

ESTUDO EM LABORATÓRIO DE ALTERAÇÃO DE BASALTO: ENSAIOS DE CICLAGEM ÁGUA - ESTUFA

BASALT ALTERATION LABORATORY STUDY: WETTING–DRYING TEST

Wilson COELHO NETO, Lázaro Valentin ZUQUETTE

Escola de Engenharia de São Carlos – USP. Departamento de Geotecnia. Avenida Trabalhador São Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt, São Carlos – SP. E-mail: wcneeto@gmail.com; lazarus1@sc.usp.br

Introdução
Materiais e métodos
Seleção e caracterização das amostras
Ensaio de Ciclagem Água-Estufa
Resistência ao Esmagamento
Critérios para o Ensaio de Resistência
Resultados e discussões
Caracterização das amostras
Basalto maciço compacto
Basalto vesicular
Índices físicos
Resistência ao Esmagamento
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Dentre as inúmeras aplicações dos materiais rochosos na engenharia, está seu uso como agregado graúdo e miúdo nos mais diferentes tipos de obras de infraestrutura. Nesse contexto, o conhecimento das características de alteração dos materiais rochosos é essencial para prevenção e manutenção para quaisquer que sejam suas aplicações. Este trabalho apresenta os resultados obtidos em estudo laboratorial com vista à avaliação da alteração de duas amostras de agregados de basalto maciço compacto (BMC) e basalto vesicular (BVA), na faixa granulométrica de 9,5 a 6,3 mm, por meio de ensaios de ciclagem acelerada do tipo água-estufa com avaliação do grau de alteração a partir dos ensaios de índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e água de absorção) e do ensaio de resistência ao esmagamento. Os resultados dos índices físicos apresentaram valores para densidade aparente (BMC: 2,85 g/cm³ - BVA: 2,61 g/cm³), porosidade aparente (BMC: 7,51 - BVA: 9,59%) e água absorvida (BMC: 2,67- BVA: 3,59%) que indicam baixa predisposição à alteração. O índice de resistência ao esmagamento para os dois litotipos após o ensaio de ciclagem água-estufa é da ordem de 0,73. De acordo com os resultados obtidos, os agregados dos dois litotipos apresentam características adequadas para seu uso como agregados em obras de engenharia.

Palavras-chave: Alteração. Agregados. Basaltos.

ABSTRACT - Among the numerous uses of rocks in civil engineering, is its use as coarse and fine aggregate in many different types of infrastructure works. In this context, the knowledge of the alterability characteristics of rock materials is essential for prevention and maintenance for any uses. This paper presents the results obtained in a laboratory study to evaluate the alterability of two aggregate samples obtained from compact massive basalt (BMC) and vesicular basalt (VBA), in the particle size range of 9.5 to 6.3 mm, through accelerated cycling tests of the water-drying-oven type with evaluation of the degree of alteration from the physical index tests (bulk density, bulk porosity and water absorption) and crushing strength test. The results of the physical index showed values for bulk density (BMC: 2.85 g/cm³ - BVA: 2.61 g/cm³), bulk porosity (BMC: 7.51 - BVA: 9.59%) and absorbed water (BMC: 2.67- BVA: 3.59%) that indicate low predisposition to alteration. The crush strength index for the two lithotypes after the water-drying-oven cycling test is of the order of 0.73. According to the results obtained, the aggregates of the two lithotypes present adequate characteristics for their use as aggregates in engineering works.

Keywords: Alteration. Aggregates. Basalt.

INTRODUÇÃO

Com o avanço do conhecimento e o domínio de tecnologias, o Homem intensificou os processos de exploração do meio ambiente de modo a usufruir dos recursos naturais para diversos fins; entre esses recursos estão os materiais geológicos. Quando se trata do âmbito da construção civil, as rochas são utilizadas de várias maneiras, como agregados para concreto, obras de pavimentação, revestimentos, ferrovias e aplicações em barragens com diferentes dimensões e finalidades (rip rap, transições, filtros) observando sempre que sejam

utilizadas nas condições granulométricas adequadas para atender aos objetivos planejados para o uso. Ainda, devido à sua ampla utilização na construção civil, existe a necessidade de compreender o seu processo de alteração quando sujeitas às ações dos componentes climáticos (temperatura, chuva, vento, componentes químicos nas águas etc.), pois esse comportamento está associado às condições de durabilidade, do material rochoso e manutenção e segurança do uso. Sendo assim, um dos desafios é o processo de diagnós-

tico do grau de alteração que ocorre no material rochoso, em que, muitas vezes, não podem ser visualmente detectados ou medidos por meio de uma rotina de ensaios simples. Conforme Bricker et al. (1994) e Sangsefidi et al. (2020), intemperismo é o processo natural e irreversível de desintegração e decomposição de material rochoso, o qual envolve mudanças mineralógicas, físicas e químicas nas características originais, sob uma complexa influência das condições ambientais. Tais processos estão relacionados às suas características intrínsecas, que incluem sua composição mineralógica, seu estado microfissural, suas características de textura, granulação e cimentação (Andrade & Saraiva, 2010; Goyena & Fallis, 2006). Somado a isso, ainda existem as variáveis relacionadas ao meio ambiente, denominadas características extrínsecas, em que as ações de intemperismo desencadeiam os processos de alteração em função das características do meio (físicas, químicas e biológicas) (Gomes, 2001; Morton et al., 2002; Asio & Jahn, 2007). Vergara & Triantafyllidis (2015) ressaltam a importância da composição mineralógica no processo de alteração da rocha. E, Lima (2002) sugere que rochas multiminerálicas tendem a sofrer mais influência da temperatura quando comparadas com rochas formadas por um único mineral, devido às diferenças dos coeficientes de dilatação térmica dos minerais e dos diferentes arranjos volumétricos dos minerais, que impõem o processo de expansão e retração devido à diferença de temperatura em diferentes direções e magnitudes, gerando a fissuração e fragmentação da rocha. De acordo com Farjallat (1971), por consequência do comportamento expansivo, a rocha sofre os efeitos da fadiga e a diminuição da resistência dos minerais, resultando na ruptura da rocha ou a abertura de fissuras. Vergara & Triantafyllidis (2015) apresentaram outro contexto para expansão e contração, que ocorre devido ao comportamento de absorção de água pelos argilominerais, que, em alguns casos, pode ser um processo reversível, pois, se a rocha não se desintegrar após o umedecimento, seu volume diminuirá quando a água for removida e se expandirá novamente quando do retorno da umidade.

Esse processo de expansão e contração devido à presença de argilominerais pode causar danos em estruturas com uso de agregados em obras de engenharia, como é o caso do estudo de Suárez et al. (2021), com basaltos nas obras do canal do Panamá, que, devido à rápida degradação do

basalto utilizado como agregado, relacionada à presença de argilominerais (esmectitas), gerou atrasos no cronograma e, por consequência prejuízos econômicos. Leyland et al. (2015) e Yue et al. (2020) apresentam exemplos de perdas econômicas em empreendimentos de engenharia relacionadas à degradação da qualidade do material rochoso devido à alterabilidade gerada por argilominerais. No sentido de gerar conhecimento e melhor entendimento sobre o processo de alterações de materiais rochosos, foi desenvolvido um estudo em laboratório para avaliar o grau de alteração de basaltos quando usados na dimensão de agregados graúdos, normalmente utilizados na construção civil, na faixa granulométrica de 9,5 a 6,3 mm. O estudo consistiu em submeter os agregados ao ensaio de ciclagem água-estufa por meio de um processo de ciclagem acelerada. Para controle em relação a avaliação do grau de alteração, foram utilizados índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água) e mecânicos (resistência ao esmagamento). No sentido de embasar o estudo e orientar os procedimentos, foi feito um levantamento de estudos existentes relativos a basaltos quanto aos métodos e às condições ensaiadas, assim como em termos dos graus de alteração observados. Estudos extensivos utilizando as ciclagens para compreender a durabilidade do agregado para fins de engenharia têm sido desenvolvidos por diversos autores, entre eles, Bell (1992), Gökceoglu et al. (2000), Gomes (2001), Hale & Shakoor (2003), Zhou et al. (2017). Dentre as ciclagens, o método que utiliza ciclos de umedecimento e secagem em estufa, chamado de ciclagem água-estufa, é o mais difundido, sendo comum o uso de diferentes procedimentos conforme consta na figura 1. Normalmente, os estudos estão associados a uma combinação de ensaios para obtenção de índices físicos e mecânicos, pois se espera que a degradação físico-mecânica dos agregados seja detectada e, assim, estimado o grau de alteração (Moon & Jayawardane, 2004, Pudlo et al., 2012, Xiang et al., 2015; Zhang et al., 2015 Gratchev; et al., 2019 e Dursun & Topal, 2020). Os estudos como os de Gupta & Rao (2001), Moon & Jayawardane (2004), Gurocak & Kilic (2005), Loubser (2013), Corrêa dos Santos et al. (2016), Dursun & Topal (2019), Gratchev et al. (2019) e Dursun & Topal (2020) apresentam resultados obtidos para basaltos, conforme as figuras 2, 3 e 4.

<i>Material</i>	<i>Dimensões</i>	<i>Tempo de Saturação</i>	<i>Tempo de Secagem</i>	<i>N° de ciclos</i>	<i>Ensaio</i>	<i>Autor</i>
Basalto	6x4,5x2,5 cm	3h	24h (Amb*)	105	A cada Ciclo: IF*	Loubser (2013)
Basalto	54 mm – Corpo de prova ISRM (1981)	-	-	24	PLT*	Corrêa dos Santos et al. (2016)
Basalto e Basalto vesicular		18h	20h (65°C)	80	A cada 10 ciclos: IF* e UCS*	Dursun & Topal (2019)
Basalto		24h	24h (100°C)	25	A cada 2 ciclos: IF, e PLT*	Gratchev et al. (2019)
Basalto e Basalto vesicular		14h	8h (110°C)	80	IF* e UCS*	Dursun & Topal (2020)

Notas*: **Amb**: Temperatura ambiente; **IF**: Índices físicos; **UCS**: Resistência a compressão uniaxial; **PLT**: Índice de resistência a carga pontual.

Figura 1 - Procedimentos de ciclagem água-estufa constantes da literatura técnica.

<i>Material</i>	Grau de alteração - Massa específica seca (kg/m³)						<i>Autor - País</i>
	<i>Minerais</i>	<i>Intacta</i>	<i>Leve</i>	<i>Moderado</i>	<i>Muito</i>	<i>Completo</i>	
Basalto Denso	1, 2 e 3	2960	2740	-	2470	1820	Gupta & Rao (2001) - Índia
Basalto	1,3,4 e 5	2811	2116	1908	1758	1538	Moon & Jayawardane (2004) - Nova Zelândia
Basalto	-	2800	2750	2600	2450	2300	Gurocak & Kilic (2005) - Turquia
Basalto	-	-	2717	-	-	-	Loubser (2013) - África do Sul
Basalto Denso	-	2820	-	-	-	-	Corrêa dos Santos et al. (2016) - Brasil
Basalto Denso	1, 2 e 5	2728	-	2554	-	-	Dursun & Topal (2019) - Turquia
Basalto Vesicular	1, 2, 5, 6 e 8	2473	-	2059	-	-	
Basalto Denso	1, 2, 5 e 7	2950	2740	2510	2160	-	Gratchev et al. (2019) - Austrália
Basalto Denso	1, 2 e 5	2750	2680	-	-	-	Dursun & Topal (2020) - Turquia
Basalto Vesicular	1, 2, 5, 6 e 8	2450	2370	-	-	-	

Principais minerais: Plagioclásios (1), Piroxênios (2), Vidro vulcânico (3), Fenocristais de Titaunagita (4), Olivina (5), Iddingsita (6), Analcima (7), Calcita (8).

Figura 2 - Valores do grau de alteração relacionado com massa específica seca.

<i>Material</i>	Grau de alteração - Absorção de água (%)						<i>Referência</i>
	<i>Minerais</i>	<i>Amostra Intacta</i>	<i>Leve</i>	<i>Moderado</i>	<i>Muito</i>	<i>Completo</i>	
Basalto Denso	1, 2 e 3	0,22	1,82	-	3,86	16,19	Gupta & Rao (2001) - Índia
Basalto	-	1,00	1,25	2,00	5,00	8,00	Gurocak & Kilic (2005) - Turquia
Basalto	-	-	2,91	-	-	-	Loubser (2013) - África do Sul
Basalto Denso	-	3,00	-	-	-	-	Corrêa dos Santos et al. (2016) - Brasil
Basalto Denso	1, 2 e 5	0,89	-	1,22	-	-	Dursun & Topal (2019) - Turquia
Basalto Vesicular	1, 2, 5, 6 e 8	2,30	-	3,33	-	-	
Basalto Denso	1, 2 e 5	1,0	1,4	-	-	-	Dursun & Topal (2020) - Turquia
Basalto Vesicular	1, 2, 5, 6 e 8	2,1	3,1	-	-	-	

Principais minerais: Plagioclásios (1), Piroxênios (2), Vidro vulcânico (3), Fenocristais de Titaunagita (4), Olivina (5), Iddingsita (6), Analcima (7), Calcita (8).

Figura 3 - Valores do grau de alteração relacionado com a absorção de água.

Material	Grau de alteração – Porosidade (%)						Autor - País
	Minerais	Amostra Intacta	Leve	Moderado	Muito	Completo	
Basalto Denso	1, 2 e 3	0,64	4,97	-	9,50	29,52	Gupta & Rao (2001) - Índia
Basalto	1,3,4 e 5	0,32	7,96	14,28	20,61	25,39	Moon & Jayawardane (2004) – Nova Zelândia
Basalto	-	1,00	2,00	4,15	9,00	11,00	Gurocak & Kilic (2005) - Turquia
Basalto	-	-	4,79	-	-	-	Loubser (2013) – África do Sul
Basalto Denso	-	1,00	-	-	-	-	Corrêa dos Santos et al. (2016) - Brasil
Basalto Denso	1, 2 e 5	6,39	-	8,33	-	-	Dursun & Topal (2019) - Turquia
Basalto Vesicular	1, 2, 5, 6 e 8	10,96	-	15,09	-	-	
Basalto Denso	1, 2, 5 e 7	1,4	2,4	14,5	27,2	-	Gratchev et al. (2019) - Austrália
Basalto Denso	1, 2 e 5	4,1	5,3	-	-	-	Dursun & Topal (2020) - Turquia
Basalto Vesicular	1, 2, 5, 6 e 8	9,9	13,6	-	-	-	

Principais minerais: Plagioclásios (1), Piroxênios (2), Vidro vulcânico (3), Fenocristais de Titanaugita (4), Olivina (5), Iddingsita(6), Analcima(7), Calcita (8).

Figura 4 - Valores do grau de alteração relacionado com a porosidade.

Os parâmetros físicos e mecânicos são importantes como indicadores do grau de alteração e predisposição à alterabilidade das rochas.

Diante disso, alguns ensaios laboratoriais são bastante difundidos na literatura técnica, tais como: densidade aparente seca e saturada, absorção de água e porosidade, todos com parâmetros de natureza física. Somado a esses ensaios de índices físicos, o ensaio de resistência ao esmagamento é muito usado e, no Brasil, os ensaios para obtenção dos parâmetros mecânicos são realizados de acordo com as normativas NBR 9938/2013 (ABNT, 2013), e por normativas do

Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), sendo a DNER 197/97 (DNER, 1997). No âmbito internacional, pode-se encontrar as recomendações do ensaio por meio da normativa - *Determination of Aggregate Crushing Value* – ACV, proposta pela *British Standard* – BS 812:1990 (BS, 1990). As características dos ensaios, de forma resumida, estão dispostas na figura 5. Nos estudos Korkanç & Tuğrul (2004), Engidasew & Barbieri (2014), Piasta et al. (2016), Kamani & Ajalloeian (2019), KhaleghiEsfahani et al., (2019), Koohmishi & Palassi (2020), são encontrados aspectos dos procedimentos desses ensaios.

Descrição	NBR 9938/2013 - DNER 197/97	ACV - BS 812:1990
Dimensão dos agregados (mm)	12,5<#<9,5	12,5<#<10,0
Quantidade de amostra para realização de 1 (um) ensaio	3 kg	3 kg
Abertura da peneira para determinação de Massa retida após esmagamento	2,36mm	2,36mm
Lavagem e secagem das amostras antes do ensaio	Em água corrente e secagem em estufa 100°C	Em água corrente e secagem em estufa 110°C
Aparelho	Cilindro vazado com 154mm de diâmetro interno e 140mm de altura, diâmetro de base 254 mm e altura 26 mm, embolo com 151mm de diâmetro.	Cilindro vazado com 154mm de diâmetro interno e 125mm de altura, base quadrada de 230mm e altura 6,3mm, embolo com 125mm de diâmetro.
Carga/Taxa/Tempo	400 kN – Taxa: 40kN/min – 10 Min	
Expressão para obtenção do índice	$R_E(\%) = \frac{M_{inicial} - M_{retida}}{M_{inicial}}$	

Figura 5 - Procedimentos para realização do ensaio de resistência ao esmagamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido com dois tipos de materiais geológicos: basalto maciço compacto (BMC) e basalto vesicular (BVA), ambos na faixa granulométrica entre 6,3 e 9,5mm.

O estudo foi realizado nas dependências dos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Toledo. A pesquisa foi desenvolvida de acordo com o fluxograma da figura 6.

Seleção e Caracterização das Amostras

As amostras de basaltos utilizadas no presente estudo, na faixa de agregados graúdos, são procedentes do município de Foz do Iguaçu-PR. Inicialmente coletou-se aproximadamente 110 kg a partir da britagem dos dois materiais geológicos, que foram lavados e secos ao ar, depois peneirados para seleção da faixa granulométrica entre 6,3 e 9,5 mm. A caracterização das amostras deu-se por

análises qualitativas e quantitativas. As análises qualitativas foram realizadas de acordo com critérios de cor, coerência, estrutura, textura, granulação e grau de alteração de acordo com os procedimentos da ISRM (1981). As análises quantitativas baseadas nos ensaios de índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e a absorção aparente) seguiram como base os procedimentos da NBR NM 53/2009 (ABNT, 2009) (Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água), com adaptação da quantidade de amostra (aproximadamente 400g). Cabe ressaltar que os ensaios foram realizados nas amostras em condições naturais a partir do 40º ciclo e posteriormente a cada 20 ciclos até o fim do ensaio de ciclagem água-estufa, sempre seguido do ensaio de resistência ao esmagamento.

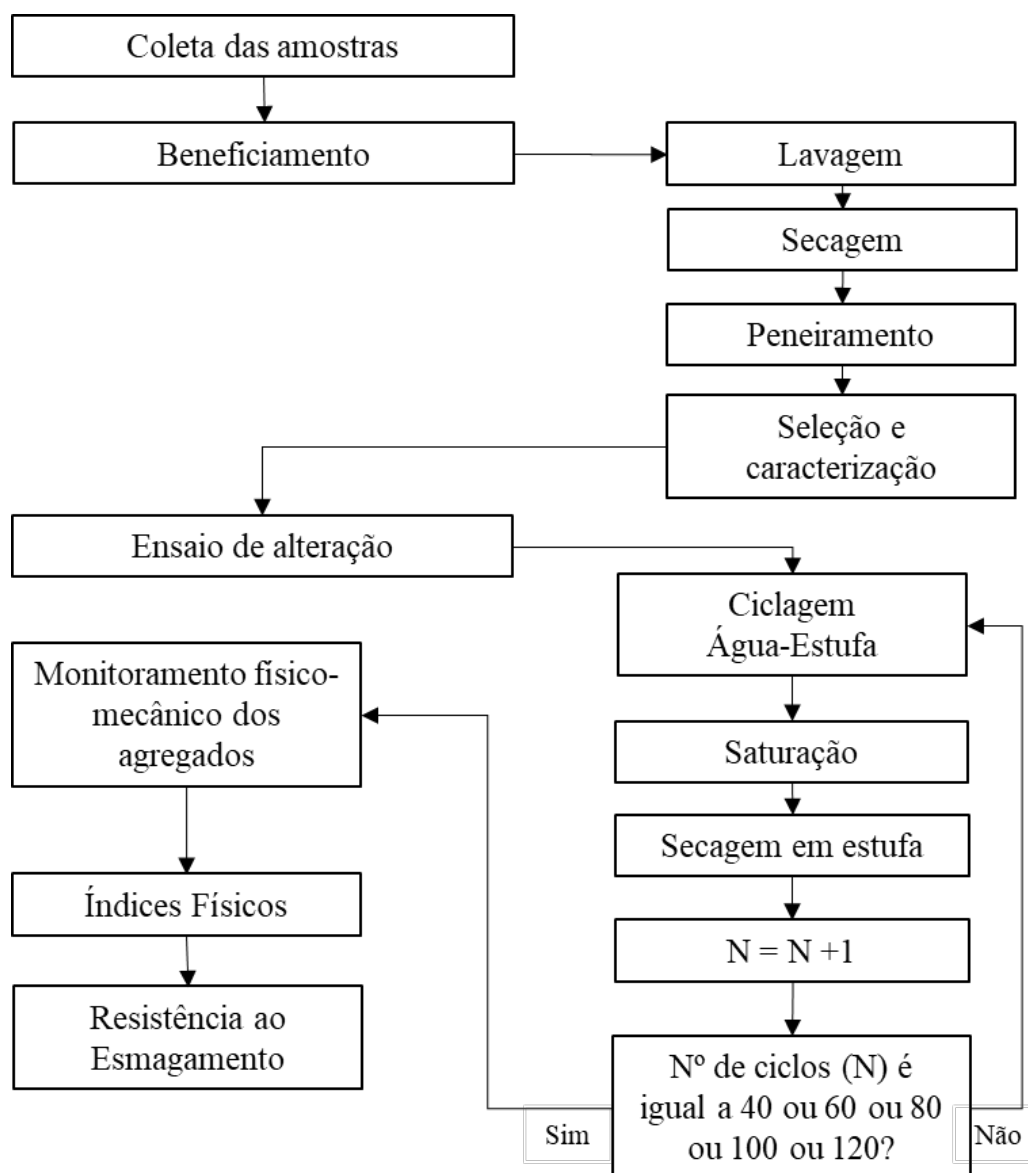


Figura 6 - Fluxograma das etapas do estudo.

Ensaio de Ciclagem Água-Estufa

O ensaio de ciclagem Água-Estufa foi conduzido a partir da NBR 12696/92 (ABNT, 1992) com adaptações quanto ao tempo de submersão dos agregados e secagem, com o objetivo de otimização do ensaio. Os seguintes passos foram desenvolvidos para adaptação e execução do ensaio:

1. Foram desenvolvidos ensaios de tempo de saturação e tempo de secagem para o período de saturação das amostras. O valor encontrado para verificar o tempo necessário de saturação e de secagem em estufa foi de 3h, portanto, adotou-se que cada ciclo seria composto por 3 horas de saturação e 21 horas de secagem.

2. A água (destilada) utilizada para saturação estava com pH7 e a temperatura da estufa para secagem foi de 110°C.

3. Para possibilitar a realização de resistência ao esmagamento, em fases ao longo dos ciclos de água-estufa e a triplicata, foram utilizados 10 kg de amostra, desconsiderando a caracterização de amostra inalterada (ciclo zero).

4. Após os ciclos, foram executados os ensaios de índices físicos e, em sequência, o ensaio de

resistência ao esmagamento.

Resistência ao Esmagamento

Como parte do estudo, visto a necessidade de realizar um número grande, foi desenvolvida uma mudança no procedimento do ensaio, o que demandaria um volume grande de amostras e espaço físico, o que inviabilizaria a aplicação do ensaio ciclagem água-estufa. Dessa forma, foram diminuídas as dimensões do cilindro alterando as medidas propostas pelas NBR 9938/2013 (ABNT, 2013) e DNER 197/97 (DNER, 1997). Na figura 7 observa-se as dimensões do equipamento construído em aço SAE 4140 (densidade de 7,85 g/cm³ e tensão de escoamento de 415 MPa), com tratamento térmico para aumentar sua dureza e, com as partes livres e a fixação móvel, para permitir a limpeza e remoção da amostra após cada ensaio. A massa utilizada é de 400g, previamente seca em estufa. As etapas realizadas durante o procedimento foram: (A) acomodação da amostra dentro do aparato de ensaio com ajuste na prensa hidráulica; (B) aplicação da carga com a taxa constante; (C) auxílio do extrator para remoção da amostra e; (D) após a extração, manejo da amostra (Figura 8).

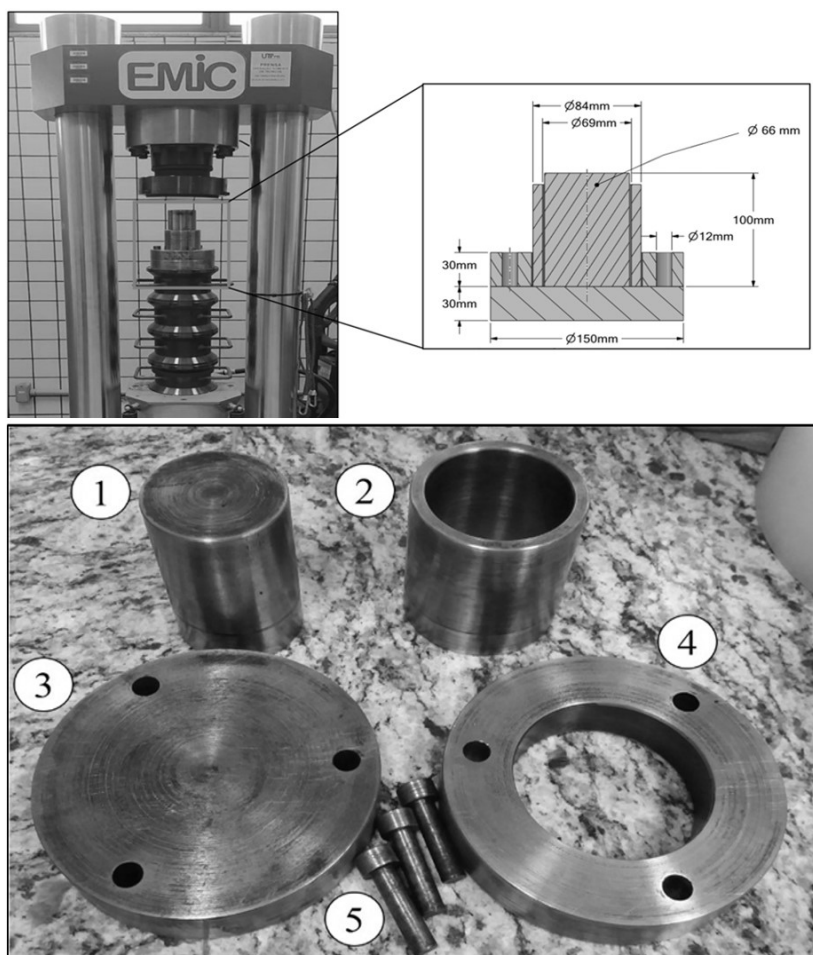


Figura 7 - Conjunto do cilindro e a prensa e, detalhes dos componentes do equipamento. 1 – Cilindro maciço de aplicação de carga; 2- Cilindro porta-amostra; 3- Base circular; 4- Anel de fixação; 5- Pinos de fixação.

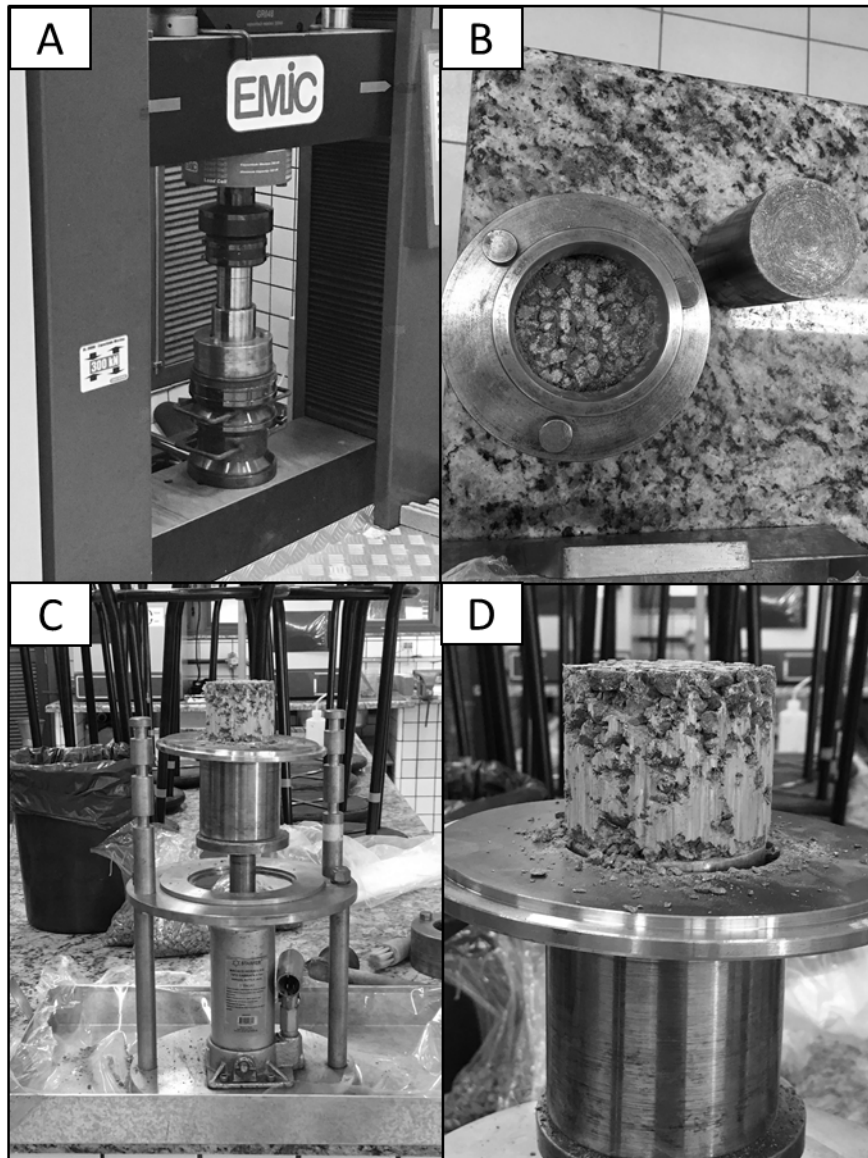


Figura 8 - Etapas do ensaio de perda ao esmagamento. (A) Aparato na prensa hidráulica. (B) vista superior após a amostra sofrer o carregamento de 50 kN. (C) Vista frontal do extrator. (D) amostra completamente extraída.

Como resultado desse ensaio, obtém-se um índice que indica a resistência ao esmagamento, sendo que quanto maior o valor menor é a resistência.

Os ensaios de resistência ao esmagamento foram realizados com as seguintes condições:

- Carregamento total: 100kN;
- Velocidade da aplicação da carga: 10kN/min;
- Cálculo do índice de resistência ao esmagamento:
 1. Passagem do material ensaiando na peneira

de retenção com abertura de 6,30mm.

2. Pesagem do material retido na peneira.
3. Cálculo do índice
4. $I = (M_t - M_r)/(M_t)$

Onde: M_r = massa retida na peneira #6,30mm

M_t = massa total das amostras.

- A análise de regressão entre os índices físicos e os índices de resistência ao esmagamento, com auxílio do *software* livre Sisvar Versão 5.6, conforme procedimentos de Ferreira (2011).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir, encontram-se os resultados obtidos para os dois tipos de basaltos e as análises comparativas.

Caracterização das Amostras

Basalto Maciço Compacto (BMC)

As amostras BMC apresentam coloração cinza, de caráter maciço e textura afanítica. De

acordo com Costa (2015), a mineralogia é composta de 45-50% de cristais de plagioclásio, 40-50% de piroxênio, olivinas e minerais opacos, enquadrando-se na classe de alteração rocha intacta de acordo com a ISRM (1981). Na figura 9 encontra-se imagem da amostra natural de mão e dos fragmentos após a britagem.

Basalto vesicular (BVA)

As amostras BVA – basaltos vesiculares têm a coloração rosada e textura granular fina, com pontuações de cor cinza claro (plagioclásios), tons de verde escuro a preto (minerais máficos) e verde claro (celadonita) (Figura 10). Costa (2015) estimou que a matriz é composta de 45-60% de plagioclásio, 40-50% de piroxênio e 5-10% de minerais opacos e vesículas esféricas com até 1,5 mm com preenchimento possível de porzolita, celadonita e argilominerais e, se enquadram na classe pouco alterada de acordo com a ISRM (1981).

Índices Físicos

Os resultados referentes aos ensaios de índices físicos para os dois litotipos BMC e BVA encontram-se na Figura 11. Os valores de densidade aparente, porosidade aparente e água absorvida indicam uma resistência à ciclagem devido à baixa variação entre os valores finais com os aferidos no material antes de ser submetido ao ensaio. Ainda conforme os números de ciclos avançam, os valores de densidade aparente apresentam um decréscimo; por outro lado, ocorre o acréscimo nos percentuais de porosidade aparente e água de absorção.

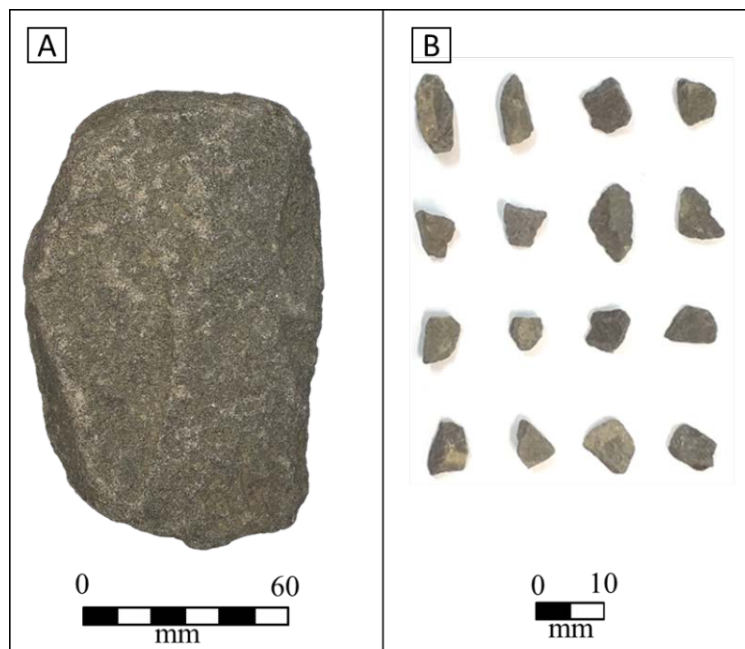


Figura 9 - Basalto maciço compacto. (A) Amostra de mão. (B) Fragmentos após beneficiamento na fração granulométrica do estudo.

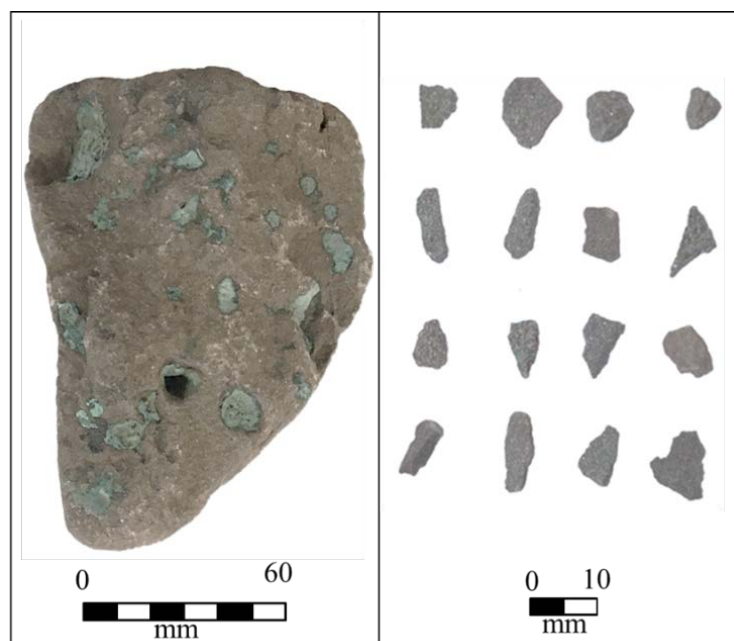


Figura 10 - Basalto vesicular. (A) Amostra de mão. (B) Após beneficiamento na fração granulométrica do estudo.

Amostra	Ciclo	ρ_a (g/cm ³)	η_a (%)	α_a (%)
BMC	0	2,968	4,334	1,5475
	40	2,965	5,791	1,9313
	60	2,884	6,257	2,1596
	80	2,816	5,664	1,9983
	100	2,804	7,277	2,5964
	120	2,810	7,519	2,6758
BVA	0	2,773	9,183	3,3803
	40	2,724	9,258	3,4426
	60	2,722	9,176	3,4423
	80	2,720	9,364	3,5675
	100	2,680	9,422	3,5221
	120	2,655	9,596	3,5947

Notas: ρ_a : Densidade Aparente; η_a : Porosidade Aparente; α_a : Água absorvida.

Figura 11 - Valores médios para os índices físicos de BMC e BVA ao longo de 120 ciclos de ciclagem água-estufa.

Para a verificação do grau de alteração do material, os valores finais encontrados foram confrontados com os valores apresentados nas figuras 1, 2 e 3, evidenciando que, ao fim do 120º ciclo, as amostras de BMC permanecem com o grau de alteração de rocha sem alteração e as amostras de BVA com o grau de alteração leve.

A partir dos resultados encontrados nos ensaios de caracterização física, das amostras após a ciclagem água-estufa, os basaltos BMC e BVA apresentaram baixo grau de alteração quando comparados a valores encontrados em outros basaltos com mineralogia semelhantes.

A hipótese para esse comportamento seria devido às diferenças dos percentuais mineralógicos entre os basaltos, por exemplo, quando comparado BMC com o basalto denso de Gupta & Rao (2001), seus percentuais de piroxênio (29%) são menores, além da presença de vidro vulcânico em suas amostras. Ainda, os autores destacam que amostras sãs apresentavam poros vazios e microfaturas em sua matriz, algo que não foi observado nas amostras de BMC.

Quando se compara a mineralogia do BVA

com os basaltos vesiculares de Dursun & Topal (2019) surgem algumas diferenças. Dursun & Topal (2019) afirmam, embora não quantificadas, que a composição de plagioclásio é muito maior do que piroxênios, algo que não ocorre com BVA, e ainda citam a presença de calcita, que também não foi observada em BVA. Gomes (2001) já havia observado o comportamento de resistência à alteração em ciclagem natural de basaltos, em que atribuiu esse comportamento às características físicas do material, pois suas amostras eram muito densas e pouco porosas, corroborando com o resultado do presente estudo. Diante disso, evidencia-se a resistência dos basaltos à ciclagem água-estufa, e conforme citado por Gomes (2001), resultados mais expressivos, poderiam ser obtidos a partir de um número consideravelmente maior de ciclos.

Resistência ao Esmagamento

O aumento do índice de resistência ao esmagamento (Figuras 12, 13 e 14) indica uma degradação do material, sendo o ciclo 120 o que apresentou os maiores valores para índice mecânico. A diferença de valores entre os ciclos é pequena (à exceção das amostras intactas).

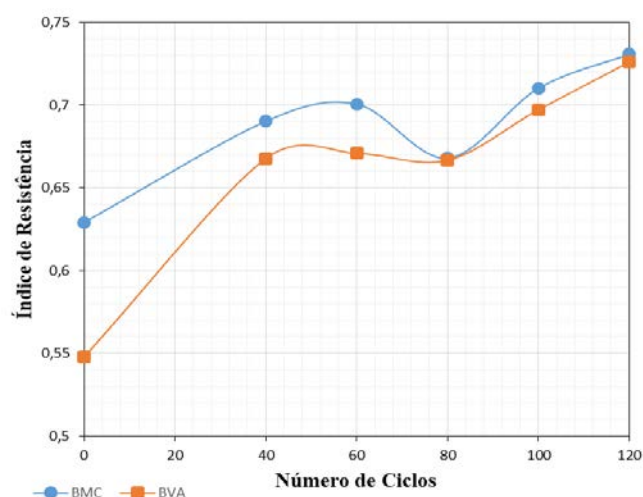


Figura 12 - Gráfico da variação do índice de resistência ao esmagamento.

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO – BMC			
Ciclos	μ	σ	cv
0	0,62915	0,00449	0,00714
40	0,70020	0,00174	0,00249
60	0,70063	0,00542	0,00774
80	0,66792	0,00208	0,00311
100	0,71016	0,0033	0,00465
120	0,73081	0,00218	0,00299

Notas: μ : média. σ : Desvio padrão. cv : Coeficiente de variação.

Figura 13 – Valores para o Índice mecânico relativo à resistência ao esmagamento – BMC.

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO – BVA			
Ciclos	μ	σ	cv
0	0,54792	0,01791	0,03269
40	0,66775	0,00724	0,01085
60	0,67080	0,00427	0,00637
80	0,66668	0,01293	0,01939
100	0,69718	0,00504	0,00722
120	0,7260	0,00557	0,00768

Notas: μ : média. σ : Desvio padrão. cv : Coeficiente de variação.

Figura 14 - Valores para o Índice mecânico relativo à resistência ao esmagamento – BVA.

Desta forma, a resistência dos dois litotipos à ciclagem água-estufa é evidenciada, pois os resultados corroboram com os resultados apresentados nos índices físicos, em que as alterações dos valores de densidade e porosidade aparente podem ser associados às perdas de resistência mecânica.

Quando da comparação entre os resultados de BMC e BVA, observa-se que os valores do índice de resistência ao esmagamento são muito próximos

e, não foi possível verificar por meio dos índices a influência do litotipo na resistência ao esmagamento. Ainda, com o objetivo de validar os dados dos ensaios, na figura 15 encontram-se os resultados do presente estudo com os resultados encontrados por Engidasew & Barbieri (2014), que utilizaram a metodologia tradicional do ensaio de resistência ao esmagamento para um basalto com valores de densidade aparente semelhantes aos pertinentes a este estudo.

LITOTIPO	ρ_a (g/cm ³) (120 ciclos)	i (%) (120 ciclos)	Engidasew & Barbieri (2014)	
			ρ_a (g/cm ³)	i (%)
BMC	2,81	26,919	2,93~3,08	20~22
BVA	2,65	27,400		

Legenda: ρ_a : Densidade aparente. i: Índice de resistência ao esmagamento.

Figura 15 - Comparativo entre os índices de resistência ao esmagamento com os valores de Engidasew & Barbieri (2014).

Observa-se que, apesar da faixa granulométrica, os resultados encontrados são de mesma grandeza, indicando que o ensaio com as dimensões reduzidas satisfaz a proposta de quantificar potencial alteração do material geológico. Por fim, a correlação (R^2) dos índices de resistência mecânica com os outros ensaios de ciclagem realizados nesse estudo e seus valores

estão dispostos nas figuras 16 e 17.

Pereira et al. (2021) sugerem que para fins geotécnicos, o R^2 deve ser maior que 0,81 uma correlação significativa. Este valor não foi atingido nos ensaios de densidade aparente em BMC e de porosidade aparente em BVA, justificados devido à baixa variação dos índices de resistência ao esmagamento entre os valores dos ciclos.

CONCLUSÕES

Os ensaios físicos e mecânicos desenvolvidos no presente estudo, em conjunto com o ensaio de ciclagem água-estufa tinham como finalidade a identificação de alteração nos agregados BMC e BVA, por meio da aferição dos seus valores em cada ciclo de ciclagem água-estufa previamente

estabelecido (0, 40, 60, 80, 100 e 120 ciclos). Somando a isso, os resultados do estudo sugerem uma mudança no procedimento do ensaio de resistência ao esmagamento, onde as dimensões do aparato de ensaio e o volume de amostra foram adaptados com o objetivo de propiciar o controle

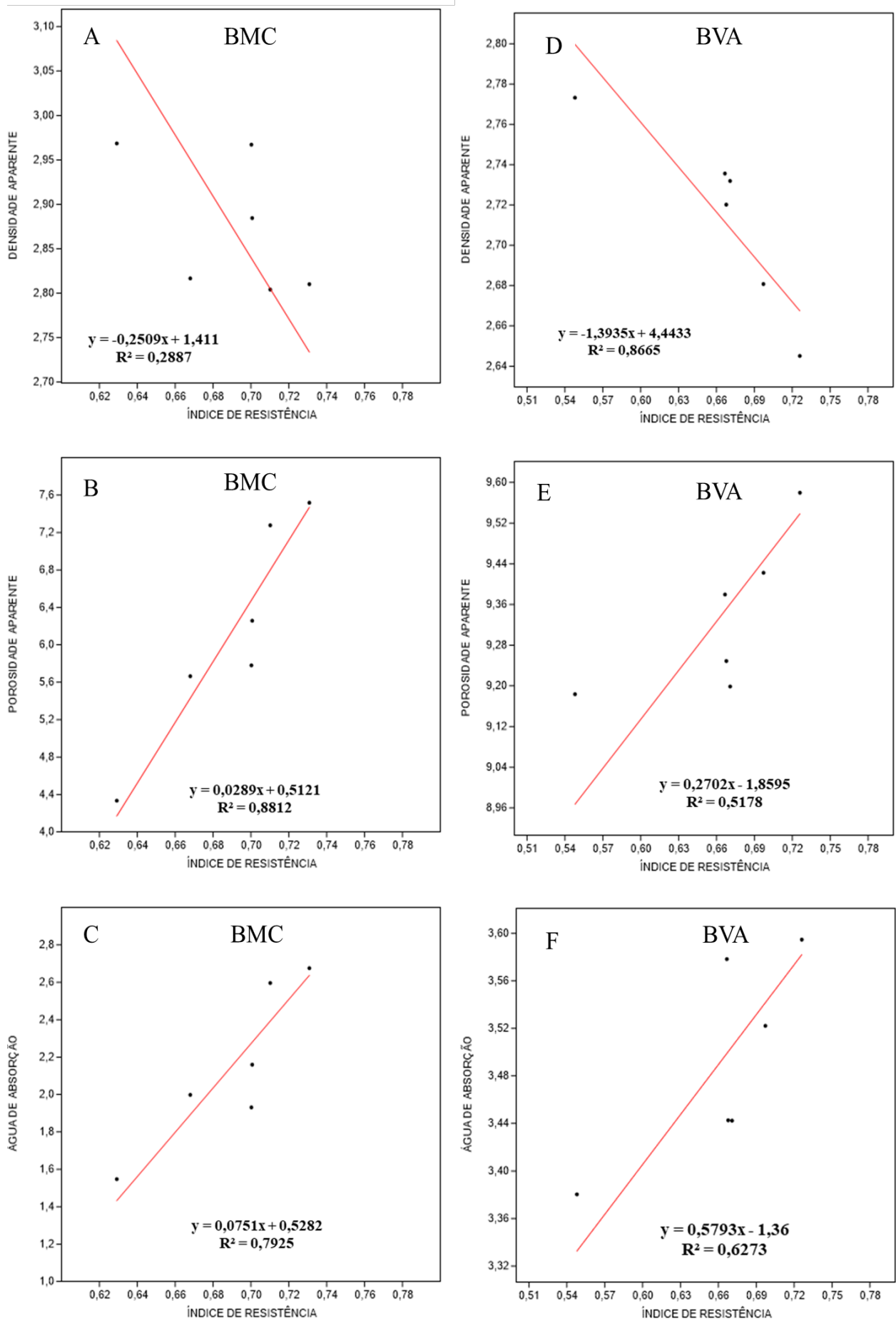


Figura 16 - Correlações entre os ensaios de ciclagem água-estufa e o índice de resistência ao esmagamento. (A) Densidade Aparente-BMC. (B) Porosidade Aparente-BMC. (C) Água de Absorção-BMC. (D) Densidade Aparente-BVA. (E) Porosidade Aparente-BVA. (F) Água de Absorção-BVA.

LITOTIPO	ENSAIO	R ²	EQUAÇÃO
BMC	Densidade aparente	0,2889	$y = -0,2509x + 1,411$
	Porosidade aparente	0,8812	$y = 0,0289x + 0,5121$
	Água de absorção	0,7925	$y = 0,0751x + 0,5282$
BVA	Densidade aparente	0,8665	$y = -1,3935x + 4,4433$
	Porosidade aparente	0,5178	$y = 0,2702x - 1,8595$
	Água de absorção	0,6273	$y = 0,5793x - 1,3600$

Notas: **X**: índice para resistência ao esmagamento.

Figura 17 - Correlação (R²) entre os ensaios de ciclagem água-estufa e o índice relativo a resistência ao esmagamento.

dos ensaios com uma massa menor submetida aos ensaios. As principais conclusões do estudo são:

1. Os basaltos BMC e BVA de uma forma geral apresentaram baixo grau de alteração quando comparados a valores encontrados em outros basaltos com mineralogia semelhantes.

2. O ensaio de resistência ao esmagamento cumpre o objetivo de avaliar e quantificar o processo de alteração, perante o aumento dos valores do índice mecânico conforme o andamento das ciclagens, sendo possível observar a perda da resistência do material.

3. Quando comparados os resultados do ensaio de resistência ao esmagamento com

valores do estudo de Engidasew & Barbieri (2014), realizado da maneira tradicional, a modificação demonstrou ser bastante promissora.

4. Os resultados encontrados para o índice de resistência ao esmagamento geraram boas correlações com índices físicos.

Por fim, os valores obtidos relativos aos índices físicos e ao índice de resistência ao esmagamento para a faixa granulométrica entre 9,5 e 6,35mm dos dois litotipos basálticos, após os diferentes números de ciclos no ensaio água-estufa, enquadram-se em níveis em que podem ser utilizados como agregados para concretos na construção civil.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (EESC-USP) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, P. & SARAIVA, A. Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 69, n. 2, p. 207–214, 2010.
- ASIO, V.B. & JAHN, R. Weathering of basaltic rock and clay mineral formation in Leyte, Philippines. *Philippine Agricultural Scientist*, v. 90, n. 3, p. 222–230, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12696: **Agregados - Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9938: **Agregados — Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NM 53: **Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.
- BELL, R.G. The Durability of Sandstone as Building Stone, Especially in Urban Environments. *Environmental & Engineering Geoscience*, v. XXIX, n. 1, p. 49–60, 1992.
- BRICKER, O.P.; PACES, T.; JOHNSON, C.; SVERDUP, H. Weathering and erosion aspects of small catchment research. *Biogeochemistry of small catchments; a tool for environmental research*, v. 51, n. January, p. 85–105, 1994.
- BS - STANDARD, **British. Methods for determination of aggregate crushing value (ACV)**, BS 812, v. 110, 1990.
- CORRÊA DOS SANTOS, A.C.; ENGENHARIA, T.E.C.; DOS SANTOS, K.C.N.; VILHENA, R.M.; ELÉTRICAS, F.C.; DE ASSIS, A.P. Determinação Da Resistência Ao Fraturamento De Partículas De Enrocamento Através De Ensaio De Tração Indireta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, VII. 2016. São Paulo. *Anais...São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*
- COSTA, J. **Estratigrafia e geoquímica da sequência de lavas da província magmática do Paraná na região da usina de Itaipu (PR)**. Curitiba, 2015. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Paraná.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM - DNER 197/97: **Agregados — Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos**. Rio de Janeiro, 1997.
- DURSUN, F. & TOPAL, T. Durability assessment of the basalts used in the Diyarbakır City Walls, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 15, p. 1–24, 2019.
- DURSUN, F. & TOPAL, T. The impact of cyclic loads on physicochemical properties of the massive and vesicular basalts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 949, n. 1, 2020.
- ENGIDASEW, T. & BARBIERI, G. Geo-engineering evaluation of Termaber basalt rock mass for crushed stone aggregate and building stone from Central Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences*, v. 99, n. PA2, p. 581–594, 2014.
- FARJALLAT, J. **Estudos Experimentais sobre a Degradação de rochas basálticas: Basaltos da Barragem de Capivara**, Rio Paranapanema, p. 125, 1971.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. *Ciência e agrotecnologia*, v. 35, p. 1039-1042, 2011.
- GÖKCEOGLU, C.; ULUSAY, R.; SÖNMEZ, H. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks

- from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. **Engineering Geology**, v. 57, n. 3–4, p. 215–237, 2000.
- GOMES, R. **Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da bacia do Paraná**. São Paulo. 2001. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 2001.
- GOYENA, R. & FALLIS, A. **Fracture and Failure of Natural Building Stones**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. v. 53E-book.
- GRATCHEV, I.; PATHIRANAGEI, S.; KIM, Dong Hyun. Strength properties of fresh and weathered rocks subjected to wetting–drying cycles. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, v. 5, n. 3, p. 211–221, 2019.
- GUPTA, A. S. & RAO, S. K. Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 60, n. 3, p. 201–221, 2001.
- GUROCAK, Z. & KILIC, 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.
- HALE, P. A. & SHAKOOR, A. A laboratory investigation of the effects of cyclic heating and cooling, wetting and drying, and freezing and thawing on the compressive strength of selected sandstones. **Environmental and Engineering Geoscience**, v. 9, n. 2, p. 117–130, 2003.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics. **Rock characterization testing & [and] monitoring: ISRM suggested methods**. Pergamon Press, 1981.
- KAMANI, M. & AJALLOEIAN, R. Evaluation of the mechanical degradation of carbonate aggregate by rock strength tests. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 121–134, 2019.
- KHALEGHI ESFAHANI, M.; 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. 6, p. 3959–3968, 2019.
- KOOHMISHI, M. & PALASSI, M. Degradation of railway ballast under compressive loads considering particles rearrangement. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 2, p. 157–169, 2020.
- KORKANÇ, M. & TUĞRUL, A. Evaluation of selected basalts from Niđe, Turkey, as source of concrete aggregate. **Engineering Geology**, v. 75, n. 3–4, p. 291–307, 2004.
- 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, 2014.
- LIMA, J.J. **Estudo da Dilatação Térmica de Rochas Usadas em Revestimento de Edificações**. São Paulo. 2002. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo.
- LOUBSER, M. J. Weathering of basalt and sandstone by wetting and drying: A process isolation study. **Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography**, v. 95, n. 4, p. 295–304, 2013.
- MOON, V. & JAYAWARDANE, J. Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. **Engineering Geology**, v. 74, n. 1–2, p. 57–72, 2004.
- MORTON, K.; THOMAS, S.; CORBETT, P.; DAVIES, D. Detailed analysis of probe permeameter and interval pressure transient test permeability measurements in a heterogeneous reservoir. **Petroleum Geoscience**, v. 8, n. 3, p. 209–216, 2002.
- PEREIRA, M.L.; SILVA, P., FERNANDES, I.; CHASTRE, C. Characterization and correlation of engineering properties of basalts. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 80, p. 2889–2910, 2021.
- PIASTA, W.; GÓRA, J.; TURKIEWICZ, T. Properties and durability of coarse igneous rock aggregates and concretes. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 119–129, 2016.
- PUDLO, D.; ROWE, M.C.; BLACK, P.M.; WILSON, D.J.; LARKIN, T.J. The impact of diagenetic fluid-rock reactions on Rotliegend sandstone composition and petrophysical properties (Altmark area, central Germany). **Environmental Earth Sciences**, v. 67, n. 2, p. 369–384, 2012.
- SANGSEFIDI, E.; ROWE, M.C.; BLACK, P.M.; WILSON, D.J.; LARKIN, T.J. Weathering behaviour of road aggregate of andesitic composition in a New Zealand quarry. **Road Materials and Pavement Design**, v.22, n. p. 1–19, 2020.
- SUÁREZ, M.; García-Romero, E.; Baz, A.; Pérez, R. Smectites: The key to the cost overruns in the construction of the third set of locks of the Panama Canal. **Engineering Geology**, v. 284, p. 106036, 2021.
- VERGARA, M. R. & TRIANTAFYLIDIS, T. Swelling behavior of volcanic rocks under cyclic wetting and drying. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 80, p. 231–240, 2015.
- XIANG, Y., WANG, L.; WU, S.; YUAN, H.; WANG, Z. Seepage analysis of the fractured rock mass in the foundation of the main dam of the Xiaolangdi water control project. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 5, p. 4453–4468, 2015.
- YUE, Q.; SHAN, X.; ZHANG, X.; XU, C.; YI, J.; FU, M. Quantitative Characterization, Classification, and Influencing Factors of the Full Range of Pores in Weathering Crust Volcanic Reservoirs: Case Study in Bohai Bay Basin, China. **Natural Resources Research**, v. 30, n. 2, p. 1347–1365, .2020.
- ZHANG, D.; CHEN, A.; WANG, X.; LIU, G. Quantitative determination of the effect of temperature on mudstone decay during wet-dry cycles: A case study of “purple mudstone” from south-western China. **Geomorphology**, v. 246, p. 1–6, 2015.
- ZHOU, Z.; CAI, X.; CHEN, L.; CAO, W.; ZHAO, Y.; XIONG, C. Influence of cyclic wetting and drying on physical and dynamic compressive properties of sandstone. **Engineering Geology**, v. 220, p. 1–12, 2017.

Submetido em 21 de junho de 2021

Aceito para publicação em 15 de janeiro de 2022