

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

TATIANE REGINA CANOVA

**AVALIAÇÃO DOS CICLOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA DA NBR
12696:1992 PARA ROCHA BASÁLTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO- PR

2017

TATIANE REGINA CANOVA

**AVALIAÇÃO DOS CICLOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA DA NBR
12696:1992 PARA ROCHA BASÁLTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.^a MSc. Patricia Casarotto de Oliveira

TOLEDO- PR

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 106

AVALIAÇÃO DOS CICLOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA DA NBR 12696:1992 PARA ROCHA BASÁLTICA

por

Tatiane Regina Canova

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15:50 h do dia **13 de Novembro de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Elmagno Catarino Santos Silva
(UTFPR – TD)

MSc. Debora de Oliveira
(CEASB/FPTI/ITAIPU)

Prof.^a MSc. Patricia Casarotto de Oliveira
(UTFPR – TD)
Orientadora

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fulvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, criador de tudo e que está acima de todos, pela proteção, bondade e direcionamento em cada momento de minha vida.

Pelos meus pais, Neuri e Cleci, agradeço por todos os conselhos e auxílio prestados e por não medirem esforços para que eu pudesse chegar até aqui. A minha irmã Vanessa Canova, que sempre me apoiou, foi compreensiva e amorosa com seu jeito todo especial.

Agradeço meu namorado Jean Frasson, por toda a paciência e pelos 6 anos que está me acompanhando. Obrigada pela sua compreensão em momentos de ausência e por sempre acreditar e nunca desistir de mim.

Agradeço a todos que auxiliaram durante a execução dos ensaios de laboratório, aos Técnicos Marcos e Wilson e aos voluntários, em especial à Aline, que dividiu muitos dias de ensaio na UTFPR-TD.

Muito obrigado aos meus colegas de graduação, principalmente a Tainara e Paula, pela amizade, incentivo e auxílio durante o longo caminho da universidade.

Aos professores do curso de Engenharia Civil da UTFPR-TD que contribuíram para minha formação, principalmente à professora Patricia Casarotto, pela orientação técnica neste trabalho e em todos os projetos realizados em conjunto.

Ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB/PTI/ITAIPU) pelo apoio financeiro e técnico, especialmente a Engenheira Josiele e a Geóloga Debora que ofereceram importantes contribuições para este trabalho.

RESUMO

CANOVA, T. R. Avaliação dos ciclos de alteração acelerada da NBR 12696:1992 para rocha basáltica. 2017. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo/PR, 2017.

As rochas são amplamente utilizadas em obras da engenharia civil como agregados para concreto, enrocamento, pavimentação, ferrovia, entre outros. Muitas vezes, o material rochoso fica diretamente exposto ao ambiente, sendo necessários estudos de durabilidade para avaliar a resistência do mesmo frente às ações intempéricas. É esperado que ocorram alterações nas propriedades geotécnicas da rocha ao longo do tempo. Nesse sentido, esse trabalho teve como objetivo apresentar uma rotina de ensaios de laboratório para a identificação do tempo de ciclagem de amostras de litotipos basálticos, baseados na NBR 12696:1992, NBR 12697:1992 e no método de Absorção d'água adaptado de Hamrol (1961). Com a análise de diferentes tempos de ciclos água-estufa para litotipos basálticos, observou-se que a perda de peso do material foi mínima (menor que 4%), se comparado ao ensaio de ciclagem acelerada com Etilenoglicol (aproximadamente 37%). Desse modo, foi possível identificar que o ensaio de ciclagem água-estufa não foi representativo para identificar a alterabilidade do material rochoso, em contrapartida, o ensaio com Etilenoglicol permitiu verificar que mesmo blocos de rocha com boas qualidades físico-mecânicas sofreram alteração ao longo do tempo, principalmente aqueles que apresentaram argilominerais em sua composição.

Palavras-chave: Basalto. Ciclagem água-estufa. Ciclagem Etilenoglicol. Alterabilidade.

ABSTRACT

CANOVA, T. R. Evaluation of the accelerated weathering cycles of NBR 12696:1992 for basaltic rocks. 2017. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo/PR, 2017.

Rocks are widely used in civil engineering works such as aggregates for concrete, rockfill, paving, railroad, among others. Often, the rock material is directly exposed to the environment, and durability studies are necessary to evaluate its resistance against weathering. Changes in the geotechnical properties of the rock are expected to occur over time. In this sense, the objective of this work was to present a routine of laboratory tests for the identification of the cycle time of samples of basaltic lithotypes, based on NBR 12696:1992, NBR 12697:1992 and the Water Absorption method adapted from Hamrol (1961). With the analysis of different times of water-greenhouse cycles for basaltic lithotypes, it was observed that the weight loss of the material was minimal (less than 4%), compared to the accelerated cycle test with Ethylene glycol (approximately 37%). Thus, it was possible to identify that the water-greenhouse cycle test was not representative to identify the alterability of the rock material, in contrast, the test with Ethylene glycol allowed to verify that even blocks of rock with good physical-mechanical qualities have undergone alteration throughout the time, especially those that presented clay minerals in their composition.

Palavras-chave: Basalt. Water-greenhouse cycle. Cycle Ethylene Glycol. Alterability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama de composição média de magmas basálticos.	17
Figura 2- Ordem de cristalização dos minerais.	18
Figura 3- Ordem de alteração química dos minerais.....	20
Figura 4- Comparação entre superfícies específicas.	22
Figura 5- Relação entre a precipitação e a temperatura anual.....	23
Figura 6- Perfil estratigráfico do Paraná.....	27
Figura 7- Vulnerabilidade à Denudação (intemperismo e erosão).	28
Figura 8- Bancada de exploração da Pedreira A.....	29
Figura 9- Coleta de material na pilha 1.	29
Figura 10- Coleta de material na pilha 2.	30
Figura 11- Frente da bancada da pilha 3.	31
Figura 12- Fluxograma resumo das etapas do trabalho.....	34
Figura 13- Ponteira de carga pontual adaptada para o ensaio.....	36
Figura 14- Dimensões dos fragmentos usados em ensaio de carga pontual.....	36
Figura 15- Esquema de interpretação de <i>Box-Plot</i>	37
Figura 16- Exemplo de gráfico de velocidade de absorção d'água.....	39
Figura 17- Relação entre a precipitação e a temperatura anual.....	42
Figura 18- Imagem macroscópica e respectiva imagem microscópica dos tipos de amostras. (A) Basalto maciço cinza-rosado com minerais escuros. (B) Basalto maciço cinza-rosado com matriz descolorida. (C) Basalto maciço cinza-rosado com minerais verde-amarelados.	44
Figura 20- Correlação entre os parâmetros obtidos nos ensaios de laboratório em função das características de cada amostra.	48
Figura 21- Curva de absorção d'água e secagem de litotipos basálticos.	49
Figura 22- Variação de absorção d'água entre leituras em amostras de basalto (dimensões entre 20 a 40 mm).....	49
Figura 23- Variação de absorção d'água entre leituras em amostras de basalto (dimensões entre 40 a 60 mm).....	50
Figura 24- Dados comparativos do ensaio pelo método de ciclagem água-estufa: tempos da NBR 2696 e tempo adaptado pelo Método de Hamrol para amostras de granulometria entre 20 a 40 mm.	51

Figura 25- Dados comparativos do ensaio pelo método de ciclagem água-estufa: tempos da NBR 12696e tempo adaptado pelo Método de Hamrol para amostras de granulometria entre 40 a 60 mm.	52
Figura 26- Amostras durante ensaio de ciclagem acelerada com granulometria entre 20 mm a 40 mm. (a) Ciclos de acordo com a NBR 12696. (b) Ciclos adaptados através da metodologia apresentada por Hamrol (1ª sugestão). (c) Ciclos de imersão em Etilenoglicol pela NBR 12697.....	56
Figura 27- Amostras durante ensaio de ciclagem acelerada com granulometria entre 40 mm a 60 mm. (a) Ciclos de acordo com a NBR 12696. (b) Ciclos adaptados através da metodologia apresentada por Hamrol (1ª sugestão). (c) Ciclos de imersão em Etilenoglicol pela NBR 12697.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Exemplos de litotipos	19
Quadro 2- Dados da bibliografia sobre ensaios de alterabilidade de basalto.....	25
Quadro 3- Classes do grau de alteração.....	32
Quadro 4- Classes de consistência	33
Quadro 5- Dimensões de amostras para ensaio de laboratório	33
Quadro 6- Índice de qualidade de litotipos rochosos.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Índice de alterabilidade	26
Tabela 2- Dados meteorológicos da estação localizada em Toledo-PR	42
Tabela 3- Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.	46
Tabela 4- Resumo dos resultados encontrados	50
Tabela 5- Classificação dos índices de perda de peso.	52
Tabela 6- Dados do ensaio com Etilenoglicol.....	53
Tabela 7- Resumo dos resultados.....	55

LISTA DE SÍMBOLOS

α_a : Absorção d'água

ρ_a : Densidade aparente

η_a : Porosidade Aparente

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

D_e : Diâmetro equivalente

I_m : Índice de perda de peso

$I_{S(50)}$: Resistência de carga pontual para o diâmetro de 50 mm

$I_{S(D_e)}$; Resistência de carga pontual para o diâmetro equivalente

ISRM: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering

m : Peso retido na peneira de 19 mm

m_0 : Peso inicial

M_{sat} : Peso saturado

M_{sec} : Peso seco

M_{sub} : Peso saturado submerso

NBR: Norma Brasileira

t : Tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivos Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	ROCHAS ÍGNEAS.....	16
2.2	PROCESSOS DE ALTERAÇÃO DE MATERIAIS ROCHOSOS.....	19
2.2.1	Fatores intempéricos.....	21
2.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA ANÁLISE DA ALTERABILIDADE DE ROCHAS.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	MATERIAL DE ESTUDO.....	27
3.1.1	Características do local de coleta de amostras.....	28
3.2	CLASSIFICAÇÃO TÁTIL-VISUAL.....	31
3.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	33
3.3.1	Índices Físicos.....	34
3.3.2	Carga Pontual.....	35
3.3.3	Apresentação dos Resultados.....	37
3.3.4	Ensaio de alterabilidade de rocha.....	38
3.3.3.1	<i>Velocidade de Absorção D'água.....</i>	<i>38</i>
3.3.3.2	<i>Ciclagem Acelerada pela NBR 12696:1992.....</i>	<i>40</i>
3.3.3.3	<i>Ciclagem Acelerada com Etilenoglicol pela NBR 12697:1992.....</i>	<i>41</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1	DESCRIÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO MEIO AMBIENTE.....	42
4.2	CARACTERIZAÇÃO TÁTIL-VISUAL.....	43
4.2.1	Índices Físicos e Carga Pontual.....	45
4.2.2	Velocidade de Absorção D'Água.....	48
4.2.3	Ciclagem acelerada água-estufa.....	51
4.2.4	Ciclagem Acelerada com Etilenoglicol pela NBR 12697:1992.....	53
4.2.5	Considerações sobre os ensaios de laboratório.....	54
5	CONCLUSÕES.....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

As rochas são utilizadas na construção civil de diversas maneiras, como agregados para concreto, em barragens de enrocamento, obras de pavimentação e ferrovias, revestimentos, dentre outros. Muitas vezes os blocos de rocha ficam diretamente expostos ao ambiente, sendo necessários estudos de durabilidade para avaliar a resistência do material rochoso frente às ações intempéricas. Assim, a alteração do material rochoso pode ocorrer por meio de variações de clima (temperatura e disponibilidade de água), de relevo (forma da superfície terrestre), modificações antrópicas (devido ação do homem), bem como da suscetibilidade de alteração dos seus minerais.

Um fator agravante no processo de desagregação da rocha é a presença de argilominerais expansivos. A expansibilidade decorre de variações na temperatura, umidade e pressão, ocasionando enfraquecimento nas propriedades físicas do material e, conseqüentemente, maior facilidade à degradação e fragmentação.

Devido a estes fatores, estudos preliminares sobre o estado de alteração e alterabilidade das rochas é imprescindível para avaliar a vida útil dos mais variados tipos de obras civis. Estes estudos devem viabilizar a caracterização do material e identificar o tipo de ataque que poderá sofrer, principalmente a averiguação do comportamento da rocha frente à situação ambiente exposta.

Nacionalmente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) regulamentava o estudo de alterabilidade de agregados com a ciclagem acelerada água-estufa (NBR 12696:1992) e ciclagem acelerada com Etilenoglicol (NBR 12697:1992), que de maneira geral, possuíam o objetivo de avaliar a presença de minerais expansivos no material rochoso.

Com base nessas normativas, era possível avaliar os blocos de rocha de forma quali-quantitativa (registro fotográfico, análise tátil-visual e perda de peso), frente às alterações impostas pelos ensaios. Contudo, em meados de 2013 essas normas foram canceladas sem reavaliação ou substituição, pelo motivo de não serem mais utilizadas pelo Comitê de Cimento, Concreto e Agregados, informação obtida no próprio *site* da ABNT.

Ademais, as normas em questão tratavam de agregados nas dimensões de 19 mm a 76 mm sem qualquer distinção de formação ou tipo de rocha. Também não estabeleciam qualificação para os agregados ensaiados, sendo o método de análise a comparação entre a perda de peso entre uma amostra e outra. Sobre a ciclagem água-estufa, além de, demasiadamente demorada a sua execução (120 ciclos), os tempos de ciclo eram o mesmo para um basalto ou para um arenito.

A anulação das normativas supracitadas implica em prejuízos técnico-financeiros às obras de engenharia que utilizam a rocha como material de construção, especialmente quando exposta a agentes intempéricos, são exemplos: barragens de enrocamento, obras ferroviárias e obras em encostas. Tecnicamente, os ensaios de alteração de rocha permitem analisar a durabilidade do material de construção e, conseqüentemente, da obra civil. Sobre os aspectos financeiros, relacionam-se a necessidade de reposição ou remediação de patologias decorrentes das modificações físico-químicas da rocha, para evitar riscos à segurança das obras de engenharia.

Com base no exposto e, considerando a relevância de normativas que estabeleçam critérios para execução de ensaios laboratoriais, este trabalho buscou verificar a eficiência, em termos de alterabilidade, dos tempos de ciclos recomendados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua Norma 12696:1992.

A saber, inicialmente realizou-se o ensaio de Absorção d'água adaptado de Hamrol (1961), que identificou o tempo de saturação e secagem de rochas basálticas. De posse dessas informações, o ensaio de ciclagem foi realizado com os tempos estabelecidos por Norma e o novo tempo encontrado pelo ensaio de absorção d'água com faixas granulométricas de 20 mm até 60 mm. No entanto, observou-se que o material rochoso apresentou baixos índices de perda de peso.

Deste modo, os blocos de rocha foram submetidos ao ensaio de ciclagem acelerada com Etilenoglicol que apresentou resultados contrários, ou seja, alta taxa de perda de peso. Essa situação comprovou a existência de argilomineral expansivo na composição da rocha basáltica analisada, principalmente devido à desagregabilidade e fragmentação do agregado.

Nesse sentido, com este estudo foi possível discutir as situações obtidas nos ensaios com relação à qualidade do material e o rendimento dos tempos de ciclos de imersão em água e secagem em estufa, identificando os índices de alteração e a utilização destas normas em termos práticos da engenharia civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os estudos de alterabilidade de rocha são importantes para a segurança de obras da engenharia, visto que, a presença de minerais expansivos e alteráveis podem ocasionar patologias ou até mesmo a ruína de algumas obras, decorrendo principalmente devido à desagregabilidade de enrocamentos e aterros, desabamentos, rompimentos de revestimentos, problemas de fundações, entre outros.

Como exemplos de problemas associados a alteração de rochas, pode-se citar os colapsos em taludes naturais e artificiais registrados em Ouro Preto/MG, Santos/SP, no Japão e no Canadá. Também, a expansibilidade dos minerais que compõem a rocha basáltica já causou patologias em obras brasileiras de enrocamentos, aterros e rodovias- agregados de base e sub-base. A presença de argilomineral em rochas foi responsável, na Noruega, por desabamentos após perfurações de túneis, e na França, por rompimento de revestimentos nas paredes de túneis (FARJALLAT, 1972; WEINERT, 1968; BREKKE, 1965 *et al. apud* OLIVEIRA, 2012).

Estas situações podem ser evitadas estudando o agregado utilizado para a concepção da obra, exigindo-se uma qualidade mínima do fornecedor deste material. Assim, é imprescindível a validação de normativas que estabeleçam critérios básicos para a execução de ensaios de laboratório que avaliem o material rochoso.

Portanto, com base no exposto, este trabalho justifica-se pelo fato da NBR 12697:1992 sobre ciclagem acelerada com Etilenoglicol e a NBR 12696:1992 sobre ciclagem artificial de agregados através de água-estufa estarem canceladas, sem nenhuma outra substituição. Essa última, abrangendo um tempo demasiadamente elevado para realização, tornando-se muitas vezes inexecutável, com ciclos de saturação em água e secagem em estufa, fixos para qualquer tipo de agregado desde pedregulho médio (20 mm) até pedra de mão (76 mm), independentemente de sua litologia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Geral

O objetivo geral do trabalho é realizar ensaios laboratoriais para identificar a duração de ciclos de alteração em laboratório (saturação em água e secagem em estufa), para acelerar o processo de intemperismo em rocha basáltica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Com relação aos objetivos específicos enquadram-se:

- Coletar amostras de basalto comercial em pedreira no município de Toledo-PR;
- Identificar uma faixa granulométrica que potencialize a aceleração da alteração da rocha em laboratório;
- Caracterizar geotecnicamente o material rochoso por meio de análise tátil-visual, índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção aparente) e carga pontual;
- Realizar ensaios de ciclagem acelerada conforme recomendações da NBR 12696:1992 e NBR 12697:1992;
- Avaliar o tempo de saturação e de secagem das amostras pelo método de Absorção d'água proposto por Hamrol (1961), para identificar novos tempos de saturação e secagem em estufa;
- Comparar os dois métodos de estudo: tempos estabelecidos pela NBR 12696:1992 e os encontrados pela absorção d'água proposto por Hamrol (1961);
- Propor recomendações de ensaio para análise de ciclagem acelerada para basaltos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As rochas podem ser classificadas em três tipos básicos: ígneas, sedimentares e metamórficas e, de acordo com a ABNT (1965), são definidas como:

- Rocha ígnea ou magmática é qualquer tipo de rocha que advém da solidificação do magma. Podem ser plutônicas (formada a grandes profundidades, como o diorito e gabro), e extrusiva ou vulcânica (formada próximo à superfície terrestre, como o basalto e o riólito);

- Rocha metamórfica é aquela proveniente de transformações de rochas preexistentes submetidas a processos termodinâmicos de origem interna (endógena), produzindo novos minerais e texturas, como por exemplo, o gnaisse e o xisto;

- Rocha sedimentar é originada pela consolidação de outras rochas transportadas, depositadas ou por produtos de atividade orgânica, bioquímica ou precipitação química por evaporação, como por exemplo, o arenito e o calcário.

2.1 ROCHAS ÍGNEAS

Especificamente sobre as rochas ígneas, o magma possui uma composição muito variada (Figura 1), observado principalmente pelo teor de sílica (SiO_2). Os magmas basálticos apresentam temperatura de formação entre 1000 a 1200 °C, com baixa viscosidade devido a seu reduzido teor de sílica, se comparado com magmas andesitos e riolíticos, que possuem 62% e 74% de sílica, respectivamente (SZABÓ; BABINSKI; TEIXEIRA, 2009).

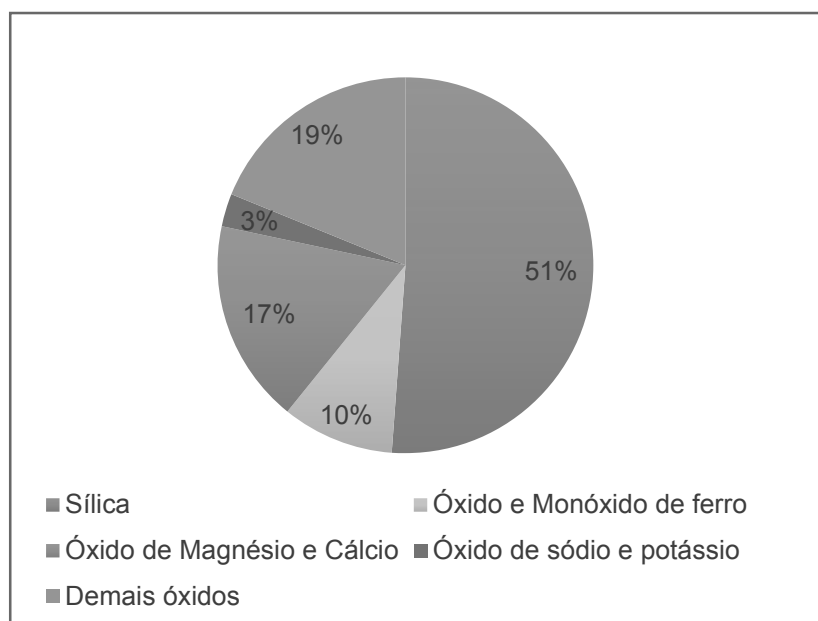


Figura 1- Diagrama de composição média de magmas basálticos.
Fonte: Adaptado de Szabó; Babinski; Teixeira, (2009).

A cristalização do magma é um processo bastante lento, pois inicialmente encontra-se a temperaturas elevadas e seus constituintes estão dissolvidos em material fundido. Quando se instala em partes superiores, perde calor para as rochas encaixantes e vai diminuindo a temperatura. Isso ocorre até que se inicia o processo de cristalização, formando pequenos núcleos de cristais, que aumentam de tamanho e formam a rocha ígnea (SZABÓ; BABINSKI; TEIXEIRA, 2009).

Assim, as rochas ígneas são classificadas em dois tipos básicos (PARAGUASSU; GANDOLFI; LANDIN, 1973):

- Rochas extrusivas ou vulcânicas: formadas na superfície da Terra e devido às condições de pressão e temperatura serem baixas, solidificam mais rapidamente e não possuem minerais muito desenvolvidos, como é o caso do basalto;
- Rochas intrusivas: é o inverso da rocha extrusiva, sendo formadas em grandes profundidades, como é o caso do granito.

Os minerais não cristalizam todos ao mesmo tempo, dependem diretamente da taxa de resfriamento e a composição do magma. De acordo com Caputo (2008), sabe-se que no decorrer do resfriamento, os diversos minerais iniciam sua cristalização em diferentes tempos e temperaturas e que os magmas possuem uma tendência previsível de cristalização, embora a proporção dos minerais da rocha final apresentar variações. Assim, Bowen (1956) estudou a relação entre essa taxa de

resfriamento e a cristalização, que originou a Série de Reações de Bowen, apresentada na Figura 2 (DAS, 2011).

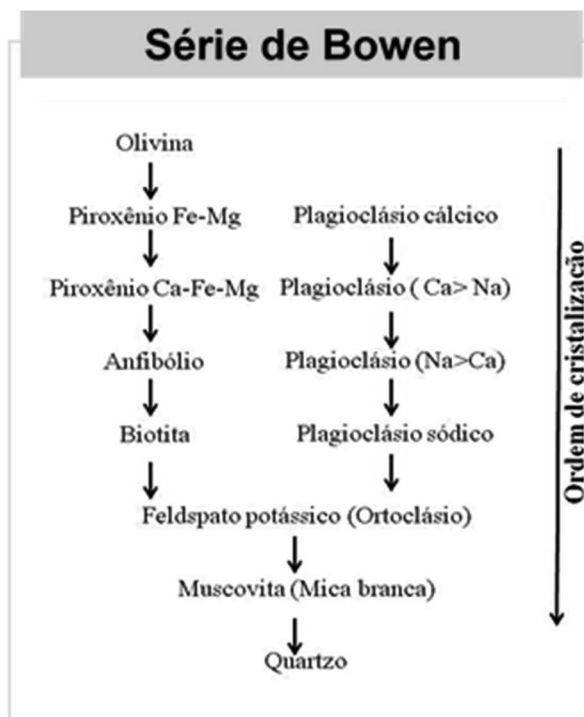
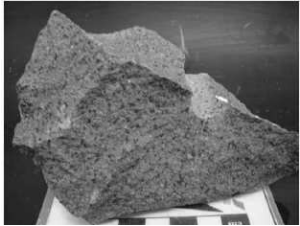


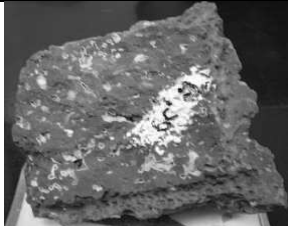


Figura 2- Ordem de cristalização dos minerais.
Fonte: Adaptado de Bowen (1956).

Os minerais que tendem a se cristalizar em altas temperaturas, são apresentados no topo da série (pirogenéticos), em contrapartida, os últimos formados a baixas temperaturas, ficam próximo a base (CAPUTO, 2008). Desde modo, devido à taxa de cristalização e profundidade de formação dos minerais, pode-se definir algumas características da rocha basáltica. De acordo com a ABNT (1995), estes litotipos podem ser definidos como descrito no Quadro 1.

Assim, o basalto possui granulação fina, de origem extrusiva, geralmente apresentando vesículas, que são originadas pelos escapes de gases durante o processo de resfriamento, os quais podem ser preenchidos posteriormente por minerais secundários, como quartzo, calcita, entre outros (PARAGUASSU; GANDOLFI; LANDIN, 1973).

Quadro 1- Exemplos de litotipos

Tipo	Descrição	Exemplo
Maciço	Rocha não evidencia presença macroscópica de vazios	 <p data-bbox="1106 533 1303 557">Basalto Maciço</p>
Vesicular	Rocha possui vazios ou vesículas provenientes do escape de gases	 <p data-bbox="1091 786 1318 815">Basalto Vesicular</p>
Amigdaloidal	Rocha possui em sua matriz vesículas preenchidas com materiais de composição diferente ao da matriz.	 <p data-bbox="1066 1052 1351 1081">Basalto Amigdaloidal</p>
Brecha	Rocha formada por fragmentos angulosos de outros materiais rochosos.	 <p data-bbox="1094 1317 1313 1346">Brecha Basáltica</p>

Fonte figuras: Silva (2013) e Oliveira (2012).

2.2 PROCESSOS DE ALTERAÇÃO DE MATERIAIS ROCHOSOS

A definição de alterabilidade de uma rocha pode ser encontrada por meio de comparações entre amostras ensaiadas em laboratório. Diz-se que uma rocha é mais alterável que outra quando ambas ao passarem pelos mesmos agentes intempéricos, durante o mesmo tempo, o grau de alteração de uma é mais elevado que outra (FARJALLAT, 1971).

Delgado Rodrigues (*apud* GUZZI, 1995, p. 4), ressalta a importância da composição mineralógica que surge exatamente da presença de minerais já alterados ou mesmo novos minerais formados após a consolidação da rocha, os minerais

secundários. A natureza e a quantidade desses minerais podem fazer com que uma rocha menos alterada seja mais susceptível à alteração do que uma inicialmente mais alterada, considerando-se a escala de tempo da engenharia.

Ou seja, além da ordem de cristalização dos minerais é importante o conhecimento da ordem de estabilidade química dos mesmos, que é apresentada na Figura 3 por meio da Série e Goldich (1938).



Figura 3- Ordem de alteração química dos minerais.
Fonte: Adaptado de Goldich (1938).

Nestes processos de alteração é importante o estudo dos minerais argilosos (silicatos de alumínio, podendo conter ferro, magnésio, potássio, sódio, lítio, entre outros), que são formados por alterações de minerais primários, como os feldspatos, piroxênios e os anfibólios (ABNT, 1995). Esse tipo de mineral presente na rocha, quando exposto ao meio externo com variação de umidade e pressão, gera enfraquecimento das ligações minerais, ocasionando a sua expansibilidade. Esse fator está totalmente relacionado com a desagregação ou degradação de rochas basálticas (FARJALLAT, 1971).

De acordo com Costa (2012), estudar o estado de alteração, que são as modificações físicas e químicas da rocha, é fundamental, pois conforme os minerais

vão se alterando, a resistência à compressão vai diminuindo, chegando a valores mínimos na condição de saprólito, ou seja, rocha decomposta.

Para Frazão (1993) a alterabilidade de rochas, que é a capacidade do material alterar-se ao longo do tempo, pode ser um dos mais complexos problemas que a engenharia civil tem enfrentado, relacionando sua utilização para construção com as solicitações que vão enfrentar em serviço.

2.2.1 Fatores intempéricos

O material rochoso ígneo formado a grandes profundidades necessita de um conjunto de alterações para adquirir a sua estabilidade, assim, genericamente, essas alterações são denominadas intemperismo, onde necessitam de tempo geológico para serem processadas (MARRANO, 1997).

De acordo com Branco (2009), muitas condições podem influenciar no intemperismo, tais como:

- Relevo: é capaz de determinar e influenciar diretamente na velocidade do fluxo de água das chuvas e, conseqüentemente, abrasividade da água;
- Tempo: relação direta com a alteração da rocha, visto que, quanto maior o tempo de exposição mais intensa será a ação do intemperismo;
- Rocha-mãe: responsável pela composição mineralógica, textura e estrutura do material rochoso resultante, que está atrelado à maior ou menor resistência à decomposição e à desagregação;
- Clima: um dos principais fatores de influência nos processos de alteração, devido à distribuição sazonal das chuvas e as variações de temperatura que ocorrem na superfície terrestre. Estas modificações de temperatura e umidade geram dilatação e contração de materiais rochosos.

Sobre os fatores que interferem no processo de alteração do material rochoso, as ações do intemperismo desagregam e fragmentam os minerais, decompondo-os e até mesmo formando novos minerais. Então, segundo Toledo (2014), é possível classificar os tipos de intemperismo nas rochas ígneas como sendo:

I. Intemperismo físico: fragmentação e desagregação dos blocos de rocha, ou seja, as transformações mecânicas, decorrentes principalmente das variações de temperatura e pressão. Esse processo ocorre devido à expansão e contração do material rochoso, gerando tensões entre os grãos que, por sua vez, deslocam-se e fragmentam-se.

Um fator importante a ser observado é que quando ocorre a fragmentação de qualquer sólido, aumenta-se a sua superfície específica, ou seja, a área exposta ao meio externo fica maior (Figura 4).

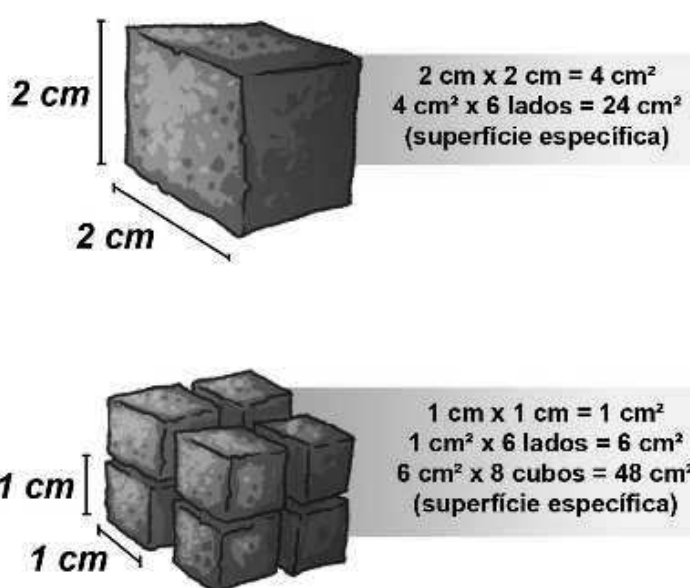


Figura 4- Comparação entre superfícies específicas.
Fonte: Toledo (2014).

II. Intemperismo químico: é a decomposição da rocha devido a reações químicas da água em contato com o material rochoso. Este processo intensifica-se perante as ações do intemperismo físico, que aumentam a superfície exposta do material, aumentando a alteração pela ação da água (Figura 5).

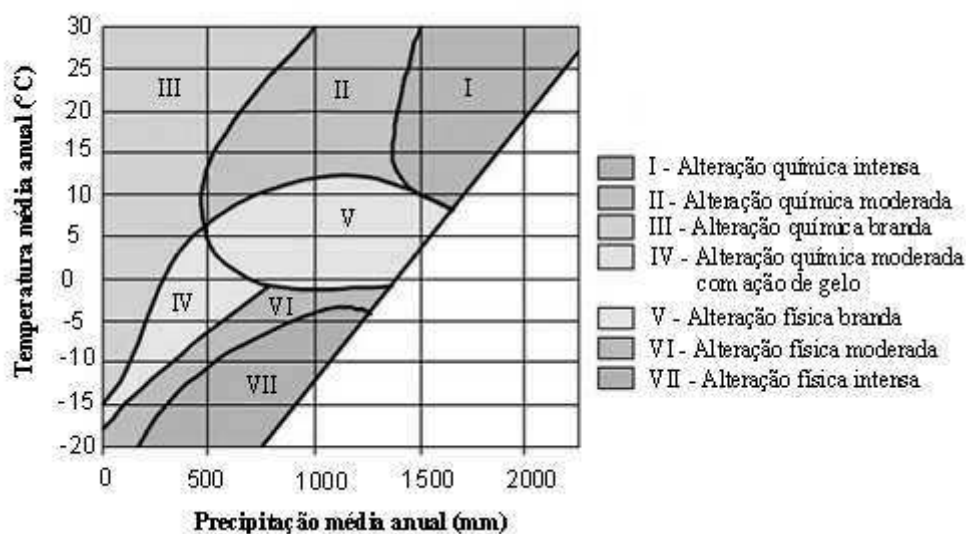


Figura 5- Relação entre a precipitação e a temperatura anual.
 Fonte: Modificado de Peltier, 1950 (*apud* OLIVEIRA, 2012, p. 37).

O contato com a água da chuva que possui diversas substâncias (compostos orgânicos, materiais dissolvidos pelo contato com a biosfera e substâncias dissolvidas através da trajetória pela atmosfera) geram reações químicas nos minerais primários nas rochas duras, que dependem diretamente das condições ambientes (temperatura, relevo e clima) e dos reagentes (composição da rocha sã). Assim, os resultados destas alterações químicas dão origem aos minerais secundários que constituem as formações superficiais (TOLEDO, 2014).

2.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA ANÁLISE DA ALTERABILIDADE DE ROCHAS

Na engenharia civil, diversos problemas são provocados pelas alterações das características do material rochoso que, conseqüentemente, levam ao processo de degradação. Segundo Frazão (1993), os principais problemas encontrados são:

- Modificação da distribuição granulométrica, quando utilizado como fragmentos;
- Diminuição da resistência mecânica e aumento da deformabilidade;
- Aumento da porosidade e da capacidade de absorção d'água;

- Diminuição da aderência ao cimento Portland e da adesividade a ligantes betuminosos.

Assim, os ensaios de resistência ao intemperismo têm o objetivo de avaliar a alteração físico-química do material rochoso por meio de ensaios acelerados em laboratório, o que permite analisar a alterabilidade do material quando utilizado como material de construção nas mais diversas obras da engenharia (COSTA, 2012).

De acordo com Costa (2012) os principais métodos empregados para a aceleração da alteração do material rochoso em laboratório são:

- Lixiviação contínua em extratores Soxhlet, onde as amostras são submetidas à percolação de água acidificada por gás carbônico a uma temperatura de 60°C e um número mínimo de 30 ciclos;
- Imersão em solução de sulfato de sódio ou magnésio durante 24 horas e aquecimento em estufa durante 10 ciclos, no mínimo;
- Imersão em água e congelamento durante 25 dias no mínimo e de 6 em 6 horas;
- Imersão em Etilenoglicol (ou glicerol) durante 15 dias, com acompanhamento do efeito deste ensaio a cada 3 dias;
- Imersão em água e secagem em estufa por meio de ciclos de 24 horas e no mínimo 30 ciclos.

A execução de ensaios de laboratório para analisar a alteração e alterabilidade de rochas é uma área de pesquisa explorada por diversos autores, como por exemplo, Oliveira (2012) e Frazão (1993). Assim, foi realizado um levantamento bibliográfico dos ensaios realizados e os valores experimentais apresentados por estes autores para a mesma litologia analisada neste trabalho: o basalto (Quadro 2).

Quadro 2- Dados da bibliografia sobre ensaios de alterabilidade de basalto

Característica do basalto	Ciclagem com Etilenoglicol (perda de peso em %)	Ciclagem água-estufa				
		Tempo de Secagem (h)	Tempo de saturação (h)	Nº Ciclos	Perda de peso máxima (%)	Perda de peso mínima (%)
Compacto Marrom-Avermelhado ¹	31,0 ± 11,8	24	12	54	1,4	0,7
Compacto Cinza-Esverdeado ¹	92,7 ± 12,7			20	88,7	3
Compacto Microvesicular Cinza Esverdeado ¹	53,1± 7,99			36	51,4	1,4
Compacto Cinza-Escuro ¹	10,7 ±7,31			60	0,7	0,1
Denso Cinza, com Minerais Rosas ou Brancos com Argilomineral disseminado ²	-	8	14	80	< 1	-
Rosado Vesículo-Amigdaloidal ²					3	

Fonte: ¹Frazão (1993) e ²Oliveira (2012).

Observa-se que os tempos de análise de cada estudo possuem duração de saturação e secagem diferentes. No entanto, para esses ensaios, Loubser (2013) destaca que a amplitude de saturação não parece ser um fator importante na influência da degradação, mas sim, o número de ciclos de água-estufa. Pois, na maioria das vezes, cada tipo de rocha pode responder aos estímulos externos em tempos diferentes. Isso remete a importância de analisar e identificar os tempos necessários para obter a máxima absorção e secagem do basalto. ‘

Para Farjallat (1971) os resultados obtidos nos ensaios com o material rochoso podem ser considerados satisfatórios se a rocha não apresentar modificação essencial em suas características físicas durante ou ao final dos ciclos de alteração. Porém, se apresentar mudança considerável em suas características ou resistência, estas são classificadas como desagregável ou não satisfatória para um determinado tipo de obra. Nesse aspecto Sadisun *et al.* 2005 (*apud* OLIVEIRA, 2012, p. 53) desenvolveu um índice que avaliou a alterabilidade da rocha em termos de perda de peso do material rochoso, Tabela 1.

Tabela 1- Índice de alterabilidade

Classe	Perda de peso (%)	Índice de alterabilidade
1	0 – 2	Muito baixo
2	2 – 10	Baixo
3	10 - 25	Médio
4	25 - 50	Alto
5	50 - 85	Muito alto
6	85 -100	Extremamente alto

Fonte: Modificado de Sadisun *et al.* 2005 (*apud* OLIVEIRA, 2012, p. 53).

Tanto os resultados de ensaios (Quadro 2), como a classificação de alterabilidade (Tabela 1) foram utilizados para comparar com os dados obtidos no presente estudo. Sobre a duração dos ciclos de alteração em laboratório, buscou-se otimizar os tempos de secagem e saturação para reduzir o tempo total do ensaio, que pode chegar a mais de 3 meses se realizados conforme NBR 12696:1992.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL DE ESTUDO

Para a realização deste estudo, as amostras de basalto foram fornecidas por uma pedreira localizada no município de Toledo, no Oeste do Paraná.

De acordo com dados da Paraná (2001), o basalto está presente em 52% do território paranaense (Figura 6) e originou-se dos derrames do vulcanismo continental, representado pelas rochas da Formação Serra Geral, do grupo São Bento, que em escala de tempo geológica foram formadas entre 140 a 230 milhões de anos atrás.

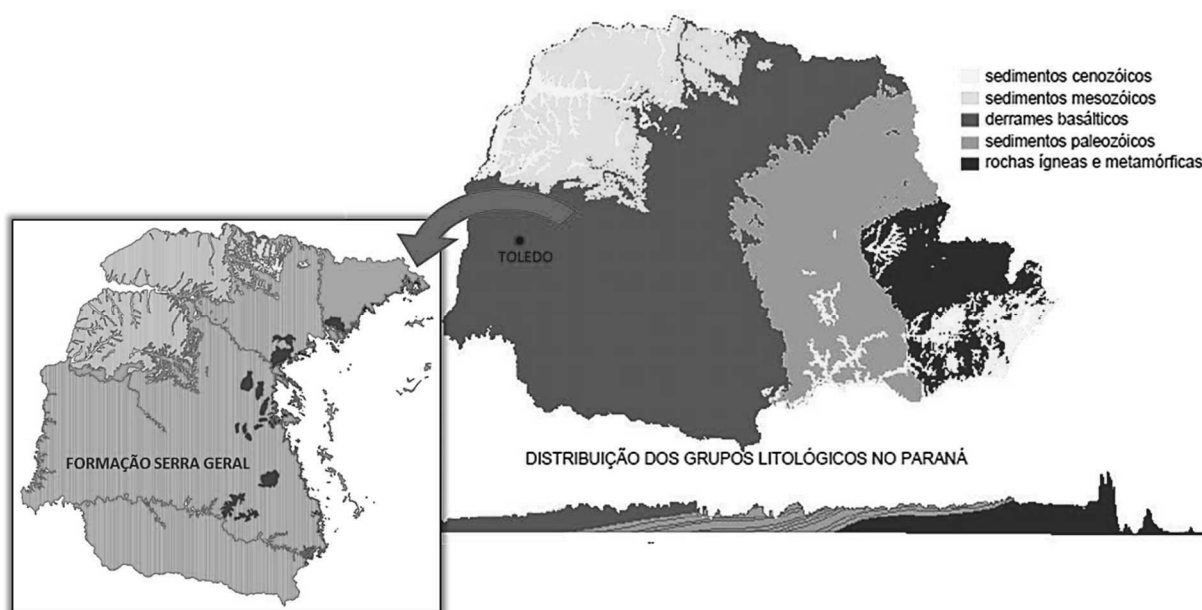


Figura 6- Perfil estratigráfico do Paraná.
Fonte: Adaptado de Paraná (2001).

O basalto apresenta índice de denudação¹ de 1,5, com alta resistência ao intemperismo e erosão (Figura 7). Os derrames basálticos dessa região possuem predominância de maciços afaníticos, cinzentos a pretos (PARANÁ, 2005).

¹ Índice de vulnerabilidade ao intemperismo e à erosão desenvolvido por Crepani *et al.* (2001) para as litologias que compõem o Estado do Paraná, com base na amplitude e declividade do relevo e no grau de dissecação da unidade - relação de porosidade e permeabilidade da rocha.

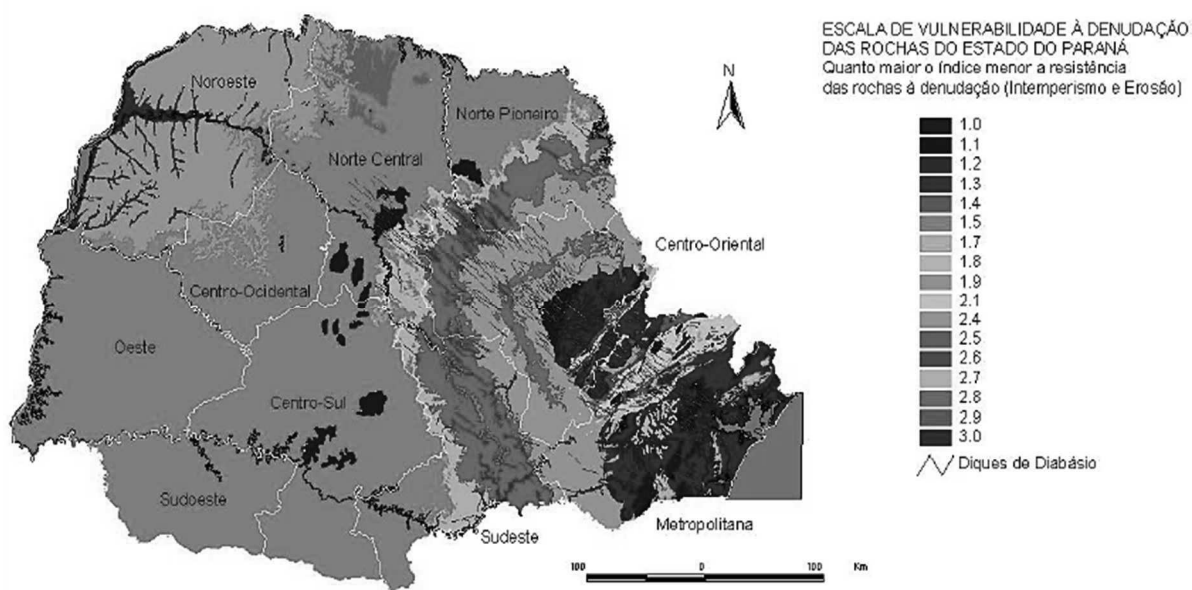


Figura 7- Vulnerabilidade à Denudação (intemperismo e erosão).
Fonte: Paraná (2005).

Com esta classificação é possível definir que áreas que apresentam altos valores de amplitude de relevo, declividade e grau de dissecação prevalecem processos de movimentação de solo e rocha e escoamento de água, processo conhecido como morfogenético. Por outro lado, baixos valores de amplitude de relevo, declividade e grau de dissecação, há predominância de fatores pedogenéticos, como transformação, adição e remoção do solo e rocha (CREPANI *et al.*, 2001).

3.1.1 Características do local de coleta de amostras

A coleta de campo das amostras de basalto foi realizada no dia 18 de janeiro de 2017 em uma pedreira de Toledo-PR, denominada como Pedreira A (Figura 8). No local, o maciço rochoso apresentava bancada de exploração de aproximadamente 40 metros de altura.



Figura 8- Bancada de exploração da Pedreira A.

Para realização dos ensaios propostos, o material rochoso foi separado por tamanho e algumas amostras foram reduzidas para atender as normativas. Na pedreira, foram definidos três pontos distintos de coleta de blocos de rocha (P1, P2 e P3) e obteve-se as seguintes informações sobre cada local, a saber:

- P1: pilha de rocha de basalto maciço com coloração cinza-rosado que saiu do britador, ou seja, passou pelo processo de britagem e estava exposta por aproximadamente 20 dias ao tempo. A detonação da rocha sã ocorreu em 13 de dezembro de 2016, e as amostras tinham dimensões entre 20 mm a 40 mm (Figura 9).



Figura 9- Coleta de material na pilha 1.

- P2: a pilha apresentava material de proveniente de uma bancada de 40 metros de altura. Foi identificado uma bancada de basalto maciço cinza-rosado com presença de minerais escuros e verde-amarelados, que segundo informações obtidas no local, é um material encontrado frequentemente e sofre modificações em sua granulometria se exposto ao tempo. No entanto, é muito resistente e difícil de britar, muitas vezes, danificando o britador. Nesta pilha, a rocha sã foi detonada na pedreira em 15 de janeiro de 2017 (Figura 10).



Figura 10- Coleta de material na pilha 2.

- P3: neste local foram coletadas amostras de basalto cinza-rosado maciço com presença de minerais escuros e verde-amarelados. Esta bancada foi detonada na pedreira no mesmo dia da P2, em 15 de janeiro de 2017 (Figura 11). Foram coletadas amostras de várias faixas granulométricas para realização dos ensaios de laboratório.



Figura 11- Frente da bancada da pilha 3.

Para cada pilha de rocha coletada foram separadas amostras testemunho, com o objetivo de análises e comparações futuras em relação ao material ensaiado.

3.2 CLASSIFICAÇÃO TÁTIL-VISUAL

Após a coleta de campo, os materiais foram acondicionados em sacos e levados até o laboratório de solos da UTFPR-TD onde foram identificadas de acordo com sua localização nas bancadas da pedreira.

Para classificação tátil-visual, algumas características importantes foram identificadas em cada bloco de rocha ígnea (TAGLIANI, 2009). A saber:

- Cor: depende do tipo de mineral que compõe o material rochoso em análise, definido pelo percentual de minerais ricos em ferro (máficos) presente na rocha (Leucocráticas- predominam os minerais de cor clara como quartzo, feldspatos, feldspatóides e micas moscovitas; Mesocrática: não há predomínio de minerais claros ou escuros; Melanocrática: predominam minerais de cor escura, como mica biotita, piroxênios, anfibólios e peridotitos; Ultramelanocrática: rochas predominantemente máficas);

- Mineralogia do basalto: análise da composição química do material e suas propriedades físicas;
- Textura: é a forma de organização interna do bloco rochoso e podem ser classificadas quanto ao tamanho dos minerais: Afanítica- formada por minerais não visíveis a olho nu; Fanerítica- minerais podem ser observados a olho nu;
- Grau de alteração: esta classificação (Quadro 3) adotará os parâmetros estabelecidos pela ISRM (1981);

Quadro 3- Classes do grau de alteração

Grau	Denominações	Características da rocha
A1	Rocha sã.	Nenhum sinal visível de material em alteração. Pode ocorrer leve descoloração na superfície das descontinuidades.
A2	Rocha pouco alterada.	Descoloração indica intemperismo no material rochoso e nas descontinuidades. Toda a rocha pode estar descolorida pela alteração e estar mais fraca que no estado de rocha sã.
A3	Rocha moderadamente alterada.	Menos da metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. Rocha sã ou descolorida está presente como arcabouço (estrutura granular) contínuo ou como núcleos pétreos.
A4	Rocha muito alterada.	Mais da metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. Rocha sã ou descolorida está presente como arcabouço descontínuo ou como núcleos pétreos.
A5	Rocha 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. Há grande alteração no volume, mas sem transporte de material.

Fonte: ISRM (1981).

- Grau de consistência: classificação das rochas para características de resistência do material (Quadro 4).

Quadro 4- Classes de consistência

Sigla	Denominações	Características da rocha
C1	Rocha muito resistente	Amostras requerem muitos golpes de martelo para fraturar-se
C2	Rocha resistente	Amostras fraturam-se com mais de um golpe de martelo
C3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser raspada com canivete e podem ser fraturada com um golpe de martelo
C4	Rocha branda	Pode ser raspada com dificuldade por canivete e fratura-se com golpe de martelo geológico
C5	Rocha extremamente branda	Esmigalha-se sob impacto de martelo, podendo ser raspada por canivete

Fonte: Adaptado de ABGE, 1983 (apud VIEIRA et al., 2015, p. 4).

3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para classificar os blocos de rocha, foi realizado um levantamento de normas aplicáveis para as análises desejadas em laboratório, para assim definir um quantitativo mínimo de material necessário para realização dos mesmos (Quadro 5).

Quadro 5- Dimensões de amostras para ensaio de laboratório

Ensaio	Tamanho	Nº de amostras	Referência
Índices Físicos	50±20 mm	10	NBR 15845-2:2015
Ciclagem Água/Estufa	19 até 76 mm	40	NBR 12696:1992
Ciclagem com Etilenoglicol	19 até 76 mm	40	NBR 12697:1992
Carga Pontual	50±20 mm	10	ISRM/1985
Velocidade de Absorção d'água	50±30 mm	10	HAMROL (1961)

Assim, este trabalho analisará a alteração de rochas em diferentes ciclos, forçando em laboratório as ações intempéricas que ocorrem no ambiente natural. Serão realizados também, ensaios de caracterização físico-mecânica, para identificação da qualidade do material rochoso. A Figura 12 apresenta resumidamente as etapas desenvolvidas neste estudo.

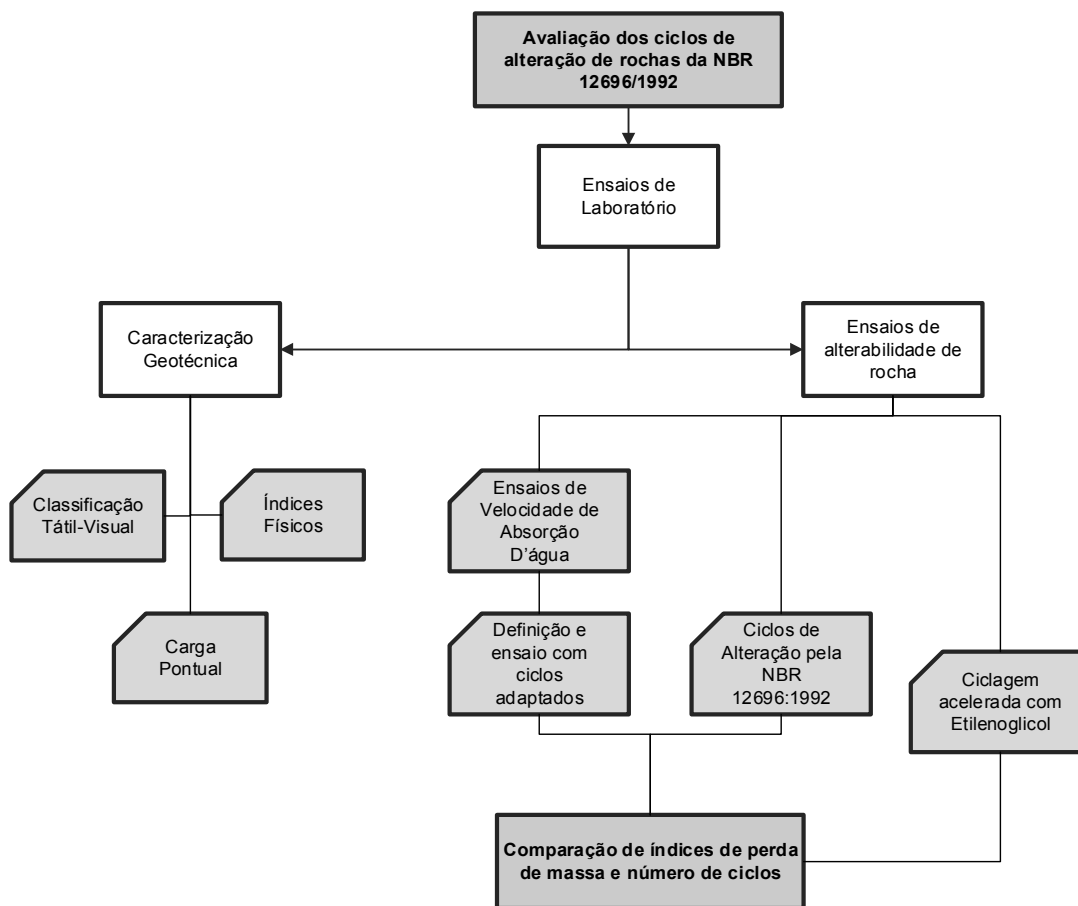


Figura 12- Fluxograma resumo das etapas do trabalho.

3.3.1 Índices Físicos

A execução dos ensaios de índices físicos foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 15845-2 (ANBT, 2015) e apresentam como resultado a densidade aparente, porosidade aparente e absorção-d'água. Inicialmente, os blocos de rocha são lavados para retirada do excesso de material fino e secos em estufa até atingir peso constante.

Para obtenção dos índices físicos faz-se necessário obter três situações de pesagem: peso seco (M_{sec}), peso saturado (M_{sat}) e peso saturado submerso (M_{sub}). Para determinação de M_{sec} as amostras devem ser levadas à estufa (70 ± 5) °C até o peso constante. Quanto à saturação para obtenção de M_{sat} , os blocos são submersos em água destilada em três estágios: 4 h com água até 1/3 da altura dos corpos-de-prova; 4 h com 2/3 da altura; e totalmente submersos até completar

48 h do início deste procedimento. A M_{sub} é obtida por meio de uma balança hidrostática onde os blocos são pesados dentro da água.

A densidade aparente (ρ_a), a porosidade aparente (η_a) e a absorção aparente (α_a) são calculadas de acordo com as Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$\rho_a = \frac{M_{sec}}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 1000 \left[\frac{kgf}{m^3} \right] \quad (1)$$

$$\eta_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 100 [\%] \quad (2)$$

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

3.3.2 Carga Pontual

Os blocos de rocha adotados no presente estudo possuem superfícies irregulares e, assim, o ensaio mecânico mais apropriado para a determinação da resistência da rocha é o de compressão pontual (*Point Load Test*), normatizado pela ISRM (1985).

As amostras de rocha são submetidas à compressão entre duas ponteiros, adaptadas para o ensaio com duas esferas de diâmetro de 5 mm (Figura 13).



Figura 13- Ponteira de carga pontual adaptada para o ensaio.
Fonte: Autor, 2017.

Para calcular a resistência à compressão são necessários três valores principais (Figura14): W (dimensão da menor dimensão da largura da amostra), D (distância entre ponteiras de aplicação da carga) e Q (carga de ruptura registrada).

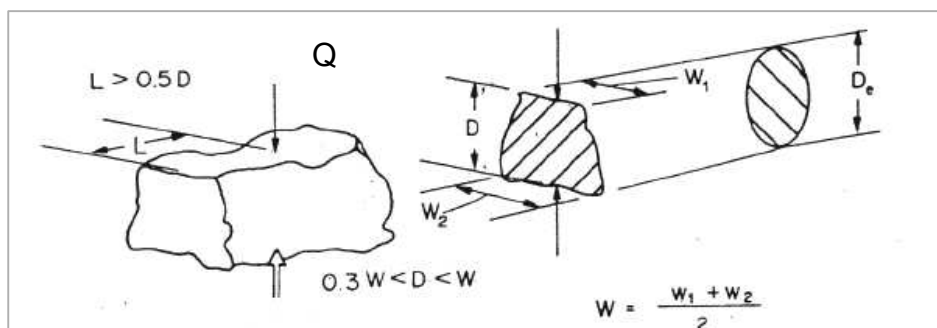


Figura 14- Dimensões dos fragmentos usados em ensaio de carga pontual.
Fonte: ISRM (1995).

Para obtenção do valor da resistência faz-se necessário a determinação do diâmetro equivalente (D_e), resistência de carga pontual para o diâmetro equivalente ($I_{S(D_e)}$) e resistência de carga pontual correspondente a uma amostra com diâmetro de 50 mm ($I_{S(50)}$), conforme Equações 4, 5 e 6, respectivamente.

$$D_e = \frac{4.W.D}{\pi} \quad (4)$$

$$I_{S(D_e)} = \frac{Q_{D_e}}{D_e^2} \cdot 1000 [MPa] \quad (5)$$

$$I_{S(50)} = I_{S(D_e)} \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad [MPa] \quad (6)$$

Para classificação de qualidade da rocha, com base nos valores físico-mecânicos, utilizou-se as classes do Quadro 6.

Quadro 6- Índice de qualidade de litotipos rochosos

Ensaio	Unidade	Excelente	Bom	Razoável	Ruim
Peso Específico seco	gf/cm ³	> 2,9	2,6 - 2,9	2,3 - 2,6	< 2,3
Absorção d'água	%	< 0,5	0,5 - 2,0	2,0 - 6,0	> 6,0
Porosidade	%	< 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0	> 4,0
Resistência à carga pontual	MPa	> 8,0	4,0 - 8,0	1,5 - 4,0	< 1,5

Fonte: Adaptado de Verhoef e Van de Wall (1998).

3.3.3 Apresentação dos Resultados

Os resultados dos ensaios de índices físicos e carga pontual realizados no trabalho serão apresentados em gráficos *Box-Plot*, pois permitem a visualização da dispersão dos dados de forma mais adequada (Figura 15).

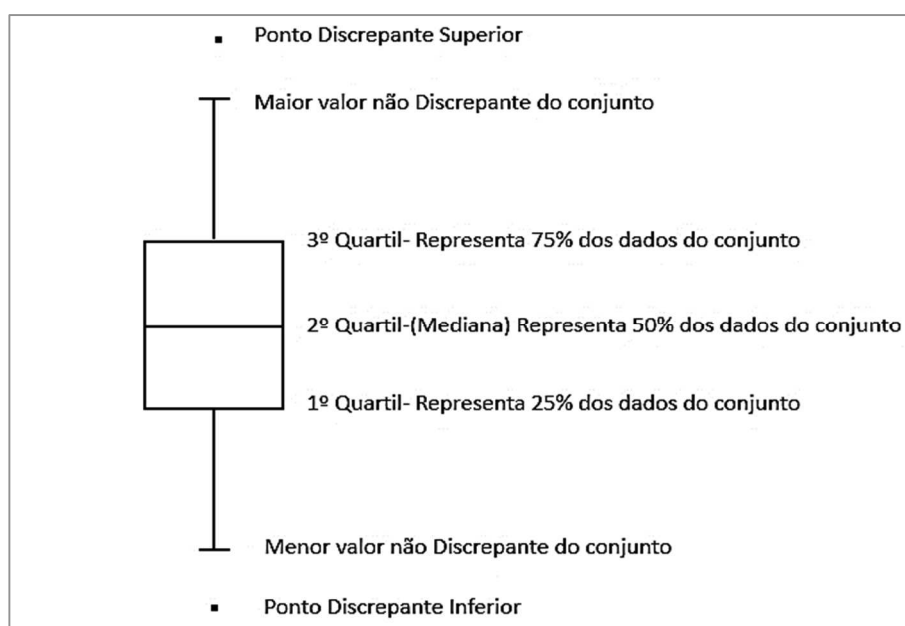


Figura 15- Esquema de interpretação de *Box-Plot*.

Esse tipo de gráfico permite verificar a variação de dados em termos de valores máximos, mínimos, mediana e quartis.

3.3.4 Ensaios de alterabilidade de rocha

3.3.3.1 *Velocidade de Absorção D'água*

Para realização do ensaio foram selecionados três conjuntos compostos por 10 amostras de rocha basáltica, sendo cada um de uma localização diferente da bancada de exploração da pedreira.

A dimensão das amostras foi de 20 mm até 60 mm. No entanto, definiu-se em cada conjunto de amostras um intervalo de tamanhos, para identificação da relação entre as dimensões e a absorção d'água. A saber:

- Conjunto 1 - amostras entre 20 mm a 40 mm;
- Conjunto 2 - amostras entre 40 mm a 60 mm.

Após separação desses grupos, as amostras foram lavadas para retirada de poeiras e secas em estufa a 110 °C até constância de peso (aproximadamente 24 horas).

Para definição dos tempos de saturação e de secagem estufa e, assim, estipular a duração de cada ciclo, obteve-se inicialmente as curvas de absorção d'água e secagem em estufa ao longo do tempo. Essas curvas foram baseadas no método de velocidade de absorção d'água de Hamrol (1961).

Para a curva de absorção d'água, as amostras eram submersas em água destilada. No primeiro dia de ensaio as leituras do peso das amostras em saturação foram registradas nos seguintes tempos: 0, 10, 20, 30, 45, 70, 120, 180, 240, 300, 360 e 420 minutos de submersão. Do segundo até o décimo dia as leituras foram realizadas duas vezes ao dia devido à pequena variação de peso. Assim, após a estabilização das medidas, foi acompanhado a velocidade de secagem dos blocos em

estufa à 110°C nos seguintes intervalos: 0, 30, 60, 120, 200, 310 e 400 minutos, seguindo em diferentes intervalos de secagem. A Figura 16 apresenta um exemplo do gráfico gerado a partir deste ensaio.

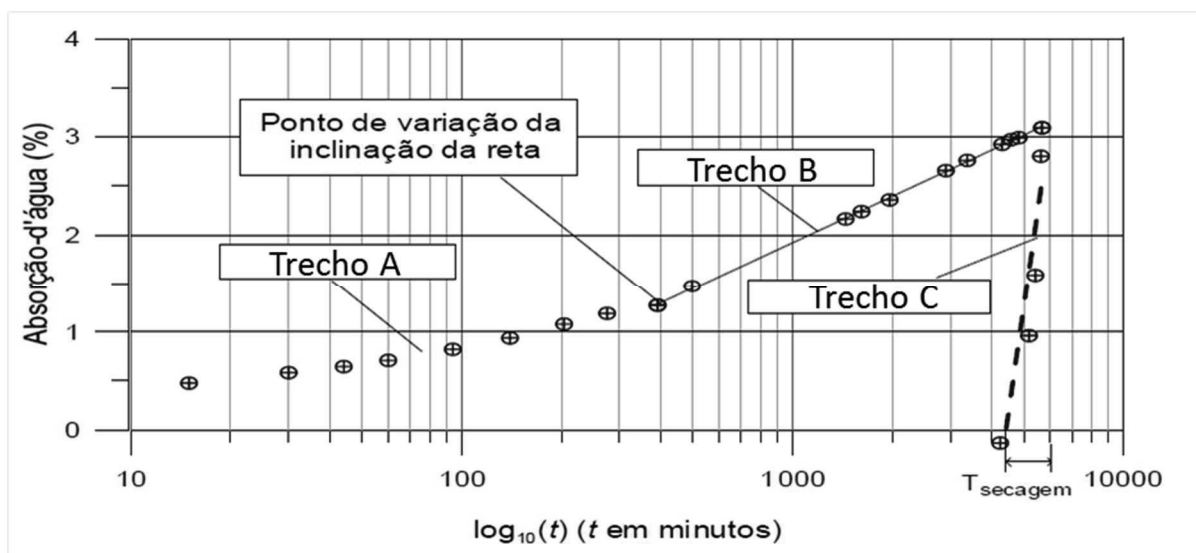


Figura 16- Exemplo de gráfico de velocidade de absorção d'água.
Fonte: Oliveira (2012).

Conforme a Figura 16, as análises podem ser representadas por meio de funções de regressão, conforme velocidade de absorção d'água. Assim, geralmente pode-se observar as seguintes variações nas curvas de saturação e secagem das amostras:

- Trecho A- curva de saturação que vai desde o início da leitura até o ponto de variação de inclinação da reta;
- Trecho B- curva de saturação que vai desde a mudança de inclinação da reta até o início do tempo de secagem;
- Trecho C- curva de secagem que representa a curva de declínio, ou seja, os valores de secagem em estufa a 110 °C.

Especificamente para este estudo, inicialmente buscou-se os tempos que representassem a maior taxa de absorção de água e de secagem.

3.3.3.2 Ciclagem Acelerada pela NBR 12696:1992

Este ensaio é normatizado pela NBR 12696:1992 e define a verificação do comportamento da rocha mediante ciclagem artificial água-estufa de agregados. Relaciona a alteração e o desempenho do material rochoso por meio de ciclos alternados de imersão em água e secagem em estufa.

A principal finalidade desta normativa é verificar a presença de minerais expansivos, responsáveis por variações volumétricas que podem levar a rocha à desintegração, quando submetidos ao processo de absorção d'água e secagem.

A norma estabelece 120 ciclos, cada um deles de 14 ± 1 horas de imersão em água e 8 ± 1 horas de secagem em estufa a $110 \text{ }^\circ\text{C}$, com amostras de dimensões de 19 a 76 mm. Os exames quantitativos devem ser realizados em múltiplos de 4 até o ciclo 24 (4, 8, 12, 16, 20, 24 ciclos), a partir daí a cada múltiplo de 12 (36, 48, 60... 120 ciclos).

Os exames quantitativos constituem na medida de peso de cada amostra em balança devidamente calibrada, com precisão de 0,01 g. Essa medida é obtida com a perda de peso em relação ao peso inicial de cada bloco, por meio da Equação (7):

$$I_M = \frac{m_0 - m}{m} (\%) \quad (7)$$

Onde:

I_m : perda de peso em (%);

m_0 : peso inicial das amostras, em gf;

m : peso retido na peneira de 19 mm ao final de cada ciclo, em gf;

Caso as amostras sofram alterações a ponto de não ficarem retidas na peneira de 19 mm, o ensaio deverá ser concluído.

3.3.3.3 Ciclagem Acelerada com Etilenoglicol pela NBR 12697:1992

Este ensaio é apresentado pela NBR 12697:1992 e tem o objetivo de avaliar a alterabilidade das amostras de rocha por meio de ciclos de imersão em Etilenoglicol.

De acordo com Frazão (2012), os constituintes desse álcool são absorvidos entre as lamelas dos argilominerais (principalmente as esmectitas) provocando a expansão e as conseqüentes tensão de tração nos espaços intergranulares da rocha, causando a desintegração do material.

Para execução do ensaio, são realizados 6 ciclos de imersão em Etilenoglicol, com tempos espaçados em: 3 primeiros ciclos com ± 24 horas de imersão e 3 últimos ciclos com ± 48 horas de imersão.

O material rochoso foi separado em dois conjuntos com granulometria entre 20 mm a 40 mm e 40 mm a 60 mm. Para iniciar o ensaio, registrou-se o peso dos blocos secos em estufa a 105 °C, e submeteu-se ao primeiro ciclo de imersão. A cada ciclo, caso o material se desagregasse a ponto de passar pela peneira de 19 mm, esse era retirado do ensaio.

Após o último ciclo de imersão o material foi lavado para retirada do Etilenoglicol, seco em estufa a 105 °C até o peso constante e registrado o seu peso.

Os resultados deste ensaio apresentam-se em forma de índice de perda peso (I_M) em relação ao início do ensaio, calculado de acordo com a Equação 8.

$$I_M = \frac{m_0 - m}{m} (\%) \quad (8)$$

Onde:

I_M : índice de perda de peso (%);

m_0 : peso inicial da amostra (gf);

m : peso retido na peneira de 19 mm ao final dos ciclos (gf).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DESCRIÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO MEIO AMBIENTE

Para classificar a ação do intemperismo atuante na região de coleta de amostra, em uma determinada pedreira no município de Toledo-PR, foi utilizado o ábaco de Peltier (1950) e os dados de temperatura e precipitação média anual no período de 2010 a 2016. Estes dados foram obtidos na estação meteorológica 24475343 do Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar), localizada na cidade de Toledo-PR (Tabela 2).

Tabela 2- Dados meteorológicos da estação localizada em Toledo-PR

Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Temperatura média (°C)	20,81	20,92	21,77	20,71	21,79	21,84	20,78
Precipitação média (mm)	1967,20	2146,80	1918,40	2328,60	2040,40	2240,60	1833,40

Deste modo é possível identificar os pontos no ábaco (Figura 17) para definição do tipo de alteração predominante na região onde a pedreira está localizada.

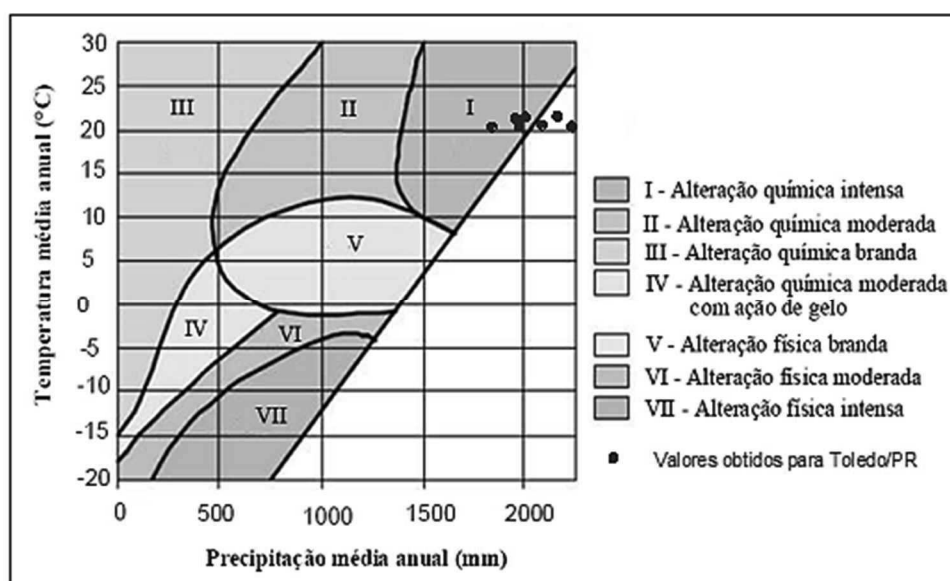


Figura 17- Relação entre a precipitação e a temperatura anual.
 Fonte: Modificado de Peltier, 1950 (*apud* Oliveira, 2012, p. 37).

Portanto, a Figura 17 mostra que todos os pontos estão localizados próximos da região do item I, indicando a atuação de alteração química intensa na região de Toledo/PR.

4.2 CARACTERIZAÇÃO TÁTIL-VISUAL

As amostras coletadas na pedreira foram separadas de acordo com o ponto de coleta (Figura 10 e 11). No entanto, durante o processo de explosão não é possível relacionar a posição da pilha com as variações macroscópicas da rocha presente no maciço natural. Assim, de maneira geral, foram identificados três grupos de rocha. A saber:

- Basalto maciço cinza-rosado, com minerais escuros (Figura 18.A): este material apresenta grau de alteração A1 (rocha sã), sem sinal visível de material em alteração, minerais com brilho e cantos cortantes. Rocha muito resistente (C1), sendo necessários muitos golpes de martelo para fraturar a amostra;
- Basalto maciço cinza-rosado com matriz descolorida (Figura 18.B): o grau de alteração deste grupo foi classificado entre rocha sã a pouco alterada (A1/A2). A matriz descolorida pode ser associada à alteração dos plagioclásios, que são mais vulneráveis à alteração, conforme série de Bowen (Figura 2) e Goldich (Figura 3). Rocha muito resistente (C1), que requer muitos golpes de martelo para fraturar-se;
- Basalto maciço cinza-rosado com minerais verde-amarelados disseminados na matriz (Figura 18.C): este grupo apresentou blocos de rochas sã (A1) e muito resistentes (C1) em seu estado fresco (logo após explosão do maciço). No entanto, os colaboradores da pedreira mencionaram que esse litotipo altera-se rapidamente no ambiente natural, mas possui alta resistência à britagem (já causou danos ao britador da empresa).

Por questões de segurança (rolamento de blocos de rocha e desmoronamento) não foi possível chegar próximo ao maciço. Assim, a olho nu não se identificou o posicionamento dos litotipos na parede exposta na pedreira.

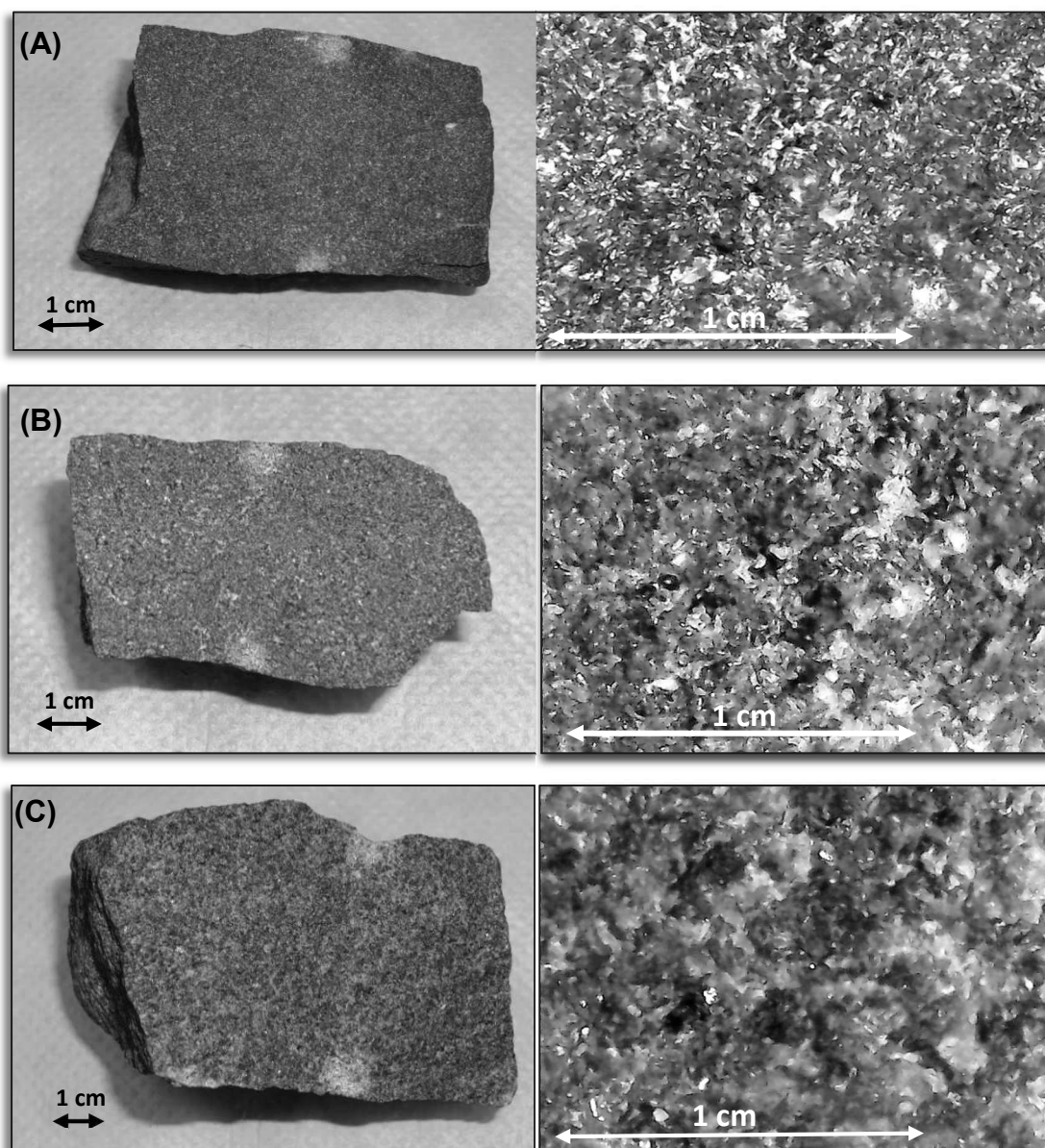


Figura 18- Imagem macroscópica e respectiva imagem microscópica dos tipos de amostras. (A) Basalto maciço cinza-rosado com minerais escuros. (B) Basalto maciço cinza-rosado com matriz descolorida. (C) Basalto maciço cinza-rosado com minerais verde-amarelados.

A caracterização mineralógica do material rochoso foi realizada pelas observações macroscópicas e microscópicas e pela reação do mesmo com o Etilenoglicol. Assim, as principais características identificadas sobre a composição da rocha foram:

- Coloração predominantemente melanocrática, com presença de minerais de cor escura, como mica biotita, piroxênios, anfibólios e peridotitos;
- É do tipo afanítica, formada por minerais não visíveis a olho nu;
- Possui em sua composição diversos minerais, principalmente os plagioclásios, piroxênios, olivinas, anfibólios e argilominerais. Estes foram caracterizados de acordo com as características apresentadas por Frazão (2012), como segue:

- Plagioclásios: são silicatos de alumínio com algum tipo de metal, como o sódio ou o cálcio. Podem formar diversas séries de associações com estes dois minerais. São poucos alteráveis.
- Piroxênios: minerais silicáticos que contêm ferro, magnésio e cálcio. São muito alteráveis em climas tropicais.
- Anfibólios: minerais parecidos com os piroxênios, mas possuem água em sua constituição e são bastante alteráveis em clima tropical.
- Olivinas: mineral silicático com ferro e magnésio, muito sensível a ácido e podem alterar-se em climas tropicais.
- Argilominerais: minerais secundários que apresentam maior relação no processo de alteração do material rochoso, como as esmectitas, cloritas, caulinita e ilita. Especialmente sobre a esmectitas, estas são mais expansíveis por absorção d'água.

4.2.1 Índices Físicos e Carga Pontual

De modo geral, a caracterização geotécnica foi realizada em pontos diferentes, mas apresenta valores de ensaios próximos (Tabela 3). Os resultados encontrados (Figura 19) foram apresentados em gráficos, tipo *Box Plot*, no qual é impossível mostrar a variação dos dados ensaiados em função dos pontos de coleta: P2 (área com predominância de blocos com minerais verde-amarelados) e P3 (área com blocos de rocha com minerais verde-amarelados e minerais escuros).

Tabela 3- Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização.

Parâmetro de laboratório	P2 10 amostras			P3 11 amostras		
	μ	σ	CV	μ	σ	CV
Densidade aparente (kgf/m ³)	2718,19	317,77	11,69%	2813,77	75,00	2,67%
Porosidade aparente (%)	1,72	1,14	66,11%	1,77	1,11	62,70%
Absorção d'água (%)	0,63	0,42	67,13%	0,64	0,41	64,34%
Carga pontual (Mpa)	4,37	1,58	36,22%	5,15	1,34	25,94%

μ - Média dos ensaios; σ - desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

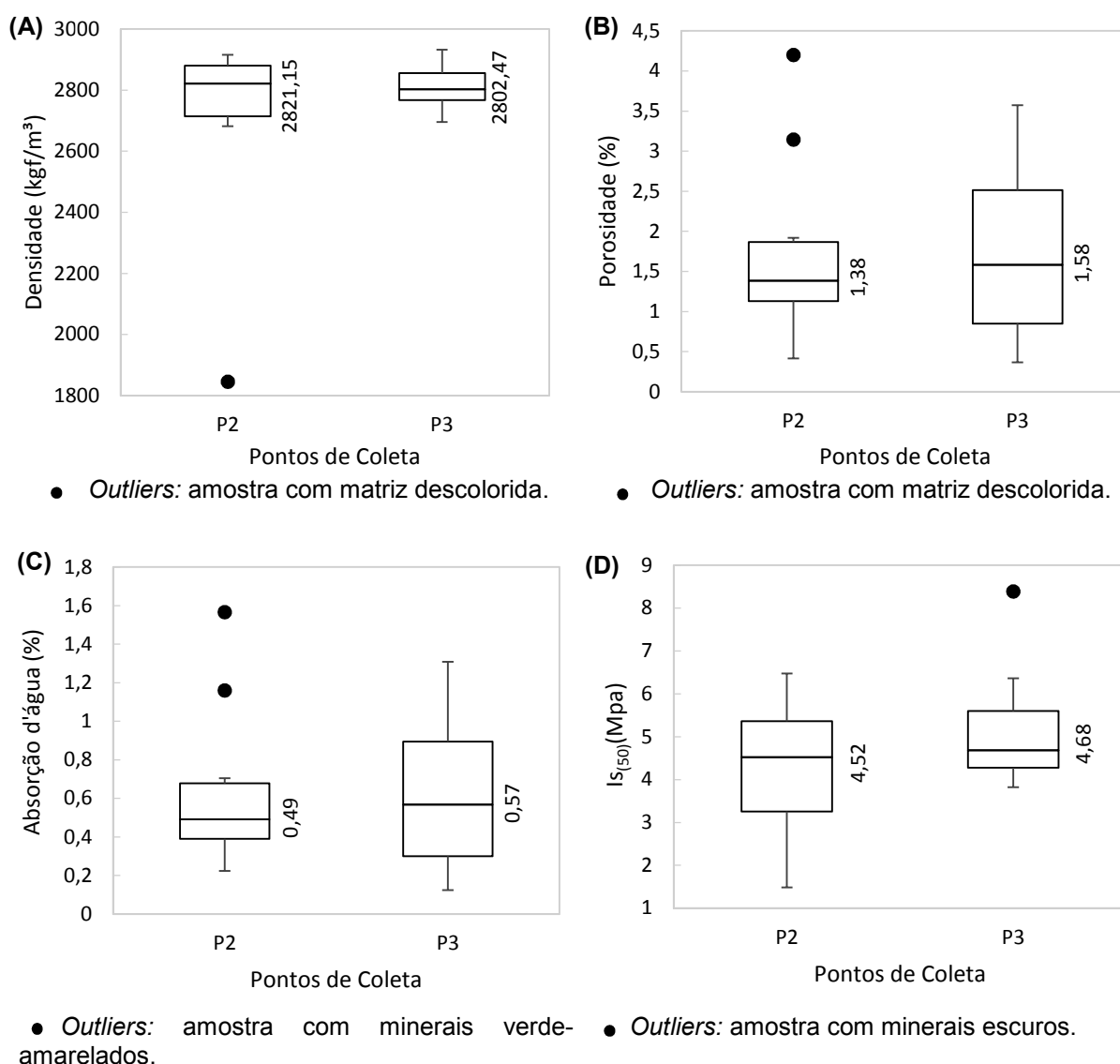


Figura 19- Dados dos ensaios de Índices Físicos. (A) Densidade aparente. (B) Porosidade aparente. (C) Absorção d'água. (D) Resistência a carga pontual- $I_{s(50)}$ (continuação).

Os resultados foram comparados com o Quadro 4, que mostra os índices de qualidade de litotipos rochosos de acordo com Verhoef e Van de Wall (1998), os quais permitiram as seguintes análises:

- Ponto de coleta 2: a qualidade da rocha, em relação aos valores médios, pode ser classificada como boa para os índices de densidade ($2718,19 \text{ kgf/m}^3 \pm 317,77$), de absorção d'água ($0,63\% \pm 0,42$) e de resistência à compressão pontual ($4,37 \text{ Mpa} \pm 1,58$). Quanto à porosidade apresentou índices classificados como excelentes ($1,72\% \pm 1,14$).

- Ponto de coleta 3: em relação aos valores médios, a qualidade do material foi classificada como boa para densidade ($2813,77 \text{ kgf/m}^3 \pm 75,00$), para absorção d'água ($0,64\% \pm 0,41$) e para resistência a compressão pontual ($5,15 \text{ Mpa} \pm 1,34$). A porosidade apresentou índices excelentes ($1,77\% \pm 1,11$).

Para comparar os parâmetros obtidos nesta etapa de trabalho, foram realizadas correlações entre os ensaios de acordo com os três grupos de basalto maciço cinza-rosado identificados: com minerais escuros, com matriz descolorida e com minerais verde-amarelados (Figura 20).

Não foi possível definir uma correlação clara entre os resultados. De maneira geral, têm-se as seguintes observações:

- Material maciço cinza-rosado com minerais escuros apresentou os maiores valores de densidade e maior resistência à compressão pontual, com tendência a menor porosidade e absorção d'água;

- Os materiais de matriz descolorida apresentaram menor densidade e maior valor de absorção d'água e porosidade, devido possivelmente a estar em um estado de alteração mais avançado se comparado com os outros blocos de rocha;

- O grupo de rochas com minerais verde-amarelados mostraram-se bastante variáveis, assim, estudos mais aprofundados devem ser realizados com materiais que contém este tipo de mineral, como por exemplo, ensaios de alterabilidade de rocha.

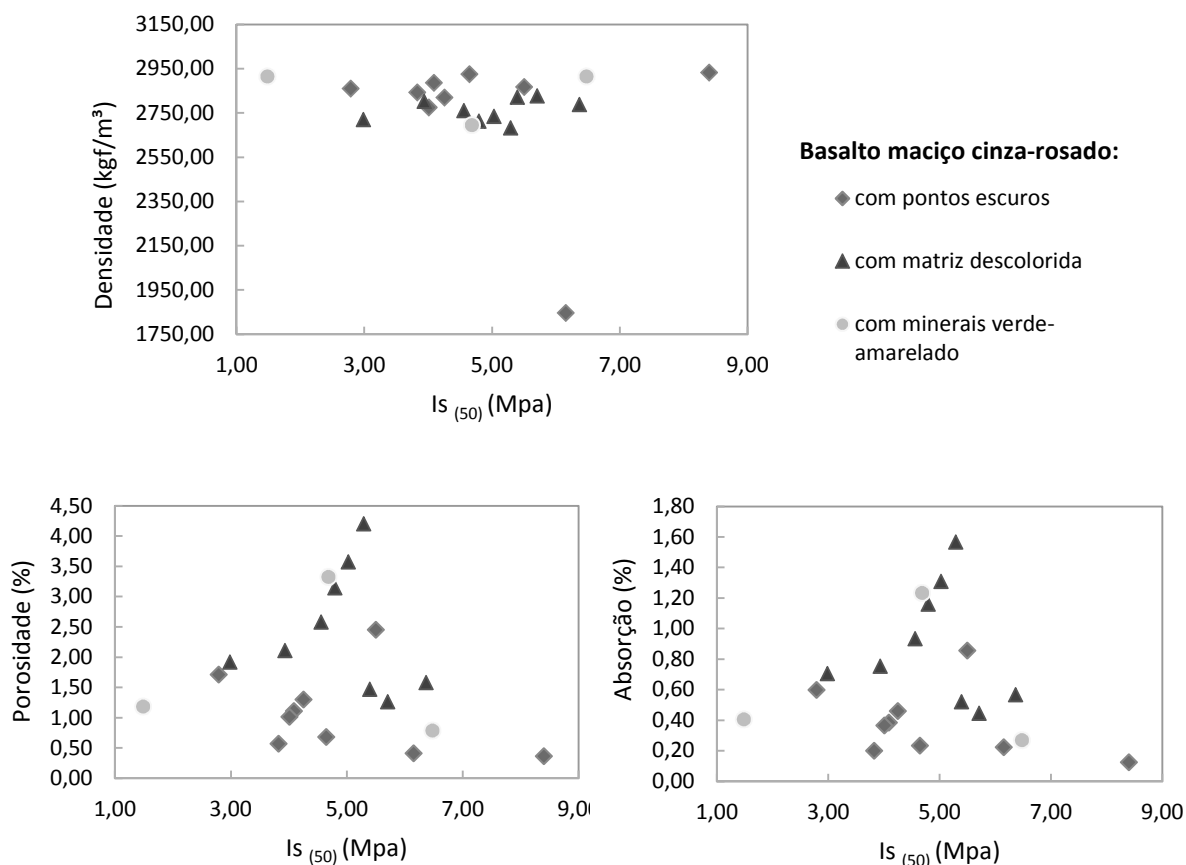


Figura 19- Correlação entre os parâmetros obtidos nos ensaios de laboratório em função das características de cada amostra.

4.2.2 Velocidade de Absorção D'Água

Para avaliar a influência do tamanho do bloco nos ensaios de ciclagem, dividiu-se as amostras em dois grupos: (i) blocos entre 20 a 40 mm e (ii) blocos 40 a 60 mm.

Ao total foram ensaiadas 20 amostras, e apresentaram a mesma tendência entre a absorção d'água ao longo do tempo (Figura 21).

Com este ensaio foi possível identificar que a taxa de absorção de água diminui após 48 horas, mas continuou absorvendo água até 263 horas de ensaio. Por outro lado, quando submetido à secagem, apresenta rápida expulsão de água dos poros internos, chegando à secagem total em 26 horas de estufa.

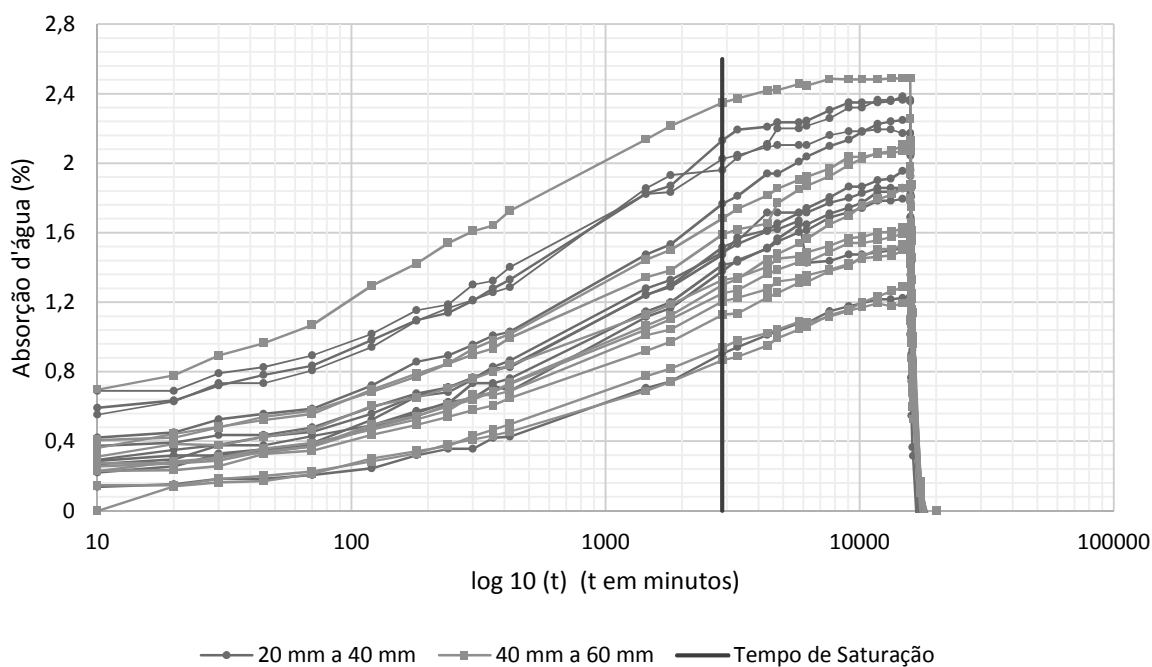


Figura 20- Curva de absorção d'água e secagem de litotipos basálticos.

Os resultados obtidos com este ensaio para obtenção dos novos tempos de saturação e secagem em estufa são apresentados na Figura 22 para amostras com dimensões entre 20 mm a 40 mm e, na Figura 23, para amostras com dimensões entre 40 mm a 60 mm.

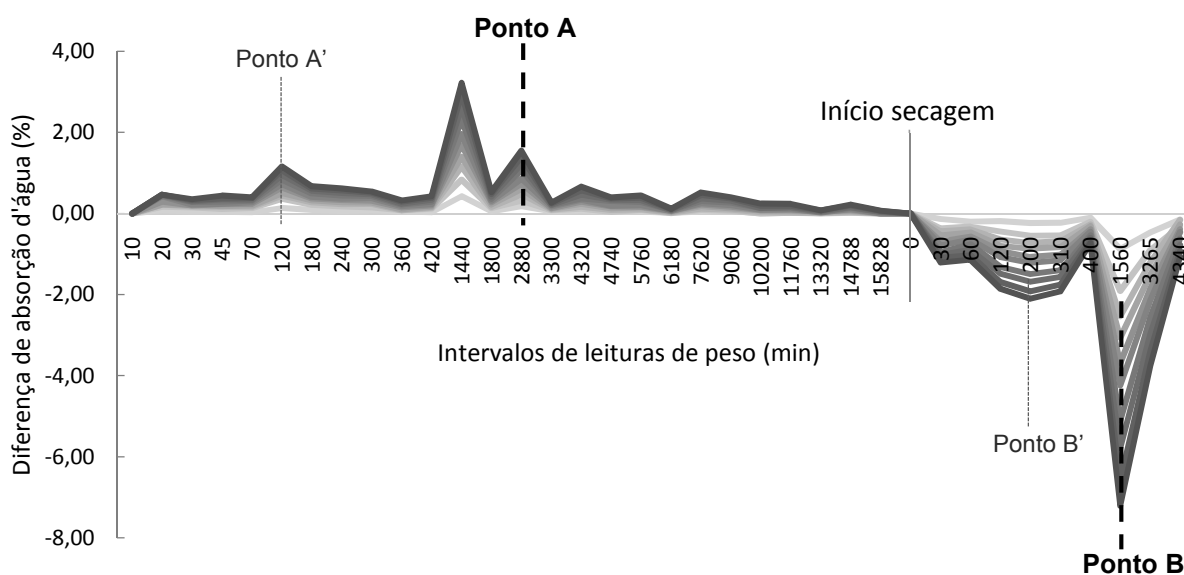


Figura 21- Variação de absorção d'água entre leituras em amostras de basalto (dimensões entre 20 a 40 mm).

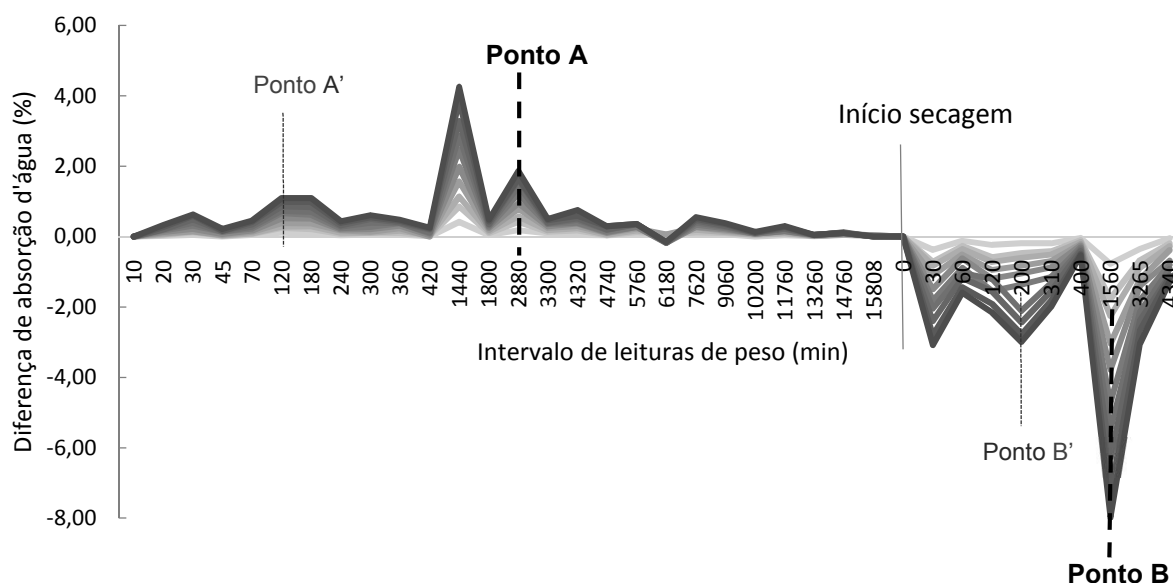


Figura 22- Variação de absorção d'água entre leituras em amostras de basalto (dimensões entre 40 a 60 mm).

Para obter os tempos de secagem em estufa para os ensaios de ciclagem, foi calculada a diferença de porcentagem de absorção d'água entre duas medidas. Foi considerado como tempo ideal para saturação o último pico de maior absorção (ponto A nas Figuras 22 e 23). Para o tempo de secagem em estufa, considerou-se o último ponto onde as amostras apresentaram máxima secagem, ou seja, onde o material perdeu a maior porcentagem de água (Ponto B nas Figuras 22 e 23).

Para melhor execução dos trabalhos seguintes, o tempo de secagem em estufa sofreu uma adaptação (redução de 2 horas). Portanto, a Tabela 4 apresenta os tempos finais utilizados para comparar com os estabelecidos pela NBR 12696:1992.

Tabela 4- Resumo dos resultados encontrados

Amostras	Saturação em água			Secagem em estufa		
	Ponto no gráfico	Tempo (min)	Tempo (h)	Ponto no gráfico	Tempo (min)	Tempo (h)
20 mm a 40 mm 40 mm a 60 mm	A	2880	48	B	1440	24

4.2.3 Ciclagem acelerada água-estufa

Este ensaio foi realizado com dois grupos de amostras de granulometria entre 20 mm a 40 mm e 40 mm a 60 m, com dois tempos diferentes de ciclo:

a) Tempo estabelecido pela NBR: 14 ± 1 horas de imersão em água e 8 ± 1 horas de secagem. As amostras foram ensaiadas ao longo de 120 ciclos e os blocos de rocha não sofreram alterações.

b) Tempo adaptado pelo método de Hamrol (1961) com 48 ± 1 horas de imersão em água e 24 ± 1 horas de secagem. As amostras foram ensaiadas ao longo de 36 ciclos, totalizando 108 dias de ensaio, sendo encerrado neste tempo porque não apresentou nenhuma alteração no material rochoso.

Os resultados dos ensaios relacionam o Índice de perda de peso das amostras em relação a quantidade de ciclos realizados. No entanto, os tempos de ciclo foram convertidos para dias de ensaios para melhor comparação entre os dois tempos definidos (Figuras 24 e 25).

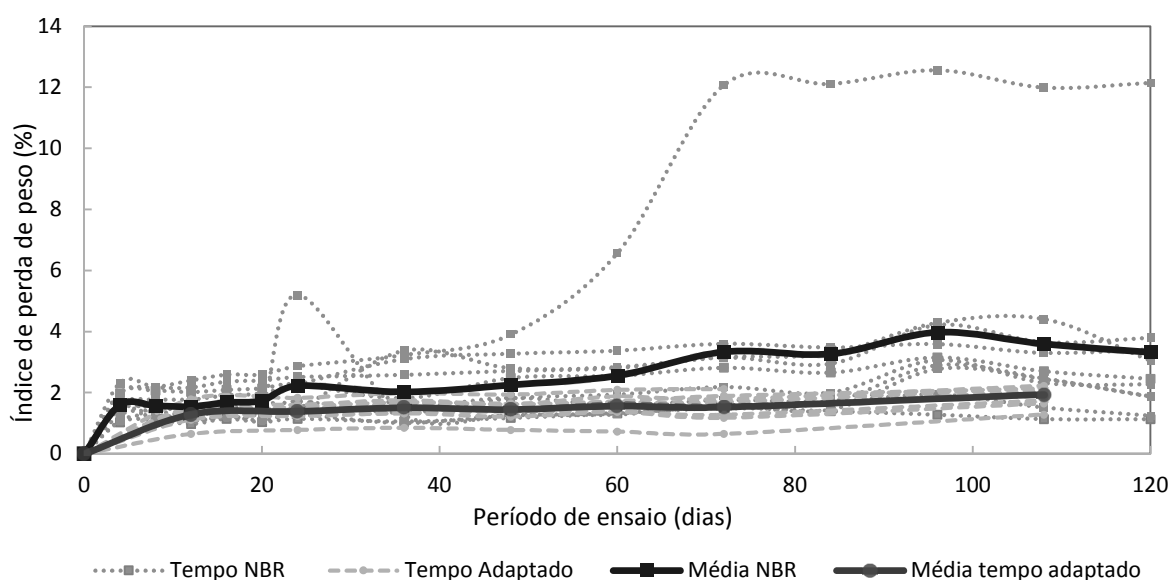


Figura 23- Dados comparativos do ensaio pelo método de ciclagem água-estufa: tempos da NBR 2696 e tempo adaptado pelo Método de Hamrol para amostras de granulometria entre 20 a 40 mm.

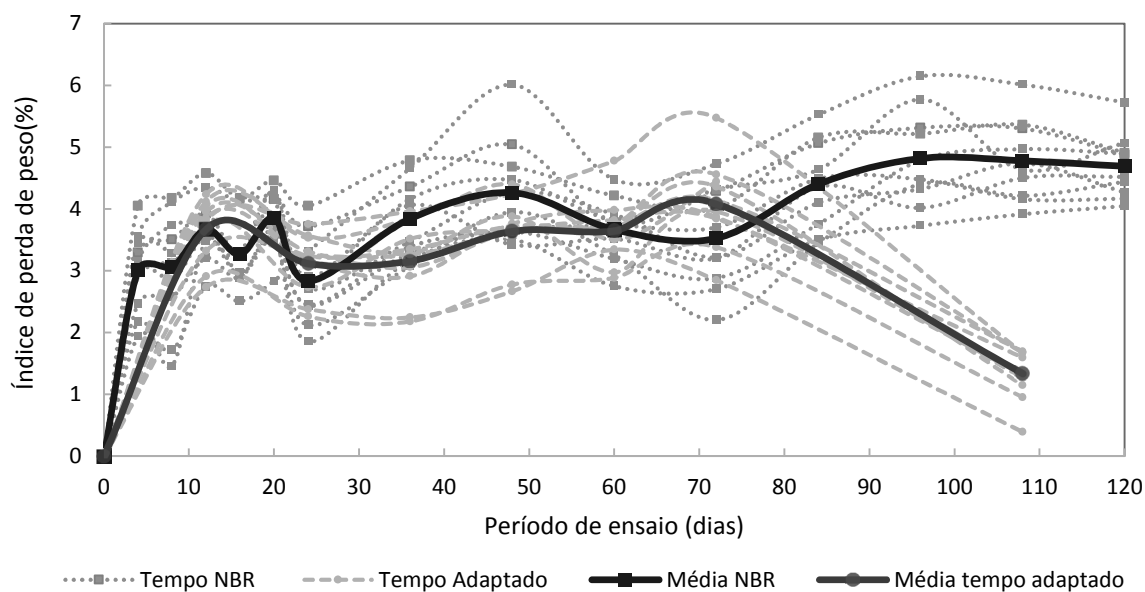


Figura 24- Dados comparativos do ensaio pelo método de ciclagem água-estufa: tempos da NBR 12696 e tempo adaptado pelo Método de Hamrol para amostras de granulometria entre 40 a 60 mm.

Os ensaios realizados com o tempo adaptado de Hamrol (1961) apresentaram menor índice de perda de peso, mostrando-se menos eficiente do que o tempo apresentado pela NBR 12696. Ressalta-se que, o material continua perdendo peso ao longo dos dias de ensaio, resultado não obtido com o tempo adaptado (não sendo possível identificar o motivo para a redução do índice de perda do material).

Para classificar a alterabilidade do material, foi utilizado as classes apresentadas por Sadisun *et al.* 2005 (*apud* OLIVEIRA, 2012, p. 53). Para isso utilizou-se a média dos valores obtidos no ensaio de ciclagem acelerada água-estufa (Tabela 5).

Tabela 5- Classificação dos índices de perda de peso.

<u>Tempo NBR</u>	Perda de peso média (%)	Índice de alterabilidade
20 mm a 40 mm	2,48	Baixo
40 mm a 60 mm	3,84	Baixo
<u>Tempo adaptado</u>		
20 mm a 40 mm	1,52	Muito Baixo
40 mm a 60 mm	3,24	Baixo

Sobre a granulometria dos blocos de rocha, o material que melhor se enquadra para realização dos ensaios está entre 40 mm a 60 mm, pois apresentam maiores valores de perda de peso, índice muito importante para as análises.

4.2.4 Ciclagem Acelerada com Etilenoglicol pela NBR 12697:1992

Durante a execução da ciclagem água-estufa observou-se que o material rochoso não apresentava alteração física (desagregação ou lasqueamento), mesmo aqueles blocos que continham mineral verde (potencialmente argilominerais expansivos).

Diante do exposto, o ensaio de ciclagem acelerada com Etilenoglicol foi acrescentado na pesquisa, porque o principal objetivo deste produto é reagir com o argilomineral, expandindo-o. No entanto, pela quantidade limitada desse reagente, os ensaios foram realizados apenas com blocos de rocha da pilha P3, com maior presença de basaltos com minerais verde-amarelado.

Para execução deste ensaio, separou-se dois conjuntos de blocos de rocha de granulometria entre 20 mm a 40 mm e 40 mm a 60 mm. O ensaio levou em torno de 15 dias para conclusão dos seis ciclos de imersão sugeridos pela norma de referência.

Os resultados de perda de peso do material mostrados na Tabela 6 comprovam a hipótese inicial de que, nos blocos de rochas, os minerais verde-amarelados observados a olho nu eram argilomineral, com características expansivas e também, que existem no material rochoso piroxênios, anfibólios e alivinas, minerais estes, alteráveis também no tempo.

Tabela 6- Dados do ensaio com Etilenoglicol

Granulometria	Peso inicial do conjunto (gf)	Peso ao final de 6 ciclos (gf)	Índice de perda de peso (%)
20 mm a 40 mm	527,04	333,88	36,65
40 mm a 60 mm	1076,26	653,44	39,29

Para classificar o material rochoso ensaiado utilizou-se os índices apresentados por Sadisun *et al.* 2005 (*apud* OLIVEIRA, 2012, p. 53), e conclui-se que

o material possui alto índice de alterabilidade, resultado que não foi possível encontrar no ensaio de ciclagem água-estufa. Uma vez que, no processo de alteração, os componentes minerais da rocha interferem diretamente no comportamento da mesma.

4.2.5 Considerações sobre os ensaios de laboratório

O basalto coletado na pedreira de Toledo-PR apresentou nos ensaios de índices físicos boas condições de absorção d'água e densidade e excelente índice de porosidade, baseados na literatura consultada. Sobre o ensaio de compressão pontual, os resultados foram satisfatórios, apresentando bons índices de resistência.

No entanto, no decorrer da caracterização geotécnica foi possível identificar diferentes grupos de basaltos maciços cinza-rosado, com características diferentes observadas a olho nu. Esse fator indica que os resultados de índices físicos e carga pontual não podem ser analisados isoladamente, sendo importante verificar também os ensaios de alterabilidade de rocha.

Os dados obtidos no ensaio de ciclagem acelerada água-estufa com os tempos da NBR 12696 e os novos tempos pelo método de absorção proposto por Hamrol (1961), não apresentaram a alteração esperada do material, além de que, o novo tempo sugerido ficou menos eficiente do que aquele apresentando pela NBR.

Diante deste fato, buscou-se na literatura embasamento para a situação contrária encontrada. Assim, Loubster (2013) apresentou que em experimentos sobre secagem de rochas a amplitude de saturação não parece ser um fator importante na influência da degradação e, sim, o número de ciclos.

Portanto, realizaram-se ensaios de alterabilidade com Etilenoglicol e reavaliou-se as Figuras 21 e 22 para determinação de novos ciclos: 2 horas de imersão em água (Ponto A') e 3 horas de secagem em estufa (Ponto B') com temperatura de 60°C, não muito superior àquela em que a rocha pode chegar na natureza.

Assim, os tempos encontrados e sugeridos estão apresentados na Tabela 7 e os registros fotográficos dos exemplares de rocha basáltica antes e após ensaios de alterabilidade são mostradas nas Figuras 25 e 26.

Tabela 7- Resumo dos resultados

Ciclagem	Tempo de Saturação em água	Tempo de secagem em estufa	Temperatura	Nº de ciclos	Índice de alterabilidade
Etilenoglicol	-	-	-	6	Alto
NBR 12696:1992	9 h	15 h	110 °C	120	Baixo
1ª Sugestão de ciclos (tempo ensaiado)	48 h	24 h	110 °C	36	Baixo/ Muito Baixo
2ª Sugestão de ciclos	2 h	3 h	60 °C	120	*

* tempo recomendando para futuras análises.

- Ciclagem pela NBR 12696:1992 (Figuras 26.a e 27.a): foram realizados 120 ciclos de imersão em água e secagem em estufa a 110 °C, no entanto, observou-se que as amostras sofreram pequenos lasqueamentos com rara desintegração de partículas finas do material rochoso ensaiado;
- Ciclos a partir da absorção de água por Hamrol 1ª sugestão (Figuras 26.b e 27.b): durante 36 ciclos, aproximadamente 108 dias de ensaio, não identificou-se alteração no material rochoso, apenas pequenos fragmentos e material fino soltaram da amostra. Não se completou os 120 dias de ensaio, pois o mesmo mostrou-se menos efetivo do que o da NBR 12696:1992 em relação à perda de peso;
- Ciclos com Etilenoglicol (Figuras 26.c e 27.c): neste ensaio foi possível identificar grandes ataques ao material rochoso, chegando a desagregar totalmente alguns blocos de rocha, especialmente aqueles com minerais verdes visíveis a olho nu. Foi através deste ensaio que se comprovou que na litologia analisada existiam minerais expansivos, sendo estes não identificados por meio da ciclagem água-estufa nos métodos anteriores.

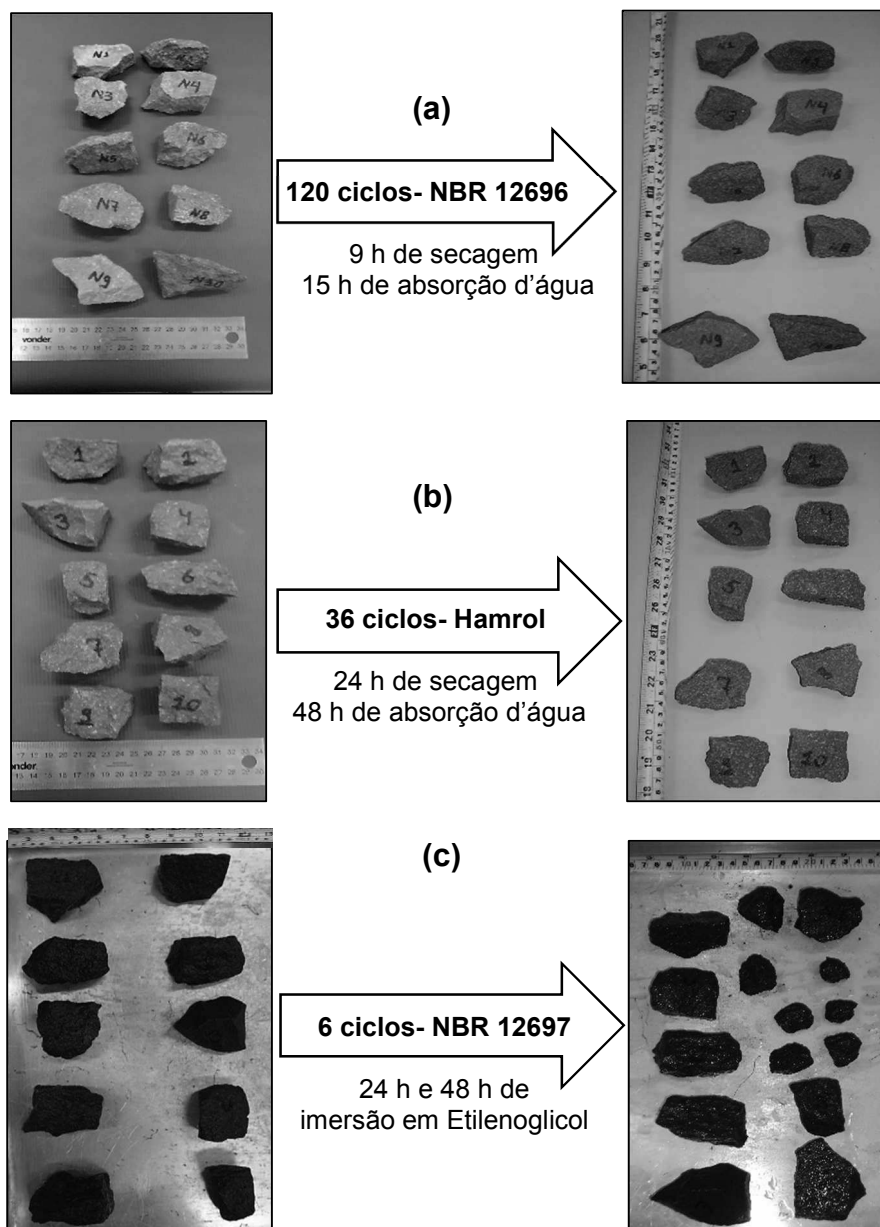


Figura 25- Amostras durante ensaio de ciclagem acelerada com granulometria entre 20 mm a 40 mm. (a) Ciclos de acordo com a NBR 12696. (b) Ciclos adaptados através da metodologia apresentada por Hamrol (1ª sugestão). (c) Ciclos de imersão em Etilenoglicol pela NBR 12697.

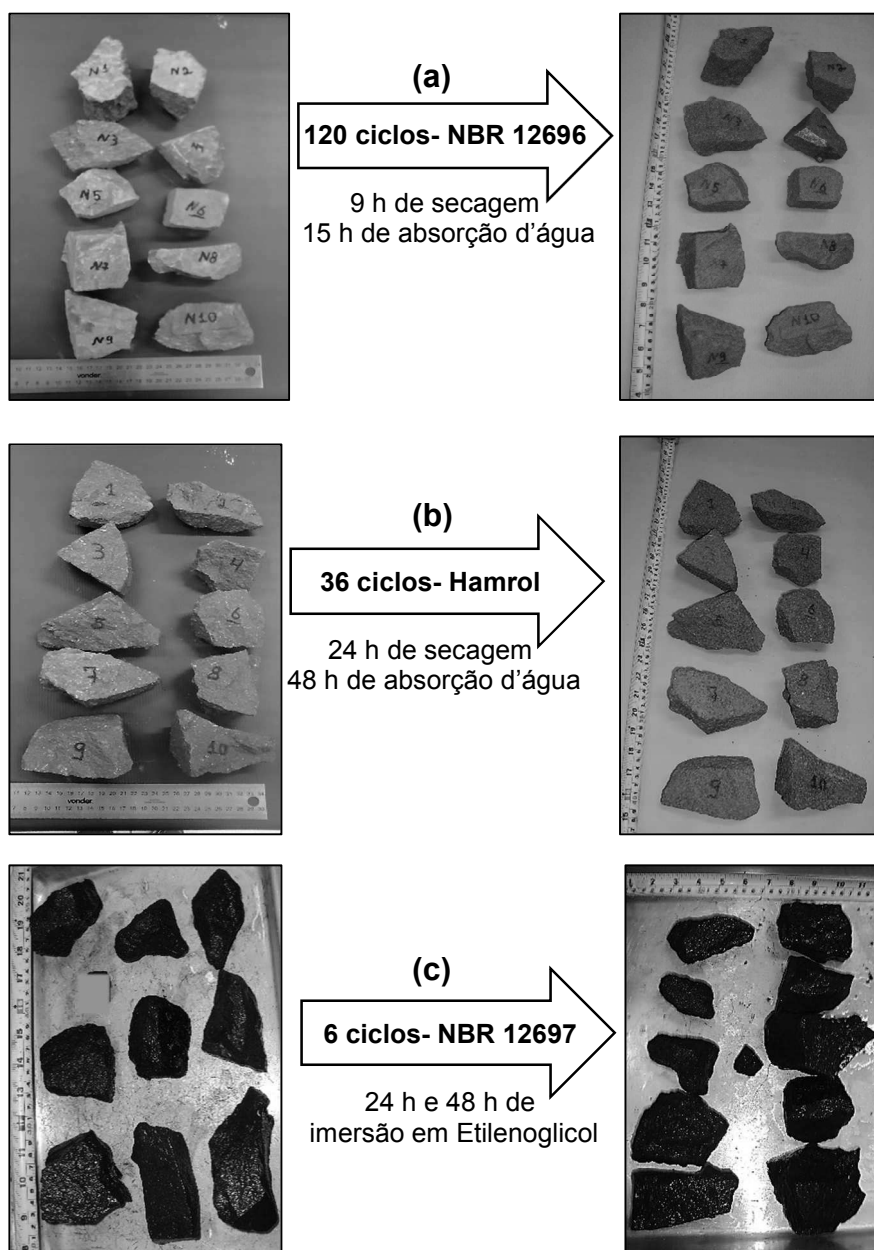


Figura 26- Amostras durante ensaio de ciclagem acelerada com granulometria entre 40 mm a 60 mm. (a) Ciclos de acordo com a NBR 12696. (b) Ciclos adaptados através da metodologia apresentada por Hamrol (1ª sugestão). (c) Ciclos de imersão em Etilenoglicol pela NBR 12697.

5 CONCLUSÕES

De maneira geral o material rochoso analisado possui boas classificações físico-mecânicas, mas nos ensaios de ciclagem com Etilenoglicol apresentou altos índices de perda de peso, resultado que compromete a usabilidade deste material em obras onde o bloco de rocha fica diretamente exposto às ações intempéricas, como é o caso de barragens de enrocamento.

Além disso, com este estudo observou-se a ineficiência da metodologia de ciclagem água-estufa, por não apresentar a real alterabilidade do material rochoso, verificado no ensaio de ciclagem com Etilenoglicol e alteração natural em campo. Este fato pode estar relacionado com a elevada temperatura em que o material ficava exposto na estufa (110 °C) e até mesmo, a qualidade da água utilizada para a imersão dos blocos de rocha durante o ensaio (água tratada pela Companhia de Saneamento do Estado do Paraná). Talvez a presença de cloro na água pode estar interferindo no processo de expansibilidade do argilomineral, uma vez que, Oliveira (2012) também não obteve perda de peso significativa para basalto com esses minerais.

O tempo adaptado pelo método de Hamrol (1961) também não foi eficiente, mostrando-se pior que o tempo de ciclo apresentado pela NBR 12696. Ou seja, mesmo os materiais alteráveis não demonstraram estas condições com esta metodologia de ensaio. No entanto, foi possível encontrar novos tempos (2º sugestão de ciclos: 2 horas de saturação em água e 3 horas de secagem em estufa) diferentes daqueles ensaiados, sendo aconselhável para análises futuras a repetição com ciclos de tempos reduzidos e com menor temperatura, simulando aquela em que o agregado se encontra no ambiente externo. Bem como, com uso de água sem tratamento (água de chuva, poços artesianos, etc.).

Contatou-se, com o ensaio de ciclagem com Etilenoglicol, que a superfície específica dos blocos de rocha interfere no processo de fadiga, responsável pela desagregabilidade da rocha quando possui argilominerais expansíveis em sua matriz. Logo, recomendam-se ensaios de ciclagem com amostras de dimensões superiores a 40 mm.

Ainda sobre o ensaio com Etilenoglicol, é importante esclarecer que o mesmo é de rápida execução se comparado com a ciclagem água-estufa e fornece dados

confiáveis sobre a presença de minerais expansíveis no material rochoso, sendo pertinente a revalidação desta normativa. Uma vez que, apresentou em laboratório a fragmentação e desintegração dos blocos de rocha relatados por colaboradores da pedreira, quanto este era exposto à ciclagem natural (em campo).

A classificação de denudação de basalto apresentada por Crepani *et al.* (2001) é relevante para compreender a relação entre a resistência ao intemperismo e erosão com a morfologia do Estado do Paraná. No entanto, os autores destacam que são resultados relativos e empíricos. Assim, considerando que a geologia de materiais de construção é complexa e de alta variabilidade, os ensaios de laboratório são fundamentais para definir com precisão a alterabilidade de todas as feições das amostras estudadas. Apesar do basalto analisado ser resistente à quebra, é vulnerável ao tempo, devido principalmente à presença do argilomineral em sua matriz.

Este é um fator primordial para a realização de estudos como o apresentado neste trabalho, pois mesmo materiais que apresentam boas condições de densidade, absorção, porosidade e resistência, podem ser altamente alteráveis no tempo. Com isso o material rochoso sofrerá principalmente alteração da granulometria do material, a diminuição da resistência, aumento da deformabilidade, porosidade e da capacidade de absorção d'água e, assim, comprometendo seu uso como material de construção nas obras de engenharia, especialmente quando exposto ao ambiente externo.

Normativas que avaliem a alterabilidade do material de construção são essenciais para garantir a segurança e a durabilidade das obras civis. Deste modo, pode-se concluir que para a litologia analisada o ensaio disposto na NBR 12697 com a utilização de Etilenoglicol apresentou elevada alterabilidade do material rochoso. Sobre a NBR 12696 são necessários maiores estudos para verificação de sua reativação, uma vez que, alguns autores obtiveram perda de peso com essa metodologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). **NBR 15845-2**: Rochas para revestimento. Parte 2: Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2015.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). **NBR 6502**: Agregados – Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

BOWEN, N. L. **The Evolution of the igneous rocks**. New York: Dorner, 334 p., 1956.

BRANCO, P.M. **O intemperismo e a erosão**. 2009. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1313&sid=129>> Acesso em: 25 mar. 2017.

CAPUTO, V. **Rochas Ígneas**. Apostila digital sobre rochas ígneas. 2008. Disponível em: <www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=0ahUKewiPrdrJ0tfXAhVFhZAKHZHMDLwQFghDMac&url=http%3A%2F%2Fxa.yimg.com%2Fkq%2Fgroups%2F26118717%2F1802906740%2Fname%2Fapostila&usg=AOvVaw1j3uC1vpCMYra2mUt5Q2YH> Acesso em: 27 nov. 2017.

COSTA, W. D. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CREPANI, E. MEDEIROS, J. S. FILHO, P. H. FLORENZANO, T. G. DUARTE, V. BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico- econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos, SP: INPE, 2001.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia Geotécnica**, 6 ed., São Paulo: Cengage Learning, 2011.

FARJALLAT, J. E. S. **Estudos experimentais sobre a desagregação de rochas basálticas: basalto da Barragem de Capivara, Rio Paranapanema**. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências e Astronomia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1971.

FRAZÃO, E. B. **Metodologia para Avaliação da Alterabilidade de Rochas a Partir de Estudo Experimental em Amostras de Basalto da UHE de Três Irmãos -**

Estado de São Paulo. Tese (doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

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

Geology, Elsevier, v. 2, n. 6, p.363-395, 1968.

GOLDICH, S. S. **A Study in rock-weathering.** Journal of Geology, v.46, p.17-58, 1938.

GUZZI, T. C. E. **Índices de alteração e de alterabilidade de rochas. Aplicação para amostras de basalto da pedreira bandeirantes.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

HAMROL, A. A. Quantitative Classification of Weathering and Weatherability of Rocks. In: International conference on soil mechanics and foundation engineering, 5., 1961, Paris. **Proceedings...** Paris: DUNOD, v. 2, p. 771-774, 1961.

International Society For Rock Mechanics (ISRM). **Rock Characterization, Testing and Monitoring.** Oxford: ISRM Suggested Methods, E.T. Brown ed., Pergamon Press, 1981.

International Society For Rock Mechanics (ISRM). **Suggested method for determining load strength.** Oxford: ISRM Suggested Methods, ET. Brown ed., Pergamon Press, 1985.

LOUBSER, M.J. **Wetting and drying weathering of basalt and sandstone: A process isolation study.** Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, p.295–304, 2013.

MARRANO, A. **Caracterização tecnológica das rochas basálticas da Usina Hidroelétrica Canoas I, Rio Paranapanema, SP/PR.** Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Geotecnia, 1997.

MOTOKI, A. **Descrição Petrográfica de Rochas Ígneas.** Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea. Faculdade de Geologia, Centro de Tecnologia e Ciências. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2004.

OLIVEIRA, P. C. **Caracterização geológico- geotécnica de diferentes litotipos basáltico: basalto denso, basalto vesículo amigdaloidal e brecha basáltica.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Carlos – São Paulo, 2012.

PARAGUASSU, A. B.; GANDOLFI N.; LANDIM, P. M. B. **Curso Prático de Geologia Geral.** Universidade de São Paulo. São Carlos- São Paulo, 1973.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Indústria, do Comércio e do Turismo. **Atlas comentando da geologia e dos recursos minerais do estado do Paraná.** A formação das rochas, 2001. Curitiba: MINEROPAR, 2001.

PARANÁ. Secretaria de Estado da Indústria, do Comércio e do Turismo e Secretaria de Estado da Indústria, do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Potencialidades e Fragilidades das Rochas do Estado do Paraná**. Programa Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Paraná, 2005. Curitiba: MINEROPAR, 2005.

SILVA, L. C. **Identificação de rochas: catálogo digital de amostras**. Catálogo, vol. 1 versão 2.0., Distribuição Gratuita, 2013.

SZABÓ, G. A.J.; BABINSKI, M.; TEIXEIRA, W. Magmas e seus produtos. Teixeira *et al.* (editores). **Decifrando a Terra**, 2 ed., Cap. 6, São Paulo, 2009.

TAGLIANI, C. R. A. **Rochas Ígneas**. Apostila de Petrografia, 2009. Disponível em: <www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&ved=0ahUKEwiPrdrJ0tfXAhVFhZAKHZHMDLwQFghDMAc&url=http%3A%2F%2Fxa.yimg.com%2Fkq%2Fgroups%2F26118717%2F1802906740%2Fname%2Fapostila&usg=AOvVaw1j3uC1vpCMYra2mUt5Q2YH> Acesso em: 24 nov. 2017.

TOLEDO, M.C.M. **Da rocha ao Solo- Intemperismo e pedogênese**. TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M.; TAIOLI. Geologia, v. 1. Cap. 7, p.135-157. Ed. São Paulo: USP/UNIVESP/EDUSP, 2014.

VERHOEF, P. N. W.; VAN DE WALL, A.. **Application of Petrography in Durability assessment of Rock Construction Materials Aggregate Resources**. Balkema, p.307-330, 1998.

VIEIRA, V. *et al.* **Caracterização Geológico-Geotécnica e Classificação Geomecânica**. In: 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2015. Bento Gonçalves, RS. *Anais...* ID 346. Disponível em: <www.cbge2015.hospedagemdesites.ws/trabalhos/trabalhos.php> Acesso em: 08 out. 2017.

WEINERT, H. H. Engineering Petrology for Roads in South Africa. **Engineering Geology**. Elsevier, v. 2, 1968.