordância com a norma NBR 5564 (ABNT, 2012).

Em Quirinópolis, ocorrem, no mínimo, 4 tipos diferentes de basaltos, que parecem constituir um derrame vulcânico de espessura considerável: (A) camada basal de basalto marrom escuro, são, compacto, situado na parte inferior da jazida, aqui denominado "BAS1"; (B) camada de "basalto" acinzentado, mais claro, e com pequenas cavidades (microvesículas) disseminadas na rocha, aqui denominado "BAS2"; (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, com presença de minerais deletérios (Figura 2). Os tipos (A) e (B) foram os materiais mais significativos em termos dos volumes explorados e utilizados como lastro. Assim foram preferencialmente selecionados para o presente trabalho.

O basalto "BAS1" se apresenta como uma 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. Predominam fissuras intraminerais e pseudoperlíticas e, em termos da alteração hidrotermal, cita-se a argilização de alguns plagioclásios.

O "BAS2" demonstrou ser menos compacto, com coloração marrom a preta, e interior preto a cinza, hipocristalino, rico em vesículas/amígdalas disseminadas na matriz; estrutura maciça (vesículo-amigdaloidal), textura afanítica, subofítica a intersertal, granulação muito fina (< 1mm), vesículas/agmídalas < 2mm, microporfírica, matriz < 0,5mm, microfenocristais 0,5 - 1,5mm. Observações tátil-visuais indicam rocha pouco resistente aos golpes de martelo. Predominam fissuras intraminerais e pseudoperlíticas e, subordinadamente, fissuras inter e transminerais. Alteração hidrotermal moderada, destacando a argilização de plagioclásios e piroxênios.

Em Santa Helena de Goiás (GO), o maciço é mais homogêneo, tendo sido caracterizado um único tipo de basalto, aqui denominado "BAS3": caraterizado como uma rocha maciça, compacta, de coloração preta a cinza, textura afanítica, subofítica a intersertal, granulação muito fina (< 1 mm), microporfírica, matriz < 0,5 mm, microfenocristais 0,5 a 1,5 mm. Rocha muito resistente aos golpes de martelo; holocristalina a hipocristalina e com raras fissuras intraminerais e pseudoperlíticas, marcado pela alteração hidrotermal, argilização de piroxênios.

Uma síntese das feições petrográficas e dos índices físicos é exibida na Tabela 1.

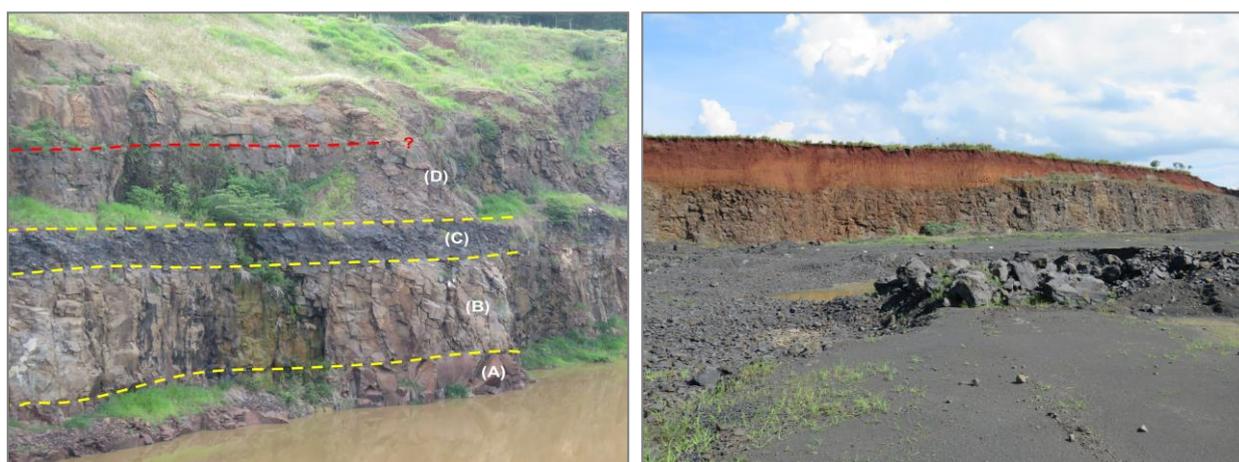


Figura 2. ESQUERDA: Vista parcial da face leste da pedreira de Quirinópolis (GO). Observar as camadas inferiores (A e B) que correspondem aos materiais basálticos "BAS1" e "BAS2", respectivamente. Linha tracejada em vermelho: contato inter derrames. DIREITA: maciço basáltico mais homogêneo inspecionado na pedreira de Santa Helena de Goiás (GO). Notar, em primeiro plano, aspecto dos materiais selecionados para amostragem do tipo "BAS3".

Tabela 1. Síntese da análise petrográfica e dos índices físicos

Amostras	"BAS1"	"BAS2"	"BAS3"	
Imagem macroscópica				
Cor	Preta a cinza			
Granulação	Muito fina (< 1 mm)	Muito fina (< 1 mm); Vesículas/amígdalas (< 2mm)	Muito fina (< 1 mm)	
Textura	Afanítica, subofítica a intersertal			
Mineralogia (%)	PI	47,3	31,5	37,8
	Px	22,7	17,6	22,2
	Op	18,2	37,1	33,1
	Ag	7,4	3,7	6,3
Microfissuras	Intragranular	Intramineral e Transmineral		
Alteração	Hidrotermal, argilização de plagioclásios e piroxênios			
pa (kg/m <sup>3</sup> )	2.865,08	2.763,34	2.894,88	
ηa (%)	4,04	8,00	2,48	
αa (%)	1,41	2,90	0,86	

Onde: PI - plagioclásio; Px - piroxênio; Op - opacos e Ag – argilominerais; pa - massa específica aparente; ηa - porosidade aparente; αa - absorção de água.

### 3. MÉTODOS DE ENSAIOS

Foram selecionados ensaios usuais em mecânica das rochas e na qualificação de materiais pétreos visando emprego como agregado, sendo utilizadas as recomendações de normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da *American Standard Testing Materials* (ASTM), conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Síntese dos ensaios abordados e respectivas normas

Ensaio	Norma Técnica	Procedimentos
RCU	NBR 5564 (ABNT, 2012)	CPs cilíndricos, com diâmetro de 76mm; carregamento axial; ensaios realizados nas condições seca e saturada; determinação da resistência à compressão uniaxial e pontual e do coeficiente de enfraquecimento hidráulico.
CP	D5731 (ASTM, 2016)	
Ri	NBR 5564 (ABNT, 2012) C88 (ASTM, 2018)	Aprox. 3 kg de partículas com diâmetro entre 63 e 38mm; 05 ciclos de imersão em solução de sulfato de sódio (18h) e de secagem em estufa (8h); calculada a massa final retida na peneira de 32mm.
EE	NBR 12697 (ABNT, 1992)	Aprox. 3 kg de partículas com diâmetro entre 38 e 19mm; Mín. 05 ciclos de imersão em etilenoglicol (72±1h) e secagem em estufa (mín. 4h); calculada a massa final retida na peneira de 19mm.

Onde: RCU e CP - resistências à compressão uniaxial e pontual, respectivamente; Ri e EE - resistências à intempérie (perda de massa) por ciclagem em sulfato de sódio e etilenoglicol, respectivamente.

Em relação aos métodos compressivos, ambos procedimentos foram realizados em corpos de provas cilíndricos, obtidos pela extração em blocos representativos coletados em campo, com diâmetro de 76 mm, que atende às dimensões requeridas na norma NBR 5564 (ABNT, 2012) nas condições secas e também saturadas. Desta forma, foram avaliadas as possíveis correlações entre os dois ensaios, além do enfraquecimento hidráulico de cada rocha em relação aos esforços exercidos.

No decorrer dos ensaios de alteração acelerada, com ciclagens em solução de sulfato de sódio (Ri) e em etilenoglicol (EE) procedeu-se avaliações quantitativas, via pesagem do material retido na peneira, e qualitativas, por inspeções visuais, para verificação de eventuais danos (fissuras, trincas, escamações, oxidação, desagregação etc.). No caso do teste EE, optou-se por estender sua duração para 21 dias, 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 provoca a expansão de argilas (quando presentes). Ou seja, a adoção destes ensaios depende do tipo de rocha a ser usada e do ambiente ao qual será exposta.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3, abaixo, apresenta uma síntese dos resultados obtidos nos ensaios em 2 tipos de basaltos (BAS1 e BAS2). Optou-se pela inserção dos resultados parciais da amostra BAS3 pela sua relevância na discussão sobre os ensaios de alterabilidade.

Tabela 3. Síntese dos resultados dos ensaios mecânicos e de alteração

Litotipo	$\sigma_s$ (MPa)	$Is_{(50)S}$ (MPa)	$k_s$	$\sigma_{SAT}$ (MPa)	$Is_{(50)SAT}$ (MPa)	$k_{SAT}$	$R(\sigma)$ (%)	$R(Is_{(50)})$ (%)	$R_i$ (%)	$EE$ (%)
BAS1	203,84	9,43	21,62	119,54	8,78	13,61	58,64	93,10	2,73	0,27
BAS2	99,00	8,52	11,62	38,76	4,01	9,67	39,15	47,06	5,46	35,60
BAS3	-	-	-	113,63	-	-	-	-	0,76	27,42

Onde:  $\sigma$ ,  $Is_{(50)}$  e  $k$ : resistências à compressão uniaxial, pontual, e parâmetro de correlação entre  $\sigma$  e  $Is_{(50)}$ , nas condições seca (S) e saturada (SAT), respectivamente;  $R$ : coeficiente de enfraquecimento hidráulico;  $R_i$  e  $EE$ : resistências à intempérie (perda de massa) por ciclagem em sulfato de sódio e etilenoglicol, respectivamente.

Em relação aos resultados RCU, tanto sob condições secas quanto saturadas, no geral, os basaltos, com exceção da amostra BAS2 que demonstrou resistências muito abaixo do limite, apresentaram valores que superam os 100 MPa requeridos pela NBR 5564 (ABNT, 2012), como um dos requisitos de agregado para uso em lastro ferroviário.

Observa-se, ainda, que os valores ensaiados na condição saturada são inferiores aos da condição seca,  $R(\sigma)$  igual a 58,64% e 39,15%;  $R(Is_{50})$  igual a 93,10% e 47,06%, para BAS1 e BAS2, respectivamente. Comportamento esperado, apresentando índices de enfraquecimento hidráulico que variam, indicando redução da resistência mecânica devido a presença de água nos poros, fissuras e adsorvidas em argilominerais (BROCH, 1974). O enfraquecimento hidráulico mais pronunciado do BAS2 está relacionado com seus valores de porosidade, de absorção d'água, das condições de microfissuramento e da alteração mineral, observadas na Tabela 1, e que, conjuntamente, são responsáveis por conduzirem ao enfraquecimento da rocha.

Por meio de correlações entre os valores de resistência de RCU e de CP considerando, por exemplo, apenas duas das amostras deste estudo (BAS1 e BAS2), é possível obter um parâmetro em comum, sendo  $k_s=17,12$  na condição seca e  $k_{SAT}=12,93$  na condição saturada. Entretanto, por se tratar de dados de apenas dois materiais, e que mesmo ambos sendo basaltos, ainda apresentaram comportamento e propriedades bem diferentes, fica evidente que adotar valores de referência baseados apenas no tipo de material rochoso não é o suficiente para representar as propriedades reais. Desta forma, recomenda-se a estimativa destes parâmetros de acordo também com cada localidade, e ressalta-se a necessidade de identificar e delimitar, em campo, os diferentes materiais presentes.

Os resultados de resistência com ciclagem em solução de sulfato de sódio anidro foram satisfatórios, com pequenas perdas de massa e inferiores ao limite máximo de 10% indicado pela NBR 5564 (ABNT, 2012). O processo de quebra dos fragmentos das amostras ocorreu pela relação direta de absorção de água e recristalização dos sais de sulfato de sódio que, enquanto solução, preencheram as fissuras e os poros presentes no BAS2.

Ao longo da avaliação qualitativa dos danos, verificou-se a oxidação superficial (pouco ou média pronunciada) dos fragmentos ensaiados, com locais pontuais de rachadura e/ou partição de alguns fragmentos, como do BAS1 que já se mostrava fraturado antes do início dos ensaios de sanidade. No BAS2, por exemplo, que apresentou pior comportamento e maior perda em massa, caracterizada por um padrão pervasivo de microfissuras mais abertas e interconectadas, aliada à presença constante de vesículas e/ou amígdalas, observou-se a ocorrência de frequentes e intensos lasqueamentos e desintegração nos fragmentos, de modo que o material perdido após o ensaio pôde ser visto com facilidade.

Destaca-se a importância dos estudos petrográficos no sentido de fornecer informações detalhadas dos componentes mineralógicos e micro estruturais (especialmente os de alteração e/ou de preenchimento das amígdalas) e sua previsão de comportamento diante das solicitações e condições de degradação laboratorial impostas por estes ensaios.

Comparativamente ao verificado no ensaio de sanidade com sulfato, nos ciclos de saturação com etilenoglicol a rocha sofreu um processo de fissuramento, lasqueamento, fragmentação e consequentemente perdas de massa mais significativas nos basaltos BAS2 e BAS3 (Figura 3).

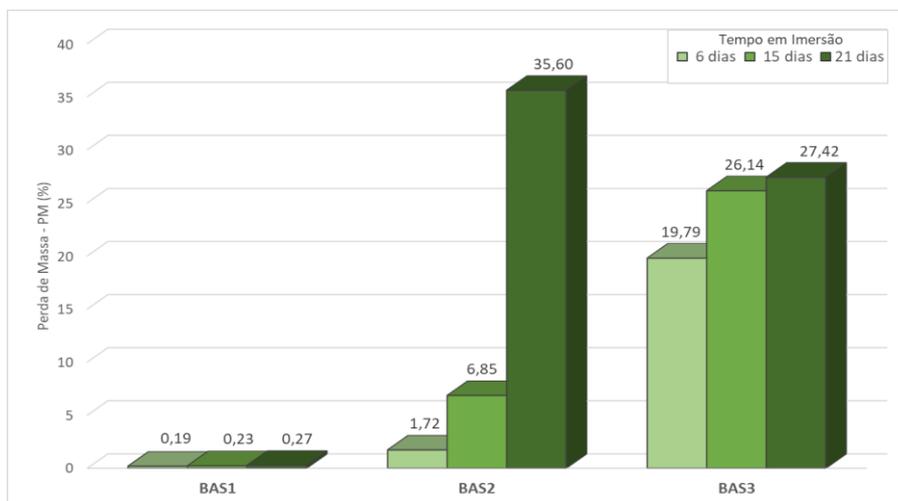


Figura 3. Porcentagens de perda de massa das amostras submetidas à ciclagem em etilenoglicol

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. Esta constatação é importante porque a NBR 12697 (ABNT, 1992), que recomenda o ensaio, foi cancelada em 2013. Conforme observado neste experimento, negligenciar ensaios para detectar a presença de argilas expansivas pode resultar na seleção de material inadequado e, conseqüentemente, prejuízos ao empreendimento. Já o BAS2 confirma que a duração de 21 dias, indicada por Van Blerk et al. (2017), deve ser utilizada na caracterização da alterabilidade de basaltos. A Figura 4 exibe um comparativo do efeito dos ensaios com sulfato e com etilenoglicol na amostra BAS3.

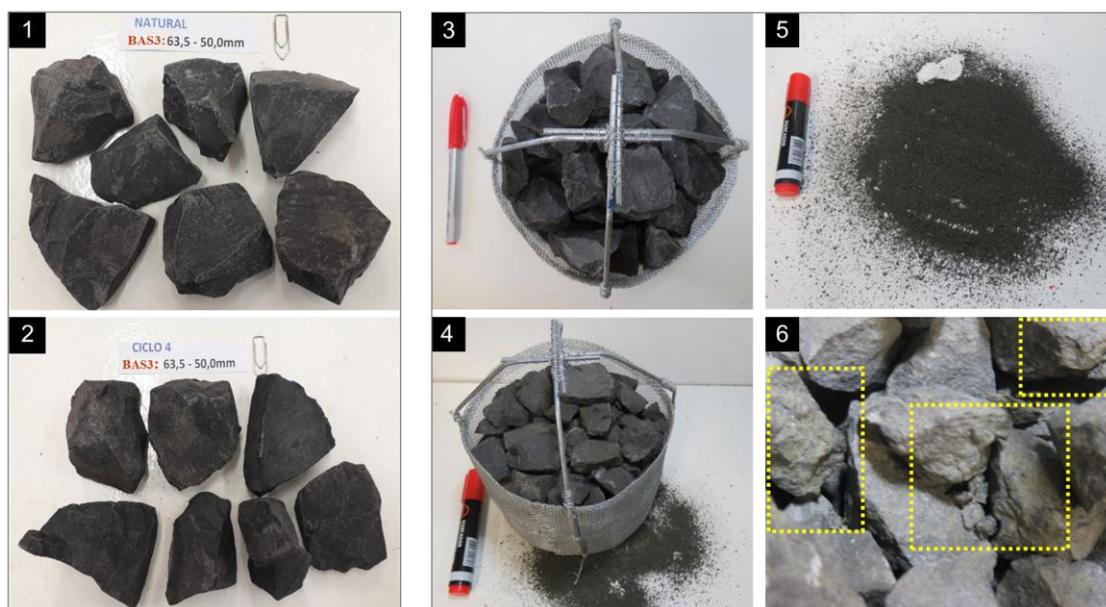


Figura 4. Amostra "BAS3". Em "1" e "2" alíquotas 63,5 a 50mm antes e depois, respectivamente, do ensaio de sanidade com sulfato de sódio, com alteração inexpressiva do material. Em "3" e "4" conjuntos recipiente/amostra em condição natural e após a ciclagem com etilenoglicol, respectivamente. Notar em "5" geração de finos observada no decorrer dos ciclos e, em "6", partículas com notável fendilhamento e expressiva fragmentação.

## 5. CONCLUSÕES

A qualidade do material pétreo usado como lastro tem impacto direto na operação da via, afetando na segurança, manutenção e qualidade do serviço prestado. 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.

Conforme observado, houve variações significativas em amostras de uma mesma pedra em Quirinópolis-GO. Foram identificados, em campo, 4 tipos geotécnicos de basalto, dos quais 2 foram selecionados e submetidos a ensaios de laboratório. Verificou-se diferenças expressivas tanto nos ensaios de caracterização mecânica quanto de alterabilidade. Enquanto a amostra BAS1 apresentou valores satisfatórios, o BAS2 teve perda de massa de 35,6% no ensaio com etilenoglicol e valores de resistência à compressão inferiores a 100MPa. 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 minucioso de descrição.

Os ensaios de compressão puntiforme 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 Ks 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 6%, estas chegaram a 35% para as amostras imersas em etilenoglicol. Tal resultado evidencia a importância de ensaios específicos para maciços basálticos, frequentemente encontrados com horizontes ricos em argilominerais.

Ainda sobre o ensaio com etilenoglicol, foram observados os 3 comportamentos possíveis para este método: perda de massa desprezível em BAS1 (material são); perda significativa na primeira semana e tendência a estabilidade a partir da segunda em BAS3; perda acentuada entre a segunda e terceira semana. Ou seja, apesar deste ensaio já apresentar resultados nos primeiros 7 dias, a imersão ao longo de, pelo menos, 21 dias é essencial.

Os dados obtidos nesse trabalho representam uma contribuição aos estudos tecnológicos das rochas brasileiras e podem também servir de referência na consolidação da norma NBR 5564 (ABNT, 2012), atualmente em revisão.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq pelo fomento e à bolsa de pesquisa (1º autor) e, aos laboratórios de Química Ambiental (IQSC/USP) e do Depto. de Geotecnia (EESC/USP), pelo suporte.

## **REFERÊNCIAS**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5564: Via férrea – Lastro ferroviário. Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 26p, 2012.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 6490: Rochas – caracterização de ocorrência – reconhecimento e amostragem. Rio de Janeiro, 3p, 2016.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 12697: Agregados – avaliação do comportamento mediante ciclagem acelerada com etilenoglicol. Rio de Janeiro, 1992.

ANM – Agência Nacional de Mineração. “Sumário Mineral 2017”. Brasília: ANM, 2019. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral\\_2017/view](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017/view). Acesso em: 10 jun. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D5731: Standard test method for determination of the point load strength index of rock and application to rock strength classification. West Conshohocken, 11 p., 2016.

- \_\_\_\_\_. ASTM C88: Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. West Conshohocken. 6 p., 2018.
- BROCH, E. "The influence of water on some rock properties". Proceeding of the 3rd Congress of the International Society for Rock Mechanics, p. 33–38, 1974.
- CPRM "Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo". Sistema de Informações Geográficas, Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM, 2004.
- CUCHIERATO, G.; DEBIAZZI NETO, D. A. "Indústria Mineral Paulista – Síntese Setorial do Mercado Produtor". São Paulo, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. 128 p., 2017. ISBN 978-85-93300-02-8
- DIAS FILHO, J. L. E.; SANTOS, V. G. P.; MAIA, P. C. A.; XAVIER, G. D. C. Study of Relationship Between Wear Tests on Rocks by Slake Durability, Micro-Deval and Los Angeles Abrasion Tests. In: ISRM Regional Symposium-8th South American Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015. DOI 10.3233/978-1-61499-605-7-225.
- FERREIRA, G. E.; FONSECA JUNIOR, C. A. F. "Mercado de agregados no Brasil". In: LUZ, A. B., ALMEIDA, S. L. M. Manual de agregados para a construção civil. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, Cap. 2, p. 9-33, 2012.
- FOOKES, P. G. "Geomaterials". Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, v. 24, n. 1, p. 3-15, 1991. DOI 10.1144/GSL.QJEG.1991.024.01.02.
- FRAZÃO, E. B. Alteração de rochas como critério de seleção de agregados. 2.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia–ABGE, 123 p., 2012. ISBN:978-85-7270-057-3.
- GUROCAK, Z., KILIÇ, R. "Effect of weathering on the geomechanical properties of the Miocene basalts in Malatya, Eastern Turkey". Bulletin of Engineering Geology and the Environment. v. 64, n. 4, p. 373-381, 2005. Springer Science and Business Media LLC. DOI 10.1007/s10064-005-0005-2.
- HASKINS D. R., BELL, F. G. "Drakensberg basalts: their alteration, breakdown and durability". Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. v. 28, n. 3, p. 287-302, 1995. Geological Society of London. DOI 10.1144/GSL.QJEGH.1995.028.P3.07.
- 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. Elsevier BV. DOI 10.1016/j.jvolgeores.2016.12.003.
- MAIA, P. C. A., SAYÃO, A. S. F. J., NUNES, A. L. L. S., ANTUNES, F. S. "Alterabilidade de rochas basálticas: caracterização petrográfica e física". Solos e Rochas. v. 25, n. 3, p. 207-220, 2002.
- MAIA, P. C. A., SAYÃO, A. S. F. J., NUNES, A. L. L. S. "Alterabilidade de rochas basálticas: caracterização mecânica". Solos e Rochas, v. 26, n. 3, p. 205-216, 2003.
- 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, n. 6-7, p. 464-486, 2001. Springer Science and Business Media LLC. DOI 10.1007/s004450000115.
- MILNER, S. C.; DUNCAN, A. R.; WHITINGHAM, A. M.; EWART, A. "Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic volcanic units within the Parará-Etendeka igneous province". Journal of Volcanology and Geothermal research. v. 69, n. 3-4, p. 137-157, 1995. Elsevier BV. DOI 10.1016/0377-0273(95)00040-2.
- OLIVEIRA, P. C.; PATIAS, J.; ZUQUETTE, L. V. A. "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. Springer Science and Business Media LLC. 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.

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.

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". In Geociências, v. 37, n. 3, p. 669-681, 2018. UNESP - Universidade Estadual Paulista. DOI 10.5016/geociencias.v37i3.12088.

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 Proceedings of ISRM 14th International Congress of Rock Mechanics. Foz do Iguaçu: ISRM, p. 2042-2048, 2019.

SANTOS, R. S.; RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSÚ, A. B.; XAVIER, G. C. "Railroad ballast of granites and basic rocks in tropical regions: relationships between petrography, physical-mechanical properties and alterability" in Transportes (no prelo), 2021.

U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. "Handbook of Concrete and Cement. Method for Testing Stone for Expansive Breakdown on Soaking in Ethylene Glycol". U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1969.

USGS (2021), "MINERAL COMMODITY SUMMARIES". U.S. Geological Survey, 200 p., 2021.

VAN BLERK, P. G. L.; FLETCHER, E.; COSTELO, S. B.; HENNING, T. F. "Ethylene Glycol Accelerated Weathering Test. An Improved, Objective Aggregate Durability Test Method". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2655, n. 1, p. 27-35, 2017. DOI 10.3141/2655-05.