UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

WILSON COELHO NETO

ESTUDO COMPARATIVO DE BASALTOS: ENSAIOS
LABORATORIAIS

Versão Corrigida

Original encontra-se disponível na unidade que aloja o programa

São Carlos

2021

WILSON COELHO NETO

ESTUDO COMPARATIVO DE BASALTOS: ENSAIOS
LABORATORIAIS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentim Zuquette

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

C672 Coelho Neto, Wilson
e ESTUDO COMPARATIVO DE BASALTOS: ENSAIOS
 LABORATORIAIS / Wilson Coelho Neto; orientador Lázaro
 Valentin Zuquette . São Carlos, 2021.

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

 1. Alterabilidade. 2. Basaltos. 3. Foz do Iguaçu.
I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **WILSON COELHO NETO**.

Título da dissertação: "Estudo comparativo de basaltos: ensaios laboratoriais".

Data da defesa: 13/08/2021.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Titular **Lázaro Valentin Zuquette**
(Orientador)

Aprovado

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Prof. Titular **José Augusto de Lollo**

Aprovado

(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Ilha Solteira)

Prof. Dr. **Edilson Pizzato**

Aprovado

(Instituto de Geociências/IG-USP)

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:

Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador Professor Dr. Lázaro Valentin Zuquette, pela amizade, pelos conselhos e paciência que contribuíram muito para meu crescimento científico e profissional.

Aos demais professores do departamento de Geotecnia da EESC, onde tive a oportunidade de conhecer e conviver com grandes profissionais.

Aos profissionais e a instituição da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, os quais permitiram que o experimento fosse realizado em suas dependências em especial ao Coordenador do Curso de Engenharia Civil, professor e amigo, Dr. Gustavo Savaris.

Aos profissionais e a instituição Parque Tecnológico de Itaipu – PTI, em especial ao CEASB pelo suporte durante o desenvolvimento da pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo financiamento da pesquisa por meio da bolsa.

Aos meus pais Jorge Luiz da Cunha Coelho e Gigianine Rejenete da Silveira Coelho e avós João Manoel da Silveira e Cely Modernel da Silveira, que nunca deixaram de apoiar durante essa trajetória da pesquisa de mestrado.

Aos meus amigos, Felipe Sant’anna, Gustavo Catarino, Matheus dos Santos, Lucas Luna, Gabriel Costa, Gabriela Otto, Jussara Henn, Ana Paula Leonel e Carolina Lima.

RESUMO

NETO, W. C. **Estudo comparativo de basaltos: Ensaios Laboratoriais**. 2021. 195f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Dentre as inúmeras aplicações que os materiais rochosos possuem na engenharia, está seu uso como agregado graúdo e miúdo nos mais diferentes tipos de obras de infraestrutura, sendo o setor de construção civil no Brasil é o maior responsável por absorver a demanda de consumo de agregados. Nesse contexto, o conhecimento das características de alteração dos materiais rochosos são essenciais para prevenção e manutenção para quaisquer que sejam suas aplicações de engenharia. Diante disso, o presente estudo está suportado por uma revisão bibliográfica de diversos tópicos pertinentes ao seu objetivo, que trata-se de analisar a alteração de dois tipos de agregados de basalto (basalto maciço compacto e basalto vesicular), na faixa granulométrica de 9,5 a 6,3 mm, por meio de análises laboratoriais com ensaios que visaram a caracterização geológica e geotécnica dos litotipos basálticos. A alteração foi avaliada com o auxílio de ensaios de ciclagem acelerada com controles físico e ensaio de resistência ao esmagamento. Os resultados dos índices físicos para ciclagem água estufa mais influente apresentaram valores finais 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%) e para ciclagem natural densidade aparente (BMC: 2,89 g/cm³ - BVA: 2,80 g/cm³), porosidade aparente (BMC: 6,54 - BVA: 10,57%) e água absorvida (BMC: 2,20- BVA: 3,69%), o que indicam em ambas ciclagens a baixa predisposição a alteração. Quanto aos índices físico-químico, para ambas ciclagens, os resultados mais pronunciados são das amostras com argilomineral, ainda que não indiquem alteração nas condições iniciais dos agregados. O índice de resistência ao esmagamento para todas variações de ciclagem e para os dois litotipos é da ordem de 0,73. Ainda o ensaio de resistência ao esmagamento proposto, cumpriu sua função de quantificar a alteração das amostras e obteve valores semelhantes quando comparado com um ensaio executado de acordo com a normativa. Por fim, os dois litotipo se caracterizam aptos para suas funções de engenharia, pois em todos os ensaios realizados nesse presente trabalho os comportamentos indicam a resistência a alteração.

Palavras-chave: Alterabilidade. Basaltos. Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

NETO, W. C. **Comparative studie of basalts: Laboratory Tests**. 2021. 195 f.
Masters Dissertation - – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Among the countless applications that rock materials have in engineering, there is their use as a coarse and fine aggregate in the most different types of infrastructure works, with the civil construction sector in Brazil being the main responsible for absorbing the aggregate consumption demand. In this context, knowledge of the changing characteristics of rock materials is essential for prevention and maintenance for whatever their engineering applications. Therefore, the present study is supported by a literature review of several topics relevant to its objective, which is to analyze the change of two types of basalt aggregates (compact massive basalt and vesicular basalt), in the granulometric range of 9, 5 to 6.3 mm, through laboratory analysis with tests aimed at the geological and geotechnical characterization of the basaltic lithotypes. The change was evaluated with the aid of accelerated cycling tests with physical controls and crush resistance test. The results of the physical indices for the most influential dry-wet cycling showed final values for apparent specific gravity (BMC: 2.85 g/cm³ - BVA: 2.61 g/cm³), apparent porosity (BMC: 7.51 - BVA: 9, 59%) and absorbed water (BMC: 2.67 - BVA: 3.59%) and for natural cycling, apparent specific gravity (BMC: 2.89 g/cm³ - BVA: 2.80 g/cm³), apparent porosity (BMC: 6 .54 - BVA: 10.57%) and absorbed water (BMC: 2.20- BVA: 3.69%), which indicate a low predisposition to alteration in both cycles. As for the physicochemical indices, for both cycles, the most pronounced results are from samples with clay mineral, although they do not indicate changes in the initial conditions of the aggregates. The crush strength index for all cycling variations and for the two lithotypes is in the order of 0.73. However, the proposed crushing resistance test fulfilled its function of quantifying the alteration of the samples and obtained similar values when compared to a test carried out in accordance with the regulations. Therefore, both lithotypes are characterized as suitable for their engineering functions, as in all tests carried out in this work, the behaviors indicate the resistance to alteration

Keywords: Alterability. Basalt. Foz do Iguaçu.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Relação entre a precipitação e temperatura anual.....	30
Figura 2.2 - Diagrama de equilíbrio Ferro-Água de Pourbaix.	32
Figura 2.3 - Imagem petrográfica, ao lado o seu resultado do ensaio DRX.....	41
Figura 2.4 - Curva granulométrica, conforme Erguler; Shakoor, (2009).	56
Figura 2.5 - Exemplo para cálculo da taxa de desintegração conforme Erguler; Shakoor, (2009).	57
Figura 2.6 - Procedimento para ciclagem de agregados em água-estufa, conforme a NBR 12696.	59
Figura 2.7 - Grupo Serra Geral disposto no Estado do Paraná.....	67
Figura 2.8 - Formação Cascavel em destaque no Grupo Serra Geral Fonte: Adaptado de MINEROPAR(2013).	70
Figura 2.9 - Disposição dos membros da formação Cascavel. (A) Membro Foz do Iguaçu. (B) Membro Santa Quitéria e (C) Membro Toledo	71
Figura 2.10 - Exemplo de um perfil de sondagem da região da UHE Itaipu.	74
Figura 3.1 - Organograma da rotina do estudo de alteração.....	80
Figura 3.2 - Litotipos basálticos de origem do município de Foz do Iguaçu. (A) Basalto maciço compacto. (B) Basalto vesicular.	82
Figura 3.3 – (A) Recipiente para monitoramento físico-químico da água de abrasão. (B) Recipientes para monitoramento físico-mecânico dos agregados.	84
Figura 3.4 - Ciclagem natural controlada. (A) Vista geral da localização. (B) Vista em perspectiva da bancada. (C) Agregados em saturação para ensaios físico-químico da água de abrasão. (D) Agregados em saturação para ensaios físico-mecânicos.	86
Figura 3.5 - Vista geral dos ensaios de ciclagem água-estufa durante período de saturação.	88
Figura 3.6 - Aparato para a realização da documentação fotográfica tipo RFI.....	89
Figura 3.7 - Esquema para realização das leituras dos parâmetros físico-químicos da água de abrasão. (A) Recipiente com o dreno. (B) Exemplo de uma leitura de pH.....	90
Figura 3.8 - Disposição do conjunto na prensa utilizada para execução do ensaio e detalhe do aparato confeccionado para ensaio de esmagamento em escala reduzida. ...	92
Figura 3.9 - Peças constituintes do aparato de ensaio de esmagamento em pequena escala.	93

Figura 3.10- Ilustração do procedimento de acomodação da amostra dentro do cilindro de ensaio.	94
Figura 3.11- 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.....	95
Figura 4.1 - Basalto Cinza Escuro.	100
Figura 4.2- Basalto Vesicular.	102
Figura 4.3- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE II - CICLO 0	104
Figura 4.4- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE II - CICLO 60	105
Figura 4.5- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE II - CICLO 120	106
Figura 4.6- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE III - CICLO 0.....	108
Figura 4.7- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE III - CICLO 60.....	109
Figura 4.8- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE III - CICLO 120.....	110
Figura 4.9- Registro com lente macro, amostra BVA - CAE II - CICLO 0.....	112
Figura 4.10- Registro com lente macro, amostra BVA - CAE II - CICLO 60.....	113
Figura 4.11- Registro com lente macro, amostra BVA - CAE II - CICLO 120.....	114
Figura 4.12- Registro com lente macro, amostra BMA - CAE III - CICLO 0.....	116
Figura 4.13- Registro com lente macro, amostra BMA - CAE III - CICLO 60.....	117
Figura 4.14- Registro com lente macro, amostra BMA - CAE III - CICLO 120.....	118
Figura 4.15- Registro com lente macro, amostra BMC – CNC - BATERIA 0.....	120
Figura 4.16- Registro com lente macro, amostra BMC – CNC - BATERIA 4.....	121
Figura 4.17 - Registro com lente macro, amostra BMC – CNC - BATERIA 12.....	122
Figura 4.18- Registro com lente macro, amostra BMA – CNC - BATERIA 0	124
Figura 4.19- Registro com lente macro, amostra BMA – CNC - BATERIA 4	125
Figura 4.20- Registro com lente macro, amostra BMA – CNC - BATERIA 12	126
Figura 4.21- Os valores médios de densidade aparente pelo número de ciclos - CAE	128
Figura 4.22- Os valores médios de porosidade aparente pelo número de ciclos - CAE	130
Figura 4.23- Os valores médios de água de absorção pelo número de ciclos - CAE..	132
Figura 4.24- Os valores médios de densidade aparente pelo número de ciclos - CNC	134
Figura 4.25- Os valores médios de porosidade aparente pelo número de ciclos - CNC	136
Figura 4.26- Os valores médios de água de absorção pelo número de ciclos - CNC..	138
Figura 4.27- Variação do pH de abrasão durante os ciclos – CAE	144

Figura 4.28- Variação do Eh de abrasão durante os ciclos – CAE.....	145
Figura 4.29- Variação da Condutividade Elétrica durante os ciclos – CAE	146
Figura 4.30- Diagrama de Pourbaix para CAE	147
Figura 4.31- Variação do pH de abrasão durante os ciclos – CNC.....	150
Figura 4.32- Variação do Eh de abrasão durante os ciclos – CNC	151
Figura 4.33- Variação da condutividade elétrica durante os ciclos – CNC.....	152
Figura 4.34- Diagrama de Pourbaix para CNC	153
Figura 4.35- Análise granulométrica para todas as variações de carga para perda ao esmagamento.	156
Figura 4.36- Análise granulométrica para perda ao esmagamento com carga de 100kN.	157
Figura 4.37- Regressão linear entre índice mecânico e número de baterias - CAE II - BMC	163
Figura 4.38- Regressão linear entre índice mecânico e número de baterias - CNC....	169
Figura 4.39- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CAE II- BMC.	191
Figura 4.40- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CAE III- BMC.	192
Figura 4.41- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CAE II- BVA.....	193
Figura 4.42- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CAE III- BVA.....	194
Figura 4.43- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CNC - BMC.	195
Figura 4.44- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CNC - BVA	196

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Principais fatores do Intemperismo Físico.....	19
Quadro 2.2 - Valores de dilatação térmica de diferentes minerais.....	20
Quadro 2.3 - Principais processos do Intemperismo Químico.....	22
Quadro 2.4 - Classificação do grau de intemperismo conforme Potencial Hidrogeniônico (pH) e Condutividade Elétrica (CE).	24
Quadro 2.5 – Comparação das séries propostas por Goldich (1938) e Bowen (1956).	26
Quadro 2.6 - Características dos principais grupos de minerais argilosos.....	27
Quadro 2.7 - Comportamento observados dos argilominerais em diferentes estudos. .	28
Quadro 2.8 - Relação entre tipos de clima e os tipos de intemperismo.	29
Quadro 2.9 – Classes do grau de alteração dos materiais rochosos.	33
Quadro 2.10 - Classes de Coerência.	34
Quadro 2.11 - Índices geoquímicos para quantificar alteração de rochas.....	35
Quadro 2.12 - Correlação entre os parâmetros da rocha com a corrente elétrica	36
Quadro 2.13 - Ensaios para avaliação de alteração.....	38
Quadro 2.14 - Ensaios para caracterização de agregados conforme ABNT.	39
Quadro 2.15 - Valores mínimos para aptidão de agregados graúdo.	40
Quadro 2.16 - Composição química do grau de alteração das amostras de basalto.....	42
Quadro 2.17 - Características petrográficas dos basaltos utilizados como rip-rap.	43
Quadro 2.18 - Formulações do ensaio para os índices físicos	44
Quadro 2.19 - Valores do grau de alteração relacionado com massa específica seca...	45
Quadro 2.20 - Valores do grau de alteração relacionado com a absorção de água.....	46
Quadro 2.21 - Valores do grau de alteração relacionado com a porosidade.....	47
Quadro 2.22 - Relação de resistência da rocha encontrada em campo.	48
Quadro 2.23 - Ensaios de caracterização de resistência propostos pelo DNIT e ABNT.	49
Quadro 2.24 - Valores para o grau de alteração do basalto de acordo com resistência a carga pontual.....	49
Quadro 2.25 - Valores para o grau de alteração do basalto de acordo com a resistência a carga pontual.....	50
Quadro 2.26 - Procedimentos para realização do ensaio de resistência ao esmagamento.	51

Quadro 2.27 - Valores máximos de Perda ao esmagamento para o uso em concreto...	52
Quadro 2.28 - Peneiras para separação de finos, conforme Turk; Dearman, (1988).	53
Quadro 2.29 - Ensaio de ciclagem natural em campo.	54
Quadro 2.30 - Valores de porcentagem de perda de massa com tempo de exposição. Elaborado pelo autor.....	55
Quadro 2.31 - Resistência ao esmagamento (%) conforme o tempo de exposição.	55
Quadro 2.32 - Valores da taxa de desintegração conforme tempo de exposição.....	56
Quadro 2.33 - Procedimentos de ciclagem água-estufa encontrados na literatura técnica.....	60
Quadro 2.34 - Valores de porcentagem de porosidade relacionados com ciclos de água- estufa.....	61
Quadro 2.35 - Valores de resistência a compressão uniaxial e resistência a carga pontual, relacionados com ciclos de água-estufa.....	62
Quadro 2.36 - Resultados de perda de massa entre diferentes tempos de saturação.....	62
Quadro 2.37 - Métodos normatizados utilizados na ciclagem com etilenoglicol.	64
Quadro 2.38 - Procedimentos de ciclagem com etilenoglicol encontrados na literatura técnica.....	65
Quadro 2.39 - Formações pertencente ao Grupo Serra Geral.	68
Quadro 2.40 - Pedreiras comerciais dos Municípios da Região Oeste do Paraná	78
Quadro 3.1 - Variações do ensaio de alteração ciclagem controlada de campo.	85
Quadro 3.2 - Variações do ensaio de alteração ciclagem água-estufa.	87
Quadro 3.3 - Procedimentos para realização do ensaio de resistência ao esmagamento. Conforme NBR 9938/2013, DNER 197/97, IS 2386-4/1963 e Gomes (2001).....	97
Quadro 4.1 - Valores do índice de correlação e respectivas equações para CAE - BMC	141
Quadro 4.2 - Valores do índice de correlação e respectivas equações para CNC.....	142
Quadro 4.3 - Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 200kN.	158
Quadro 4.4 - Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 100kN.	158
Quadro 4.5 - Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 75kN.	158
Quadro 4.6 - Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 50kN.	159
Quadro 4.7 - Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 25kN.	159
Quadro 4.8 - Índice mecânico para resistência ao esmagamento - BMC.	161
Quadro 4.9 - Índice mecânico para resistência ao esmagamento - CAE II- BVA.....	162

Quadro 4.10- Comparativo entre os índices mecânicos de CAE com os valores de Engidasew; Barbieri, (2014).....	165
Quadro 4.11- Correlação entre os ensaios de alterabilidade e ensaio de resistência ao esmagamento – BMC - CAE.....	166
Quadro 4.12- Correlação entre os ensaios de alterabilidade e ensaio de resistência ao esmagamento – BVA - CAE.	167
Quadro 4.13- Índice mecânico para resistência ao esmagamento – CNC	168
Quadro 4.14- Correlação entre os ensaios de alterabilidade e ensaio de resistência ao esmagamento – BMC - CNC.....	170
Quadro 4.15- Correlação entre os ensaios de alterabilidade e ensaio de resistência ao esmagamento – BMC - CNC.....	171
Quadro 4.16- Comparativo entre os valores R^2 de CNC com os valores de Gomes (2001).	171
Quadro 4.17- Comparativo entre os índices mecânicos de CNC com os valores de Gomes (2001).....	172

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivos específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	INTEMPERISMO	18
2.1.1	Intemperismo Físico	19
2.1.2	Intemperismo Químico	21
2.1.3	Fatores intrínsecos	25
2.1.4	Fatores extrínsecos	29
2.1.5	Estado de Equilíbrio em meio Aquoso	30
2.2	ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE	32
2.2.1	Alteração.....	32
2.2.2	Alterabilidade	37
2.3	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ROCHOSO	37
2.3.1	Propriedades Mineralógicas e Químicas	40
2.3.2	Propriedades Físicas	43
2.3.3	Propriedades Mecânicas	48
2.4	PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA ALTERABILIDADE	53
2.4.1	Ciclagem Natural	54
2.4.2	Ciclagem água-estufa	57
2.4.3	Ciclagem com Etilenoglicol	63
2.5	BASALTOS DO GRUPO SERRA GERAL	66
2.5.1	FORMAÇÃO CASCAVEL	69
2.6	AREIA ARTIFICIAL	75
2.6.1	ASPECTOS GERAIS	75
3	MATERIAIS E MÉTODOS	79
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	79
3.2	MATERIAL DE ESTUDO.....	80
3.2.1	Basaltos.....	80
3.3	ANÁLISE QUALITATIVA	83

3.4	ENSAIOS DE ALTERABILIDADE.....	83
3.4.1	Ciclagem Natural controlada (CNC)	84
3.4.2	Ciclagem Água-Estufa (CAE)	86
3.4.3	Registro fotográfico	88
3.4.4	Parâmetros físico-químicos de monitoramento da água de ciclagem.....	89
3.5	ÍNDICES FÍSICOS	90
3.6	RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO	91
3.6.1	Critérios para definição da resistência ao esmagamento (R_E)	95
4	RESULTADOS	99
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	99
4.1.1	BMC – Blocos de Basalto Maciço Compacto	99
4.1.2	BVA – Blocos de Basalto vesicular.	101
4.2	ANÁLISE QUALITATIVA	103
4.2.1	Ciclagem água estufa.....	103
4.2.2	Ciclagem Natural Controlada	118
4.3	ÍNDICES FÍSICOS	127
4.3.1	Ciclagem água estufa.....	127
4.3.2	Ciclagem Natural Controlada	133
4.3.3	Discussões para os índices físicos	139
4.4	MONITORAMENTO DA ÁGUA DE ABRASÃO	143
4.4.1	Ciclagem água-estufa	143
4.4.2	Ciclagem Natural Controlada	149
4.5	RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO	155
4.5.1	Procedimento preliminar para definição da peneira de retenção e carga da carregamento	155
4.5.2	Resultados para resistência ao esmagamento	160
5	CONCLUSÕES.....	173
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176
	APÊNDICE A – Análise granulométrica para CAE	190
	APÊNDICE B – Análise granulométrica para CNC	195

1 INTRODUÇÃO

A interferência do homem sobre o ambiente em que habita ocorre desde os primórdios da humanidade. Com o avanço do conhecimento e o domínio de tecnologias os seres humanos intensificaram os processos de exploração do meio ambiente de modo a usufruir dos recursos naturais para diversos fins, entre esses recursos estão as rochas.

Quando se trata do âmbito da construção civil, as rochas são utilizadas de várias maneiras, como agregado para concreto, obras de pavimentação, revestimentos, ferrovias e aplicações em barragens

Dentre as aplicações em barragens, as rochas podem ser empregadas em diversas partes do empreendimento, como por exemplo enrocamento, rip rap, transições, filtros, desde que seja utilizada nas condições granulométricas adequadas para cada função.

Nesse contexto, ainda que seja em uma fração menor, os agregados estão sujeitos as alterações consequentes do ambiente em que está inserido. Sendo assim, um dos desafios é o processo de identificação do grau de alteração que está ocorrendo no material, onde muitas vezes, não podem ser visualmente detectados ou averiguados através de uma simples rotina de ensaios.

Diante disso, o presente estudo, propõem avaliar o comportamento de alteração em dois litotipos de basalto sendo um basalto maciço cinza e o outro basalto vesicular na faixa granulométrica de #9,5mm a #6,35mm, por meio de diferentes processos de ciclagem acelerada, acompanhamento de potencial Hidrogeniônico (pH), o potencial redox (Eh) e a condutividade elétrica (CE), aferições de índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente, Absorção de água) e mecânicos (resistência ao esmagamento) e verificar suas aptidões para fins de engenharia.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo geral do presente estudo é analisar a alteração de agregados de basalto, na faixa granulométrica #9,5mm a #6,35mm, em diferentes condições físicas com o auxílio de ensaios de resistência mecânica.

1.1.1 Objetivos específicos

- Estabelecer diferentes ambientes de alteração de rocha (laboratorial e natural);
- Desenvolver estudos de laboratório para identificar processos, mecanismos e intensidade de alteração do material rochoso.
- Desenvolver um ensaio de resistência ao esmagamento para faixa granulométrica aplicada nesse estudo e que seja possível avaliar a alteração do material.

1.2 JUSTIFICATIVA

O presente projeto de pesquisa faz-se necessário para compreender os comportamentos físico e mecânico dos agregados basálticos que podem utilizados como agregados na região de Foz do Iguaçu.

A validação desse material possibilita uma alternativa econômica, fornecendo destinação comercial para uma faixa granulométrica muitas vezes tratada como descarte, visto que a região é um importante produtor de agregado graúdo do estado do Paraná.

Por fim, contribuir com o meio científico com uma alternativa de avaliar o comportamento da resistência do material na faixa granulométrica de entre 6,3 mm e 9,5 mm, por meio de um ensaio de esmagamento, onde o consumo de material para amostras é muito inferior ao necessário nas normativas e que retorne um resultados quantitativo que correspondente aos métodos tradicionais. Desta maneira tornando-se uma alternativa para avaliar mecanicamente, com eficiência, pequenos volumes de amostra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para que os objetivos desta pesquisa sejam alcançados, necessita-se da compreensão do comportamento da alterabilidade das rochas. Nesse sentido, o presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dividida em tópicos, os quais abordam os principais itens sobre o assunto, sendo:

- Intemperismo: físico, químico e seus fatores intrínsecos e extrínsecos;
- Alteração e alterabilidade: Conceitos;
- Caracterização do material rochoso: Propriedades mineralógicas, químicas, físicas e mecânicas;
- Procedimentos para avaliação da alterabilidade: Ciclagens em ambiente laboratorial e natural.

Por fim, uma breve revisão sobre os basaltos do grupo serra geral.

2.1 INTEMPERISMO

Intemperismo é um processo natural e irreversível de desintegração e decomposição da rocha quando exposta na superfície da terra (BRICKER et al., 1994). Envolvendo mudanças físicas e químicas nas características da rocha, sobre uma complexa influência das condições ambientais que concebem tais processos, relacionados com as condições climáticas e topográficas (ARIKAN et al., 2007; FOOKES et al., 1988; SANGSEFIDI et al., 2020).

Marque et al. (2004) sugerem que intemperismo é toda mudança física e química que ocorre em uma rocha, por consequência da sua interação com o ecossistema ao qual pertence, modificando suas características de deformabilidade, resistência e permeabilidade. Isto ocorre pois a rocha torna-se mais porosa, e as ligações entre suas partículas são enfraquecidas ou até mesmo perdidas dependendo da natureza da rocha (ARIKAN, 2007; CERYAN, 2008; MOMENI et al., 2017).

Em condições específicas do clima em conjunto com ações antrópicas, maciços rochosos podem rapidamente responder às ações do intemperismo e se deteriorarem

antes mesmo do tempo útil de vida (entre 50 e 100 anos) de uma estrutura de engenharia (TATING et al., 2015).

2.1.1 Intemperismo Físico

O Intemperismo físico é o processo de desagregação mecânica da rocha, não ocorrendo mudanças consideráveis na composição química e mineralógica, sem interferência significativa na sua estrutura cristalina (FOOKES et al., 1988; PRICE, 1995). Os principais fatores que induzem o intemperismo físico são descritos no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Principais fatores do Intemperismo Físico.

<i>Fatores</i>	<i>Intemperismo Físico</i>
Abrasão	Desgaste e atrito entre as partículas da própria rocha ou desgaste decorrente da movimentação da rocha.
Variação de temperatura	Ocorrência de expansão e contração, devido à composição das rochas por diferentes minerais que apresentam coeficientes de dilatação e contração distintas.
Congelamento	Congelamento da água acumulada nas fissuras da rocha, esse fenômeno causa o aumento de volume da água, fragmentando a rocha.
Precipitação de sais	Acúmulo de sais em fissuras da rocha, ocasionando o fraturamento quando os sais começam a se cristalizar e expandem seu volume desagregando a rocha.
Ciclos de umidade e secagem	Essa alternância leva a formação de fissuras e influencia na desintegração da rocha. Processo característico de regiões de clima tropical úmido, cuja umidade está associada às altas temperaturas.
Ação antrópica	Ser humano como agente de alteração quando utiliza-se de técnicas de corte ou desmonte de maciços para obras de engenharia.

Fonte: Fookes et al. (1988).

Com a ocorrência do intemperismo físico, a fragmentação da rocha a coloca em uma nova classe de exposição superficial, aumentando o contato com os agentes (água, vento, fauna, flora entre outros) atuantes no ambiente e facilitando a ocorrência do intemperismo químico (SALLES, 2013).

Diante disso, um importante fator para que ocorra a fragmentação da rocha são as formações de fissuras, as quais se dispõem por meio dos mecanismos de fadiga. Esse processo desencadeia tensões na estrutura interna dos minerais, por consequência da expansão de suas dimensões quando aquecidos e contração quando resfriados, induzindo o enfraquecimento da estrutura do mineral (PLEVOVÁ et al., 2010).

Além disso, fissuras presentes nas rochas facilitam o acesso da água ao seu interior, aumentando sua superfície específica e agregam funções importantes para a ocorrência do intemperismo físico, ao propor um meio de reação para os elementos e contribuindo com a desintegração física da rocha (BEGONHA, 1989; BLYTH; DE FREITAS, 2017; WEINERT, 1968; SALLES 2014).

Lima (2002) sugere que rochas formadas com variados minerais tendem a sofrer mais influência da temperatura quando comparadas com rochas formadas por um único mineral. O Quadro 2.2 ilustra os valores de dilatação térmica para diferentes minerais.

Quadro 2.2- Valores de dilatação térmica de diferentes minerais.

<i>MINERAL</i>	<i>COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA (°C⁻¹)</i>
Quartzo	$4,98 \times 10^{-5}$
Ortoclasio	$1,54 \times 10^{-5}$
Albita	$2,24 \times 10^{-5}$
Monticellite	$3,42 \times 10^{-5}$
Jadeita	$2,45 \times 10^{-5}$
Augita	$2,19 \times 10^{-5}$
Diópsido	$2,51 \times 10^{-5}$
Andaluzita	$2,82 \times 10^{-5}$
Magnetita	$3,50 \times 10^{-5}$
Hematita	$3,10 \times 10^{-5}$
Pirita	$3,40 \times 10^{-5}$
Galena	$6,33 \times 10^{-5}$

Halita	$13,83 \times 10^{-5}$
Calcita	$2,01 \times 10^{-5}$
Aragonita	$6,53 \times 10^{-5}$

Fonte: Robertson, (1988)

2.1.2 Intemperismo Químico

Intemperismo químico é a alteração da composição química e mineralógica da rocha. Esse processo desencadeia a formação de minerais secundários como produtos de decomposição, os quais são um processo evolutivo de alteração mineralógica, estáveis para as condições da superfície terrestre (FOOKES et al. 1988; DUARTE, 2011).

Geralmente, o intemperismo químico é ocasionado pelas águas proveniente das chuvas que infiltram nas rochas e também pelo contato com águas subterrâneas, salinas e orgânicas (CARROLL, 1970; MARTINI, 1992).

A água torna-se requisito fundamental para ação dos mecanismos do intemperismo químico e suas contribuições são divididas em físicas e químicas, sendo elas (MARTINI, 1992):

- Físicas: agente de transporte, meios de reações, pressões parciais e desintegração física;
- Químicas: Solvente, componente necessário para reações típicas do intemperismo, constituinte de produtos de alteração, solução tampão.

As reações químicas que acontecem através do contato das soluções aquosas com a rocha são as que caracterizam o intemperismo químico, dessa maneira, essas reações são mais intensas em regiões com climas quentes e úmidos do que em climas secos (CARROL, 1970; BLYTH e FREITAS, 1984; FOOKES et al. 1988, MARRANO, 1997).

A decomposição química dos minerais primários das rochas são os resultados de ações individuais ou simultâneas de vários processos químicos, os quais os principais estão descritos no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Principais processos do Intemperismo Químico.

<i>Intemperismo Químico</i>	
<i>Principais processos</i>	<i>Descrição</i>
Oxidação	<p>Reação de elementos com o oxigênio, resultando a destruição da estrutura cristalina do mineral para formação de óxidos ou hidróxidos ou qualquer outra reação que o número de elementos oxidados aumente, comumente em rochas com minerais que contém ferro ferroso. Exemplo:</p> $4\text{Fe}^{2+}\text{O} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{Fe}^{3+}\text{O OH}$ <p style="text-align: center;"> óxido de goethita ferro </p>
Redução	Reação de elementos com o oxigênio, resultando a liberação de oxigênio de um mineral para o meio ambiente, os íons deixam a estrutura mineral à medida que o número de oxidação dos elementos reduzidos diminui.
Hidratação	Incorporação de água ao mineral, ocorrendo considerável variação de volume.
Hidrólise	<p>Reação entre íon H⁺ e o OH⁻ de água e íons do mineral, ocorrendo a decomposição do mineral pela água. Exemplo:</p> $4\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{K}^+ + \text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + 8\text{SiO}_2$ <p style="text-align: center;"> feldspato Íon Íon caulinita sílica potássico hidrogênio potássio </p>
Carbonatação	Reação entre íons CO ₃ ⁻ ou HCO ₃ ⁻ com os minerais da rocha de ocorre a produção de carbonatos, a intensidade desse comportamento é maior caso exista a presença de gás carbônico.
Dissolução	<p>Processo de dispersão de íons dos minerais que compõem a rocha em uma solução aquosa, depende diretamente da solubilidade do mineiras e as características químicas e físicas do meio aquoso. Exemplo:</p> $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2(\text{HCO}_3)^-$ <p style="text-align: center;"> Calcita Ácido Íon Íon carbônico cálcio bicarbonato </p>
Troca de Cátion	Processo que ocorre com à soma das cargas negativas nas partículas (fração argila) retendo os cátions em solução, normalmente, Ca, H, K Mg

Fonte: Blyth e Freitas (1984); Price (1995); Frascá, (2003).

No intervalo e tempo de uma obra de engenharia, as mais relevantes reações químicas em solução são possivelmente de oxidação e redução, no entanto, em regiões do planeta onde o clima é tropical, predomina a relevância da hidrólise com a formação de óxidos e hidróxidos de alumínio e argilominerais (FOOKES et al. 1988; PRICE, 1995; WECKMÜLLER, 2011).

Nesse sistema químico de decomposição, Babechuk et al. (2014) destacam que o intemperismo é fundamental no ciclo elementar da terra, pois a quebra química dos minerais instáveis em longo prazo contribui na regulação da concentração de CO₂ na atmosfera, além de fornecer elementos dissolvidos em reservatórios fluviais e marinhos, contribuindo para o equilíbrio desses ambientes (OHTA; ARAI, 2007).

2.1.2.1 Influência do pH no intemperismo químico

O processo de formação dos minerais secundários ocorre através de reações químicas removendo os elementos com maior solubilidade e resultando em novos produtos (PRICE, 1995).

Carrol (1970) afirma que, para a ocorrência do intemperismo químico, o comportamento oxidante deve prevalecer na solução (potencial de oxidação +600mV) e valores de pH variando entre 4 e 10.

O intemperismo químico ocorre geralmente com ataques ácidos originados da atmosfera, por exemplo, a água da chuva contém CO₂ em sua estrutura e, em média, valores de pH 5.25. Quando infiltrada através do maciço, é progressivamente neutralizada, e os minerais da rocha absorvem os íons de hidrogênio e liberam cátions no fluxo da água (CARROL, 1970; DE SOUZA et al., 2006).

Para a verificação do pH em processos de intemperismo, umas das técnicas utilizadas é do pH de abrasão, em que uma solução composta de rocha pulverizada é imersa em água destilada.

Desta maneira, o pH é controlado pela quantidade de cátions residuais liberados de minerais primários e quantidade de minerais argilosos (FERRARI, G. A.; MAGALDI, 1983; GRANT, 1969).

De maneira geral, o pH de abrasão pode ser expresso em uma função que relaciona o a quantidade de minerais primários e de argilominerais presentes na rocha, conforme Equação 1 (GRANT, 1969).

$$pH \text{ de abrasão} = f\left(\frac{\text{minerais primários}}{\text{Argilominerais}}\right) \quad (1)$$

Segundo Grant (1969) os valores altos de pH de abrasão ($pH > 7,5$), estão relacionados a presença de argilominerais e para Gomes (2001) valores baixos ($pH < 6,5$) a presença de minerais metálicos.

Em estudo mais recente, Oliveira e Zuquette (2014) salientam que as aferições de pH são promissoras para a avaliação do grau de intemperismo da rocha, seus resultados mostraram uma boa correlação dos estágios iniciais de intemperismo (aumento dos valores de pH) com a tendência de perda de resistência a carga pontual. Além disso, sugere uma classificação do grau de intemperismo com base no pH de abrasão para basaltos densos, basaltos vesiculares-amigdaloidais e brechas, conforme o Quadro 2.4.

Quadro 2.4 - Classificação do grau de intemperismo conforme Potencial Hidrogeniônico (pH) e Condutividade Elétrica (CE).

<i>Litotipos</i>	<i>Estados</i>	<i>Potencial Hidrogeniônico</i>	<i>Condutividade Elétrica</i>
Basaltos Densos	Rocha integra (sem alteração)	$7 > pH \leq 8$	$EC \leq 15 \text{ mS/cm}$
	Rocha pouco alterada	$8 > pH \leq 10$	$EC \leq 15 \text{ mS/cm}$
	Avaliar microscopicamente	$pH > 10$	$EC \leq 15 \text{ mS/cm}$
Brechas e Basaltos vesiculares-amigdaloidais	Rocha pouco alterada	$7 > pH \leq 8$	$10 > EC \leq 30.$
	Moderadamente alterado	$8 > pH \leq 9$	$30 > EC \leq 40$

Fonte: Oliveira e Zuquette (2014).

2.1.3 Fatores intrínsecos

Os processos de alteração intempérica das rochas dependem das suas características intrínsecas, que incluem sua composição mineralógica, seu estado microfissural, suas características de textura, granulação e cimentação (ANDRADE; SARAIVA, 2010; GOYENA; FALLIS, 2006).

2.1.3.1 Mineralogia

Para compreender a influência da composição mineralógica no processo de alteração e formação de novos minerais, Goldich (1938) sugeriu uma sequência que demonstra o comportamento da estabilidade química dos principais minerais sob a velocidade de ação do intemperismo (Quadro 2.5)

Nos minerais origem magmática, Bowen (1956) sugeriu uma série de cristalização (Quadro 2.5) equivalente à de Goldich (1938), propondo uma relação entre a cristalização em diferentes condições de temperaturas e a ordem teórica de formação dos minerais, vale ressaltar que a ordem de cristalização dos minerais influenciará na sua estabilidade química (SALLES, 2013).

Quadro 2.5 – Comparação das séries propostas por Goldich (1938) e Bowen (1956).

Série de Goldich	Velocidade Alteração	Série de Bowen
<i>Mais estável</i>	<i>Menor</i>	<i>Último a Cristalizar</i>
Óxidos de ferro (Hematita)	↓	Quartzo
Hidróxidos de Alumínio		Muscovita
(Gibbsita)		Ortoclásio
Quartzo		
Argilominerais		
Muscovita		Biotita
Feldspato K (Ortoclásio)		Anfibólio ¹
Biotita		Minerais Máficos
Feldspato Na (Albita)		Piroxênio
Piroxênio		Olivina
Feldspato Ca (Anortita)		
Olivina		
Calcita		
Halita		
<i>Menos Estável</i>	<i>Maior</i>	<i>Primeiro a Cristalizar</i>

¹Série descontinua²Série Contínua

Fonte: Salles (2013).

Dessa maneira, os primeiros minerais a se formarem serão os menos estáveis, quando comparados com os minerais que possuem um tempo maior de cristalização, comportamento que também pode ser observado na série de Goldich (Estabilidade dos minerais).

2.1.3.1.1 Comportamento dos argilominerais

Os argilominerais são componentes minerais filossilicatos com estruturas cristalinas em camadas, associados como produto de alteração das ações do intemperismo, ainda, podem ser compostos por um ou mais minerais e apresentarem diferentes estruturas (GUGGENHEIM et al., 1995; VELDE; MEUNIER, 2008; DIAS, 2019).

A gênese dos argilominerais está relacionada com o tipo da rocha pretérita, pluviometria, temperatura, topografia, presença de organismos e matéria orgânica. (DIAS, 2019)

Devido às suas particularidades, é possível dividir os argilominerais em grupos (Quadro 2.6), os principais são caulinita, ilitas, montmorilonitas e vermiculitas, pois desempenham um papel importante nas texturas e propriedades dos solos (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 2013).

Quadro 2.6 - Características dos principais grupos de minerais argilosos.

Característica	GRUPOS DE ARGILOMINERAIS			
	Caulinita	Ilita	Esmectita	Vermiculita
Argilominerais	Caulinita, dickita, nacrita, haloisita e meta-haloisita	Ilita, fengita, bremalita, glauconita e celadonita	Montmorilonita, nontronita, hectorita, saponita e sauconita	Vermiculita
Estrutura	1:1 Componentes tetraédricos e octaédricos	2:1	2:1	2:1
Ataque Ácidos	A caulinita é pouco solúvel em ácidos diluídos	Atacada	Nontronita e saponita são facilmente atacadas	Atacada
Paragênese	Alteração de rochas ácidas, feldspatos, etc. Condições ácidas	Alteração de micas, feldspatos, etc. Condições alcalinas. Concentrações elevadas de Al e K	Alteração de rochas básicas e material vulcânico. Condições alcalinas. Disponibilidade de Mg e Ca, deficiência de K	Alteração de palhetas de biotita ou de material vulcânico, cloritas, hornblenda, etc.
Cor	Branca, por vezes tons avermelhados, acastanhadas ou azuladas. Incolor em lâmina delgada	Branca e de cores pálidas variadas. Incolor em lâmina delgada	Frequentemente branca, amarela ou verde. Em lâmina delgada incolor, amarela, verde	Incolor, amarela, verde, castanha. Incolor em lâmina delgada

Fonte: Deer; Howie; Zussman, (2013).

A rocha como parte de um ambiente onde ocorrem variações de temperatura e umidade, seus argilominerais sofrerão expansão pela água absorvida e armazenada entre as camadas e o volume de água absorvida passa a depender da composição mineralógica do argilomineral (VERGARA E TRIANTAFYLLIDIS, 2015).

Vegara e Triantafyllidis (2015) afirmam que a expansão dos argilominerais presentes na rocha, em alguns casos, pode ser um processo reversível, pois, se a rocha não se desintegrar após a umedecimento, seu volume diminuirá quando a água for removida das camadas e se expandirá novamente se a umidade retornar.

Farjallat (1971) ressalta que, por consequência desse comportamento expansivo, a rocha pode sofrer os efeitos da fadiga e o enfraquecimento dos minerais, resultando na ruptura da rocha ou a abertura de fissuras já existentes.

No Quadro 2.7, são apresentados, de maneira breve, estudos que relacionam comportamento expansivo dos argilominerais.

Quadro 2.7 - Comportamento observados dos argilominerais em diferentes estudos.

Material Geológico	Localização	Comportamentos observados	Referência
Basalto	Panamá	Prejuízos em uma obra de infraestrutura devido a rápida degradação do basalto, relacionada ao preenchimento de argilominerais nas microfraturas da rocha.	Suárez et al., (2021)
Basalto	China	Ferro e magnésio promoveram a geração de argilominerais nos poros presentes crosta de intemperismo dos reservatórios de gás e óleo.	Yue et al., (2020)
Basalto	Brasil	O padrão de distribuição dos argilominerais na rocha é mais relevante para o processo de alteração do material do que seu volume.	Frasca, (2019)
Basalto	África do Sul	Baixa durabilidade dos agregados relacionado a expansão dos argilominerais.	Leyland e Verryn; Momayez, (2015)

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.3.2 Fissurais

O estado microfissural da rocha também é uma característica intrínseca, tipificado por ser de pequena espessura, cerca de 1µm, distribuído por todas as direções e com dimensões longitudinais do tamanho dos cristais (MARRANO 1997; KAPLAN et al., 2013).

As microfissuras são responsáveis pela superfície específica interna da rocha possibilitando o acesso de fluidos à matriz onde ocorrem depósitos de sais e microrganismos, sendo assim, importantes no processo de alteração da rocha. (GOMES, 2001; MARRANO 1997; KAPLAN 2013).

2.1.4 Fatores extrínsecos

Os fatores extrínsecos são as variáveis relacionadas ao meio ambiente, no qual as ações de intemperismo desencadeiam os processos de alteração em função das características físicas, químicas e biológicas (ASIO; JAHN, 2007; GOMES, 2001; MORTON et al., 2002).

Para Goyena e Fallis, (2006), o principal fator extrínseco é o clima, sendo suas características gerais: temperatura, umidade, vento e precipitações.

A relação entre as condições climáticas e as alterações em rochas pode ser observada no Quadro 2.8.

Quadro 2.8 - Relação entre tipos de clima e os tipos de intemperismo.

Tipo de Clima	Tipos de gradação do Intemperismo	Consequências
Frio ($< -7^{\circ}\text{C}$) e Seco	Forte intemperismo físico	Desintegração da rocha devido às baixas temperaturas.
Frio ($1^{\circ}\text{C} < t < 4^{\circ}\text{C}$) e úmido	Intemperismo químico moderado associado ao intemperismo físico.	Alteração da rocha associada a decomposição do material orgânico.
Quente e úmido	Forte intemperismo químico	Aceleração do processo de decomposição da rocha devido às altas temperaturas e elevada umidade.
Úmido	Intemperismo químico	Lixiviação de sais solúveis e outros minerais devido à percolação de água.
Alternância de úmido e seco	Intemperismo químico moderado	Movimento da água pode ser ascendente durante o período seco, concentrando e fixando óxidos e hidróxidos de ferro, que resultam em uma barreira contra o movimento descendente de água, retardando a decomposição abaixo da zona de laterização.

Quente e seco	Intemperismo químico mínimo	Atividades químicas muito lentas.
---------------	-----------------------------	-----------------------------------

Fonte: Hunt(2006).

Graficamente também é possível relacionar as condições climáticas com o intemperismo, através de uma correlação da precipitação média anual com a temperatura média anual (Figura 2.1), proposta por Peltier (1950). Quanto maiores forem os valores de temperatura e pluviosidade, a alteração química é predominante. E quanto menores forem os valores para temperatura e pluviosidade, a alteração física ganha destaque.

Figura 2.1 - Relação entre a precipitação e temperatura anual.

Fonte: Peltier (1950) editado por Oliveira (2012).

2.1.5 Estado de Equilíbrio em meio Aquoso

É fato que a oxidação é uma das reações fundamentais para que ocorra o intemperismo químico. Para avaliar o comportamento corrosivo de metais em soluções aquosas, uma das contribuições mais importantes são diagramas de equilíbrio termodinâmico propostos por Pourbaix (VERINK, 2011).

Pourbaix (1974) sugere uma analogia direta entre o processo de formação dos minerais com a corrosão dos metais, pois muitos se formam em ambientes aquosos e oxidantes. Dessa maneira, comportamento do ferro (Fe) no processo de alteração pode

ser acompanhado através da comparação dos valores de pH com os valores de potencial redox (Eh) da solução aquosa.

Devido a isso, entre os vários diagramas de equilíbrio termodinâmico, destaca-se o diagrama de equilíbrio Ferro-Água, onde ele representa os campos de estabilidade do Fe em meio aquoso, demonstrando o estado de equilíbrio químico desse meio (VERINK, 2011).

A Figura 2.2, apresenta o diagrama ferro-água, em que é possível identificar três grupos distintos:

- Grupo do $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e $\text{Fe}(\text{OH})_2$: Zona de oxidação com dissolução lenta onde não há reações de oxidação;
- Grupo do Fe^{2+} e Fe^{3+} : Zona de oxidação onde podem ocorrer tais reações;
- Grupo do Fe: Zona onde não haverá oxidação devido a região ser considerada imune.

As linhas A e B são os limites termodinâmicos de estabilidade da água. Acima da linha B, a água é instável em relação à evolução do oxigênio, ocorre a liberação de oxigênio e acidificação. Abaixo da linha (A), a água é instável em relação à evolução do hidrogênio, ocorre liberação de hidrogênio e alcalinização (POURBAIX, 1974; VERINK, 2011).

Figura 2.2 - Diagrama de equilíbrio Ferro-Água de Pourbaix.

Fonte: Adaptado de Venrink (2011).

2.2 ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE

2.2.1 Alteração

A alteração dos materiais rochosos está relacionada a processos artificiais (laboratório) ou naturais (intemperismo), cuja intensidade dependerá das características intrínsecas da rocha (composição química, textura e mineralogia) e da agressividade do meio de exposição (BEGONHA, 1989; DAGDELENLER; SEZER; GOKCEOGLU, 2011). No ambiente exógeno, o processo está condicionado ao clima, relevo, fauna, flora e o tempo em que o material é exposto (SOUZA, 2013).

Dessa maneira, o processo de alteração das rochas pode ser estabelecido como o conjunto de modificações físicas (desintegração) e químicas (decomposição) nas quais o

material rochoso é submetido, em detrimento às suas características físico-mecânicas (BEGONHA 1989; ARIKAN ET AL., 2007; CERYAN, 2008; SANTIAGO, 2008).

A rocha é menos resistente e deformável, quanto mais avançado o seu estado de alteração. Dessa forma, é possível qualificar e quantificar o processo de intemperismo, em função do grau de alteração do material rochoso em conjunto com a caracterização dos parâmetros geotécnicos (BEGONHA 1989; ARIKAN ET AL., 2007; GOMES et al., 2007; CERYAN, 2008; SANTIAGO, 2008).

A Sociedade internacional de mecânica das rochas (ISRM), sugere um método qualitativo para verificar o grau de alteração da rocha em campo, muito utilizado no meio técnico e acadêmico para rochas ígneas e metamórficas (Quadro 2.9).

Guidicini e Nieble (1984) descrevem as dificuldades de quantificar o processo de alteração em campo, além disso, sugerem para rochas sedimentares um complemento na sua avaliação qualitativa por meio do método do grau de coerência (resistência ao risco da lâmina e ao impacto do martelo), pois dessa forma reduziriam os efeitos de subjetivismo do método que avalia apenas qualitativamente (Quadro 2.10).

Quadro 2.9 – Classes do grau de alteração dos materiais rochosos.

Grau	Denominações para a Rocha	Características da rocha
A1	Sã	Minerais primários sem vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas incipientes.
A2	Medianamente alterada	Apresentam minerais medianamente alterados.
A3	Muito alterada	Apresenta minerais muito alterados.
A4	Extremamente alterada.	Apresentam minerais totalmente alterados.
A5	Completamente Alterada	Todo o material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. A estrutura original do maciço está ainda bastante intacta.
A6	Solo Residual	O material está totalmente transformado em solo. A estrutura da rocha está destruída.

Fonte: ISRM (1981).

Quadro 2.10 - Classes de Coerência.

Coerência	Coerente	C1	Material quebra com dificuldade ao golpe do martelo e produz poucos fragmentos que são de bordas cortantes; superfícies são dificilmente riscáveis por lâmina de aço.
	Medianamente Coerente	C2	Material quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo (esfarela) e produz fragmentos com bordas quebráveis por pressão dos dedos; superfícies são riscáveis por lâmina de aço.
	Pouco Coerente	C3	Material quebra com muita facilidade ao golpe do martelo (esfarela) e produz fragmentos que podem ser partidos manualmente; superfícies são riscáveis por lâmina de aço, que deixa sulcos profundos.
	Friável	C4	Material quebra facilmente com a pressão dos dedos e se desagrega; pode ser cortada por lâmina de aço.

Fonte: Guidicini e Nieble (1984).

Abordagens quantitativas de classificação também podem considerar propriedades mineralógicas, propriedades físico-químicas ou características de resistência de rochas (FRAZÃO, 1993).

Dagdelenler et al. (2011) salientam sobre as abordagens quantitativas, pois afirmam que esses métodos direcionam a classificações mais consistentes e objetivas do grau de alteração quando comparado com abordagens qualitativas, pois inibem a subjetividade encontrada nos métodos de análises qualitativas.

Um exemplo disso é a confecção de lâminas delgadas para serem utilizadas na caracterização das rochas e a possibilidade aplicação de índices quantitativos nas análises, como o Índice Petrógrafico (I_p) proposto por Aires-Barros (1971), (Equação 2), aplicado como uma abordagem mineralógica para quantificar alteração.

$$I_p = \frac{(\% \text{ minerais s\~aos})}{\% \text{ minerais alterados} + \% \text{ de fissuras} + \% \text{ minerais secund\~arios}} \quad (2)$$

Através da Equação 2, é possível quantificar os minerais intactos, os alterados e os secundários de uma rocha, a partir dos seus percentuais na amostra.

Dentre os métodos para quantificar alteração de rochas, também estão os índices geoquímicos de alteração, os quais, são determinados a partir da composição química da rocha. Geralmente são obtidos por meios de ensaios/análises de solução, monitorando a decomposição de um mineral instável ou localização da transferência de massa de um elemento (OHTA; ARAI, 2007). O Quadro 2.11 apresenta algumas contribuições encontradas na literatura.

Quadro 2.11 - Índices geoquímicos para quantificar alteração de rochas.

<i>Índices</i>	<i>Equação</i>	<i>Referência</i>
CIA	$\frac{100 * Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)}$	Nesbitt; Markovics (1997)
PIA	$\frac{100 * Al_2O_3 - K_2O}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O - K_2O)}$	Fedo et al. . (1995)
TCWI	$\frac{CWPI + CLI}{2}$ onde $CLI = 100(A_{mob} - B_{mob}) / A_{mob}$ e $CWPI = 100(B_{imob} - C_{imob}) / C_{imob}$	Ceryan (2008)
IOL	$\frac{100 * (Al_2O_3 + Fe_2O_3)}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2)}$	Hill; Worden; Meighan, (2000)
MIA	$\frac{100 * Al_2O_3}{(Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)}$	Babechuk; Widdowson; Kamber, (2014)

Notas:

CIA: Índice de alteração química (*Chemical Index Alteration*)

PIA: Índice de alteração do plagioclásio (*Plagioclase Weathering Index*)

MIA: Índice de alteração mafico (*Mafic Index of Alteration*)

IOL: Índice de laterização (*Index of Laterisation*)

TCWI: Índice total de alteração química (*Total Chemical Weathering Index*)

CWPI: Índice total de alteração química (*Total Chemical Weathering Index*)

CLI: Índice de lixiviação química (*Total Leaching Index*)

A_{mob}: Concentração volumétrica de óxidos na rocha sã

B_{mob}: Concentração volumétrica de óxidos na rocha alterada

C_{mob}: Concentração volumétrica de óxidos na parte não alterada da amostra alterada.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme Iliev (1966), os índices físicos-mecânicos ($I\%$), podem indicar se a rocha sofreu algum processo de alteração, de maneira prática. A alteração dos valores de densidade, porosidade, capacidade da de absorção de água, resistências mecânicas, são ser comparados com os seus respectivos valores nas condições iniciais, (Equação 3).

$$I\% = \frac{(\text{Estado inicial} - \text{Estado final})}{\text{Estado final}} \times 100 \quad (3)$$

Outra alternativa para quantificar o processo de alteração é por meio da condutividade elétrica em solução aquosa, mediante a dissolução de íons na solução, com base nesse parâmetro pode-se avaliar o estágio de alteração da rocha (GOMES 2001, SHALKOWSKI et al., 2009).

A técnica utilizada é chamada de condutividade de abrasão, semelhante ao pH de abrasão, em que rocha pulverizada é imersa em água destilada e através do eletrodo é medida sua corrente elétrica. A análise dos resultados podem ser é expressa a partir da quantidade de íons na concentração (SHALKOWSKI et al., 2009).

Gomes (2001), em seu estudo, apresentou várias correlações entre corrente elétrica com parâmetros físicos e mecânicos (Quadro 2.12).

Quadro 2.12 - Correlação entre os parâmetros da rocha com a corrente elétrica

<i>Parâmetro</i>	<i>Equação</i>	<i>Coefficiente de Correlação (R^2)</i>
Porosidade Aparente	$POR=0,1615X-3,24$	99%
Absorção de água	$ABS=0,0738X-1,60$	99%
Massa específica	$ESP=-0,0067X+3,09$	97%
Resistência Compressão Uniaxial	$UCS=-1,2625X+223,95$	27%
Resistência ao Esmagamento	$ESM=4,873\ln(X)-2,504$	93%

Notas:

X: Valor de corrente elétrica;

POR: Porosidade Aparente;

ABS: Absorção de água;

UCS: Massa específica;

EMS: Resistência ao Esmagamento.

Fonte: Gomes (2001).

Observa-se, no Quadro 2.12, que os valores de correlação para os índices físicos (porosidade, água de absorção, massa específica aparente) são altos, assim como a correlação com resistência ao esmagamento. No entanto, quando relacionado ao ensaio de resistência à compressão a carga uniaxial, a correlação com a corrente elétrica é fraca, o mesmo observado por Oliveira (2014), afirmando não haver correlação entre corrente elétrica e ensaio de resistência à carga pontual.

2.2.2 Alterabilidade

A alterabilidade está relacionada à susceptibilidade da rocha para sofrer modificações de suas propriedades em um intervalo de tempo, sendo dependente da estabilidade química dos minerais da rocha, quanto mais estáveis quimicamente forem os minerais, menos alterável será a rocha (GOLDICH, 1938; FOOKES et al., 1988; BEGONHA 1989).

A quantificação da alterabilidade pode ser realizada por índices que indicam a taxa de variação de alteração do material em um intervalo de tempo (LADEIRA; MINETTE, 1984).

Santiago (2008) sugere que a velocidade de alteração é influenciada pelos minerais da rocha, devido à sua capacidade de modificação no meio em que está exposto até permanecerem estáveis.

De forma geral, os procedimentos de avaliação da alterabilidade (α) envolvem o parâmetro de alteração (Δi), por exemplo os valores de um ensaio de índices físicos ou de resistência mecânica, com a variação do tempo (Δt), conforme a Equação 4 (LADEIRA; MINETTE, 1984).

$$\alpha = \frac{\Delta i}{\Delta t} \times 100\% \quad (4)$$

2.3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ROCHOSO

As propriedades físicas e mecânicas das rochas dependem do processo de alteração dos minerais que compõem suas estruturas, controlados por condições físicas, químicas e mineralógicas (SANTIAGO, 2008). Composições mineralógicas semelhantes podem

apresentar diferentes graus de alteração, mesmo que ambas estejam sobre condições ambientais similares (DAGDELENLER et al., 2011).

Nesse contexto, os ensaios de caracterização geológico-geotécnica são necessários para aferir as condições de alterabilidade do material rochoso, visto que demonstram as características específicas da rocha avaliada (DAGDELENLER et al., 2011).

Salles (2006) sugeriu uma classificação dos principais ensaios utilizados para avaliar a alteração de materiais geológicos, separando-os em diretos e indiretos (Quadro 2.13).

Os ensaios diretos expõem a rocha a diferentes mecanismos de alteração, divididos em duas categorias (degradação e desgaste mecânico), e os ensaios indiretos analisam o parâmetro degradado da rocha para posteriormente compará-lo com os parâmetros da rocha intacta (SALLES 2013).

Quadro 2.13 - Ensaios para avaliação de alteração.

Fonte: Salles, (2006).

Em sua maioria, os ensaios propostos por Salles (2006) estão presentes nas recomendações para caracterização de agregados, proposto pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (Quadro 2.14).

Quadro 2.14 - Ensaios para caracterização de agregados conforme ABNT.

<i>Ensaio</i>	<i>Normativa</i>	<i>Recomendado</i>
Forma média das partículas	NBR 5564 – Anexo A	Lastro Ferroviário
Partículas Cúbicas	NBR 5564 – Anexo A	Lastro Ferroviário
Massa Específica aparente	NBR 5564/NM 53 – Anexo B	Lastro Ferroviário / Agregado para Concreto
Absorção de água	NBR 5564/NM53 – Anexo B	Lastro Ferroviário / Agregado para Concreto
Porosidade Aparente	NBR 5564/NM53 – Anexo B	Lastro Ferroviário / Agregado para Concreto
Resistência a intempérie	NBR 5564/NM53 – Anexo C	Lastro Ferroviário / Agregado para Concreto
Resistência compressão axial	NBR 5564 – Anexo D	Lastro Ferroviário / Agregado para Concreto
Resistência ao Choque/Impacto - Treton	NBR 5564 – Anexo E	Lastro Ferroviário
Teor de fragmentos macios e friáveis	NBR 5564 – Anexo F	Lastro Ferroviário
Material Pulverulento	NBR/NM – 46	Lastro Ferroviário
Torrões de argila	NBR/NM – 7218	Lastro Ferroviário
Limite de massa unitária no estado solto	NBR/NM – 45	Lastro Ferroviário
Resistência ao desgaste	NBR/NM – 51	Lastro Ferroviário / Agregado para Concreto
Ciclagem Natural	NBR 12695	Agregado para Concreto
Ciclagem Água-Estufa	NBR 12696	Agregado para Concreto
Ciclagem com Etilenoglicol	NBR 12697	Agregado para Concreto
Teor das Partículas Leves	NBR 9936	Agregado para Concreto
Umidade Total	NBR 9939	Agregado para Concreto
Modulo de deformação elástico e coeficiente de Poisson de rochas	NBR 10341	Agregado para Concreto
Resistência ao Esmagamento	NBR 9938	Agregado para Concreto

Fonte: ABNT 5564 e 7211.

Na literatura técnica, encontram-se valores de referência para os ensaios de caracterização da rocha e recomendações das instituições técnicas. O Quadro 2.15 apresenta os valores mínimos sugeridos pela ABNT 5564 (2014), Paige-Green (2007) e Verhoef; Van de Wall (1998), para classificar o material rochoso como apto para suas funções na construção civil.

Quadro 2.15 - Valores mínimos para aptidão de agregados graúdo.

<i>Ensaios</i>	<i>ABNT 5564</i>	<i>Verhoef; Van de Wall, (1998)</i>	<i>Paige-Green (2007)</i>
Aplicação	Agregado para lastro de ferrovia	Agregado para uso geral	Agregado para base de rodovia
Massa Específica	Mín 2,5 g/cm ³	Mín 2,3 g/cm ³	-
Porosidade	Máx 1,5%	-	-
Absorção d'água	Máx 0,8%	Máx 2%	-
Compressão Axial	Min 100MPa	Mín 50 MPa	-
Resistência ao Esmagamento	-	Máx 30%	Máx 18,5%
Resistência ao Impacto	Máx 25%	Máx 20%	Máx 20%
Resistência ao Desgaste	Máx 30%	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.3.1 Propriedades Mineralógicas e Químicas

Os componentes minerais das rochas e suas transformações, em áreas tropicais e subtropicais, são influenciados principalmente por suas composições químicas (GUAN et al., 2001).

Uma compreensão das propriedades químicas das rochas é bastante útil para o estudo de seu comportamento em engenharia, em perspectiva geotécnica, direcionada a identificar índices que possam ser úteis para prever o grau de alteração (GUAN et al., 2001; MOON; JAYAWARDANE, 2004; PEREIRA et al., 2021).

Diversos ensaios geoquímicos e petrográficos são realizados através de determinações químicas, mineralógicas, por meio de microscopia de raios x, óptica, e eletrônica, além de análises termogravimétrica (IPT, 2016).

Nesse contexto, os ensaios de Difração de raios X (DRX) e Fluorescência de raios X (XRF) se destacam dentre os demais, pois seus princípios teóricos já estão

compreendidos e são utilizados extensivamente em diversas áreas do conhecimento (LOUBSER; VERRYIN, 2008).

Conforme Loubser e Verryin (2008), XRF é um ensaio utilizado para determinar a composição química de uma amostra, e DRX é utilizado para determinar fases cristalinas presente em uma amostra, pois cada fase possui um padrão único de difração, sendo possível distinguir entre os compostos cristalinos.

Quando DRX é associado com Microscopia óptica, os ensaios tornam-se uma ferramenta interessante na identificação de minerais (MARQUES, et al. 2005). Um exemplo da aplicação de DRX e Microscopia óptica pode ser observado na Figura 2.3, onde os minerais observados na microscopia são associados respectivamente as informações encontradas nos resultados de DRX, desta maneira, os ensaios tornam-se complementares entre eles.

Figura 2.3- Imagem petrográfica, ao lado o seu resultado do ensaio DRX.

Fonte: Momeni (2016).

A utilização dos ensaios XRD, XRF e Microscopia eletrônica, para caracterização das amostras de rocha, associada aos ensaios de caracterização físico-mecânicos são bastante difundidos na literatura técnica (AMAH et al., 2012; BABECHUK; WIDDOWSON; KAMBER, 2014; POLA et al., 2014; SOJIEN, 2019).

Moon (2004) apresentou correlações entre os parâmetros químicos e mecânicos do basalto de uma pedreira abandonada na Nova Zelândia e associou a composição química das amostras de basalto com o seu grau de alteração, conforme o estado de

alteração da amostra, alguns elementos destacam-se, como o aumento dos valores percentuais de Óxido de Alumínio (Quadro 2.16).

Quadro 2.16 - Composição química do grau de alteração das amostras de basalto

Composição Química (%)	Grau de alteração				
	<i>Intacta</i>	<i>Levemente</i>	<i>Moderadamente</i>	<i>Muito</i>	<i>Completamente</i>
SiO ₂	42,39	30,81	33,29	32,78	38,67
Al ₂ O ₃	12,04	21,52	26,83	27,80	27,67
MnO	0,18	0,32	0,22	0,28	0,07
MgO	12,53	3,52	0,65	0,37	0,32
CaO	10,82	1,35	0,08	0	0
Na ₂ O	1,3	0,04	0,01	0	0
K ₂ O	0,7	0,07	0,06	0,06	0,08
TiO ₂	2,41	4,32	2,98	3,27	2,23
P ₂ O ₅	0,39	0,53	0,33	0,53	0,18
Fe ₂ O ₃	3,12	16,32	14,94	16,57	12,91
FeO	10,46	5,11	0,79	0,87	0,68
H ₂ O+	3,68	13,42	17,89	15,08	15,11

Fonte: Moon (2004).

Com uma abordagem semelhante, Frasca, (2019), avaliou a alterabilidade de basaltos utilizados como rip-rap no reservatório de uma usina hidrelétrica, relacionando a petrografia com as características físico-mecânica.

Em seu estudo, separou os basaltos em grupos, sendo, Grupo A – Basalto compacto cinza escuro, Grupo B - Basalto compacto avermelhado e Grupo C - Basalto cinza esverdeado com amigdaloidal.

A rotina dos ensaios físico-mecânicos indicaram que os menores valores de absorção de água e consequentemente os maiores valores de compressão uniaxial, foram encontrados nas amostras do Grupo A. Por outro lado, o Grupo C obteve maiores valores de absorção de água e menores valores de resistência a compressão.

O Quadro 2.17 apresenta as características petrográficas dos basaltos utilizados no estudo de Frasca (2019).

Quadro 2.17- Características petrográficas dos basaltos utilizados como rip-rap.

<i>Grupo</i>	<i>Minerais</i>	<i>Minerais Secundários</i>
A	Labradorita – 50% Augita – 35% Minerais opacos – 10%	Esmectita – 5%
B	Labradorita – 45% Augita – 35% Minerais opacos – 5%	Esmectita – 15%
C	Labradorita – 40% Augita – 35% Minerais opacos – 5% Olivina - Presença	Esmectita – 20%

Fonte: Frasca, (2019).

De acordo com percentuais de minerais secundários, apresentados no Quadro 2.17, nota-se que é possível associar a perda de resistência e o aumento da absorção de água com o percentual maior de minerais do grupo esmectita nas amostras.

Frasca, (2019), afirma que o padrão de distribuição do argilomineral na rocha é relevante no processo de alteração, desta maneira, quanto maiores forem as áreas interligadas pelas conexões formadas pelos argilominerais, maior será o processo de alteração da rocha e por fim ressalta a importância das análises petrográficas para explicar os mecanismos de degradação.

2.3.2 Propriedades Físicas

Os parâmetros de caracterização física são importantes e podem ser indicadores de alteração e alterabilidade das rochas. Para obtenção desses parâmetros, devem ser executados ensaios laboratoriais na rocha, como exemplo os ensaios de densidade aparente seca e saturada, absorção de água e porosidade.

No Brasil, os ensaios correspondem a normativa NBR 5564/2011 ou NBR NM 53 (com exceção da porosidade), com abordagens que aferem, massa específica (seca e saturada), absorção de água do material rochoso e porosidade.

O Quadro 2.18, apresenta as formulações para obtenção dos valores de índices, conforme a NBR 5564/2011.

Quadro 2.18 - Formulações do ensaio para os índices físicos

<i>Índice</i>	<i>Equação</i>	<i>Legenda</i>	<i>Observação</i>
Massa específica Seca (aparente)	$\rho_a = \frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100$	M_{sec} : Massa seca; M_{sat} : Massa Saturada; M_{sub} : Massa submersa.	Saturação adicionar água destilada até 1/3 de sua altura, após 4h complementar os 2/3 de altura restantes, saturar por 48h. Secagem em estufa 70°C/48h.
Massa específica Saturada (aparente)	$\rho_{sat} = \frac{M_{sat}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100$		
Absorção de água	$\alpha_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$		
Porosidade Aparente	$n_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100$		

Fonte: Adaptado de NBR 5564/2011

Por meio da determinação dos parâmetros físicos, Gupta e Rao, (2001), Moon (2004), Gurocak e Kilic, (2005), apresentam valores para cada grau de alteração em amostras de basaltos, conforme o índice físico a massa específica seca (Quadro 2.19), absorção de água (Quadro 2.20) e porosidade aparente (Quadro 2.21).

Quadro 2.19 - Valores do grau de alteração relacionado com massa específica seca

Material	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 e Rao, (2001) - Índia
Basalto	1,3,4 e 5	2811	2116	1908	1758	1538	Moon (2004) – Nova Zelândia
Basalto	-	2800	2750	2600	2450	2300	Gurocak e 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 e 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 e 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), Analcime (7), Calcita (8). Fonte: Compilado pelo Autor.

Quadro 2.20 - Valores do grau de alteração relacionado com a absorção de água

Material	Grau de alteração - Absorção de água (%)						Referência
	<i>Minerais</i>	<i>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 e Rao, (2001) - Índia
Basalto	-	1,00	1,25	2,00	5,00	8,00	Gurocak e 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 e 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 e 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), Anlcime (7), Calcita (8). Fonte: Compilado pelo Autor.

Quadro 2.21 - Valores do grau de alteração relacionado com a porosidade.

Material	Grau de alteração – Porosidade (%)						Autor - País
	<i>Minerais</i>	<i>Intacta</i>	<i>Leve</i>	<i>Moderado</i>	<i>Muito</i>	<i>Completo</i>	
Basalto Denso	1, 2 e 3	0,64	4,97	-	9,50	29,52	Gupta e Rao, (2001) - Índia
Basalto	1,3,4 e 5	0,32	7,96	14,28	20,61	25,39	Moon (2004) – Nova Zelândia
Basalto	-	1,00	2,00	4,15	9,00	11,00	Gurocak e 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 e 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 e 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 Titaunagita (4), Olivina (5), Iddingsita(6), Anlcime (7), Calcita (8). Fonte: Compilado pelo Autor.

Observa-se nos Quadro 2.19, Quadro 2.20 e Quadro 2.21, uma tendência no comportamento dos parâmetros físicos da rocha, conforme seu estado de alteração avança os valores de massa específica reduzem, por outro lado, os valores de água de absorção e porosidade tendem a ter um aumento nos seus percentuais.

2.3.3 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas são parâmetros importantes para projetos e construções de engenharia e são obtidos através de ensaios de resistência mecânica realizados em laboratório ou a campo (ZHANG, 2002).

Segundo a *New Zealand Geotechnical Society - NZGS* (2005), a resistência do material rochoso, de uma forma geral, pode ser baseada nos valores dos ensaios de resistência à compressão uniaxial (*Uniaxial Compressive Strength - UCS*), resistência à carga pontual (*Point load test – PLT*) e sugere uma relação dos valores de resistência com o estado da rocha encontrada em campo, conforme o Quadro 2.22.

Quadro 2.22 - Relação de resistência da rocha encontrada em campo.

<i>Termo</i>	<i>Condição em campo</i>	<i>UCS (MPa)</i>	<i>PLT (MPa)</i>
Extremamente resistente	Apenas Lascado com martelo	>250	10
Muito Resistente	Requer muitos golpes de martelo para quebrar	100-250	5-10
Resistente	Requer mais do que um golpe de martelo para fraturar	50-100	2-5
Moderadamente Resistente	Requer um golpe de martelo para fraturar	20-50	1-2
Fraco	Um golpe de martelo atinge em profundidade	5-20	<1
Muito Fraco	Um golpe de martelo desintegra o material	1-5	
Extremamente Fraco	Não tem resistência ao aperto com polegar.	<1	

Fonte: NGZS (2005).

No Brasil, ensaios para obtenção dos parâmetros mecânicos são realizados de acordo com as normativas NBR NM 51, NBR 9938/2013, NBR 8938/2010 e por normativas do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER) (Quadro 2.23).

Quadro 2.23 - Ensaio de caracterização de resistência propostos pelo DNIT e ABNT.

Ensaio	Normativas	
Resistência Mecânicas pelo método dos 10% de finos	DNER-ME 096/98	-
Resistência Abrasão “Los Angeles”	DNER-ME 035/98	NBR NM 51/2001
Resistência ao Esmagamento	DNER-ME 197/97	NBR 9938/2013
Degradação compactação Proctor	DNER-ME 398/99	-
Resistencia ao choque - Treton	DNER-ME 399/99	NBR 8938/2010

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na literatura técnica, são encontrados diversos estudos que avaliam o grau de intemperismo da rocha, de acordo com valores de resistência mecânica, Quadro 2.24 e Quadro 2.25, conforme seu estado de alteração avança, independentemente do seu litotipo, os valores de resistência tendem reduzir. (GUPTA E RAO (1998); TUGRUL E GURPINAR, 1997; GUPTA E RAO, 2001; MOON 2004; GUROCAK E KILIC, 2005; GRATCHEV, PATHIRANAGEI E KIM, 2019).

Quadro 2.24 - Valores para o grau de alteração do basalto de acordo com resistência a carga pontual.

País	Grau de alteração – Resistência a compressão Uniaxial (MPa)					Referência
	<i>Intacta</i>	<i>Leve</i>	<i>Moderado</i>	<i>Muito</i>	<i>Completo</i>	
Turquia	120,0	-	60,0	20,0	-	Tugrul e Gurpinar, (1997)
Índia	172,5	93,2	-	17,80	3,40	Gupta e Rao, (2001)
Nova Zelândia	262	-	-	-	-	Moon (2004)
Turquia	75,0	70,0	50,0	25,0	10,0	Gurocak e Kilic, (2005)
Portugal	137,91	-	58,63	10,69	-	Pereira et al.,(2021)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Quadro 2.25 - Valores para o grau de alteração do basalto de acordo com a resistência a carga pontual.

País	Grau de alteração – Resistência a carga pontual (I_{s50})					Referência
	<i>Intacta</i>	<i>Leve</i>	<i>Moderado</i>	<i>Muito</i>	<i>Completo</i>	
Índia	10,03	6,75	-	0,25	0,01	Gupta e Rao (1998)
Nova Zelândia	5,6	0,41	-	-	-	Moon (2004)
Austrália	9,1	3,9	1,6	0,6	-	Gratchev, Pathiranagei e Kim, (2019)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Outras abordagens podem ser utilizadas na avaliação do parâmetro de resistência, como por exemplo o ensaio de resistência ao esmagamento, que utiliza de um índice de porcentagem de perda de massa para um fração granulométrica específica, ou seja, a diferença percentual entre a massa inicial da amostra com a massa final da amostra após o ensaio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

2.3.3.1 Resistência ao esmagamento

O ensaio de resistência ao esmagamento, tem como proposta determinar a resistência do agregado sobre um carregamento compressivo gradual, ou seja, uma carga variando com uma taxa fixa em um intervalo de tempo (RAMASAMY; GROUP, 2020; SHAHRIN, 2010).

A utilização do ensaio de resistência ao esmagamento, possui o objetivo de classificar o material rochoso para utilização como agregado em concreto e obras de pavimentação, principalmente. Os estudos de Korkanç; Tuğrul, (2004), Engidasew; Barbieri, (2014), Piasta; Góra; Turkiewicz, (2016), Kamani; Ajalloeian, (2019), Khaleghi Esfahani; et al., (2019), Koohmishi; Palassi, (2020) demonstram esta aplicação.

No Brasil, os ensaios são recomendados pela NBR 9938/2013 e DNER 197/97 e no âmbito internacional tem-se as recomendações sugeridas pela *Determination of Aggregate Crushing Value – ACV*, sendo proposta pela *British Standard – BS 812:1990*.

Os procedimentos recomendados pelas normativas são muito semelhantes, não havendo diferenças significativas entre elas (

Quadro 2.26), no entanto, Gomes (2001) propôs uma alteração no método de ensaio para que fosse possível a avaliar a resistência ao esmagamento em amostras que abrangessem um intervalo de faixa granulométrica maior, adicionando dimensões menores, e a utilização de um volume menor de amostra (

Quadro 2.26).

Quadro 2.26 - Procedimentos para realização do ensaio de resistência ao esmagamento.

<i>Descrição</i>	<i>NBR 9938/2013 - DNER 197/97</i>	<i>ACV - BS 812:1990 e IS 383</i>	<i>Gomes (2001)</i>
Dimensão dos agregados (mm)	12,5<#<9,5	12,5<#<10,0	12,5<#<6,3
Quantidade de amostra para realização de 1 (um) ensaio	3 kg	3 kg	Não informado
Abertura da peneira para determinação de Massa retida (M_{retida}) após esmagamento	2,36mm	2,36mm	1,4mm
Lavagem e secagem das amostras ante do ensaio	Em água corrente e secagem em estufa 100°C	Em água corrente e secagem em estufa 110°C	Umidade natural, pois foi desenvolvido para ensaio de campo
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.	Pórtico de reação de 70 cm de altura e 30 de largura, cilindro com 69mm de diâmetro e altura de 70 mm, embolo com 167 mm de diâmetro.
Carga/Taxa/Tempo	400 kN – 40kN/min – 10 Min		100 kN
Expressão para resultados	$R_E(\%) = \frac{M_{inicial} - M_{retida}}{M_{inicial}}$		

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Embora as normativas brasileiras não apresentem limites percentuais para classificar o agregado, a BS 812:1990 sugere que o limite de perda ao esmagamento para aplicação em pavimentos de concreto não ultrapasse 30%. Por outro lado a *Indian Standard* - IS 383, sugere valores máximos aceitáveis para a utilização do agregado de acordo com seu litotipo, conforme o Quadro 2.27.

Quadro 2.27 - Valores máximos de Perda ao esmagamento para o uso em concreto.

Litotipo	Valor máximo para o agregado
Basalto	14%
Diábase	10%
Granito	17%
Corneana	13%
Quartzito	20%
Calcário	14%
Grauvaque	10%

Fonte: Adaptado de Bureau of Indian Standards (1963).

Turk e Dearman (1988) realizaram um estudo para analisar a influência do tamanho do agregado nas suas propriedades mecânicas, utilizando a normativa *British Standard* BS 812/1975. Em seus resultados, os maiores valores dos índices de resistência ao esmagamento foram encontrados nas amostras de maior dimensão, comprovando que os valores de resistência têm uma correlação de dependência com o tamanho do agregado.

Além disso, os autores sugerem que, para a utilização de granulometria diferente da proposta na normativa BS 812/1975, na amostragem deve existir uma relação de proporção entre a peneira de retenção e a peneira de separação fina de aproximadamente 3,7 a 4,24 vezes. Essas proporções são justificadas com análises das curvas granulométricas dos agregados, que diferem suas dimensões da normativa, apresentando um coeficiente de correlação de 0,99. Ainda, propuseram que, para cada tipo de rocha, seja utilizado um conjunto diferente de tamanhos de peneira, daquelas recomendadas na BS 812-1975.

Desta maneira, Turk e Dearman (1988) citam peneiras diferentes das recomendadas na normativa, que fornecem o mesmo comportamento da curva de granulométrica do ensaio padronizado, sugestão pode ser observada no Quadro 2.28.

Quadro 2.28- Peneiras para separação de finos, conforme Turk; Dearman, (1988).

Faixa granulométrica (mm)	Peneira para separar os finos (mm)		
	<i>Ensaio de Resistência ao esmagamento</i>		
	Diabásio	Diabásio (Olivina)	Diabásio (Quartzo)
20 – 14	2,6	2,65	2,4
14 – 10	2,36	2,36	2,36
10 – 6,3	1,8	2	1,85
6,3 – 5	1,4	2	1,25

Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.4 PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DA ALTERABILIDADE

Obras de engenharia que utilizam rochas como um dos seus principais materiais, são estruturas sujeitas às variáveis naturais como chuva, evaporação, aumento do lençol freático entre outros fenômenos que empregam nas rochas ações alternadas de umedecimento, secagem e congelamento (HALE; SHAKOOR, 2003).

Com base nas manifestações patológicas que ocorrem em obras de engenharia devido à degradação do agregado, a interação água-rocha passou a ser um importante fator que indica a alterabilidade do material. Nessas circunstâncias, pesquisadores elaboraram extensivos estudos para compreender a durabilidade do agregado para fins de engenharia, no entanto, ainda se faz necessário o entendimento dessa interação água-rocha, pois não se trata apenas uma mera relação entre saturação e absorção de água (GÖKCEOGLU et al., 2000, HALE; SHAKOOR, 2003, ZHOU et al., 2017).

As manifestações macroscópicas são consequência das mudanças na estrutura microscópica da rocha, dessa maneira, a degradação mecânica das estruturas microscópicas se atenuam ao fim de cada ciclo de interação da água-rocha, sendo esse comportamento de grande significância para o entendimento das perdas nas propriedades mecânicas, em decorrência dos repetidos ciclos de saturação, secagem, congelamento e degelo (MOON ; JAYAWARDANE 2004, PUDLO et al., 2012, XIANG et al., 2015; ZHANG et al., 2015).

Nesse contexto físico, os ensaios de ciclagem para estudo da alterabilidade das rochas são utilizados extensivamente no meio técnico, sendo, desta maneira, possível

estimar previsões do comportamento de durabilidade do material e, ainda, aferir se é apto para as funções de engenharia pretendidas.

2.4.1 Ciclagem Natural

Conforme Salles (2014), a exposição das rochas em campo é influenciada pelas características climáticas do local de exposição, dessa forma, sua degradação está relacionada com a temperatura, chuva, umidade relativa do ar, vento, pressão atmosférica entre outros fatores.

No Brasil, a NBR 12695/1992 sugeriu as condições para a execução do ensaio para verificação do comportamento mediante a ciclagem natural de agregados.

No ensaio a NBR 12695/1992 propôs, os agregados de granulometria entre 76mm e 19mm devem ser colocados sobre uma plataforma de madeira, expostos ao tempo, em local que permanentemente estão em contato com as variações no tempo, durante o período de um ano (1 ciclo). A plataforma deve estar localizada em local onde, num raio de 30 m, a partir do seu centro, não haja qualquer objeto ou estrutura elevada que possa obstruir a livre ação das condições climáticas nos fragmentos de rocha. As análises qualitativas (registros fotográficos e análises visuais) e quantitativas (aferição dos índices físicos) devem ser feitas antes e depois de cada ciclo.

Sales (2014), afirma não ser frequente a padronização de procedimentos para os ensaios de ciclagem natural em campo, o Quadro 2.29, demonstra estudos que utilizaram a metodologia de exposição natural das rochas.

Quadro 2.29 - Ensaio de ciclagem natural em campo.

<i>Referência</i>	<i>Material de Estudo</i>	<i>Métodos Quantitativos</i>	<i>Normativa</i>	<i>Tempo de exposição</i>
Ladeira; Minette (1984)	Diorito	Perda de massa e Absorção d'água	-	11 meses
Gomes (2001)	Diabásio e Basalto Vesicular	Perda de massa, Resistência ao esmagamento	NBR 12695	12 meses
Gautam; Shakoar, (2013)	Argilito, Lamito, Siltito e Folhelho	Taxa de desintegração	-	12 meses

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os valores de perda de massa encontrados por Ladeira e Minette (1984) e Gomes (2001) são demonstrados conforme o Quadro 2.30.

Quadro 2.30 - Valores de porcentagem de perda de massa com tempo de exposição. Elaborado pelo autor.

<i>Referência</i>	<i>Material de Estudo</i>	<i>Perda de massa (%)</i>				
		<i>Tempo de exposição (meses)</i>				
		3	6	9	11	12
Ladeira; Minette (1984)	Diorito	-	0,27	0,62	0,82	-
Gomes (2001)	Diabásio	1,75	2,34	3,24	3,55	3,60
Gomes (2001)	Basalto Vesicular	10,75	11,65	11,18	11,26	11,30

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme pode ser observado, o comportamento do percentual de perda de massa dos três litotipos apresentados tende a crescer, conforme o tempo de exposição natural da rocha aumenta.

Gomes (2001) ainda apresentou o comportamento da resistência ao esmagamento das rochas expostas, os quais podem ser observados no Quadro 2.31.

Quadro 2.31 - Resistência ao esmagamento (%) conforme o tempo de exposição.

<i>Referência</i>	<i>Material de Estudo</i>	<i>Índice de Perda de Resistência ao Esmagamento (%)</i>				
		<i>Tempo de exposição (meses)</i>				
		3	6	9	11	12
Gomes (2001)	Diabásio	14,15	14,20	14,56	14,48	14,83
	Basalto Vesicular	20,77	20,32	20,71	21,74	22,14

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Em geral, o comportamento do índice percentual de perda da resistência ao esmagamento das duas amostras apresentadas não tem aumentos consideráveis conforme o tempo de exposição natural. O autor salienta que as amostras possuem baixa porosidade e absorção de água e uma elevada massa específica, condições físicas que não favorecem o acesso da água no material, restringindo o contato com os argilominerais presentes (esmectitas), cabe salientar que o estudo não faz nenhuma menção no padrão de distribuição dos argilominerais na rocha.

Por outro lado, Gautam e Shakoore (2013) utilizaram uma metodologia não destrutiva para verificar a influência das ações climáticas ao longo do tempo, aferiu seus resultados a partir da taxa de desintegração (Quadro 2.32).

Nesse método, as estimativas de desintegração são realizadas a partir das áreas encontradas do gráfico de granulometria do material. Por exemplo, Gautam e Shakoor (2013) utilizaram 10 amostras com diâmetro máximo inicial de 2,54 cm e posteriormente as peneiras 25 mm, 6 mm e 2 mm para a construção da curva granulométrica do material (Figura 2.4), Sendo assim, a obtenção da taxa de desintegração é a divisão da área do polígono formado pela curva granulométrica, obtida pelo peneiramento do material, pela área total do gráfico (Figura 2.5).

Quadro 2.32 - Valores da taxa de desintegração conforme tempo de exposição.

<i>Material de Estudo</i>	<i>Taxa de desintegração</i>					
	<i>Tempo de exposição(meses)</i>					
	2	4	6	8	10	12
Argilito	0,172	0,085	0,060	0,050	0,038	0,042
Lamito	0,719	0,417	0,475	0,190	0,337	0,208
Siltito	0,997	0,984	0,978	0,998	0,989	0,990
Folhelho	0,985	0,972	0,966	0,934	0,961	0,950

Fonte: Gautam; Shakoor, (2013).

Figura 2.4- Curva granulométrica, conforme Erguler; Shakoor, (2009).

Fonte: Gautam; Shakoor, (2013)

Figura 2.5- Exemplo para cálculo da taxa de desintegração conforme Erguler; Shakoor, (2009).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o Quadro 2.32, os valores de taxa de desintegração tendem a reduzir ao longo do tempo de exposição, ocorrendo uma amplitude maior nos primeiros meses e uma graduação redução até o décimo segundo mês. Gautam; Shakoor, (2013) associam esses resultados à rápida fragmentação do material exposto nos três primeiros meses, após isso, a fragmentação ocorreu de maneira gradual. Além disso, a exceção ocorre com Siltito, onde não houve mudanças, pois o material permaneceu íntegro ao longo da exposição ao natural.

2.4.2 Ciclagem água-estufa

O ensaio de ciclagem água-estufa tem como objetivo determinar a resistência à alteração do material rochoso, submetido a ciclos de saturação (umedecimento) em solução de abrasão e secagem em estufa com temperaturas que podem variar de acordo com a necessidade do experimento (GOMES, 2001).

De acordo com Bell (1992), o ciclo de umedecimento e secagem da rocha pode conduzir o material a um estado de deterioração, devido à variação de seus mecanismos físicos, químicos e mecânicos.

Quando a rocha possui minerais expansivos em sua estrutura, normalmente, ocorre a absorção de água por esses minerais que expandem e aumentam a pressão intergranular do material, podendo ocorrer também a retração quando liberado o excesso de umidade, o que pode levar a fadiga do material (BELL 1992).

Além de outros processos que podem levar à deterioração mecânica da rocha, como dissolução dos componentes de cimentação, carreamento de partículas, precipitação de íons dissolvidos como sais, todos são exemplos podem ocorrer durante ciclos de umedecimento e secagem (BELL, 1992).

Nos últimos anos, estudos de Akin e Özsan (2011); Cui et al. (2017); Ghobadi e Babazadeh (2015); Khanlari e Abdilor (2015); Momeni et al. (2017); Özbek (2014); Yang et al. (2019) utilizaram a metodologia de ciclagem água-estufa, em que o material rochoso passa por um procedimento de saturação em um determinado período de tempo e posteriormente por secagem, normalmente em estufa.

No Brasil, a NBR 12696/1992 sugeriu as condições para a execução do ensaio para verificação do comportamento mediante a ciclagem água-estufa de agregados, de forma geral, o procedimento de ensaio está disposto na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Procedimento para ciclagem de agregados em água-estufa, conforme a NBR 12696.

Os exames qualitativos e quantitativos devem ser realizados ao fim dos ciclos múltiplos de 4 até o ciclo 24 e a partir daí, a cada múltiplo de 12 até o ciclo 120.

Nota: *Registro fotográfico. **Cálculo de perda de massa.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1992).

Ainda que existam procedimentos padronizados, é comum os pesquisadores utilizarem diferentes parâmetros para o ensaio de ciclagem água-estufa, devido às condições de suas pesquisas, condições decampo e condições de obra. O Quadro 2.33, demonstra os procedimentos adotados por alguns estudos.

Quadro 2.33 - Procedimentos de ciclagem água-estufa encontrados na literatura técnica.

<i>Material Geológico</i>	<i>Dimensões da amostra</i>	<i>Tempo de Saturação</i>	<i>Tempo de Secagem</i>	<i>Nº de ciclos</i>	<i>Ensaio Físicos</i>	<i>Referência</i>
Basalto e Basalto Amigdaloidal	64 ≤#≤38 mm	12h (Amb)	24h (110°C)	80	IF	Frazão, (1993)
Basalto	2 cm de diâmetro e 2 cm de altura	12h (Amb)	12h (Amb)	12	IF e UCS	Kanyaya; Trenhaile, (2005)
Basalto	20 ≤#≤40 mm	6h (Amb)	6h (110°C)	9	IF e UCS	Sampaio, (2010)
Basalto	6x4,5x2,5 cm	3h e 10 Min (Amb)	24h (Amb)	105	A cada Ciclo: IF	Loubser, (2013)
Basalto	54 mm – Corpo de prova ISRM (1981)	-	-	24	PLT	Corrêa dos Santos <i>et al.</i> , (2016)
Basalto e Basalto vesicular	54 mm – Corpo de prova ISRM (1981)	18h (Amb)	20h (65°C)	80	A cada 10 ciclos: IF e UCS	Dursun; Topal, (2019)
Basalto	54 mm – Corpo de prova ISRM (1981)	24h (Amb)	24h (100°C)	25	A cada 2 ciclos: IF, e PLT	Gratchev; Pathiranagei; Kim, (2019)
Basalto e Basalto vesicular	54 mm – Corpo de prova ISRM (1981)	14h (Amb)	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.

Fonte: Compilação do Autor.

Como pode ser observado no Quadro 2.33, em todos os trabalhos, os autores caracterizaram o material por meio de índices físicos, pois são utilizados como indicadores de degradação do material. Desta maneira, alguns resultados e suas correlações quanto à porosidade são apresentados no Quadro 2.34.

Quadro 2.34 - Valores de porcentagem de porosidade relacionados com ciclos de água-estufa.

<i>Material</i>	<i>Valores para ciclos de água-estufa x Porosidade (%)</i>				
	<i>Amostra íntegra</i>	<i>Último ciclo</i>	<i>Equação de correlação</i>	<i>Coef. R²</i>	<i>Referência</i>
Basalto	1,4	3,2	$\eta = 0,0473x + 1,5639$	0,85	Gratchev; Pathiranagei ; Kim, (2019)
Basalto	4,1	5,3	$\eta = 0,0165x + 3,9216$	0,90	Dursun; Topal, (2020)
Basalto Vesicular	9,9	13,6	$\eta = 0,0458x + 9,6526$	0,98	Dursun; Topal, (2020)

Notas:

X: Número de ciclos; **η** : Porosidade (%).

Fonte: Compilação do Autor.

Pode ser observado o aumento da porosidade conforme o aumento do número de ciclos de água-estufa (Quadro 2.34). O fator importante quanto a porosidade é apresentado no estudo de Dursun; Topal, (2020), onde existe uma forte correlação (R^2 igual 0,98) entre o aumento da porosidade e perda de resistência do material.

Além dos índices físicos, ensaios destrutivos de resistência mecânica estão presentes na literatura técnica para avaliar os efeitos das ciclagens água-estufa, dentre os ensaios destacam-se a Resistência a compressão uniaxial (UCS) e o Índice de carga pontual (PLT). O comportamento dos ensaios UCS e PLT relacionados com o aumento do número de ciclos, são apresentados no Quadro 2.35.

Quadro 2.35 - Valores de resistência a compressão uniaxial e resistência a carga pontual, relacionados com ciclos de água-estufa.

<i>Material</i>	<i>Valores para ciclos de água-estufa x UCS, PLT</i>				
	<i>Amostra integral</i>	<i>Último ciclo</i>	<i>Equação de correlação para ciclos de água-estufa x UCS, PLT</i>	<i>Coef. R²</i>	<i>Referência</i>
Basalto	10 MPa	3 MPa	$PLT = 9,587\exp(-0,27X)$	0,95	Gratchev; Pathiranage i; Kim, (2019)
Basalto	145,4 MPa	109,1 MPa	$UCS = -0,4212x + 146,08$	0,95	Dursun; Topal, (2020)
Basalto Vesicular	63,3 MPa	43,4 MPa	$UCS = -0,2302x + 62,666$	0,97	Dursun; Topal, (2020)

Notas

X: Número de ciclos; **UCS**: Resistência a compressão uniaxial; **PLT**: Índice de resistência a carga pontual.

Fonte: Compilação do Autor.

Nota-se que, em todos os casos, os valores de resistência tiveram decréscimos, conforme o aumento nos números de ciclos de água-estufa. Além disso, os estudos demonstraram uma forte correlação desse comportamento.

Os resultados apresentados nos

Quadro 2.34 e Quadro 2.35, sugerem que os números de ciclagens de água-estufa causam alterações nos valores de porosidade e consequentemente perda de resistência mecânica do material, sendo possível, estimar a alterabilidade do material ensaiado.

Por fim, Loubser (2013), propõem que o tempo de saturação não é o maior fator de influência na rocha, pois, em seu estudo, os valores de perda de massa (Quadro 2.36) foram os mesmos nos tempos de saturação de 10 minutos e 3 horas, e acrescenta que o número de ciclos água-estufa é mais relevante para as variações nas características do material.

Quadro 2.36- Resultados de perda de massa entre diferentes tempos de saturação.

<i>Amostra</i>	<i>Tempo de Saturação</i>	<i>Perda de massa (%)</i>
Basalto	3 horas	0,01
	10 minutos	0,01
Arenito	3 horas	0,17
	10 minutos	0,17

Fonte: Loubser (2013).

2.4.3 Ciclagem com Etilenoglicol

Neste tópico é apresentado, de maneira breve, o método de ciclagem com etilenoglicol, embora não presentes neste estudo, é utilizado para estimar a alterabilidade dos materiais rochosos.

Conforme Martins e Cardoso (2005), o composto químico etilenoglicol é obtido a partir da reação de óxido de eteno com água ou álcool, sendo utilizado principalmente como anticongelante, na formulação de tintas e vernizes. Na literatura técnica, existem vários métodos em que o composto é utilizado para investigar a exposição à ação intempérica de rochas ígneas, por meio de ciclagem (LEYLAND, 2014; PAIGE-GREEN, 2007; MOMAYEZ, 2014).

De acordo com Van Blerk et al. (2017), o principal método utilizado em estudos foi desenvolvido em 1969 pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (U.S Army Corps), identificado como Method CRD-C para agregados de concreto e cimento. Para a execução do método, eram utilizados 5kg de agregados com dimensões entre 76,1mm e 19mm, em que são submergidos em solução de etilenoglicol por 15 dias, posteriormente a cada 3 dias o material deveria passar por ciclos de inspeções visuais para aferição de fraturamentos ou lascamentos. Ao fim do 15º dia, material deveria ser peneirado, e o peso do material retido na peneira 19 mm deve ser registrado.

No Brasil, a normativa que sugeriu a utilização do etilenoglicol para avaliação de agregados mediante ao processo de ciclagem utilizando o composto era a 12697/1992, cancelada em 2013. Quando comparada com o Method CRD-C, a normativa brasileira difere apenas no período dos ciclos de inspeção visual, sendo divididos em 6 ciclos, os quais os três primeiros são realizados a cada 48 horas, e os três restantes a cada 72 horas. O Quadro 2.37 apresenta alguns métodos encontrados na literatura técnica.

Quadro 2.37 - Métodos normatizados utilizados na ciclagem com etilenoglicol.

<i>Ensaio</i>	<i>Inspeção visual (dias)</i>	<i>Inspeção visual (qualitativa)</i>	<i>Peneira para material retido</i>
Method CRD-C	3,6,9,12 e 15	Desintegração	19 mm
Gomes (2001)	3,6,9,15,18 e 21	-	-
NBR 12697	2,4,6,9,12 e 15	Desintegração, rachadura, fissuração e lasqueamento	19 mm
BS 812-112	-	-	2,36 mm
SANS 3001 AG14	1,5,10 e 20	Desintegração	-
NZTA T20	-	-	2,36 mm

Fonte: Compilação do Autor.

Gomes (2001) destaca que o etilenoglicol é amplamente utilizado por ser um material que reage com os argilominerais expansivos da rocha, principalmente aqueles do grupo das esmectitas. Essa reação forma um complexo organo-argiloso que apresenta um volume superior que o próprio argilomineral. Sendo assim, a resistência à desagregação de agregados em etilenoglicol pode ser avaliada, desde que existam no material rochoso quantidades de argilomineral distribuídos com capacidade de absorção, para que causem desagregações.

Leyland (2014), Paige-Green (2007) e Momayez (2014) apresentam algumas críticas aos métodos existentes de ciclagem de agregados com etilenoglicol, utilizados em rodovias, indicando dois problemas principais, sendo eles:

- A representatividade da amostra: Quando um grupo de agregados são selecionados aleatoriamente para a ciclagem, é comum que apenas um pequeno número mostre evidências de desintegração.
- Definir um único parâmetro para a durabilidade: Ao fim do procedimento de ciclagem, em alguns métodos, não é alcançado um valor que caracterize o comportamento das amostras durante a submersão na solução. Ainda reforça que, para especificar o material em termos de resultados, faz-se necessário que o método retorne um único valor, como um ensaio de resistência mecânica.

Por fim, Paige-Green (2007) sugere que mais importante que a escolha do método de ciclagem com etilenoglicol é a combinação do mesmo com ensaio de resistência mecânica, desta maneira fica evidente a existência de um parâmetro a ser avaliado. Nesse contexto, o

Quadro 2.38, apresenta um resumo da forma como alguns autores abordaram a ciclagem com etilenoglicol em seus trabalhos.

Quadro 2.38 - Procedimentos de ciclagem com etilenoglicol encontrados na literatura técnica.

<i>Material geológico</i>	<i>Quantidade de amostra</i>	<i>Dimensões da amostra</i>	<i>Tempo de imersão (dias)</i>	<i>Ensaio Físicos</i>	<i>Fonte</i>
Basalto	10 unidades	25,4<#<19,1 mm	21	Ao fim dos ciclos: RF, PN	Gomes (2001)
Basalto	40 unidades	13,2<#<9,5 mm	45	Ao fim dos ciclos: ACV	Paige Green (2007)
Basalto	40 unidades	13,2<#<9,5 mm	20	A cada 5 ciclos: RF	Leyland et al (2014)
Calcário, Mármore e Quartzito	4 kg	-	30	Ao fim dos ciclos: RF, PN	Bista, Krishna Tamrakar, Naresh Kazi (2017)
Arenito	-	3× 3 ×3 cm	30	A cada ciclos: RF	Bhattarai; Kazi (2017)
Arenito	2,7 kg	13,2<#<9,5 mm	21	Ao fim dos ciclos: ACV	Van Blerk et al. (2017)

Notas:

RF: Registro Fotográfico (ou visual)

PN: Peneiramento

ACV: Valor para esmagamento do agregado (Ensaio de res. ao esmagamento).

Fonte: Compilação do Autor.

2.5 BASALTOS DO GRUPO SERRA GERAL

O Grupo Serra Geral, anteriormente chamado de Formação Serra Geral, é o resultado de uma intensa atividade ígnea que ocorreu no período Cretáceo e recobre aproximadamente 75% da Bacia do Paraná é composta por sucessões de derrames de basalto de natureza toleítica, e subordinadamente por riolitos, dacitos e riodacitos, formando camadas com espessuras variáveis que atingem no máximo 1700m, sendo a maior área continua composta por rochas ígneas do Brasil. (HARTMANN, 2014; MINEROPAR, 2019; PATIAS, 2010; MELFI et al., 1988; WAICHEL et al., 2007). A Figura 2.7, representa a distribuição da Formação Serra Geral ao longo do estado do Paraná.

Figura 2.7 - Grupo Serra Geral disposto no Estado do Paraná.

Fonte: Da Luz Rocha(2010).

Segundo Da Cunha; Martins, (2017), com objetivo de obter um melhor entendimento do Grupo Serra Geral no território paranaense, o Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR, 2013) apresentou uma subdivisão em quatro formações e treze membros (Quadro 2.39).

Quadro 2.39 - Formações pertencente ao Grupo Serra Geral.

<i>Formação</i>	<i>Membro</i>	<i>Litotipos</i>
Covó	Guarapuava	Ignimbrito, riodacito, adensito, quartzo-latito, riolito.
	Palmas	Ignimbrito.
Candói	Três pinheiros	Basalto hipohialino.
	Foz do Areia	Basalto fanerítico cinza.
	Ivaiporã	Basalto fanerítico cinza e brechas.
	General Carneiro	Basalto fanerítico cinza e brechas.
	Chopinzinho	Basalto hipohialino e Basalto fanerítico.
Barracão	Flor da Serra	Basaltos roxo-esverdeado.
	Cantagalo	Basalto vesicular e Arenito.
	Salgado Filho	Basalto vesicular, brechas e Arenito.
Cascavel	Toledo	Basalto cinza-arroxeadado e Arenito.
	Santa Quitéria	Basalto vesicular e brechas e Arenito.
	Foz do Iguaçu	Basalto cinza, Basalto vesicular e brechas.

Fonte: MINEROPAR(2013).

Estudos como, Biffi; Paisani, (2018); Cássia; Biff, (2021); Da Cunha; Martins, (2017); Lima; Flores, (2017), já incorporam as subdivisões propostas pela MINEROPAR no território paranaense.

2.5.1 FORMAÇÃO CASCABEL

A ênfase na Formação Cascavel entregue nesse item, é em razão das amostras do presente estudo serem provenientes do município Foz do Iguaçu/PR que está localizado dentro dos limites desta formação.

A Formação Cascavel está disposta a leste ao longo do planalto homônimo seguindo em direção a oeste até a calha do rio Paraná, seguindo ao sul até a calha do rio Iguaçu, limitando-se ao norte a formação Caiuá (MINEROPAR, 2013).

Devido à sua grande extensão territorial, a formação Cascavel (Figura 2.8) é dividida em três membros, sendo:

- Membro Foz do Iguaçu: Inicia-se nas margens do rio Paraná, na cidade de mesmo nome, expandindo-se até o planalto Cascavel (Figura 2.9.A);
- Membro Santa Quitéria: Limitada ao norte, leste e sul pelo membro Foz do Iguaçu, estende-se a leste até as proximidades do município de Guaraniaçu (Figura 2.9.B);
- Membro Toledo: Seu afloramento inicia-se na idade de Itaipulândia e estende-se em direção ao norte até o município de Guairá, a leste tem seu limite nas proximidades dos municípios de Campo Mourão e Roncador (Figura 2.9.C).

Figura 2.8- Formação Cascavel em destaque no Grupo Serra Geral

Fonte: Adaptado de MINEROPAR(2013).

Figura 2.9- Disposição dos membros da formação Cascavel. (A) Membro Foz do Iguaçu. (B) Membro Santa Quitéria e (C) Membro Toledo

Fonte: Adaptado de MINEROPAR(2013).

2.5.1.1 Geoquímica

Os basaltos do Grupo Serra Geral, são em grande parte, maciços, com alguns níveis vesiculares e/ou amigdaloidas, com coloração cinza a preta, em alguns casos adquirem tonalidades verde-amarronzadas devido ao seu processo de alteração (COSTA, 2015).

As rochas basálticas desse grupo, frequentemente apresentam em sua composição mineralógica, fenocristais, microfencristais de augita, plagioclásios, piroxênios, pigeonita e pequenas proporções de titanomagnetita e rara olivina (COSTA, 2015). São predominantemente constituídas por basaltos de natureza toleítica e podem separadas em dois grupos para classificação geoquímica, definidos em função do teor de Dióxido de Titânio (TiO_2) (HARTMANN, 2014; COSTA, 2015; SQUISATO et al., 2009), sendo:

- Baixo $\text{TiO}_2 < 2\%$, caracterizado pelo empobrecimento em P, Sr, Ba, La, Zr, Ce e Y. Essas rochas podem ser classificadas como Basaltos Toleíticos, adensitos toleitico.
- Alto $\text{TiO}_2 > 2\%$, caracterizado pelo enriquecimento de Rb, Th e U e maior porcentagem de metais alcalinos. Essas rochas são classificadas como Andesi-basaltos toleíticos, lati-basaltos e latitos.

Marques (1988) e Mantovani et al.(1989), avaliaram as concentrações de TiO_2 e outros elementos encontrados no basalto da bacia do Paraná, e subdividiram o grupo Alto em três subgrupos:

- Urubici: $\text{TiO}_2 > 3,3\%$, $\text{Sr} > 550\text{ppm}$, $\text{Ti/Y} > 500$ e $\text{Zr/Y} > 6,5$.
- Pitanga: $\text{TiO}_2 > 2,9\%$, $\text{Sr} > 350\text{ppm}$, $\text{Ti/Y} > 350$ e $\text{Zr/Y} > 5,5$.
- Paranapanema: $1,7\% < \text{TiO}_2 < 3,2, 9\%$, $200\text{ppm} < \text{Sr} < 450\text{ppm}$, $\text{Ti/Y} > 330$ e $4 < \text{Zr/Y} < 7$.

O grupo Baixo foi dividido em outros três subgrupos:

- Gramado: $0,75\% < \text{TiO}_2 < 1,9\%$, $140\text{ppm} < \text{Sr} < 400\text{ppm}$, $\text{Ti/Y} < 300$ e $3,5 < \text{Zr/Y} < 6,5$.
- Esmeralda: $1,1\% < \text{TiO}_2 < 2,3\%$, $120\text{ppm} < \text{Sr} < 250\text{ppm}$, $\text{Ti/Y} < 330$ e $2 < \text{Zr/Y} < 5$.
- Ribeira: $1,5\% < \text{TiO}_2 < 2,3, 9\%$, $200\text{ppm} < \text{Sr} < 375\text{ppm}$, $\text{Ti/Y} > 330$ e $3,5 < \text{Zr/Y} < 7$.

A formação Cascavel, está disposta na região central da província magmática do Paraná, a qual está localizada entre os lineamentos do Rio Uruguai e Rio Piquiri. Rochas dessa região são classificadas geoquimicamente nos grupos Pitanga e Paranapanema (COSTA 2015).

De uma maneira mais específica a Mineropar (2013), apresenta uma associação das características geoquímicas dos membros da Formação Cascavel. Para o membro Toledo, os basaltos são agrupados em Adensi-basaltos e Olivina-basalto.

O membro Santa Quitéria apresenta Adensi-basaltos e Lati basaltos, ainda ressalta que os basaltos desse membro são enriquecidos Cr, Cu e Au e pobres em Pt e Pd.

Por fim, os basaltos do membro Foz do Iguaçu são agrupados em Olivina-basalto, Adensi-basaltos e Lati-basalto, demonstrando enriquecimentos em Cr, Au, Ni, Hg, Ba, Rb, Sr, Ce, Zr, Th e La e o empobrecimento em Pt e Pd.

2.5.1.2 Mineralogia

São encontradas algumas variações litológicas de basalto no município de Foz do Iguaçu, em específico na região da Usina Hidrelétrica de Itaipu, próximo ao Rio Paraná, segundo ITAIPU, (2009), Patias (2010) e Costa (2015), a UHE de Itaipu possui cinco unidades mapeadas, denominadas:

- Derrame E: Basalto Denso;
- Derrame D: Basalto denso rosado, duro, medianamente a muito fraturado;
- Derrame C: Brechas no topo seguido por basalto vesicular e amigdaloidal rosado e um núcleo de basalto cinza.
- Derrame B: Brechas no topo com a presença de manchas seguido por basalto denso e basalto vesicular amigdaloidal.
- Derrame A: Brechas seguidos de basalto vesicular/amigdaloidal.

A Figura 2.10 apresenta um perfil típico de sondagem com a localização, denominação e descrição breve das amostras analisadas.

Figura 2.10- Exemplo de um perfil de sondagem da região da UHE Itaipu.

Fonte: Oliveira (2012).

Em especial dois litotipos são descritos, devido sua utilização neste estudo, sendo eles basalto cinza de coloração cinza maciço e basalto vesicular, ambos encontrados dentro dos limites do município de Foz do Iguaçu.

Amostras de agregados de basalto cinza maciço, são basaltos com mineralogia primária compostas por traços de fenocristais de plagioclásio de até 2,4mm, 45-60% de cristais euédricos de plagioclásio com até 0,4mm, compondo a matriz da rocha. 40-50% de cristais subédricos de piroxênios com tamanhos entre 0,3 a 0,1 mm (COSTA, 2015). De 5-10% de minerais opacos subédricos, no topo da unidade há 20% vidro vulcânico oxidado. As amígdalas variam de arredondadas a alongadas e são preenchidas por quartzo, zolita e celadonita e argilominerais (COSTA, 2015).

Agregados de basaltos vesicular são basaltos equigranular, localmente porfiritico, hipohialino, amigdaloidal com textura intergranular e intersertal (COSTA, 2015). Composto por 40-55% de cristais euédricos de plagioclásio com 0,3-0,5mm. De 25%-

40% de cristais subédricos de clinopiroxênio, até 5% de cristais subédricos de olivina e 10-30% de traços de minerais opacos em meio a matriz vítrea (COSTA, 2015). As amígdalas possuem em torno de 2 a 5 mm de diâmetro, são arredondadas e estão preenchidas por clorita, carbonato, quartzo e zeólita (COSTA, 2015).

2.5.1.3 Derrames

Estudos com enfoque nos aspectos vulcanológicos, realizados no Grupo Serra Geral na porção Oeste do Paraná, portanto na Formação Cascavel, permitiram identificar derrames do tipo *phaoehoe* (superfície lisa, onduladas ou em cordas), associados com derrames maciços (WAICHEL 2006).

Os derrames *phaoehoe* ocorrem como fluxos compostos, formando pequenos corpos de espessura entre 0,5 m e 2m e como fluxos simples com espessuras de até 35m (WAICHEL, 2006; WAICHEL et al., 2007).

A região Oeste do Paraná possui uma estruturação dos derrames basálticos em três zonas, inferior, núcleo e superior, sendo típicos de derrames *phaoehoe* nos municípios de Cascavel, Matelândia e Toledo, todos pertencentes à formação Cascavel (WAICHEL, 2006; WAICHEL, et al., 2007).

Nesses municípios, a porção superior do derrame são predominantes de feições de superfície tipo cordas, na parte central dos derrames possui a existência de vesículas, microvesículas entre cristais de plagioclásio e piroxênio (WAICHEL, 2006; WAICHEL et al., 2007).

2.6 AREIA ARTIFICIAL

Neste capítulo são apresentadas considerações gerais relacionadas a areia artificial e uma breve abordagem de seu contexto de extração na região oeste estado do Paraná.

2.6.1 ASPECTOS GERAIS

Conforme Almeida e Luz, (2012), a mineração de brita e areia está entre as mais importantes atividades de extração mineral no Brasil, ainda ressaltam que, quando comparado o volume de produção de agregados com o volume de produção de outros minérios, tornam-se o principal produto mineral nacional.

De acordo com DAVID et al. (2004), o setor da construção civil no Brasil é o maior responsável pelo consumo de agregados. Guimarães e Gomes, (2020) afirmam que a demanda por produção de areia vem sofrendo crescente aumento e isto está relacionado a expansão da infraestrutura interna e a escassez de abastecimento.

Essa escassez pode ser relacionada aos fatores econômicos e ambientais. Almeida e Rezende (2013), destacam o baixo valor unitário dos agregados para construção civil, por consequência, jazidas localizadas fora de um raio de 100 km do mercado consumidor, são economicamente inviáveis.

No âmbito ambiental, as restrições quanto a extração de areia podem tornar o empreendimento inviável, devido aos impactos que podem ser causados, que são desde a geração de resíduos nos rios até a mudança do nível do lençol freático, além da existência de outros agravantes como, desmatamento e alteração de paisagem. Mesmo com todas as limitações, estima-se que 70% da produção de areia natural vem de leito de rios (ALMEIDA E LUZ, 2012).

Nesse contexto de preservação do meio ambiente e de questões econômicas envolvidas na obtenção de areia natural, principalmente em grandes centros, que a exploração e identificação de materiais alternativos ascendem para atender a demanda por areia natural, com o destaque areia artificial.

Por definição areia artificial é um derivado do processo de produção de agregado graúdo, sendo a fração menor que 9,5mm. Ainda possui duas divisões, onde na fração de 9,5mm a 4,8mm é associada a brita 0 e frações menores que 4,8mm denominada de pó de pedra (ALMEIDA E LUZ, 2012).

SILVA et al. (2019), salienta que areia artificial possui um baixo valor comercial, pois ainda é considerada um material secundário pelos empreendedores, devido ao pouco conhecimento sobre suas aplicações, vantagens e por considerarem um entulho. Por consequência disso permanecem por muito tempo estocados em pilhas nas pedreiras, causando impactos sobre o meio ambiente devido a sua geração de poeira.

Por outro lado, Almeida e Rezende (2013), destaca que o produto tem um potencial nicho de mercado, devido à dificuldade de encontrar depósitos de areias em grandes centros, além disso, Silva et al. (2005) destacam que a areia artificial apresenta a vantagem por ser mais uniforme facilitando sua aplicação na construção civil, melhorando a trabalhabilidade em argamassas de revestimentos e concreto, por fim, a aplicação na granulometria correta em filtros e drenos de barragens (ITAIPU, 2009).

2.6.1.1 Produção de areia natural e artificial no Oeste do Paraná

Estima-se que o estado do Paraná, possui cinco milhões de metros cúbicos de reservas medidas de areia natural, por consequência, agrega centenas de empreendimentos destinados a produção do agregado, com atuação principal nas inundações do rio Iguaçu, além dos rios Paraná, Paranapanema e Tibagi (SANTOS, 2013).

O Rio Paraná apresenta extração de sedimentos no seu leito desde a montante do lago de Itaipu localizado no município de Guaíra até a divisa com o Estado de São Paulo, sendo o maior responsável pelo fornecimento de areia natural para a construção civil. Devido ao grande volume e o baixo custo de produção, o produto final é destinado ao abastecimento de grandes centros urbanos como, Paranavaí, Maringá, Londrina, Campo Mourão, Cascavel e Foz do Iguaçu. (PELLENZ, 2001; SANTOS, 2013).

Nesta região os conflitos estão no âmbito ambiental, pois as atividades de extração de areia são contestadas pelo poder público, em 2012 o tribunal regional da quarta região manteve a proibição de extração de areia nas margens do Rio Paraná, desta maneira, produção de areia no Rio Paraná, limita-se apenas as áreas concedidas e são concentradas em poucos mineradores.

Pellenz (2001), destaca que apesar de Foz do Iguaçu muitas vezes aparecer nas estatísticas como produtor de areia, o município apenas recebe areias extraídas à montante que são transportadas pelo lago de Itaipu. Vale ressaltar que o município de Foz do Iguaçu está a 215 km do polo de extração.

Conforme o Cadastro Nacional dos Produtores de Brita (DNPM, 2018), o Estado do Paraná é o sexto maior produtor de brita do Brasil e o terceiro maior em número de empreendimentos de britagem.

A região oeste é um importante polo produtor de agregados graúdo, onde blocos de basalto são beneficiados em pedreiras e comercializados, abastecendo o mercado consumidor da região (PELLENZ, 2001; MINEROPAR, 2013).

De acordo com Cadastro Nacional dos Produtores de Brita (DNPM, 2018), até o ano de 2015, as pedreiras pertencentes a região oeste somam 15% dos empreendimentos que podem atuar na venda do minério no estado, os dados excluem pedreiras que são patrimônio de municípios, estado e união.

O Quadro 2.40, ilustra por cidade a quantidade de pedreiras destinadas ao comércio de agregados graúdos.

Quadro 2.40- Pedreiras comerciais dos Municípios da Região Oeste do Paraná

<i>Município</i>	<i>Porte do Empreendimento</i>			<i>Rocha</i>
	Médio	Pequeno	Micro	
Cascavel	X			Basalto
	X			
		X		
Corbélia		X		
Foz do Iguaçu		X		
Guaraniaçu		X		
Itaipulândia		X		
Matelândia		X		
Palotina		X		
Pato Bragado		X		
Santa Helena			X	
Santa Lúcia			X	
Santa Tereza do Oeste	X			
Santa Terezinha de Itaipu			X	
São Miguel do Iguaçu		X		
Terra Roxa		X		
Toledo		X		

Fonte: DNPM, 2018.

Conforme os dados apresentados no Quadro 2.40, a grande maioria dos empreendimentos dessa região são pequeno e micro porte e todas possuem o basalto como a rocha de extração.

Desta maneira, a utilização da areia artificial no mercado consumidor local, pode ser uma alternativa econômica para os empreendedores, além de ser uma iniciativa importante para o caráter ambiental da região, indo de acordo com as afirmações de SILVA et al. (2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os diferentes procedimentos que estão sendo realizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Nos próximos itens são apresentados as rotinas de ensaios adotadas, descrição dos materiais presentes na pesquisa, além dos delineamentos dos ensaios de alteração, aferição das características físico-químicas da água de ciclagem e da caracterização físico-mecânica do material rochoso.

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foram adotadas as seguintes condições:

- Desenvolvimento de uma rotina de ensaios para caracterização geotécnica de agregado graúdo ($6,3 < \phi < 9,5$ mm) de rocha basáltica;
- Avaliar o comportamento químico-físico-mecânico de agregados de basalto condicionados a diferentes ambientes de alteração, buscando averiguar a agressividade de cada meio no processo de alteração e na alterabilidade do material rochoso.
- Concepção de procedimentos para a caracterização mecânica da rocha, por meio da resistência ao esmagamento, bem como para a avaliação da depreciação desses parâmetros mediante aos processos de alteração impostos pelos ensaios de ciclagem.

Para o desenvolvimento experimental do presente estudo, o organograma da Figura 11 ilustra as etapas adotadas na rotina de ensaios, as quais foram divididas em três grandes grupos, as quais serão detalhadas nas sequências do texto: caracterização geotécnica, ensaios de alterabilidade e monitoramento da água de ciclagem.

Figura 11- Organograma da rotina do estudo de alteração.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 MATERIAL DE ESTUDO

As amostras para a realização desse estudo tratam-se de agregados de basalto procedentes dos municípios de Foz do Iguaçu-PR.

3.2.1 Basaltos

As amostras foram selecionadas das pilhas de materiais remanescente da UHE-Itaipu, da época das obras de construção. Desta forma, o material rochoso encontrava-se exposto às condições climáticas locais por mais de quatro décadas. Em meados de 2018, anterior a esta pesquisa, estes blocos de rocha foram selecionados por litotipo basáltico (dimensões iniciais: 100<#<200mm) e beneficiados em pedreira para produção de areia artificial (dimensões finais: 0,150<#<9,5mm). Na pedreira, a moagem do material rochoso foi em britador tipo cônico. Esta etapa foi antecipada de seleção e moagem do material geológico, assim como a elaboração dos métodos de ensaio executados neste trabalho foram desenvolvidos por pesquisadores do CEASB-PTI (2018-2019).

Para a presente pesquisa, selecionou-se aproximadamente 110 kg de dois litotipos basálticos, dos derrames E e D (ilustrados na Figura 12) sendo respectivamente, basalto maciço compacto e basalto vesicular.

Em laboratório, o material foi lavado em betoneira, seco ao ar e novamente peneirado em agitador de peneira quadradas (50x50 cm) para seleção da faixa granulométrica entre 6,3 e 9,5 mm. Essas dimensões foram definidas por constituírem a porção grossa da areia artificial, também chamada de brita zero, sendo uma alternativa aplicação da areia natural em empreendimentos e possibilitando a destinação comercial de uma faixa granulométrica tratada como descarte na região e potencialmente poluidora quando não há um armazenamento correto nas pedreiras. A utilização de dimensões inferiores poderia dificultar a quantificação dos índices físico-mecânicos ao longo dos ensaios de ciclagem.

Com base no exposto, os materiais geológicos foram assim denominados:

- BMC: basalto maciço compacto (Figura 12.A);
- BVA: basalto vesicular (Figura 12.B);

Figura 12 - Litotipos basálticos de origem do município de Foz do Iguaçu. (A) Basalto maciço compacto. (B) Basalto vesicular.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 ANÁLISE QUALITATIVA

As análises qualitativa do material geológico foram realizadas de acordo com critérios de cor, coerência, estrutura, textura, granulação e grau de alteração.

Com relação à cor, as amostras são classificadas visualmente, em função da cor predominante da matriz do basalto. Quanto à estrutura, no contexto da rocha basáltica, podem ser classificadas em estrutura maciça, vesicular, amigdaloidal ou brecha basáltica.

3.4 ENSAIOS DE ALTERABILIDADE

Os ensaios de alterabilidade foram conduzidos em recipientes de volumes específicos, em função do critério de monitoramento. A necessidade de separação em recipiente de diferentes volumes deve-se à necessidade de fracionar as amostras para realização dos ensaios destrutivos, em função dos estágios de alteração e/ou do tempo de ciclagem. Já para o controle dos parâmetros físico-químicos da água é necessário manter a proporção amostra/água ao longo da ciclagem. Desta forma, os ensaios foram assim denominados:

- Monitoramento físico-químico da água de ciclagem (F-Q_{água}). O objetivo foi analisar o comportamento da água durante o ensaio de ciclagem, em função do processo de dissolução dos minerais da rocha. O ensaio foi conduzido em recipientes plásticos com capacidade para 1000 ml. Nestes, são acomodadas aproximadamente 400g de agregado e saturados com 400ml de solução (Figura 13.A).
- Monitoramento físico-mecânico da rocha (F-M_{rocha}). O objetivo foi analisar as propriedades físicas (densidade, porosidade e absorção de água) e mecânicas (resistência ao esmagamento) dos agregados, ao longo dos ensaios de ciclagem. Os ensaios foram realizados em recipientes plástico com capacidade para 12 litros, nos quais inicialmente são acomodados aproximadamente 10 kg de agregados, saturados com 7 litros de solução (Figura 13.B). Ao longo dos ensaios para Ciclagem água-estufa ao fim de cada bateria (20 ciclos), eram retiradas aproximadamente 1,6kg de amostra para as análises, o mesmo ocorre a

Ciclagem Natural controlada que no entanto para cada bateria foram 40 ciclos.

Figura 13 – (A) Recipiente para monitoramento físico-químico da água de abrasão. (B) Recipientes para monitoramento físico-mecânico dos agregados.

Fonte: Acervo do autor (2020).

A seguir serão detalhadas as principais considerações exploradas nos ensaios de alteração, em função do pH, temperatura, variação ou não de saturação e exposição aos raios Ultra Violeta. Estes ambientes foram desenvolvidos simultaneamente nos ensaios de monitoramento físico-químico da água (F-Q_{água}) e físico-mecânico do agregado (F-M_{rocha}).

3.4.1 Ciclagem Natural controlada (CNC)

O ensaio de ciclagem natural controlado, foi assim denominado, por expor o material rochoso ao ambiente externo com exposição aos raios UV, mas com controle do tempo de saturação e de secagem do material rochoso. O Quadro 41 apresenta um resumo das variações da ciclagem controlada em campo, em função do pH da água de abrasão.

Quadro 41- Variações do ensaio de alteração ciclagem controlada de campo.

<i>Código</i>	<i>Amostras</i>		<i>Um Ciclo completo</i>	<i>Uma Bateria</i>
	<i>BMC</i>	<i>BVA</i>		
CNC (Água destilada - pH 7,0)	X	X	24 h	4 semanas em saturação. 2 semanas em secagem ambiente.

Nota: X indica que o litotipo está presente na rotina de ciclagem.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 3.4 ilustra a ciclagem natural controlada em execução, durante o seu período de saturação. As amostras foram dispostas em uma bancada de ensaio projetada e construída por pesquisadores do CEASB/PTI, instalada em campo aberto dentro da área das obras da UTFPR-TD. Para proteção das amostras e questões ergonômicas, a bancada de madeira foi construída com dimensões de 3m de comprimento, 1,5m de largura e 80 cm de altura. Para acomodar as amostras foram dispostas ripas espaçadas a cada 50 cm formando um lastro vazado e tela de polipropileno de 50x50 mm. Para evitar a proliferação de insetos, uma tela de Nylon (malha de 1,4 x 1,6mm, cor cinza) foi fixada sobre o lastro da bancada e sobre os recipientes (Figura 14).

Figura 14- Ciclagem natural controlada. (A) Vista geral da localização. (B) Vista em perspectiva da bancada. (C) Agregados em saturação para ensaios físico-químico da água de abrasão. (D) Agregados em saturação para ensaios físico-mecânicos.

Fonte: Acervo do autor (2020).

3.4.2 Ciclagem Água-Estufa (CAE)

O ensaio de ciclagem Água-Estufa, inicialmente foi conduzido a partir de adaptações da NBR 12696/92, que recomenda ciclos de saturação (16 ± 1 h) e de secagem em estufa a 110°C (8 ± 1 h). No entanto, para otimizar o período de saturação das amostras, foram realizados ensaios de tempo de saturação e tempo de secagem.

Desta maneira, para definição do período de saturação, foi utilizado o método de absorção de Hamrol (1961) adaptado por Oliveira (2012). Para isso, realizou-se os seguintes procedimentos:

- Quantidade de amostra: 100 ± 20 g de agregado de cada amostra, em triplicata;
- Inicialmente as amostras foram secas em estufa à 105°C , por 24h;
- Para obtenção da curva de saturação as amostras foram submergidas em água destilada e a cada intervalo de tempo realizavam-se as leituras de massa. Para aferição das leituras, as amostras eram secas em superfície com o auxílio de uma flanela úmida. As leituras foram registradas para os tempos de 0, 120, 240, 360, 480 e 1800 minutos de submersão. Após o período de submersão

passou a ser acompanhado a velocidade de secagem a 105°C com tempos de leitura aproximadamente 0, 60, 120, 180 e 240 minutos para secagem;

Os valores encontrados para verificar o tempo necessário de saturação e de secagem em estufa, foram respectivamente 3h e 4h. Devido a necessidade de se adequar as normativas de restrição ao uso laboratório durante a pandemia COVID-19, adotou-se que cada ciclo seria composto por 3 horas de saturação e 21h de secagem, totalizando 1 ciclo por dia de ensaio.

Definido a duração do ciclo água-estufa, acrescenta-se que algumas medidas foram tomadas para otimizar o manuseio dos agregados, no que se refere à disposição em bandejas e estufa. Para possibilitar a realização do ensaio destrutivo (resistência ao esmagamento), em fases ao longo dos ciclos de alteração e em triplicata, foram necessários inicialmente 10 kg de amostra, desconsiderando a caracterização de amostra inalterada (ciclo zero). Desta forma, as amostras foram dispostas em recipiente plástico, forrado com uma tela de Nylon (malha de 1,4 x 1,6mm). A tela tem a função de auxiliar no escoamento da água e transferência para bandejas de alumínio (secagem em estufa). Destaca-se, ainda, que durante o período de saturação as bandejas foram cobertas com lona para evitar proliferação de insetos.

As bandejas de alumínio foram projetadas em função do tamanho das estufas e do volume de amostras, para conseguir acomodar todas as amostras nos equipamentos disponíveis para o ensaio.

Com relação a composição química da água de saturação, sendo água destilada, pH 7. Sobre a temperatura da estufa, duas variações de temperatura de secagem foram adotadas, sendo 45°C e 105°C. Por fim, o Quadro 42, exibe as composições elaboradas para os ensaios de ciclagem água-estufa, conforme os parâmetros de estudo a Figura 15 demonstra a disposição das ciclagens.

Quadro 42- Variações do ensaio de alteração ciclagem água-estufa.

<i>Código</i>	<i>Amostras</i>		<i>pH</i>	<i>Tempo (h) - Temperatura (°C)</i>		<i>Um ciclo</i>	<i>Uma bateria</i>
	<i>BMC</i>	<i>BVA</i>		<i>Saturação</i>	<i>Secagem</i>		
CAE - II	X	X	7	3h – amb	21h– 45°C	24h	20 ciclos
CAE - III	X	X	7		21h– 105°C		

Nota: “amb” corresponde a temperatura em que está o ambiente.

Fonte: Acervo do Autor (2020).

Figura 15- Vista geral dos ensaios de ciclagem água-estufa durante período de saturação.

Fonte: Acervo do autor (2020).

3.4.3 Registro fotográfico

A documentação fotográfica do processo de alteração das amostras foi realizada por câmera profissional (Equipamento pertencente a UTFPR-TD), com lentes e equipamento com finalidades específica, sendo:

- Registro fotográfico de detalhe para monitoramento qualitativo das alterações mineralógicas (RFI). Nesta etapa, aproximadamente três a quatro agregados foram selecionados em cada recipiente de ciclagem (ciclagem tipo F-Q_{água}), para permitir o monitoramento num mesmo agregado ao longo dos ensaios de ciclagem, individualizados dentro do recipiente em um copo plástico de 50 ml. Para tanto, foi utilizada câmera profissional, com lente macro de 105 mm 1:2.8. A resolução desta lente permite analisar a superfície dos minerais em maior detalhe em relação as lentes convencionais. O processo de registro fotográfico dessa etapa (Figura 16) consiste em dispor os agregados

na posição vertical (a proximidade da lente produz sombra sobre o objeto), fixar a câmera a um tripé nivelado e o disparo deve ser automatizado (função timer - 2 segundos) para que não ocorra deslocamentos na câmera devido a pressão exercida no botão de disparo. O ajuste na luz da câmera também é necessário e deve ser configurado para balanço de branco, de maneira a manter fidelidade às cores dos minerais.

Figura 16- Aparato para a realização da documentação fotográfica tipo RFI.

Fonte: Acervo do autor (2020).

3.4.4 Parâmetros físico-químicos de monitoramento da água de ciclagem

Nesse item foi detalhado os procedimentos de monitoramento dos parâmetros físico-químicos da água de ciclagem, referente aos ensaios em recipientes com volume de 1000 ml (F-Q_{água}).

Em resumo são as leituras semanais dos parâmetros de potencial hidrogeniônico pH, condutividade elétrica (CE), potencial redox (Eh) e temperatura. Os equipamentos pertencentes a UTFPR-TD utilizados foram:

- Aparelho pHmetro modelo LUCA-210, calibrado com solução padrão pH 4 e 7;

- Aparelho Condutivímetro modelo mCA 150, calibrado com solução padrão de 146,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- Aparelho pHmetro modelo LUCA-210 adaptado para potencial redox, aferido com solução padrão de Light (JARDIM, 2018).

Além disso, a fim de não danificar os equipamentos, o procedimento de leitura deve ocorrer com a introdução dos eletrodos dentro de drenos (Figura 17.B), elaborados com tubo de PVC de diâmetro 50 mm, com furos na parte inferior em contato com a água (Figura 17.A).

Figura 17- Esquema para realização das leituras dos parâmetros físico-químicos da água de abrasão. (A) Recipiente com o dreno. (B) Exemplo de uma leitura de pH.

Fonte: Acervo do autor (2020).

3.5 ÍNDICES FÍSICOS

Os ensaios para aferição dos índices físicos seguiram como base os procedimentos da NBR NM 53/2009 (Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água), com adaptação na granulometria e quantidade de amostra (aproximadamente 400g). Cabe ressaltar que os ensaios foram realizados

para cada bateria em todas as variações de ciclagem, antecedendo o ensaio de resistência ao esmagamento. Estes ensaios de índices físicos possibilitaram a obtenção dos parâmetros de densidade aparente (ρ_a), porosidade aparente (n_a) e a absorção aparente (α_a).

Para obter esses parâmetros as amostras foram previamente lavadas e secas em estufa por 24h à 105°C para registro da massa seca (M_{sec}).

Posteriormente as amostras foram saturadas em água destilada, por um período mínimo de 24h. Na sequência enxugadas com auxílio de um pano absorvente até que toda sua água visível seja eliminada e o registro da massa saturada superfície seca (M_{sat}) realizado. Logo após, as amostras foram submergidas com o auxílio de um recipiente metálico semiesférico em água, e foi realizada a aferição do valor de massa submersa (M_{sub}).

Após o procedimento de pesagem e seus respectivos registros, a próxima etapa é realização dos cálculos dos parâmetros ρ_a , n_a e α_a , conforme as Equações 2, 3 e 4.

$$\rho_a = \frac{M_{sec}}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (2)$$

$$n_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

$$\alpha_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100 [\%] \quad (4)$$

3.6 RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

O ensaio de resistência ao esmagamento utilizado nesse trabalho foi uma releitura dos métodos presentes na bibliografia (ver capítulo 3.3.2 - Resistência ao Esmagamento). O intuito desta etapa foi explorar o método para a determinação da resistência ao esmagamento (R_E) de agregados da faixa granulométrica específica desse estudo, bem como quantificar se este parâmetro sofre alguma alteração ao longo dos ensaios de ciclagem realizados neste estudo. Em virtude da gama de ensaios de

ciclagem (variação de temperatura, oscilação do nível de água, dentre outros), para monitoramento do R_E pelas normativas existentes, demandaria uma grande quantidade de recursos para abranger o volume expressivo de amostras, principalmente espaço físico e muitas estufas. Assim, buscou-se esforços para reduzir a escala do ensaio e manter a representatividade dos resultados.

Desta forma, foi confeccionado um aparato adaptado para a prensa universal de ensaios (Figura 18). O aparato é constituído de embolo, cilindro e base (Figura 19), usinados em aço SAE 4140 (densidade de $7,85 \text{ g/cm}^3$ e tensão de escoamento de 415 MPa), com tratamento térmico para aumentar sua dureza (não se dispõem de equipamentos para aferição da dureza). As peças do aparato são livres e a fixação é móvel, para permitir a limpeza e remoção da amostra após cada ensaio.

Figura 18- Disposição do conjunto na prensa utilizada para execução do ensaio e detalhe do aparato confeccionado para ensaio de esmagamento em escala reduzida.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19- Peças constituintes do aparato de ensaio de esmagamento em pequena escala.

Legenda: 1 – Cilindro maciço de aplicação de carga; 2- Cilindro porta-amostra; 3- Base circular; 4- Anel de fixação; 5- Pinos de fixação.

Para completar o volume do cilindro porta-amostra, para realização de um único ensaio, são necessárias aproximadamente 400g da fração 6,3<#<9,5, previamente seco em estufa. O preenchimento do porta amostra deve ocorrer em três camadas, com volumes aproximadamente iguais. Cada camada de amostra deve ser disposta dentro do cilindro metálico, sobre a qual é disposto um êmbolo de madeira. Aplicar leves golpes de martelo de borracha sobre o embolo, apenas para ajuste dos agregados. Remover o embolo e repetir o procedimento para as camadas subsequentes (Figura 3.20).

Figura 3.20- Ilustração do procedimento de acomodação da amostra dentro do cilindro de ensaio.

*imagem dos agregados meramente ilustrativa

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21, ilustra as etapas realizadas durante o procedimento sendo:

- Acomodação da amostra dentro do aparato de ensaio e ajuste na prensa hidráulica;
- Aplicação da carga com uma velocidade de carregamento constante;
- Auxílio do extrator para remoção da amostra;
- Após a extração, manejo cuidadoso da amostra para evitar perdas de material;
- Execução da análise granulométrica da amostra.

Figura 21- 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.

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6.1 Critérios para definição da resistência ao esmagamento (R_E)

Esse item tem como finalidade detalhar as possibilidades de quantificar R_E em função do objetivo de cada análise. Desta forma, foram elencadas as seguintes considerações, que podem culminar ou não no mesmo valor de carregamento para o ensaio:

- Identificar o carregamento ideal para caracterizar o parâmetro R_E , independentemente do seu litotipo, como um método de classificação do material rochoso;
- Identificar o carregamento em função do litotipo, que permita quantificar a depreciação do valor de R_E ao longo dos ensaios de alterabilidade.

Para o alcance das considerações apresentadas, foram ser realizados testes iniciais, em triplicada, a uma velocidade de carregamento correspondente a 10kN/min, até o critério de limite de carga fixado pelo operador. Foram analisadas neste trabalho os carregamentos máximos de 25kN, 50kN, 75kN, 100kN, 200kN.

Após o alcance da carga limite (P_{lim}), a prensa foi descarregada e retirado o material contido no cilindro de ensaio. O material removido deve passar por peneiramento com o conjunto de peneiras de #6,30, #4,75, #2,36, #2,00, #1,18, #1,00 #0,60, #0,42, #0,30 e #0,15 mm.

A curva granulométrica para cada P_{lim} foi elaborada para averiguação do comportamento da redução granulométrica das partículas e equacionamento para determinação de R_E .

Como critério de caracterização de rocha, a definição de P_{lim} foi a mesma, independentemente do litotipo. No entanto, não foi descartada a possibilidade de definição de P_{lim} relacionado ao litotipo, para permitir a avaliação da redução de R_E ao longo dos ensaios de ciclagem.

O Quadro 43, apresenta um comparativo das sugestões encontradas na bibliografia, com a proposta do presente estudo para ensaios em escala reduzida.

Quadro 43- Procedimentos para realização do ensaio de resistência ao esmagamento. Conforme NBR 9938/2013, DNER 197/97, IS 2386-4/1963 e Gomes (2001).

Descrição	NBR 9938/2013 - DNER 197/97	IS 2386- 4/1963	Gomes (2001)	Sugestão deste estudo
Dimensão dos agregados (mm)	12,5<#<9,5	12,5<#<10,0	12,5<#<6,3	9,5<#<6,3
Quantidade de amostra para realização de 1 (um) ensaio	3 kg	3 kg	Não informado	400g
Abertura da peneira para determinação de Massa retida (M _{retida}) após esmagamento	2,36mm	2,36mm	1,4mm	Após interpretação da curva granulométrica
Lavagem e secagem das amostras ante do ensaio	Em água corrente e secagem em estufa 100°C	Em água corrente e secagem em estufa 110°C	Umidade natural, pois foi desenvolvido para ensaio de campo	Em água corrente e secagem em estufa 105°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 150mm de diâmetro interno e 130mm de altura, base quadrada de 230mm e altura 6,3mm, embolo com 125mm de diâmetro.	Pórtico de reação de 70 cm de altura e 30 de largura, cilindro com 69mm de diâmetro e altura de 70 mm, embolo com 167 mm de diâmetro.	Cilindro vazado com 84mm de diâmetro interno e 69 mm de altura, base circular de 150 mm e altura 30mm, embolo com 66 mm de diâmetro.
Carga/Taxa/Tempo	400 kN – Taxa: 40kN/min – 10 Min		100 kN	Após interpretação de curva granulométrica em função das diferentes cargas limites
Expressão para resultados	$R_E(\%) = \frac{M_{inicial} - M_{retida}}{M_{retida}}$			

Notas

R_E : Resistência ao esmagamento do agregado;

$M_{inicial}$: Peso da amostra antes do ensaio de esmagamento

M_{retida} : Peso da amostra retido na peneira #2,4 mm (NBR ou IS) ou #1,4 (Gomes, 2001), após ensaio de esmagamento. Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante das considerações expostas, para fins de definição P_{lim} e peneira de retenção, os cálculos iniciais serão executados conforme os índices propostos, sendo eles:

- Índice 1: Área da curva das peneiras 6,30, 4,75 e 2,36, dividido pela área total da curva;
- Índice 2: Área da curva das peneiras 6,30 e 4,75, dividido pela área total da curva;
- Índice Alfa AB: Coeficiente angular da reta entre as peneiras 2,36 e 4,75;
- Índice Alfa BC: Coeficiente angular da reta entre as peneiras 4,75 e 6,30;
- Índice #2,36: Somatório do peso retido nas peneiras 6,30, 4,75 e 2,36 dividido pelo peso total da amostra;
- Índice #4,75: Somatório do peso retido nas peneiras 6,30 e 4,75 dividido pelo peso total da amostra;
- Índice #6,30: Soma do peso retido na peneira 6,30 dividido pelo peso total da amostra.

A motivação principal dos índices foi encontrar uma equação numérica que nos retorna-se um número que pudéssemos relacionar o comportamento de alteração do material. Conforme o exposto, os índices 1 e 2 foram uma releitura do processo de cálculo de Gautam; Shakoor, (2013). Os índices Alfa, com a finalidade de acompanhar o comportamento da curva granulométrica por meio dos seus coeficientes angulares, ainda os índices #2,36, #4,75 e #6,30 que foram uma adaptação do método de cálculo utilizado nas normativas.

Por fim, resultados foram submetidos a análise de regressão com auxílio do software livre Sisvar Versão 5.6, conforme Ferreira, (2011). As análises foram executadas entre os índices com os itens citados:

- Número de ciclos,
- Índices físicos,
- Parâmetro físico-químico,
- Índice do ensaio de esmagamento.

Essas análises foram feitas para os dois litotipos (BVA e BMC) e para todas as variações de ciclagem.

4 RESULTADOS

Nesse capítulo, são apresentados os resultados do presente estudo, os quais foram divididos em:

- Caracterização das amostras;
- Análise Qualitativa;
- Índices Físicos;
- Monitoramento da água de abrasão;
- Resistência ao esmagamento.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

4.1.1 BMC – Blocos de Basalto Maciço Compacto

As amostras BMC são basalto de coloração cinza, maciço e afanítico. Seus agregados selecionados para este estudo apresentam na sua matriz pontuações com dimensões menores que 1mm, de cor cinza claro (plagioclásios) e tons de verde escuro a preto (minerais máficos), textura granular muito fina, e os minerais não apresentam propensão à orientação (Figura 22)

De acordo com Costa (2015), o material pertence ao derrame E (unidade 10 - núcleo) com percentual da minerologia composta de 45-50% de cristais de plagioclásio, 40-50% de piroxênio, olivina e minerais opacos.

As amostras se enquadram na classe de alteração A1 (não tinham evidências de alteração) e classe de coerência C1 (dificuldade de quebra com o martelo).

Figura 22 - Basalto Cinza Escuro.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1.2 BVA – Blocos de Basalto vesicular.

As amostras BVA são basaltos vesiculares com coloração rosada e pontuações de cor cinza claro (Figura 23). Conforme Costa (2015), o material pertence ao derrame D (Unidade 10 - Base), suas vesículas esféricas variam de tamanho entre 0,3 milímetros até 1,5 mm de diâmetro e são revestidas possivelmente por celadonita. O percentual mineralógico da matriz é composto com 45-60% de plagioclásio, 40-50% de piroxênio e 5-10% de minerais opacos (COSTA, 2015). As amostras se enquadram na classe de alteração A2 (apresentou alguns minerais alterados) e classe de coerência C1 (dificuldade na quebra com o martelo).

Figura 23- Basalto Vesicular.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2 ANÁLISE QUALITATIVA

A análise qualitativa dos agregados buscou avaliar a variação das características físicas da superfície da amostra, como cor, brilho e o comportamento dos minerais (observáveis a olho nu) em função do número de ciclos aos quais foram submetidas.

4.2.1 Ciclagem água estufa

Os resultados dos agregados dos dois litotipos (BMC e BVA) são apresentados a seguir.

4.2.1.1 BMC - Basalto Maciço Compacto

Conforme o agregado selecionado para acompanhar as mudanças nas características físicas visíveis a olho nu na variação da ciclagem CAE II (pH 7 e 45°C), a Figura 4.24 demonstra o mesmo em seu estado inicial (ciclo 0). Devido à sua composição mineralógica, é perceptível que, em sua coloração, possui um tom verde oliva, e não se observa a presença de poros em sua superfície.

No decorrer de 120 ciclos, a mudança superficial que ocorreu no agregado é demonstrada conforme a Figura 25. A observação notável é a descoloração da sua cor principal e a perda do seu brilho, em que o agregado adquire tons mais escuros.

Em destaque na Figura 25, está uma zona em que, no seu ciclo inicial, era composta predominantemente com a presença de minerais com tons verde oliva, além disso, não foram observadas formações de poros da fração superficial da amostra.

Nota-se que, entre os ciclos 60 e 120 (Figura 25 e Figura 26), não há mudanças significativas no agregado.

Figura 4.24- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE II - CICLO 0.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE II - CICLO 60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE II - CICLO 120

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o agregado selecionado para acompanhar a variação da ciclagem CAE III (pH 7 e 110°C), a Figura 27 apresenta o mesmo em seu estado inicial (ciclo 0).

Assim como o agregado descrito para a variação CAE II, conforme a sua composição mineralógica, é perceptível que sua coloração possui um tom verde oliva e não se observa a presença de poros em sua superfície.

Ao longo de 60 ciclos, as mudanças físicas que ocorreram no agregado são demonstradas conforme a Figura 287.

Além da descoloração e a perda evidente de brilho, as setas em vermelho indicam presença de poros na superfície do agregado, fato não observado na condição inicial do agregado; ainda, as setas em amarelo destacam minerais de cor branca, que, neste ciclo, estão perceptíveis na amostra.

Assim como ocorreu com CAE II, entre os ciclos 60 e 120 (Figura 28 e Figura 29), não há mudanças significativas no agregado.

Figura 27- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE III - CICLO 0.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE III - CICLO 60.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29- Registro com lente macro, amostra BMC - CAE III - CICLO 120.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1.2 BVA - Basalto Vesicular

De acordo com o agregado basalto vesicular (BVA), o qual foi selecionado para acompanhar a variação da ciclagem CAE II (pH 7 e 45°C), a Figura 30 apresenta o seu estado inicial (ciclo 0).

No decorrer dos 60 ciclos, as mudanças na superfície no agregado são demonstradas conforme a Figura 31. Nota-se a redução da intensidade do brilho e uma descoloração do agregado, além disso, os minerais mais claros aparentavam ter um aspecto mais fosco, conforme está circulado na Figura 31; ainda, em destaque com a seta vermelha, há presença de poros na superfície do agregado.

Além da descoloração e a perda evidente de brilho, fato não observado na condição inicial do agregado, o círculo em vermelho destaca minerais de cor branca, que neste ciclo estão perceptíveis na amostra. Assim como ocorreu com BMC, entre os ciclos 60 e 120 (Figura 31 e Figura 32) não há mudanças significativas no agregado.

Figura 30- Registro com lente macro, amostra BVA - CAE II - CICLO 0.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31- Registro com lente macro, amostra BVA - CAE II - CICLO 60.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32- Registro com lente macro, amostra BVA - CAE II - CICLO 120.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o agregado BVA, o qual foi selecionado para acompanhar a variação da ciclagem CAE III (pH 7 e 110°C), a Figura 33 apresenta o seu estado inicial (ciclo 0).

No decorrer dos 60 ciclos, as mudanças na superfície do agregado são demonstradas segundo a Figura 34.

Assim como o agregado analisado na variação CAE II, no agregado selecionado para esta variação (Figura 33), é possível visualizar a redução na intensidade do brilho e uma descoloração da superfície do agregado.

Além disso, ocorreu uma redução aparente na intensidade dos minerais de cor esverdeada, sendo possível observar a presença de pequenos poros na superfície do agregado. Entre os ciclos 60 e 120 (Figura 34 e Figura 35), não há mudanças significativas no agregado.

Figura 33- Registro com lente macro, amostra BMA - CAE III - CICLO 0.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34- Registro com lente macro, amostra BMA - CAE III - CICLO 60.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35- Registro com lente macro, amostra BMA - CAE III - CICLO 120.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Ciclagem Natural Controlada

4.2.2.1 BMC - Basalto Maciço Compacto

De acordo com o agregado de basalto cinza compacto (BMC), selecionado para acompanhar a variação da ciclagem CNC, a Figura 36 demonstra o seu estado inicial (Bateria 0).

No decorrer de 12 baterias (430 ciclos), as mudanças na superfície do agregado são demonstradas conforme as Figura 37 e Figura 38.

Nesta condição de ciclagem, o agregado mostra-se resistente ao número de ciclos exposto, não são evidenciadas grandes alterações entre as baterias, apenas uma pequena descoloração da sua cor principal e perda de brilho, adquirindo um aspecto amarelado em relação à sua cor original, em que os minerais tinham um tom mais rosado; ainda, pequenos pontos brancos podem ser observados e a ausência de poros na superfície do agregado.

Figura 36- Registro com lente macro, amostra BMC – CNC - BATERIA 0.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37- Registro com lente macro, amostra BMC – CNC - BATERIA 4.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Registro com lente macro, amostra BMC – CNC - BATERIA 12.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2.2 BVA - Basalto Vesicular

De acordo com o agregado de basalto vesicular (BVA), selecionado para acompanhar a variação da ciclagem CNC, a Figura 39 demonstra o seu estado inicial (Bateria 0).

No decorrer de 12 baterias (430 ciclos), as mudanças físicas evidenciadas no agregado são demonstradas conforme a Figura 40 e Figura 41.

Assim como ocorreu com o agregado BMC, nesta condição de ciclagem, o agregado BVA, mostra-se resistente ao número de ciclos exposto. Não são evidenciadas grandes alterações entre as baterias, apenas uma pequena descoloração da sua cor principal e perda de brilho; ainda, ausência do aparecimento de poros ou a propagação de fissuras.

Figura 39- Registro com lente macro, amostra BMA – CNC - BATERIA 0.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40- Registro com lente macro, amostra BMA – CNC - BATERIA 4.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41- Registro com lente macro, amostra BMA – CNC - BATERIA 12.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 ÍNDICES FÍSICOS

4.3.1 Ciclagem água estufa

No presente item, são apresentados os valores médios dos índices físicos das amostras BMC e BVA que foram submetidas aos 120 ciclos das duas variações de ciclagem água-estufa (CAE II – 45° e CAE III-110°). Por meio desses valores, busca-se compreender quais são as influências entre as diferenças de temperatura de secagem.

4.3.1.1 Densidade Aparente

Os valores médios de densidade aparente, ao longo dos 120 ciclos, para a variação CAE, são apresentados na Figura 42.

Figura 42- Os valores médios de densidade aparente pelo número de ciclos – CAE.

DENSIDADE APARENTE - EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO R²	
BMC - CAE II	$Y = -0.001095975871 * X + 2.98965848$ $R^2 = 0.835124$
BMC - CAE III	$Y = -0.001641583705 * X + 2.984375557$ $R^2 = 0.846374$
BVA - CAE II	$Y = -0.0005609864196 * X + 2.779706045$ $R^2 = 0.872827$
BVA - CAE III	$Y = -0.0009016337625 * X + 2.773042327$ $R^2 = 0.920388$

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o gráfico (Figura 42), as amostras de BMC, em ambas as variações, sofreram gradativas reduções conforme o número de ciclos avançava. Esse comportamento também foi observado para as amostras de BVA.

Além disso, os valores de densidade aparente para BMC obtiveram uma boa correlação conforme número de ciclos avança com R^2 em torno de 0,83, embora o valor final não seja expressivo, ocorre um indicativo de alteração nas amostras, assim como foi observado na variação BMC - CAE III, em que valores de densidade aparente obtiveram uma boa de R^2 em torno de 0,84.

Quando comparados os valores registrados em BMC no 120º ciclo, nota-se que a variação CAE III apresenta um valor menor de densidade aparente, sugerindo uma alteração em torno de 5,06% em relação ao material em seu estado inicial, indicando a influência da temperatura de secagem no processo de redução da densidade aparente.

Para BVA – CAE II, os valores de densidade aparente obtiveram uma boa correlação conforme número de ciclos avançam com R^2 em torno de 0,87. Em BVA – CAE III, valores de densidade aparente obtiveram uma correlação ainda melhor quando comparado com o CAE II, com R^2 em torno de 0,92.

Assim como ocorreu nas amostras de BMC, os valores registrados para o 120º ciclo nas amostras BVA sugerem um valor de densidade aparente menor do que o registrado CAE-II, em que a temperatura de secagem é de 45°C, evidenciando o fator de influência da temperatura neste litotipo.

4.3.1.2 Porosidade Aparente

Os valores médios de porosidade aparente, ao longo dos 120 ciclos, para a variação CAE, são apresentados na Figura 43.

Figura 43- Os valores médios de porosidade aparente pelo número de ciclos – CAE.

POROSIDADE APARENTE - EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO R²

BMC - CAE II		$Y = 0.01991751107 * X + 4.613718335$ $R^2 = 0.835072$
BMC - CAE III		$Y = 0.02507321524 * X + 4.469390568$ $R^2 = 0.860681$
BVA - CAE II		$Y = 0.01301058738 * X + 9.045392311$ $R^2 = 0.678138$
BVA - CAE III		$Y = 0.003263358422 * X + 9.116220801$ $R^2 = 0.75868$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a Figura 43, no decorrer dos 120 ciclos, para as amostras BMC tanto CAE II quanto CAE III, a porosidade aparente evidenciou um aumento em seus valores, comportamento que corrobora com a perda dos valores de densidade aparente. Além disso, os valores para porosidade aparente obtiveram uma boa correlação conforme número de ciclos avança com R^2 em torno de 0,83 para CAE II e R^2 em torno de 0,86 para CAE III.

Dessa maneira, para BMC, o maior valor registrado foi o 120º ciclo de CAE-III, sendo um aumento de 57,65% em relação ao material em seu estado inicial. Novamente, a influência da temperatura de secagem é evidenciada.

Para a porosidade aparente dos agregados BVA, o comportamento foi semelhante ao observado em BMC. No entanto, os valores para porosidade aparente para BVA-CAE II obtiveram uma correlação intermediária conforme número de ciclos avança com R^2 em torno de 0,67, e o seu valor registrado para o 120º ciclo sugere um aumento em torno de 11,91% em relação ao material em seu estado inicial.

Para a variação BVA-CAE III, os valores para porosidade aparente obtiveram uma correlação intermediária, como ocorreu com CAE-II, com R^2 em torno de 0,75. Por fim, o valor final de BVA-CAE-III apresentou um aumento relativamente menor. Esse comportamento pode ser justificado pela heterogeneidade das amostras.

4.3.1.3 Absorção de água

Os valores médios da água de absorção, ao longo dos 120 ciclos, para a variação CAE, são apresentados na Figura 44.

Figura 44- Os valores médios de água de absorção pelo número de ciclos – CAE.

ÁGUA DE ABSORÇÃO - EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO R²

BMC - CAE II		$Y = 0.00707220601 * X + 1.594336437$ $R^2 = 0.931406$
BMC - CAE III		$Y = 0.009303716463 * X + 1.53127976$ $R^2 = 0.888095$
BVA - CAE II		$Y = 0.007015501968 * X + 3.196390313$ $R^2 = 0.785286$
BVA - CAE III		$Y = 0.001776503518 * X + 3.373220526$ $R^2 = 0.852929$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao longo dos 120 ciclos, para as amostras de BMC, a absorção de água exibiu um aumento em seus valores para ambas as variações; ainda, BMC-CAE II obteve uma ótima correlação conforme número de ciclos avança, com R^2 em torno de 0,93, e BMC-CAE III obteve a boa correlação com R^2 em torno de 0,88.

Assim como ocorreu com o parâmetro de porosidade aparente, o maior valor registrado para o 120º ciclo de BMC foi a variação CAE III, sendo de 57,67% em relação ao material em seu estado inicial e, novamente, a influência da temperatura de secagem é evidenciada.

Para as amostras de BVA, o comportamento de aumento nos valores de água de absorção também é evidenciado. Para BVA-CAE II, a correlação conforme número de ciclos avança com R^2 em torno de 0,78; por outro lado, BVA-CAE III obteve uma correlação R^2 em torno de 0,85, sendo melhor quando comparada com a variação do mesmo litotipo.

4.3.2 Ciclagem Natural Controlada

No presente item, são apresentados os resultados dos índices físicos dos dois litotipos basálticos BMC e BVA, para as baterias 0, 2, 4, e 6 da ciclagem natural controlada (CNC).

4.3.2.1 Densidade aparente

Os valores médios de densidade aparente, ao longo das 6 baterias, para a variação CNC, são apresentados na Figura 45.

Figura 45- Os valores médios de densidade aparente pelo número de ciclos – CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os valores do litotipo BMC para CNC, a densidade aparente dos agregados na 6ª bateria sofre uma pequena redução quando comparado com o valor aferido a bateria 0 (inicial) e, assim, como foi observado na CAE, os valores de densidade aparente obtiveram uma boa correlação com R² em torno de 0,88, conforme o gráfico.

No geral, valores não apresentam alterações na densidade aparente do grau de alteração do material, com exceção para a 6ª Bateria, em que ocorre uma redução e o índice de alteração registrado de 3,29%; ainda assim, o material enquadra-se na categoria de rocha intacta, conforme a comparação com os valores de Moon (2004).

A densidade aparente dos agregados BMA, conforme ocorreu com o litotipo BMC, demonstra pouca variação em seus valores; a maior redução foi observada ao final da sexta bateria, e ainda obtiveram uma correlação R^2 em torno de 0,94. Por fim, os valores apresentam poucas alterações na densidade aparente do material, assim como ocorre com o litotipo BMC.

4.3.2.2 Porosidade Aparente

Os valores médios de porosidade aparente, ao longo das 6 baterias, para a variação CNC, são apresentados na Figura 46.

Figura 46- Os valores médios de porosidade aparente pelo número de ciclos – CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao longo das 6 baterias, os valores de porosidade aparente dos agregados BMC demonstraram um aumento gradativo ao longo dos ciclos e obtiveram uma ótima correlação conforme número de ciclos avançam com R^2 em torno de 0,95; ainda, o valor registrado para o 6ª bateria indica que o material passou por um processo de alteração, embora a amplitude seja baixa quando comparada com o valor registrado no início da ciclagem.

O mesmo comportamento é observado para as amostras BVA, em que os valores de porosidade aparente obtiveram uma ótima correlação conforme número de baterias avança com R^2 em torno de 0,93.

De forma geral, os valores de porosidade aparente apresentaram um aumento ao longo das baterias, assim como ocorreu com o litotipo BMC, porém, quando comparados os valores da bateria final, nota-se que BMC possui uma amplitude menor.

4.3.2.3 Água de absorção

Os valores médios de água de absorção, ao longo das 6 baterias, para a variação CNC, são apresentados na Figura 47.

Figura 47- Os valores médios de água de absorção pelo número de ciclos – CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a Figura 47, os valores para absorção de água crescem gradualmente ao longo das baterias, independentemente do litotipo, assim como ocorreu com a porosidade aparente.

Para BMC, os valores obtiveram uma boa correlação com R² em torno de 0,88, além disso, valor médio final registrado sugeriu que o material passou por um processo de

alteração, embora a amplitude seja baixa quando comparada com o registro inicial da ciclagem.

Para BVA, os valores de água de absorção obtiveram uma ótima correlação com R^2 em torno de 0,93, ainda, como ocorreu com os registros de porosidade, o valor final da água de absorção para BVA é maior quando comparado com BMC, embora nos dois casos a amplitude em relação aos valores iniciais foi baixa.

4.3.3 Discussões para os índices físicos

O presente tópico apresenta as discussões para os resultados encontrados conforme os índices físicos para as duas variações de ciclagem.

4.3.3.1 Considerações para ciclagem água-estufa

Embora BMC e BVA apresentem uma resistência à ciclagem água-estufa devido à baixa amplitude entre os valores finais com os aferidos no material intacto, para os dois litotipos, 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.

Esse comportamento dos índices físicos nas duas variações corroboram com os trabalhos de Gupta e Rao (2001), Moon (2004), Gurocak; Kilic (2005), Salles (2013), Özbek (2014), Zhou et al (2017), Dursun; Topal, (2019), Gratchev; Pathiranagei; Kim, (2019) e Dursun; Topal, (2020).

Diante dessa modificação nos valores de índices físicos e conforme a pretensão de verificar o grau de alteração do material, quando confrontados os valores finais encontrados com os valores de referências apresentados por Gupta e Rao (2001), Moon (2004), Gurocak; Kilic (2005) e expostos nos Quadro 2.19 Quadro 2.20 e Quadro 2.21, evidencia-se que, para CAE II (45°C) e CAE III (110°C), ao fim do 120º ciclo de ambas, as amostras de BMC permanecem com o grau de alteração de rocha intacta, e as amostras de BVA podem ser classificadas com o grau de alteração leve.

Embora nas duas variações (CAE II e III), o valor da porosidade aparente classificaria as amostras de BVA como muito alterada, a análise qualitativa das amostras de BVA não condiz com a classificação a partir do valor.

Ainda sobre porosidade aparente, os coeficientes de correlação encontrados em BVA (CAE II 0,67 e CAE III 0,75) são menores quando comparados com os valores encontrados em BMC (CAE II 0,82 e CAE III 0,86). A hipótese que pode ser relacionada a esse comportamento de BVA passa pela baixa variação entre os valores aferidos em cada ciclo, visto que o material por si só apresenta uma resistência ao método da ciclagem água-estufa.

Além disso, também deve-se levar em consideração a heterogeneidade dos agregados presentes em cada amostragem, visto que existe a possibilidade de variação na quantidade de mineiras presentes em cada agregado.

Vale ressaltar, para ciclagem BMC-CAE-III, os valores do índices físicos ao final do 120º ciclo nos três parâmetros sugerem que a temperatura de secagem 110°C é mais influente para a alteração do material quando comparado com os valores aferidos na variação com a temperatura de secagem de 45°C; ainda assim, o número de ciclos não foi o suficiente para que se obtivessem resultados de índices físicos que classificassem BMC e BVA com um grau de alteração diferente do registrado nas amostras iniciais.

Ainda corroborando com a resistência dos dois litotipos a ciclagem água-estufa, quando calculado o índice de alterabilidade proposto por Ladeira e Minette (1984), ver item 2.2.2, encontram-se valores menores do que 1% para todos os índices físicos.

Por fim, o Quadro 44, apresenta os valores de R^2 e suas respectivas equações para os índices físicos aferidos nas amostras BMC e BVA para as duas variações de ciclagem água-estufa.

Quadro 44- Valores do índice de correlação e respectivas equações para CAE – BMC.

LITOTIPO	ENSAIO	CICLAGEM	R ²	EQUAÇÃO
BMC	Densidade aparente	CAE II	0,8351	$y = -0,001x + 0,9897$
		CAE III	0,8464	$y = -0,002x + 2,9844$
	Porosidade aparente	CAE II	0,8265	$y = 0,0203x + 4,4807$
		CAE III	0,8607	$y = 0,0251x + 4,4694$
	Água de absorção	CAE II	0,9314	$y = 0,0071x + 1,5943$
		CAE III	0,8881	$y = 0,0093x + 1,5313$
BVA	Densidade aparente	CAE II	0,8728	$y = -0,001x + 0,7797$
		CAE III	0,9204	$y = -0,0009x + 2,773$
	Porosidade aparente	CAE II	0,6781	$y = 0,013x + 9,0454$
		CAE III	0,7587	$y = 0,0033x + 9,1162$
	Água de absorção	CAE II	0,7853	$y = 0,007x + 3,1964$
		CAE III	0,8529	$y = 0,0018x + 3,3732$

Notas:

BMC: Basalto maciço compacto;

BVA: Basalto vesicular;

CAE II: Ciclagem água-estufa – 45°C;

CAE III: Ciclagem água-estufa – 110°C;

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3.2 Considerações para ciclagem natural controlada

Os resultados encontrados para BMC e BVA sugerem que o comportamento dos índices físicos indica uma possível alteração nas rochas, devido ao decréscimo da densidade aparente e o aumento dos percentuais de porosidade aparente e água de absorção.

Esse comportamento dos índices físicos em todas as variações do ensaio corroboram com os trabalhos de Gomes (2001), Gupta e Rao (2001), Moon (2004), Gurocak e Kilic (2005).

Assim como ocorre com BMC e BVA na ciclagem água-estufa, quando confrontados os valores finais encontrados na bateria 6 com os valores de referências expostos nos Quadro 2.19, Quadro 2.20 e Quadro 2.21, evidencia-se que as amostras de BMC permanecem com o grau de alteração de rocha intacta.

Embora as amplitudes registradas em BVA sejam maiores, indicando que o material sofreu maior influência, as amostras permanecem com o grau de alteração leve. Gomes (2001) elucidou uma situação semelhante no basalto de seu estudo, justificando que esse comportamento é consequência da alta densidade do material. Vale ressaltar que o material também já estava exposto há 40 anos. Para ocorrer uma mudança no grau de alteração dos dois litotipos, seria necessário uma exposição maior ao ambiente.

Ainda corroborando com a resistência do material à ciclagem natural controlada, quando calculado para BMC e BVA o índice de alterabilidade proposto por Ladeira e Minette (1984), ao final da sexta bateria, encontram-se valores menores do que 1%. O mesmo comportamento foi evidenciado em CAE, em ambas situações, tanto BMC quanto BVA foram resistentes à alteração pelas ciclagens.

Por fim, o

Quadro 45, apresenta os valores de R^2 e suas respectivas equações para os índices físicos aferidos nas amostras BMC e BVA para a ciclagem natural controlada.

Quadro 45- Valores do índice de correlação e respectivas equações para CNC.

LITOTIPO	ENSAIO	CICLAGEM	R^2	EQUAÇÃO
BMC	Densidade aparente	CNC	0,8814	$y = -0,0039x + 2,9167$
	Porosidade aparente		0,9569	$y = 0,3636x + 4,4934$
	Água de absorção		0,8876	$y = 0,0981x + 1,5793$
BVA	Densidade aparente	CNC	0,9488	$y = -0,0054x + 2,8362$
	Porosidade aparente		0,9358	$y = 0,9772x + 4,8899$
	Água de absorção		0,9312	$y = 0,3349x + 1,7496$

BMC: Basalto maciço compacto;

BVA: Basalto vesicular;

CNC: Ciclagem Natural Controlada;

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 MONITORAMENTO DA ÁGUA DE ABRASÃO

O monitoramento da água de ciclagem busca avaliar as alternâncias de valores de potencial hidrogeniônico (pH), potencial redox (Eh) e condutividade elétrica (CE) da água de abrasão das amostras ao longo dos ciclos; ainda nesse item, também é apresentado o diagrama de equilíbrio Ferro-Água de Pourbaix, para fins de acompanhamento das reações de oxidação.

4.4.1 Ciclagem água-estufa

No presente item, são apresentados os valores para o monitoramento da água de ciclagem BMC e BVA que foram submetidas aos 120 ciclos das duas variações de ciclagem água-estufa (CAE II – 45° e CAE III - 110°).

No geral, os dois litotipos demonstram a mesma tendência de comportamento, independentemente da variação da temperatura de secagem (Figura 48), cujo pH tende a aumentar ao longo dos ciclos; portanto, assumindo um comportamento mais alcalino. A queda nos valores no começo de cada bateria é atribuída à troca da água de abrasão que ocorreu ao fim de cada bateria.

Figura 48- Variação do pH de abrasão durante os ciclos – CAE.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como o pH, os valores de Eh para ambas variações apresentaram a mesma tendência de comportamento (Figura 49 e Figura 50), em que, ao fim de cada bateria, apresentam valores menores de Eh quando comparado com o valor inicial. O aumento estabelecido é em função da troca de água ao fim da bateria. Quando observados os valores de corrente elétrica, BVA apresentou para suas duas variações de ciclagem resultados maiores do que BMC.

Figura 49- Variação do Eh de abrasão durante os ciclos – CAE.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50- Variação da Condutividade Elétrica durante os ciclos – CAE.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, conforme o diagrama de equilíbrio Ferro-Água de Pourbaix todos os valores registrados de BMC e BMA estão presentes na zona de oxidação com dissolução lenta, onde não há reações de oxidação (Figura 51).

Figura 51- Diagrama de Pourbaix para CAE.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.1.1 Considerações para ciclagem água-estufa

Os valores de o pH de abrasão apresentados para duas variações de temperatura de secagem tiveram um comportamento semelhante para as amostras BMC e BVA. Como já mencionado, os menores valores são registrados no começo de cada bateria em função da troca da água de abrasão. Ao longo dos ciclos, ocorre a liberação de íons OH^- e, por consequência, o aumento gradual dos valores registrados, tornando o meio

alcalino, sendo ao fim de cada bateria o maior registro encontrado para cada litotipo e suas variações respectivamente.

No entanto, os valores registrados ao final de cada bateria para as amostras de BVA, para as duas variações ciclagem, foram próximos ou maiores que 8. Por outro lado, BMC sempre registrou valores finais menores ou iguais a 8.

Os valores maiores em BVA podem ser justificados pela sua composição mineralógica com argilominerais, pois os valores maiores de pH são associados à adsorção dos íons básicos e, conseqüentemente, o aumento da concentração de íons OH^- .

Embora os dois litotipos difiram em seus valores finais, os resultados não indicam uma tendência de aumento entre uma bateria e outra; em contrapartida, direciona um comportamento de estabilização na leitura final em cada bateria. Isso pode ser associado à resistência à alteração que as amostras já apresentaram por meio de seus índices físicos, ocorrendo interações químicas apenas na superfície do agregado.

Nos estudos de Gomes (2001) e Oliveira e Zuquette (2014), as amostras de basalto vesiculares apresentam valores maiores quando comparadas com amostras de basaltos maciços, no entanto, não são de mesma ordem de grandeza dos registros encontrados no presente estudo.

Para justificar esse comportamento, cabe ressalva para metodologia adotada: nos dois estudos citados, o agregado foi pulverizado, aumentando sua superfície específica, e imerso na solução de água destilada para aferição do pH.

Quanto aos valores de potencial redox, BMC e BVA, não apresentam diferenças expressivas quanto à temperatura de secagem; por outro lado, o comportamento para os dois litotipos é de um crescimento gradual ao longo das baterias devido à liberação de íons negativos na solução.

Embora o valor ao final do 120º ciclo seja na ordem de grandeza de 350 mV, esses valores em conjunto com os valores de pH não foram suficientes para criar um ambiente oxidante. Para as condições de pH apresentadas no estudo, os valores de potencial redox que indicariam uma possível alteração nas amostras seria em torno de 100 mV.

Portanto, o comportamento averiguado foi ao encontro da afirmação de Carroll (1970), em que as rochas ígneas têm um baixo potencial de oxidação. Ainda corroborando com esse indicativo está o diagrama de Pourbaix apresentado na Figura 51, em que tanto para BMC quanto para BVA não há reações de oxidação.

Para os valores de Condutividade elétrica (CE) de BMC e BVA, o comportamento da variação das leituras durante as baterias é semelhante, no entanto, quando comparadas as grandezas dos registros finais, verifica-se que, para as amostras BVA, os valores de CE são superiores em torno de $300\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo para BMC próximo de $100\mu\text{S}/\text{cm}$.

Essa alta nos valores de CE para BVA pode ser associada à presença de minerais secundários nos agregados e, conseqüentemente, à maior liberação de íons na solução de abrasão, desta maneira, concordando os registros de pH maiores na bateria final.

Por fim, quando confrontados os valores de pH e CE encontrados ao final da 120ª bateria com a classificação do grau de alteração proposta por Oliveira e Zuquette (2014), BMC e BVA, podem ser classificadas como pouco alteradas (ver Quadro 2.4).

Fato também observado nas análises dos índices físicos, corroborando com a hipótese de que o BMC e BVA têm uma resistência à alteração da ciclagem água estufa; assim, para resultados mais expressivos, necessitaria de um número maior de ciclos.

4.4.2 Ciclagem Natural Controlada

Conforme a (Figura 52), a tendência comportamental do pH de abrasão, para BMC e BVA, foi o aumento nos seus valores de pH conforme o número de ciclos aumentam, assim como ocorreu em CAE, com exceção de BVA, bateria 2 e 3.

Quanto ao comportamento do Eh de abrasão (Figura 53) e à condutividade elétrica (Figura 54), ocorre o aumento nos valores devido à troca de abrasão e à tendência de redução nas próximas leituras; no entanto, entre uma bateria, o comportamento do Eh tem uma tendência de aumento, o mesmo ocorre com a condutividade elétrica. Novamente foram evidenciados os maiores valores para BVA, seguindo a tendência observada em CAE.

Figura 52- Variação do pH de abrasão durante os ciclos – CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53- Variação do Eh de abrasão durante os ciclos – CNC.

Figura 54- Variação da condutividade elétrica durante os ciclos – CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, de acordo com o diagrama de equilíbrio Ferro-Água de Pourbaix (Figura 55), todos os dados encontram-se na zona de oxidação com dissolução lenta, onde não há reações de oxidação.

Figura 55- Diagrama de Pourbaix para CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2.1 Considerações para ciclagem natural controlada

De acordo com os valores de o pH de abrasão apresentados para ciclagem natural controlada (CNC), as amostras BMC e BVA, de forma geral, obtiveram uma tendência de crescimento do valor de pH ao longo dos ciclos, assim como o comportamento já observado nas amostras da ciclagem água-estufa.

Por outro lado, para CNC, os valores obtidos na 6ª bateria são maiores do que os encontrados (BMC = 8,13 e BVA = 8,24) no 120º Ciclo, ciclagem água-estufa (BMC II

= 7,57 e BMC III = 7,87; BVA II = 8,01 e BVA III = 8,20), isso pode ser verificado nos dois litotipos.

Uma hipótese para esse comportamento é o tempo de exposição ao ambiente ao qual as amostras eram sujeitas em cada bateria, chegando a 504 horas seguidas de submersão, somadas à variação temperatura do ambiente ao qual estavam expostas. Dessa maneira, possibilitando aos agregados uma condição de interação química, em que ocorre uma maior liberação de íons na água de abrasão.

Quando comparados os valores finais entre os dois litotipos em CNC, os maiores valores foram aferidos nas amostras BVA. Esse comportamento está associado à presença de argilominerais nos agregados, corroborando com os resultados encontrados na ciclagem água-estufa.

Para os valores de potencial redox, BMC e BVA não apresentam diferenças expressivas nos valores (aproximadamente 300mV) quando comparados com a ciclagem água-estufa; ainda, faz-se presente o crescimento gradual ao longo das baterias devido à liberação de íons negativos na solução.

Da mesma forma como ocorre na ciclagem água-estufa, o último valor registrado na 6ª bateria está na ordem de grandeza de 350 mV, ainda insuficiente para criar um ambiente oxidante. Ainda corroborando com esse indicativo, está o diagrama de Pourbaix apresentado na Figura 55, em que tanto para BMC quanto para BVA não há reações de oxidação.

Para os valores de Condutividade elétrica (CE) de BMC e BVA, observa-se que, para BVA, as aferições ao longo do ensaio são maiores quando comparados com BMC, sendo 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente. Esse comportamento está associado à presença de argilominerais nos agregados e, por consequência, ocorre uma maior liberação de íons na solução de abrasão, indo de acordo com os registros superiores de pH para BVA. Além disso, os valores de CE para CNC, independentemente do seu litotipo, são maiores quando comparados com os registros de CAE (BMC = 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e BVA = 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Por fim, quando confrontados os valores de pH e CE encontrados ao final da 6ª bateria com a classificação do grau de alteração proposta por Oliveira e Zuquette (2014), BMC e BVA, podem ser classificadas como pouco alteradas (ver Quadro 2.4).

Fato também observado nas análises dos índices físicos, corroborando com a hipótese de que o BMC e BVA têm uma resistência à alteração a CNC, desta maneira, para resultados mais expressivos, necessitaria de um tempo de exposição ambiente

maior. Além disso, para essa situação de ciclagem natural, cabe a ressalva do tempo de exposição, os BMC e BVA já estavam expostos há 40 anos ao ambiente, por outro lado, era esperada uma contribuição maior com um tempo de saturação controlada; no entanto, não ocorreram resultados expressivos.

4.5 RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO

4.5.1 Procedimento preliminar para definição da peneira de retenção e carga da carregamento

O procedimento foi executado com a aplicação do conjunto de carga de 200kN, 100kN, 75kN, 50kN e 25kN a uma taxa de 10kN/min, em triplicata nos dois litotipos de basalto presentes nesse estudo (BMC, BVA); ao total, foram realizados 30 ensaios.

Ao fim do processo de esmagamento na prensa hidráulica, as amostras passaram pelo procedimento de análise granulométrica, e os resultados são apresentados na Figura 56.

Figura 56- Análise granulométrica para todas as variações de carga para perda ao esmagamento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando observado o comportamento das curvas granulométricas de cada carregamento isoladamente, nota-se que, na carga 100kN, é possível fazer uma distinção dos litotipos, a partir da peneira #2,35mm (onde ocorre a maior amplitude entre as peneiras), conforme a Figura 57. Esse comportamento não é observado nos demais carregamentos, em que as curvas granulométricas da triplicata não se distinguem entre os litotipos.

Figura 57- Análise granulométrica para perda ao esmagamento com carga de 100kN.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante disso, ainda foram feitos cálculos de índices para avaliação e a escolha da peneira de retenção ideal (ver item 3.6.1), os resultados são ilustrados nos Quadro 46, Quadro 47, Quadro 48, Quadro 49 e Quadro 50.

Quadro 46- Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 200kN.

<i>200 kN</i>								
AMOSTRA		INDICE I	INDICE 2	ALFA AB	ALFA BC	#2,36	#4,75	#6,3
BMA	A	0,34	0,05	9,27	8,95	0,78	0,86	0,70
	B	0,34	0,05	9,23	8,49	0,78	0,87	0,69
	C	0,34	0,05	9,34	8,53	0,78	0,87	0,69
BMC	A	0,35	0,05	10,44	9,61	0,75	0,85	0,74
	B	0,35	0,05	10,65	8,81	0,75	0,86	0,74
	C	0,39	0,05	11,17	9,51	0,73	0,85	0,72

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 47- Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 100kN.

<i>100 kN</i>								
AMOSTRA		INDICE I	INDICE 2	ALFA AB	ALFA BC	#2,36	#4,75	#6,3
BMA	A	0,42	0,07	7,81	9,11	0,81	0,86	0,53
	B	0,43	0,08	8,08	9,67	0,81	0,85	0,55
	C	0,44	0,08	8,56	10,63	0,80	0,84	0,57
BMC	A	0,45	0,09	9,16	12,77	0,78	0,80	0,63
	B	0,46	0,08	10,11	11,21	0,76	0,83	0,62
	C	0,47	0,08	10,14	11,79	0,76	0,82	0,63

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 48- Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 75kN.

<i>75 kN</i>								
AMOSTRA		INDICE I	INDICE 2	ALFA AB	ALFA BC	#2,36	#4,75	#6,3
BMA	A	0,49	0,11	6,47	10,77	0,85	0,83	0,45
	B	0,49	0,10	7,43	10,98	0,82	0,83	0,50
	C	0,49	0,12	6,76	11,51	0,84	0,82	0,48
BMC	A	0,51	0,09	9,64	11,05	0,77	0,83	0,57
	B	0,53	0,12	8,78	14,13	0,79	0,78	0,58
	C	0,61	0,11	9,12	10,91	0,78	0,83	0,49

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 49- Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 50kN.

50 kN								
AMOSTRA	INDICE I	INDICE 2	ALFA AB	ALFA BC	#2,36	#4,75	#6,3	
BMA	A	0,52	0,14	5,65	11,51	0,86	0,82	0,42
	B	0,54	0,13	4,92	8,39	0,88	0,87	0,33
	C	0,56	0,15	5,86	11,66	0,86	0,82	0,42
BMC	A	0,57	0,12	7,39	10,45	0,82	0,84	0,44
	B	0,58	0,13	7,05	10,66	0,83	0,83	0,43
	C	0,57	0,12	7,29	10,92	0,83	0,83	0,45

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 50- Índices para perda ao esmagamento com carregamento de 25kN.

25 kN								
AMOSTRA	INDICE I	INDICE 2	ALFA AB	ALFA BC	#2,36	#4,75	#6,3	
BMA	A	0,66	0,27	1,92	7,37	0,95	0,89	0,18
	B	0,67	0,18	3,94	7,74	0,90	0,88	0,26
	C	0,69	0,27	1,99	7,00	0,95	0,89	0,18
BMC	A	0,66	0,17	4,34	8,09	0,90	0,87	0,27
	B	0,64	0,21	2,09	5,77	0,95	0,91	0,17
	C	0,67	0,21	3,53	8,49	0,92	0,87	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que, para o carregamento 100kN, através do índice #6,30, é possível distinguir cada litotipo ensaiado; ainda para o mesmo carregamento, ocorre a possibilidade de distinguir os litotipos através da curva granulométrica. Espera-se que, por meio dos valores retornados com cálculo do índice #6,30, seja possível observar o comportamento de alteração do material.

Portanto, para realização dos ensaios de perda ao esmagamento, foram adotados os parâmetros:

- Carregamento: 100kN;
- Taxa: 10kN/min
- Peneira de retenção: 6,30mm.
- $I = (M_r - M_t)/(M_t)$

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

M_t = massa total da amostras.

4.5.2 Resultados para resistência ao esmagamento

No presente item, são apresentados os valores para a resistência ao esmagamento, chamados de índice mecânico (ver item 3.6.1), originados das amostras que passaram pelas ciclagens CAE e CNC para os dois litotipos BMC e BVA.

Por meio desses valores, busca-se compreender a influência das diferentes ciclagens na resistência mecânica das amostras e a possibilidade de quantificar sua alteração.

4.5.2.1 Ciclagem água-estufa

Após a realização dos ensaios prévios para as definições da carga limite e peneira de retenção, foram executados ensaios em triplicata para os ciclos 0, 40, 60, 80, 100 e 120, para os dois litotipos, somando ao todo, para essa variação de ciclagem água-estufa, 66 ensaios de resistência ao esmagamento.

Em sequência ao processo executado na prensa hidráulica, as amostras de BMC e BVA foram submetidas ao ensaio de análise granulométrica para obtenção da curva e os valores da massa retida na peneira #6,30 mm para o cálculo do índice mecânico. Todos os gráficos dos ensaios granulométricos, encontram-se no Apêndice A.

Os resultados encontrados para o índice mecânico de cada ensaio da amostra BMC estão dispostos no

Quadro 51, e para as amostras de BVA, no Quadro 52.

De acordo com os valores do índice mecânico, independentemente do litotipo, ao longo dos ciclos é possível observar o aumento do índice. Esse comportamento indica uma degradação do material, sendo o ciclo 120 o qual apresentou os maiores valores para índice mecânico; por outro lado, é importante salientar que a amplitude entre os ciclos é pequena, com exceção da amostra intacta que, como esperado, apresentou o menor índice.

Além disso, quando se comparam os valores do ciclo 120 de CAE II e CAE III, para ambos litotipos, não foi possível observar a interferência da temperatura, devido à proximidade entre os valores de índice mecânico. Ainda, o gráfico de correção entre o índice mecânico e o número de ciclos está ilustrado na Figura 58.

Quadro 51- Índice mecânico para resistência ao esmagamento - BMC.

ÍNDICE MECÂNICO – CICLAGEM ÁGUA-ESTUFA - BMC						
CICLAGEM	CICLOS	AMOSTRA	i	μ	σ	cv
CAE II	0	A	0,62921	0,62915	0,00449	0,00714
		B	0,62363			
		C	0,63463			
	40	A	0,69998	0,71002	0,01607	0,02263
		B	0,69739			
		C	0,73269			
	60	A	0,70385	0,71021	0,00787	0,01109
		B	0,70547			
		C	0,7213			
	80	A	0,67277	0,69059	0,01481	0,02144
		B	0,70902			
		C	0,68998			
	100	A	0,72730	0,72738	6,3E-05	8,6E-05
		B	0,72744			
		C	0,72742			
	120	A	0,74609	0,75026	0,0033	0,0044
		B	0,75418			
		C	0,75049			
CICLAGEM	CICLOS	AMOSTRA	i	μ	σ	cv
CAE III	0	A	0,62921	0,62915	0,00449	0,00714
		B	0,62363			
		C	0,63463			
	40	A	0,70172	0,70020	0,00174	0,00249
		B	0,70112			
		C	0,69776			
	60	A	0,69824	0,70063	0,00542	0,00774
		B	0,70813			
		C	0,69551			
	80	A	0,67086	0,66792	0,00208	0,00311
		B	0,66662			
		C	0,6663			
	100	A	0,70592	0,71016	0,0033	0,00465
		B	0,71397			
		C	0,71058			
	120	A	0,73337	0,73081	0,00218	0,00299
		B	0,73101			
		C	0,72803			

Legenda: i : Índice mecânico. μ : Média. σ : Desvio padrão. cv : Coeficiente de variação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 52- Índice mecânico para resistência ao esmagamento - CAE II- BVA.

ÍNDICE MECÂNICO – CICLAGEM ÁGUA-ESTUFA - BVA						
CICLAGEM	CICLOS	AMOSTRA	i	μ	σ	cv
CAE II	0	A	0,52732	0,54792	0,01791	0,03269
		B	0,54547			
		C	0,57099			
	40	A	0,72087	0,71654	0,01305	0,01821
		B	0,72991			
		C	0,69883			
	60	A	0,69867	0,7205	0,01776	0,02465
		B	0,72065			
		C	0,74217			
	80	A	0,70844	0,72899	0,01455	0,01996
		B	0,73847			
		C	0,74006			
	100	A	0,74206	0,7479	0,0042	0,00562
		B	0,75178			
		C	0,74986			
	120	A	0,76062	0,75664	0,00359	0,00475
		B	0,75191			
		C	0,75739			
CICLAGEM	CICLOS	AMOSTRA	i	μ	σ	cv
CAE III	0	A	0,52732	0,54792	0,01791	0,03269
		B	0,54547			
		C	0,57099			
	40	A	0,67608	0,66775	0,00724	0,01085
		B	0,65842			
		C	0,66875			
	60	A	0,67501	0,6708	0,00427	0,00637
		B	0,66494			
		C	0,67243			
	80	A	0,67914	0,66668	0,01293	0,01939
		B	0,64886			
		C	0,67203			
	100	A	0,70372	0,69718	0,00504	0,00722
		B	0,69634			
		C	0,69147			
	120	A	0,73241	0,726	0,00557	0,00768
		B	0,72678			
		C	0,71881			

Legenda: i : Índice mecânico. μ : Média. σ : Desvio padrão. cv : Coeficiente de variação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58- Regressão linear entre índice mecânico e número de baterias - CAE II - BMC.

CAE - ÍNDICE MECÂNICO -		EQUAÇÕES DE CORRELAÇÃO R ²
BMC - II	$Y = 0.0008416471536 * X + 0.6468253854$ $R^2 = 0.77453$
BMC - III	$Y = 0.00067152196 * X + 0.645043589$ $R^2 = 0.649716$
BVA - II	$Y = 0.001560518582 * X + 0.5990469587$ $R^2 = 0.75494$
BVA - III	$Y = 0.00129015397 * X + 0.5767111029$ $R^2 = 0.840832$

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o gráfico (Figura 58), os valores de índice mecânico de BMC não obtiveram uma correlação satisfatória conforme número de ciclos avança com R^2 em torno de 0,77 para CAE II e 0,65 para CAE III. Já para as amostras de BVA, os valores de R^2 foram melhores quando comparados com BMC, sendo 0,75 para CAE II e 0,84 para CAE III.

4.5.2.1.1 Considerações para ciclagem água-estufa

De acordo com os resultados do índice de resistência para BMC e BVA (Quadro 53), evidencia-se que os dois litotipos têm resistência à ciclagem água-estufa, pois as diferenças dos resultados entre os ciclos não são expressivas, corroborando com os resultados já apresentados nos índices físicos e no monitoramento físico-químico.

Quando comparados os resultados entre BMC e BVA, observa-se que os valores do índice de resistência são muito próximos, sendo para a variação CAE II o mesmo índice encontrado para os dois litotipos. Além disso, não foi possível por meio dos índices observar influência da temperatura de secagem na resistência ao esmagamento dos agregados.

Com intuito de verificar os valores encontrados com um ensaio executado conforme as normativas, o Quadro 53 apresenta um comparativo com os resultados encontrados no estudo de Engidasew e Barbieri (2014). A escolha por esse estudo é baseada na semelhança de litologia dos valores de densidade aparente apresentados com os valores iniciais encontrados no presente estudo. A partir dos valores apresentados no Quadro 53, verifica-se que, apesar de a faixa granulométrica e de o volume de amostras serem diferentes entre os ensaios, os resultados encontrados são de mesma grandeza, indicando que o ensaio com as dimensões reduzidas satisfaz a proposta de quantificar a depreciação do material na faixa granulométrica do estudo.

Quadro 53- Comparativo entre os índices mecânicos de CAE com os valores de Engidasew e Barbieri (2014).

LITOTIPO	ENSAIO	ρ_a (g/cm ³) (120 ciclos)	$i(\%)*$ (120 ciclos)	Engidasew e Barbieri (2014)	
				ρ_a (g/cm ³)	$i(\%)$
BMC	CAE II	2,83	25	2,93~3,08	20~22
	CAE III	2,81	27		
BVA	CAE II	2,72	25		
	CAE III	2,65	27		

Legenda: * : Cálculo #6,35mm conforme Engidasew e Barbieri (2014)

Fonte: Elaborado pelo autor

Desta maneira, os Quadro 54 e Quadro 55 apresentam os coeficientes de correlação (R^2) entre o ensaios de esmagamento e os demais ensaios de alterabilidade executados neste trabalho, sendo eles: Densidade aparente, Porosidade Aparente, Água de absorção, Potencial hidrogênico, Potencial Redox e Condutividade Elétrica.

Quadro 54- Correlação entre os ensaios de alterabilidade e ensaio de resistência ao esmagamento – BMC - CAE.

LITOTIPO	ENSAIO	CICLAGEM	R ²	EQUAÇÃO
BMC	Ciclos (0-120)	CAE II	0,7745	$y = 0,0008x + 0,6468$
		CAE III	0,6497	$y = 0,0007x + 0,6450$
	Densidade aparente	CAE II	0,5163	$y = -0,573x + 2,3741$
		CAE III	0,2887	$y = -0,2509x + 1,411$
	Porosidade aparente	CAE II	0,9653	$y = 0,0439x + 0,4401$
		CAE III	0,8812	$y = 0,0289x + 0,5121$
	Água de absorção	CAE II	0,9167	$y = 0,1250x + 0,4448$
		CAE III	0,7925	$y = 0,0751x + 0,5282$
	Potencial hidrogeniônico	CAE II	0,7922	$y = 0,0118x + 0,6280$
		CAE III	0,6839	$y = 0,0093x + 0,6291$
	Potencial redox	CAE II	0,9030	$y = 0,0003x + 0,6290$
		CAE III	0,8672	$y = 0,0003x + 0,6266$
	Condutividade elétrica	CAE II	0,8160	$y = 0,0007x + 0,6282$
		CAE III	0,6801	$y = 0,0005x + 0,6300$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 55- Correlação entre os ensaios de alterabilidade e ensaio de resistência ao esmagamento – BVA - CAE.

LITOTIPO	ENSAIO	CICLAGEM	R ²	EQUAÇÃO
BVA	Ciclos (0-120)	CAE II	0,7549	$y = 0,0016x + 0,5990$
		CAE III	0,8408	$y = 0,0013x + 0,5767$
	Densidade aparente	CAE II	0,7388	$y = -2,5709x + 7,7533$
		CAE III	0,8665	$y = -1,3935x + 4,4433$
	Porosidade aparente	CAE II	0,4043	$y = 0,0723x - 0,0134$
		CAE III	0,5178	$y = 0,2702x - 1,8595$
	Água de absorção	CAE II	0,3738	$y = 0,1387x + 0,1949$
		CAE III	0,6273	$y = 0,5793x - 1,3600$
	Potencial hidrogeniônico	CAE II	0,9527	$y = 0,0234x + 0,5491$
		CAE III	0,8460	$y = 0,0172x + 0,5489$
	Potencial redox	CAE II	0,9605	$y = 0,0006x + 0,5594$
		CAE III	0,9421	$y = 0,0005x + 0,5579$
	Condutividade elétrica	CAE II	0,9840	$y = 0,0007x + 0,5495$
		CAE III	0,8929	$y = 0,0005x + 0,547$

No geral, os valores de R² encontrados (Quadro 54 e Quadro 55) indicam uma boa correlação entre o ensaio de resistência ao esmagamento com os demais, conforme Pereira et al. (2021) sugerem: para interesses geotécnicos, numa correlação significativa, o R² deve ser maior que 0,81. A exceção está no ensaio de densidade aparente em BMC e porosidade aparente em BVA. Esse comportamento, nos dois casos, pode ser justificado com a baixa variação dos índices de resistência entre os valores dos ciclos.

4.5.2.2 Ciclagem Natural Controlada

Da mesma forma como ocorre para CAE, após ensaios prévios para as definições da carga limite e peneira de retenção, foram executados ensaios em triplicata para as baterias 0, 2, 4 e 6 somando ao todo 24 ensaios de resistência ao esmagamento, 12 ensaios para cada litotipo (BMC e BVA).

Os resultados encontrados para o índice mecânico para as amostras BMC e BVA estão dispostos no Quadro 56 e a suas respectivas análises granulométricas encontram-se no Apêndice - B.

Conforme os resultados apresentados no Quadro 56, assim como ocorreu para CAE, para dois litotipos o aumento do índice ao longo dos ciclos indica uma degradação do material, sendo que a bateria 6 apresentou os maiores valores para índice mecânico, embora os seus valores sejam muito próximos aos encontrados na bateria 4. Além disso, o gráfico de correção entre o índice mecânico e o número de ciclos está ilustrado na Figura 59.

Quadro 56- Índice mecânico para resistência ao esmagamento – CNC.

ÍNDICE MECÂNICO – CICLAGEM NATURA CONTROLADA						
LITOTIPO	BATERIA	AMOSTRA	i	μ	σ	cv
BMC	0	A	0,62921	0,62915	0,00449	0,00714
		B	0,62363			
		C	0,63463			
	2	A	0,71196	0,71028	0,00248	0,0035
		B	0,71211			
		C	0,70677			
	4	A	0,7374	0,73487	0,00184	0,0025
		B	0,73307			
		C	0,73415			
	6	A	0,75207	0,74881	0,00365	0,00488
		B	0,74371			
		C	0,75065			
CICLAGEM	BATERIA	AMOSTRA	i	μ	σ	cv
BVA	0	A	0,52732	0,54792	0,01791	0,03269
		B	0,54547			
		C	0,57099			
	2	A	0,67349	0,68386	0,01619	0,02368
		B	0,70672			
		C	0,67137			
	4	A	0,67829	0,69580	0,01368	0,01966
		B	0,69744			
		C	0,71168			
	6	A	0,7073	0,72807	0,0147	0,0202
		B	0,73931			
		C	0,73759			

Legenda: i : Índice mecânico. μ : Média. σ : Desvio padrão. cv : Coeficiente de variação.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59- Regressão linear entre índice mecânico e número de baterias – CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o gráfico (Figura 59), os valores índice-mecânico de BMC obtiveram uma correlação R^2 em torno de 0,85, ainda quando comparados com os índices R^2 encontrados em CAE (0,65 e 0,77) para o mesmo litotipo, os valores de correlação para CNC são melhores. Para BVA, R^2 em torno de 0,80, valor semelhante aos encontrados em CAE, o destaque nesta ciclagem foi BMC, que obteve correlações melhores que BVA, o contrário foi observado em CAE.

4.5.2.2.1 Considerações para ciclagem natural controlada

Conforme os resultados do índice mecânico para CNC de BMC e BVA (Quadro 56), evidencia-se que os dois litotipos têm uma resistência ao procedimento da ciclagem, pois as amplitudes entre os resultados em cada bateria não são expressivas.

Os litotipos BMC e BVA não apresentam diferenças consideráveis entre os índices na 6ª bateria, este comportamento já pode ser observado em CAE. Quando se comparam os últimos valores encontrados para CNC (6ª bateria) com CAE (120º ciclo), não é possível quantificar diferenças na resistência ao esmagamento, seguindo a tendência já observada nos outros ensaios de alterabilidade.

Dessa maneira, os Quadro 57 e Quadro 58 apresentam os coeficientes de correlação (R^2) entre o ensaios de esmagamento e os demais ensaios de alterabilidade executados neste presente trabalho, sendo eles: Densidade aparente, Porosidade Aparente, Água de absorção, Potencial hidrogênio, Potencial Redox e Condutividade Elétrica.

Quadro 57- Correlação entre os ensaios de alterabilidade e ensaio de resistência ao esmagamento – BMC – CNC.

LITOTIPO	ENSAIO	CICLAGEM	R^2	EQUAÇÃO
BMC	Baterias (0-6)	CNC	0,8564	$y = 0,0192x + 0,6482$
	Densidade aparente		0,5589	$y = -3,7653x + 1,644$
	Porosidade aparente		0,9326	$y = 0,0538x + 0,4051$
	Água de absorção		0,8174	$y = 0,18x + 0,3686$
	Potencial hidrogeniônico		0,926	$y = 0,0127x + 0,6286$
	Potencial redox		0,8691	$y = 0,0004x + 0,6421$
	Condutividade elétrica		0,8238	$y = 0,0004x + 0,6464$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 58- Correlação entre os ensaios de alterabilidade e ensaio de resistência ao esmagamento – BMC - CNC

LITOTIPO	ENSAIO	CICLAGEM	R ²	EQUAÇÃO
BVA	Baterias (0-6)	CNC	0,8036	$y = 0,0276x + 0,5811$
	Densidade aparente		0,8667	$y = -5,1671x + 5,235$
	Porosidade aparente		0,9464	$y = 0,0297x + 0,4318$
	Água de absorção		0,9528	$y = 0,0867x + 0,4252$
	Potencial hidrogeniônico		0,9712	$y = 0,0201x + 0,5468$
	Potencial redox		0,9266	$y = 0,0005x + 0,5492$
	Condutividade elétrica		0,8964	$y = 0,0003x + 0,5517$

Fonte: Elaborado pelo autor.

No geral, os valores de R² encontrados (Quadro 57 e Quadro 58) indicam uma boa correlação entre o ensaio de resistência ao esmagamento com os demais. Quando comparado com os valores de R² encontrados em CAE, CNC apresenta valores de correlação melhores para os dois litotipos.

A fim de validar o ensaio, assim como ocorre em CAE, os valores de R² encontrados no estudo de Gomes (2001) são comparados com o presente estudo no Quadro 59.

Quadro 59- Comparativo entre os valores R² de CNC com os valores de Gomes (2001).

Ensaio	Litotipo	Ciclagem Natural Controlada	Ciclagem Natural Gomes (2001)
Densidade Aparente	BMC	0,5589	0,7765
	BVA	0,8667	
Porosidade Aparente	BMC	0,9326	0,8341
	BVA	0,9464	
Água de absorção	BMC	0,8174	0,8417
	BVA	0,9528	
Condutividade elétrica	BMC	0,8238	0,9300
	BVA	0,8964	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme o Quadro 59, os valores de R^2 entre os dois ensaios ficaram próximos, indicando uma validação do ensaio apresentado neste trabalho. Ainda cabe a ressalva de que o cálculo do R^2 adotado por Gomes (2001) leva em consideração todos os litotipos apresentados em seu trabalho.

Por outro lado, Gomes (2001) apresenta para cada litotipo de seu estudo o índice de mecânico, sendo assim, para o mesmo número de ciclos e litotipo semelhante, são comparados os valores dos índices no

Quadro 60.

A principal diferença entre os cálculos dos índices mecânicos é a peneira adotada. Gomes (2001) utilizou o percentual de massa retida na peneira #1,14 mm; por outro lado, o presente adotado utiliza o percentual de massa que passa pela peneira #6,35 mm.

Dessa maneira, no

Quadro 60, estão apresentados os índices mecânicos utilizando o método de cálculo já descrito no item 5.6 e uma adaptação conforme Gomes (2001), utilizando a massa retida na peneira #6,35 mm.

Quadro 60- Comparativo entre os índices mecânicos de CNC com os valores de Gomes (2001).

Ensaio	Litotipo	Ciclagem Natural Controlada	Litotipo Gomes (2001)	Ciclagem Natural Gomes (2001)
Índice de mecânico (resistência)	BMC	74,881 (25,119)*	BMC	14,31
	BVA	72,807 (27,193)*	BVA	20,73

Legenda: *: Cálculo #6,35mm conforme Gomes (2001)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme as diferenças entre os ensaios, principalmente no controle da carga aplicada nas amostras, as diferenças entre os índices são aceitáveis (

Quadro 60), direcionando o ensaio realizado à validação.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou três ensaios de alterabilidade, sendo dois tipos de ciclagens diferentes denominadas de ciclagem água-estufa - CAE (com duas variações de temperatura de secagem 45° e 110°) e ciclagem natural controlada - CNC, com o foco na qualificação e quantificação das amostras de basalto com potencial de serem utilizadas como areia artificial e agregados na construção civil.

Dentre os métodos utilizados, dois tipos de ciclagens foram abordados a fim de observar o comportamento do material utilizando metodologias diferentes, diante dessa problemática em que os resultados se basearam.

Nas amostras utilizadas para análise qualitativa, em todas as variações de ciclagem, não há indicativos significativos de alteração.

Em relação ao índices físicos, os dois litotipos apresentaram um comportamento conservador em relação às ciclagens, embora ocorra variação nos índices, quando comparados os valores junto aos registros de classificação encontrados na bibliografia, seus índices ainda estão dentro dos limites sugeridos pelos estudos de Gupta e Rao, (2001), Moon (2004), Gurocak e Kilic, (2005), Loubser, (2013), Corrêa dos Santos et al., (2016), Dursun e Topal, (2019), Gratchev; et al., (2019) e Dursun e Topal, (2020), como rocha sã ou pouco alterada.

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

Gupta e Rao (2001) afirmam que o intemperismo inicial no basalto passa pela sua composição fraturas, microfraturas e microporos, no entanto as etapas posteriores são marcadas por uma transformação completa de minerais.

O mesmo pode ser elucidado para BVA. Quando se compara a mineralogia com os basaltos vesiculares de Dursun e Topal, (2019), evidenciam-se algumas diferenças. Dursun e Topal (2019) afirmam, embora não quantifiquem, que a composição de

plagioclásio é muito maior do que piroxênios, algo que não ocorre com BVA e ainda citam a presença de calcita mineral, que também não foi observada em BVA.

Quando se confrontam os valores encontrados entre as ciclagens, a variação CAE III para os dois litotipos apresenta-se a mais influente, este comportamento relaciona-se ao umedecimento junto à sua temperatura de secagem de 110°C.

Para BVA, os valores dos índices físicos são mais acentuados quando comparados com BMC, ou seja, os menores valores de densidade aparente e maiores percentuais para porosidade aparente e água absorvida. Este comportamento foi atribuído aos argilominerais presentes nos agregados.

Conforme o comportamento das ciclagens CAE e CNC nos parâmetros físico-químicos da água de abrasão, para os dois litotipos, seguiram a mesma tendência. Onde as baterias iniciaram com o pH neutro, e ao longo dos ciclos, ocorreu uma discreta tendência de aumento e posteriormente estabilização dos valores aferidos.

Os maiores registros de pH foram encontrados nas amostras de BVA, isso ocorre em CAE e CNC. Novamente, o comportamento é atribuído à presença de argilominerais que possibilitam o aumento da concentração de íons OH^- na solução e, por consequência, o valor do pH.

De acordo com os valores de Eh, o comportamento para CAE e CNC é semelhante, são encontrados os menores registros em que a água de abrasão no início da bateria e os valores encontrados ao final de cada ciclagem foram da mesma ordem de grandeza, sendo em torno de 300-350 mV.

Para os valores aferidos de condutividade elétrica, nas duas variações de ciclagem, BVA apresentou os maiores registros. Novamente, os argilominerais presentes nas amostras atuam com uma maior liberação de íons na solução, corroborando com os maiores registros encontrados no pH.

Além disso, conforme os dados pH e Eh dispostos no diagrama de Ferro-Água de Pourbaix, todos os resultados se encontraram na zona de oxidação com dissolução lenta, em que não há reações de oxidação. Pode-se concluir que, tanto para CAE quanto para CNC, o número de ciclos não foi suficiente para criar um ambiente oxidante, o qual indicaria uma possível alteração nas amostras.

O comportamento padronizado encontrado nos diferentes tipos de ciclagem é um indicativo de resistência das amostras ao processo de alteração. Em ambos os casos, quando confrontados os valores com a classificação de alteração sugerida por Oliveira e

Zuquette (2014), evidencia-se que não há alteração com o estado inicial das rochas, indo ao encontro dos valores encontrados com os índices físicos.

Para o acompanhamento da alteração por meio do ensaio de resistência ao esmagamento, foram realizados os estudos preliminares, descritos nos resultados, para que retornassem os parâmetros ideais de ensaios, condizentes com a faixa granulométrica da pesquisa.

Diante disso, os valores encontrados para todas as variações das ciclagens cumpre o objetivo de quantificar o processo de alteração das amostras, perante o aumento dos valores do índice mecânico conforme o andamento das ciclagens, sendo possível observar a perda de resistência do material.

De forma geral, a correlação com os outros ensaios de alterabilidade é significativa conforme Pereira et al. (2021), no entanto, cabe cautela quanto às correlações com os parâmetros químicos devido à metodologia utilizada no presente estudo.

Os valores dos índices de resistência ao esmagamento são validados e comparados com os estudos de Gomes (2001) e Engidasew e Barbieri (2014), que embora apresentem diferenças metodológicas, retornam resultados semelhantes.

Por outro lado, não foi possível elucidar a influência da temperatura de ciclagem na resistência dos materiais, comportamento evidenciado nos outros ensaios de alterabilidade, pois os valores dos índices de resistência são muito próximos. O mesmo ocorre quando comparado CAE e CNC, não há diferenças relevantes diante dos índices.

Dessa maneira, os dois litotipos utilizados se caracterizam aptos para suas funções de agregado na construção civil e para utilização de areia artificial, pois em todos os ensaios realizados nesse presente estudo os comportamentos indicaram a resistência à alteração. Cabe a ressalva de que o material já estava exposto às condições ambientes por aproximadamente 40 anos.

Por fim, os objetivos propostos para o estudo foram alcançados, sendo possível observar o comportamento de alteração dos dois litotipos, por meio dos diferentes ensaios de ciclagens e quantificar sua perda por meio do índice de resistência ao esmagamento. Além disso, o ensaio de resistência ao esmagamento para faixa granulométrica proposta demonstrou-se promissor, e saliento que se trata de um estudo inicial, o aperfeiçoamento do método pode ser tema de pesquisas futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES-BARROS, L.. **Alteração e Alterabilidade de rocha ígneas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1971. 57 p.
- AKIN, Mutluhan; ÖZSAN, Aydin. Evaluation of the long-term durability of yellow travertine using accelerated weathering tests. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 70, n. 1, p. 101–114, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-010-0287-x>
- ALEXANDRE CRISTINO CORRÊA DOS SANTOS *et al.* Determinação Da Resistência Ao Fraturamento De Partículas De Enrocamento Através De Ensaio De Tração Indireta. **Anais do VII Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas**, [S. l.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/cps/sbmr-02-0016>
- AMAH, E. A. *et al.* Evaluation of Old Netim Basement Rocks (South-Eastern Nigeria) for Construction Aggregates. **Journal of Geography and Geology**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 90–98, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jgg.v4n3p90>
- ANDRADE, Pedro Santarém; SARAIVA, António Almeida. Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central portugal. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 69, n. 2, p. 207–214, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0251-9>
- ARIKAN, Fehmi; ULUSAY, Reşat; AYDIN, Nihal. Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 66, n. 4, p. 415–430, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0087-0>
- ASIO, Victor B.; JAHN, Reinhold. Weathering of basaltic rock and clay mineral formation in Leyte, Philippines. **Philippine Agricultural Scientist**, [S. l.], v. 90, n. 3, p. 222–230, 2007.
- BABECHUK, M. G.; WIDDOWSON, M.; KAMBER, B. S. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. **Chemical Geology**, [S. l.], v. 363, p. 56–75, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.027>
- BARROS, Maria Heloisa; FRASC, Oliveira. **Maria Heloisa Barros de Oliveira Frascá**. 2003. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2003.

BEGONHA, Arlindo Jorge Sá de. **Alteração das Rochas Graníticas do Norte e Centro de Portugal**. [S. l.: s. n.]

BELL, R. G. The Durability of Sandstone as Building Stone, Especially in Urban Environments. **Environmental & Engineering Geoscience**, [S. l.], v. xxix, n. 1, p. 49–60, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxix.1.49>

BHATTARAI, Sunita; KAZI, Naresh. Physical Properties, Strength and Durability of Selected Rocks from the Central Nepal Lesser Himalaya, Malekhu River Area for Building Stones. **American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 236–250, 2017.

BIFFI, Vitor Hugo Rosa; PAISANI, Julio Cesar. Superfícies De Cimeira Do Planalto Das Araucarias – Sul Do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 19, n. 3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i3.1336>

BLYTH, F. G. H.; DE FREITAS, Michael. **A Geology for Engineers**. [S. l.]: CRC Press, 2017. v. 153 *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781315276113>

BRICKER, Owen P. *et al.* Weathering and erosion aspects of small catchment research. **Biogeochemistry of small catchments; a tool for environmental research.**, [S. l.], v. 51, n. January, p. 85–105, 1994.

CARROLL, Dorothy. Chemical Weathering. *In*: **Rock Weathering**. Boston, MA: Springer US, 1970. p. 89–115. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1794-4_8

CÁSSIA, Karina de; BIFF, Gazola; Julio Cesar Paisani; Vitor Hugo Rosa. Micromorfologia para Caracterização de Processos Depositionais em Paleocabeceira no Planalto Pinhão / Guarapuava - Paraná Micromorphology for Characterization of Depositional Processes in a Paleovalley. [S. l.], p. 405–420, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2021v30n1p405>

CERYAN, Şener. New chemical weathering indices for estimating the mechanical properties of rocks: A case study from the Kürtün Granodiorite, NE Turkey. **Turkish Journal of Earth Sciences**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 187–207, 2008.

CHEN, You Liang *et al.* An experimental study of the mechanical properties of granite after high temperature exposure based on mineral characteristics. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 220, p. 234–242, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.02.010>

COSTA, Juliana. **Estratigrafia e geoquímica da sequência de lavas da província magmática do Paraná na região da usina de Itaipu (PR)**. 2015. - Universidade

- Federal do Paraná, [s. l.], 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/42082>
- CUI, Kai *et al.* Behaviour of slate following freeze–thaw and dry–wet weathering processes. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, [S. l.], v. 50, n. 2, p. 117–125, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1144/qjegh2016-093>
- DA CUNHA, Ricardo Borges; MARTINS, Cesar Augusto Avila. ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA (IPT) PARA CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA DAS FORMAS DE RELEVO NO ESTADO DO PARANÁ - BRASIL TOPOGRAPHIC. RA'E GA - O Espaço Geografico em Analise, [S. l.], v. 39, p. 43–56, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/raega>
- DAGDELENLER, Gulseren; SEZER, Ebru Akcapinar; GOKCEOGLU, Candan. Some non-linear models to predict the weathering degrees of a granitic rock from physical and mechanical parameters. **Expert Systems with Applications**, [S. l.], v. 38, n. 6, p. 7476–7485, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.12.076>
- DE SOUZA, Patricia Alexandre *et al.* Composição química da chuva e aporte atmosférico na Ilha Grande, RJ. **Quimica Nova**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 471–476, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000300013>
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An Introduction to the Rock-Forming Minerals**. [S. l.: s. n.]. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1180/dhz>
- DIAS, Isis Armstrong. Universidade federal do paraná isis armstrong dias. [S. l.], v. 1, 2019.
- DNPM. **Cadastro Nacional De Produtores De Brita**. Brasília: [s. n.], 2018.
- DURSUN, F.; TOPAL, T. The impact of cyclic loads on physicomechanical properties of the massive and vesicular basalts. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S. l.], v. 949, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/949/1/012037>
- DURSUN, Felat; TOPAL, Tamer. Durability assessment of the basalts used in the Diyarbakır City Walls, Turkey. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 78, n. 15, p. 1–24, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8466-y>
- ENGIDASEW, Tesfaye Asresahagne; BARBIERI, Giulio. Geo-engineering evaluation of Termaber basalt rock mass for crushed stone aggregate and building stone from Central Ethiopia. **Journal of African Earth Sciences**, [S. l.], v. 99, n. PA2, p. 581–594, 2014 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.11.020>
- ENGIDASEW, Tesfaye Asresahagne; BARBIERI, Giulio. Geo-engineering evaluation of Termaber basalt rock mass for crushed stone aggregate and building stone from

Central Ethiopia. **Journal of African Earth Sciences**, [S. l.], v. 99, n. PA2, p. 581–594, 2014 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.11.020>

ERGULER, Zeynal Abiddin; SHAKOOR, Abdul. Quantification of fragment size distribution of clay-bearing rocks after slake durability testing. **Environmental and Engineering Geoscience**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 81–89, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.15.2.81>

FARJALLAT, José Eduardo Siqueira. Estudos Experimentais sobre a Degradação de rochas basálticas: Basaltos da Barragem de Capivara, Rio Paranapanema. [S. l.], p. 125, 1971.

FERRARI, G. A., & MAGALDI, D. **DEGREE OF SOIL WEATHERING AS DETERMINED BY ABRASION pH: APPLICATIONS IN SOIL STUDY AND IN PALEOPEDOLOGY**. [S. l.]: Pedologie, 1983. *E-book*.

FOOKES, P. G.; GOURLEY, C. S.; OHIKERE, C. R o c k w e a t h e r i n g in engineering time Naturally occurring weathering processes. [S. l.], v. 21, p. 33–57, 1988.

FRASCÁ, Maria Heloisa Barros de Oliveira. Assessment of alterability of basalt used for riprap by petrographic examination. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 208–213, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.06.009>

FRAZÃO, Ely Borges. **Metodologia Para Avaliação da Alterabilidade de Rochas à partir de estudo Experimental em amostras de Basalto da UHE de três irmãos**. 1993. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 1993.

GAUNT, H. Elizabeth *et al.* Effect of temperature on the permeability of lava dome rocks from the 2004–2008 eruption of Mount St. Helens. **Bulletin of Volcanology**, [S. l.], v. 78, n. 4, p. 1–11, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1024-5>

GAUTAM, Tej P.; SHAKOOR, Abdul. Slaking behavior of clay-bearing rocks during a one-year exposure to natural climatic conditions. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 166, p. 17–25, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.08.003>

GHOBADI, M. H.; BABAZADEH, R. Experimental Studies on the Effects of Cyclic Freezing–Thawing, Salt Crystallization, and Thermal Shock on the Physical and Mechanical Characteristics of Selected Sandstones. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, [S. l.], v. 48, n. 3, p. 1001–1016, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00603-014-0609-6>

- GÖKCEOGLU, Candan; ULUSAY, Resat; SÖNMEZ, Harun. 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**, [S. l.], v. 57, n. 3–4, p. 215–237, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00031-4)
- GOLDICH, Samuel S. A Study in Rock-Weathering. **The Journal of Geology**, [S. l.], v. 46, n. 1, p. 17–58, 1938. Disponível em: <https://doi.org/10.1086/624619>
- GOMES, Ronaldo Lima. **Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da bacia do Paraná**. 2001. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2001.
- GOYENA, Rodrigo; FALLIS, A. .. **Fracture and Failure of Natural Building Stones**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. v. 53E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5077-0>
- GRANT, Willard H. Abrasion pH, an Index of Chemical Weathering. **Clays and Clay Minerals**, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 151–155, 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.1346/CCMN.1969.0170303>
- GRATCHEV, Ivan; PATHIRANAGEI, Savani Vidana; KIM, Dong Hyun. Strength properties of fresh and weathered rocks subjected to wetting–drying cycles. **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. 211–221, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40948-019-00104-5>
- GUAN, P. *et al.* Weathering indices for rhyolitic tuff and granite in Hong Kong. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 59, n. 1–2, p. 147–159, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00071-5)
- GUGGENHEIM, Stephen *et al.* Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees. **Clays and Clay Minerals**, [S. l.], v. 43, n. 2, p. 255–256, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1346/CCMN.1995.0430213>
- GUIMAR, Marcelo; DUARTE, E. S. Ensaios Laboratoriais Para. [S. l.], p. 1, 2011.
- GUIMARÃES, Cleidson; GOMES, Vinicius Aguiar. Labor & Engenho. [S. l.], p. 1–8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/labore.v14i0.8659725>
- GUPTA, A. S.; RAO, K. Seshagiri. Index properties of weathered rocks: Inter-relationships and applicability. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 57, n. 2, p. 161–172, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s100640050032>

- GUPTA, Anand S.; RAO, Seshagiri K. Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 60, n. 3, p. 201–221, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s100640100113>
- GUROCAK, Zulfu; KILIC, Recep. Effect of weathering on the geomechanical properties of the Miocene basalts in Malatya, Eastern Turkey. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 64, n. 4, p. 373–381, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0005-2>
- HALE, Paul A.; SHAKOOR, Abdul. 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**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 117–130, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/9.2.117>
- HILL, I. G.; WORDEN, R. H.; MEIGHAN, I. G. Yttrium: The immobility-mobility transition during basaltic weathering. **Geology**, [S. l.], v. 28, n. 10, p. 923–926, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<923:YTITDB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<923:YTITDB>2.0.CO;2)
- HUMBERTO ALMEIDA; REZENDE, Márcio Marques. Agregados para a Construção Civil. **Sumário Mineral do Brasil**, [S. l.], n. 11, p. 602–635, 2013. Disponível em: <http://anepac.org.br/wp/wp-content/uploads/2011/07/DNPM2009.pdf>
- HUNT, Roy E. **Geotechnical Engineering Investigation Handbook**. [S. l.: s. n.]. v. 12E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/12.1.84>
- ITAIPU. Projeto – Aspectos de Engenharia. **Diretoria Técnica da Itaipu Binacional**, [S. l.], p. 784, 2009.
- KAMANI, Mojtaba; AJALLOEIAN, Rassoul. Evaluation of the mechanical degradation of carbonate aggregate by rock strength tests. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 121–134, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.05.007>
- KANYAYA, Jacob I.; TRENHAILE, Alan S. Tidal wetting and drying on shore platforms: An experimental assessment. **Geomorphology**, [S. l.], v. 70, n. 1–2, p. 129–146, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.04.005>
- KAPLAN, çağlayan D. *et al.* Weathering of andesite monuments in archaeological sites. **Journal of Cultural Heritage**, [S. l.], v. 14, n. 3 SUPPL, p. 77–83, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.11.022>
- KHALEGHI ESFAHANI, Mohammad; KAMANI, Mojtaba; AJALLOEIAN, Rassoul. An investigation of the general relationships between abrasion resistance of aggregates and rock aggregate properties. **Bulletin of Engineering Geology and the**

Environment, [S. l.], v. 78, n. 6, p. 3959–3968, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1366-7>

KHANLARI, Gholamreza; ABDILOR, Yasin. Influence of wet–dry, freeze–thaw, and heat–cool cycles on the physical and mechanical properties of Upper Red sandstones in central Iran. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 74, n. 4, p. 1287–1300, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0691-8>

KOOHMISHI, Mehdi; PALASSI, Massoud. Degradation of railway ballast under compressive loads considering particles rearrangement. **International Journal of Pavement Engineering**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 157–169, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1449949>

KORKANÇ, M.; TUĞRUL, A. Evaluation of selected basalts from Niğde, Turkey, as source of concrete aggregate. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 75, n. 3–4, p. 291–307, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.015>

LADEIRA, F. L., MINETTE, E. A quantificação da alteração e da alterabilidade de rochas. In: **Congresso brasileiro de geologia de engenharia, 4., 1984^a**. Belo

Horizonte. Anais... São Paulo: ABGE, v. 3, 1984a, p. 351-358

LEYLAND, R. C.; VERRYIN, S.; MOMAYEZ, M. Smectite clay identification and quantification as an indicator of basic igneous rock durability. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 74, n. 3, p. 981–989, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0669-6>

LEYLAND, Robert C.; PAIGE-GREEN, Phil; MOMAYEZ, Moe. Development of the Road Aggregate Test Specifications for the Modified Ethylene Glycol Durability Index for Basic Crystalline Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 26, n. 7, p. 04014028, 2014. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000946](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000946)

LI, Gaojun *et al.* Temperature dependence of basalt weathering. **Earth and Planetary Science Letters**, [S. l.], v. 443, p. 59–69, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.015>

LIMA, Adalto Gonçalves; FLORES, Diego Moraes. River slopes on basalts: Slope-area trends and lithologic control. **Journal of South American Earth Sciences**, [S. l.], v. 76, p. 375–388, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.03.014>

LIMA, Jose Janio. **Estudo da Dilatação Térmica de Rochas Usadas em Revestimento de Edificações**. 2002. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2002.

LOUBSER, Maggi; VERRYIN, Sabine. Combining XRF and XRD analyses and sample

preparation to solve mineralogical problems. **South African Journal of Geology**, [S. l.], v. 111, n. 2–3, p. 229–238, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gssajg.111.2-3.229>

LOUBSER, Michael J. Weathering of basalt and sandstone by wetting and drying: A process isolation study. **Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography**, [S. l.], v. 95, n. 4, p. 295–304, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/geoa.12023>

LUZ, ADÃO BENVINDO DA; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Manual de Agregados para construção civil**. [S. l.: s. n.]. v. 53E-book. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Downloads/fvm939e.pdf>

MA, Zheng-jing *et al.* Effects of rain and heat-cool cycles on the weathering behavior of basalt from Wudalianchi, Heilongjiang Province, NE China. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 78, n. 8, p. 6033–6045, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01512-3>

MARQUES, Eduardo A. G.; VARGAS, Eurípedes Do A.; ANTUNES, Franklin S. A study of the durability of some shales, mudrocks and siltstones from Brazil. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S. l.], v. 23, n. 3, p. 321–348, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10706-004-1605-5>

MARRANO, Antonio. **Caracterização tecnológica das Rochas basálticas da Usina Hidroelétrica Canoas I, Rio Paranapanema, SP/PR**. 1997. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 1997.

MARTINI, I. P.; CHESWORTH, W. **Weathering, soils and paleosols**. [S. l.: s. n.]. E-book. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(93\)90030-p](https://doi.org/10.1016/0277-3791(93)90030-p)

MARTINS, Leandro; CARDOSO, Dilson. Production of ethyleneglycols and derivatives by catalytic reactions of ethylene oxide. **Química Nova**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 264–273, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0100-40422005000200018>

MOMENI, A. *et al.* The effect of weathering on durability and deformability properties of granitoid rocks. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 76, n. 3, p. 1037–1049, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0999-7>

MOON, Vicki; JAYAWARDANE, Jayanthi. Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 74, n. 1–2, p. 57–72, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.02.002>

MORTON, Kirsty *et al.* Detailed analysis of probe permeameter and interval pressure

transient test permeability measurements in a heterogeneous reservoir. **Petroleum Geoscience**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 209–216, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1144/petgeo.8.3.209>

NESBITT, H. Wayne; MARKOVICS, G. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, [S. l.], v. 61, n. 8, p. 1653–1670, 1997.

NEW ZEALAND GEOTECHNICAL SOCIETY. Field description of Soil and rock. **Guideline for the field classification and description of soil and rock for engineering purpose**, [S. l.], n. December, p. pp.3-38, 2005.

OHTA, Tohru; ARAI, Hiroyoshi. Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. **Chemical Geology**, [S. l.], v. 240, n. 3–4, p. 280–297, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.02.017>

OLIVEIRA, Patricia Casarotto de; ZUQUETTE, Lázaro Valentin. Evaluation of weathering of basaltic lithotypes based on pH, electrical conductivity, and point-load strength tests. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S. l.], v. 67, n. 1, p. 13–19, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672014000100002>

ÖZBEK, A. Investigation of the effects of wetting–drying and freezing–thawing cycles on some physical and mechanical properties of selected ignimbrites. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 73, n. 2, p. 595–609, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0519-y>

PAIGE-GREEN, P. Durability testing of basic crystalline rocks and specification for use as road base aggregate. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 66, n. 4, p. 431–440, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0088-z>

PELLENZ, Elbio. Diagnóstico preliminar dos impactos ambientais da mineração no Paraná. **MINERAIS DO PARANÁ S.A - MINEROPAR**, [S. l.], p. 217, 2001.

PELTIER, Louis C. The geographic cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. **Annals of the Association of American Geographers**, [S. l.], v. 40, n. 3, p. 214–236, 1950. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00045605009352070>

PEREIRA, Maria Luísa *et al.* Characterization and correlation of engineering properties of basalts. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], p. 2889–2910, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02107-7>

- PIASTA, Wojciech; GÓRA, Jacek; TURKIEWICZ, Tadeusz. Properties and durability of coarse igneous rock aggregates and concretes. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 126, p. 119–129, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.022>
- PLEVOVÁ, E. *et al.* Thermal behavior of selected Czech marble samples. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, [S. l.], v. 101, n. 2, p. 657–664, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10973-010-0907-5>
- POLA, Antonio *et al.* General characterization of the mechanical behaviour of different volcanic rocks with respect to alteration. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 169, p. 1–13, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.11.011>
- POURBAIX, M. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. Houston:NACE International. **Materials Science Forum**, [S. l.], p. 43–54, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.251-254.143>
- PRICE, D. G. Weathering and weathering processes. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 243–252, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1144/gsl.qjegh.1995.028.p3.03>
- PUDLO, Dieter *et al.* The impact of diagenetic fluid-rock reactions on Rotliegend sandstone composition and petrophysical properties (Altmark area, central Germany). **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 67, n. 2, p. 369–384, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1723-y>
- RAMASAMY, Prabu; GROUP, Mott Macdonald. Performance of Oil Palm Shell (OPS) and OPS Concrete under Aggressive Conditions. [S. l.], n. February, 2020.
- ROBERTSON, Eugene C. Thermal Properties of Rocks. **US Department of the Interior: Geological Survey**, [S. l.], p. 88–441, 1988.
- RODRIGUEZ-NAVARRO, Carlos; DOEHNE, Eric. Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S. l.], v. 24, n. 2–3, p. 191–209, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9837\(199903\)24:3<191::aid-esp942>3.0.co;2-g](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9837(199903)24:3<191::aid-esp942>3.0.co;2-g)
- SALLES, R. O. **Durabilidade de Geossintéticos em Equipamentos de Degradação em Laboratório**. 2006. - Dissertação de Mestrado da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-UENF, Campos dos Goytacazes-RJ., [s. l.], 2006.
- SALLES, Raquel Ofrante. **Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade da Rocha Gnáissica da Obra do Ahe Simplício**. 2013. - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [s. l.], 2013.

SAMPAIO, Marconi Neves. Avaliação do Colapso por Degradação em Enrocamentos Arenítico e Basáltico através de Procedimentos de Laboratório. *[S. l.]*, p. 82, 2010.

SANGSEFIDI, Ebrahim *et al.* Weathering behaviour of road aggregate of andesitic composition in a New Zealand quarry. **Road Materials and Pavement Design**, *[S. l.]*, v. 0, n. 0, p. 1–19, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1710236>

SANTIAGO, L. O. **Alteração e Alterabilidade de Rochas Basálticas Intrusivas Metamorfizadas e Filitos Sericíticos da Região do Quadrilátero Ferrífero e sua Implicação no Comportamento Mecânico**. Tese, Programa de Pós graduação em engenharia civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SANTOS, D. **ANÁLISE DA EXTRAÇÃO DE AREIA NO TRECHO LIVRE DO CANAL DO ALTO CURSO DO RIO PARANÁ, ENTRE OS MUNICÍPIOS DE GUAÍRA E MARILENA (PR): IMPACTOS AMBIENTAIS E APLICABILIDADE**. 2013. - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, *[s. l.]*, 2013.

SHAHNIN, MOHD SHAFIQ. **Properties of Different Aggregate Types Use As Highway Construction Material**. 2010. - Universiti Teknologi Petronas., *[s. l.]*, 2010.

SHALKOWSKI, Anestoria; KODAMA, Yoshinori; NAKANO, Shigenori. The assessment of weathering stages in granites using an EC/pH meter. **Geomorphology**, *[S. l.]*, v. 105, n. 3–4, p. 253–260, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.10.002>

SILVA, G. B.; SOUZA, F. R.; GOMES, A. C. F. Caracterização Tecnológica De Resíduo De Britagem E Sua Avaliação Como Areia Artificial. *[S. l.]*, 2019.

SILVA, Narciso G.; BUEST, Guilherme; CAMPITELI, Vicente Coney. Argamassas Com Areia Britada: Influência dos finos e da forma das partículas. **VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, *[S. l.]*, p. 12–22, 2005.

SOJEN, Taylor; View of Geochemical and Petrographical Evolution of the Weathering Mantle Derived from Basalt in Bangam Locality (West-Cameroon)_ Implication in the Bauxitisation Process.pdf. **Current Journal of Applied Science and Technology**, *[S. l.]*, v. 36, n. 3, p. 1–20, 2019.

SOUZA, Felipe Andrade D. E. **Dissertação de Mestrado ESTUDO DA ALTERAÇÃO DA BRITA FRENTE À DRENAGEM ÁCIDA DE ROCHA**. 2013. - Universidade Federal de Ouro Preto, *[s. l.]*, 2013. Disponível em: http://nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/dissertacao-

estudoalteracaobrita.pdf

SQUISATO, Eloíza *et al.* **Litogeoquímica E aspectos Petrogenéticos dos basaltos da Província Magmática do Paraná na porção centro-norte do Estado de São Paulo.**

[S. l.: s. n.]

SUÁREZ, Mercedes *et al.* Smectites: The key to the cost overruns in the construction of the third set of locks of the Panama Canal. **Engineering Geology**, [S. l.], n. C, p. 106036, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106036>

TATING, Frederick; HACK, Robert; JETTEN, Victor. Weathering effects on discontinuity properties in sandstone in a tropical environment: case study at Kota Kinabalu, Sabah Malaysia. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 74, n. 2, p. 427–441, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0625-5>

TUGRUL, A.; GURPINAR, O. The Effect of Chemical Weathering on the Engineering Properties of Eocene Basalts in Northeastern Turkey. **Environmental & Engineering Geoscience**, [S. l.], v. III, n. 2, p. 225–234, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.III.2.225>

TURK, N.; DEARMAN, W. R. An investigation into the influence of size on the mechanical properties of aggregates. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 143–149, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF02590458>

VAN BLERK, Petrus G. L. *et al.* Ethylene Glycol Accelerated Weathering Test: An Improved, Objective Aggregate Durability Test Method. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S. l.], v. 2655, n. 1, p. 27–35, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2655-05>

VELDE, Bruce; MEUNIER, Alain. Basics for the Study of Soil and Weathered Rock Geochemical Systems. In: **The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. v. 147p. 75–111. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-540-75634-7_2

VERGARA, Maximiliano R.; TRIANTAFYLLIDIS, Theodoros. Swelling behavior of volcanic rocks under cyclic wetting and drying. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, [S. l.], v. 80, p. 231–240, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.08.021>

VERHOEF, PETER NW; VAN DE WALL, Alexander RG. Application of petrography in durability assessment of rock construction materials. [S. l.], p. 307–330, 1998.

- VERINK, Jr D. Simplified Procedure for Constructing Pourbaix Diagrams. **Uhlig's Corrosion Handbook: Third Edition**, [S. l.], v. 535, n. 1979, p. 93–101, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470872864.ch7>
- VILES, Heather *et al.* Simulating weathering of basalt on Mars and Earth by thermal cycling. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 37, n. 18, p. 1–5, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2010GL043522>
- WAICHEL, Breno L. Estruturação De Derrames E Interações Lava-Sedimento Na Porção Central Da Província Basáltica Continental Do Paraná. [S. l.], p. 108, 2006.
- WECKMÜLLER, Rômulo; VICENS, Raúl Sánchez. Revista Brasileira de Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 06, p. 1275–1291, 2011.
- WEINERT, H. H. Engineering petrology for roads in South Africa. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 363–395, 1968. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(68\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0013-7952(68)90017-3)
- WELLS, Tony *et al.* Laboratory simulation of the salt weathering of schist: I. Weathering of schist blocks in a seasonally wet tropical environment. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S. l.], v. 31, n. 3, p. 339–354, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/esp.1248>
- WENG, Lei; WU, Zhijun; LIU, Quansheng. Influence of heating/cooling cycles on the micro/macroc cracking characteristics of Rucheng granite under unconfined compression. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 79, n. 3, p. 1289–1309, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01638-4>
- XIANG, Yan *et al.* Seepage analysis of the fractured rock mass in the foundation of the main dam of the Xiaolangdi water control project. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 74, n. 5, p. 4453–4468, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4445-0>
- YANG, Xiaojie *et al.* Effect of wetting and drying cycles on microstructure of rock based on SEM. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 78, n. 6, p. 1–10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8191-6>
- YUE, Qingyou *et al.* 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**, [S. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09774-5>
- ZHANG, Dan *et al.* 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**, [S. l.], v. 246, p. 1–6, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.011>

ZHANG, Supping Peng; Jincai. **Engineering Geology for Underground Rocks**. Berlin: Springer, Heidelberg, 2002. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-540-73295-2_1

ZHOU, Zilong *et al.* Influence of cyclic wetting and drying on physical and dynamic compressive properties of sandstone. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 220, p. 1–12, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.017>

APÊNDICE A – Análise granulométrica para CAE

Figura 60- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CAE II-BMC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CAE III-BMC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CAE II-BVA.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 63- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CAE III-BVA.

Fonte: Elaborado pelo autor.

APÊNDICE B – Análise granulométrica para CNC

Figura 64- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CNC - BMC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 65- Análise granulométrica para resistência ao esmagamento para CNC - BVA

Fonte: Elaborado pelo autor.