

PATRICIA CASAROTTO DE OLIVEIRA

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE DIFERENTES
LITOTIPOS BASÁLTICOS: BASALTO DENSO, BASALTO VESÍCULO-
AMIGDALOIDAL E BRECHA BASÁLTICA**

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

Versão Corrigida

Orientador: Lázaro Valentin Zuquette

São Carlos – SP

2012

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

048c Oliveira, Patricia Casarotto
 Caracterização geológico-geotécnica de diferentes
litotipos basálticos : basalto denso, basalto vesiculo-
amigdaloidal e brecha basáltica / Patricia Casarotto de
Oliveira ; orientador Lázaro Valentin Zuquette. -- São
Carlos, 2012.

 Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Geotecnia) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2012.

 1. Basaltos. 2. Caracterização geológico-geotécnica.
3. Alteração. 4. Alterabilidade. 5. Formação Serra Geral.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **PATRÍCIA CASAROTTO DE OLIVEIRA**

Título da dissertação: "Caracterização geológico-geotécnica de diferentes litotipos basálticos: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica".

Data da defesa: 10/04/2012

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Lázaro Valentin Zuquette (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Dr^a. **Josiele Patias**
(Itaipu Binacional)

Prof. Dr. **Edilson Pissato**
(Instituto de Geociências/USP)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

Resultado:

Aprovada

APROVADA

Aprovada

Dedicatória

À Deus e ao meu esposo Rafael Gregório de Oliveira.

AGRADECIMENTOS

À Deus, sem Ele eu nada seria. Muito obrigada por me acompanhar em todos os momentos da minha vida.

À minha família. Ao meu esposo Rafael, pelo amor, carinho, dedicação e compreensão. Aos meus pais, Vanda e Moacir, pelo amor e educação. Aos meus irmãos, Grazieli e Moacir Jr, pelo carinho e confiança. Ao meu cunhado Diogo e à sua família pelo carinho. À minha cunhada Vilmara por nos presentear com o Lucas Vinícius, meu amado sobrinho. À minha sogra Eunice pela afeição e alegria. Aos meus avôs Ângelo e Adelina, em memória à Amália Letícia, pelo carinho e orações. Aos irmãos de coração Débora, Franciele, Josiane, Joyce e Thiago. Aos amigos Veronice e Cláudio. Aos afilhados Nycoll, Lucas Emanuel e Marcos Vinícius. Enfim, a todos aqueles que estiveram sempre ao meu lado.

Pela dedicação técnica e apoio na elaboração desta dissertação, expresso minha gratidão aos seguintes profissionais:

Ao professor Dr. Lázaro Valentin Zuquette, pela orientação, pela imensa contribuição científica e, também, pela compreensão e parceria.

À todos os docentes do Departamento de Geotecnia (EESC/USP).

Aos funcionários dos laboratórios e da secretaria do Departamento de Geotecnia (EESC/USP), em especial ao Seu Antônio, Décio e Manoel pela colaboração nos ensaios de laboratório.

Aos amigos e colegas da pós-graduação, pelo carinho e hospitalidade. Não citarei nomes, mas guardarei todas as lembranças com muito carinho.

Aos funcionários da Usina de Itaipu das divisões ENCC, ENCA e SO.DT/ITAIPU, em especial a engenheira Dra. Josiele Patias. Agradecimento especial também ao Eng. Joécio e ao técnico Nilo.

À Geóloga Débora Fernandes, pela amizade e contribuições a esta pesquisa. Também aos colegas do grupo de Geotecnia do CEASB/PTI, Bruna, Bruno, Diane, Jéssica, Kathleen, Larissa, Rudney e Willian.

Aos funcionários e colaboradores do CEASB/PTI/ITAIPU.

Ao Parque Tecnológico de Itaipu (PTI C&T/ITAIPU) e ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB/PTI/ITAIPU) pelo apoio financeiro.

À Itaipu Binacional pelo fornecimento das amostras e dados técnicos.

RESUMO

OLIVEIRA, P. C. **Caracterização geológico-geotécnica de diferentes litotipos basálticos: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica.** 2012. 159p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

Esta dissertação apresenta a caracterização geológico-geotécnica de diferentes litotipos basálticos, abrangendo basaltos densos, basaltos vesículo-amigdaloidais e brecha basáltica. Estes materiais são oriundos de quatro derrames basálticos pertencentes à Formação Serra Geral, região da barragem de Itaipu. Para a caracterização foram realizados ensaios rotineiros de densidade aparente, porosidade aparente, absorção-d'água, compressão pontual e alterabilidade (ciclagem acelerada em laboratório). Incrementou-se neste trabalho a aplicação da velocidade de absorção-d'água como apoio para ensaios de ciclagem, além do uso de análises de *pH* e de condutividade elétrica para avaliação do grau de alteração. O ensaio de velocidade de absorção-d'água permitiu a verificação dos tempos necessários para a saturação e a secagem de cada litotipo, mostrando-se importante para a adequação dos ciclos de alteração em laboratório. As análises pHmétricas e de condutividade elétrica apresentaram-se eficientes para a avaliação da alteração, principalmente quando as classificações tátil-visuais e a resistência não refletiram com precisão o grau de alteração da rocha.

Palavras-chave: Caracterização Geológico-Geotécnica, Alteração, Alterabilidade, Basaltos, Formação Serra Geral.

ABSTRACT

OLIVEIRA, P. C. **Geological- Geotechnical characterization of different basaltics lithotypes: dense basalt, vesicular-amygdaloidal basalt and basaltic breccia.** 2012. 159p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

This study presents the geological- geotechnical characterization of different basaltics lithotypes (dense basalt, vesicular-amygdaloidal basalt and basaltic breccias). These rock materials were selected from four basaltics flows from Serra Geral Formation (Itaipu Dam region). For this characterization were performed apparent density, apparent porosity, water absorption, point load strength and alterability (wet-dry cycling tests). Increased in this study the application of the water absorption rate as support for cycling tests, and the use of the pH and electrical conductivity tests for interpretation of the weathering degree. The water absorption rate allowed determining the adequate time for saturation and drying of each lithotype, and proved to be important for suitability of the cycling tests. Electrical and pH conductivity analysis were effective for the evaluation of the alteration degree especially when the tactile-visual classifications and the resistance did not reflect so precisely the rock alteration.

Key-words: Geological- Geotechnical Characterization, Alteration, Alterability, Basalts, Serra Geral Formation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Ordem de alteração química dos minerais constituintes das rochas (GOLDICH, 1938). (b) Ordem de cristalização dos minerais de origem magmática (BOWEN, 1956).....	30
Figura 2.2 – Correlação entre o regime de precipitação e a temperatura anual (modificado de PELTIER, 1950).....	37
Figura 2.3 – Idealização da relação entre <i>pH</i> abrasivo e ambiente intempérico em saprólitos de alteração de granitos para regiões tropicais e subtropicais úmidas (GRANT, 1969).....	41
Figura 2.4 – Relação entre taxa de dissolução e velocidade de onda <i>P</i> , aplicada em granitos (SHALKOWSKI et al., 2009).	43
Figura 2.5 - Variação de alteração ao longo do tempo para o índice de resistência de uma rocha ácida ($\text{SiO}_2 > 66\%$) e classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração (LADEIRA e MINETTE, 1984a).	50
Figura 2.6 – Alterabilidade de materiais rochosos, África do Sul (Weinert, 1968).....	52
Figura 2.7 – Variação dos índices de alteração com o tempo de lixiviação contínua (MAIA et al., 2003).....	54
Figura 2.8 – Distribuição de tensão na superfície do maciço rochoso e fissuras de retração (ROCHA, 1971).	57
Figura 3.1 – Fluxograma da sequência das diferentes etapas da pesquisa.	65
Figura 3.2 – Arranjo Geral do projeto de Itaipu (Fonte: Itaipu, 2008).....	66
Figura 3.3 – Ensaio de Ciclagem Natural em Grande Escala de Itaipu, pilha de rocha 1E. ...	67
Figura 3.4 – Seção geológica longitudinal ao eixo da barragem principal de Itaipu (Fonte: ITAIPU, 1994).....	68
Figura 3.5 – Identificação das amostras em perfil.....	69
Figura 3.6 - Registro fotográfico da amostra 4D. (a) Dois meses de alteração (ITAIPU, 1975). (b) Um ano de alteração (ITAIPU, 1976). (c) Três anos de alteração (ITAIPU, 1978a). (d) Seis anos de alteração natural (ITAIPU, 1981).	71

Figura 3.7 – Correlação entre o regime de precipitação e a temperatura anual de Peltier (1950).	75
Figura 3.8 – Esquematização das etapas dos ensaios de laboratório.	77
Figura 3.9 – Exemplo de gráfico de velocidade de absorção-d'água para rochas basálticas. 80	
Figura 3.10 – Sistema desenvolvido durante a pesquisa para ensaio de alteração química. (a) amostra embalada com fixador. (a) Detalhe para saquinho e fixador de amostra. (b) Detalhe para béquer com tampa adaptada. (c) Equipamentos de aquisição de dados.....	83
Figura 3.11 – (a) Aparelho Treton usado na redução das amostras para ensaio de alteração química. (b) Esquema de limpeza das partículas com ar comprimido.....	84
Figura 3.12 – Equipamento usado para ensaio de resistência à compressão pontual.	86
Figura 3.13 – Dimensões dos fragmentos usados em ensaio de carga pontual.	86
Figura 4.1 – Amostra 1E, basalto denso cinza escuro, (a) imagem mesoscópica com amígdala de filossilicato e (b) microscópica 200X da matriz (detalhe para disposição dos minerais de plagioclásio).....	91
Figura 4.2 – Amostra 2D, (a) imagem mesoscópica de bloco grande quantidade de amígdalas de calcita e (b) de bloco com níveis de siltito.	92
Figura 4.3 – Amostra 2D, brecha com basalto vesículo-amigdaloidal, (a) imagem microscópica 200X da matriz basáltica e (b) de uma microvesícula revestida por argilomineral em processo de argilificação.	92
Figura 4.4 – Amostra 3D _v , basalto vesicular, (a) imagem mesoscópica e (d) microscópica 200X da matriz (os minerais de plagioclásios encontram-se mais descoloridos).....	93
Figura 4.5 – Blocos tipo 4D ₁ com matriz rosada e argilomineral verde escuro, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios descoloridos).....	94
Figura 4.6 – Blocos tipo 4D ₂ com matriz levemente descolorida e argilomineral verde amarelado, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios descoloridos e bem mais pronunciados que na amostra 4D ₁).....	94
Figura 4.7 – Subgrupo 5D _C , basalto denso rosado com argilomineral em pontos esparsos, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz.....	95

Figura 4.8 – Subgrupo 5D _B , basalto denso rosado com plagioclásios alterados e matriz descolorida, (a) imagem mesoscópica do bloco e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios bastante descoloridos e pronunciados).	96
Figura 4.9 – Amostra 6C, basalto vesículo-amigdaloidal, imagem microscópica 200X da matriz. Argilomineral distribuído em plano preferencial e plagioclásios bastante descoloridos na matriz.	97
Figura 4.10 – Amostra 6C, basalto vesículo-amigdaloidal, (a) imagem mesoscópica de bloco com amígdalas preenchidas por quartzo e argilominerais e (b) de bloco com argilominerais em níveis de alinhamento.	97
Figura 4.11 – Amostra 6C' _v , brecha com basalto vesicular, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (matriz bastante porosa).	98
Figura 4.12 – Subgrupo 7C _C , basalto denso cinza escuro sem minerais róseos, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios pouco pronunciados).	99
Figura 4.13 – Subgrupo 7C _R , basalto denso cinza escuro com minerais róseos, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (detalhe para pontos róseos, variante dos plagioclásios).	99
Figura 4.14 – Blocos do tipo 8B _E , (a) imagem mesoscópica de bloco com predomínio de argilomineral e (b) de bloco com predomínio de argilito/siltito.	100
Figura 4.15 – Blocos do tipo 8B _V com basalto vesículo-amigdaloidal, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásio descolorido).	101
Figura 4.16 – Amostra 9B, basalto rosado vesículo-amigdaloidal, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios descoloridos e pronunciados).	102
Figura 4.17 – Amostra 10B, basalto denso cinza escuro, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios sem indícios de alteração).	102
Figura 4.18 – Classificação do intemperismo da região de Itaipu pelo ábaco de Peltier (1950).	104
Figura 4.19 – Histograma de frequência da variação de temperatura num mesmo dia.	105
Figura 4.20 – Velocidade de absorção-d'água, basaltos densos (cinza escuro) 1E, 7C _C , 7C _R e 10B.	108

Figura 4.21 – Velocidade de absorção-d’água, basaltos densos rosados 4D (com argilomineral), 5D _C e 5D _B	109
Figura 4.22 – Velocidade de absorção-d’água, amostras 3D _V , 6C e 9B.	110
Figura 4.23 – Velocidade de absorção-d’água, amostras 2D _V , 6C’, 8B _E e 8B _V	110
Figura 4.24 – Alteração química, análises de pHmetria para granulometria 0,42<#<1,0 mm.	112
Figura 4.25 – Alteração química, valores médios de <i>pH</i> de acordo com a faixa granulométrica.	113
Figura 4.26 – Correlação entre <i>pH</i> e superfície específica para basaltos vesículo-amigalóides e brechas basálticas, com presença de argilomineral e/ou calcita na matriz ou em amígdalas.	114
Figura 4.27 – Correlação entre <i>pH</i> e superfície específica para basaltos densos cinza escuros.	115
Figura 4.28 – Correlação entre <i>pH</i> e superfície específica para basaltos densos rosados. ...	115
Figura 4.29 – Alteração química, valores médios de condutividade elétrica de acordo com a faixa granulométrica.	116
Figura 4.30 – Correlação entre condutividade elétrica e superfície específica, amostras com presença de argilomineral ou calcita.	117
Figura 4.31 – Correlação entre condutividade elétrica e superfície específica, amostras de basalto denso.	117
Figura 4.32 – Histograma dos valores de pH para 0,42<#<1,0 mm.	118
Figura 4.33 – Histograma dos valores de condutividade elétrica para 0,42<#<1,0 mm.....	119
Figura 4.34 – Amostra após ensaio de carga pontual, com oxidação interna acentuada na face de ruptura (condição de pré-ruptura).	120
Figura 4.35 – Valores de ruptura de ensaio de carga pontual, anterior à ciclagem acelerada.	120
Figura 4.36 – Histograma dos valores de Índice de Carga Pontual $I_{S(50)}$	121
Figura 4.37 – Correlação entre densidade aparente e condutividade elétrica	123
Figura 4.38 – Correlação entre porosidade aparente e condutividade elétrica	124

Figura 4.39 – Correlação entre velocidade de absorção-d'água e condutividade elétrica . . .	124
Figura 4.40 – Correlação entre resistência à carga pontual e condutividade elétrica	125
Figura 4.41 – Correlação entre <i>pH</i> e condutividade elétrica.	126
Figura 4.42 – Correlação entre <i>pH</i> e porosidade aparente.	127
Figura 4.43 – Correlação entre <i>pH</i> e velocidade de absorção d'água.	128
Figura 4.44 – Correlação entre <i>pH</i> e resistência a carga pontual.	128
Figura 4.45 – Correlação entre resistência à carga pontual e absorção-d'água.....	129
Figura 4.46 – Correlação entre porosidade aparente e resistência a carga pontual.....	129
Figura 4.47 – Correlação entre densidade aparente e resistência a carga pontual.	130
Figura 4.48 – Correlação entre velocidade de absorção-d'água e resistência a carga pontual.	130
Figura 4.49 – Perda de massa ao longo dos ciclos de alteração em laboratório.....	131
Figura 4.50 – Amostra 6C-F em desagregação (escala em cm). (a) Início de fraturamento após 34 ciclos. (b) Após 64 ciclos, fragmentação do bloco, detalhe para face de ruptura com concentração de argilomineral. Escala em milímetros.	132
Figura 4.51 – Basalto denso cinza escuro (1E). (a) Película de oxidação nas faces externas de exposição à ciclagem acelerada. (b) Face de ruptura de carga pontual, indicando conservação do estado inicial de alteração.....	134
Figura 4.52 – Basalto denso com argilomineral disseminado (4D). Material depositado no fundo do recipiente de saturação após cinco ciclos.	134
Figura 4.53 – Amostra de basalto vesículo-amigdaloidal 6C, após 80 ciclos. (a) Face exposta à ciclagem acelerada com carreamento de argilomineral das microamígdalas. (b) Face de ruptura após carga pontual, indicando preservação do estado inicial de alteração.	135
Figura 4.54 – Variação dos índices físicos durante ciclagem acelerada em laboratório.....	136
Figura 4.55 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 1E.....	137
Figura 4.56 – Variação do índice $I_{S(50)}$ em 80 ciclos de alteração, amostra 2D _v	138
Figura 4.57 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 3D _v	138
Figura 4.58 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 4D.	139

Figura 4.59 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 5D _B	139
Figura 4.60 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 5D _C	140
Figura 4.61 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 6C.	140
Figura 4.62 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 6C'.	141
Figura 4.63 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 7C _C	141
Figura 4.64 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 7C _R	142
Figura 4.65 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 8B.	142
Figura 4.66 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 9B.	143
Figura 4.67 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 10B.	143
Figura 4.68 – Variação de $I_{S(50)}$ ao longo da ciclagem acelerada.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Forças típicas exercidas por processos de intemperismo físico (OLLIER, 1975).....	36
Tabela 2.2 – Correlação entre condutividade de abrasão e parâmetros da rocha basáltica (GOMES, 2001).	42
Tabela 2.3 – Valores de parâmetros geotécnicos de rocha basáltica.....	47
Tabela 2.4 – Alterabilidade e relação a percolação de fluidos em granitos (FARRAN e THENOZ, 1965).....	53
Tabela 2.5 – Relação entre permeabilidade, porosidade e alterabilidade em basaltos (MARRANO, 1997).....	53
Tabela 2.6 - Índice de alterabilidade (modificado de SADISUN et al., 2005).....	53
Tabela 2.7 – Guia para avaliação da qualidade do agregado baseado em ensaios de laboratório (modificado de VERHOEF e VAN DE WALL, 1998).....	62
Tabela 4.1 - Índice climático N para a região de Itaipu.....	103
Tabela 4.2 - Índices físicos anteriores à ciclagem em laboratório.....	106
Tabela 4.3 – Parâmetros de absorção-d’água máxima, velocidade de absorção-d’água e tempo de secagem.....	111
Tabela 4.4 – Índice de Carga Pontual ($I_{S(50)}$) anterior à ciclagem em laboratório.....	121
Tabela 4.5 – Correlação entre Condutividade elétrica e outras variáveis.....	123
Tabela 4.6 - Correlação entre pH e outras variáveis.....	127
Tabela 4.7 - Correlação entre $I_{S(50)}$ e outras variáveis.	129
Tabela 5.1 – Sugestão de adaptações para ensaios de ciclagem acelerada em diferentes litotipos basálticos.	149

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Escala de tempo para observação da alteração de rochas (FOOKES et al., 1988).	29
Quadro 2.2 – Características básicas dos principais grupos de minerais argilosos (DEER et al., 1966).	32
Quadro 2.3 – Porcentagem de minerais secundários e em relação ao estágio de decomposição (Weinert, 1968).	33
Quadro 2.4 – Exemplos de patologias em obras civis relacionadas a expansibilidade de argilominerais.....	33
Quadro 2.5 – Classificação das propriedades físico-mecânicas das rochas de acordo com o grau de influência dos processos intempéricos (ILIEV, 1966).	36
Quadro 2.6 – Função da água nas zonas de intemperismo (MARTINI e CHESWORTH, 1992).	39
Quadro 2.7 – Classes de alteração, segundo IPT (1984).	44
Quadro 2.8 – Classes de alteração, segundo ISRM (1981).	44
Quadro 2.9 – Índices químicos de alteração.	46
Quadro 2.10 – Métodos de avaliação da alterabilidade de rochas.....	50
Quadro 2.11 – Exemplos de colapsos de túneis associados a alteração de rocha.	58
Quadro 2.12 – Exemplos de colapsos de taludes naturais e artificiais.	59
Quadro 2.13 – Porcentagens limites de minerais secundários para materiais de construção.	61
Quadro 2.14 – Exemplos de estruturas de concreto danificadas pela alteração de agregados.	62
Quadro 3.1 – Classes de alteração, segundo ISRM (1981).	76
Em dois grupos de amostras foi possível identificar subgrupos de acordo com observações visuais. O Quadro 4.1 resume as amostras analisadas em laboratório, com uma descrição tátil-visual resumida e o respectivo grau de alteração.	90

Quadro 4.2 – Descrição resumida das amostras analisadas em laboratório e respectivos graus de alteração.....	90
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos do alfabeto latino

a : Alterabilidade

A : Área

d : Diâmetro equivalente do agregado

D : Distância entre as ponteiros da aplicação da carga pontual

D_e : Diâmetro equivalente

e : Fatores extrínsecos de alteração

E : Módulo de elasticidade

Eh : Potencial de oxidação

E_j : Taxa de evaporação

F : Abrasão Los Angeles no final de Δt , mais % desagregada

i : Fatores intrínsecos de alteração

i_0 : Parâmetro de laboratório antes da alteração natural ou acelerada

i_j : Parâmetro de laboratório após alteração natural ou acelerada

I : Abrasão Los Angeles no início de Δt , mais % desagregada

I_i : Índice de alteração do parâmetro i

I_M : Índice de perda de massa

I_p : Índice micropetrográfico de alteração

$I_{S(50)}$: Índice de compressão pontual para diâmetro equivalente igual a 50 mm

I_w : Índice de alteração

K : Índice de qualidade micropetrográfico

$K(\Delta t)$: coeficiente de alterabilidade

K_{AR} : Permeabilidade aparente ao ar

m : intensidade de ocorrência dos processos de alteração

m : perda de massa

m_0 : massa saturada

m_1 : massa seca

M : Módulo de finura

M_0 : módulo de finura *in situ*

M_2 : módulo de finura após ensaio com britador a 700°C

M_3 : módulo de finura após ensaio com britador a 450°C

M_{sat} : Massa saturada

M_{sec} : Massa seca

M_{sub} : Massa saturada submersa

N : Índice climático

P : Carga de ruptura registrada no manômetro (carga pontual)

P_a : Precipitação anual

p_i e p_j : coeficientes (pesos) que avaliam os efeitos da mineralogia e das fissuras nas propriedades mecânicas da rocha.

pH : Potencial hidrogeniônico

q_u : Resistência a compressão uniaxial

Q : Carregamento pontual

Q_a : Resistência ao fraturamento

r_X : Raio do fragmento de rocha na direção X

r_Y : Raio do fragmento de rocha na direção Y

R : Resistência mecânica

R_i : Resistência mecânica inicial

R_f : Resistência mecânica final

SE : Superfície específica teórica

t : Tempo

t_{lix} : Tempo de lixiviação

t_{nat} : Tempo de alteração natural

t_r : Tempo de ruína

v_p : velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

V : Volume

V_{abs} : Velocidade de absorção-d'água

V_{NW} : Velocidade de alteração natural

W : Menor dimensão lateral (largura) de um fragmento de rocha

Símbolos do alfabeto grego

α_a : Absorção-d'água

η_a : Porosidade aparente

ρ_a : Densidade aparente

ρ'_d : Densidade aparente aparente seca

ρ'_{sat} : Densidade aparente saturada

σ_c : Resistência à compressão

τ_f : Resistência ao cisalhamento

ω : Dimensões lineares das aberturas de diáclases

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 -	INTRODUÇÃO.....	23
1.2	OBJETIVOS.....	25
CAPÍTULO 2 -	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DE ROCHAS	27
2.2	FATORES DE INTERFERÊNCIA.....	29
2.2.1	Fatores intrínsecos.....	29
2.2.1.1	<i>Características dos argilominerais no processo de alteração.....</i>	<i>31</i>
2.2.2	Fatores extrínsecos	33
2.2.2.1	<i>A água no intemperismo químico.....</i>	<i>37</i>
2.3	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÃO E DE ALTERABILIDADE	43
2.3.1	Alteração	44
2.3.2	Alterabilidade	48
2.4	IMPLICAÇÕES GEOTÉCNICAS	54
2.4.1	Obras envolvendo escavação em rocha.....	56
2.4.2	Rocha como material de construção.....	60
CAPÍTULO 3 -	MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	65
3.2	MATERIAL DE ESTUDO	66
3.2.1	O ensaio de ciclagem natural de Itaipu	70
3.3	MÉTODOS.....	74
3.3.1	Revisão bibliográfica.....	74
3.3.2	Identificação do tipo de intemperismo local	74

3.3.3	Extração e caracterização de amostras.....	75
3.3.4	Ensaio laboratoriais	77
3.3.4.1	<i>Índices físicos.....</i>	78
3.3.4.2	<i>Velocidade de absorção-d'água</i>	79
3.3.4.3	<i>Alteração química.....</i>	81
3.3.4.4	<i>Compressão pontual</i>	85
3.3.4.5	<i>Ciclagem acelerada</i>	88
3.3.4.6	<i>Tratamento dos resultados.....</i>	89
3.3.4.7	<i>Interpretação dos resultados</i>	89
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES		90
4.1	DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS	91
4.2	CONDIÇÕES INTEMPÉRICAS	103
4.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	105
4.3.1	Caracterização geológico-geotécnica básica anterior à ciclagem acelerada.....	105
4.3.1.1	<i>Índices físicos: densidade aparente, porosidade aparente e absorção-d'água</i>	105
4.3.1.2	<i>Velocidade de absorção-d'água</i>	108
4.3.1.3	<i>Alteração química.....</i>	112
4.3.1.4	<i>Compressão pontual</i>	119
4.3.1.5	<i>Correlações entre parâmetros obtidos em ensaios laboratoriais</i>	123
4.3.2	Caracterização geológico-geotécnica após ciclagem acelerada.....	131
4.3.2.1	<i>Controle qualitativo e quantitativo da ciclagem acelerada</i>	131
4.3.2.2	<i>Índices físicos: densidade aparente, porosidade aparente e absorção</i>	135
4.3.2.3	<i>Compressão pontual</i>	137
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES		147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		151

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A utilização de rochas na área da engenharia civil é bastante ampla e possui diversas aplicações, seja como material de construção ou como suporte para as diferentes estruturas civis. De acordo com sua aplicação e o nível de rigor estabelecido em projeto, são necessárias metodologias específicas capazes de caracterizar geológico-geotecnicamente o material rochoso, as quais permitirão qualificar e quantificar os parâmetros de interesse.

Nestes estudos é importante considerar a análise de alterabilidade do material rochoso, que está relacionada com as características intrínsecas da rocha e com a agressividade do meio de exposição. Para tanto, faz-se necessário conhecer o estado atual de alteração, bem como a velocidade em que se processam as modificações na natureza da rocha.

O grau de alteração de uma rocha normalmente pode ser obtido por índices de qualidade envolvendo parâmetros físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção-d'água), geomecânicos (módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência ao cisalhamento) e químicos (*pH* de abrasão, condutividade elétrica de abrasão e teor de elementos químicos alterados). Com relação aos parâmetros físicos, os resultados são considerados bastante representativos do estado de alteração. Estudos mostram que há aumento progressivo na porosidade e na absorção-d'água com aumento da alteração, principalmente pelo aumento de fissuras (efeitos de origem térmica de expansão/contração, da expansibilidade de argilominerais ou do crescimento de cristas e de sais).

Os parâmetros geomecânicos também são utilizados eficientemente como índices de alteração, uma vez que materiais rochosos alterados são mais sensíveis a variações na resistência mecânica e na deformabilidade. Quanto à caracterização da alteração com índices químicos, esta pode ser realizada de diferentes formas, seja pelo teor de elementos químicos, como o aumento de Fe_2O_3 , seja pela medição do *pH* e da condutividade. A condutividade elétrica tende a ser maior em materiais rochosos alterados, pois em solução aquosa tende-se a acrescer a concentração de íons com o carreamento de minerais. No que se refere ao *pH*, este parâmetro também reflete consideravelmente processos desta natureza, mas deve-se tomar cuidado com sua interpretação, pois são altamente dependentes da composição mineralógica

da rocha e dos produtos de alteração, como presença de argilominerais (aumenta o pH) ou de produtos de oxidação (reduz o pH).

Frente às exposições anteriores constata-se:

- Não há um consenso sobre um índice que realmente seja efetivo;
- Existe uma tendência para integração de dados de diferentes tipos de ensaios e que refletem diferentes características intrínsecas dos materiais rochosos;
- Muitos ensaios necessitam de tratamento refinado das amostras e de equipamentos de precisão onerosos (microscópios eletrônicos de alta precisão, prensas hidráulicas, perfuratrizes e retíficas para preparação de corpos-de-prova, etc);
- Com o desenvolvimento tecnológico estão surgindo equipamentos portáteis e de fácil manuseio, que permitem extrair informações em campo ou em ambientes com pouca estrutura física (microscópios, pH metros, e condutivímetros portáteis, entre outros).

Com base nestas considerações, este trabalho se propõe a contribuir na integração de dados a partir de um conjunto de ensaios que reflitam as características físicas e químicas do material rochoso, associado à preparação simples de amostras e ao uso de equipamentos não sofisticados.

Apresenta-se nesta pesquisa um conjunto de ensaios (densidade aparente, porosidade aparente, absorção-d'água, velocidade de absorção-d'água, compressão pontual, ciclagem acelerada, pH e condutividade elétrica) e observações laboratoriais, no sentido de que os resultados ao serem integrados permitam facilitar as avaliações do grau de alteração, da alterabilidade e na estimativa do comportamento da resistência mecânica quanto aos possíveis usos.

A pesquisa justifica-se ao propor um conjunto de ensaios físicos, químicos e mecânico, associados a observações microscópicas (50 e 200X), que possa ser desenvolvido em laboratórios simples e que os resultados sejam utilizáveis para o fim desejado.

Os ensaios foram desenvolvidos em litotipos basálticos oriundos da região da Barragem de Itaipu. O uso destes justifica-se visto que os mesmos foram utilizados na construção das diferentes estruturas civis da barragem, como agregado de concreto (Barragem Principal, Estrutura de Desvio, Barragens de Ligação, Barragem Lateral Direita e

Vertedouro), para compor a Barragem de Enrocamento (transições, enrocamento e rip-rap) e também utilizado na barragem de terra (filtros, proteção de filtros e na região de montante).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi o emprego de um grupo de ensaios laboratoriais sobre amostras sem geometria definida, em que os resultados podem ser integrados para uma análise do material rochoso, com ênfase na avaliação da alteração e da alterabilidade da rocha. As amostras estudadas foram litotipos basálticos (basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica) da região da Barragem de Itaipu.

Com relação aos objetivos específicos, cita-se:

- Analisar as características do intemperismo local com base em dados hidrometeorológicos;
- Avaliar a alteração mineralógica das amostras em microscópio digital e em lupa de aumento;
- Avaliar as características geológico-geotécnicas de diferentes litotipos basálticos com uso de ensaios rotineiros, como densidade aparente, porosidade aparente, absorção-d'água e compressão pontual;
- Analisar a alterabilidade dos diferentes litotipos basálticos e o efeito da alteração no comportamento físico e mecânico nestes materiais rochosos;
- Avaliar o parâmetro de absorção-d'água rápida no processo de alteração de rochas basálticas;
- Verificar a possibilidade de classificar a alteração da rocha basáltica por meio de análises de *pH* e de condutividade elétrica de abrasão;
- Estabelecer correlações entre os parâmetros da rocha basáltica obtidos em laboratório;

- Avaliar a aplicabilidade de ensaios normalizados para as amostras em estudo;
- Contribuir com a bibliografia regional a partir da caracterização geotécnica dos litotipos de rocha comumente encontrados nos derrames basálticos da Formação Serra Geral: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DE ROCHAS

A sanidade de materiais rochosos não é assunto novo no meio acadêmico e na prática em obras de grande porte. Contudo, verifica-se na bibliografia a necessidade de intensificar as investigações científicas nesta área de conhecimento.

Carroll (1970) define alteração como um processo químico (decomposição), em que os minerais originais primários são afetados por soluções inorgânicas e orgânicas, obtendo-se um ambiente químico em estado estacionário na superfície da Terra. Tais soluções são governadas por leis de solução e de equilíbrio químico, pela liberação de energia e pelo potencial redox (oxidação/redução). Contudo, a alteração também pode ser de origem física, conservando a individualidade química e mineralógica da rocha, ou seja, processos que ocasionam a desintegração da rocha pela perda de coesão e individualização dos minerais (PEDRO, 1968).

Estas alterações químicas ou físicas podem ocorrer isolada ou simultaneamente num material rochoso, modificando, além de suas características de textura e cor, suas propriedades de resistência e permeabilidade, as quais são de grande importância para as obras de engenharia (NASCIMENTO, 1970).

Quanto a origem destes processos, podem estar associadas a fenômenos meteorológicos (alteração causada por agentes atmosféricos); modificações deutéricas e hidrotermais (comuns nos últimos estágios de consolidação do magma); e ainda as modificações físico-mecânicas de uma rocha devido a causas variadas (forças tectônicas, forças dinâmicas, modificações físico-químicas resultantes das condições impostas por obras civis ou algo que reduza as forças intermoleculares dos minerais) (NASCIMENTO, 1970;

AIRES-BARROS, 1971; ROCHA, 1971; FARJALLAT, 1972; YOSHIDA, 1972; LADEIRA E MINETTE, 1984a). Os principais termos associados são:

- Desintegração: Perda de coesão dos grãos da rocha, associada, ou não, à alteração da rocha (NBR 12695, 1992; NBR 12696, 1992);
- Fissuração: Formação de descontinuidades em apenas uma face da amostra de rocha (NBR 12695, 1992; NBR 12696, 1992);
- Rachadura: Propagação das fissuras por mais de uma dimensão do fragmento (NBR 12695, 1992; NBR 12696, 1992);
- Lasqueamento: Partição do fragmento através de rachaduras. A ocorrência de lasqueamento generalizado pode ser referida como fragmentação (NBR 12695, 1992; NBR 12696, 1992);
- Arenitização, pulverização e desagregação: comumente usados para transformações de blocos ou de fragmentos rochosos em areia ou material pulverulento (FARJALLAT, 1972);
- Decomposição: alteração exclusivamente química tendo como consequência a modificação progressiva da natureza dos minerais, sem necessariamente ocorrência de desintegração (CARROLL, 1970).

Com relação ao conceito de alterabilidade ou alteração potencial, refere-se à susceptibilidade da rocha alterar-se ao longo do tempo (NASCIMENTO, 1970; ROCHA, 1971; FOOKES et al., 1988). Sendo assim, uma rocha possuirá maior alterabilidade que outra, se ambos os materiais ao serem submetidos aos mesmos agentes intempéricos e durante o mesmo período de exposição, apresentarem diferentes níveis de alteração (HAMROL, 1961).

Dada a importância do tempo na interpretação da alterabilidade de uma rocha, faz-se necessário compreender as diferentes escalas de tempo existentes. De acordo com Fookes et al. (1988), a escala de tempo pode ser geológica, quando as transformações da rocha ocorrem em períodos de até bilhões de anos; escala de tempo de engenharia, relacionada a vida útil das obras civis, da ordem de dezenas de anos; e escala de tempo experimental, usada para prever o comportamento de um material através de métodos acelerados em laboratório, os intervalos variam de dias a meses. O Quadro 2.1 apresenta um resumo dos conceitos de escala de tempo em função do objeto de observação.

Objeto de observação	Escala de tempo	Exemplo
Estudo experimental	Tempo experimental	Ensaio de alteração acelerado
Estruturas civis	Tempo de engenharia	Construções civis, monumentos históricos
Materiais geológicos	Tempo geológico	Intemperismo de depósitos e materiais geológicos

Quadro 2.1 – Escala de tempo para observação da alteração de rochas (FOOKES et al., 1988).

2.2 FATORES DE INTERFERÊNCIA

Os fatores de influência são aqueles que podem acelerar o processo de alteração ou na alterabilidade do material rochoso. Estes fatores podem interferir em diferentes escalas:

- Micro escala: fatores relacionados à composição da rocha, estabilidade química dos minerais e presença de minerais expansivos;
- Meso escala: cristalização de sais, ação gelo/degelo, crescimento de raízes, percolação de água, agressividade do líquido percolado, temperatura, etc;
- Macro escala: interferência das condições climáticas, relevo e tipo de ambiente de exposição (chuva ácida, resíduos industriais, etc).

Na sequência são detalhados alguns fatores relevantes no processo de alteração e na alterabilidade, de acordo com as características próprias da rocha (fatores intrínsecos) ou externas a ela (fatores extrínsecos).

2.2.1 Fatores intrínsecos

Tanto a alteração como a alterabilidade da rocha dependem das características intrínsecas da rocha, ou seja, de seus minerais constituintes e da estabilidade química entre eles (AIRES-BARROS, 1971; FARJALLAT, 1971a, 1971b; STRUILLLOU, 1969).

Com relação à estabilidade química, Goldich (1938) propôs uma sequência de estabilidade dos principais minerais frente à ação do intemperismo, Figura 2.1.a. Especificamente sobre os minerais de origem magmática, Bowen (1956) desenvolveu uma série de cristalização equivalente a de Goldich (1938), Figura 2.1.b. Comparando as duas sequências, os primeiros minerais a se cristalizarem (formados em maiores temperatura e pressão) são menos estáveis do que os últimos (gerados em menores temperatura e pressão). Portanto, maior será a alterabilidade, quanto maior for a diferença entre o ambiente de formação dos minerais e o ambiente de alteração (GOMES, 2001).

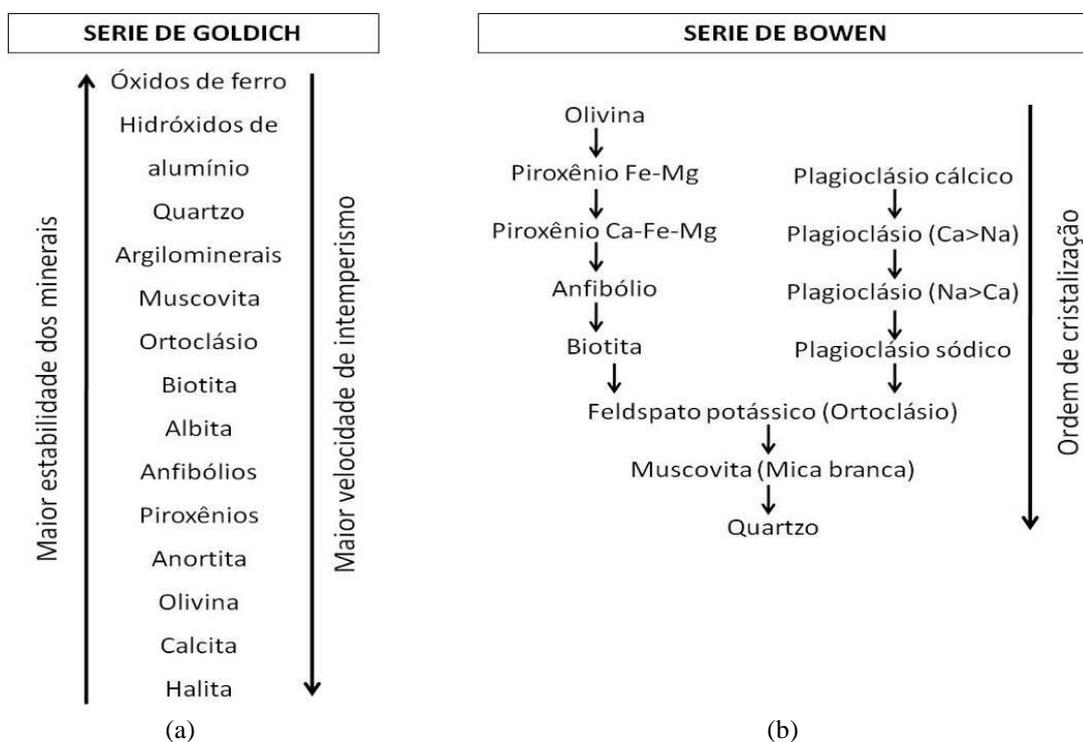


Figura 2.1 – (a) Ordem de alteração química dos minerais constituintes das rochas (GOLDICH, 1938).

(b) Ordem de cristalização dos minerais de origem magmática (BOWEN, 1956).

Além da composição mineralógica, pode-se ainda citar como interferentes, os fatores de estado microfissural, estrutura, textura e grau de cimentação. No estado microfissural, cada categoria de fissuras interfere num processo específico de alteração. As macro e microfaturas abertas formam uma rede de irrigação, favorecendo a ocorrência de reações químicas entre a rocha e água de percolação (FARJALLAT, 1972; MARRANO, 1997), podendo ainda, modificar as características de porosidade e permeabilidade da rocha (FARRAN e THENOZ, 1965; FRAZÃO, 1993). Com isso, a água pode atingir mais rapidamente os argilominerais

expansivos presentes nos poros ou fissuras, acelerando ainda mais os processos de desagregação (WOODRUFF, 1966). Portanto, características como espaçamento, natureza, persistência e abertura de descontinuidades, juntamente com as condições de tensão do maciço, são muito importantes para definir a influência do fraturamento na alterabilidade de material rochoso (PRICE, 1995).

Com relação à estrutura, esta pode constituir vias de alteração, principalmente quando verificadas estruturas macroscópicas visíveis, como estratificação, xistosidade, foliação e dobramentos (FERREIRA, 2000).

Quanto à textura, caracteriza o tamanho, a forma, a disposição e o arranjo dos componentes minerais. Afeta, principalmente, o comportamento da rocha frente às solicitações mecânicas. Maior será sua intervenção no processo de alteração, quanto maior a proporção predominante de certo mineral. Já a cimentação, este parâmetro tem alta interferência na porosidade, na permeabilidade e na resistência da rocha. Portanto, possui grande relevância na percolação de fluídos e na estabilidade de obras civis (CARNERO, 1994; FERREIRA, 2000).

Referente à presença de argilominerais, devido à sua grande relevância na alteração e alterabilidade de rochas, é apresentado na sequência um tópico específico sobre as características destes constituintes mineralógicos.

2.2.1.1 Características dos argilominerais no processo de alteração

Os argilominerais são filossilicatos que se apresentam quimicamente como silicatos hidratados, principalmente de alumínio ou magnésio, e com estruturas cristalinas em camadas. Devido a algumas diferenças relacionadas a estrutura, paragênese (processo formador) e cor, entre outros parâmetros, pode-se dividir os argilominerais em grupos (DEER et al., 1966). Destaca-se os grupos das canditas, ilitas, montmorilonitas e vermiculitas, cujas principais características estão resumidas no Quadro 2.2.

Característica	Canditas	Ilitas	Montmorilonitas (Esmectitas)	Vermiculitas
Argilominerais pertencentes ao grupo	Caulinita, dickita, nacrita, haloisita e meta-haloisita	Ilita, hidromicas, fengita, bremalita, glauconita e celadonita	Montmorilonita, nontronita, hectorita, saponita e sauconita	Vermiculita
Estrutura	1:1 Componentes tetraédricos e octaédricos (difórmica)	2:1 (trifórmica)	2:1 (trifórmica)	2:1 (trifórmica)
Ataque a ácidos	A caulinita é pouco solúvel em ácidos diluídos	Facilmente atacada	Atacada	Facilmente 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

Quadro 2.2 – Características básicas dos principais grupos de minerais argilosos (DEER et al., 1966).

As montmorilonitas são as mais expansivas, pois absorvem água e líquidos entre os estratos da estrutura, possuindo elevada capacidade de troca catiônica. Este grupo pertence a classe de argilas do tipo 2:1, formadas por duas camadas de tetraedros (T) e uma camada de octaedros (O). O espaço interlamelar pode apresentar água de hidratação e cátions de compensação, passíveis de troca iônica. Se há introdução de mais água ou de outros solventes neste espaço, então, devido à ligação química relativamente fraca entre as lamelas (Van der Waals), as camadas tenderão a expandir (CLARK et al., 1992).

Quando uma rocha é exposta ao ambiente exógeno, devido à expansão dos argilominerais pela variação de umidade e de pressões, ocorre o efeito da fadiga e enfraquecimento das ligações entre os minerais, seguido da ruptura da rocha ou abertura de fissuras já existentes (FARJALLAT et AL., 1972a). Ruiz (1963) mediu as forças de expansão de uma argila rica em nontronita e observou pressões de até 200 kgf/cm². Frazão (1981) também mediu estas pressões de expansão e obteve valores de 7,71 kgf/cm² para argilas predominantemente esmectíticas.

No Quadro 2.3 são apresentados os estágios de decomposição de rochas em função da porcentagem de argilominerais e no Quadro 2.4 alguns exemplos de patologias em obras de engenharia, quando verificados a presença destes minerais expansivos.

Porcentagem de minerais secundários (%)	Estágio de decomposição
Próximo de 100	Solo residual
Mais que 30	Muito decomposto
Entre 14 e 30	Decomposto
Menos que 15	Rocha sã

Quadro 2.3 – Porcentagem de minerais secundários e em relação ao estágio de decomposição (Weinert, 1968).

Tipo de patologia	Tipo de material geológico	Local	Referência
Desagregabilidade de enrocamentos e aterros	Basalto	Brasil (São Paulo)	Cruz e Nieble (1971); Farjallat (1972b); Farjallat et al. (1972); Maia et al. (2002)
Desagregabilidade de agregados utilizados como base e sub-base de rodovias	Basalto	Brasil; Estados Unidos; Brasil; África do Sul	Pichler (1942); Scott (1955); Schneider e Rocha (1968); Weinert (1968)
Desabamentos durante e após perfuração de túneis e galerias	Presença de argilomineral em rochas diversas	Noruega	Brekke (1965)
Rompimento do revestimento de concreto em paredes de túneis	Presença de argilomineral em rochas diversas	França	Thenoz et al. (1966)
Problemas de fundações com solos expansivos	Presença de argilomineral em solos	Estados Unidos	Chen (1975)

Quadro 2.4 – Exemplos de patologias em obras civis relacionadas a expansibilidade de argilominerais.

2.2.2 Fatores extrínsecos

A alteração ocorre pelo equilíbrio do material, inicialmente no interior da litosfera, quando exposto a uma nova condição na natureza, seja à atmosfera, à hidrosfera ou, principalmente, à biosfera. Os processos que causam estas modificações são conhecidos como

intemperismo, que atuam continuamente por meios de processos físicos e químicos (REICHE, 1943; FOOKES et al., 1988).

O intemperismo físico fragmenta a rocha em partículas de dimensões menores, sem alteração da natureza dos minerais. Já o intemperismo químico modifica a natureza dos componentes minerais, principalmente pela ação da água nas discontinuidades de um maciço, sendo muitas vezes intensificado por poluição atmosférica e por substâncias químicas depositadas pelo orvalho, chuva ou neblina (LOUGHNAN, 1969; CAROLL, 1970; ROCHA, 1971; FOOKES et al., 1988; PRICE, 1995).

Na maioria das vezes ocorrem simultaneamente ambos os processos, contudo o intemperismo físico ocorre geralmente próximo à superfície, enquanto que o químico pode prolongar-se a profundidades da ordem de dezenas ou centenas de metros (CHORLEY, 1969). Sendo assim, em pequena escala o intemperismo é função da porosidade (pouca profundidade) e em maior escala das discontinuidades presentes (grandes profundidades) (PRICE, 1995).

O clima é outro agente externo que interfere consideravelmente na alteração, envolve temperatura, umidade, regime de ventos, evapotranspiração e volume de chuvas, que por sua vez sofre interferência da topografia, correntes marítimas, altitudes e distribuição das águas (JENNY, 1941; LEINZ e AMARAL, 1969; AIRES-BARROS, 1971).

Com relação à variação de temperatura, esta pode provocar a desintegração física, pois os minerais apresentam diferentes coeficientes de dilatação (LEINZ e AMARAL, 1969) e, ainda, interferir na velocidade das reações químicas, que praticamente duplicam para cada 10°C de elevação na temperatura (CARROL, 1970). Segundo Carrol (1971), de acordo com as regiões climáticas e variação sazonal na temperatura, ocorrem diferentes intensidades nas reações químicas:

- Regiões úmidas e quentes (clima tropical): intenso intemperismo químico;
- Regiões áridas e quentes: falta água para reações químicas e, conseqüentemente, ocorre baixo intemperismo químico com favorecimento aos mecanismos de desintegração;
- Regiões úmidas e frias: *permafrost* (solo constituído por terra, gelo e rochas permanentemente congelados) e solo congelado. Retardam os processos de formação do solo e o movimento da água é impedido. Também há influência da variação do volume de água durante o congelamento, intensificando a

alteração física pela expansão da água presente em descontinuidades de um maciço rochoso;

- Regiões secas e frias: a desintegração física é máxima e o intemperismo químico é nulo ou muito baixo.

De maneira geral, as principais consequências da alteração de origem intempérica são (LEINZ e AMARAL, 1969; FOOKES et al., 1988; LEE e PARSONS, 1999; PRICE, 1995):

a) Intemperismo físico

- Enfraquecimento e fragmentação da rocha pela variação de temperatura e de umidade (contração/expansão);
- Aumento das fraturas ou de fragmentação pelas pressões causadas por congelamento de água (a água sofre expansão de até 9% em seu volume), Tabela 2.1;
- Cristalização de sais: o crescimento de cristais de sal no interior dos poros causa tensões de tração e, conseqüentemente, a desagregação da rocha, Tabela 2.1. As principais fontes de sais são a poluição atmosférica (fonte de sulfatos e nitratos), transportados pelo vento do mar ou do deserto, degelo, materiais de limpeza inadequados, materiais de construção incompatíveis e contato com fertilizantes ou com a própria estocagem de sal (HYPOLITO e VALARELLI, 1972; DOEHNE e PRICE, 2010);
- Surgimento de fraturas ao expor rochas que se encontravam a grandes profundidades, efeito do alívio de pressão (juntas de alívio);
- Quebra da rocha pelo crescimento de raízes em fissuras (intemperismo físico-biológico);
- Hidrólise de minerais ferrosos (físico-químico), por aumentar de volume propicia a abertura de fissuras e penetração de fluídos em maciços rochosos (HYPOLITO e VALARELLI, 1972).

b) Intemperismo químico

- Minerais secundários neoformados: resultante da recristalização dos minerais da rocha;
- Minerais secundários transformados: ocorre a modificação química nos minerais da rocha, mas com preservação de sua estrutura (parcial ou total).

Tabela 2.1 – Forças típicas exercidas por processos de intemperismo físico (OLLIER, 1975).

Processo	Pressão exercida (MPa)
Congelamento (máximo a -20°C)	200
Cristalização de sais	2 – 20
Hidratação de sais	100

Especificamente sobre o grau de influência da evolução do intemperismo nas propriedades físico-mecânicas, Iliev (1966) elaborou uma hierarquia em três grupos: propriedades fortemente variáveis (aumento ou redução superior a duas vezes), moderadamente variáveis (aumento ou redução inferior a duas vezes) e fracamente variáveis (praticamente não influenciado pelo intemperismo). Os parâmetros de cada categoria estão listados no Quadro 2.5.

Variação Forte	Variação Moderada	Variação Fraca
Volume dos poros Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas Módulo de elasticidade Módulo de deformação Tensão máxima de ruptura	Massa específica aparente Coeficiente de Poisson	Massa específica dos grãos

Quadro 2.5 – Classificação das propriedades físico-mecânicas das rochas de acordo com o grau de influência dos processos intempéricos (ILIEV, 1966).

Na literatura há métodos que permitem definir o tipo de intemperismo através do conteúdo de água nas reações. Weinert (1984) quantifica a influência dos fatores climáticos

por um índice climático N , definido em função da taxa de evaporação do mês mais quente do ano (E_j) e da precipitação anual total (P_a), conforme pode ser visto na Equação 2.1. Para $N > 5$ o intemperismo é físico e para $N < 5$ o intemperismo é químico.

$$N = 12 \frac{E_j}{P_a} \quad 2.1$$

Graficamente o tipo de intemperismo pode ser obtido correlacionando a precipitação média anual com a temperatura média anual, Figura 2.2 (PELTIER, 1950). Neste gráfico pode-se observar que temperatura é de grande importância para definir o tipo de intemperismo. Por exemplo, considerando uma precipitação anual de 500 mm, maior será a alteração química, quanto maior for a temperatura. Por outro lado, quando menor a temperatura, maior a ocorrência de alteração física (força de tração na rocha ocasionada pela expansão da água durante congelamento, por exemplo).

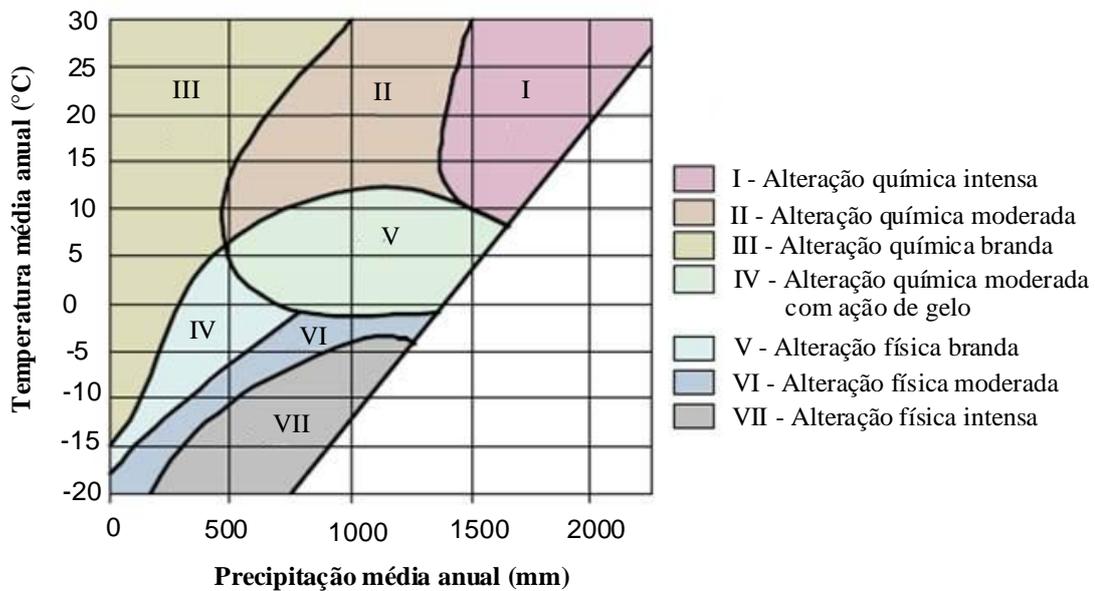


Figura 2.2 – Correlação entre o regime de precipitação e a temperatura anual (modificado de PELTIER, 1950).

2.2.2.1 A água no intemperismo químico

Segundo Loughnan (1969), no intemperismo químico ocorrem três processos simultâneos: a quebra da estrutura mineral com liberação de íons ou moléculas; a remoção em

solução de alguns constituintes liberados e a reconstituição do resíduo com componentes da atmosfera (água, oxigênio, gás carbônico, etc) para a formação de novos minerais em equilíbrio com o ambiente.

Os processos de decomposição química podem ser classificados de acordo com a natureza da reação entre a rocha e as soluções aquosas (LEINZ e AMARAL, 1969; CARNERO, 1994; FERREIRA, 2000; MAIA, 2001; MAIA et al., 2002):

- Hidratação: incorporação de moléculas de água na estrutura cristalina do mineral, com considerável variação de volume;
- Hidrólise: decomposição de um mineral pela água, originando um ácido ou uma base, devido à reação química entre os íons H^+ e OH^- da água e os íons do mineral;
- Dissolução: consiste no mecanismo de dispersão de íons dos minerais constituintes da rocha numa solução aquosa, sendo função da solubilidade do mineral e das características físicas e químicas do meio aquoso;
- Oxidação: processo de decomposição química que envolve a perda de elétrons (ferro, nitrogênio, fósforo e manganês, principalmente) que ao combinarem com o oxigênio presente na água, oxidam-se formando produtos como óxidos e hidróxidos, elementos de fácil lixiviação. Em outras palavras, o ferro bivalente (Fe^{2+}) contido na rocha passa para a forma trivalente (Fe^{3+}), modificando a estrutura cristalina dos minerais ricos em ferro;
- Redução: Reação contrária à oxidação, em que o oxigênio é liberado de seus compostos, dando origem a óxidos ferrosos hidratados. Ocorre abaixo do nível de água;
- Carbonatação: reação dos íons CO_3^{2-} ou HCO_3^- com os minerais da rocha. Há produção de carbonatos que são facilmente lixiviados. A intensidade é maior se houver presença de gás carbônico, pois os íons de H^+ reagem com os íons de CO_3^{2-} do calcário, formando o bicarbonato de cálcio ($Ca(HCO_3)_2$) que é levado em solução (dissolução dos carbonatos);
- Complexação: reação em que ocorre uma forte ligação entre um íon, normalmente um metal, e a estrutura anelar do composto químico dos agentes da complexação (matéria orgânica e húmus, principalmente).

A intemperização química é causada principalmente pela água da chuva que infiltra na rocha, mas também pelo contato com águas subterrâneas (regiões submersas) ou com águas salinas e orgânicas (CARROLL, 1970). O Quadro 2.6 apresenta as principais funções da ação da água dentro das zonas de intemperismo.

Função física	Função química
Transporte	Solvente
Potencial gravitacional e de evapotranspiração (macro escala);	Alta capacidade de dissolver sólidos.
Forças capilares (micro escala).	Componente necessário para reações
Meio de reação	Hidratação/desidratação;
Interface sólido/líquido, por exemplo.	Ácido/base;
Pressões parciais	Solução/precipitação;
Relação com potencial químico.	Troca de íons.
Contribuição na desintegração física	Constituinte principal dos produtos de alteração
Gelo/degelo, por exemplo.	Hidróxidos;
	Argilas;
	Substâncias amorfas.
	Tamponante químico

Quadro 2.6 – Função da água nas zonas de intemperismo (MARTINI e CHESWORTH, 1992).

Geralmente, o ambiente em que ocorre a intemperização é oxidante, com um potencial de oxidação (Eh) de +600 mV e pH variando de 4 a 10 (CARROLL, 1970). Na maioria das situações, a água disponível para reação tem pH entre 3 e 9, ou seja, de ácida a moderadamente alcalina (MARRANO, 1997). Contudo, a acidez da água pode ser intensificada ao interagir com o CO_2 da atmosfera ($H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$); pela presença de raízes, dejetos de animais ou de microorganismos (intemperismo biofísico); e por ação antrópicas, como atividades agrícolas, urbano-industriais e energético-mineradora (intemperismo bioquímico) (LEE e PARSONS, 1999; SMITH, 1999; CHEN et al., 2000; FRITZSONS et al., 2009). Especificamente sobre a decomposição pelo ácido carbônico, embora um ácido bastante fraco, este é um dos componentes mais importantes no intemperismo químico, pois age sobre os feldspatos, o mineral mais abundante da crosta terrestre. Destaca-se também, os ácidos húmicos, orgânicos (metabolismo de microorganismos) e sulfúricos (decomposição de sulfetos), entre outros (LEINZ e AMARAL, 1969; CARROL, 1970).

Em maciços rochosos as reações químicas irão depender da quantidade e da facilidade de acesso da água e do ar ao entrar em contato com a rocha; da reatividade e solubilidade do material rochoso; do intervalo de tempo em que se processa a circulação da água; e do meio

em que se encontra o maciço, em especial da alimentação de água e da composição desta (agressividade), conforme já mencionado (FARRAN e THENOZ, 1965).

No que se refere à solubilidade dos minerais, uma ordem comum é: $Ca > Na > Mg > K > Si > Al > Fe$. No entanto, o grau de solubilidade pode variar dependendo do valor de pH . Assim, o Fe é de cerca de 100 mil vezes mais solúvel em pH 6 do que em pH 8.5 (PRICE, 1995).

Com relação à importância do pH no intemperismo, dá-se pelas reações de hidratação e liberação de íons. Por sua vez, estes íons combinam-se com os íons OH^- e H^+ da solução, sendo que, quanto maior a quantidade de íons liberados, menor ou maior será o valor do pH (MALOMO, 1980).

Neste contexto, o pH pode ser utilizado como índice de intemperismo. Para tanto, faz-se uso da técnica do pH de abrasão, que é a mistura de água, geralmente destilada, com minerais moídos (GRANT, 1963, 1964 e 1969; MALOMO, 1980) ou rocha pulverizada menor que 0,063mm (GOMES, 2001). Segundo Grant (1969), o valor de pH de abrasão de uma rocha alterada é uma função do tipo e da quantidade de argilomineral e do tipo e quantidade de minerais primários, podendo ser expresso pela Equação 2.2.

$$pH \text{ de abrasão} = f \left(\frac{Na + K + Ca + Mg}{\text{Argilomineral}} \right) \quad 2.2$$

Quando o pH de abrasão apresenta valores altos, pode-se associar o resultado a presença de argilominerais, que adsorvem parte dos íons básicos aumentando a concentração de OH^- (GRANT, 1969). Pode-se dizer ainda, que a tendência alcalina é encontrada em ambientes secos com déficit de água, por causa do alto potencial de evapotranspiração (MARTINI e CHESWORTH, 1992).

Em contrapartida, quando os valores são baixos, deve-se a presença de minerais metálicos, principalmente os sulfetos, cujas reações de oxidação produzem sulfatos, óxidos e íons de H^+ , acarretando na acidez da solução (GOMES, 2001).

A Figura 2.3 mostra uma distribuição idealizada de pH de abrasão em granitos, abaixo dos horizontes A e B de solo. O diagrama mostra que o pH de abrasão diminui com o aumento da ação intempérica. Os contornos de pH igual a 5 podem ser considerados paralelos às juntas, ao longo das quais ocorrem as primeiras soluções intempéricas que penetram na rocha. Com relação ao grau de alteração, as áreas com pH de abrasão de 5 a 6 são fáceis de

desintegrar na mão; pH entre 6 e 7.5 são quebradas na mão com dificuldade; e acima de 7,5 o uso de um martelo é essencial (GRANT, 1969).

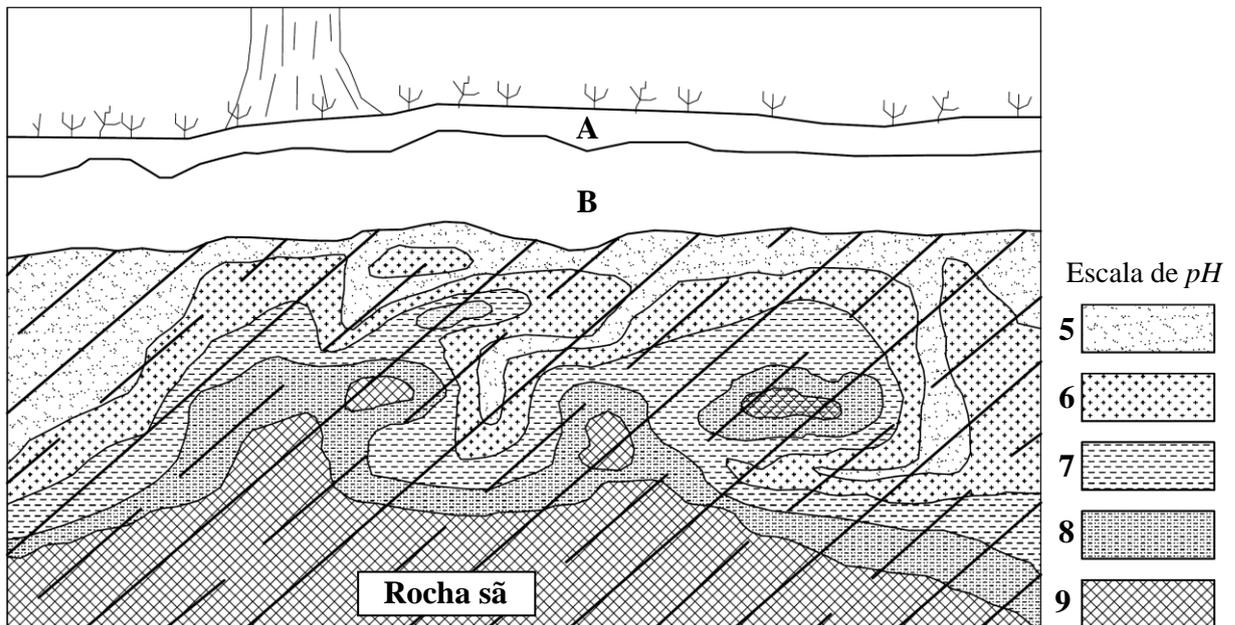


Figura 2.3 – Idealização da relação entre pH abrasivo e ambiente intempérico em saprólitos de alteração de granitos para regiões tropicais e subtropicais úmidas (GRANT, 1969).

Ainda com relação ao pH , deve-se verificar as condições de rochas reduzidas artificialmente para uso como material de construção ou em ensaios laboratoriais. Segundo Farjallat (1972), quando se brita uma rocha, as ligações interatômicas são quebradas ao nível da superfície de ruptura. Nos silicatos, principais constituintes, obtêm-se superficialmente íons positivos (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , etc) e íons negativos (O^{2-}). Em presença de água os cátions fixam OH^- e os íons de O^{2-} fixam H^+ , assim, as superfícies tornam-se cada vez mais ácidas, devendo ser considerado na interpretação de análises químicas.

Outro parâmetro que pode quantificar a ação do intemperismo através da água é a condutividade elétrica (capacidade de uma solução conduzir corrente elétrica), que representa a dissolução de íons na solução, refletindo a geologia e o estágio de alteração da rocha (ROFFMAN, 1971; SHALKOWSK et al., 2009). Sendo assim, considerando que a lixiviação

aumenta a concentração de íons, maior será a condutividade de abrasão¹ e maior será o grau de alteração (GOMES, 2001).

Com intuito de relacionar a condutividade de abrasão com outros parâmetros, Gomes (2001) fez várias correlações com outros métodos utilizados na caracterização de processos de alteração. Conforme pode ser visto na Tabela 2.2, a condutividade possui boa correlação com os parâmetros físicos.

Tabela 2.2 – Correlação entre condutividade de abrasão e parâmetros da rocha basáltica (GOMES, 2001).

Parâmetros correlacionados	Tipo de correlação	Coefficiente de correlação R ²
Porosidade aparente (η_a)	Linear crescente	0,99
Absorção d'água (α_a)	Linear crescente	0,99
Massa específica aparente seca (ρ'_d)	Linear decrescente	0,97
Massa específica aparente saturada (ρ'_{sat})	Linear decrescente	0,96
Índice de alteração da esmectita	Linear crescente	0,98
Perda de massa por imersão em etileno glicol	Linear crescente	0,62

Shalkowski et al. (2009) desenvolveram análises semelhantes, com intuito de desenvolver um gráfico de alteração com base em análises químicas de condutividade elétrica (intemperismo químico), que mede a taxa de dissolução de íons, e análises de velocidade de ondas *P* (intemperismo físico). O gráfico apresenta-se na Figura 2.4, onde *I* representa a rocha sã e *VI* refere-se a um solo. Os autores utilizaram a classificação de alteração da norma britânica BSI (1981).

¹ Condutividade de abrasão: condutividade elétrica medida em uma solução composta de rocha pulverizada e água destilada, geralmente.

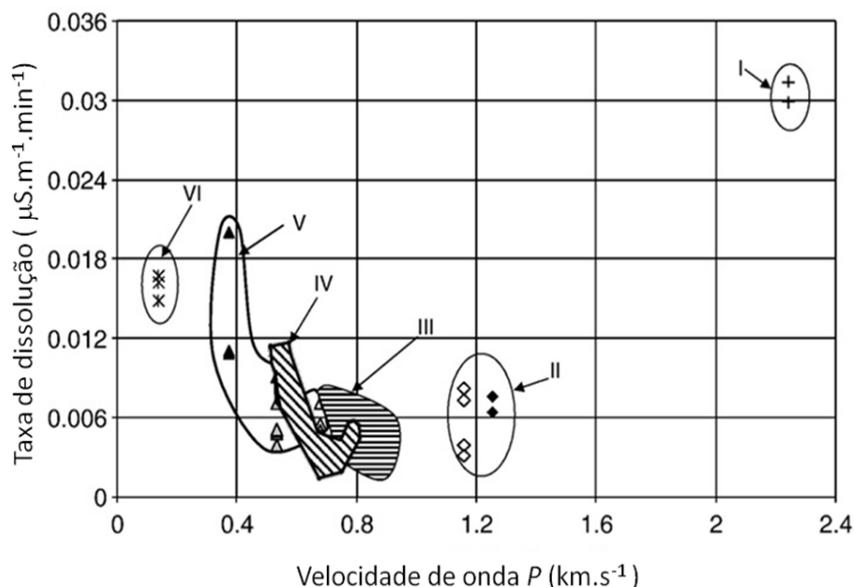


Figura 2.4 – Relação entre taxa de dissolução e velocidade de onda P , aplicada em granitos (SHALKOWSKI et al., 2009).

2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE ALTERAÇÃO E DE ALTERABILIDADE

Com o objetivo de oferecer resultados próximos da realidade de campo, diversos autores desenvolveram procedimentos para determinar o estado de alteração ou a velocidade de alteração (alterabilidade) de materiais rochosos. Segundo Frazão (1993), a extensa diversidade bibliográfica resultou na dificuldade em escolher o melhor método para cada condição de uma obra geotécnica específica. De acordo com o autor, a decisão sobre um ou outro método deve levar em consideração, principalmente, o procedimento de cálculo da variação da resistência e escolha do parâmetro de análise; a influência da granulometria; as correlações entre resultados obtidos em ensaios de laboratório com a alteração em campo; e a validade e aplicabilidade do estudo, ou seja, o significado físico dos ensaios de alteração.

Alguns dos principais métodos existentes para esta finalidade estão apresentados nos próximos itens.

2.3.1 Alteração

De maneira geral, a alteração de uma rocha pode ser analisada qualitativamente e quantitativamente. Na primeira situação é possível comparar diferentes materiais através de exame visual e registro do tipo de alteração (desintegração, rachadura, fissuração ou lasqueamento). Já as avaliações quantitativas fornecem respostas estruturadas em números, geralmente por técnicas destrutivas (FRAZÃO, 1993).

Em análises qualitativas o grau de alteração é comumente definido por meio de classes de alteração, em função de uma avaliação macroscópica das características petrográficas da rocha como cor, brilho dos minerais, película de alteração, bordas de reação, porosidade e crostas (GUIDICINI e NIEBLE, 1976). De maneira a padronizar estas avaliações podem ser encontradas diversas classificações (GUIDICINI et al., 1972; HOEK e BRAY, 1977; ITAIPU, 1977; OLANA et al., 2010), destaca-se as apresentadas no Quadro 2.7 e no Quadro 2.8, pois são as mais utilizadas no meio técnico e acadêmico.

Grau	Denominações	Características da rocha
A1	Rocha sã ou praticamente sã.	Minerais primários sem vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso a rocha é ligeiramente descolorida.
A2	Rocha medianamente alterada.	Apresentam minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3	Rocha muito alterada.	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4	Rocha extremamente alterada.	Apresentam minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, graduando para cores de solo.

Quadro 2.7 – Classes de alteração, segundo IPT (1984).

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.

Quadro 2.8 – Classes de alteração, segundo ISRM (1981).

A4	Rocha muito alterada.	Mais da metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. Rocha sã ou descolorida está presente como arcação 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.

Quadro 2.8 (continuação) – Classes de alteração, segundo ISRM (1981).

Segundo Aires-Barros (1971), através de análises petrográficas microscópicas, pode-se qualificar e quantificar os minerais sãos e os alterados de uma rocha, além de se avaliar o estado microfissural e determinar-se o teor de minerais secundários. A partir destas informações, o autor estabeleceu um índice micropetrográfico de alteração (I_p), conforme Equação 2.3. Nesta equação, quanto menor o valor de I_p , maior será o grau de alteração.

$$I_p = \frac{\% \text{ minerais sãos}}{\% \text{ minerais alterados} + \% \text{ minerais secundários} + \% \text{ vazios}} \quad 2.3$$

Outra forma de se obter resultados bastante objetivos é através de índices de qualidade frequentemente aplicados na mensuração específica das propriedades da rocha. Iliev (1966) sugere a utilização de índice de alteração I_i (Equação 2.4), sendo que o valor de i refere-se à velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (ν_p) e os subscritos 0 e f , referem-se aos estados iniciais e finais de alteração, respectivamente. Sendo assim, o valor de I_i pode variar de 0 a 1, quando $i_0 = i_f$ a rocha não apresenta alteração ($I_i \cong 0$) e quando $i_f = 0$ a rocha encontra-se completamente alterada ($I_i = 1$).

$$I_i = \frac{i_0 - i_f}{i_0} \quad 2.4$$

Ladeira e Minette (1984a, 1984b e 1984c), também utilizaram a Equação 2.4 para determinar o grau de alteração, neste caso, i assumiu parâmetros físicos, como porosidade aparente (η_a), absorção-d'água (α_a), densidade aparente seca (ρ'_d); perda de massa (m); e parâmetros geomecânicos, como módulo de elasticidade (E), resistência à compressão (σ_c) e resistência ao cisalhamento (τ_f). A mesma equação também foi usada por Maia et al. (2003) para avaliar o estado de alteração de amostras de basalto com 25 anos de alteração em campo (amostras extraídas *in situ* da barragem de enrocamento da barragem de Marimbondo). Os autores utilizaram o índice de compressão pontual ($I_{S(50)}$) e de resistência ao fraturamento

(Q_a), Equação 2.5. Este último, resumidamente, é obtido pelo método de Marsal (1969) em que três fragmentos de rocha são submetidos a um carregamento vertical constante (P) até a ruptura por meio de duas placas de aço. Na equação, N_c representa o menor número de contatos dos fragmentos com a placa superior ou inferior.

$$Q_a = \frac{P}{N_c} \quad 2.5$$

Angeli et al. (2006) definiu o índice de alteração (AI , *alteration index*) em função da desagregação causada pela cristalização de sais. O índice AI equivale ao número de ciclos (imersão em sulfeto de sódio) imediatamente anterior ao início da desagregação. Os autores consideram a seguinte classificação: para $AI \geq 19$ o índice de alteração é alto; moderado para $10 < AI < 19$; e baixo para $AI \leq 10$.

Outra forma de se determinar o estado de alteração pode ser por meio de índices que envolvem a composição química da rocha (Quadro 2.9).

Índice	Fórmula (proporção molecular de óxidos)	Referência
WPI	$\frac{[100 \times \text{mols}(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O})]}{[\text{mols}(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O})]}$	Reiche (1943)
WI	$100[(\text{Na})_a/0.35 + (\text{Mg})_a/0.9 + (\text{K})_a/0.25 + (\text{Ca})_a/0.7];$ onde X_a é a proporção atômica do elemento X.	Parker (1970)
CIA	$100 * \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$	Nesbitt e Young (1982)
CIW	$100 * \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$	Harnois (1988)
PIA	$100 * (\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O})$	Fedo et al. 1995
$TCWI$	$(CWPI + CLI) / 2$ onde $CLI = 100(A_{mob} - B_{mob}) / A_{mob}$ $CWPI = 100(B_{immob} - C_{immob}) / C_{immob}$	Ceryan (2008)

Legenda

- WPI : Índice potencial de alteração (*Weathering Potential Index*)
 WI : Índice de alteração química (*Index of weathering*)
 CIA : Índice químico de alteração (*Chemical Index of alteration*)
 CIW : Índice químico de alteração (*Chemical Index of Weathering*)
 PIA : Índice de alteração do plagioclásio (*Plagioclase Index of Alteration*)
 $TCWI$: Índice total de alteração química (*Total Chemical Weathering Index*)
 $CWPI$: Índice total de alteração química (*Total Chemical Weathering Index*)
 CLI : Índice de lixiviação química (*Chemical 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

Quadro 2.9 – Índices químicos de alteração.

Pelo exposto, observa-se que as classificações qualitativas são de grande importância para identificar previamente o estado de alteração da rocha. Contudo, a classificação escolhida deve fornecer informações suficientes para diferenciar os materiais existentes de forma rápida e prática, já que possui caráter inicial num estudo de alteração.

Após esta classificação, a escolha do método de quantificação da alteração deve ser de acordo com os equipamentos disponíveis e o parâmetro de interesse (mecânico, físico, químico ou mineralógico). Deve-se levar em consideração também, que quando se deseja obter o grau de alteração através de índices mecânicos ou físicos, por exemplo, obrigatoriamente deve-se dispor de amostras inalteradas (rocha sã) para confiabilidade do valor fornecido, uma vez que se utiliza o parâmetro inicial de alteração no cálculo (caso apresentado pela Equação 2.4). Já para os índices de alteração mineralógica, a análise em uma amostra sã seria interessante para verificação dos resultados, uma vez que a alteração é medida pelo teor de elementos químicos alterados.

Com relação aos parâmetros geotécnicos, sem necessariamente a apresentação do grau de alteração, são apresentados alguns valores de referência para rocha basáltica, Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Valores de parâmetros geotécnicos de rocha basáltica.

Descrição	Presença de argilominerais	ρ_d (g/cm ³)	α_a (%)	η_a (%)	σ_c (MPa)	$I_{S(50)}$ (MPa)	I_M (%)	Local	Referência
Denso cinza escuro a esverdeado	Espaços intergranulares	2,7	1,28	3,65	215,7	-	0,1	Brasil (São Paulo)	Frazão (1993)
Denso marrom avermelhado	Preenchendo microamígdalas	2,8	2,5	6,9	117,2	-	1,0	Brasil (São Paulo)	Frazão (1993)
Micro-amigdaloidal	Preenchendo microamígdalas	2,7	3,3	8,9	147,0	-	26,5	Brasil (São Paulo)	Frazão (1993)
Denso cinza escuro	Preenchendo microamígdalas	2,9	0,5	1,5	-	-	0,4	Brasil (São Paulo)	Guzzi (1995)
Denso cinza a castanho avermelhado	Preenchendo microamígdalas	2,7	3,2	8,2	-	-	0,6	Brasil (São Paulo)	Guzzi (1995)
Vesicular amigdaloidal	-	2,5	3,9	9,6	53,0	-	-	Brasil (São Paulo/Paraná)	Marrano (1997)
Brecha aglomerática	-	2,1	11,7	24,1	-	-	95,4	Brasil (São Paulo/Paraná)	Marrano (1997)
Denso cinza escuro	Disseminado na matriz	2,4	7,4	17,9	43,7	-	-	Brasil (São Paulo/Paraná)	Marrano (1997)

Tabela 2.3 (continuação) – Valores de parâmetros geotécnicos de rocha basáltica.

Descrição	Presença de argilominerais	ρ_d (g/cm ³)	α_a (%)	η_a (%)	σ_c (MPa)	$I_{S(50)}$ (MPa)	I_M (%)	Local	Referência
Denso cinza escuro	Esmeclita - alteração de clinopiroxênios	2,9	0,4	1,1	190,7	-	3,3	Brasil (São Paulo)	Gomes (2001)
Basalto Vesicular	Esmeclita - alteração de clinopiroxênios	2,2	7,8	17,3	60	-	12,9	Brasil (São Paulo)	Gomes (2001)
Denso cinza escuro	--	2,91	0,23	0,68	198,83	11,6	-	Brasil (São Paulo)	Freitas Neto et al. (2006)
Denso cinza escuro	Produto de alteração	-	1,25	-	237,8	8,98	-	Brasil (São Paulo/ Minas Gerais)	Maia (2001)
Denso cinza escuro são	-	2,81	-	0,32	-	5,6	-	Nova Zelândia	Moon e Jayawardane (2004)
Denso cinza escuro levemente alterado	-	2,12	-	7,96	-	0,41	-	Nova Zelândia	Moon e Jayawardane (2004)
Denso escuro	-	2,56	3,53	6,35	40,64	-	-	Turquia	Gurocak e Kilic (2005)
Denso são	-	2,96	-	0,11	172,6	15,15	-	India	Gupta e Rao (1998)
Denso levemente alterado	-	2,59	-	1,97	93,2	6,23	-	India	Gupta e Rao (1998)
Geral	-	2,50 a 2,85	-	-	38,3 a 173,7	0,54 a 6,79	-	India	Birid (2006)
Brecha vulcânica	-	2,29 a 2,51	-	-	1,8 a 94,6	0,33 a 3,44	-	India	Birid (2006)

Legenda ρ_d : Densidade aparente seca (kg/m³) η_a : Porosidade aparente (%) α_a : Absorção-d'água (%) σ_c : Resistência à compressão uniaxial (MPa) $I_{S(50)}$: Índice de compressão pontual (MPa) I_M : índice de perda de massa por ciclagem água/estufa (%)**2.3.2 Alterabilidade**

Para avaliar a suscetibilidade a alteração pode ser utilizadas técnicas simples como a do registro quantitativo da perda de massa ao longo do tempo. São exemplos os ensaios de alteração natural (submete a rocha aos agentes intempéricos locais) e ensaios de alteração acelerada em laboratório, como ciclos de imersão em água, etilenoglicol, glicerol, água

oxigenada ou sulfato de sódio e de secagem em estufa; lixiviação contínua com extrator Soxlet; congelamento e degelo; alternância de aquecimento e resfriamento a seco; e ataque ao ácido sulfúrico, entre outros. Nacionalmente, para análise de agregados são comuns os ensaios padronizados de ciclagem acelerada com água-estufa (NBR 12696/92), ciclagem acelerada com etileno glicol (NBR 12697/92) e ciclagem natural (NBR 12695/92).

As análises acima podem ainda alertar para a presença de minerais expansivos, pois as variações volumétricas sofridas na presença de água, dependendo da quantidade e distribuição do tipo de argilomineral, são determinantes no modo de ocorrência e intensidade da alteração (NBR 12967, 1992).

A alterabilidade também pode ser definida equacionalmente, como é o caso do exposto em Aires-Barros (1971). Segundo o autor, conforme já mencionado em capítulos anteriores, a intensidade de ocorrência dos processos de alteração (m) vai depender de fatores intrínsecos (i) e fatores extrínsecos (e). Ao incluir o fator tempo no período de exposição aos agentes modificadores, então, a alterabilidade (a) pode ser expressa pela Equação 2.6. Esta equação considera a taxa de variação do grau de alteração (Δm) em um dado intervalo de tempo (Δt).

$$m = f(i, e) \Rightarrow m = f(i, e, t)$$

$$\Rightarrow a = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad 2.6$$

A mesma filosofia é utilizada por Struillou (1969), Delgado Rodrigues (1977) e Ladeira e Minette (1984a), contudo o termo Δm é substituído por Δi , que é a variação sofrida pelo parâmetro i no intervalo de tempo Δt , Equação 2.7.

$$a = \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad 2.7$$

Estes mesmos conceitos são abordados por Ladeira e Minette (1984a, 1984b e 1984c) que quantificaram a alterabilidade através de curvas de variação da alteração com o tempo, por meio de índices de alteração (Figura 2.5). Para obtenção desta curva, os autores sugerem determinar o índice de alteração (I_a), por exemplo o índice de resistência à compressão (I_R), para três diferentes estágios de alteração inicial (A, B e C, sendo A a rocha mais sã) e submetê-los a ciclagem natural ou acelerada (A', B' e C'). Quanto a velocidade de alteração, esta é obtida pela Equação 2.8, onde V_{NW} é a velocidade de alteração natural e Δ_{TW} é a

variação do índice de alteração. A mesma curva pode ser elaborada a partir de índices físicos, químicos, geomecânicos, dinâmicos e mineralógicos.

$$V_{NW} = \frac{\Delta I_w}{\Delta t} \tag{2.8}$$

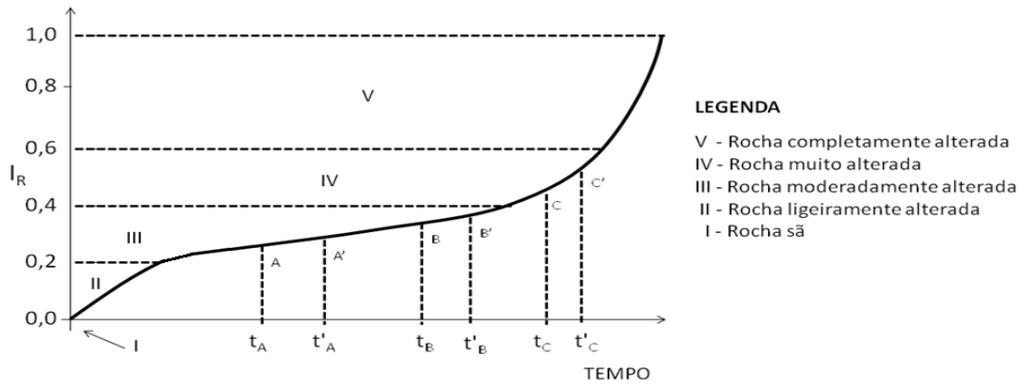


Figura 2.5 - Variação de alteração ao longo do tempo para o índice de resistência de uma rocha ácida ($\text{SiO}_2 > 66\%$) e classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração (LADEIRA e MINETTE, 1984a).

Outras formas de avaliação podem ser desenvolvidas em termos da variação de parâmetros específicos da rocha ao longo do tempo. O Quadro 2.10 apresenta alguns exemplos de aplicação.

Parâmetro de análise	Método de avaliação	Referência
Variação do grau de alteração no tempo: absorção rápida	$a = \frac{\Delta \alpha}{\Delta t} \rightarrow \alpha = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100$	a: alterabilidade α: absorção m ₀ : massa saturada m ₁ : massa seca Hamrol (1961)
Variação do grau de alteração no tempo: abertura de diaclases	$a = \frac{\Delta i}{\Delta t}$ $\rightarrow i = (\omega_x + \omega_y + \omega_z) \times 100$	ω: dimensões lineares das aberturas de diaclases nos três eixos ortogonais (pode-se individualizar com e sem preenchimento) Hamrol (1961)
Índice de qualidade micropetrográfico (K)	$k = \frac{\sum_{i=1}^n p_i x_i}{\sum_{j=1}^m p_j x_j}$	n: valores de Xi minerais são; m: valores de Yi minerais alterados; p _i e p _j : coeficientes (pesos) que avaliam os efeitos da mineralogia e das fissuras nas propriedades mecânicas da rocha. Mendes et al. (1966)

Quadro 2.10 – Métodos de avaliação da alterabilidade de rochas.

Índice de módulo de finura (m) em relação ao meio de exposição	$m = \frac{100 \cdot (M_3 - M_2)}{M_0}$ $C_1 = (m - 5) \cdot \eta \cdot \frac{1}{d} \Rightarrow \text{Meio orgânico e biológico}$ $C_2 = (m - 5) \cdot \eta \cdot \frac{1}{d} \cdot 2^{(pH-9)} \Rightarrow pH > 9$ $C_3 = (m - 5) \cdot \eta \cdot Fe \cdot \frac{1}{d} \Rightarrow pH < 7$	M_0 : módulo de finura <i>in situ</i> M_3 : módulo de finura após ensaio com britador a 450°C M_2 : módulo de finura após ensaio com britador a 700°C η : porosidade d : diâmetro equivalente do agregado Fe : teor em ferro não incluído nos retículos cristalinos nos ferromagnesianos (%) $m < 5$: rocha insensível à dissolução	Struillou (1969)
Lixiviação contínua (alteração) e Abrasão Los Angeles	$K(\Delta t) = \frac{(200 - I) - (200 - F)}{(200 - I)}$	$K(\Delta t)$: coeficiente de alterabilidade I : Abrasão Los Angeles no início de Δt , mais % desagregada F : Abrasão Los Angeles no final de Δt , mais % desagregada	Farjallat (1971a)
Resistência mecânica	$k = \frac{\Delta R}{R_i} \rightarrow \Delta R = \frac{R_i - R_f}{R_i}$	ΔR : queda percentual da resistência mecânica R_i : resistência mecânica inicial R_f : resistência mecânica final	Yoshida (1972)
Percolação contínua à quente (80°C) em rocha moída	A alterabilidade relaciona-se com a perda de massa em certo intervalo de tempo		Rocha (1971)

Quadro 2.10 (continuação) – Métodos de avaliação da alterabilidade de rochas.

Guzzi (1995) complementa ainda, que a quantificação da alterabilidade permite determinar o tempo de ruína da obra. Segundo a autora, o tempo de ruína (t_r) pode ser estimado em função dos estados de alteração inicial (i_0), do estado de ruína (i_r) e da alterabilidade (a), Equação 2.9. Analisando esta equação, o tempo de ruína é inversamente proporcional a alterabilidade do material, ou seja, quanto mais alterável, mais rápida será a ruína da obra.

$$t_r = \frac{i_0 - i_r}{a} \quad 2.9$$

Em termos de classificação de alterabilidade, Weinert (1968) relaciona o clima da região e o conteúdo de minerais secundários da rocha, com base em trinta tipos diferentes de rocha utilizadas em pavimentação na África do Sul (Figura 2.6). Neste gráfico podem-se identificar os materiais inapropriados para uso em base e sub-bases de rodovias, os valores recomendados são os localizados acima das curvas estabelecidas. Para analisar o clima, o autor utiliza o fator climático N , definido em função da taxa de evaporação do mês mais

quente do ano (E_j) e da precipitação anual total (P_a), conforme pode ser visto na Equação 2.10.

$$N = 12 \frac{E_j}{P_a} \quad 2.10$$

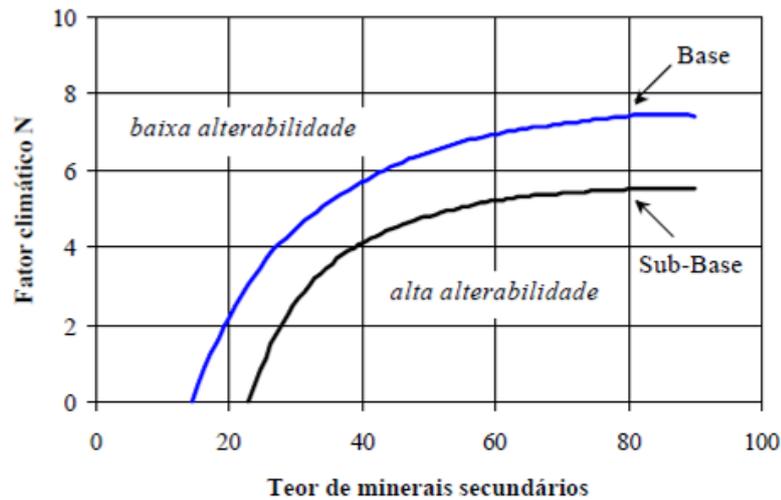


Figura 2.6 – Alterabilidade de materiais rochosos, África do Sul (Weinert, 1968).

Guzzi (1995) considera uma velocidade de alteração média limite de 0,095 Irt /ano para basaltos com finalidade de agregados para concreto e pavimentação, sendo Irt o índice de resistência ao impacto Treton, obtido em laboratório por métodos como o apresentado em DNER-ME 399/99. Acrescenta-se ainda, que quando o maciço destina-se à construção de obras de engenharia, recomenda-se a utilização de várias velocidades ou uma velocidade máxima de alteração para obtenção de valores mais confiáveis.

O ensaio de percolação contínua abordado em Rocha (1971) também permite classificar a alterabilidade, contudo é altamente dependente do tipo de rocha. Por exemplo, um dolerito com granulometria de 2 mm, pode ser considerado facilmente alterável quando obtido 5% de perda de massa em 1500h de ensaio.

Uma abordagem qualitativa foi desenvolvida por Farran e Thenoz (1965), com base na observação de rochas graníticas (Tabela 2.4). Os autores observaram que em locais onde não há circulação de água (permeabilidade ao ar menor que 0,1 milli-Darcy – 1 Darcy equivale a $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$), a alteração é mínima, mesmo onde a área global das microfissuras é alta e a rocha

é reativa. Marrano (1997) desenvolveu um estudo semelhante para basaltos e obteve os resultados apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Alterabilidade e relação a percolação de fluidos em granítos (FARRAN e THENOZ, 1965).

Local	Permeabilidade ao ar (mdy)	Porosidade relativa (%)	Área global das microfissuras (cm ² /cm ³)	Alterabilidade da rocha
Vale Sioule	1,30	4,3	3000	Apreciável
Lago Tazenat	0,14	2,3	7800	Baixa
Usina Montpezat	0,12	2,8	14000	Forte
Barragem Saint-Cassien	0,20	5,0	25000	Muito forte
Galeria Luzières	0,58	9,1	28000	Muito forte

Tabela 2.5 – Relação entre permeabilidade, porosidade e alterabilidade em basaltos (MARRANO, 1997).

Local	Litologia	Permeabilidade aparente ao ar (K_{AR})		Porosidade η (%)	Alterabilidade	Observações
		Milidarcy	cm/s			
Barragem de Ilha Solteira	Basalto compacto	0,061	$6,1 \times 10^{-8}$	1,56	Baixa	$K_{ar} < 0,1$ milidarcy; Baixa alterabilidade
Barragem de Capivara	Basalto compacto	0,159	$1,6 \times 10^{-7}$	2,18	Média	$K_{ar} > 0,1$ milidarcy; Alterabilidade crescente
Barragem de Capivara	Basalto vesicular	1,204	$1,2 \times 10^{-6}$	20,16	Alta	
Barragem de Capivara	Basalto compacto	5,906	$5,9 \times 10^{-6}$	9,04	Alta	

Pode-se citar ainda o trabalho desenvolvido por Sadisun et al. (2005) que através da avaliação da abertura de fraturas e quantificação da perda de massa, desenvolveu as categorias de alterabilidade descritas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Índice de alterabilidade (modificado de SADISUN et al., 2005).

Classe	Perda de massa (%)	Índice de alterabilidade (I_s)
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

Além da classificação, autores como Maia et al. (2003) desenvolveram relações que permitissem comparar os valores obtidos em laboratório com os dados de campo. Primeiro os

autores verificaram as variações dos índices de alteração de resistência à compressão uniaxial (q_u) e de módulo de elasticidade (E) com o tempo de lixiviação (t_{lix} , em horas), Figura 2.7. Com o gráfico, determinou-se t_{lix} correspondente a 25 anos de alteração natural (t_{nat} , em anos) para cada parâmetro (acha-se o t_{lix} cujo valor de q_u ou de E lixiviado seja igual ao do campo). Após isso, determina-se I_{qu} e I_E , conforme Equação 2.4, e com estes índices e o gráfico mencionado, obtem-se equações de equivalência 2.11 e 2.12.

$$t_{lix} = 704 \frac{t_{nat}}{25}, \text{ para } q_u \quad 2.11$$

$$t_{lix} = 108 \frac{t_{nat}}{25}, \text{ para } E \quad 2.12$$

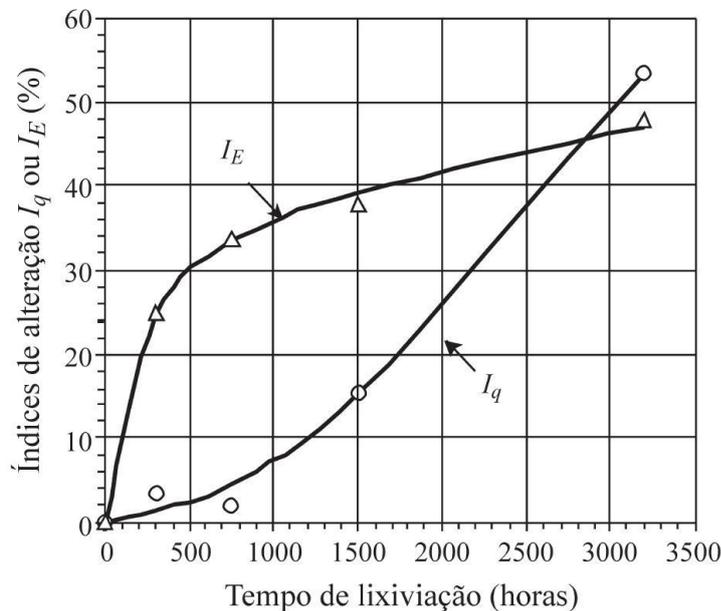


Figura 2.7 – Variação dos índices de alteração com o tempo de lixiviação contínua (MAIA et al., 2003).

2.4 IMPLICAÇÕES GEOTÉCNICAS

No setor da construção civil a rocha pode ser solicitada de diferentes maneiras, de acordo com o seu uso (YOSHIDA et al., 1972): material de fundação, suportando grandes estruturas, como barragens; sob pressão, por exemplo em túneis, podendo ou não sofrer

tratamentos de consolidação e reforço; agregado sem ligante, como material de filtro, lastro de vias férreas, enrocamentos, onde o material deverá permanecer praticamente sem modificação durante sua vida útil; e agregado com ligante, como em concretos betuminosos ou de cimento portland.

Neste sentido, a importância de se conhecer as características de alteração e alterabilidade dos materiais rochosos dá-se, principalmente, pelas modificações nos seguintes parâmetros (FARJALLAT et al., 1972a; YOSHIDA, 1972; MAIA, 2001; GOMES, 2001):

- Alteração da resistência mecânica
 - Grande influência na resistência à compressão, resistência à abrasão Los Angeles, Impacto treton, Esmagamento e Módulo de elasticidade, entre outros.
 - Diminuição da resistência mecânica, com ou sem produção de finos, reduzindo o fator de segurança da obra;
 - Diminuição da resistência ao cisalhamento de enrocamentos;
 - Caso excepcional, aumento da resistência, por exemplo, limonitização secundária (reforço das ligações cristalinas, petrificação).
- Deformabilidade
 - O processo de alteração modifica a natureza e a ligação entre os grãos, aumentando a deformabilidade da rocha.
- Variação da permeabilidade e porosidade
 - Redução da permeabilidade pela produção de finos. Em taludes este processo causa sobrecarga (acúmulo de água) e em drenos reduz a capacidade de vazão;
 - Variação na estanqueidade, podendo aumentar e diminuir a porosidade e permeabilidade das rochas. A variação destas propriedades é especialmente importante em obras onde a estanqueidade é fundamental: barragens, túneis e fundação.
- Aderência
 - Redução na capacidade de aderência pela quebra das ligações interatômicas dos elementos constituintes da rocha.

Contudo, o reconhecimento de má qualidade face a alteração de materiais rochosos não impede sua utilização, nem mesmo em situações de maior responsabilidade, possíveis de

reparação ou de substituição econômica. Para isso, faz-se necessário analisar, prever, corrigir ou reduzir ao mínimo seus efeitos (FARJALLAT, 1972). Como exemplo, tem-se a aplicação de materiais alteráveis como transições e camadas internas de enrocamentos, desde que bem direcionados e protegidos com material não alterável (PAES de BARROS, 1972; PATIAS et al., 2010).

A seguir, apresentam-se algumas áreas da engenharia civil e considerações geotécnicas associadas à alteração e alterabilidade de materiais rochosos.

2.4.1 Obras envolvendo escavação em rocha

Obras com escavação em rocha são inevitáveis em túneis, galerias, taludes, fundações e jazidas de materiais de construção. Nestas situações, na ocorrência da ruína de uma determinada obra, a solução do problema dependerá inicialmente do entendimento do fenômeno ocorrido e secundariamente dos métodos de cálculo e dos recursos disponíveis (GUIDICINI e NIEBLE, 1976). Sendo assim, faz-se necessário conhecer o comportamento do maciço rochoso antes da implantação da obra e após as modificações antropológicas realizadas.

Logo após a escavação em rocha, procede-se a exposição do maciço ao ar e expansão imediata, em regra à umidade constante, do volume influenciado pela redução do estado de tensão. Após esta expansão inicial, o estado de equilíbrio do maciço dependerá da umidade da atmosfera. Variando a umidade atmosférica, ocorrerão ciclos de secagem e umidificação da rocha e, conseqüentemente, ciclos de retração e expansão. Por sua vez, estes ciclos geram estados de tensão de tração, podendo provocar fendilhação a partir da superfície, a qual se acentuará em profundidade com a repetição destes até onde se pode propagar a secagem (ROCHA, 1971). A Figura 2.8 apresenta um esquema de fissuras de retração.

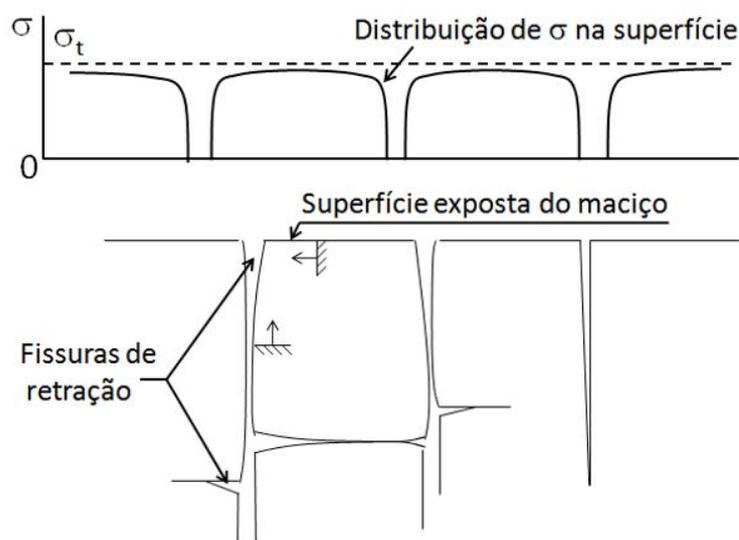


Figura 2.8 – Distribuição de tensão na superfície do maciço rochoso e fissuras de retração (ROCHA, 1971).

Segundo Rocha (1971), a susceptibilidade à fissuração será mais acentuada nas rochas com retratibilidade elevada e com menor resistência à tração (σ_t), por exemplo, em rochas com elevado teor de argilominerais expansivos. A fissuração depende também da irregularidade da distribuição de tensões residuais, do processo de formação e da deformabilidade dos elementos da estrutura do maciço.

Em taludes e tetos de escavações subterrâneas, em virtude do aumento de fraturas, da maior exposição da superfície e da maior percolação de água nas fraturas, acelera-se o processo de instabilização do maciço por alteração, que associado a variação de umidade pode causar fadiga (contração/expansão), diminuição na resistência mecânica e aumento na deformabilidade (FERREIRA, 2000). Assim, quando necessário, é indispensável prever a execução de trabalhos destinados a bloquear a circulação de água, como revestimentos de concreto e injeções apropriadas (FARRAN e THENOZ, 1965).

Segundo Seidenfuss (2006) a ruína deste tipo de obra, quando envolve a alteração da rocha, geralmente pode estar associada às características climáticas e topográficas locais, à erosão do material alterado, a horizontes subterrâneos de rocha intemperizada e ao aumento da pressão hidrostática pela maior presença de água em rochas alteradas. O Quadro 2.11 apresenta alguns exemplos de colapso em túneis associados à alteração de rocha.

Data	Localização	Subsolo	Categoria da ruína	Causas	Referência
1969	Austrália	Granito	Escorregamento de rocha	Erosão e flutuação da pressão hidrostática	Jacobs (1975)
1970-1975	Estados Unidos	-	Colapso	Influxo de água e formação de dolinas	Seidenfuss (2006)
1987	Alemanha	Arenito intemperizado	Desmoronamento	Drenagem e a fragilidade do subsolo	Madrid (1996)
1991	Coréia	Rocha alterada ou argila	Desmoronamento	Fragilidade do subsolo	Madrid (1996)
1993	Coréia	Rocha alterada	Escorregamento elíptico	Falha do subsolo quando em contato com a água subterrânea	Madrid (1996)
1994	Turquia	Arenito, argilito e siltito	Instabilidade de taludes	Rochas fraturadas saturadas e altamente intemperizadas, com presença de argilas expansivas.	Türkmen e Özgüzelb (2003)
1994	Brasil (Túnel Carvalho Pinto)	-	Ruptura do emboque	Trincas generalizadas	Ribeiro Neto e Kochen (2000)
1995	Estados Unidos	-	Colapso	Influxo de água e formação de dolinas	Seidenfuss (2006)
1978-2001	Japão	Granito alterado	Deformações súbitas	Baixa resistência da rocha alterada e propagação das deformações até superfície	Fukushima (2002)

Quadro 2.11 – Exemplos de colapsos de túneis associados a alteração de rocha.

Acrescenta-se ainda a importância do intemperismo químico em rochas calcárias, com formação de dolinas ou *sinkholes*. Nestes casos ocorre a dissolução química da rocha, podendo acarretar na subsidência da superfície do terreno ou no colapso total do teto das cavernas formadas no subsolo. Sua ocorrência pode ser natural e, ainda, acelerada pela interferência de atividades humanas (NEWTON, 1984).

A formação de dolinas é um fenômeno que envolve grande preocupação pelo alto risco geológico envolvido, cujo colapso repentino resulta em sérios danos quando atingem rodovias, ferrovias, barragens, edifícios, residências, veículos e até mesmo, pessoas (NEWTON, 1984). Vários casos envolvendo este fenômeno estão descritos em Beck (1984), nesta coletânea podem ser encontradas ocorrências nos Estados Unidos (nos estados da Flórida, Carolina do Norte, Virginia, Minesota, Nova Jersey, Michigan e Califórnia, entre outros), China, México, Tailândia e na África do Sul. A ocorrência mais recente e de grande magnitude foi a registrada na Guatemala em 2010, na qual se abriu uma enorme cratera no meio da cidade com aproximadamente 100 metros de profundidade, as causas do colapso ainda não estão totalmente esclarecidas (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2010).

Com relação a movimentos de massa em taludes naturais e encostas, Guidicini e Nieble (1976) apontam como causas internas o efeito de oscilações térmicas e a diminuição dos parâmetros de resistência por intemperismo. No primeiro, ocorrem variações volumétricas por oscilações térmicas diárias ou sazonais, atingindo potencial máximo em condições climáticas com predominância do intemperismo físico, acarretando em quedas de blocos ou deslocamento por rastejo (movimentos lentos e contínuos de encostas). Com relação à segunda causa interna, a diminuição dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) por intemperismo, ocorre pelo enfraquecimento gradual do maciço, como consequência da remoção dos elementos solúveis constituintes dos próprios minerais, pela dissolução dos elementos de cimentação e, novamente, pelo desenvolvimento de uma rede microfissural.

O Quadro 2.12 apresenta alguns exemplos de ocorrências de colapsos envolvendo a alteração da rocha em taludes naturais e artificiais.

Data	Localização	Categoria	Causas	Referência
1988 a 1998	Ouro Preto/MG (Brasil)	Movimento gravitacional de massa, na forma de mistura de solo e blocos de rocha	Intemperismo químico, erosão, chuvas intensas e intervenção humana	Bonuccelli e Zuquette (1999)
2004	Japão	Movimento de massa	Infiltração de água e sobrecarga pela formação de neve	Nishii e Matsuoka (2010)
1992 e 2009	Santos/SP (Brasil)	Queda de blocos de rocha	Varição térmica do maciço rochoso e perda de sustentação por processos erosivos	Tominaga et al. (2009)
2010	República Checa	Movimento gravitacional de massa, na forma de mistura de solo e blocos de rocha	Conjunto de falhas profundamente intemperizadas	Pánek et al. (2011)
Eventos históricos	Japão	Movimento de massa em regiões vulvânicas	Movimento das placas tectônicas, podendo ser acrescentado o enfraquecimento por alteração hidrotermal	Yoshida et al. (2012)
Eventos históricos	Canadá	Movimento de massa	Acamamentos, fraturamentos e juntas transversais, associados à alteração da superfície das discontinuidades	Sturzenegger e Stead (2012)

Quadro 2.12 – Exemplos de colapsos de taludes naturais e artificiais.

2.4.2 Rocha como material de construção

a) Agregado para concretos hidráulicos e betuminosos

Para produção de agregado, além das condições locais existentes da rocha a ser explorada, deve-se levar em consideração a microfissuração decorrente do efeito da britagem, que modifica totalmente as características iniciais. Os danos são ainda maiores quando a estocagem é realizada ao ar livre por longo período de tempo. Quando sua utilização é imediata o risco de alteração é menor, mas isso não impossibilita os efeitos da umidade, principalmente quando o concreto apresenta defeitos de adensamento (FARJALLAT, 1972).

O processo de britagem associado a alteração dos materiais rochosos é significativo na diminuição das características de aderência e adesividade do agregado, tanto de ligantes hidráulicos como betuminosos. Conforme já mencionado no Item 2.2.2.1 (A água no intemperismo químico), ao britar uma rocha as ligações interatômicas são quebradas na superfície de ruptura. Em presença de água, há neutralização dos íons na superfície, que posteriormente entram em solução. Dependendo do estado de alteração do agregado, ocorrem as seguintes reações (STRUILLOU, 1969; YOSHIDA, 1972; YOSHIDA et al., 1972; GOMES, 2001):

- Agregados são: as superfícies silicatadas têm tendência a se enriquecer relativamente em sílica e em alumina, tornando-se cada vez mais ácidas, propiciando riscos de má adesividade a curto ou médio prazo;
- Agregados constituídos de rochas semialteradas ou alteradas: podem conter hidróxidos de ferro livres ou minerais instáveis, por exemplo, feldspatos ferruginizados ou pirita. Os hidróxidos tem tendência a migrar para a superfície do agregado, constituindo uma película ferruginosa desfavorável a uma boa aderência entre a rocha e o ligante, sobretudo para pré-misturados a frio.

Com relação à composição dos concretos, é importante esclarecer que o cimento *Portland* é composto por matérias-primas como calcário, argila, gipsita e adições. A argila possui em sua constituição elementos como óxidos de sódio (Na_2O) e de potássio (K_2O),

responsáveis pelo teor de álcalis no concreto. Dependendo do teor de álcalis, o *pH* do meio pode se situar entre 12,5 e 13,5, propiciando um líquido cáustico ou fortemente alcalino, que em presença de algumas rochas e minerais não permanecem estáveis sob exibição prolongada (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Estes materiais que danificam o concreto ao reagirem com os álcalis do cimento são conhecidos como deletérios, são eles: rocha vulcânica de médio a alto teor de sílica; vidros silicosos (artificial ou natural, exceto o tipo básico como o vidro basáltico); opalas e calcedônia; e as do tipo montmorilonita que podem aumentar a quantidade de álcalis pelas reações de troca de cátions (ROCHA, 1971; GUEDES, 1972).

Com relação à presença de argilominerais, fator preponderante na durabilidade dos agregados, alguns autores estipulam porcentagens admissíveis na composição, conforme pode ser observado no Quadro 2.13.

Porcentagem de argilomineral	Atribuição	Referência
Minerais alterados + 0,5% de absorção d'água	Descartar material	Pichler (1951)
< 20%	Pequeno efeito	Scott, 1965
20 a 35 %	Algumas falhas na utilização	
> 35%	Insucesso	
< 15%	Boa qualidade	Day (1962)
15 a 25%	Transição	
> 25%	Qualidade inferior	
< 5% de minerais secundários	Rochas adequadas	Schneider e Rocha (1968)
5 a 10 % de minerais secundários não expansivos	Rochas adequadas	
5 a 10 % de minerais secundários expansivos	Recomendam-se ensaios de durabilidade	
> 10%	Recomendam-se ensaios de durabilidade	

Quadro 2.13 – Porcentagens limites de minerais secundários para materiais de construção.

Referente à desagregabilidade de agregados para uso em concreto hidráulico, Aguillar Filho e Tezuka (1993) comparam o comportamento de agregado são com agregado desagregável em diferentes condições de exposição. Os autores concluíram que os agregados desagregáveis poderiam ser utilizados em concreto massa para construção de barragens, desde que permaneçam com umidade e temperatura constantes, e protegidos em suas faces expostas com concreto de boa qualidade. Em condições de ciclos de umidade e temperatura, o mesmo apresentaria comportamento insatisfatório.

A qualidade do agregado para fabricação de concreto também pode ser avaliada em termos de índices físicos e geomecânicos, conforme valores apresentados na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Guia para avaliação da qualidade do agregado baseado em ensaios de laboratório (modificado de VERHOEF e VAN DE WALL, 1998).

Ensaio (índice)	Classificação			
	Excelente	Bom	Razoável	Ruim
Massa Específica seca (g/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	2-3	3-4	>4
Resistência à compressão simples (MPa)	>200	100-200	50-100	<50
Resistência à carga pontual (MPa)	>8,0	4,0-8,0	1,5-4,0	<1,5
Resistência ao impacto Treton (%)	<20	20-25	25-30	>30

O Quadro 2.14 apresenta alguns casos históricos relacionados ao mecanismo de alteração de agregados.

Tipo de rocha	Localização	Categoria da ruína	Causas	Referência
Granito	Califórnia/EUA (1934)	Deterioração da Barragem Parker	Deterioração por reação álcali-agregado	Stanton (1940)
Arenito	Teatro Municipal, São Paulo/SP (1969)	Deterioração da fachada	Intemperismo químico, físico e biológico (vegetação)	Del Lama et al. (2008)
Diversos	África do Sul (casos históricos)	Deterioração de base e sub-base de rodovias	Deterioração pela presença de argilominerais expansivos	Weinert (1968)
Diversos	Japão (casos históricos)	Deterioração de estruturas de concreto	Deterioração por reação álcali-agregado	Wakizaka (2000)
Diversos	Recife/PE (casos históricos)	Deterioração de pontes e edifícios	Deterioração por reação álcali-agregado	Silva (2007)
Basalto	Estados Unidos	Deterioração de base e pavimento de rodovias	Deterioração pela presença de argilominerais expansivos	Scott (1955)

Quadro 2.14 – Exemplos de estruturas de concreto danificadas pela alteração de agregados.

b) Agregado para enrocamento

Enrocamentos podem ser utilizados em rodovias, barragens, fundações e gabiões, sendo mais comum nos dois primeiros casos, selecionados em função das características e disponibilidade de material no local da obra (SMITH, 1999).

Segundo Smith (1999), a estabilidade de taludes formados por enrocamentos depende principalmente da resistência ao cisalhamento (τ), em que os fragmentos de rocha não podem mover um sobre o outro ou entre si. Enrocamentos geralmente possuem altos valores de resistência ao cisalhamento, principalmente quando compactado, sendo este parâmetro influenciado pelo tamanho, forma, graduação e resistência dos fragmentos de rocha que formam o aterro, além de estar intimamente relacionado com a mineralogia e grau de alteração da rocha.

A ruína de um enrocamento é dita quando, considerando a tensão efetiva constante, ocorrem deformações relativamente rápidas para modificações no teor de umidade (NEVES, 2002). Por isso, o estudo de alterabilidade e de alteração são fundamentais nestes tipos de estruturas civis. Nestes casos, o aumento do desgaste em relação ao tempo provoca diminuição da resistência superficial do agregado e afeta diretamente a deformabilidade e a resistência de enrocamentos como meio granular, principalmente pela modificação das características dos pontos de contato entre os blocos de rocha (MAIA et al., 2002).

O tipo de alteração comum em enrocamentos dá-se basicamente por desagregação, provocada pelas variações de umidade e temperatura da rocha, e por decomposição, ocasionada pelas reações físico-químicas dos minerais constituintes da rocha. A intensidade com que estes processos atuam é função, basicamente, do tipo da rocha e das condições atmosféricas locais (MAIA, 2001).

Embora a face de jusante tenha influência direta dos agentes intempéricos, a face crítica de uma barragem de enrocamento é a de montante, na qual há oscilação do nível d'água do reservatório, possibilitando a ciclagem continuada da rocha exposta. Em caso de desagregação, ocorrerão finos que podem ser carreados pela ação das ondas, expondo novos blocos de rocha, aprofundando continuamente o processo. Por outro lado, caso o material não seja carreado, os finos podem funcionar como uma capa protetora das camadas internas, até uma profundidade máxima de um metro, contudo, não por toda a vida útil da barragem (FARJALLAT et al., 1972b).

Como há influência da granulometria no processo de alteração, em geral, as perdas acumuladas aumentam em direção às frações granulométricas menores (MARRANO e PARAGUASSU, 1998). Então, além dos ensaios de laboratório rotineiros, em alguns casos opta-se por ensaios em grande escala como enrocamentos experimentais, avaliando a alteração em profundidade através de poços de observação (CASAGRANDE, 1976; CESP, 1976; PATIAS et al., 2010) e de cisalhamento direto em material intacto e em material alterado com equipamento Soxhlet de grandes dimensões (MAIA et al., 2001).

Alguns exemplos de estruturas de enrocamento, aterros e rip-rap que sofreram rápida alteração, principalmente pela presença de argilominerais expansivos, podem ser vistos em Smith et al. (1970), Farjallat (1971), Farjallat et al. (1972), Maia et al. (2002) Zhang e Yuan (2011).

Com relação ao ambiente costeiro, enrocamentos são comumente utilizados como estruturas de proteção, conhecidos como “quebra-mar”. Neste caso, além das características intrínsecas, há a influência da mobilidade entre os blocos e da ação das ondas. Blocos com baixo grau de travamento aceleram processos de alteração pelo arredondamento e perda de massa, até mesmo em blocos de rochas mais duras (LATHAN, 1991).

Com relação aos agentes intempéricos, a zona entre marés é ainda mais vulnerável aos efeitos físico-químicos, podendo se intensificar pela ação gelo/degelo, cristalização de sais e ciclos de molhagem/secagem acima do nível da água. Reações de dissolução, geralmente impulsionada por água ácida, são significativas em lagos de água doce, mas raramente abaixo do mar salgado. Em camadas permanentemente submersas, os efeitos dentro da água salgada são ainda mais desprezíveis, pois as baixas velocidades da água reduzem os mecanismos de degradação (LATHAN et al., 2006).

A corrosão por água do mar não é um processo mecânico, mas sim eletroquímico por meio do crescimento de cristais de sal nos poros da rocha e da hidratação de hidrato formando sais como o sulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Os cristais de sal em expansão exercem uma pressão sobre as paredes dos poros da rocha que excede a resistência à tração da rocha (KWAAD, 1970; BENAVENTE et al., 2001; VILES e GOUDIE, 2007).

Em Lathan (1991), Benavente et al. (2001) e Viles e Goudie (2007), podem ser vistos alguns exemplos de deterioração intempérica em ambientes costeiros.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo apresenta as diferentes etapas realizadas para o desenvolvimento desta pesquisa, conforme pode ser visto no fluxograma da Figura 3.1. Estas etapas envolvem revisão bibliográfica, extração e caracterização das amostras, ensaios de laboratório, tratamento e interpretação dos dados.

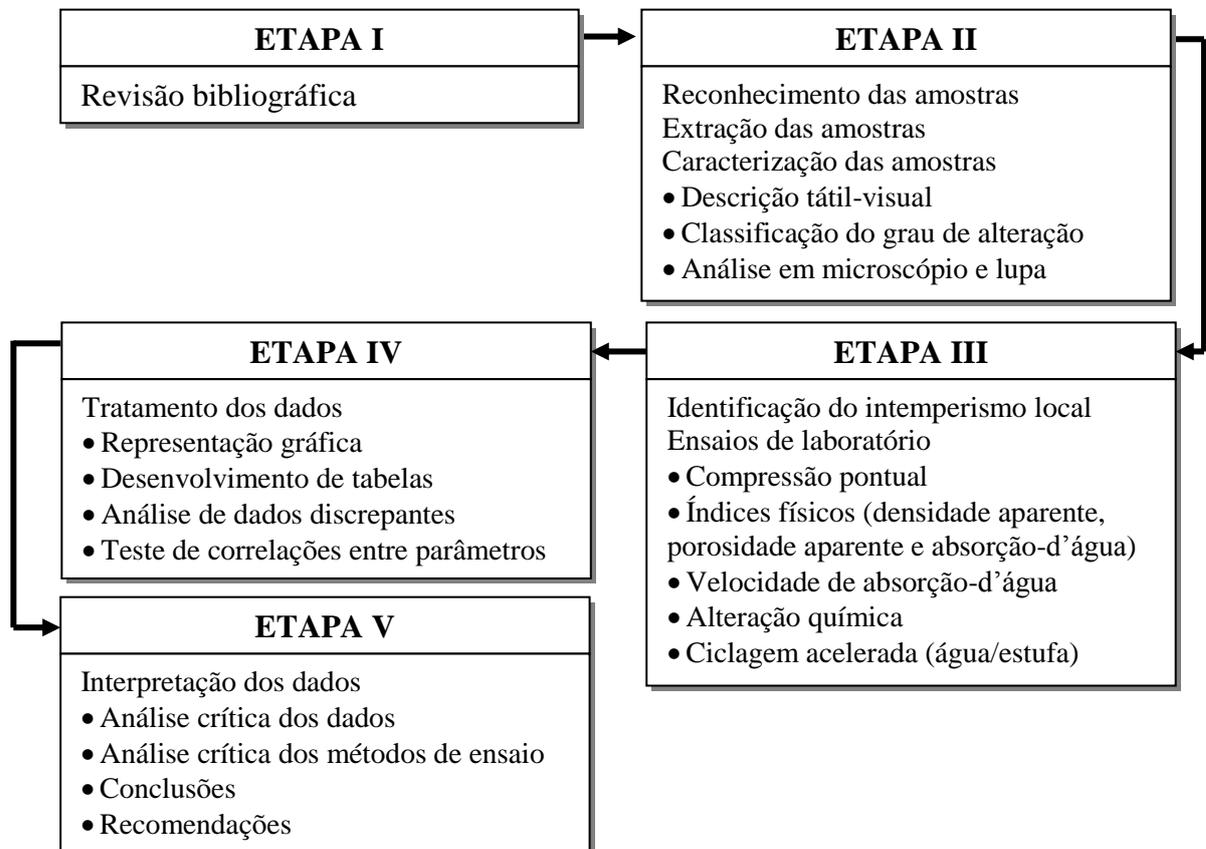
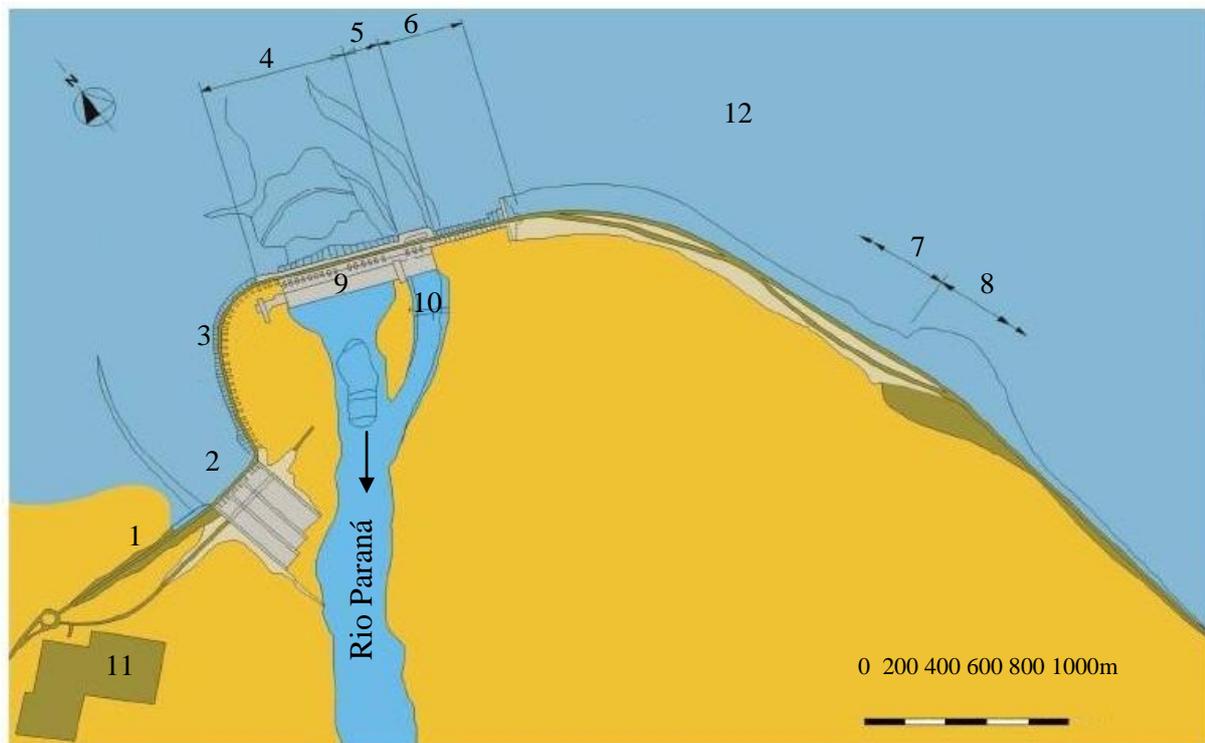


Figura 3.1 – Fluxograma da sequência das diferentes etapas da pesquisa.

3.2 MATERIAL DE ESTUDO

As amostras de rocha basáltica utilizadas no presente estudo foram coletadas na região da Usina Hidrelétrica de Itaipu. A usina está localizada no Rio Paraná, em uma região de fronteira entre Brasil e Paraguai, respectivamente nos municípios de Foz do Iguaçu/PR (Brasil) e Ciudad Del Este (Paraguai). As principais estruturas civis do projeto deste barramento estão resumidas na Figura 3.2.



Legenda

- | | | |
|--|--|-------------------------------|
| 1 Barragem de Terra Direita | 5 Estrutura de Desvio | 9 Casa de Força |
| 2 Vertedouro | 6 Barragem de Ligação Esquerda (Contraforte) | 10 Canal de Desvio |
| 3 Barragem Lateral Direita | 7 Barragem de Enrocamento | 11 Subestação/ Margem Direita |
| 4 Barragem de Ligação Direita (Contraforte) e Barragem Principal | 8 Barragem de Terra Esquerda | 12 Reservatório |

Figura 3.2 – Arranjo Geral do projeto de Itaipu (Fonte: Itaipu, 2008).

Com relação à geologia local, a barragem de Itaipu está apoiada em rochas vulcânicas geradas no Cretáceo Inferior. Essas rochas compreendem espessos e sucessivos derrames de lavas pertencentes à Formação Serra Geral, do Grupo São Bento, podendo atingir espessuras de até 1.700 m e estender-se por uma área de aproximadamente 1.200.000 km². Vale ressaltar ainda que a Formação Serra geral encontrada em cerca de 75% da extensão da Bacia

Sedimentar do Paraná, alcançando regiões do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, (MAACK, 1952; LEINZ et al., 1966; MELFI et al., 1988).

Na área das obras de Itaipu os estudos de caracterização e investigação se intensificaram em cinco derrames basálticos de maior interesse para as estruturas de barramento. Estes derrames foram designados em ordem ascendente, pelas letras A, B, C, D e E (ITAIPU, 1994).

Especificamente sobre as amostras utilizadas no presente estudo, estas foram coletas do ensaio de Ciclagem Natural em Grande Escala, desenvolvido por Itaipu durante as fases de investigação e projeto. Estas amostras representam quatro diferentes sequências de derrames basálticos e de seus respectivos litotipos: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica. No total somavam onze amostras dispostas em pilha com aproximadamente 4 m³ de rocha, apoiadas em plataforma de concreto de 3x3 m. (Figura 3.3). Considera-se ainda, que estas amostras são as originais das frentes de escavação e representativas dos principais materiais geológicos utilizados na construção da barragem.



Figura 3.3 – Ensaio de Ciclagem Natural em Grande Escala de Itaipu, pilha de rocha 1E.

A Figura 3.4 apresenta uma seção geológica típica da fundação da barragem de Itaipu com identificação dos derrames basálticos.

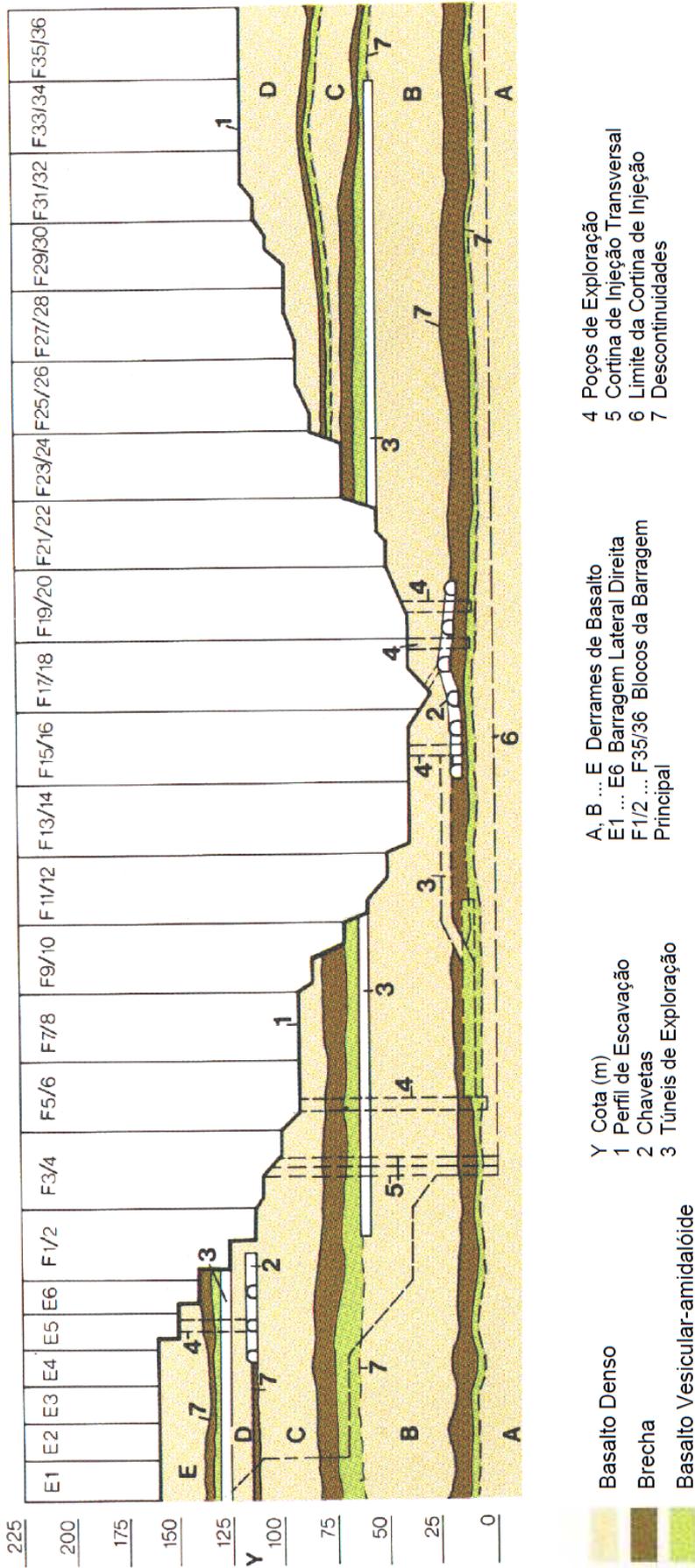


Figura 3.4 – Seção geológica longitudinal ao eixo da barragem principal de Itaipu (Fonte: ITAIPU, 1994).

Os blocos de rocha utilizados neste estudo foram selecionados aleatoriamente das 11 pilhas do ensaio de ciclagem natural original. Foram escolhidos os blocos que apresentavam melhores características para redução e remoção da capa de alteração.

A Figura 3.5 apresenta um perfil típico de sondagem com a localização, denominação e descrição resumida das amostras analisadas.

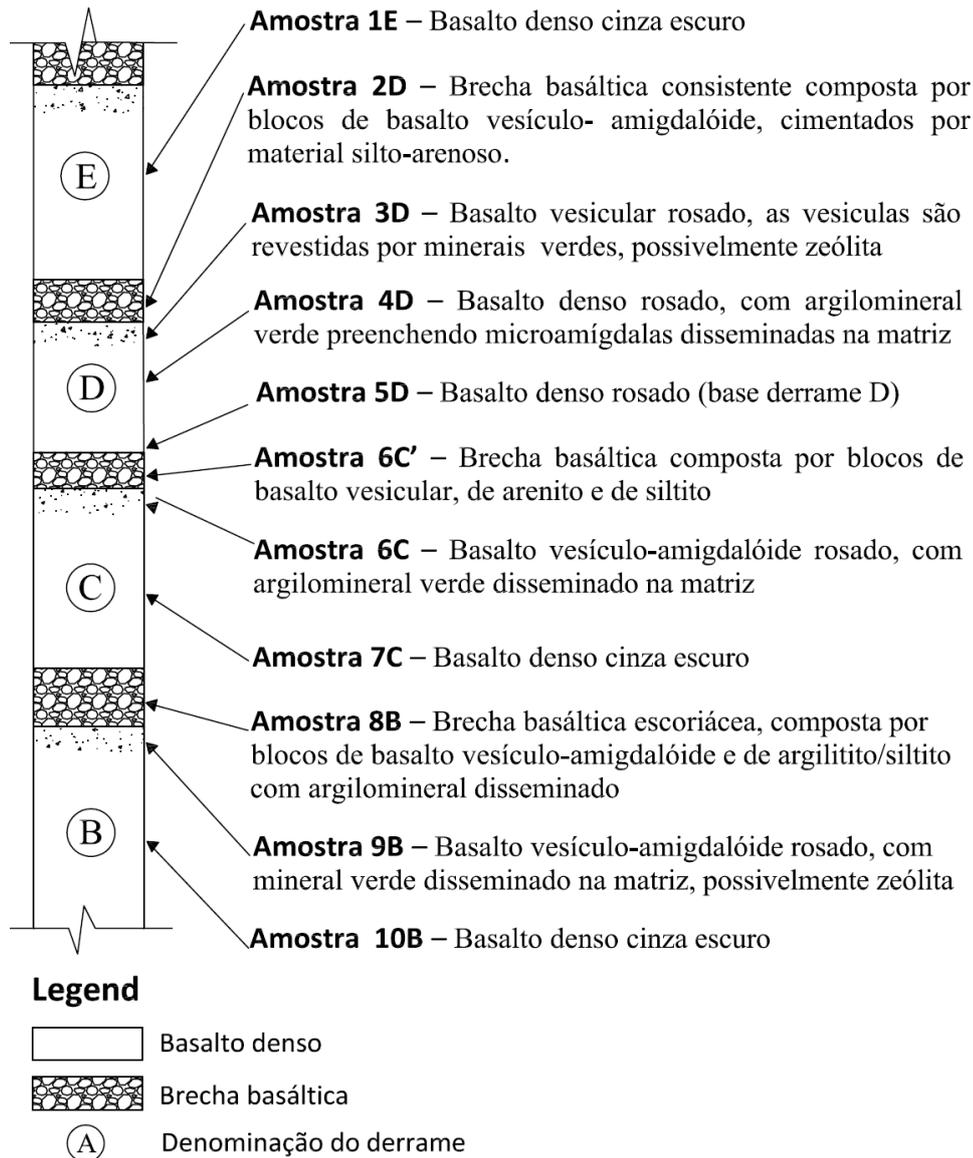


Figura 3.5 – Identificação das amostras em perfil.

3.2.1 O ensaio de ciclagem natural de Itaipu

O ensaio de ciclagem natural ou Ensaio de Ciclagem Natural em Grande Escala (CNGE), como foi registrado no arquivo técnico da Itaipu, teve início em 1975. O estudo teve como objetivo avaliar o processo de intemperismo sobre os diferentes tipos de rocha de interesse das áreas de escavações e para produção de material de construção, sem interferência de metodologias artificiais.

As amostras deste ensaio foram extraídas de trincheiras e galerias de exploração, escolhidas pela localização favorável ou posição estratigráfica dos materiais a serem analisados. Os blocos extraídos possuíam dimensões de 20 a 40 cm, dispostos em plataformas quadradas de concreto de 3 m. O ensaio foi composto por onze pilhas, de 3 a 4 m³, dos principais tipos litológicos, consistindo apenas em análises qualitativas, através de registro de imagens fotográficas e observações do estado físico dos blocos: cantos vivos, som metálico, surgimento de fissuras, lasqueamento, desagregação e desintegração (ITAIPU, 1975). A Figura 3.5 apresentou uma breve descrição litológica das amostras.

Os relatórios técnicos encontrados compreendem o período de 1975 a 1981. Dadas as condições de clima úmido do local, com extremas variações de temperatura, foi concluído que este período de exposição era suficientemente representativo, principalmente para as amostras de litotipos mais suscetíveis à desagregação, como o basalto denso com micro-amígdalas preenchidas por argilomineral de cor verde, amostra 4D (ITAIPU, 1981).

A Figura 3.6 ilustra uma sequência parcial da alteração desta amostra 4D. Com 60 dias de exposição, 40% dos blocos já apresentavam superficialmente cobertos por material fino e matriz bastante alterada (Figura 3.6.a). Após um ano, a alteração é marcada pelo arredondamento de vários blocos com superfícies friáveis (Figura 3.6.b). Com três anos de exposição, os blocos superficiais da pilha encontravam-se todos alterados, descoloridos, friáveis e com espessa película de alteração (Figura 3.6.c). No último relatório identificado, após seis anos de ensaio, dava-se ênfase a alteração orientada desta pilha, na face sul-oeste e na base da pilha concentravam-se os blocos com mais alto grau de desagregação, chegando a estar totalmente pulverizados (Figura 3.6.d).



(a)



(b)

Figura 3.6 - Registro fotográfico da amostra 4D. (a) Dois meses de alteração (ITAIPIU, 1975).
(b) Um ano de alteração (ITAIPIU, 1976). (c) Três anos de alteração (ITAIPIU, 1978a). (d) Seis anos de alteração natural (ITAIPIU, 1981).



(c)



(d)

Figura 3.6 (Continuação) - Registro fotográfico da amostra 4D. (a) Dois meses de alteração (ITAIPU, 1975). (b) Um ano de alteração (ITAIPU, 1976). (c) Três anos de alteração (ITAIPU, 1978a). (d) Seis anos de alteração natural (ITAIPU, 1981).

A alteração da amostra 4D era condicionada pela incidência solar, resultando em blocos mais alterados os que permaneceram úmidos por mais tempo, dispostos na base e direção sul da pilha. Este fato pode ser associado ao represamento de água na plataforma de concreto, a qual se apoiava as amostras. De maneira geral, a desagregação nestas rochas foi considerada como uniforme, evoluindo do arredondamento dos blocos, para esfoliação e posterior pulverização, resultando em um material terroso (ITAIPU, 1981).

Como conclusão, ao final dos seis anos de observação do ensaio de ciclagem natural, as amostras foram divididas em três grupos (ITAIPU, 1981):

- Inalteradas: 1E, 7C, 10 B, 5D, 6C' e parte das amostras 2D;
- Quase inalteradas, com desagregação incipiente: parte das amostras 2D, 3D e 9B;
- Em desagregação: 4D e 6C (menos acentuado).

A partir dos estudos de alterabilidade foi realizada na época uma pré-seleção das rochas para material de construção. Após o desenvolvimento de outros ensaios, tais como Enrocamento Experimental (exclusivamente com Amostra 4D, para maiores detalhes sobre este ensaio ver PATIAS et al., 2010), impacto Treton, abrasão Los Angeles e resistência à compressão, foi definida a seguinte aplicação dos materiais basálticos (ITAIPU, 1978b):

- Derrame E, C e B - basalto cinza denso são - produção de agregado para concreto;
- Derrame E, D inferior, C e B - basalto rosado denso são - compor estruturas da Barragem de Enrocamento;
- Derrame C e B - basalto denso amigdaloidal - zonas de transição, enrocamento e *rip-rap*
- Derrame D, C e B - basalto vesicular e brecha - zonas de transição e camadas internas do enrocamento;
- Derrame D - basalto denso desagregável - camadas internas do enrocamento mesclado com material não desagregável e protegido por uma camada de material resistente.

Acrescenta-se que mesmo após o término do estudo de ciclagem natural, as amostras de rocha permaneceram no local de ensaio, o que totalizou até a presente data um período de 36 anos de exposição natural às intempéries.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Revisão bibliográfica

Esta etapa envolveu a revisão bibliográfica de assuntos relacionados ao desenvolvimento do estudo, tais como:

- Principais definições relacionadas à alteração e alterabilidade de rochas;
- Fatores que interferem na alteração e na alterabilidade de materiais rochosos;
- Métodos de avaliação e de classificação de alteração e alterabilidade;
- Implicações geotécnicas destes processos em obras de engenharia.

3.3.2 Identificação do tipo de intemperismo local

A caracterização do tipo de intemperismo da região Itaipu foi desenvolvida a partir da equação de Weinert (1984), Equação 3.1, e pelo ábaco de Peltier (1950), Figura 3.7. Para esta análise foram utilizados os dados de temperatura, evaporação e precipitação, compreendidos entre os anos de 2003 e 2008, fornecidos pela Estação Meteorológica de Itaipu.

$$N = 12 \frac{E_j}{P_a} \quad 3.1$$

sendo, E_j : a taxa de evaporação do mês mais quente do ano;
 P_a : a precipitação anual total;
 N : índice climático (se $N > 5$ o intemperismo é físico e se $N < 5$ o intemperismo é químico).

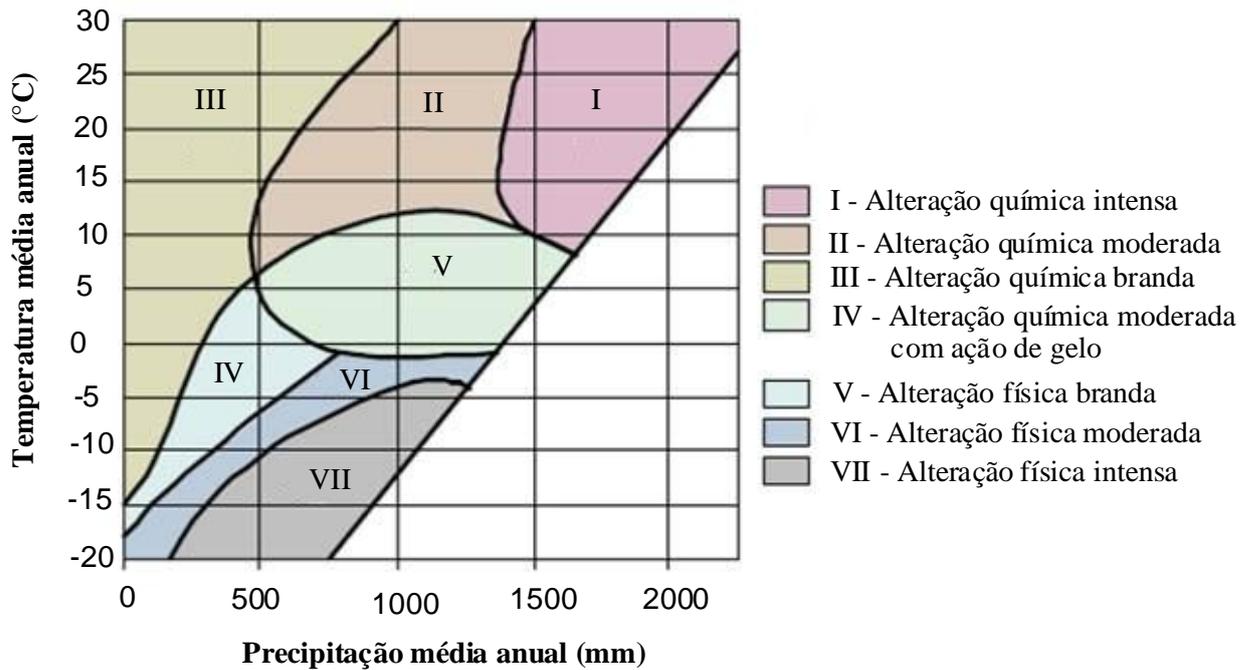


Figura 3.7 – Correlação entre o regime de precipitação e a temperatura anual de Peltier (1950).

3.3.3 Extração e caracterização de amostras

A extração de amostras iniciou com a transferência de parte dos blocos de rocha do ensaio Ciclagem Natural em Grande Escala de Itaipu (margem direita do rio Paraná) para o Laboratório de Tecnologia do Concreto – LTC/SO.DT/ITAIPU (margem esquerda do rio Paraná). Neste laboratório realizou-se a primeira fase de redução dos blocos, que apresentavam inicialmente dimensões entre 300 e 400 mm, e foram reduzidos para dimensões entre 50 e 150 mm. Para esta redução foi necessário inicialmente realizar furos com

perfuratrizes e, então, provocar a quebra com auxílio de ponteira e marreta. O tamanho inicial das amostras foi definido de maneira a eliminar a capa de alteração e de facilitar o transporte entre a Itaipu (Foz do Iguaçu/PR) e a EESC/USP (São Carlos/SP).

Finalizada a redução, foram somados aproximadamente 300 kg de rocha e, então, transportados para os laboratórios do Departamento de Geotecnia da EESC/USP. Neste local, as dimensões dos blocos foram novamente adequadas, de acordo com cada tipo de ensaio a ser realizado.

Após a etapa de redução, as amostras foram identificadas e caracterizadas visualmente e em microscópio digital ou lupa de aumento:

- Descrição mesoscópica: registro tátil e visual da rocha, com registro da coloração, da presença de minerais secundários (teste com HCl para identificação de calcita), da textura, da orientação dos minerais, do grau de alteração e registro fotográfico dos blocos de rocha (imagem mesoscópica);
- Descrição em microscópio digital ou em lupa: permitiu a identificação de alguns minerais (plagioclásios, minerais máficos e argilominerais), a presença de microfissuras, a disposição dos minerais secundários na matriz e a verificação de oxidação, entre outros. Esta etapa teve início no LTC/ITAIPU, com lupa de 10 e 30X, e concluída no Departamento de Geotecnia com auxílio de microscópio digital de 50 e 200X.

Para padronizar a caracterização da cor da rocha utilizou-se a escala de cor de Munsell (2009). Quanto à classificação qualitativa do grau de alteração foi utilizada a classificação da ISRM (1981) pela maior abrangência no meio técnico e por apresentar maior detalhamento de cada classe de alteração (Quadro 3.1).

Grau	Denominações	Características da rocha
A1	Rocha sã.	Nenhum sinal visível de material em alteração. Pode ocorrer leve descoloração na superfície das discontinuidades.
A2	Rocha pouco alterada.	Descoloração indica intemperismo no material rochoso e nas discontinuidades. 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.

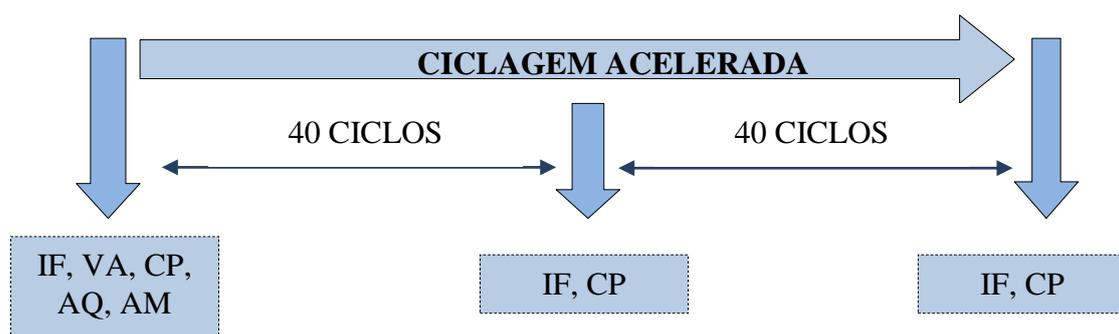
Quadro 3.1 – Classes de alteração, segundo ISRM (1981).

Grau	Denominações	Características da rocha
A4	Rocha muito alterada.	Mais da metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. Rocha sã ou descolorida está presente como arcação 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.

Quadro 3.1 (continuação) – Classes de alteração, segundo ISRM (1981).

3.3.4 Ensaios laboratoriais

A terceira etapa envolveu os ensaios de laboratório, realizados em diferentes momentos. Num primeiro momento foram abordados os ensaios de caracterização física, química e mecânica, além da classificação tátil e visual. Após estes, deu-se início ao ensaio de ciclagem acelerada, interrompido a cada 40 ciclos para realização dos ensaios de índices físicos e de carga pontual. A Figura 3.8 apresenta um esquema das etapas dos ensaios de laboratório.



Legenda

IF: índices físicos (densidade aparente, porosidade aparente e absorção-d'água)

VA: velocidade de absorção-d'água

CP: compressão pontual

AQ: alteração química

AM: avaliação microscópica

Figura 3.8 – Esquemática das etapas dos ensaios de laboratório.

3.3.4.1 Índices físicos

Os ensaios de índices físicos compreenderam os parâmetros de densidade aparente, porosidade aparente e absorção-d'água. Os procedimentos de laboratório foram realizados de acordo com as recomendações da NBR 15845 (2010).

De acordo com esta norma, são necessários dez corpos-de-prova, com dimensões entre 5 e 7 cm e com relação 1:1 (base:altura). Entre os grupos de amostra analisados em apenas dois não foi atingido o número mínimo de exemplares, pela quantidade reduzida de amostras disponíveis para o ensaio.

Quanto à execução do ensaio, considera-se inicialmente que os corpos-de-prova não foram lavados com água corrente, apenas limpos com jato de ar. O uso de água e de escova poderia desprender materiais das faces dos blocos, como argilominerais disseminados na matriz ou de preenchimento de amígdalas.

Para obtenção dos índices físicos faz-se necessário obter três situações de pesagem: massa seca (M_{sec}), massa saturada (M_{sat}) e massa saturada submersa (M_{sub}). Para determinação de M_{sec} as amostras foram levadas à estufa (70 ± 5) °C até massa constante. Quanto à saturação para obtenção de M_{sat} , os blocos foram submersos em água deionizada (pH de 6,55 e Condutividade Elétrica de $1,0 \mu S/cm$) 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. M_{sub} foi obtida secando os blocos saturados com pano levemente úmido.

A densidade aparente (ρ_a), a porosidade aparente (η_a) e a absorção aparente (α_a) foram calculadas de acordo com as expressões matemáticas 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$\rho_a = \frac{M_{sec}}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad 3.2$$

$$\eta_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{(M_{sat} - M_{sub})} \times 100 [\%] \quad 3.3$$

$$\alpha_a = \frac{(M_{sat} - M_{sec})}{M_{sec}} \times 100 [\%] \quad 3.4$$

3.3.4.2 *Velocidade de absorção-d'água*

Este ensaio utilizou o princípio do método de absorção rápida de Hamrol (1961), o que permitiu desenvolver um ensaio capaz de analisar a velocidade de absorção-d'água e o tempo necessário para saturação e secagem de blocos de rocha em estufa.

Para realização do ensaio foram selecionados três blocos de rocha com massa entre 150 e 250 gramas. Inicialmente os blocos foram limpos com jato de ar (pelo mesmo motivo exposto anteriormente) e secos em estufa a 110°C até massa constante. O resfriamento deu-se em dissecador com substância desidratante (sílica).

Após a fase de preparação, as amostras foram submergidas em água deionizada. A cada intervalo de tempo realizavam-se as leituras de massa. Para estas leituras os blocos eram secos em superfície com pano levemente úmido.

No primeiro dia de ensaio as leituras eram registradas para os tempos aproximados de 0, 10, 20, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 480 e 600 minutos de submersão. Do segundo até o quinto dia, eram realizadas duas leituras por dia devido à pequena variação de massa. Após estabilização das leituras também foi acompanhado a velocidade de secagem a 110°C, com tempos iniciais de leitura de aproximadamente 0, 30, 60, 120, 210, 300, 390 e 570 minutos, seguindo em diferentes intervalos até atingir massa constante.

A Figura 3.9 exemplifica os gráficos gerados por este ensaio.

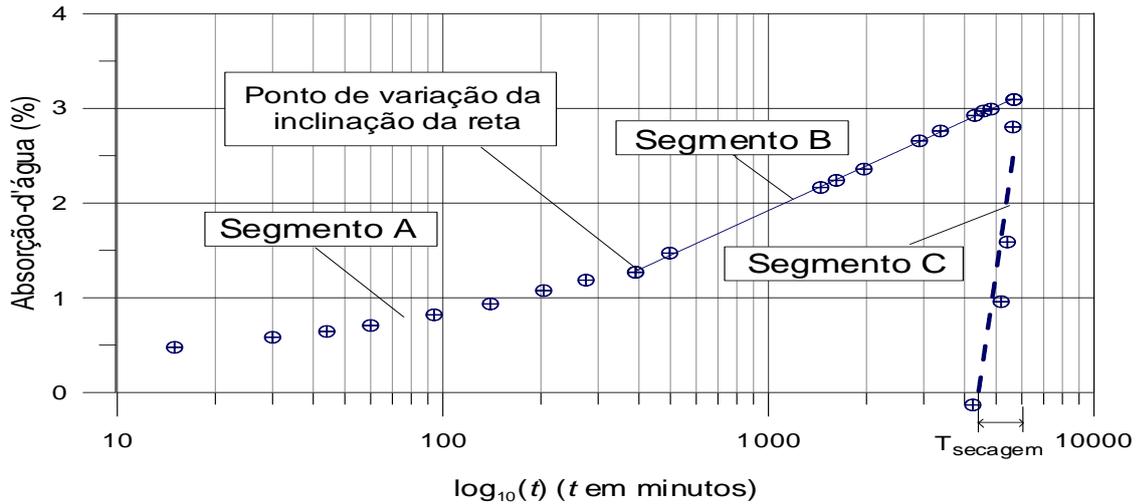


Figura 3.9 – Exemplo de gráfico de velocidade de absorção-d'água para rochas basálticas.

Conforme gráfico anterior, cada análise foi apresentada através de funções de regressão, divididas em três segmentos:

- Segmento A (representado por pontos não conectados por linhas) – curva de saturação: refere-se ao período inicial de leitura, até aproximadamente 600 minutos (pode variar de acordo com a amostra), com velocidade de absorção-d'água $V_{abs,A}$;
- Segmento B (representados por pontos conectados por linhas contínuas) - curva de saturação: refere-se as leituras com velocidade de absorção-d'água $V_{abs,B}$. O tempo em que ocorre a mudança de $V_{abs,A}$ para $V_{abs,B}$ depende de cada amostra;
- Segmento C (representados por pontos conectados por linhas tracejadas) – curva de secagem: valores referente a secagem da amostra em estufa a 110°C, realizada após o período intervalo de saturação. Equivale a curva de declínio de absorção-d'água, com velocidade $V_{abs,sec}$.

Com relação à velocidade de absorção-d'água, trata-se do coeficiente angular das retas de absorção-d'água pelo tempo (Equação 3.5).

$$\alpha_a = \left(\frac{\alpha_{a,2} - \alpha_{a,1}}{\log(t_2) - \log(t_1)} \right) \log(t) + \alpha_{a,0} \Rightarrow V_{abs} = \frac{\alpha_{a,2} - \alpha_{a,1}}{\log(t_2) - \log(t_1)} \quad 3.5$$

sendo, α_a : absorção-d'água;
 V_{abs} : velocidade de absorção-d'água;
 t : tempo de submersão.

Este ensaio também permitiu verificar o tempo necessário para saturação da amostra (considerado como o tempo em que a variação entre uma leitura e outra de absorção-d'água era inferior a 5%) e para secagem em estufa de cada litotipo basáltico (segmento C do gráfico da Figura 3.9). Os dados de saturação tenderam a uma assíntota e os de secagem foram registrados até massa constante.

3.3.4.3 Alteração química

Esta análise utilizou o método de Shalkowski et al. (2009), que é baseado no mecanismo de dissolução dos íons da rocha numa solução aquosa de água bidestilada e deionizada, por um sistema Millipore (Milli-Q).

Os equipamentos usados por esta pesquisa foram:

- pHmetro (Digimed DM 21) e condutivímetro (Analyser 650): mensurar a taxa de dissolução;
- Tela de polyester 150 fios/cm: utilizada como embrulho para as amostras de rocha, cortada em circunferência com 21 cm de diâmetro e amarrada com linha de Nylon;
- Aparelho Treton: equipamento usado para reduzir os blocos de rocha nas variações granulométricas desejadas;
- Peneiras de ensaio e agitador mecânico para controle da granulometria:
 - ✓ 0,063 a 0,125 mm (granulometria usada por Shalkowski et al., 2009);
 - ✓ 0,42 a 1,0 mm;
 - ✓ 1,0 a 2,0 mm; e
 - ✓ 2,0 a 4,75 mm;
- Agitador magnético para homogeneização da solução;

Para cada um dos grupos de amostras foram preparados 25 g nas quatro faixas granulométricas e colocadas em embrulhos de poliéster (Figura 3.10.a). Em paralelo, num béquer de 400 ml foram adicionados 250 ml de água Milipore ($18,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C). Para este recipiente foi confeccionada uma tampa para fixação do eletrodo do pHmetro e do respectivo termômetro de correção de temperatura, do eletrodo medidor de condutividade elétrica e do aparato para segurar o embrulho com amostra (Figura 3.10.b). Durante as leituras, o sistema era protegido com plástico filme para diminuir as interferências do ambiente externo ao ensaio.

A Figura 3.10.c apresenta o sistema de leitura desenvolvido por esta pesquisa.

Quanto à produção das faixas granulométrica, os blocos de rocha possuíam dimensões iniciais de 50 a 150 mm. Inicialmente realizava-se redução manual com auxílio de marreta e bigorna, até obtenção de dimensões de aproximadamente 20 mm. Em seguida os fragmentos foram levados ao aparelho Treton para obtenção de partículas com granulometria desejada.

O aparelho Treton foi selecionado pela facilidade de manuseio e de descontaminação do aparelho (resíduos da redução dos blocos de rocha, poeira, etc). Este equipamento utiliza o sistema de queda livre de 16 kg sobre as partículas de rocha colocadas dentro do tubo guia, que possibilita a redução da rocha nas faixas granulométricas em estudo (Figura 3.11.a).

Após atingir o volume de partículas necessário para as análises, o conjunto de peneiras foi submetido a agitador mecânico por 15 minutos. Em seguida, as partículas recebiam jato de ar para remoção do material pulverulento. Para evitar perda de material, a peneira com a amostra era protegida por peneira de mesma abertura ou inferior (Figura 3.11.b).

A tela que serviria como embrulho das amostras foi deixada inicialmente de molho em água destilada, em seguida seca ao ar por 10 minutos e, então, permanecia em repouso no dissecador até o momento do ensaio.

Anterior as análises, o phmetro era calibrado com solução de pH 7 e 4 e o condutivímetro com solução KCl (0,01N) de acordo com a temperatura ambiente, 22°C . Quanto à calibração do sistema, foi realizada com 250 ml de água Milli-Q sem a tela de embrulho (experimento neutro) e também para a situação com a tela de embrulho sem amostra (experimento de controle). Segundo Shalkowski et al. (2009), o experimento de controle representa as mudanças da interação com a tela. Os autores recomendam que no cálculo da taxa de dissolução seja subtraído do experimento neutro os valores do experimento

de controle. Pode ocorrer ainda, interação da solução com os gases da atmosfera e da própria dissolução da água Milli-Q, contudo o sistema não é capaz de descontar estas interferências.



Legenda

- | | |
|--|--|
| 1. Embrulho com amostra | 7. Tampa com furos nos diâmetros dos eletrodos |
| 2. Fixador de amostra ao recipiente de solução | 8. pHmetro |
| 3. Eletrodo de condutividade elétrica | 9. Condutivímetro |
| 4. Eletrodo de pH | 10. Agitador magnético |
| 5. Termômetro | 11. Cronômetro |
| 6. Béquer de 400 ml | 12. Plástico filme |

Figura 3.10 – Sistema desenvolvido durante a pesquisa para ensaio de alteração química. (a) amostra embalada com fixador. (a) Detalhe para saquinho e fixador de amostra. (b) Detalhe para béquer com tampa adaptada. (c) Equipamentos de aquisição de dados.

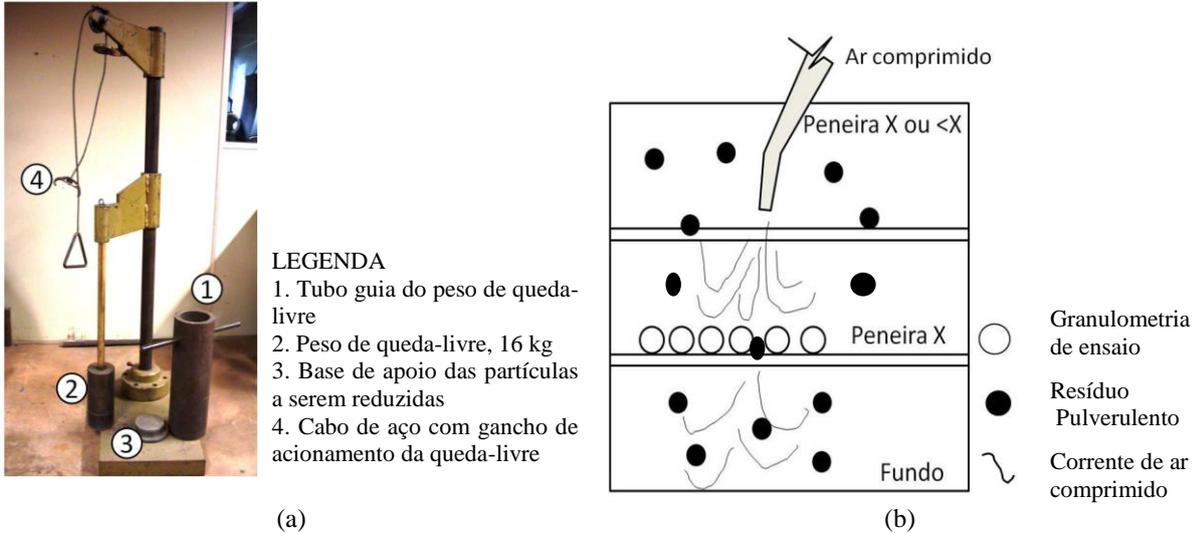


Figura 3.11 – (a) Aparelho Treton usado na redução das amostras para ensaio de alteração química. (b) Esquema de limpeza das partículas com ar comprimido.

Iniciando as análises com as amostras de rocha, imediatamente após a montagem do sistema, a solução mais o embrulho de amostras eram homogêneas em agitador magnético por 5 minutos. Neste intervalo realizavam-se leituras a cada 1 minuto, bem como nos 10 minutos seguintes de repouso (tempo que teoricamente mede o estado de alteração, após isso ocorre reação com íons liberados pela amostra).

Para a validação do ensaio, em um grupo de amostra específico foi repetido duas vezes o mesmo ensaio para as quatro faixas granulométricas. Como não houve variações significativas entre os resultados, decidiu-se realizar um único teste para cada amostra.

Considerou-se ainda neste ensaio a variação da superfície específica teórica (SE), que aumenta consideravelmente com a diminuição das partículas. Esta variável é considerada como sendo a área externa da amostra por unidade de peso. Admitindo-se esféricas as partículas retidas entre as peneiras X e Y , então, respectivamente, considera-se que os diâmetros variam entre d_X e d_Y . Logo, multiplicando-se a relação área (A) sobre volume (V) pelo inverso da densidade aparente da amostras, tem-se o valor da superfície específica teórica, conforme Equação 3.6.

$$SE = \frac{A}{V} \cdot \frac{1}{\rho_a} = \frac{4\pi \left(\frac{r_x + r_y}{2} \right)^2}{\frac{4\pi}{3} \left(\frac{r_x + r_y}{2} \right)^3} \cdot \frac{1}{\rho_a} \frac{[cm^2]}{[cm^3] \cdot [g/cm^3]} \quad 3.6$$

$$\Rightarrow SE = \frac{6}{\rho_a \cdot (r_x + r_y)} \left[\frac{cm^2}{g} \right]$$

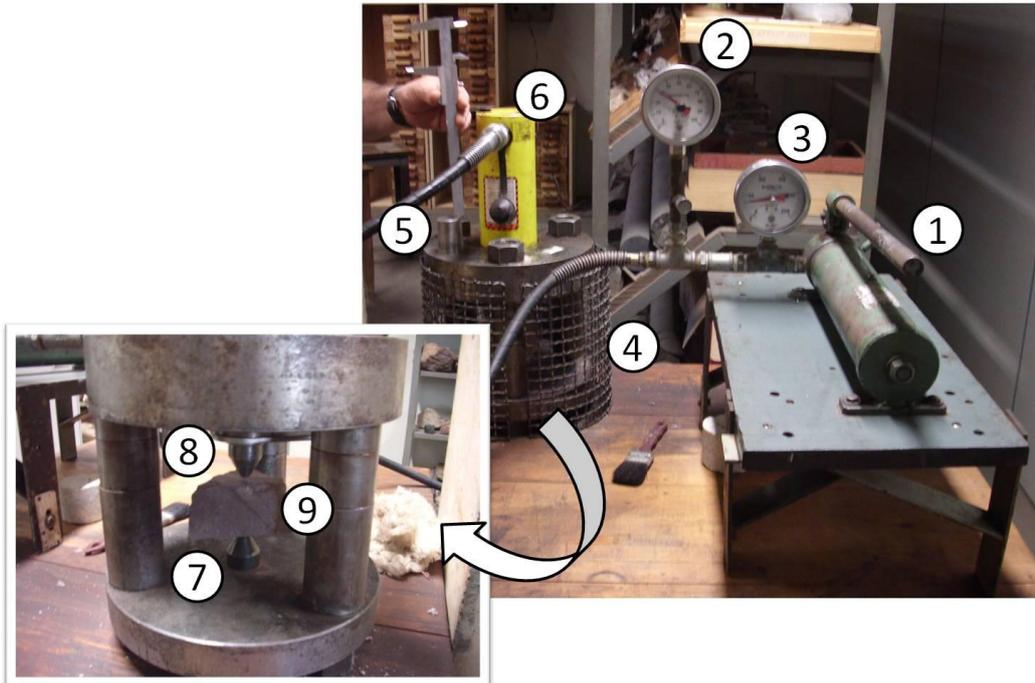
Na análise dos resultados o valor de SE foi multiplicado por 1000 de maneira a melhorar a escala dos gráficos, uma vez que o *software Grafer* não possibilitou formatar escalas com unidades inferiores a 0,01.

3.3.4.4 Compressão pontual

Devido à irregularidade dos blocos de amostras, o ensaio mecânico mais apropriado para obtenção da resistência da rocha foi o de carregamento pontual (*Point Load Test*), também conhecido como compressão pontual ou carregamento puntiforme. Para desenvolvimento dos ensaios foram seguidas as recomendações da ISRM (1972).

O equipamento constituiu-se de dois manômetros, um para leituras de até 100 kgf/cm² e outro para leituras até 200 kgf/cm². Ambos os manômetros foram calibrados com célula de carga CC2 80 (mV/V), que por sua vez foi calibrada em uma prensa hidráulica servocontrolada (MST 815) para conversão dos dados em kN.

Além dos manômetros, o equipamento é composto também por uma bomba manual de óleo com capacidade para 300 kgf/cm² e dois compressores cônicos para aplicação do carregamento, conforme esquema da Figura 3.12.



Legenda

- | | |
|--|-----------------------|
| 1. Bomba manual de óleo | 6. Pistão |
| 2. Manômetro 1 (até 100 kgf/cm ²) | 7. Ponta de aço fixa |
| 3. Manômetro 2 (até 200 kgf/cm ²) | 8. Ponta de aço móvel |
| 4. Grade de proteção | 9. Amostra |
| 5. Pistão para leitura da altura do corpo-de-prova | |

Figura 3.12 – Equipamento usado para ensaio de resistência à compressão pontual.

Como os blocos utilizados possuíam dimensões irregulares, para o cálculo da resistência de carga pontual fez-se necessário extrair três valores principais: W (dimensão da largura do fragmento, menor dimensão lateral), D (distância entre ponteiros de aplicação da carga, sendo a direção mantida perpendicular ao comprimento do fragmento) e P (carga de ruptura registrada no manômetro), conforme Figura 3.13.

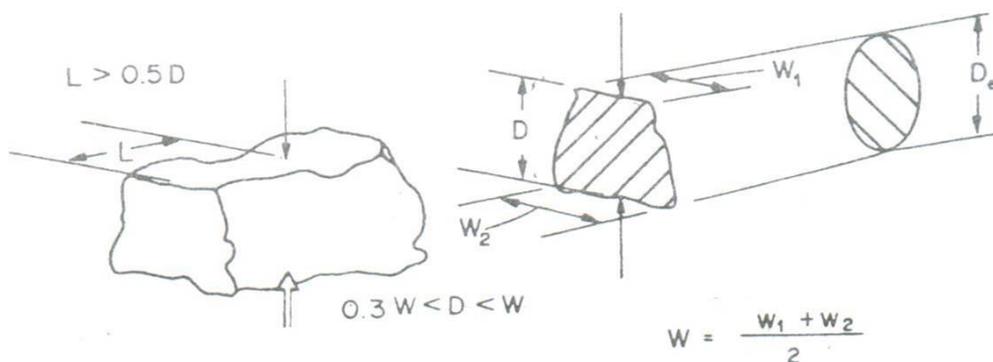


Figura 3.13 – Dimensões dos fragmentos usados em ensaio de carga pontual.

Inicialmente obteve-se o valor correspondente ao diâmetro equivalente D_e (Equação 3.7). Em seguida, determinou-se o valor da força Q , correspondente à carga pontual da equação de calibração entre P e Q . Para os manômetros 1 e 2, seguem as Equações de calibração 3.8 e 3.9.

$$D_e = \frac{4.W.D}{\pi} \quad 3.7$$

$$Q = 0,3331.P - 0,6432 \text{ [kN]} \text{ (Manômetro 1, até } 100 \text{ kgf/cm}^2\text{)} \quad 3.8$$

$$Q = 0,3346.P - 1,7999 \text{ [kN]} \text{ (Manômetro 2, até } 200 \text{ kgf/cm}^2\text{)} \quad 3.9$$

Quando os valores de diâmetros equivalentes são bem distribuídos, D_e^2 e Q são plotados em um gráfico de logXlog. A partir dos dados plotados é possível desenvolver uma reta de regressão linear, para que a partir desta seja calculado a carga correspondente ao diâmetro equivalente igual a 50 mm ($D_e^2 = 2500 \text{ mm}^2$), Q_{50} (kN). Com o valor de Q_{50} determina-se a Resistência de Carga Pontual $I_{S(50)}$, conforme Equação 3.10.

$$I_{S(50)} = \frac{Q_{50}}{50^2} \cdot 1000 \text{ [MPa]} \quad 3.10$$

No caso de fragmentos com valores de diâmetro equivalente muito próximos, não é possível obter uma correção linear entre D_e^2 e Q e a correção para determinar $I_{S(50)}$ deve ser de acordo com as equações 3.11 e 3.12.

$$I_{S(D_e)} = \frac{Q_{D_e}}{D_e^2} \cdot 1000 \text{ [MPa]} \quad 3.11$$

$$I_{S(50)} = I_{S(D_e)} \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \text{ [MPa]} \quad 3.12$$

Com relação à quantidade mínima de amostras ensaiadas recomendadas pela ISRM (1972), 10 exemplares, esta não foi possível de ser atingida durante as etapas de ciclagem devido ao número reduzido de amostras disponível para o ensaio.

3.3.4.5 Ciclagem acelerada

A finalidade de realizar a ciclagem acelerada foi de avaliar a relação entre os ciclos de alteração e as características geotécnicas das amostras. Para isto, foram utilizadas as recomendações da NBR 12696 (1992), sendo realizados 80 ciclos com 14 ± 1 horas de imersão em água comum e 8 ± 1 horas de secagem em estufa a 110°C .

O controle de massa foi realizado com balança de precisão de 0,01g, calibrada regularmente com pesos padrão de 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 g. Devido ao grande volume de amostras, o controle de massa era realizado a cada 5 ciclos. A cada 40 ciclos o tempo de estufa era estendido a 24 h para repetição dos ensaios físico-mecânicos.

O índice de perda massa (I_M) foi calculado de acordo com a Equação 3.13 e os resultados foram plotados em gráfico com escala linear, relacionando a porcentagem de perda de massa com o número de ciclos.

$$I_M = \frac{m_0 - m}{m} (\%) \quad 3.13$$

onde, I_M : índice de perda de massa (%)

m_0 : massa inicial da amostra (g)

m : massa retida na peneira de 19 mm ao final do ciclo (g)

Na avaliação qualitativa ao longo dos ciclos foram observados sinais de desintegração (perda de coesão dos grãos da rocha), fragmentação (descontinuidade em uma face do agregado), rachadura (extensão da fissura por mais de uma dimensão do fragmento), lasqueamento (desprendimentos de material de pequena espessura, como finas “cascas”) e carreamento de argilominerais das vesículas e amígdalas.

Também a cada 40 ciclos foram realizados ensaios de índices físicos e de compressão pontual.

3.3.4.6 *Tratamento dos resultados*

O tratamento dos resultados envolveu as seguintes fases:

- Digitalização dos dados obtidos em laboratório;
- Análise dos pontos discrepantes;
- Consulta as amostras de ensaio para esclarecimento de dúvidas;
- Manipulação de softwares para geração dos gráficos e tabelas;
- Manipulação de softwares gráficos para teste das possíveis correlações.

3.3.4.7 *Interpretação dos resultados*

Esta etapa compreendeu as análises finais do trabalho:

- Análise crítica dos resultados dos ensaios de laboratório;
- Principais conclusões com relação aos valores geotécnicos de laboratório, correlações;
- Verificação da eficiência dos métodos de ensaios adotados para as amostras em estudo e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras foram catalogadas de acordo com a nomenclatura utilizada por Itaipu. O prefixo de 1 a 10 representa a ordem de profundidade em relação à superfície, seguido da identificação do derrame basáltico do qual foi obtida a amostra (E, D, C e B). As descrições foram baseadas nas características tátil-visuais (imagens mesoscópicas) e em microscópio digital de 200X. Com relação à identificação visual do grau de alteração, utilizou-se a classificação da ISRM (1981).

Em dois grupos de amostras foi possível identificar subgrupos de acordo com observações visuais. O Quadro 4.1 resume as amostras analisadas em laboratório, com uma descrição tátil-visual resumida e o respectivo grau de alteração.

Amostra	Descrição litológica	Grau de alteração
1E	Basalto denso cinza escuro	A1
2D _V	Brecha compacta e bem cimentada, porção com predomínio de vesículas e amígdalas de quartzo e calcita	A1
3D _V	Basalto vesicular rosa acinzentado. A matriz possui mineral verde disseminado e as vesículas são revestidas por zeólita e internamente por argilomineral verde	A2
4D	Basalto denso marrom, com micro-amígdalas preenchidas por argilomineral de cor verde moderado e verde amarelado escuro	A2
5D _C	Basalto denso rosado <ul style="list-style-type: none"> • 5D_C - Basalto denso rosado com matriz bastante rosada • 5D_B - Basalto denso rosado com matriz descolorida pela alteração dos plagioclásios 	A1 A2
6C	Basalto vesículo-amígdalóide marrom acinzentado, com argilomineral disseminado na matriz e, as vezes, concentrados em planos. As amígdalas são preenchidas por argilomineral em diferentes tons de verde, calcita ou quartzo	A2
6C' _V	Porção vesicular de brecha. As vesículas são revestidas por mineral verde claro (descolorido), a matriz é descolorida e pouco consistente	A2/A3
7C	Basalto denso cinza escuro <ul style="list-style-type: none"> • 7C_C - Basalto denso cinza escuro sem minerais róseos • 7C_R - Basalto denso cinza escuro, com minerais róseos disseminados na matriz (variante dos plagioclásios) 	A1 A1
8B	Brecha escoriácea marrom avermelhado, com basalto vesículo-amígdalóide	A2/A3
9B	Basalto rosado vesicular-amígdalóide, com minerais verdes disseminado na matriz. As amígdalas são preenchidas por calcita ou quartzo	A2
10B	Basalto denso cinza escuro	A1

Quadro 4.2 – Descrição resumida das amostras analisadas em laboratório e respectivos graus de alteração.

4.1 DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

a) Amostra 1E – basalto denso cinza escuro

Apresenta matriz com pontuações submilimétricas de cor cinza claro (plagioclásio) e verde escuro a preto (minerais máficos, como olivina, piroxênio e anfibólio), Figura 4.1. Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular muito fina. Os blocos analisados apresentam raras amígdalas milimétricas, preenchidas por minerais escuros distribuídos em folhas (filossilicatos). As faces com capa de alteração possuem oxidação variando de branda a leve. O grau de alteração foi classificado como A1.

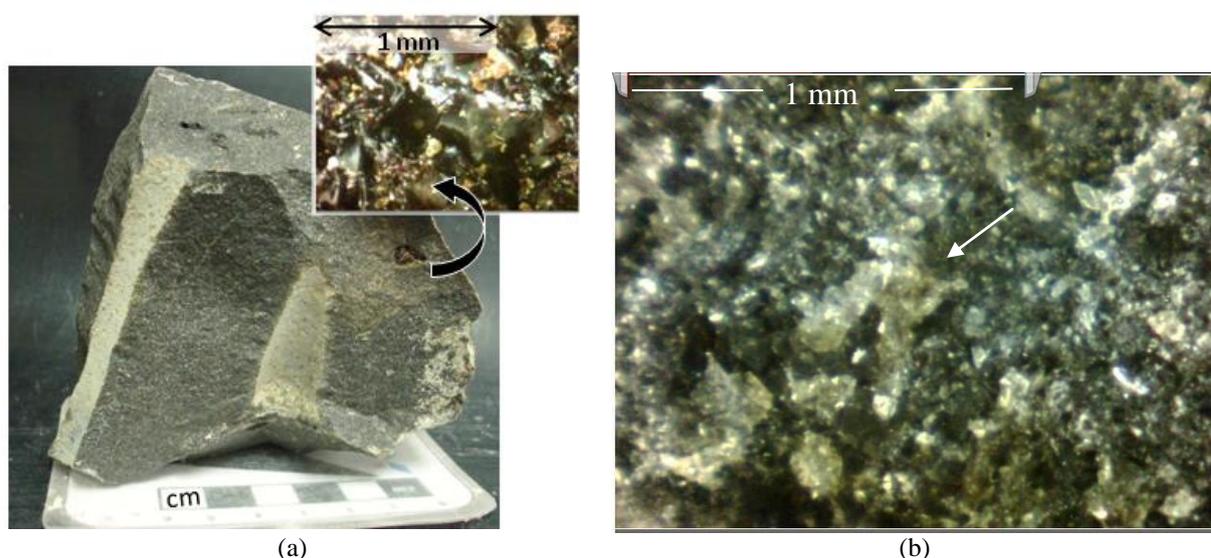


Figura 4.1 – Amostra 1E, basalto denso cinza escuro, (a) imagem mesoscópica com amígdala de filossilicato e (b) microscópica 200X da matriz (detalhe para disposição dos minerais de plagioclásio).

b) Amostra 2D – brecha com basalto rosado vesículo-amigdaloidal

Na porção vesículo-amigdaloidal a matriz apresenta-se com pontuações submilimétricas de cor branca a cinza claro (plagioclásio) e verde escuro a preto (minerais máficos), Figura 4.2 e Figura 4.3. As vesículas variam de milimétricas a centimétricas, sendo

a maioria revestida por mineral de cor verde escura, possivelmente argilomineral. Em alguns blocos predominam amígdalas milimétricas e centimétricas, preenchidas por quartzo e calcita (reage ao HCl), Figura 4.2.a. Algumas amostras também possuem níveis de siltito (Figura 4.2.b). O grau de alteração é A1.

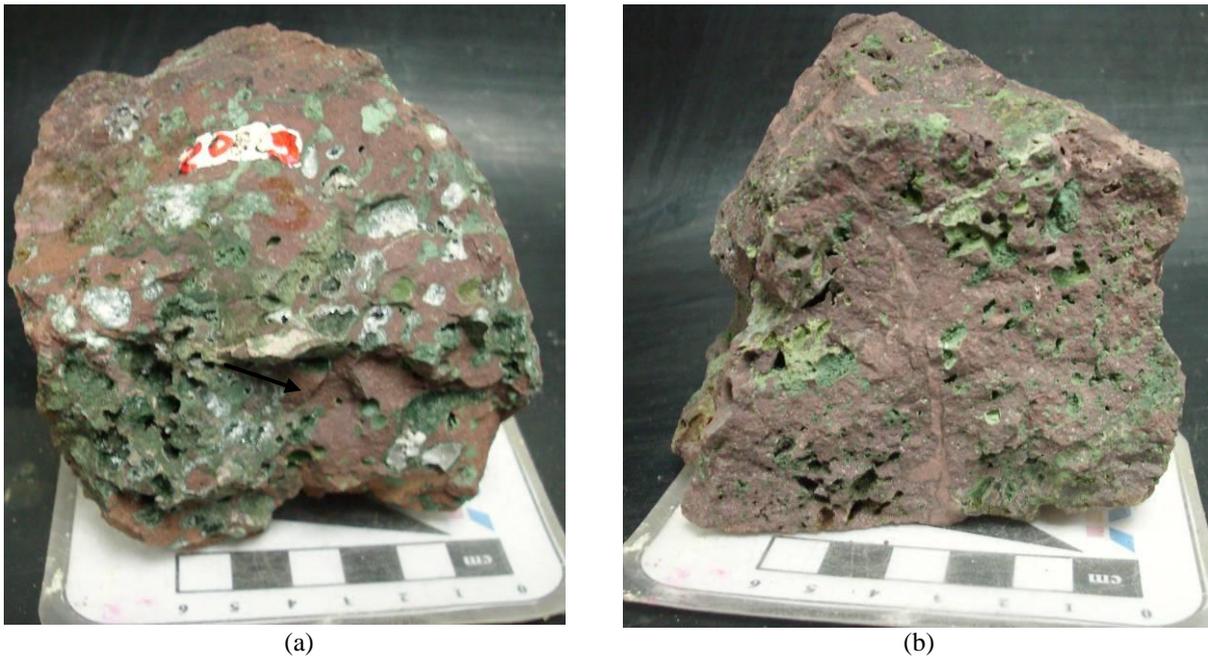


Figura 4.2 – Amostra 2D, (a) imagem mesoscópica de bloco grande quantidade de amígdalas de calcita e (b) de bloco com níveis de siltito.

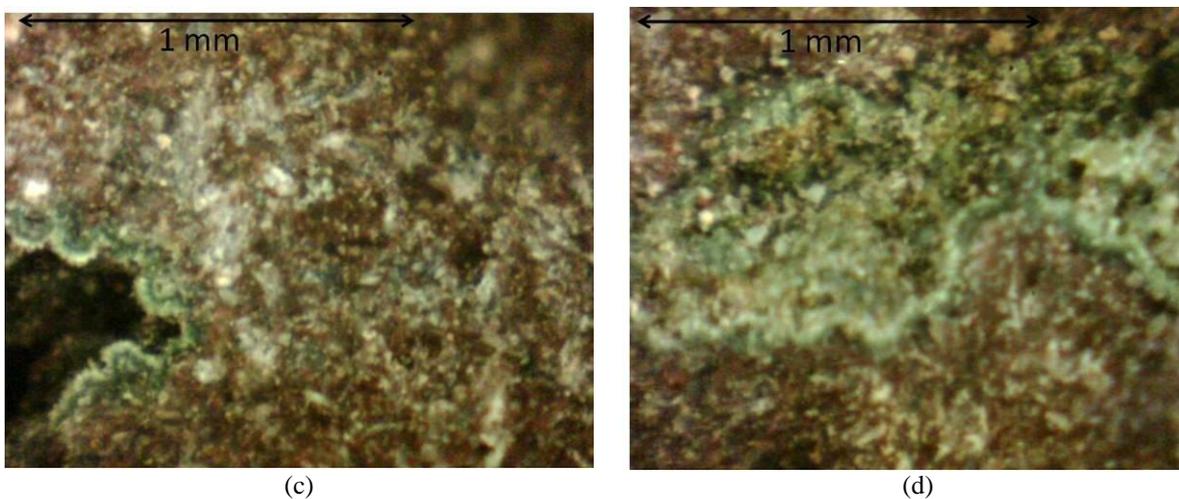


Figura 4.3 – Amostra 2D, brecha com basalto vesículo-amigdaloidal, (a) imagem microscópica 200X da matriz basáltica e (b) de uma microvesícula revestida por argilomineral em processo de argilificação.

c) Amostra 3D_v – basalto rosado vesicular

Basalto rosado acinzentado vesicular. Matriz com pontuações submilimétricas a milimétricas de cor cinza claro (plagioclásio), verde acinzentado claro (possivelmente argilominerais) e verde escuro a preto (minerais máficos), Figura 4.4. As vesículas apresentam tamanho variando de milimétrico a centimétrico, com paredes revestidas por mineral de cor verde escuro e verde claro, possivelmente zeólita. Raras amígdalas com crescimento de quartzo. Os blocos analisados apresentam grau de alteração A2;

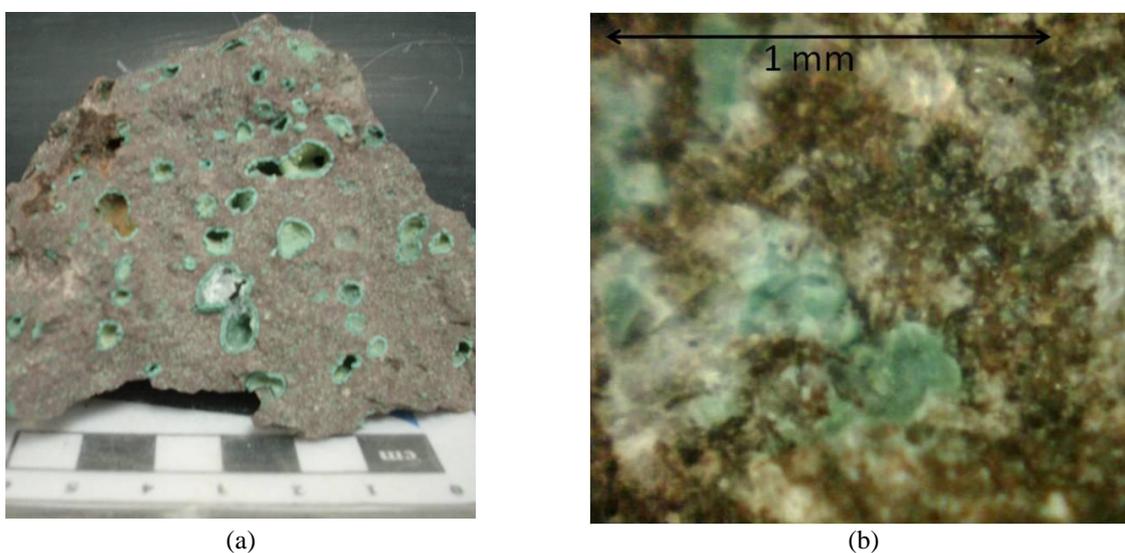


Figura 4.4 – Amostra 3D_v, basalto vesicular, (a) imagem mesoscópica e (d) microscópica 200X da matriz (os minerais de plagioclásios encontram-se mais descoloridos).

d) Amostra 4D – basalto denso rosado, com argilomineral disseminado

Basalto denso marrom com pontuações submilimétricas de cor branca a cinza claro (plagioclásio), verde escuro a preto (minerais máficos) e mineral verde disseminado na matriz. Estudos recentes solicitados por Itaipu e realizados pela UNESP (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”), a partir de análises petrográficas e de difratometria de raios X, indicam que estes minerais verdes são argilominerais expansivos, possivelmente saponita, nontronita ou montmorilonitas (ITAIPU, 2010). Por vezes, estes argilominerais também podem ser encontrados preenchendo amígdalas submilimétricas (< 1 mm), com formas arredondadas e irregulares. Os minerais não apresentam orientação

preferencial e a textura é granular fina. No teste com ácido clorídrico ocorre efervescência, indicando leve presença de calcita na matriz e nas paredes das micro-amígdalas. O grau de alteração foi classificado como A2.

Neste grupo podem ser encontrados blocos com algumas diferenças em termos de coloração da matriz e coloração dos argilominerais presentes nas microamígdalas:

- 4D₁: A matriz é bastante rosada e o argilomineral é verde escuro (Figura 4.5);
- 4D₂: A matriz é levemente descolorida (plagioclásios mais pronunciados) e o argilomineral é verde amarelado moderado (Figura 4.6).

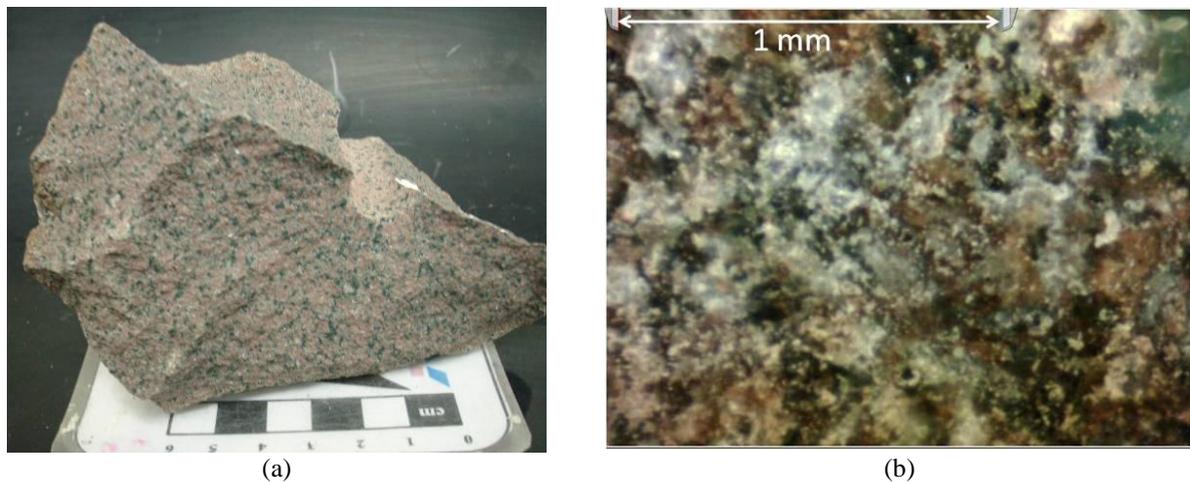


Figura 4.5 – Blocos tipo 4D₁ com matriz rosada e argilomineral verde escuro, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios descoloridos).

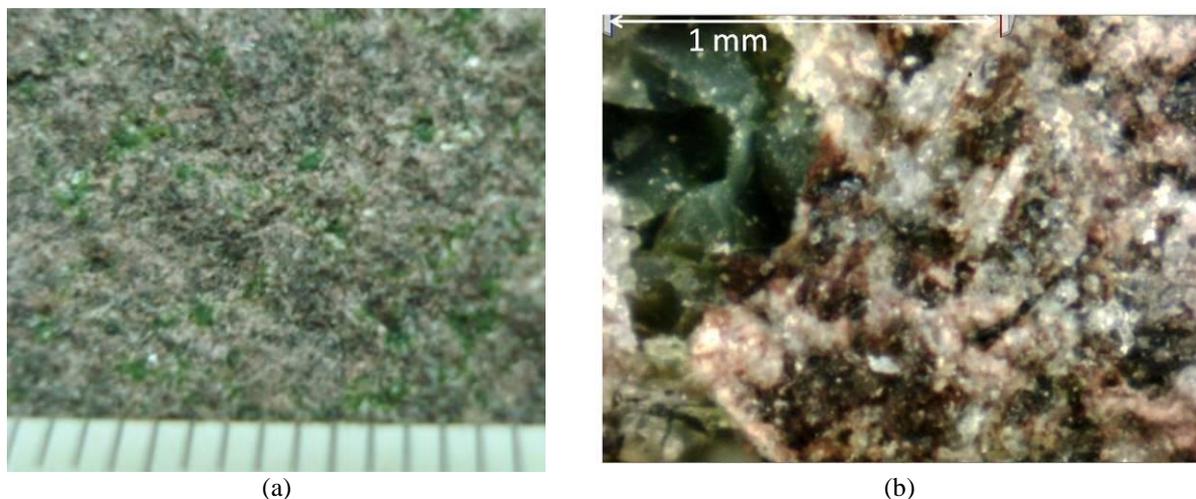


Figura 4.6 – Blocos tipo 4D₂ com matriz levemente descolorida e argilomineral verde amarelado, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios descoloridos e bem mais pronunciados que na amostra 4D₁).

e) **Amostra 5D – basalto denso rosado**

Identificaram-se dois subgrupos nesta amostra, de acordo com a quantidade de plagioclásios alterados e pela presença ou não de argilominerais em microamígdalas:

- 5D_C: Basalto denso marrom com pontuações submilimétricas de cor branca a cinza claro (plagioclásio), verde escuro a preto (minerais máficos) e pontos milimétricos de mineral verde amarelado escuro em pontos esparsos na matriz (Figura 4.7), possivelmente argilominerais. Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular fina. Possui grau de alteração A1;
- 5D_B: Basalto denso marrom com pontuações submilimétricas de cor branca a cinza claro (plagioclásio) e pontos verde escuro a preto (minerais máficos). Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular fina. A principal diferença entre o subgrupo anterior é a maior quantidade e maior tamanho dos minerais de plagioclásios, o que torna os blocos mais descoloridos a olho nu, Figura 4.8. Não é frequente a verificação de argilominerais neste subgrupo. O grau de alteração é A2.

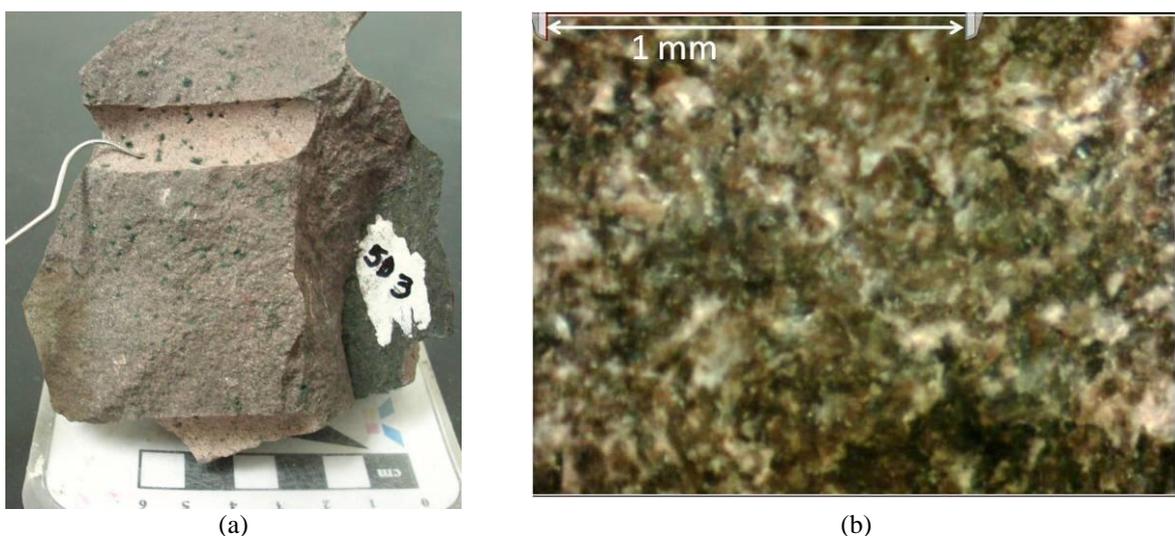


Figura 4.7 – Subgrupo 5D_C, basalto denso rosado com argilomineral em pontos esparsos, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz.

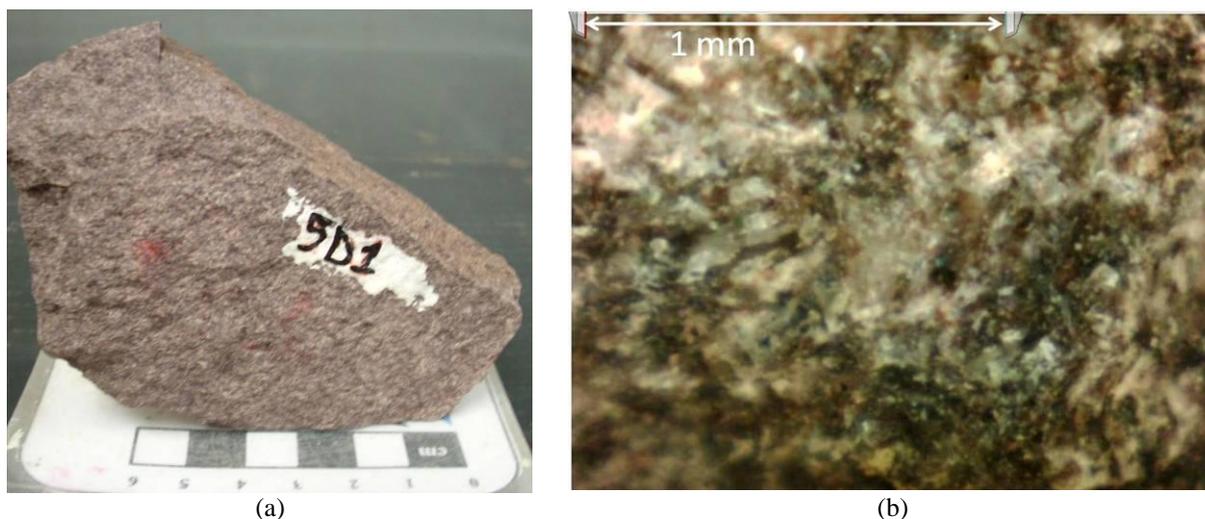


Figura 4.8 – Subgrupo 5D_B, basalto denso rosado com plagioclásios alterados e matriz descolorida, (a) imagem mesoscópica do bloco e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios bastante descoloridos e pronunciados).

f) Amostra 6C – basalto marrom acinzentado vesículo-amigdaloidal

Trata-se de basalto marrom acinzentado vesículo-amigdaloidal, com pontuações submilimétricas de cor cinza claro (plagioclásio), verde escuro a preto (minerais máficos) e verde amarelado escuro (possivelmente argilomineral expansivo), Figura 4.9. As vesículas variam de milimétricas a centimétricas, são revestidas por mineral verde duro (provavelmente zeólita). As amígdalas têm tamanho variando de milimétrico a centimétrico, revestidas por mineral verde duro (provavelmente zeólita), podendo ser preenchidas por mineral verde amarelado escuro a verde médio (possivelmente argilominerais), calcita ou, ainda, com cristalização de quartzo em forma de geodos (Figura 4.10.a). Os blocos frequentemente apresentam níveis com concentrações de, possivelmente, argilominerais expansivos que caracterizam o processo de fraturamento deste grupo (Figura 4.10.b). Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular fina. O grau de alteração foi classificado como A2.

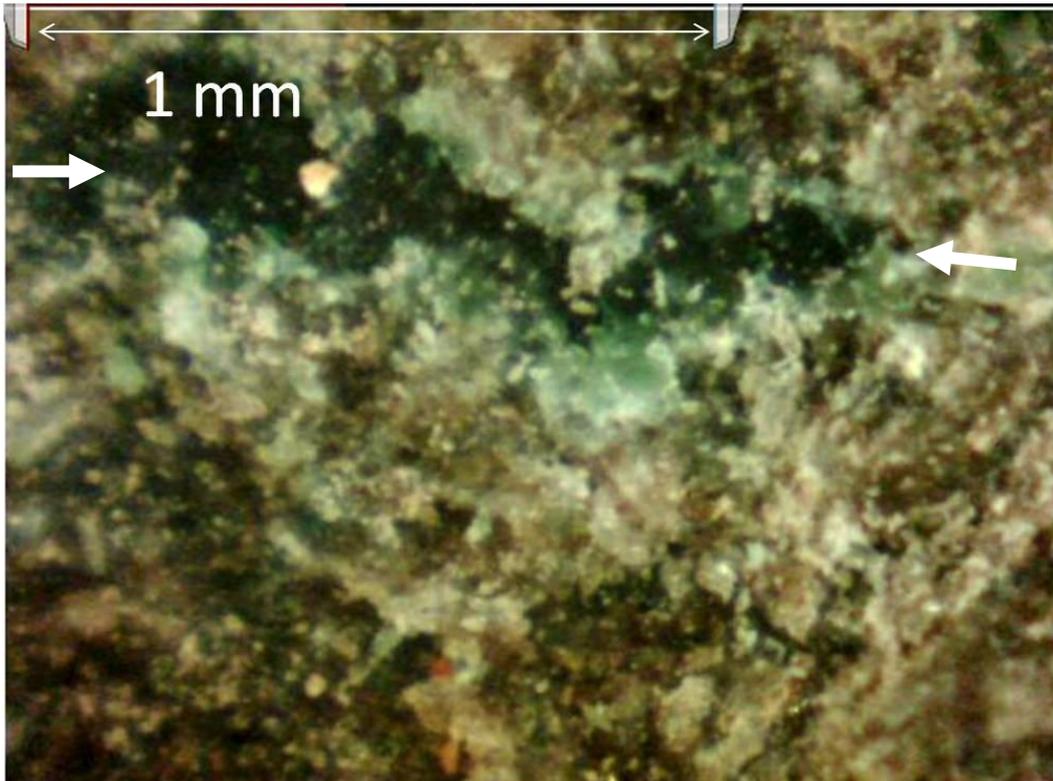


Figura 4.9 – Amostra 6C, basalto vesículo-amigdaloidal, imagem microscópica 200X da matriz. Argilomineral distribuído em plano preferencial e plagioclásios bastante descoloridos na matriz.

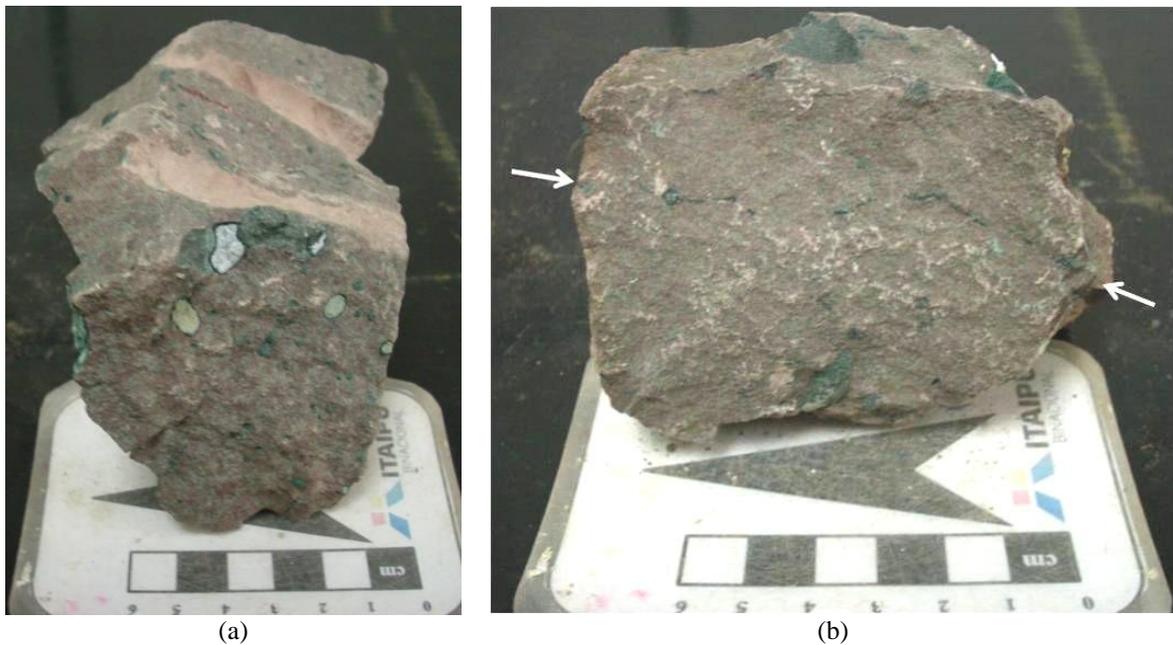


Figura 4.10 – Amostra 6C, basalto vesículo-amigdaloidal, (a) imagem mesoscópica de bloco com amígdalas preenchidas por quartzo e argilominerais e (b) de bloco com argilominerais em níveis de alinhamento.

g) Amostra 6C' – brecha basáltica com basalto vesicular

Brecha basáltica com basalto marrom acinzentado vesicular. Na matriz do basalto vesicular é possível identificar pontos submilimétricos de cor cinza claro (plagioclásio), verde escuro a preto (minerais máficos) e verde amarelado moderado (possivelmente argilomineral expansivo). As vesículas têm tamanho milimétrico (até 5 mm) e raramente centimétrico (de 1 a 3 cm) e são revestidas por mineral verde amarelado moderado, possivelmente argilomineral (Figura 4.11). Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular fina. O grau de alteração foi classificado como A2/A3.

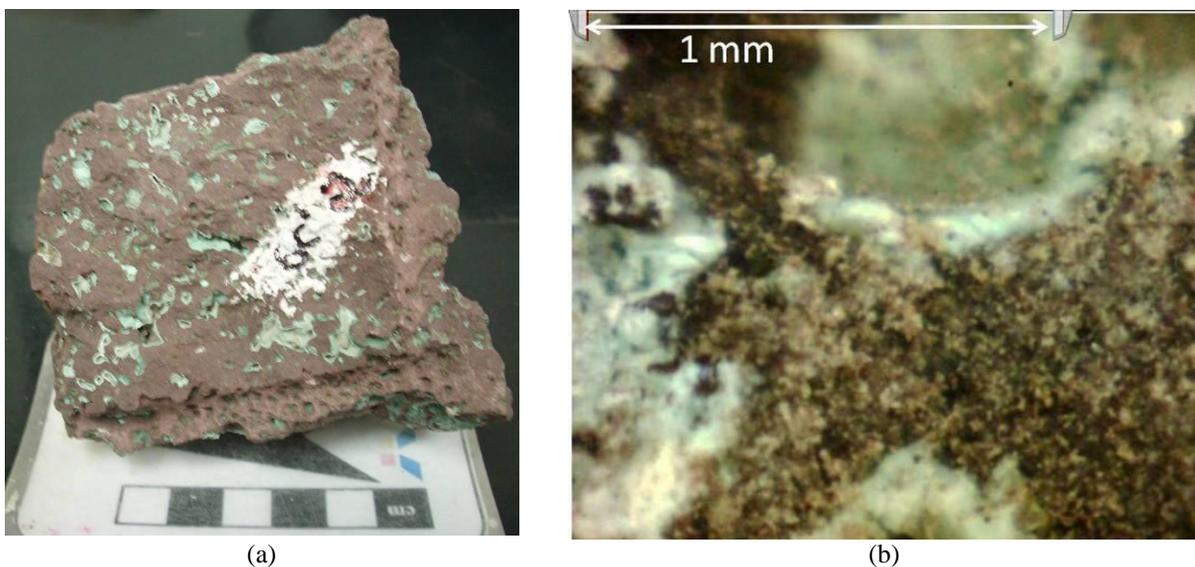


Figura 4.11 – Amostra 6C'_v, brecha com basalto vesicular, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (matriz bastante porosa).

h) Amostra 7C – basalto denso cinza escuro

Identificaram-se dois subgrupos na amostra 7C, de acordo com a presença ou não de minerais róseos:

- 7C_C: Basalto denso cinza escuro (Figura 4.12). Matriz com pontuações submilimétricas (menor que 0,1 mm) de cor cinza claro (plagioclásio) e verde escuro a preto (minerais máficos). Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular muito fina. O grau de alteração foi classificado como A1;

- 7C_R: Basalto denso cinza escuro (Figura 4.13). Matriz com pontuações submilimétricas (<1 mm) de cor cinza claro (plagioclásio) e verde escuro a preto (minerais máficos). Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular muito fina. Disseminados na matriz é visível a olho nu pontos róseos disseminados. Após análise em microscópio de 50X e 200X, verificou-se que estes minerais róseos apresentam-se em fases de cristalização e de acordo com sua disposição na matriz e com o comportamento ao longo dos ciclos de alteração acelerada, foram considerados como uma variante do grupo dos plagioclásios. Grau de alteração classificado como A1.

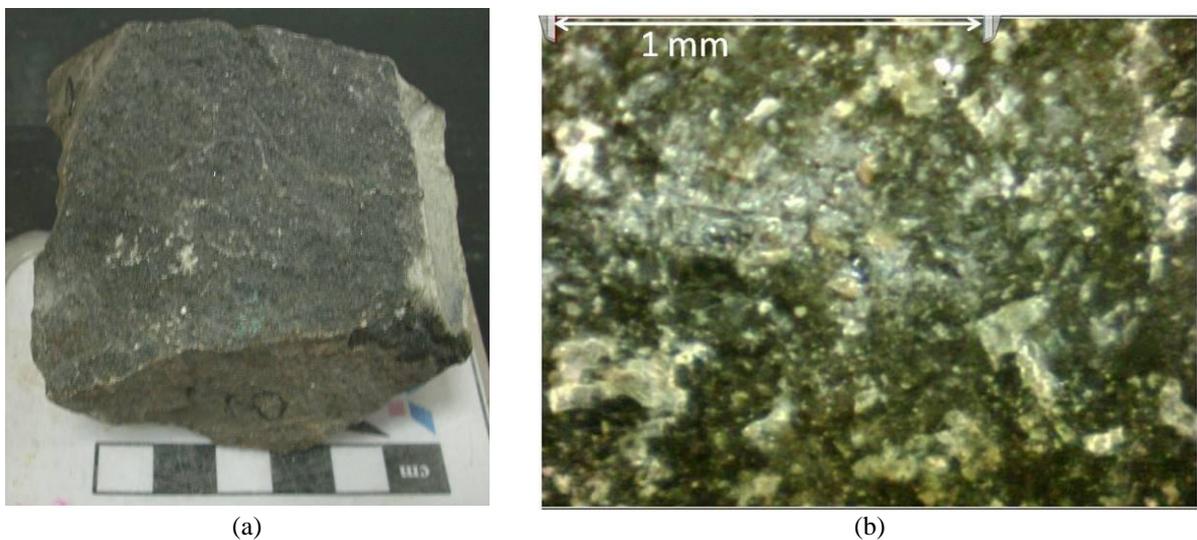


Figura 4.12 – Subgrupo 7C_C, basalto denso cinza escuro sem minerais róseos, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios pouco pronunciados).

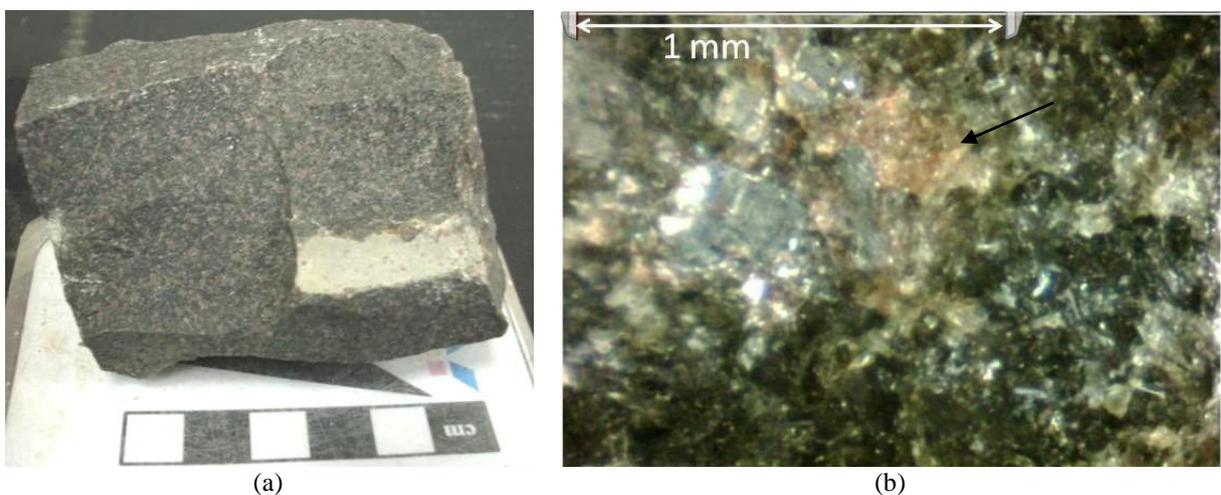


Figura 4.13 – Subgrupo 7C_R, basalto denso cinza escuro com minerais róseos, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (detalhe para pontos róseos, variante dos plagioclásios).

i) **Amostra 8B – brecha escoriácea com basalto vesículo-amigdaloidal**

Brecha com basalto marrom avermelhado vesículo-amigdaloidal. Embora analisada como um único grupo, pode ser considerado algumas diferenças entre os blocos:

- 8B_E: Porção relacionada à presença de argilito/siltito de coloração marrom avermelhado com bastante mineral verde moderado disseminado, possivelmente argilomineral expansivo. Material bastante heterogêneo, podendo apresentar concentrações de cristais quartzo e calcita (Figura 4.14). O grau de alteração é variável de acordo com a concentração de argilominerais, de A2 a A3;
- 8B_V: Parte relativa à presença de basalto rosado vesículo-amigdaloidal (Figura 4.15). A matriz basáltica apresenta pontuações submilimétricas de cor branca a cinza claro (plagioclásio) e verde escuro a preto (minerais máficos). Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular fina. As vesículas variam de milimétricas a centimétricas, revestidas por mineral de cor verde amarelado escuro, possivelmente argilominerais. Raras amígdalas com cristalização de quartzo. Possui grau de alteração A2.



Figura 4.14 – Blocos do tipo 8B_E, (a) imagem mesoscópica de bloco com predomínio de argilomineral e (b) de bloco com predomínio de argilito/siltito.

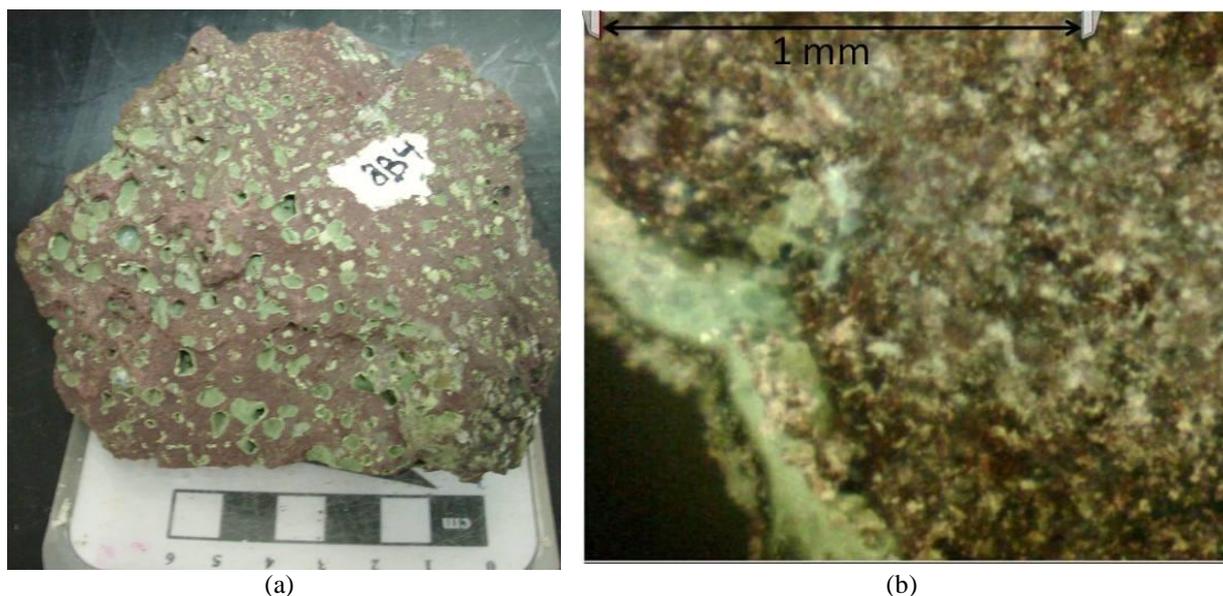


Figura 4.15 – Blocos do tipo 8B_v com basalto vesículo-amigdaloidal, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásio descolorido).

j) Amostra 9B – basalto rosado vesículo-amigdaloidal

Basalto rosado vesículo-amigdaloidal. Amígdalas milimétricas a centimétricas, preenchidas por cristais de quartzo, calcita e argilominerais. As vesículas variam de milimétrico a centimétrico e, assim como as amígdalas, são revestidas por mineral verde duro, possivelmente zeólitas, e com concentração de calcita no contato com a matriz (Figura 4.16). A matriz possui pontuações submilimétricas de cor cinza claro (plagioclásio), verde escuro a preto (minerais máficos) e verde amarelado moderado (possivelmente zeólitas). Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular fina. O grau de alteração foi classificado como A2.

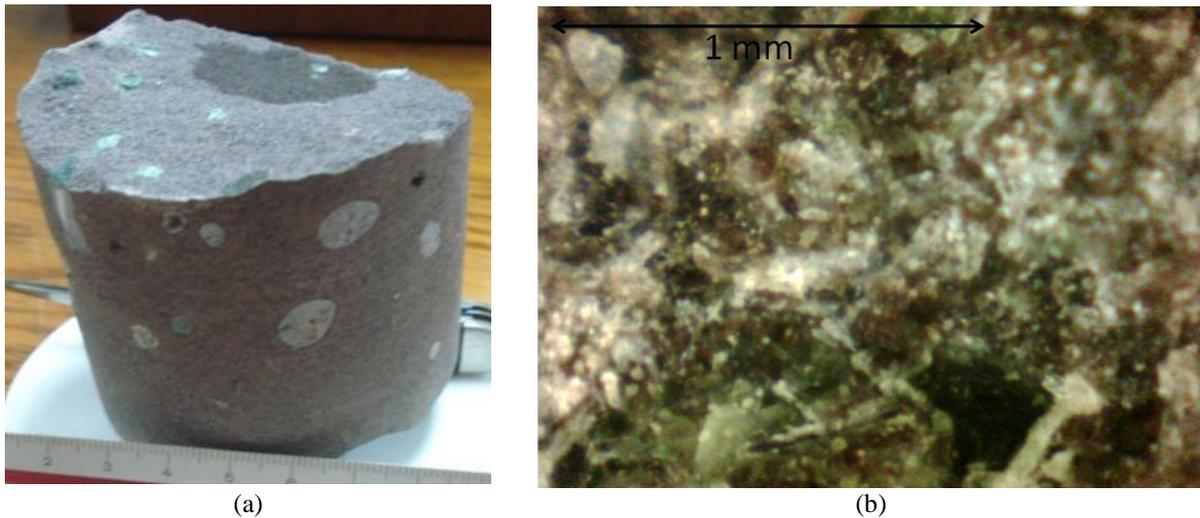


Figura 4.16 – Amostra 9B, basalto rosado vesículo-amigdaloidal, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios descoloridos e pronunciados).

k) Amostra 10B – basalto denso cinza escuro

Basalto denso com coloração cinza escuro. Matriz com pontuações submilimétricas de cor cinza claro (plagioclásio) e verde escuro a preto (minerais máficos). Os minerais não apresentam orientação preferencial e a textura é granular muito fina (Figura 4.17). O grau de alteração foi classificado como A1.

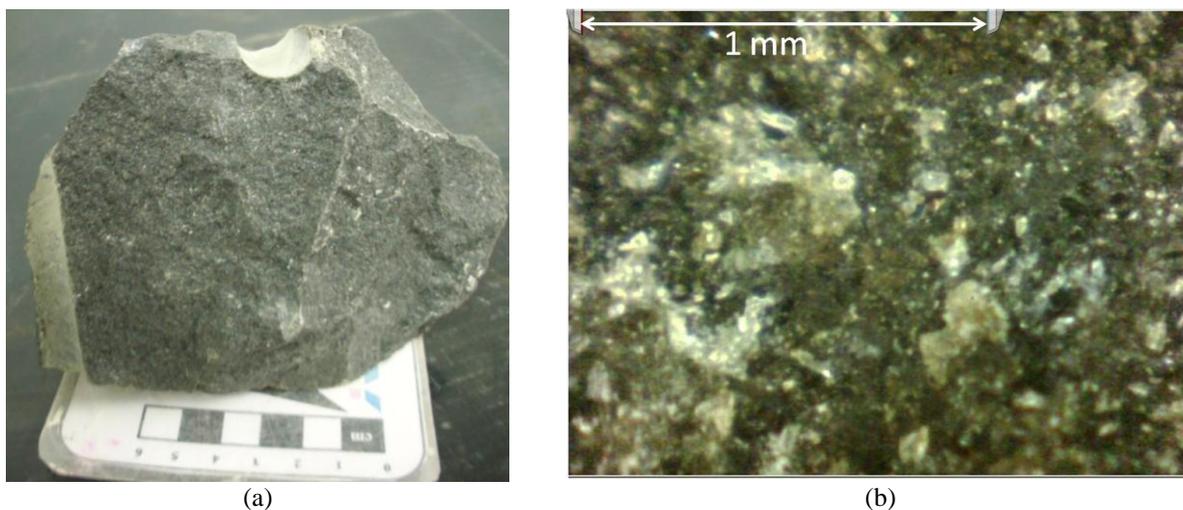


Figura 4.17 – Amostra 10B, basalto denso cinza escuro, (a) imagem mesoscópica e (b) microscópica 200X da matriz (plagioclásios sem indícios de alteração).

4.2 CONDIÇÕES INTEMPÉRICAS

A região de Itaipu está localizada no sul do Brasil, numa região de clima subtropical úmido mesotérmico (IAPAR, 2000). De maneira a quantificar e qualificar o intemperismo da região em estudo analisou-se os dados hidrometeorológicos num período de seis anos, de 2003 a 2008, disponibilizados pela Estação Meteorológica da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

Para verificar o tipo de intemperismo químico utilizou-se o equacionamento de Weinert (1984), com base na precipitação anual e na taxa de evaporação do mês mais quente do ano. Com relação à quantificação da intensidade da ação do intemperismo local, foram plotados no ábaco de Peltier (1950) os valores de precipitação média anual e temperatura média anual.

A Tabela 4.1 e a Figura 4.18 apresentam, respectivamente, o índice climático N e a classificação de Peltier (1950) de cada ano analisado.

Tabela 4.1 - Índice climático N para a região de Itaipu.

Ano	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Mês mais quente do ano	Abril	Março	Fevereiro	Janeiro	Fevereiro	Dezembro
$T_{máx,mensal}$ (°C)	32,5	32,4	33,4	32,0	32,0	32,4
$T_{méd,anual}$	22,3	22,2	22,7	22,8	22,1	22,5
E_i (mm)	252,3	283,3	234,1	234	167,8	293,7
P_a (mm)	1837,7	1528,3	1940,8	1733,8	1480,3	1447,6
N	1,65	2,22	1,45	1,62	1,36	2,43

Legenda

$T_{máx,mensal}$: temperatura máxima do mês mais quente do ano (°C)

$T_{méd,anual}$: temperatura média anual (°C)

E_i : taxa de evaporação do mês mais quente do ano (mm)

P_a : precipitação anual total (mm)

N : índice climático

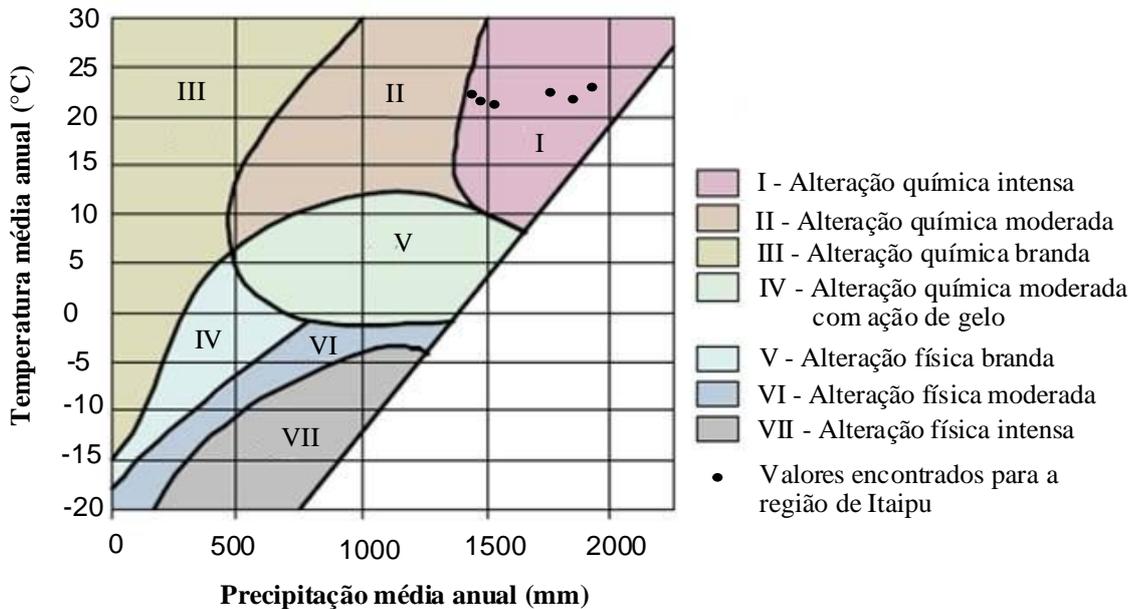


Figura 4.18 – Classificação do intemperismo da região de Itaipu pelo ábaco de Peltier (1950).

Verificou-se que os valores de N foram inferiores a 5, então, segundo Weinert (1984), o intemperismo predominante é o químico. Analisando este índice juntamente com a classificação de Peltier (1950), Figura 4.18, foi identificado que a alteração química que ocorre na região de Itaipu é do tipo intensa.

Neste sentido, verifica-se que quantidade de água disponível pela água de precipitação e as altas temperaturas deste local, promovem a intemperização química dos materiais rochosos expostos a esses agentes.

Além disso, a região tem como característica a grande variação de temperatura ao longo do próprio dia. Conforme o histograma de frequência da Figura 4.19, esta variação pode chegar a 22,5°C num mesmo dia. No período de 2003 a 2008, o mais comum é a oscilação térmica de 9 a 13,5 °C no dia. Com isso, pode-se dizer que pela alta oscilação térmica a rocha pode apresentar fissuras de retração/contração, facilitando a penetração de água e, conseqüentemente, acelerando o intemperismo químico. A alteração física pode ser ainda maior naqueles horizontes litológicos com presença de minerais expansivos, também pela abertura de fissuras.

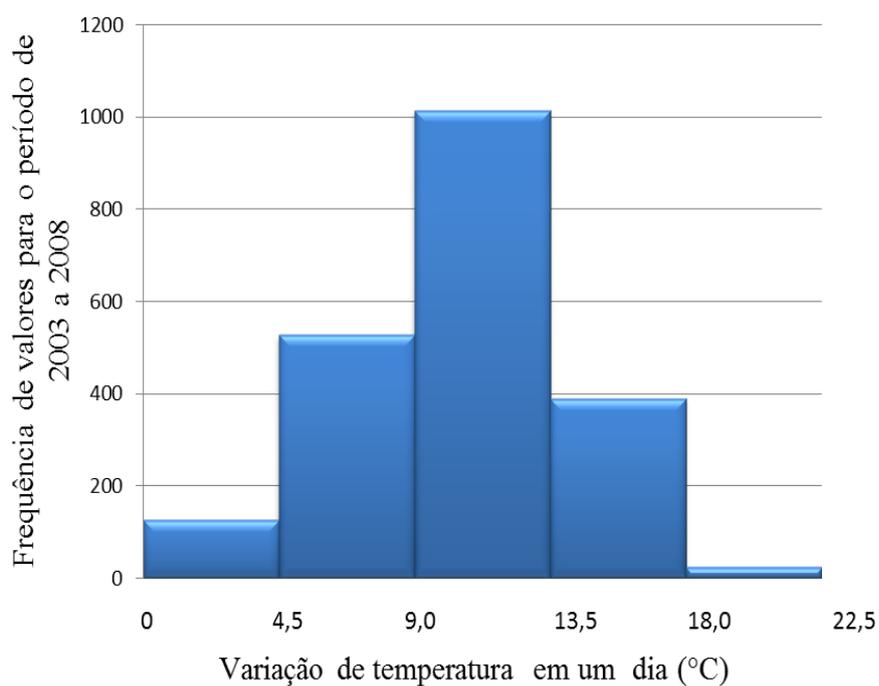


Figura 4.19 – Histograma de frequência da variação de temperatura num mesmo dia.

4.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.3.1 Caracterização geológico-geotécnica básica anterior à ciclagem acelerada

4.3.1.1 Índices físicos: densidade aparente, porosidade aparente e absorção-d'água

Os valores iniciais dos ensaios de índices físicos estão apresentados em ordem decrescente na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Índices físicos anteriores à ciclagem em laboratório.

Amostra	Descrição	N° de amostras	ρ_a (kg/m ³)			η_a (%)			α_a (%)		
			μ	σ	cv	μ	σ	cv	μ	σ	cv
10B	Densos cinza	11	2959,85	25,85	0,87	0,75	0,22	29,39	0,25	0,07	29,31
7C _R	Densos cinza com minerais róseos	5	2933,94	10,94	0,37	0,80	0,15	18,27	0,27	0,05	18,65
1E	Densos cinza	11	2936,80	15,82	0,54	1,15	0,35	29,99	0,39	0,12	30,34
7C _C	Densos cinza	5	2925,53	9,17	0,31	1,22	0,11	9,26	0,42	0,04	9,56
5D _C	Denso rosado	4	2851,70	27,89	0,98	2,46	0,47	19,10	0,86	0,17	20,00
5D _B	Denso rosado com minerais brancos	9	2788,66	49,64	1,78	3,37	1,07	31,85	1,21	0,40	33,32
4D	Denso rosado c/ argilomineral disseminado	12	2755,30	75,46	2,74	4,76	1,76	36,89	1,75	0,69	39,37
9B	Basalto rosado vesículo-amigdaloidal	11	2725,47	23,68	0,87	4,79	0,84	17,52	1,76	0,32	18,38
6C	Basalto rosado vesículo-amigdaloidal	13	2686,19	22,47	0,84	5,38	0,63	11,62	2,01	0,24	12,06
3D _V	Basalto rosado vesicular	2	2517,51	2,43	0,10	7,07	0,17	2,40	2,81	0,06	2,30
8B*	Brecha escoriácea vesículo-amigdaloidal	9	2369,08	36,06	1,52	12,43	0,68	13,01	5,25	0,68	13,01
6C'	Porção vesicular de brecha	10	2330,78	72,63	3,12	12,61	1,51	11,99	5,42	0,72	13,25
2D _V	Porção vesicular de brecha	8	2301,70	93,71	4,07	13,38	1,59	11,91	5,84	0,87	14,95

Legenda ρ_a : densidade aparente (kg/m³) η_a : porosidade aparente (%) α_a : absorção-d'água (%) μ : média σ : desvio padrão

cv: coeficiente de variação (%)

* Os valores dos subgrupos 8B_V e 8B_E foram próximos e, por isso, apresentados em um único valor.

Conforme pode ser visto, as amostras de basalto denso cinza (10B, 7C e 1E) apresentaram os maiores valores de densidade aparente e os menores para porosidade aparente e absorção de água. Com relação aos subgrupos 7C_R e 7C_C foi possível identificar uma variação de aproximadamente 54% nos parâmetros de η_a e α_a , comprovando que a variante dos plagioclásios (pontos róseos) não é produto de alteração. Porosidade e absorção-d'água tendem a aumentar com a alteração e nas amostras com pontos róseos estes parâmetros são inferiores ao outro subgrupo.

Na sequência, observa-se que os subgrupos 5D_C e 5D_B apresentam valores distintos nos três parâmetros em análise. Esta variação é pequena em relação à densidade aparente, aproximadamente de 2%, mas em relação à porosidade aparente e à absorção-d'água estes

parâmetros são 40% maiores nas amostras 5D_B com alteração nos plagioclásios (pontos brancos pronunciados, Figura 4.8.d).

As amostras 4D e 9B apresentaram valores muito próximos, assim como as 6C e 3D_V, em ambos os quatro grupos é visível a olho nu a presença de argilomineral verde na matriz. Estes minerais, pela característica de expansibilidade, podem provocar microfissuras no interior dos blocos, influenciando consideravelmente em seus índices físicos.

Os menores valores de ρ_a e maiores de η_a e α_a , foram observados para a porção vesicular das brechas 8B, 6C'_V e 2D. Nas duas primeiras, os resultados podem ser associados à presença de argilominerais, e na última, possivelmente, pela conexão entre vesículas. Ressalta-se ainda, que em campo estes valores podem ser maiores dada a heterogeneidade na constituição destas brechas basálticas.

Comparando estes valores com os encontrados na bibliografia para amostras são semelhantes, também da Formação Serra Geral (Tabela 2.3, Item 2.3 – Métodos de Avaliação e Classificação), verificou-se similaridade com relação aos basaltos densos. Contudo, considerando os 36 anos de alteração em campo, os valores de porosidade e absorção para basaltos com argilomineral disseminado, vesiculares e brechas, estão menores do que os encontrados por outros autores para material são. Esta diferença pode ser associada a fatores como:

- Método de seleção do material analisado: quebra manual, mecânica, outros;
- Quantidade de amostras: quanto maior o número de amostra, maior a representatividade dos resultados;
- Procedimentos de ensaio: por exemplo, o uso ou não de água destilada, o tempo de saturação (alguns procedimentos utilizam 24 h outros 48 h de submersão em água para determinação da massa saturada e submersa), a temperatura e o período de secagem em estufa;
- Peculiaridades petrográficas das amostras: materiais de um mesmo litotipo podem apresentar variantes que interferem nos resultados dos ensaios, como foi o caso da amostra 5D que apresentou diferentes níveis de alteração nos minerais de plagioclásios.

4.3.1.2 Velocidade de absorção-d'água

Conforme descrito na metodologia deste trabalho, este ensaio foi baseado nos procedimentos propostos por Hamrol (1961).

De maneira a melhorar a interpretação visual, os resultados estão apresentados em diferentes gráficos, de acordo com o comportamento das amostras. Cada ensaio é constituído de uma função de saturação e uma função de secagem de cada amostra analisada. Com relação à função de saturação, esta foi dividida em dois segmentos, a partir do ponto em que ocorre a variação da velocidade de absorção-d'água. Neste sentido, tem-se $V_{abs,A}$ para o primeiro segmento da curva de saturação (sem linha entre os pontos) e $V_{abs,B}$ para o segundo segmento (com linha contínua entre os pontos). A maior velocidade entre o segmento A e B é representada por $V_{abs,máx}$. Com relação a velocidade de secagem equivale a $V_{abs,sec}$ (com linha pontilhada entre os pontos).

A Figura 4.20 ilustra o comportamento das amostras com menor velocidade de absorção-d'água, os basaltos densos cinza escuros. Destaca-se o basalto 10B com absorção-d'água máxima ($\alpha_{a,máx}$) de aproximadamente 0,4 % e $V_{abs,máx}$ de 0,16 (g/g/min). Já para as amostras 1E, 7C_C e 7C_R, $\alpha_{a,máx}$ foi de 0,7% e $V_{abs,máx}$ variou entre 0,3 e 0,1 g/g/min, nesta ordem.

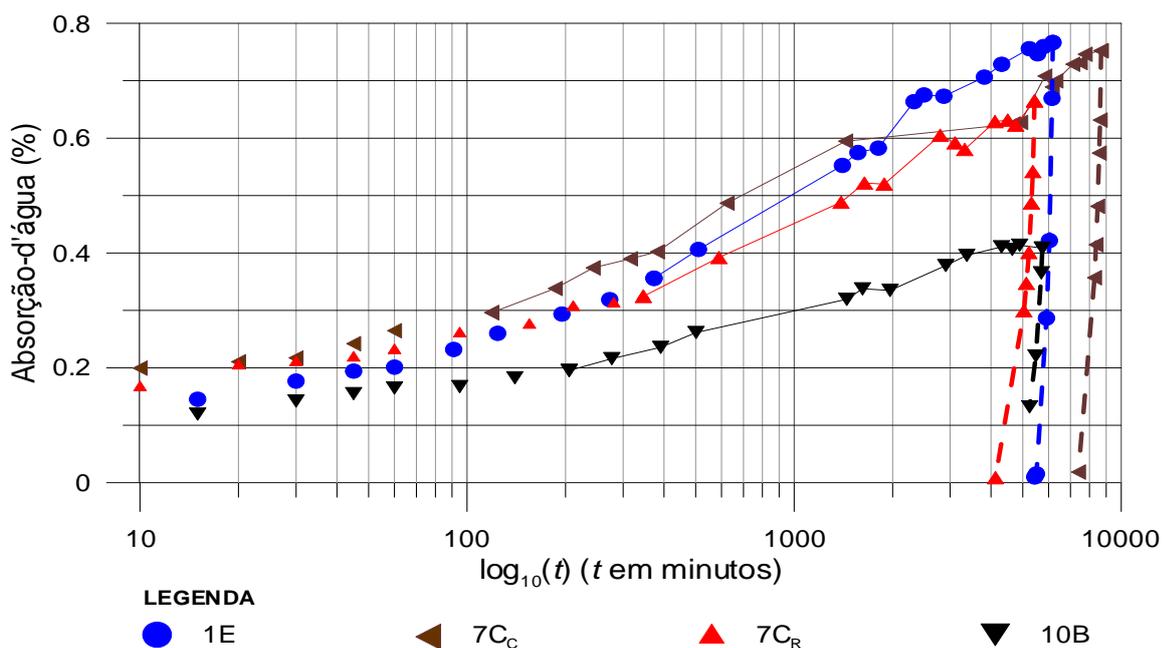


Figura 4.20 – Velocidade de absorção-d'água, basaltos densos (cinza escuro) 1E, 7C_C, 7C_R e 10B.

Na sequência, a Figura 4.21 apresenta os basaltos densos rosados. Considerando as amostras 5D_C, 5D_B e 4D, nesta ordem, os valores de $\alpha_{a,máx}$ variam de 1,3 a 2,6% e $V_{asb,máx}$ de 0,7 a 0,9 g/g/min. Os maiores valores foram registrados para o basalto com argilomineral disseminado (4D), uma vez que estes possuem maior capacidade de absorção-d'água e, além disso, podem propiciar microfissuração na matriz do basalto pelas reações expansivas quando em contato com a água. A presença de plagioclásios alterados no subgrupo 5D_B também influenciou levemente nos resultados, possivelmente pela microfissuração da matriz (a alteração dos plagioclásios também é uma reação expansiva).

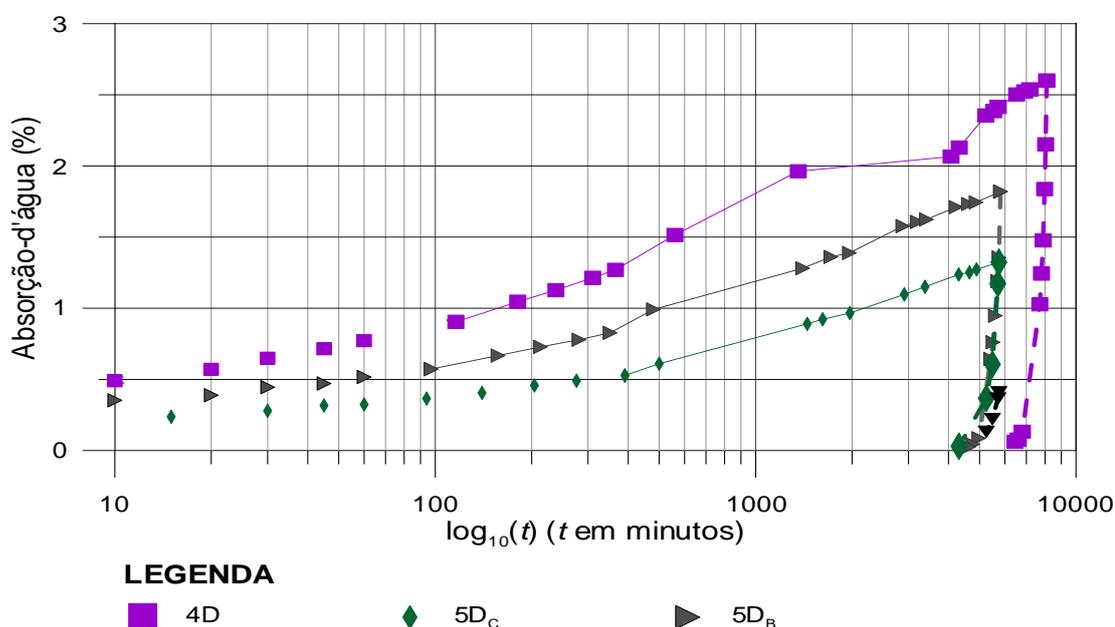


Figura 4.21 – Velocidade de absorção-d'água, basaltos densos rosados 4D (com argilomineral), 5D_C e 5D_B.

Os basaltos vesiculares e vesículo-amigdalóides também apresentaram comportamento semelhante, Figura 4.22. A amostra 3D_V por apresentar maior concentração de vesículas, além da presença de argilomineral na matriz e no revestimento das vesículas, atingiu $\alpha_{a,máx}$ de 4,5 e $V_{asb,máx}$ de 1,8 g/g/min. As amostras 6C e 9B, ambas possuem argilomineral na matriz e as vesículas e amígdalas mais espaçadas que a anterior, sendo que na primeira há planos preenchidos com argilomineral. Os valores de $\alpha_{a,máx}$ e de $V_{asb,máx}$ foram próximos de 3,1 % e 1,6 g/g/min, respectivamente.

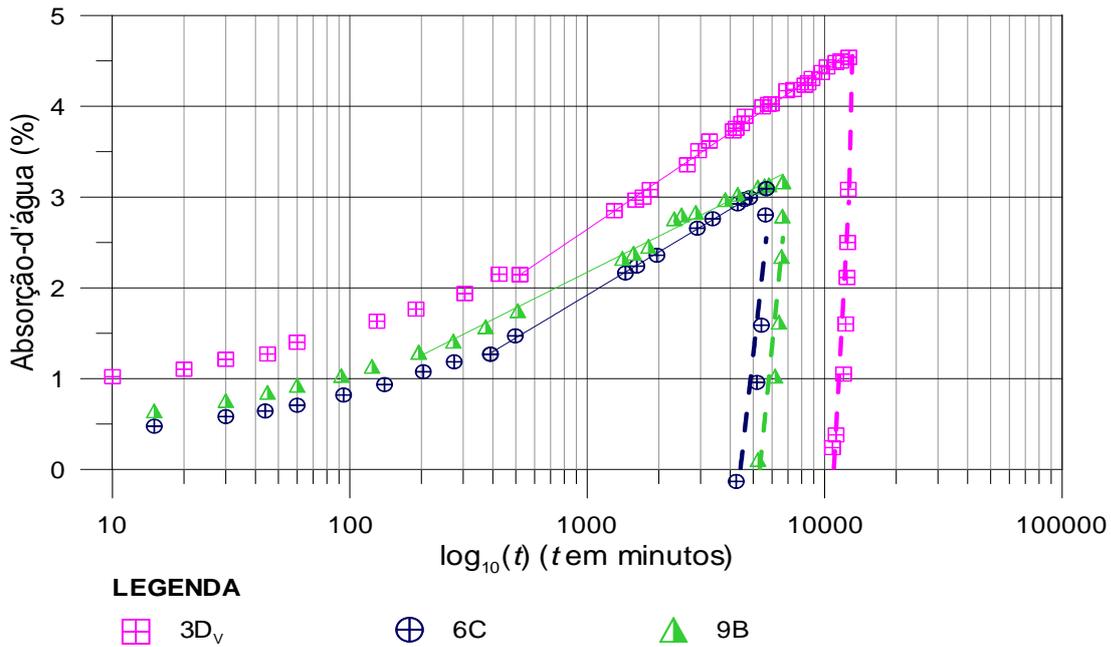


Figura 4.22 – Velocidade de absorção-d'água, amostras 3D_v, 6C e 9B.

Os maiores valores de $\alpha_{a,máx}$ e de $V_{asb,máx}$ foram observados para as porções vesiculares das brechas basálticas analisadas, com aproximadamente 6,4% e 2,1 g/g/min, respectivamente (Figura 4.23). Destaca-se o subgrupo 8B_E, que apresentou 8,8% e 2,7 g/g/min, possivelmente, por apresentar maior concentração de argilomineral em relação às outras amostras.

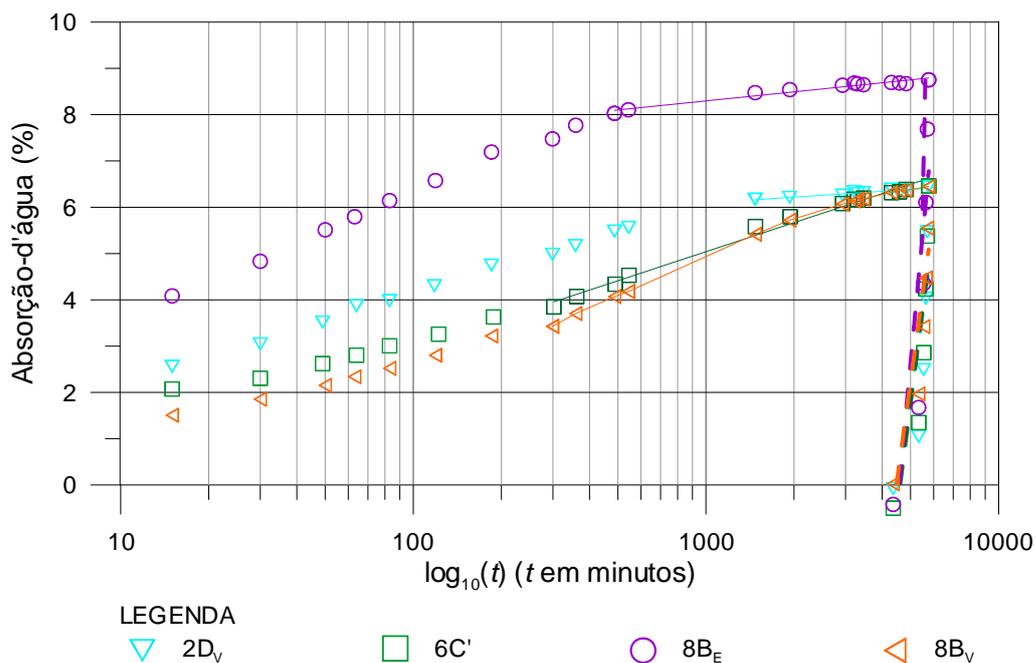


Figura 4.23 – Velocidade de absorção-d'água, amostras 2D_v, 6C', 8B_E e 8B_v.

A Tabela 4.3 resume os valores de $\alpha_{a,máx}$ e de V_{abs} para as curvas de saturação e secagem de cada amostra individualmente. Comparando os resultados desta tabela com os gráficos expostos anteriormente, verifica-se que $V_{abs,B}$ (no segmento B da curva de saturação) tende a aumentar em relação à $V_{abs,A}$ para a maioria dos grupos de rocha. Com exceção das amostras 2D_V e 8B_B, $V_{abs,B}$ tende a diminuir, possivelmente pela alta porosidade aparente e capacidade de absorção, que possibilita atingir a saturação mais rapidamente já nas primeiras horas de ensaio.

Tabela 4.3 – Parâmetros de absorção-d'água máxima, velocidade de absorção-d'água e tempo de secagem.

Amostra	Descrição	$\alpha_{a,R}$ <i>máx</i>	$V_{abs,A}$ (W%/min)	$V_{abs,B}$ (W%/min)	$V_{abs,S}$ (W%/min)	ΔT_{Sat} (horas)	ΔT_{Sec} (horas)
10B		0,41	0,06	0,16	7,05	48,0	9,2
7C _C	Basalto denso	0,75	0,09	0,24	9,49	24,0	22,4
1E	cinza escuro	0,77	0,12	0,34	12,68	38,8	13,4
7C _R		0,66	0,13	0,1	4,77	27,4	22,8
5D _B	Basalto denso	1,82	0,19	0,68	15,91	48,0	28,5
5D _C	rosado	1,32	0,23	0,73	9,22	48,0	24,9
4D	Basalto denso com argilomineral	2,6	0,39	0,91	21,77	22,7	28,5
9B		3,17	0,54	1,31	26,04	38,8	24,9
6C	Basalto vesículo-amigdalóide	3,09	0,59	1,57	23,37	48,5	25
3D _V		4,54	0,71	1,76	46,62	44,0	32,1
6C'		6,46	1,45	2,08	49,3	24,6	24,5
8B _V		6,45	1,55	2,42	46,2	24,6	24,5
2D _V	Brecha basáltica	6,44	1,87	0,42	44,99	24,6	24,5
8B _B		8,75	2,65	0,65	66,99	9,1	24,5

Legenda

$\alpha_{a,R, máx}$: absorção-d'água máxima (valores tendem a uma assíntota)

$V_{abs,A}$: velocidade de absorção-d'água do primeiro segmento da curva de saturação (segmento A)

$V_{abs,B}$: velocidade de absorção-d'água do segundo segmento da curva de saturação (segmento B)

$V_{abs,S}$: velocidade de absorção-d'água da curva de secagem (segmento C)

ΔT_{sat} : tempo necessário para atingir saturação

ΔT_{sec} : tempo de secagem após saturação da amostra em estufa

Através deste ensaio também foi possível analisar o tempo necessário para secagem das amostras, neste caso, para blocos de rocha basáltica com massa entre 150 e 250 gramas. De maneira geral, 24 horas é suficiente para secagem da maioria das amostras, conforme última coluna da Tabela 4.3. Este tempo em estufa a 110°C estaria em excesso para as amostras 1E e 10B e insuficiente para as amostras 3D_V, 4D e 5D_B, que exigiria um tempo de até 31 horas para secagem total. Com relação ao tempo de saturação, varia entre 20 e 48 horas, com exceção do subgrupo 8B_B que necessitaria de apenas 9 horas.

4.3.1.3 Alteração química

Os gráficos na sequência apresentam os valores de pH e condutividade para os 10 minutos iniciais de leitura. Após este tempo podem ocorrer reações químicas entre os minerais, a água e as moléculas do ar, o que não mais representaria o estado de alteração das amostras. A Figura 4.24 apresenta os valores de pH para a faixa granulométrica de $0,42 < \# < 1,0$ mm.

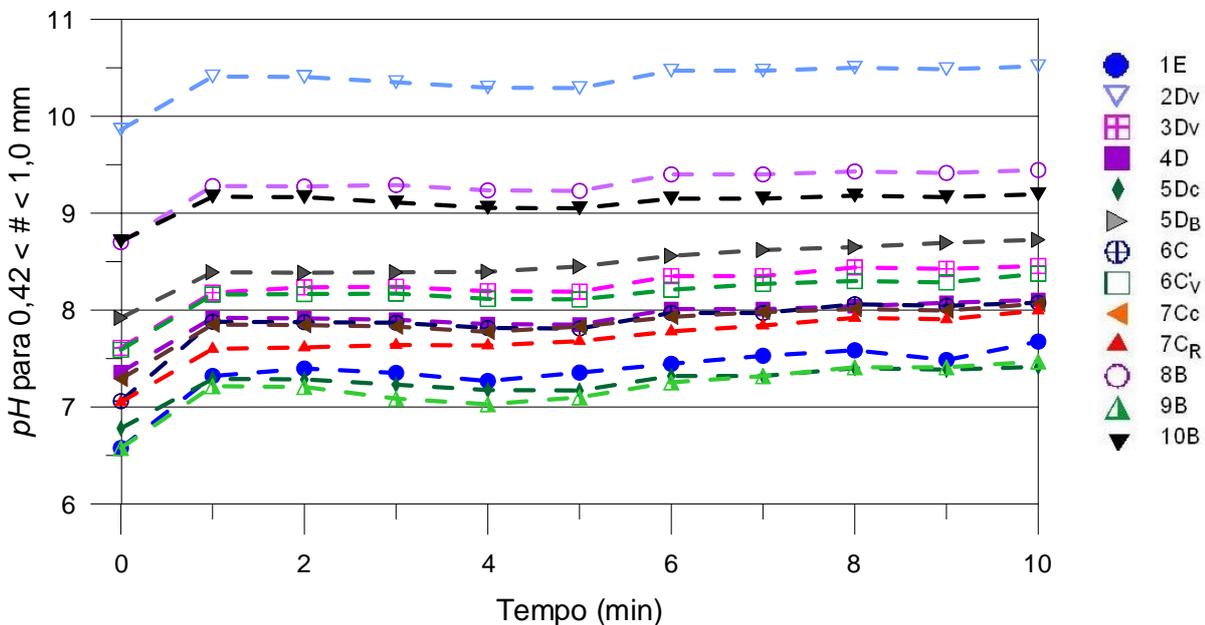


Figura 4.24 – Alteração química, análises de pHmetria para granulometria $0,42 < \# < 1,0$ mm.

Com exceção do primeiro minuto de leitura, verifica-se que os valores permanecem praticamente constantes ao longo das leituras (a variação entre os segundos 5 e 6 é muito pequena e não interferiu nas análises dos resultados). Neste sentido, verifica-se que não está ocorrendo reações químicas e que os valores realmente equivalem ao estado de alteração das amostras. Com relação à variação da primeira leitura, deve-se a interferência da agitação magnética de homogeneização da solução.

Como para todas as granulometrias analisadas o comportamento durante o período de leitura foi o mesmo, os valores médios de cada faixa foram resumidos na Figura 4.25.

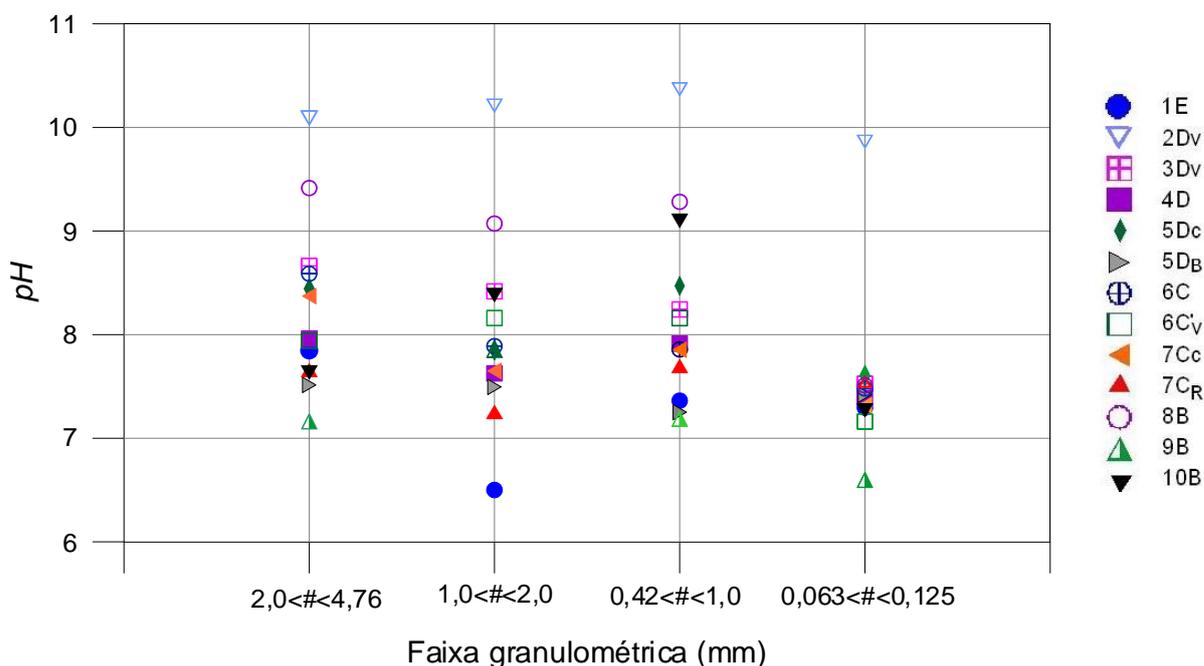


Figura 4.25 – Alteração química, valores médios de pH de acordo com a faixa granulométrica.

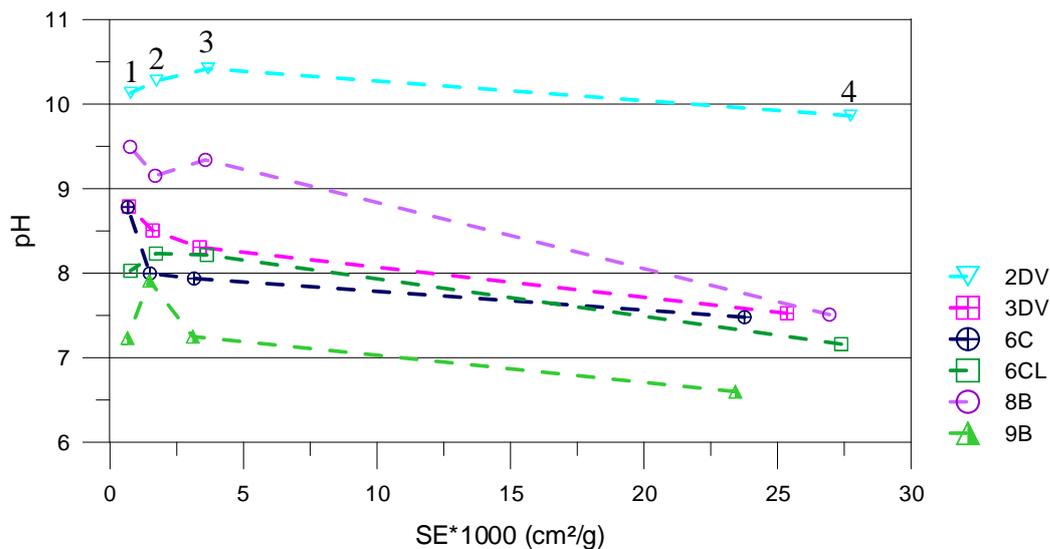
Com relação aos valores de pH das três maiores granulometrias, $2,0<#<4,76$ mm, $1,0<#<2,0$ mm e $0,42<#<1,0$ mm, apresentaram comportamento bastante semelhante. Verifica-se uma tendência alcalina na solução, sendo mais acentuada para os grupos de rocha oriundos de brechas basálticas $2D_v$ ($pH \approx 10$) e $8B$ ($pH \approx 9$). Este comportamento está associado à presença de amígdalas de calcita nestas amostras.

As amostras com argilomineral na matriz ou no revestimento e preenchimento de vesículas e amígdalas, $3D_v$, $4D$, $6C$ e $6C'$, apresentaram valores entre 7,6 e 8,7. Isto porque os argilominerais promovem adsorção de H^+ e, conseqüentemente, aumento de concentração de OH^- na solução. A amostra $9B$, embora com presença de argilomineral e calcita em algumas amígdalas, apresentou valores mais próximo do pH neutro, talvez pelo equilíbrio com íons de ferro presente na superfície (efeito da britagem) que tendem à pH mais ácidos. O restante das amostras, basaltos densos, permaneceram dentro da faixa de pH 7,0 a 7,5.

Especificamente sobre amostra $1E$, basalto denso cinza escuro, observou-se um comportamento levemente ácido ($pH = 6,5$) na faixa granulométrica de $1,0<#<2,0$ mm. Imagens realizadas por microscópio digital de 50X não apontaram justificativa para este resultado, podendo ser associado a maior concentração de íons positivos na superfície dos grãos (efeito da britagem).

A faixa de grãos menores ($0,063 < \# < 0,125$ mm,) apresentou comportamento diferenciado da demais granulometrias. Praticamente todas as amostras reduziram-se para a faixa de pH entre 7,0 e 7,6, com exceção das amostras 2D_V ($pH \approx 10$) e 9B ($pH \approx 6,5$). A primeira pela elevada concentração de calcita e a segunda, possivelmente, pelo efeito de britagem que eleva a acidez.

A primeira tentativa de associar os resultados a um comportamento padrão foi a de correlacionar o pH com a superfície específica teórica de cada faixa granulométrica. Admite-se inicialmente que a rocha britada possui em sua superfície íons positivos (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , etc) que fixam OH^- e íons negativos (O^{2-}) que fixam H^+ , e que por isso, tornam as faces dos grãos cada vez mais ácidas (FARJALLAT, 1972). Faria sentido, então, que a menor granulometria apresenta-se mais acidez, que em equilíbrio com a alcalinidade dos argilominerais e calcita, atingissem valores próximos ao pH neutro, Figura 4.26.

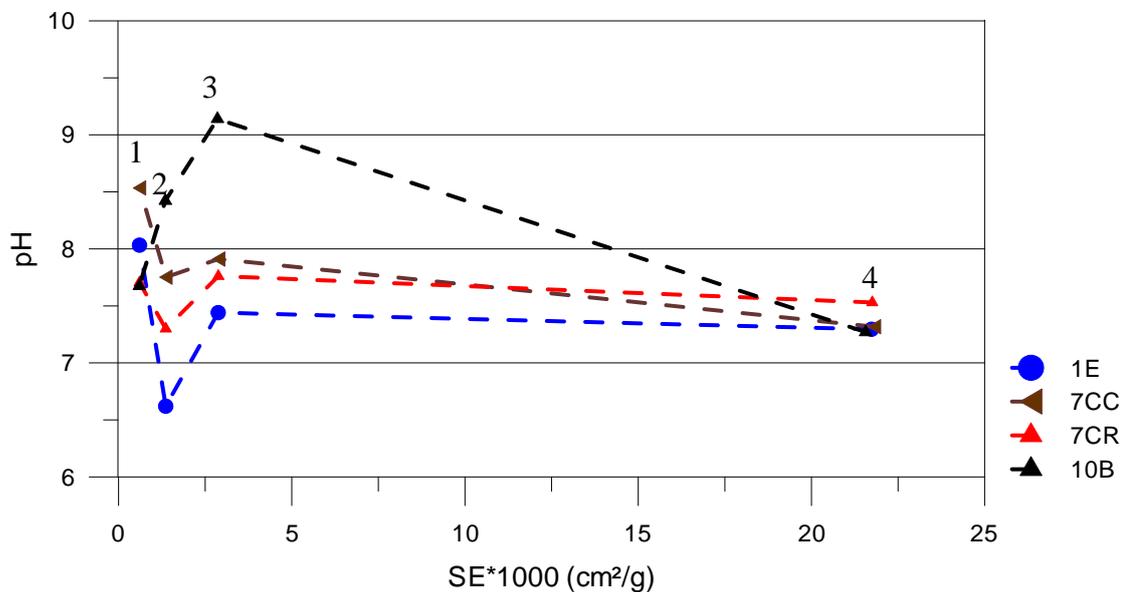


Faixas granulométricas: 1 → $2,0 < \# < 4,76$ mm; 2 → $1,0 < \# < 2,0$ mm; 3 → $0,42 < \# < 1,0$ mm; 4 → $0,063 < \# < 0,125$ mm

Figura 4.26 – Correlação entre pH e superfície específica para basaltos vesículo-amigalóides e brechas basálticas, com presença de argilomineral e/ou calcita na matriz ou em amígdalas.

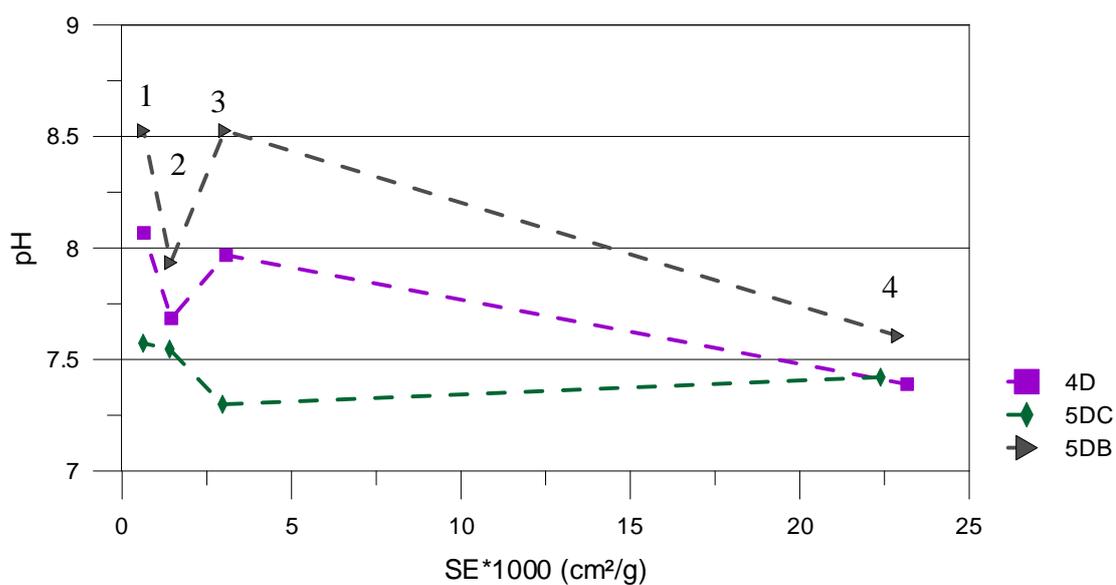
Contudo, para veracidade da hipótese anterior, os basaltos densos deveriam apresentar maior acidez quanto menor fosse a granulometria. Observa-se pelas Figura 4.27 e Figura 4.28 que os valores pH métricos não são correlacionáveis à superfície específica e que os pH s da menor faixa granulométrica são condicionados a algum tipo de contaminante. O contaminante

mais provável é o material pulverulento da britagem, difícil de ser removido devido à pequena dimensão dos grãos (próximos a uma areia fina).



Faixas granulométricas: 1 → 2,0<#<4,76 mm; 2 → 1,0<#<2,0 mm; 3 → 0,42<#<1,0 mm; 4 → 0,063<#<0,125 mm

Figura 4.27 – Correlação entre pH e superfície específica para basaltos densos cinza escuros.



Faixas granulométricas: 1 → 2,0<#<4,76 mm; 2 → 1,0<#<2,0 mm; 3 → 0,42<#<1,0 mm; 4 → 0,063<#<0,125 mm

Figura 4.28 – Correlação entre pH e superfície específica para basaltos densos rosados.

Quanto as análises de condutividade elétrica (*CE*), os valores permaneceram ainda mais estáveis que as leituras de *pH*, praticamente constantes ao longo dos dez minutos iniciais de leitura, inclusive no minuto inicial do ensaio. Por isso, são apresentados apenas os valores médios de *CE* de cada amostra, Figura 4.29.

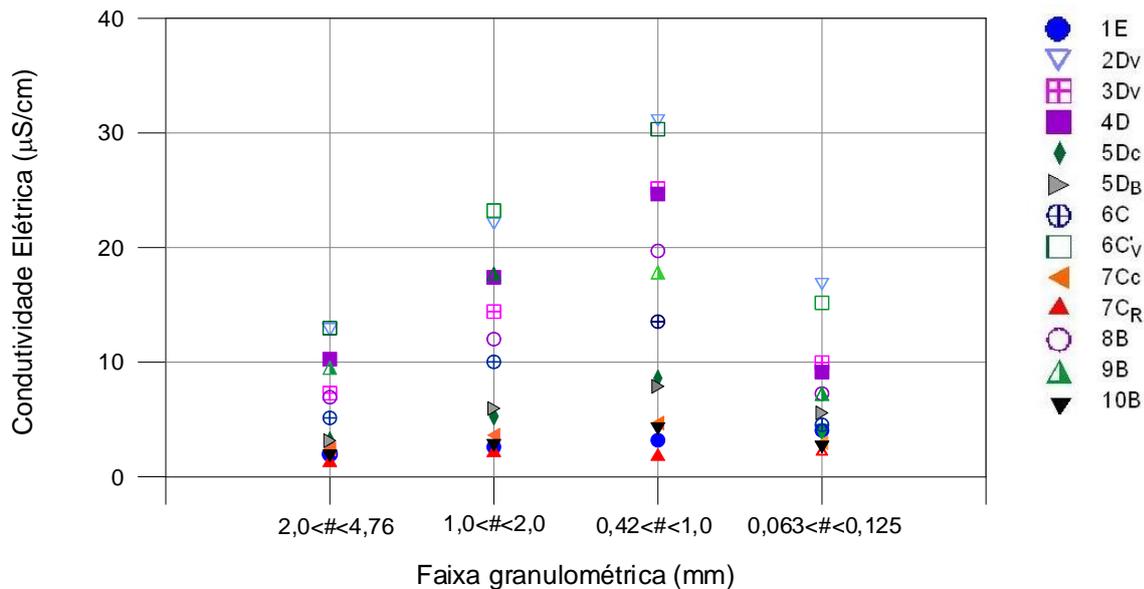


Figura 4.29 – Alteração química, valores médios de condutividade elétrica de acordo com a faixa granulométrica.

Assim como observado pelas análises químicas, a menor faixa granulométrica apresentou comportamento diferenciado pela contaminação com o material pulverulento oriundo do processo de britagem dos grãos e, por isso, não está incluída nas interpretações abaixo.

Comparando as faixas granulométricas de 2,0<#<4,76 mm e 0,42<#<1,0 mm, verifica-se que as amostras 2D_v e 6C_v passaram de 12 para 31 μS/cm. Os grupos 3D_v e 4D, que apresentavam *CE* próximo de 7 e 10, respectivamente, passaram a atingir 25 μS/cm. Já as amostras 6C, 8B e 9B, com 5, 7 e 10 μS/cm inicialmente, alcançaram valores de *CE* de 14, 20 e 18 μS/cm, nesta ordem.

Para os basaltos densos cinza escuros 1E, 7C_c, 7C_R e 10B, os valores de condutividade elétrica oscilaram pouco entre as quatro análises, apresentando valores máximos de 5 μS/cm. Os subgrupos dos basaltos densos rosados, 5D_B e 5D_C, ambos

apresentaram um pequeno incremento, de 3 para aproximadamente 8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre as faixas granulométricas.

A Figura 4.30 e a Figura 4.31 apresentam as correlações entre condutividade elétrica e superfície específica teórica das três faixas granulométricas consideradas válidas nesta análise.

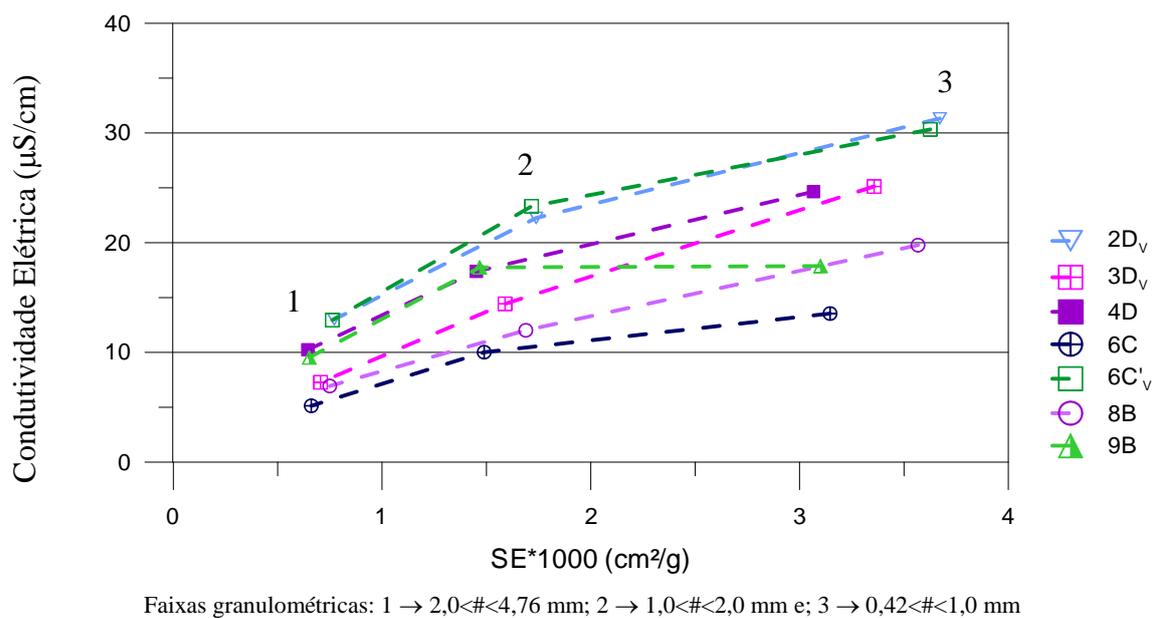


Figura 4.30 – Correlação entre condutividade elétrica e superfície específica, amostras com presença de argilomineral ou calcita.

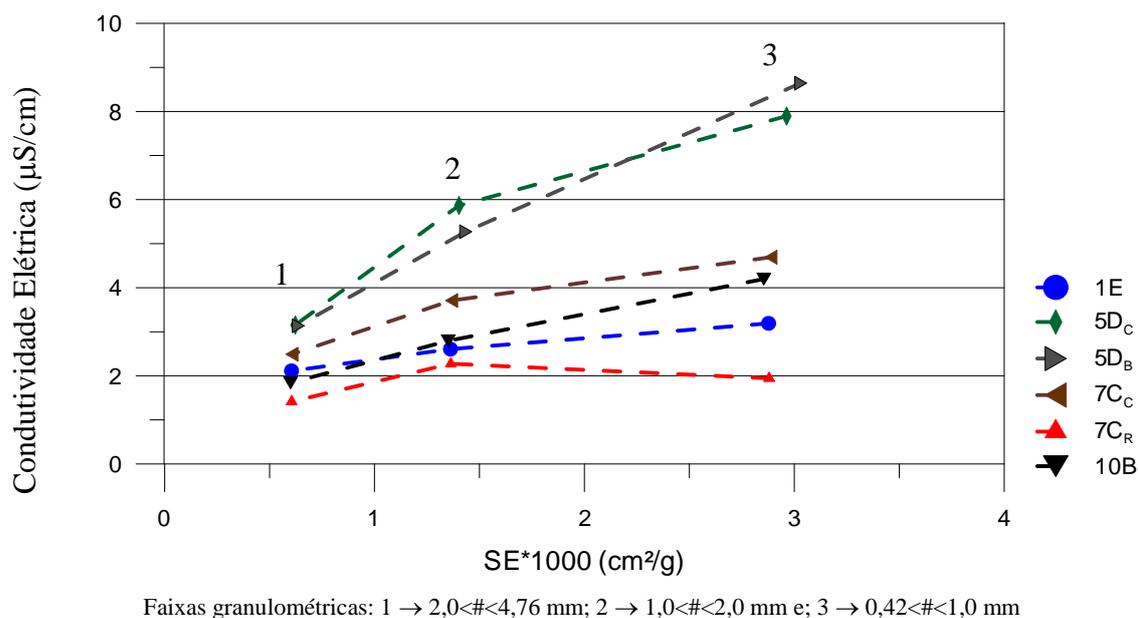


Figura 4.31 – Correlação entre condutividade elétrica e superfície específica, amostras de basalto denso.

Verifica-se que a influência da superfície específica dos grãos na condutividade elétrica é mais pronunciada nos basaltos vesículo-amigdaloidais (3DV, 6C e 9B) e para as brechas basálticas (2DV, 6C' e 8B), do que para os basaltos densos (1E, 5D, 7C e 10B), com exceção do basalto denso com argilomineral 4D, com comportamento similar aos vesículo-amigdaloidais. Sendo assim, quanto menor o diâmetro dos grãos e maior a presença de minerais secundários, maior será a liberação de íons na solução.

Considerando as análises pH métricas e de condutividade elétrica, observa-se que entre as faixas granulométricas a de grãos com diâmetro entre 0,42 e 1,0 mm é a que possui maior liberação de íons (a faixa com grãos de diâmetro inferiores a esta não foi considerada pela alta presença de material pulverulento). Portanto, os valores obtidos para a faixa granulométrica referida foram os utilizados nas correlações com os demais ensaios de laboratório. Os histogramas da Figura 4.32 e a Figura 4.33 apresentam os valores de *pH* e condutividade elétrica, respectivamente.

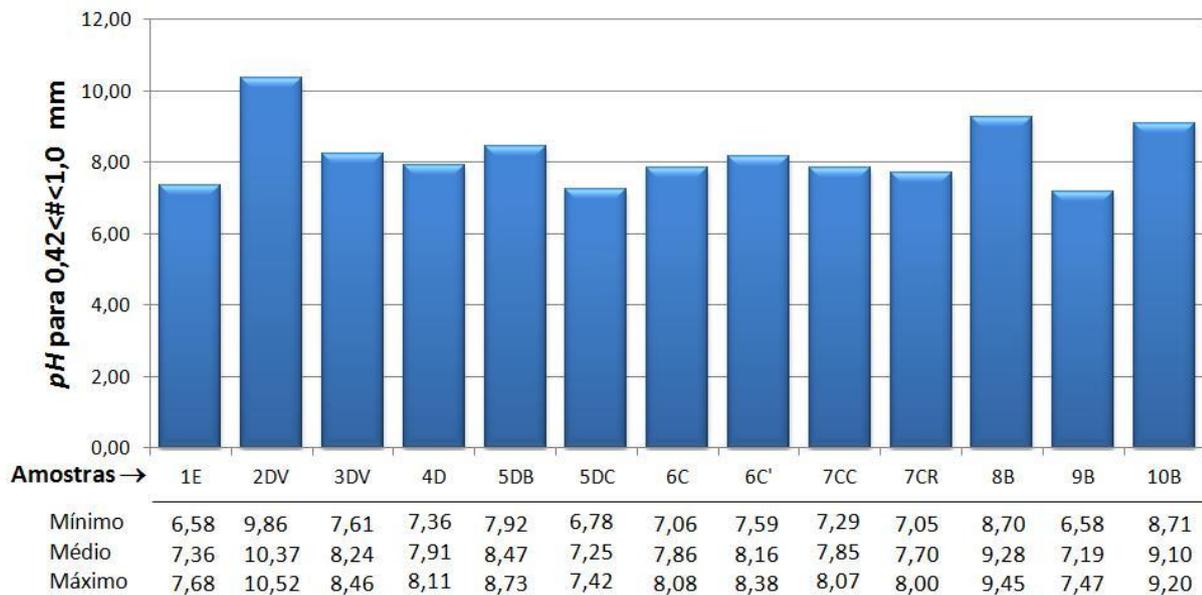


Figura 4.32 – Histograma dos valores de pH para 0,42 <#<1,0 mm.

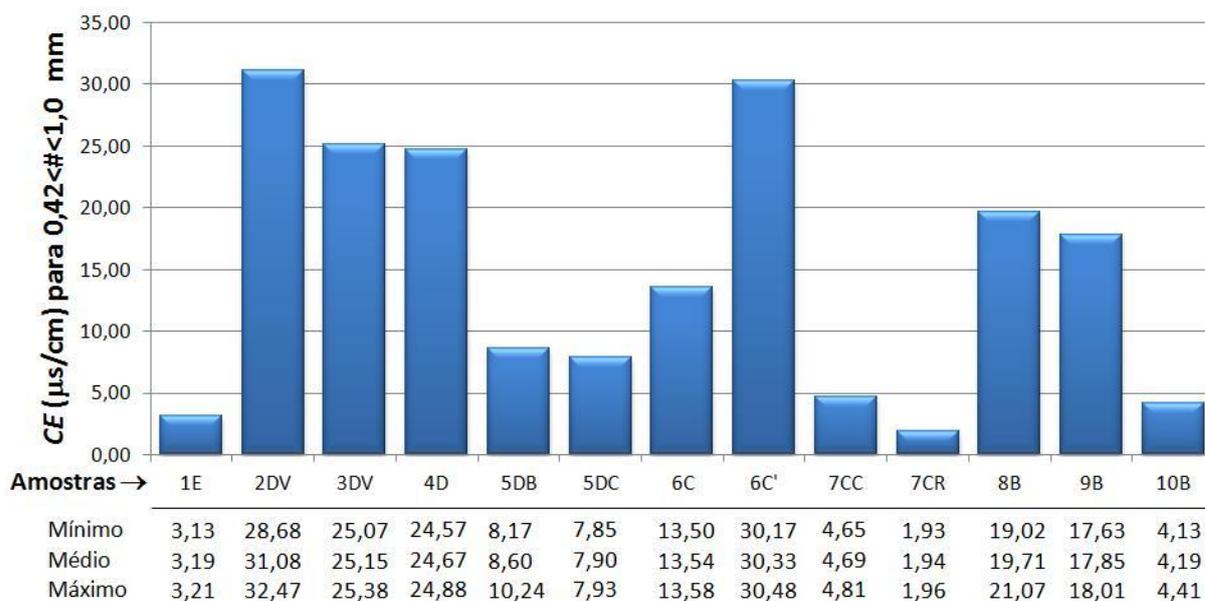


Figura 4.33 – Histograma dos valores de condutividade elétrica para $0,42 < \# < 1,0$ mm.

4.3.1.4 Compressão pontual

Para este ensaio, foram consideradas válidas somente as amostras que apresentaram plano de ruptura coincidente com a seção transversal do bloco, conforme recomendação da ISRM (1972).

Com relação aos resultados considerados válidos, alguns pontos afastaram-se da análise de regressão para determinação do Índice de carga pontual $I_{S(50)}$. Analisando individualmente as faces de ruptura das amostras, na maioria dos grupos de rocha, estes pontos foram respectivos aos blocos com oxidação interna mais acentuada (Figura 4.34). Como o intuito da pesquisa é avaliar o progresso da alteração, não se justificou a remoção destes pontos.



Figura 4.34 – Amostra após ensaio de carga pontual, com oxidação interna acentuada na face de ruptura (condição de pré-ruptura).

Os resultados obtidos em laboratório estão apresentados na Figura 4.35 e representam os parâmetros de resistência mecânica iniciais das amostras, antes da ciclagem acelerada.

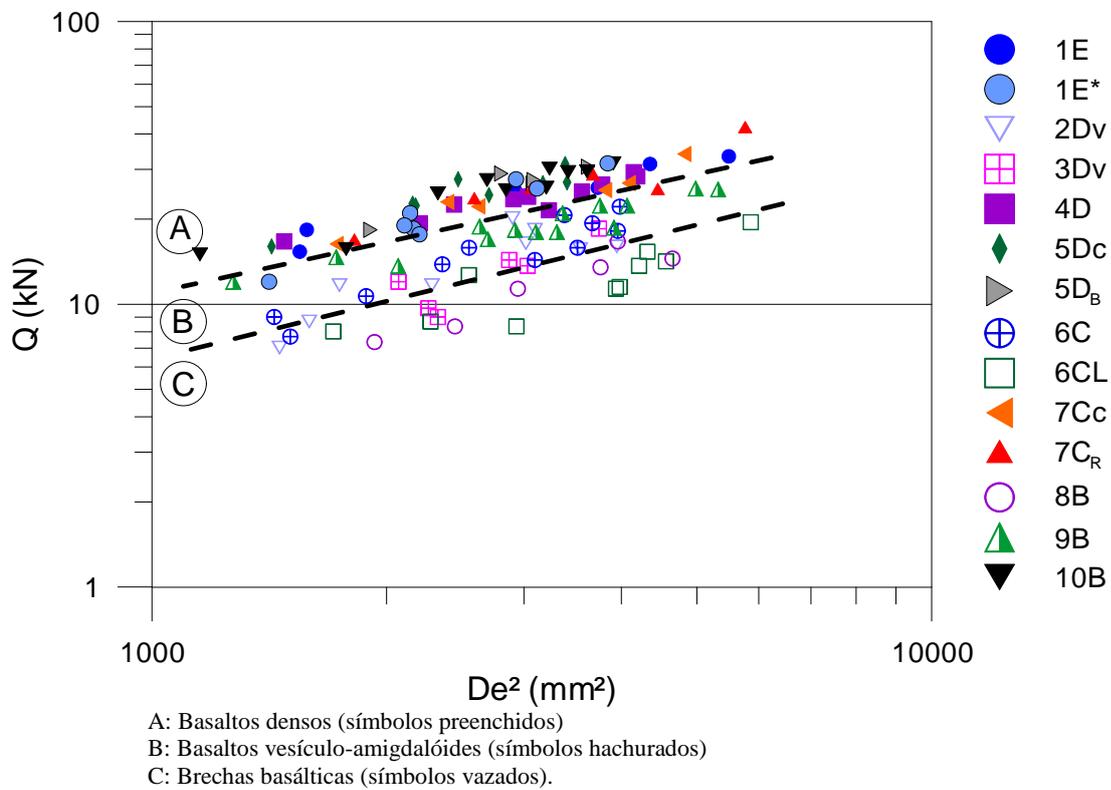


Figura 4.35 – Valores de ruptura de ensaio de carga pontual, anterior à ciclagem acelerada.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados de $I_{S(50)}$ em ordem decrescente e agrupados de acordo com o litotipo das amostras. Os valores mais altos de $I_{S(50)}$ equivalem aos basaltos rosado (5D_C e 5D_B) e denso cinza escuro (10B), com aproximadamente 9,6 MPa. Em seguida, o basalto 1E, em que foi possível diferenciar blocos sem e com oxidação interna na face de ruptura, contudo, os valores em ambas as situações foram próximos a 8,8 MPa. Na sequência, seguem as amostras 7C_C e 7C_R, com cerca de 8,5 MPa. Os valores também foram resumidos no histograma da Figura 4.36.

Tabela 4.4 – Índice de Carga Pontual ($I_{S(50)}$) anterior à ciclagem em laboratório.

Amostra	Litotipo	Nº de Amostras	R ²	$I_{S(50)}$ (Mpa)
5D _C	Basalto denso rosado	8	0,82	9,73
5D _B		5	0,86	9,52
10B	Basalto denso cinza escuro	10	0,89	9,52
1E		6	0,96	8,84
1E *		9	0,95	8,70
7C _C		6	0,89	8,53
7C _R		6	0,82	8,39
4D	Basalto denso com argilomineral	10	0,90	8,54
9B	Basalto vesículo-amigaloidal	14	0,90	6,71
6C		11	0,85	5,51
3D		6	0,81	4,69
2D _V	Brecha basáltica com basalto vesicular	9	0,67	5,48
8B		6	0,84	3,80
6C' _V		10	0,76	3,75

* Blocos com oxidação interna, nas superfícies de ruptura.

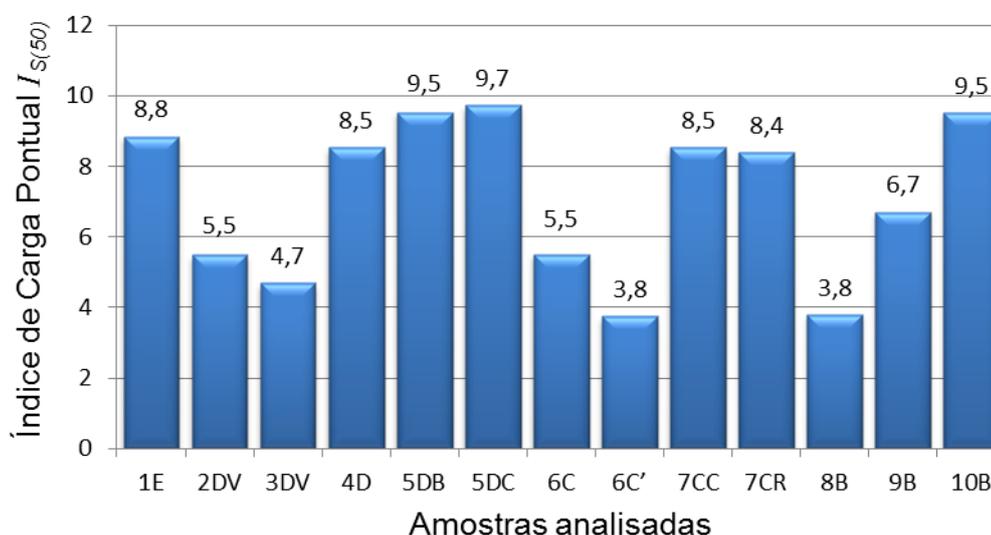


Figura 4.36 – Histograma dos valores de Índice de Carga Pontual $I_{S(50)}$.

Especificamente sobre os subgrupos das amostras 5D (amostras com diferentes concentrações de minerais brancos, possíveis plagioclásios alterados, 5D_C e 5D_B) e 7C (amostra com e sem minerais róseos, variantes do grupo dos plagioclásios, 7C_C e 7C_R), praticamente não houve diferença entre os índices de carga pontual $I_{S(50)}$, sendo inferior a 2% entre os subgrupos.

Ainda sobre os grupos de basaltos densos e lembrando que estas amostras estavam expostas ao meio ambiente por um período de 35 anos, pode-se compará-los aos valores obtidos por Maia et al. (2003). Conforme apresentado na Tabela 2.3 (Item 2.3 – Métodos de Avaliação e Classificação), estes autores obtiveram valor de $I_{S(50)}$ próximo a 8,5 MPa para basaltos com características semelhantes (basalto denso cinza escuro, Bacia do Paraná, 25 anos de alteração em campo), valores estes próximo aos obtidos no presente estudo. Ainda nesta tabela, verifica-se que os basaltos densos e as brechas basálticas atingiram valores superiores aos obtidos por Gupta e Rao (1998) e por Birid (2006).

Com relação ao basalto denso rosado com argilomineral disseminado do 4D, atingiu $I_{S(50)}$ de 8,54 MPa, valor próximo aos basaltos densos sem este mineral presente na matriz. Contudo, amostras com o mesmo tempo de exposição deste grupo foram encontradas em consistência de solo. Portanto, principalmente para esta amostra, este índice $I_{S(50)}$ deve ser considerado com ressalvas e comparado com outros parâmetros de laboratório.

As amostras 3D_V, 6C e 9B, basaltos vesículo-amigdaloidais, apresentaram índices com 4,70, 5,50 e 6,70 MPa, respectivamente. Contudo, as mesmas ressalvas da amostra 4D devem ser consideradas para a 6C.

Com relação às porções vesiculares das brechas 2D_V, 6C' e 8B, os valores são mais dispersos em relação à função de regressão, uma vez que o conjunto dos blocos apresenta-se heterogêneos em relação ao tamanho, quantidade e preenchimento das vesículas e amígdalas. A 2D_V, por possuir matriz mais dura atingiu valor de 5,48 MPa. Já a 6C' e 8B, possuem matriz mais alterada e alcançaram valores próximos a 3,80 MPa. Ressalta-se que estas três amostras representam parte de seus respectivos litotipos e não caracterizam a resistência das brechas destes derrames basálticos.

4.3.1.5 Correlações entre parâmetros obtidos em ensaios laboratoriais

- Correlação entre condutividade elétrica e outras variáveis

A Tabela 4.5 resume as correlações entre condutividade elétrica e os parâmetros físicos, químicos e de resistência presentes nos itens anteriores. Nesta tabela apresenta-se também o tipo de regressão e o respectivo coeficiente de correlação (R^2). Os respectivos gráficos estão apresentados entre a Figura 4.37 e a Figura 4.40.

Tabela 4.5 – Correlação entre Condutividade elétrica e outras variáveis.

Variável correlacionada	Tipo de correlação	R^2
Densidade aparente (ρ_a)	Linear decrescente	0,80
Porosidade aparente (η_a)	Exponencial crescente	0,83
Velocidade de absorção-d'água (V_{abs})	Exponencial crescente	0,75
Resistência a carga pontual ($I_{S(50)}$), basaltos densos	Exponencial crescente	0,60

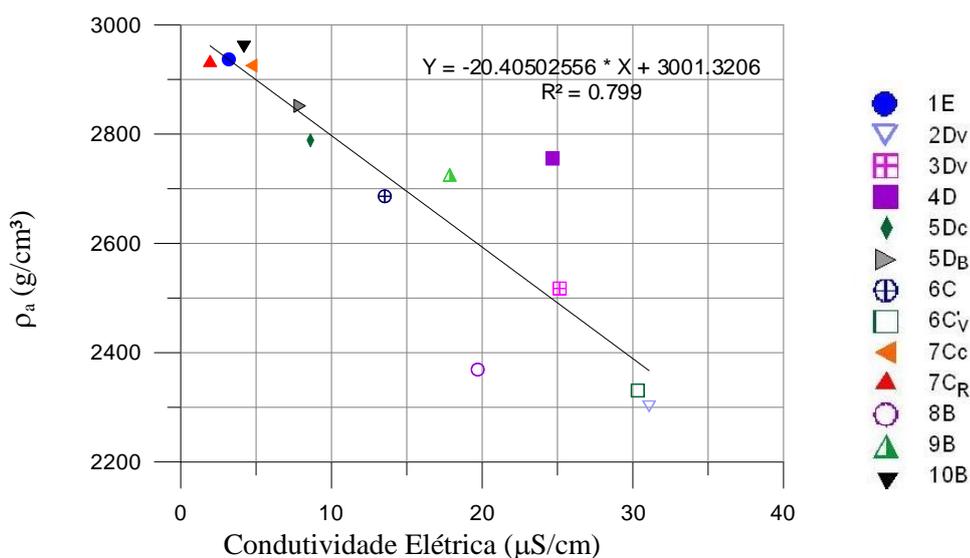


Figura 4.37 – Correlação entre densidade aparente e condutividade elétrica .

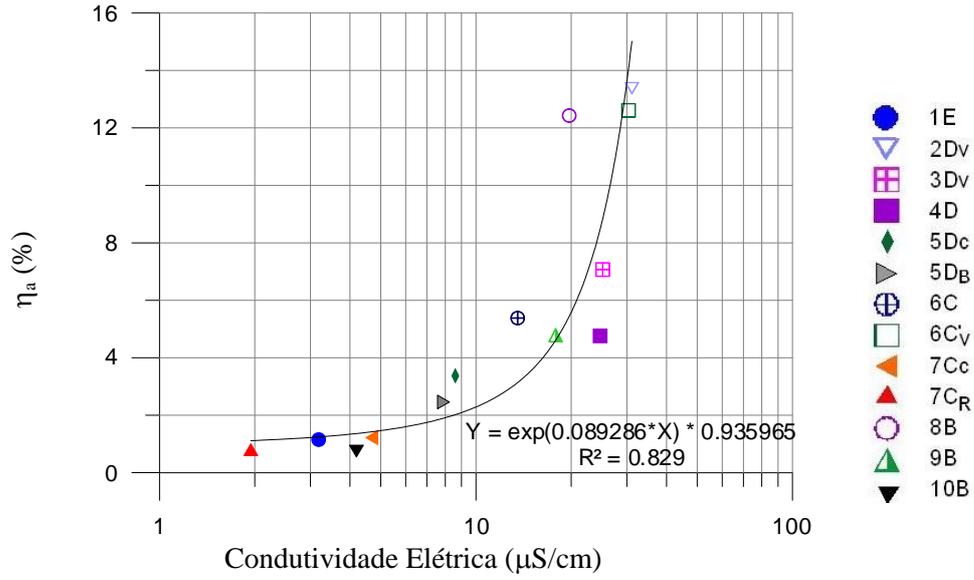


Figura 4.38 – Correlação entre porosidade aparente e condutividade elétrica .

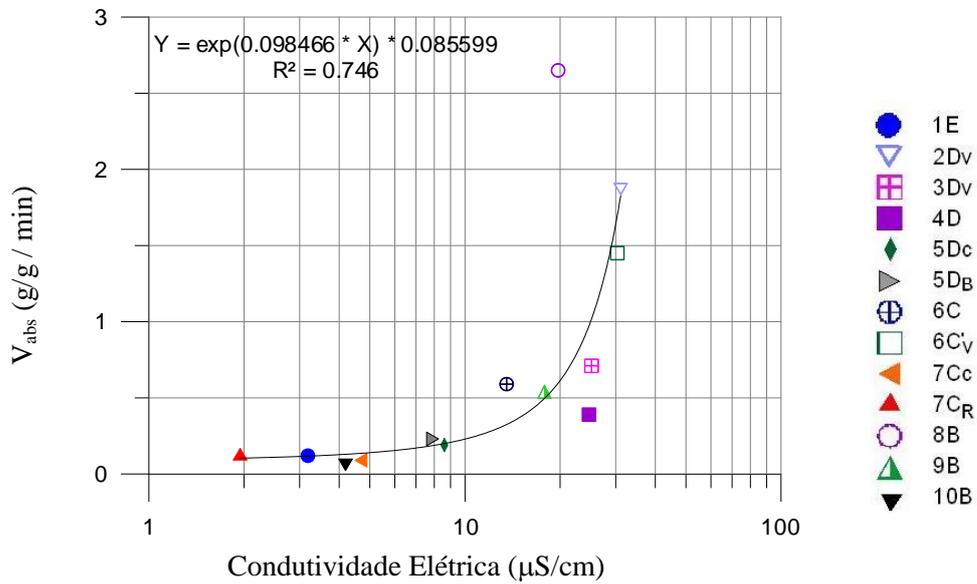


Figura 4.39 – Correlação entre velocidade de absorção-d'água e condutividade elétrica .

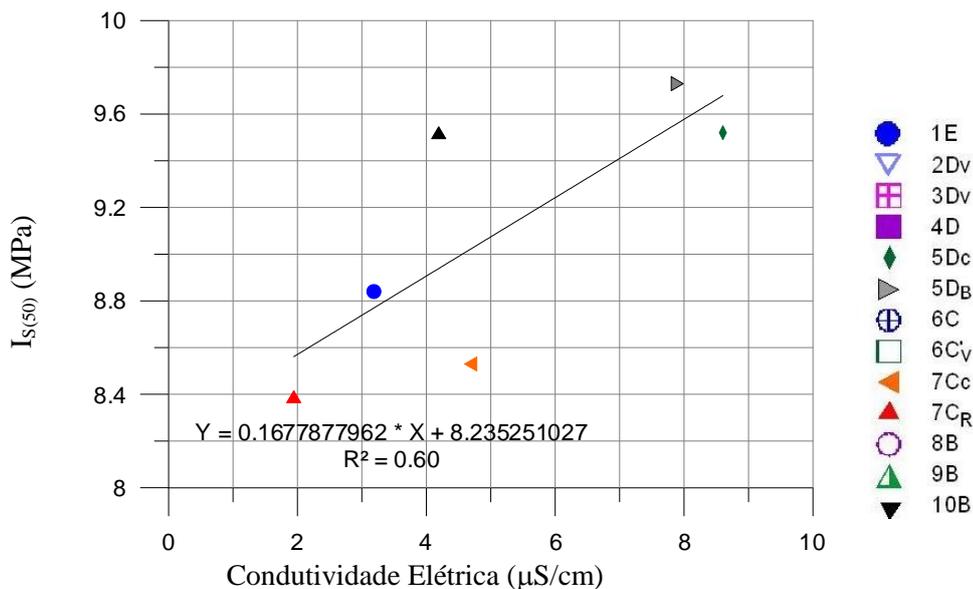


Figura 4.40 – Correlação entre resistência à carga pontual e condutividade elétrica .

Analisando os gráficos apresentados, verifica-se que a condutividade elétrica possui boa correlação com os parâmetros físicos: densidade aparente (Figura 4.37), porosidade aparente (Figura 4.38) e velocidade de absorção-d'água (Figura 4.39). Neste sentido, quanto maior a porosidade e absorção-d'água, maior a taxa de dissolução de íons. Por outro lado, quanto maior a densidade da rocha, menor a liberação de íons e menor a condutividade elétrica, já que menor será a porosidade deste material rochoso.

Especificamente entre as variáveis pH e condutividade elétrica, identificou-se uma correlação expressa por meio de um ábaco, Figura 4.41.

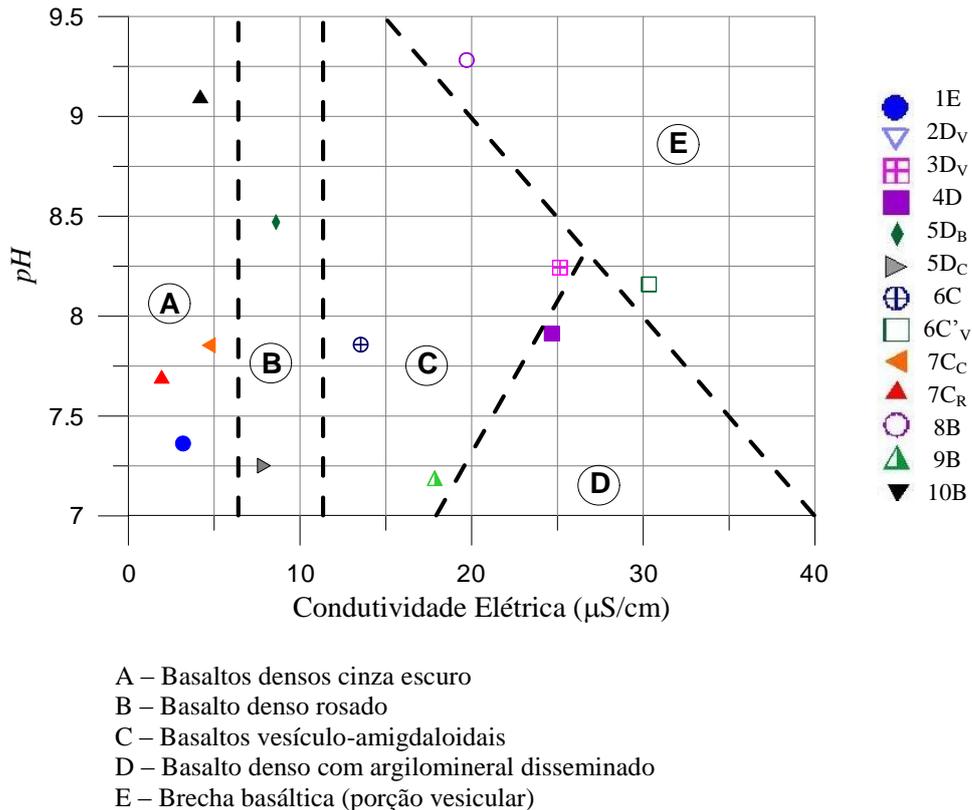


Figura 4.41 – Correlação entre *pH* e condutividade elétrica.

Neste ábaco, as linhas pontilhadas são ilustrativas e não representam a real variação entre os litotipos. De maneira geral, ocorre a seguinte divisão:

- Basaltos densos cinza escuros assumem: *CE* de 0 a 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e *pH* de 7 a 9,5;
- Basaltos densos rosados: *CE* de 5 a 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e *pH* de 7 a 8,5;
- Basalto denso com argilomineral disseminado: *CE* de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e *pH* de 8;
- Basaltos vesículo-amigdaloidais: *CE* de 13 a 26 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e *pH* de 7 a 8,5;
- Brecha basáltica: *CE* de 19 a 32 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e *pH* de 8 a 9,5.

Neste sentido, constata-se que a presença de minerais secundários tende a elevar a condutividade elétrica, assim como o valor do *pH* da solução. Ressalta-se que este ábaco não deve ser considerado para amostras com elevadas concentrações de calcita, pois ela condiciona o resultado a altos valores de *pH*, por este motivo a amostra 2D_v (*pH*=10,5) foi desconsiderada deste gráfico.

- Correlação entre pH e outras variáveis

Os valores de pH são bastante sensíveis a composição do material rochoso analisado. Portanto, os gráficos da Figura 4.42 à Figura 4.44 estão divididos entre os grupos de basalto denso e os de basaltos vesículo-amigdalóides e brechas basálticas. A Tabela 4.6 resume os indicadores de correlações, já que os coeficientes de correlação R^2 não apresentaram valores altos.

Tabela 4.6 - Correlação entre pH e outras variáveis.

Variável correlacionada	Litotipo basáltico	Tipo de correlação	R^2
Porosidade aparente (η_a)	Vesículo-amigdalóide e brecha	Linear crescente	0,64
Porosidade aparente (η_a)	Densos	Não há	-
Velocidade de absorção-d'água (V_{abs})	Densos	Polinomial decrescente	0,75
Velocidade de absorção-d'água (V_{abs})	Vesículo-amigdalóide e brecha	Linear crescente	0,58
Resistência a carga pontual ($I_{S(50)}$)	Densos	Linear crescente	0,66
Resistência a carga pontual ($I_{S(50)}$)	Vesículo-amigdalóide e brecha	Linear decrescente	0,71

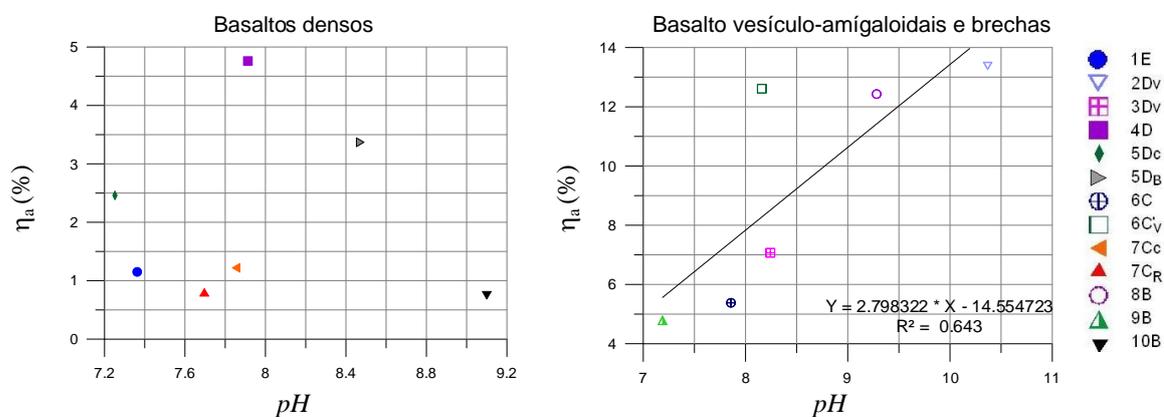


Figura 4.42 – Correlação entre pH e porosidade aparente.

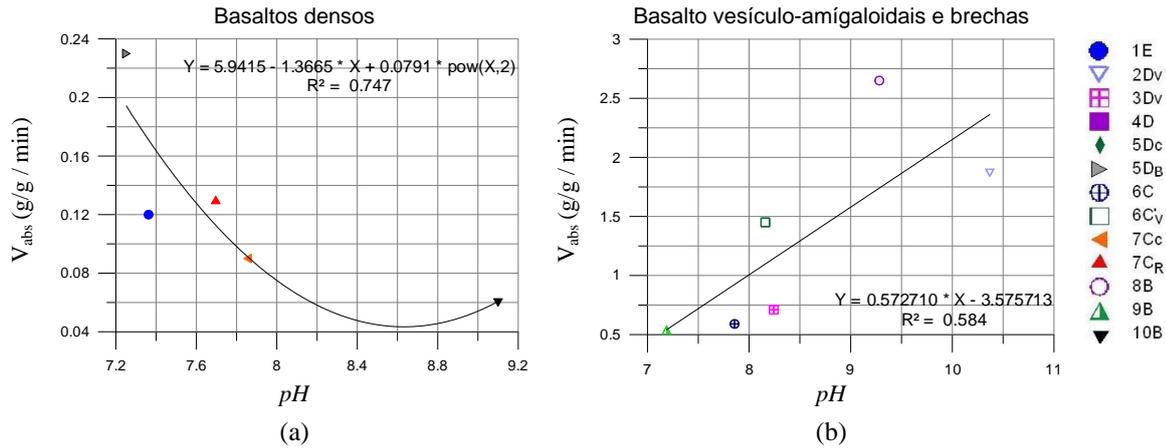


Figura 4.43 – Correlação entre *pH* e velocidade de absorção d’água.

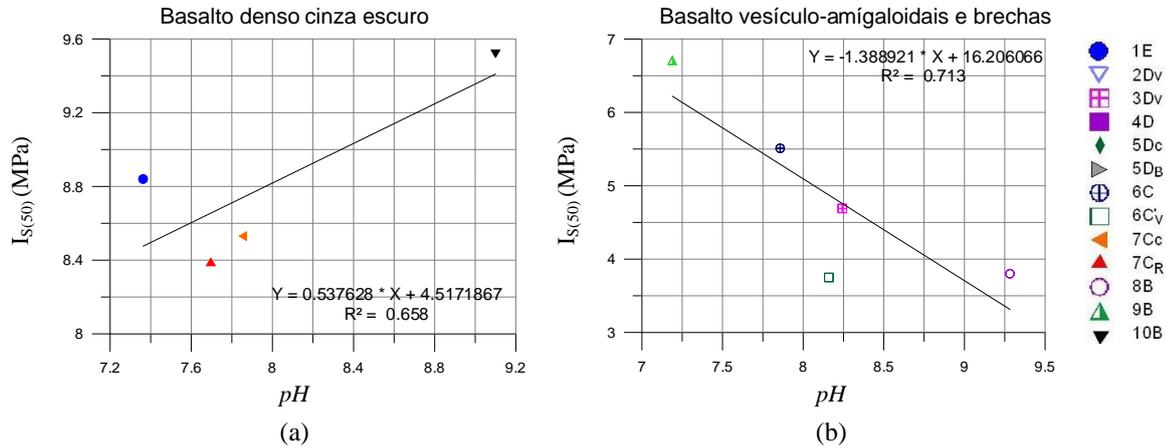


Figura 4.44 – Correlação entre *pH* e resistência a carga pontual.

Com base nos gráficos apresentados, constata-se que as melhores correlações entre *pH* e os demais parâmetros são para os basaltos vesículo-amígaloidais e brechas basálticas. Contudo, ressalta-se que os valores de *pH* para estes grupos de rocha possuem minerais secundários em sua composição que tendem a elevar estes valores, como por exemplo a calcita.

- Correlação entre resistência à carga pontual e outras variáveis

As correlações entre a resistência à carga pontual e as demais variáveis estão resumidas na Tabela 4.7 e representadas nos gráficos da Figura 4.45 a Figura 4.46. Com

relação às correlações com CE e pH já foram apresentadas nas Figura 4.40 e Figura 4.44, respectivamente.

Tabela 4.7 - Correlação entre $I_{S(50)}$ e outras variáveis.

Variável correlacionada	Tipo de correlação	R ²
Absorção-d'água (α_a)	Linear decrescente	0,73
Porosidade aparente (η_a)	Linear decrescente	0,74
Densidade aparente (ρ_a)	Exponencial crescente	0,80
Velocidade de absorção-d'água (V_{abs})	Linear decrescente	0,66

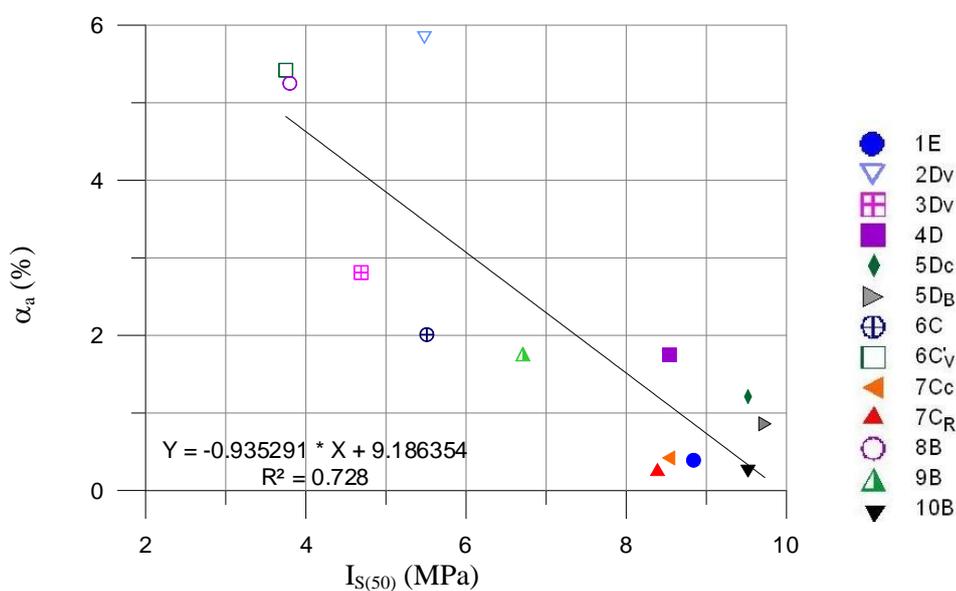


Figura 4.45 – Correlação entre resistência à carga pontual e absorção-d'água.

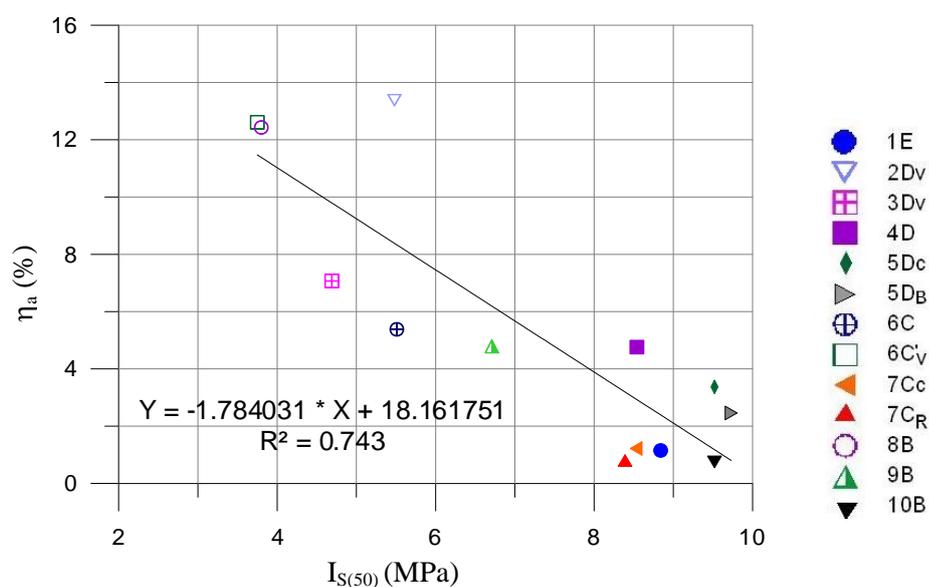


Figura 4.46 – Correlação entre porosidade aparente e resistência a carga pontual.

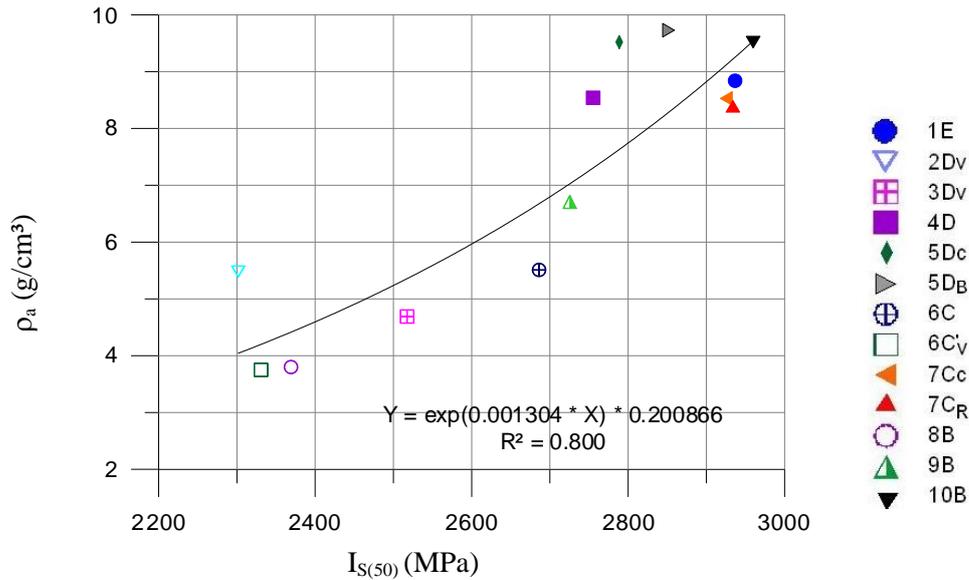


Figura 4.47 – Correlação entre densidade aparente e resistência a carga pontual.

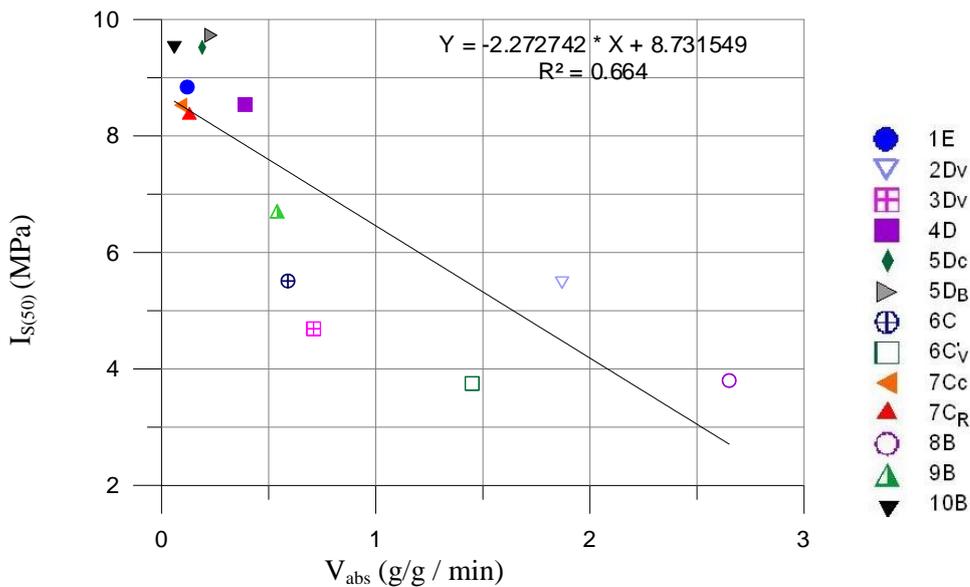


Figura 4.48 – Correlação entre velocidade de absorção-d'água e resistência a carga pontual.

Os gráficos apresentados mostram que o índice de carga pontual possui boa correlação com os parâmetros físicos. Quanto maior a densidade da rocha, maior a resistência à carga pontual. Com relação a absorção-d'água e a porosidade aparente, estes parâmetros são inversamente proporcionais a resistência a carga pontual.

De maneira geral, algumas correlações listadas apresentaram o valor de R^2 inferior a 0,7, possivelmente, pela heterogeneidade entre os litotipos basálticos. Entre esta justificativa,

Yoshida (1972) cita ainda possíveis problemas com a relação de dependência entre as propriedades em análise, com a população de amostras e com a própria execução dos ensaios.

4.3.2 Caracterização geológico-geotécnica após ciclagem acelerada

4.3.2.1 Controle qualitativo e quantitativo da ciclagem acelerada

Apresentam-se neste tópico os resultados de perda de massa até 80 ciclos de água/estufa, representados na Figura 4.49.

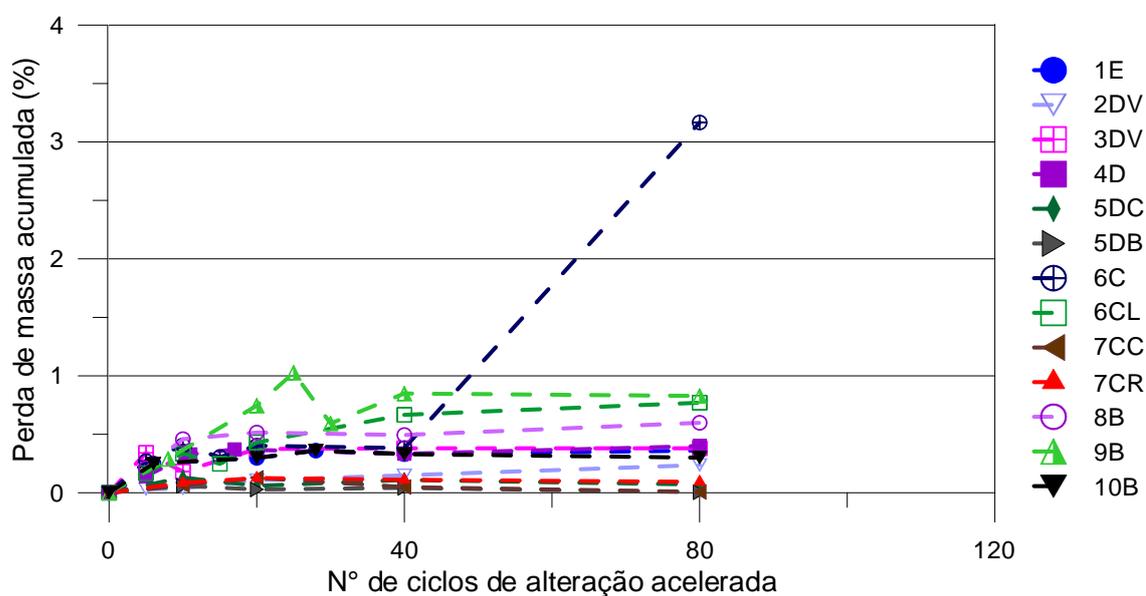


Figura 4.49 – Perda de massa ao longo dos ciclos de alteração em laboratório.

Verificou-se que a variação de massa ao longo dos ciclos foi inferior a 1%, com exceção da amostra 6C com aproximadamente 3%. Com relação a esta última, esta perda de

massa deve-se a desagregação de um bloco após 64 ciclos, por meio da intensificação de fissuras que surgiram no ciclo 34 (Figura 4.50). Outros dois blocos também iniciaram fissuras após 30 ciclos, mas permaneceram estáveis durante o ensaio. Ressalta-se que estas fissuras ocorrem através de planos preenchidos por argilominerais.

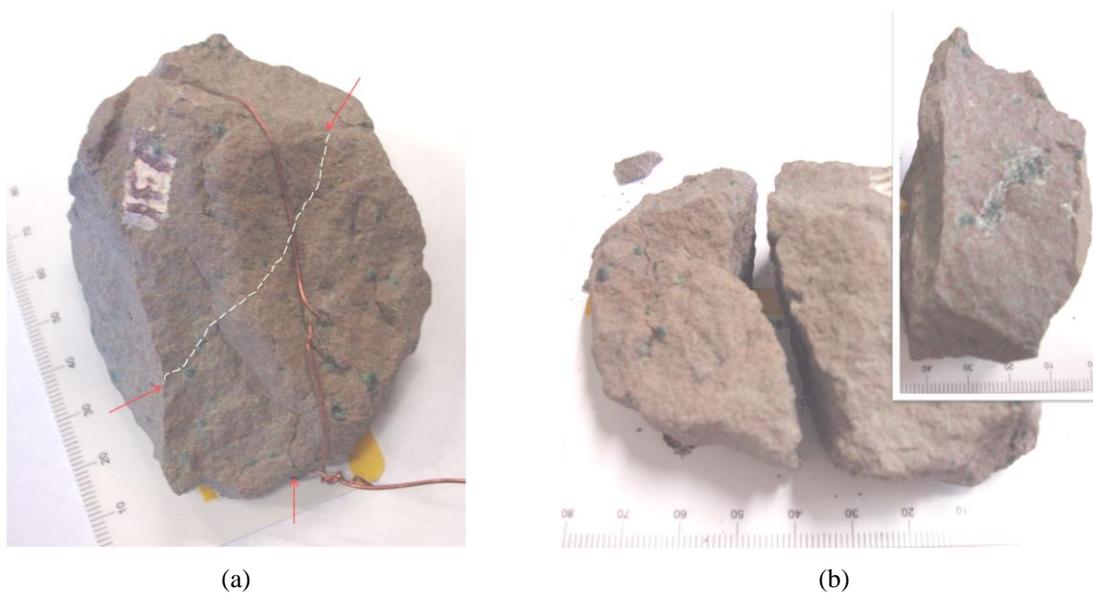


Figura 4.50 – Amostra 6C-F em desagregação (escala em cm). (a) Início de fraturamento após 34 ciclos. (b) Após 64 ciclos, fragmentação do bloco, detalhe para face de ruptura com concentração de argilomineral. Escala em milímetros.

Contudo, a alteração destes blocos não reflete o comportamento do restante dos blocos deste grupo. O comportamento predominante nestas amostras foi o carreamento de argilomineral das faces expostas e destacamento de finas lascas com dimensões milimétricas.

Constatou-se neste período que o tempo de estufa recomendado pela norma foi insuficiente para secagem da amostra. Conforme recomendado, utilizou-se 8 ± 1 horas de estufa, quando se verificou pelo ensaio de absorção-d'água rápida que este período é adequado apenas para a amostra 10B, aceitável para a 1E e insuficiente para as demais. Neste sentido, para a amostra 5D_B e 3D_V é necessário, respectivamente, 28 e 31 horas para secagem total e de 24 horas para as amostras restantes.

Acrescenta-se ainda, que não foi realizada reclassificação do grau de alteração das amostras, as poucas modificações observadas foram apenas superficiais, com permanência das características físicas iniciais praticamente constantes ao longo dos ciclos. Os principais registros de alteração foram:

- Basaltos densos cinza escuros 1E, 7C_C, 7C_R e 10B: formação de fina película de oxidação nas faces expostas à ciclagem (Figura 4.51);
- Basaltos densos rosados 5D_C e 5D_B: formação de fina película de oxidação nas faces expostas à ciclagem, menos pronunciadas que os basaltos anteriores, talvez pela própria cor rosada da matriz que se confunde a cor ocre da oxidação;
- Basalto denso rosado com argilomineral 4D: carreamento leve e em pontos esparsos de argilominerais presentes nas micro-amígdalas das faces dos blocos. Desprendimento eventual de lascas milimétricas (até 10 mm) e de pequenas partículas (< 5 mm) das arestas dos blocos (Figura 4.52);
- Basalto vesículo-amigdaloidal de brecha basáltica 2D_V: matriz rosada consistente, com raro desprendimento de fragmentos milimétricos (< 5 mm) e formação de fina e leve película de oxidação;
- Basaltos vesículo-amigdaloidais 3D_V e 9B: carreamento leve de minerais em tons verdes, presentes na matriz ou no revestimento de vesículas, que se depositam no fundo do recipiente de saturação. Desprendimento eventual de lascas com dimensões milimétricas (< 10 mm);
- Basalto vesicular de brecha basáltica 6C'_V e 8B: carreamento moderado de argilominerais presentes na matriz ou no revestimento de vesículas, que se depositavam no fundo do recipiente de saturação. Desprendimento eventual de lascas com dimensões milimétricas (< 10 mm) das faces dos blocos e de pequenas partículas (< 5mm);
- Basalto vesículo-amigdaloidal 6C: carreamento moderado dos minerais em tons verdes, presentes na matriz ou no revestimento de vesículas (Figura 4.53). O material carreado se deposita no fundo do recipiente. Observou-se também o desprendimento de lascas com dimensões milimétricas (< 10 mm) das faces dos blocos, pouco mais frequente que em amostras anteriores, e de pequenas partículas (< 5mm) das arestas dos blocos.

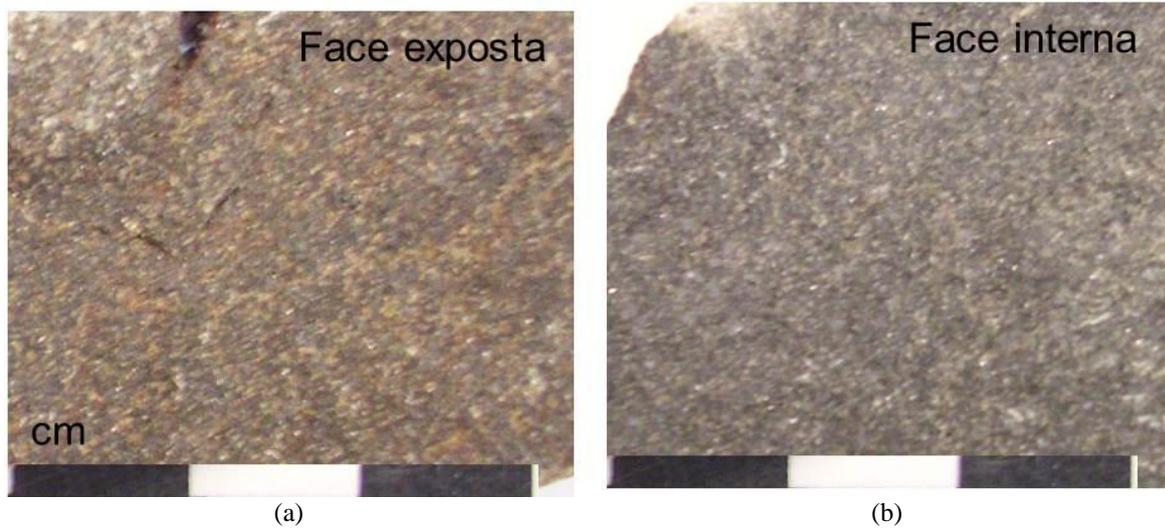
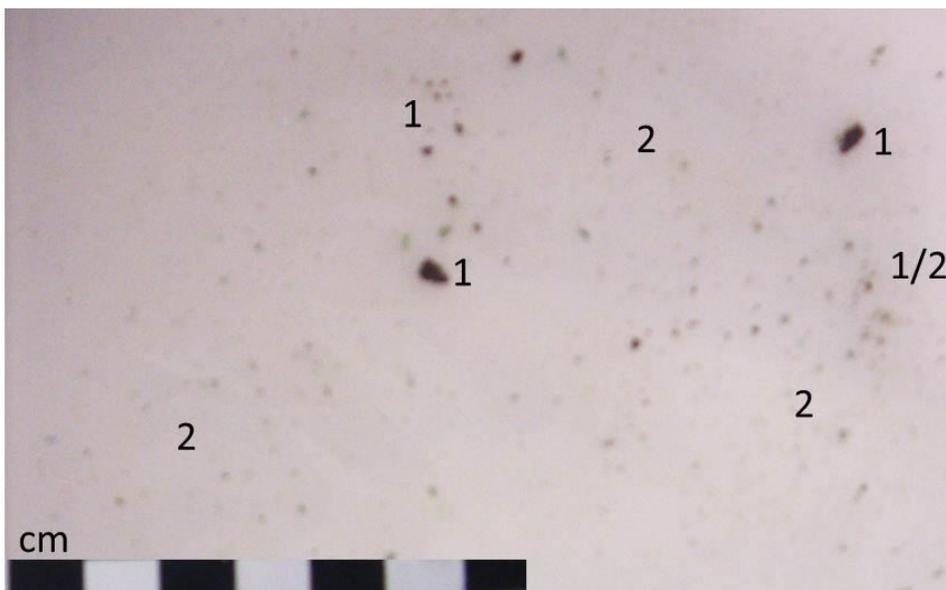


Figura 4.51 – Basalto denso cinza escuro (1E). (a) Película de oxidação nas faces externas de exposição à ciclagem acelerada. (b) Face de ruptura de carga pontual, indicando conservação do estado inicial de alteração.



Legenda

- 1. Fragmentos de rocha
- 2. Argilomineral carreado

Figura 4.52 – Basalto denso com argilomineral disseminado (4D). Material depositado no fundo do recipiente de saturação após cinco ciclos.

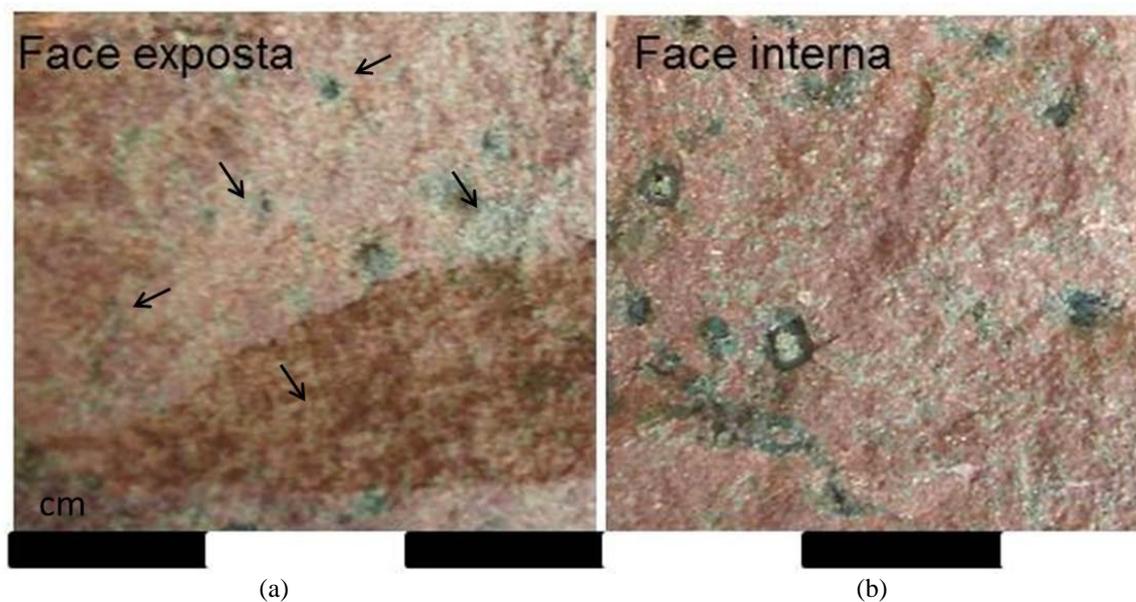
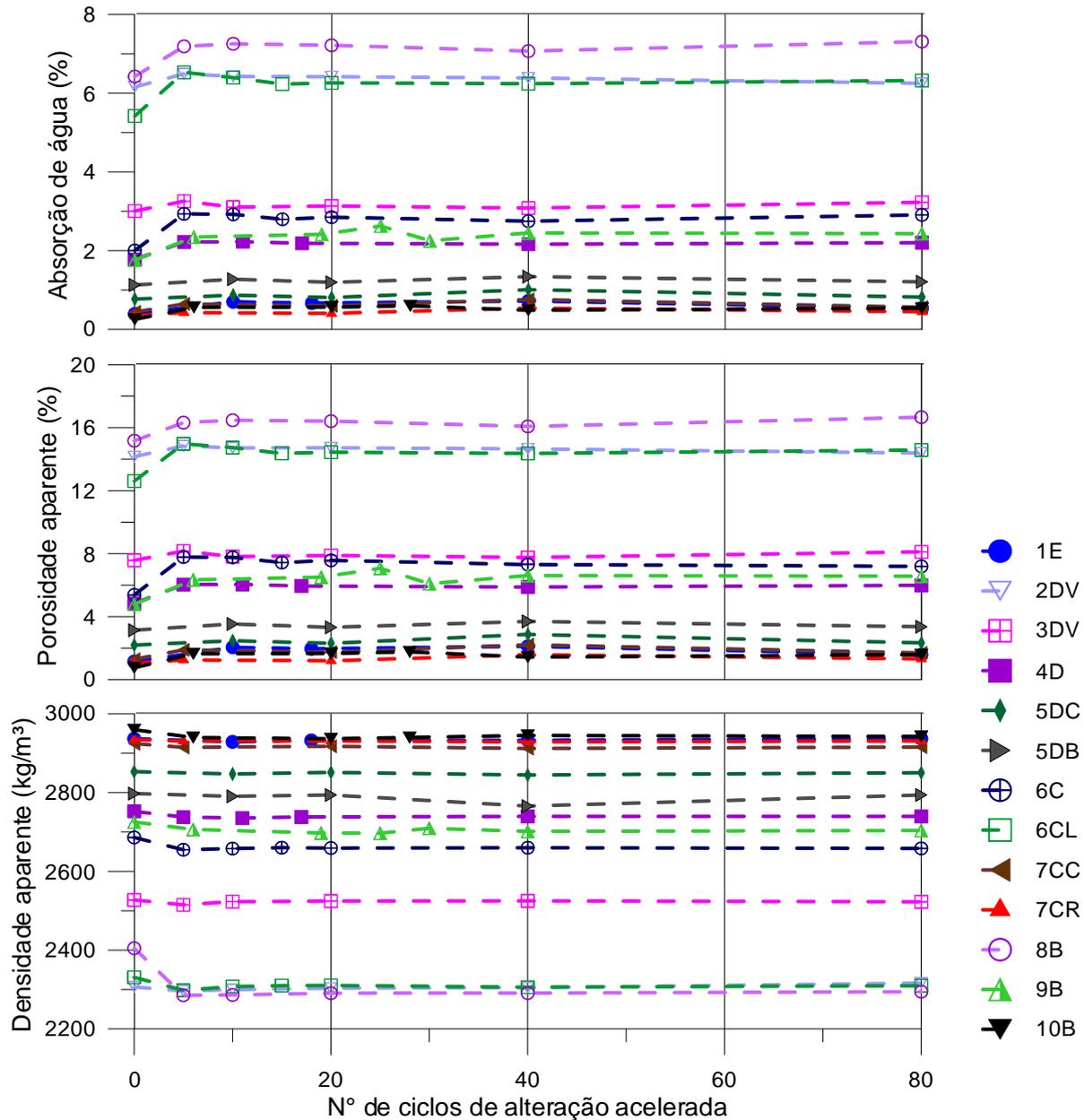


Figura 4.53 – Amostra de basalto vesículo-amigdaloidal 6C, após 80 ciclos. (a) Face exposta à ciclagem acelerada com carreamento de argilomineral das microamígdalas. (b) Face de ruptura após carga pontual, indicando preservação do estado inicial de alteração.

4.3.2.2 Índices físicos: densidade aparente, porosidade aparente e absorção

A variação dos índices físicos ao longo dos ciclos de alteração em laboratório está representada na Figura 4.54.



*0 ciclos = parâmetros iniciais anteriores à ciclagem acelerada.

Figura 4.54 – Variação dos índices físicos durante ciclagem acelerada em laboratório.

Observa-se que as variações mais significativas ocorreram nos primeiros dez ciclos, permanecendo constantes ao longo dos ciclos posteriores. Os valores de densidade aparente pouco sofreram redução, sendo próximos de 5% para a amostra 8B e inferior a 1% para as demais. Com relação à porosidade aparente e absorção-d'água, as variações obtidas foram:

- Basalto denso cinza: 1E ($\uparrow 44\%$), 7C_C ($\uparrow 30\%$), 7C_R ($\uparrow 18\%$) e 10B ($\uparrow 54\%$);
- Basalto denso rosado: 5D_B ($\uparrow 11\%$) e 5D_C ($\uparrow 11\%$);

- Basalto denso com argilomineral: 4D ($\uparrow 20\%$);
- Basalto vesículo-amigdaloidal: 3D_V ($\uparrow 3\%$), 6C ($\uparrow 30\%$) e 9B ($\uparrow 25\%$);
- Brecha basáltica: 2D_V ($\uparrow 4\%$), 8B ($\uparrow 10\%$), e 6C' ($\uparrow 14\%$).

4.3.2.3 Compressão pontual

Os gráficos da Figura 4.55 a Figura 4.67, apresentam individualmente para cada grupo de amostras os valores de carga pontual para 0, 40 e 80 ciclos de alteração acelerada, bem como as funções de regressão e os coeficientes de determinação R^2 . Em alguns casos, os pontos encontravam-se muito concentrados, dificultando a realização de regressão. Nestes casos, o índice $I_{S(50)}$ foi determinado equacionalmente (apresentado entre parênteses o valor do coeficiente de variação).

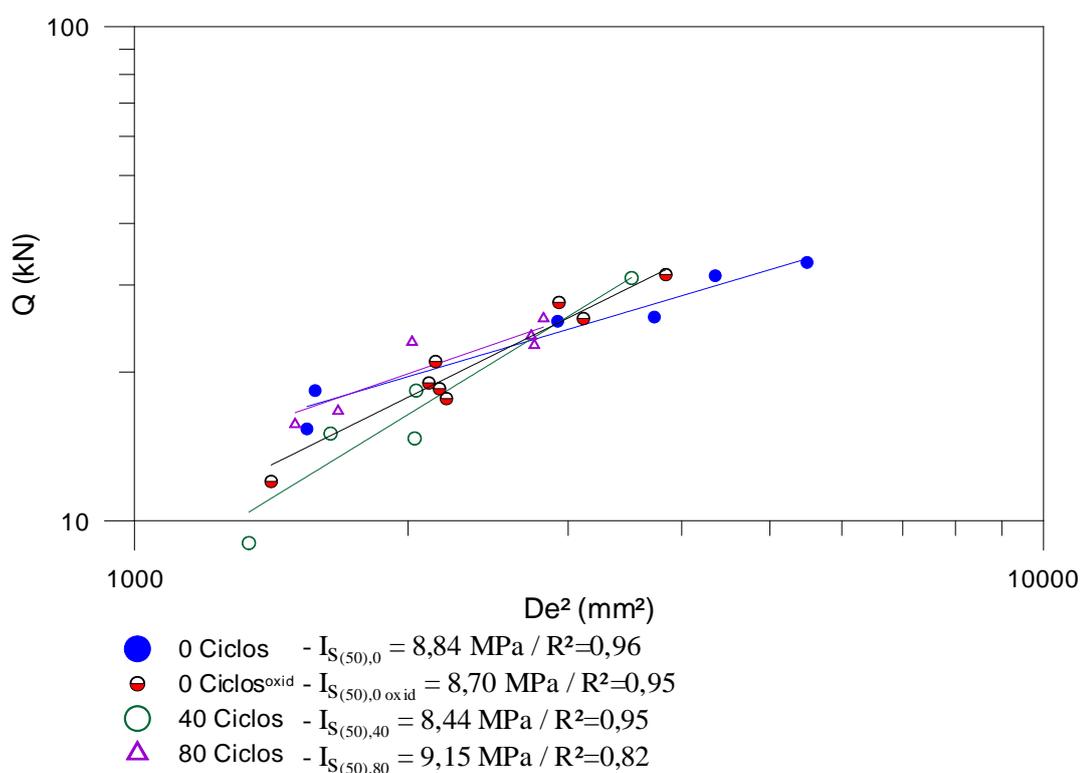


Figura 4.55 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 1E.

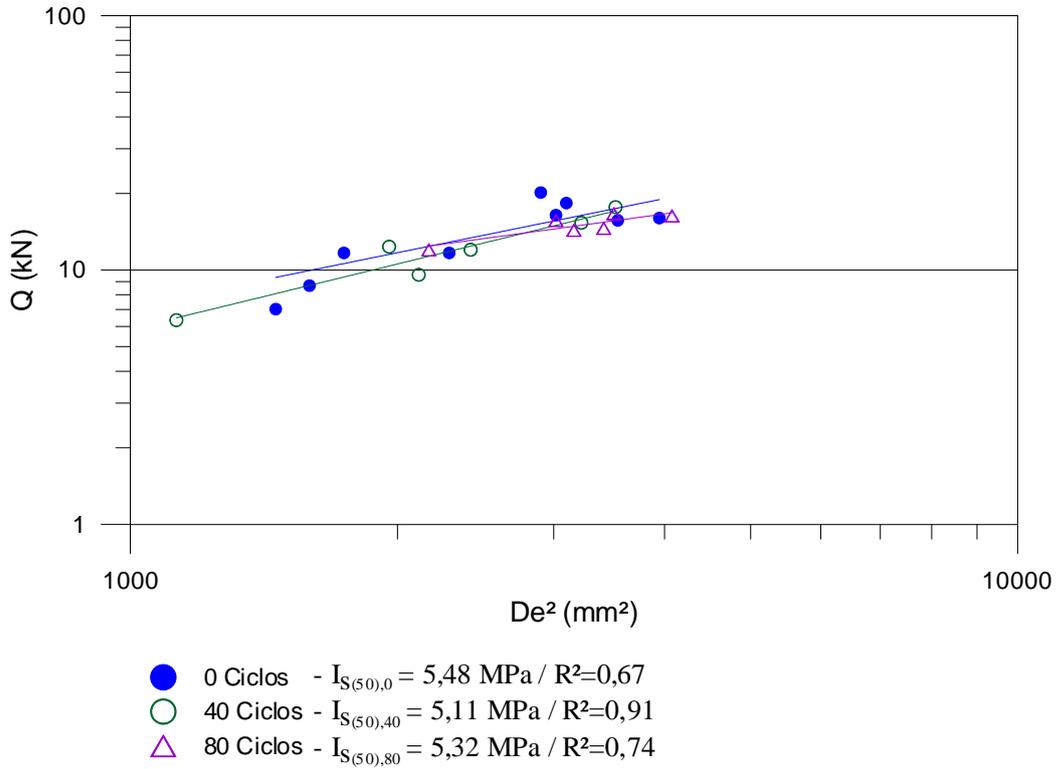


Figura 4.56 – Variação do índice $I_{S(50)}$ em 80 ciclos de alteração, amostra 2D_v.

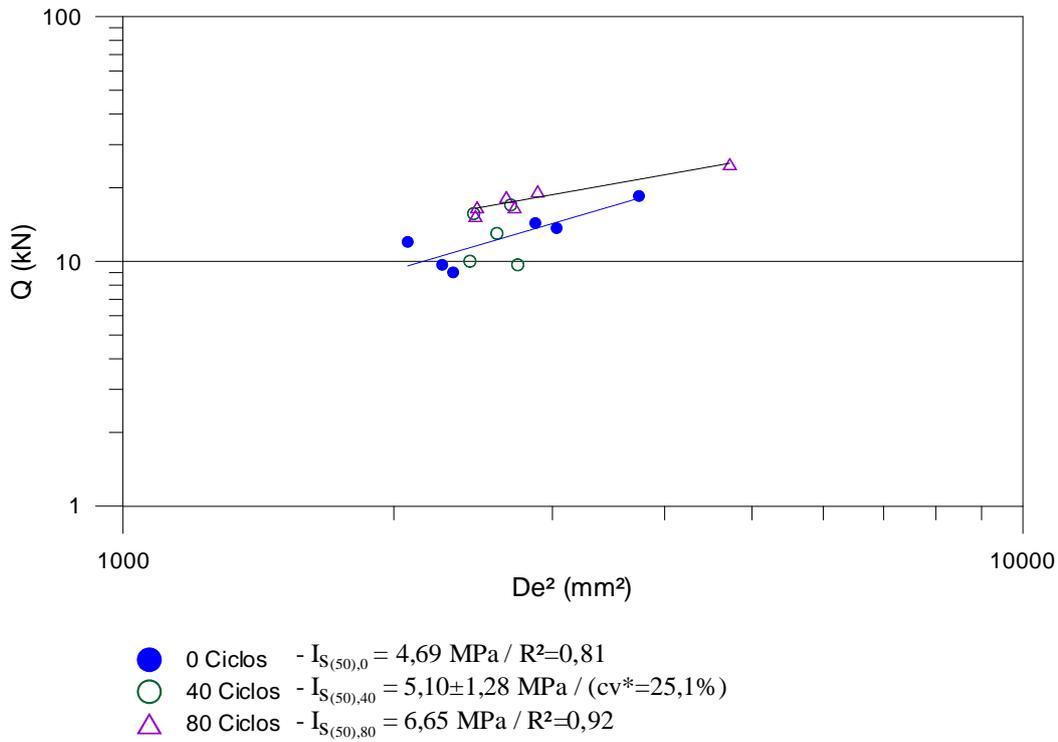


Figura 4.57 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 3D_v.

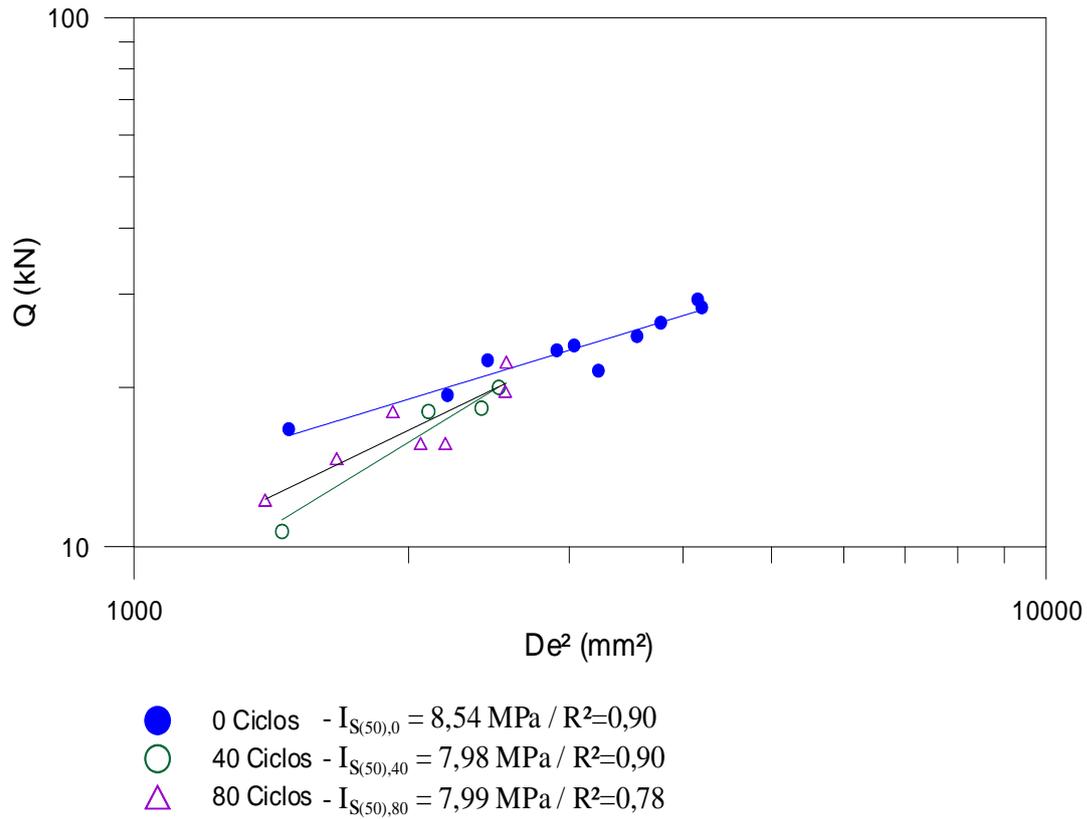


Figura 4.58 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 4D.

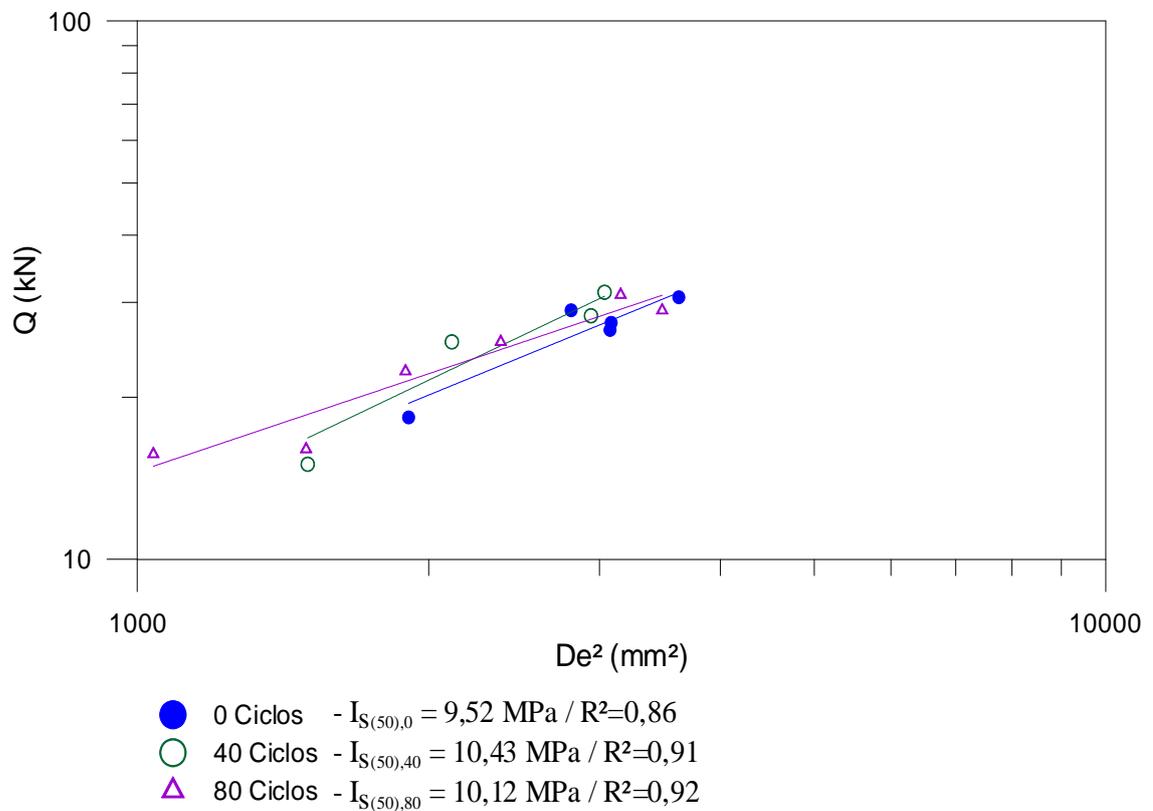


Figura 4.59 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 5D_B.

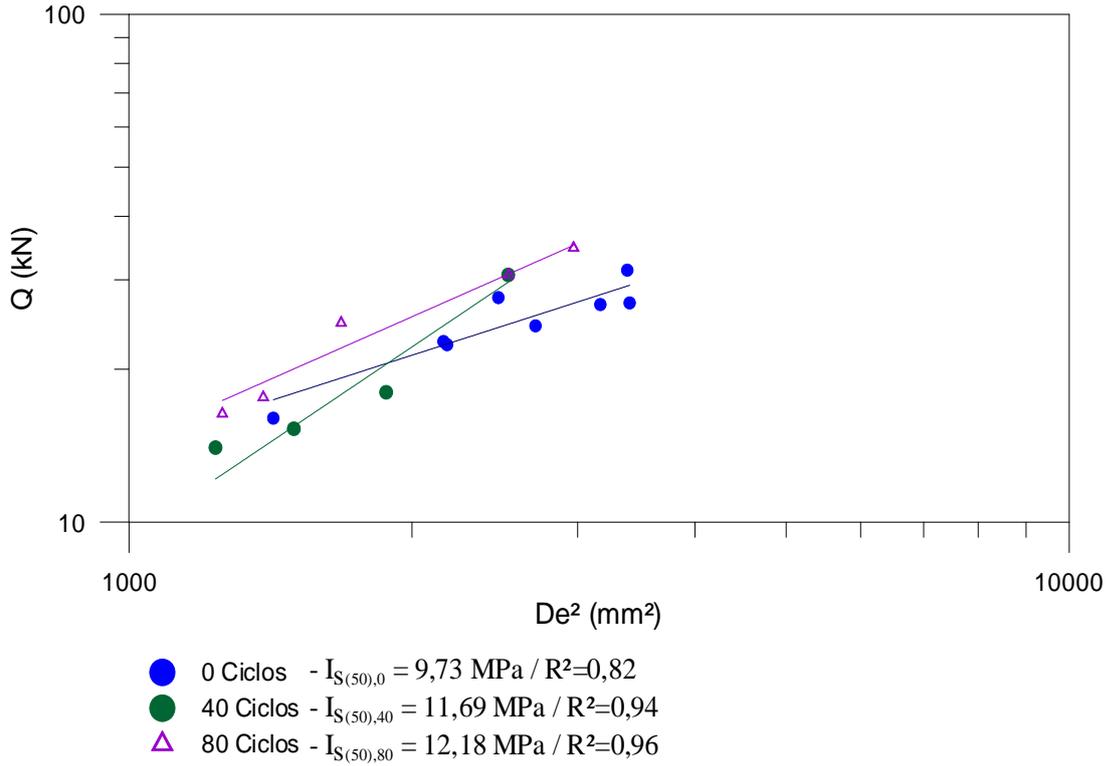


Figura 4.60 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 5D_C.

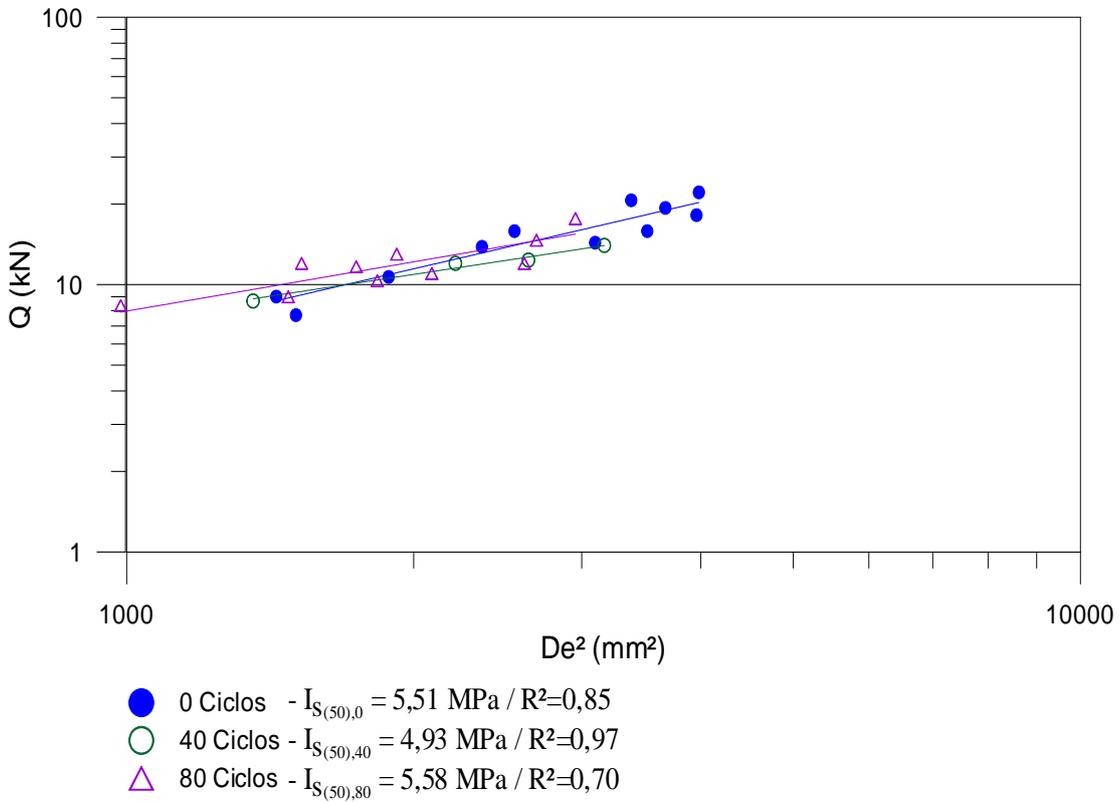


Figura 4.61 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 6C.

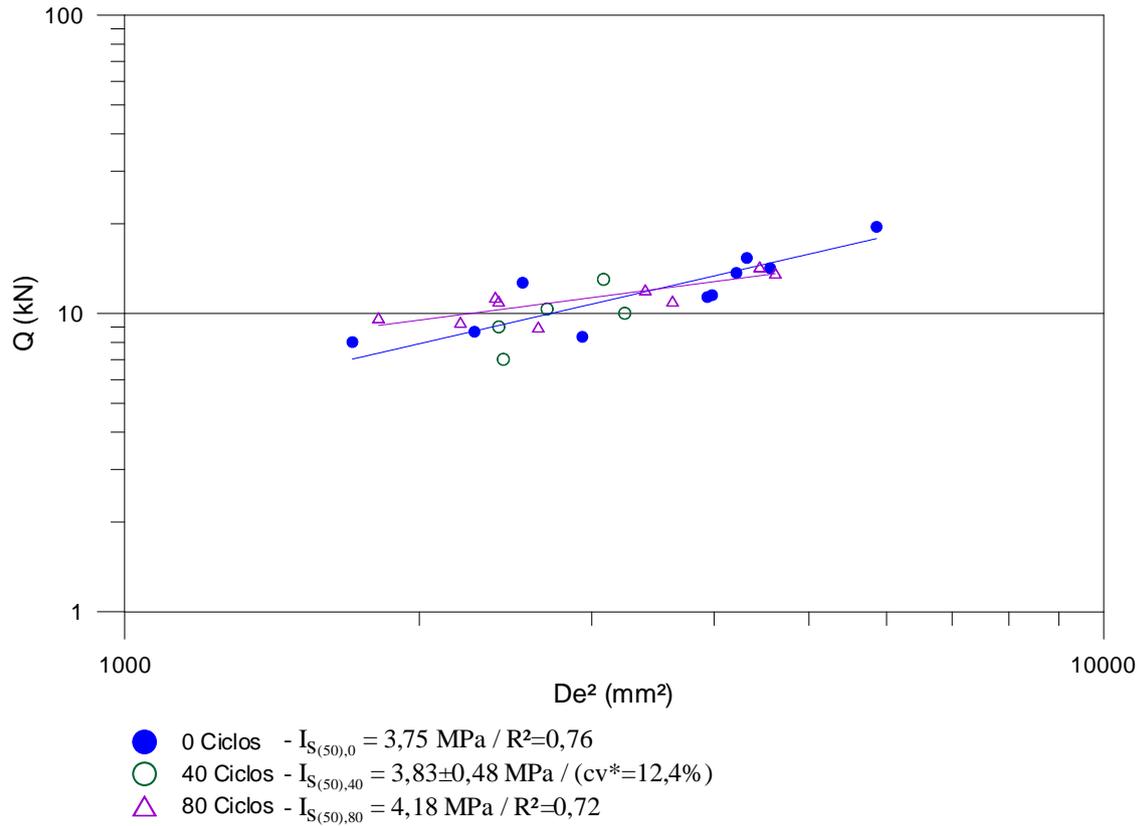


Figura 4.62 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 6C'.

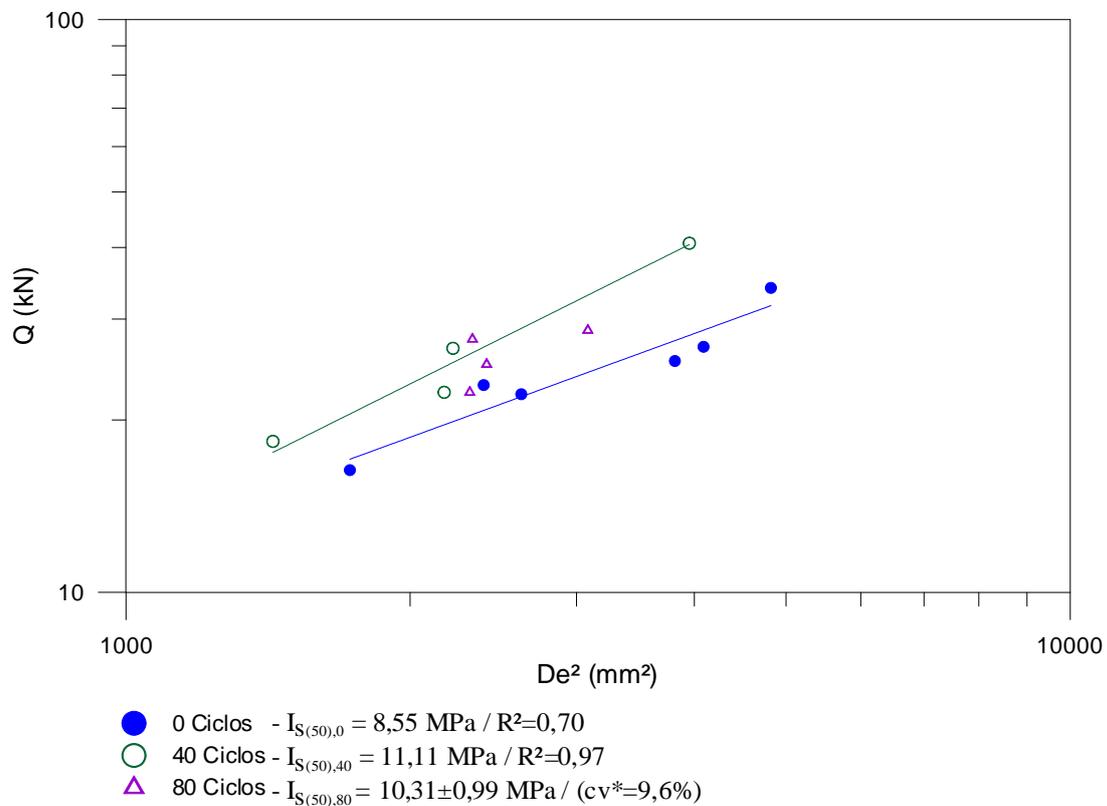


Figura 4.63 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 7C_C.

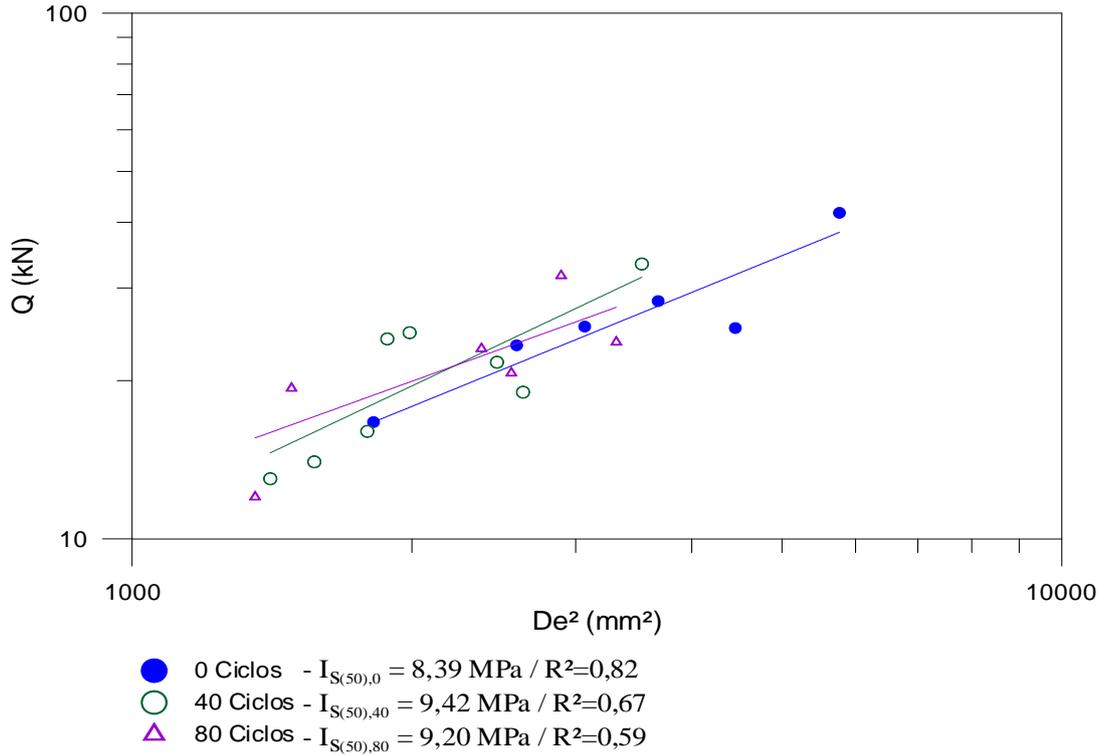


Figura 4.64 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 7C_R.

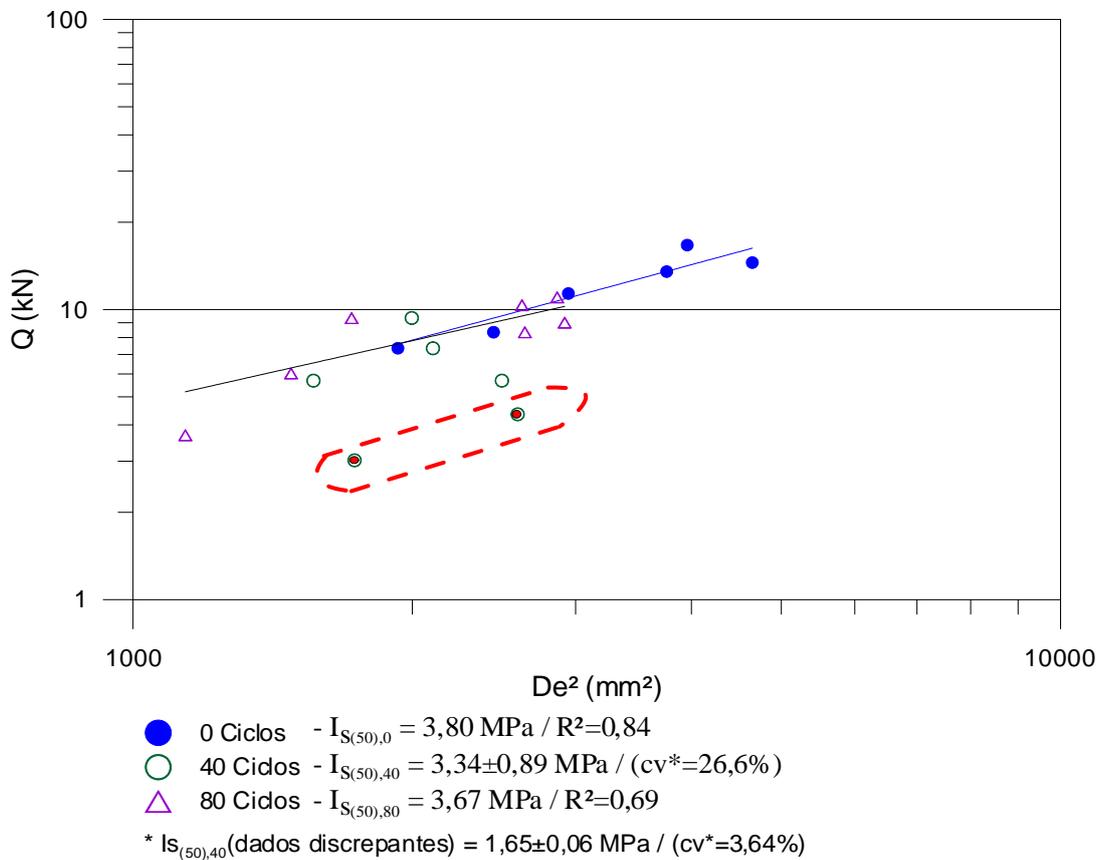


Figura 4.65 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 8B.

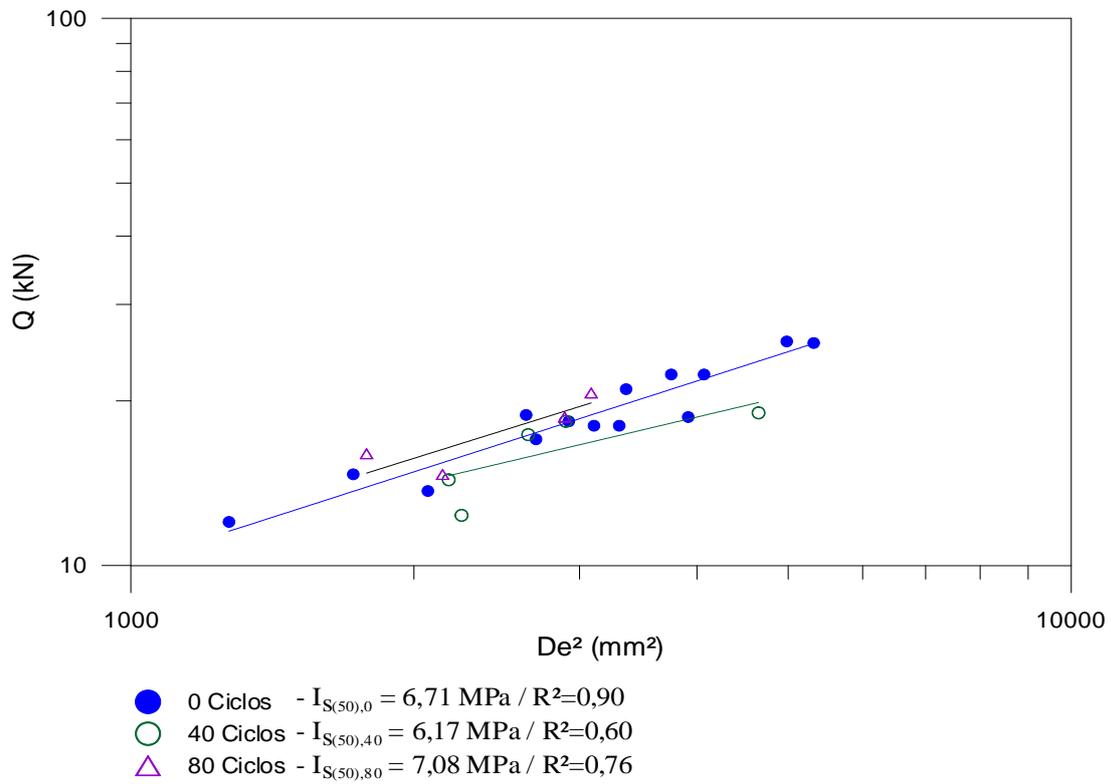


Figura 4.66 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 9B.

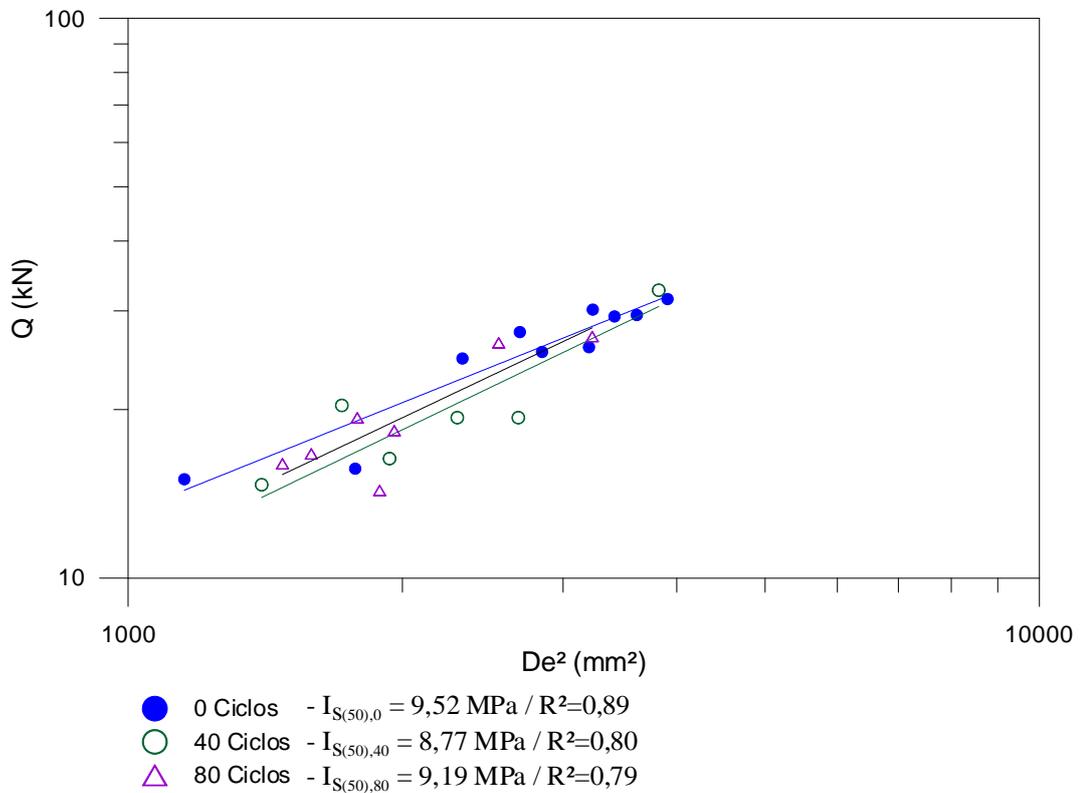


Figura 4.67 – Variação do índice $I_{S(50)}$ durante 80 ciclos de alteração, amostra 10B.

Os grupos de basaltos densos cinza escuros apresentaram comportamentos distintos em termos da variação do índice $I_{S(50)}$. Especificamente para a amostra 1E (Figura 4.55), foi possível na primeira etapa de ensaios (zero ciclo de alteração) individualizar blocos com acentuação de oxidação interna que apresentaram redução de -1,6% no índice $I_{S(50)}$, em relação aos blocos sem oxidação visível a olho nu. Considerando a alteração deste índice ao longo da ciclagem acelerada, houve redução de -4,5% nos primeiros 40 ciclos e após 80 ciclos ocorreu aumento de 3,5 %, em relação ao início da ciclagem. Para o grupo 10B (Figura 4.67), a redução foi de 7,9 % (40 ciclos) e depois a diferença diminuiu para 3,5 % (80 ciclos).

Já nas amostras 7C, os aumentos nestes índices foram de acordo com os subgrupos, 23,4% para 7C_C (Figura 4.63) e 10,9% para 7C_R (Figura 4.64), considerando os primeiros 40 ciclos. Na sequência do ensaio, aos 80 ciclos houve queda nos valores, mas ainda superiores aos iniciais, a diferença reduziu para 20,6 e 9,7 %, respectivamente.

Aumentos em $I_{S(50)}$ próximos a 18% também foram identificados nos subgrupos de basalto densos rosados 5D_C (Figura 4.60) e 5D_B (Figura 4.59), após 40 ciclos. Os valores mantiveram-se praticamente constantes até 80 ciclos.

No grupo 3D_V (Figura 4.57), basalto vesicular, para a condição de 40 ciclos, a variação dos dados foi de 25%, possivelmente pela disposição e tamanho das vesículas e amígdalas na linha de aplicação da carga pontual, atingindo aumento de 8,7% no índice de resistência. Em 80 ciclos este índice aumentou em 41,8 %, de 4,69 para 6,65 MPa. Tanto este aumento, como a alta variação entre os dados pode estar associados novamente à disposição e tamanho de vesículas e amígdalas na linha da aplicação do carregamento.

A amostra 6C não apresentou variações significativas no índice $I_{S(50)}$ ao longo dos 80 ciclos de alteração. Pode-se dizer ainda, que os valores obtidos de resistência pontual podem não ser característicos desta amostra, pois a fragilidade destas está nos planos de argilominerais, então, embora seja mais resistente que a o material vesicular da brecha 6C', por exemplo, sua resistência é governada por planos com concentração de argilominerais.

A amostra de basalto vesículo-amigdalóide 9B apresentou redução de -8,0 % em 40 ciclos e depois aumento de 5,5 % após 80 ciclos de alteração.

Com relação à porção vesicular da brecha basáltica 6C', houve pequeno aumento no índice $I_{S(50)}$, próximo a 2 %. Após 80 ciclos, este incremento passou para 11,5 %. A brecha 8B apresentou valores muito variáveis após 40 ciclos, com $I_{S(50)}$ de 1,65 a 3,34 MPa, reflexo da

heterogeneidade do material. Após 80 ciclos, a variação foi menor, e as amostras apresentaram redução de -3,4 % em relação ao valor anterior à ciclagem.

A porção vesicular da brecha 2D não apresentou variações significativas ao longo do 80 ciclos de alteração em laboratório.

A Figura 4.68 ilustra a variação do índice $I_{S(50)}$ ao longo dos ciclos acelerados de alteração. Observa-se que na maioria das amostras a variação da resistência à carga pontual foi muito pequena.

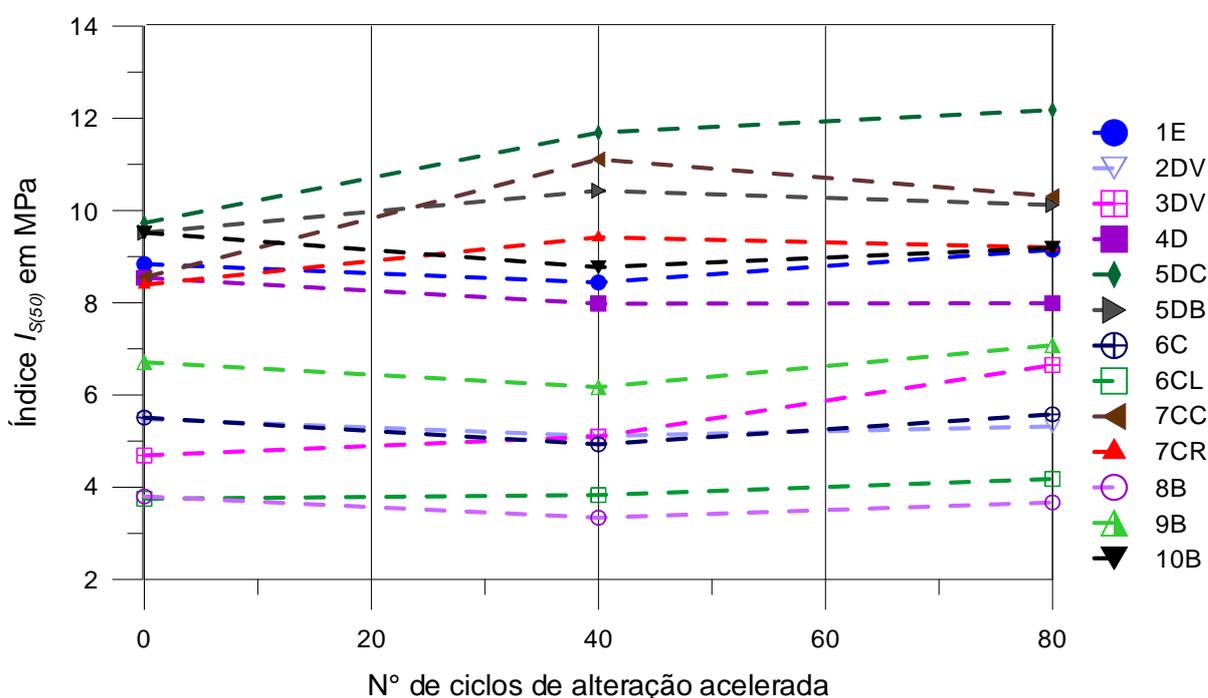


Figura 4.68 – Variação de $I_{S(50)}$ ao longo da ciclagem acelerada.

Com relação às amostras 5D e 7C verificou-se aumento de resistência ao longo da ciclagem. Como estas amostras são densas e, por isso, sofrem pouca interferência da ciclagem (baixa porosidade e baixa capacidade de absorção-d'água), estes aumentos podem ser oriundos da amostragem e não de algum processo de alteração.

Verifica-se que o comportamento das brechas foi mais resistente do que se espera para este tipo de material geológico. Estes resultados são reflexos do método de seleção das amostras analisadas por este estudo. Como estes litotipos eram muito heterogêneas quanto à composição, foi decidido analisar apenas a porção vesicular destas brechas. Com isso, os

resultados não refletem o comportamento deste material geológico, mas sim da porção de basalto vesicular que compõe este litotipo.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios físicos (porosidade aparente, absorção-d'água e velocidade de absorção-d'água), químicos (*pH* e condutividade elétrica) e mecânico (carga pontual), apresentaram boa correlação entre si, mas devem ser utilizados com cuidado para estimar os diferentes parâmetros. Verificou-se que os resultados estão intimamente associados à presença de minerais secundários, ao tamanho e disposição das vesículas e amígdalas e ao estado de alteração da rocha.

Sobre o ensaio de carga pontual, deve-se levar em consideração que o mesmo pode não ser representativo da qualidade real do material rochoso, principalmente pelo fator escala e pela dificuldade em contabilizar a deformação da rocha. O primeiro porque a resistência provém justamente de um carregamento pontual que dificilmente abrange as peculiaridades da rocha, como fraturas e variação dos tamanhos de vesículas ou amígdalas. Com relação à influência da deformação da rocha, esta é dada pela variação que ocorre na distância entre os pontos de carregamento ao longo do ensaio e, conseqüentemente, interfere no cálculo do índice de resistência pontual.

Esperava-se também, que o ensaio de carga pontual refletisse melhor o estado de alteração das amostras. Mesmo seguindo todas as recomendações normativas, em algumas situações não foi possível atingir o número mínimo de corpos-de-prova, o que pode ter interferido nos resultados. Contudo, mesmo levando-se em consideração todos estes fatores, o ensaio permitiu analisar satisfatoriamente a resistência mecânica das amostras, pois se obteve pouca variação entre os resultados de cada grupo de rocha. Somado a isso, o teste de carga pontual tem a vantagem de possibilitar a análise em amostras de geometria irregular, o que o torna prático e rápido na obtenção dos dados.

Confrontando o índice de carga pontual $I_{S(50)}$ com os valores de densidade aparente, porosidade aparente e absorção-d'água, de acordo com a classificação de Verhoef e Van de Wall (1998), os grupos de rocha basáltica podem ser divididos como de qualidade:

- Excelente: Basalto denso cinza escuro (1E, 7C_C, 7C_R e 10B);

- Bom: Basalto denso rosado (5D_C);
- Razoáveis: Basalto denso rosado (5D_B);
- Ruim: basalto denso com argilomineral disseminado (4D), basaltos vesículo-amigdaloidais (3D_V, 6C e 9B) e brechas basálticas (2D_V, 6C' e 8B).

Esta classificação é bastante semelhante à desenvolvida por Itaipu para aplicação destes mesmos litotipos como material de construção, durante as fases de investigação e construção desta usina. Como exemplo, os basaltos densos dos derrames E, C e B, com melhores características físico-mecânicas, foram destinados para produção de agregado para concreto. Os materiais geológicos de qualidade inferior, como os basaltos vesiculares e algumas brechas, foram utilizados para compor zonas de transição e camadas internas da barragem de enrocamento. Com relação ao basalto denso com argilomineral, amostra 4D, embora classificado como ruim, após estudo em um enrocamento experimental, foi utilizado em camadas internas do enrocamento mesclado com material não desagregável e protegido por uma camada de material resistente.

Especificamente sobre a adaptação do ensaio de absorção-d'água rápida, mostrou-se bastante interessante para avaliação da velocidade de absorção-d'água e para determinação do tempo de saturação e de secagem de cada litotipo basáltico. No presente trabalho estes ensaios foram realizados em paralelo à ciclagem acelerada. Porém, constatou-se que este deve ser desenvolvido anterior a este outro ensaio, de maneira a definir previamente a duração de cada ciclo.

Com base nas informações anteriores, com relação ao tempo de estufa estabelecido pela NBR 12696/1992, o ensaio de ciclagem acelerada não foi eficiente para os litotipos de basalto analisados. O período de secagem em estufa foi insuficiente e, conseqüentemente, este ensaio não atingiu seu potencial máximo de alteração em laboratório. As amostras não evoluíram no grau de alteração o que impossibilitou o cálculo dos índices de qualidade (índice de alteração com base nos ensaios físicos e de carga pontual) e o desenvolvimento das curvas de alterabilidade. A Tabela 5.1 apresenta as sugestões de adaptações aos ciclos de alteração.

Acrescenta-se que em condições naturais dificilmente a amostra ficará totalmente saturada, desde que não localizadas em ambiente que armazenem água. Portanto, embora a ciclagem acelerada não tenha possibilitado evolução no grau de alteração, pode-se considerar o ensaio realizado como de agressividade moderada. Além disso, os grupos de rocha analisados mostraram-se bastante resistentes às condições de alteração impostas: (1) as

amostras já haviam sido expostas por 36 anos ao ambiente natural, caracterizado por intenso intemperismo químico, acelerado por processos físicos, como alta oscilação térmica diária e presença de minerais expansivos em alguns grupos de rocha; (2) posteriormente ao período de alteração natural, embora removida a capa de alteração, as mesmas amostras foram submetidas a 80 ciclos de alteração acelerada.

Tabela 5.1 – Sugestão de adaptações para ensaios de ciclagem acelerada em diferentes litotipos basálticos.

Amostra	Descrição	Tempo de saturação (horas)	Tempo de secagem em estufa a 110°C (horas)
-	NBR 12696/92	14±1h	8±1h
1E	Basalto denso cinza escuro	48	12
7C _C		24	24
7C _R		24	24
10B		48	12
5D _B	Basalto denso rosado	48	36
5D _C		48	24
4D	Basalto denso com argilomineral	24	36
3D _V	Basalto vesículo-amigdalóide	48	36
6C		48	23
9B		48	24
2D _V	Brecha basáltica	24	24
6C'		24	24
8B _V		24	24

No que se refere às análises de alteração química, estas atingiram as expectativas iniciais do estudo. Os resultados apresentam diferenças significativas num mesmo litotipo basáltico que dificilmente são detectadas pela avaliação tátil-visual, voltada à classificação do grau de alteração ou até mesmo no próprio ensaio compressão pontual.

Anterior a ciclagem em laboratório os basaltos densos cinza escuros (1E, 7C_C, 7C_R e 10B) são todos classificados como A1 (material são) e com alta resistência (classificação segundo Verhoef e Van der Wall (1998) para $I_{S(50)} > 8$ MPa). Contudo, verifica-se que a amostra 10B apresenta variação significativa em termos de *pH*. Especialmente entre os subgrupos 5DC (W1) e 5DB (W2), ambos com $I_{S(50)} > 9$ MPa, as análises pHmétricas são ainda mais distintas. Ao comparar as imagens de microscópio 200X de cada grupo, estas diferenças de *pH* foram associadas a alteração nos plagioclásios. Sendo assim, para as amostras de basaltos densos analisadas neste estudo, *pH* de abrasão acima de 8 podem ser indicativos de início de alteração.

Quanto aos basaltos vesículo-amigdaloidais e brechas basálticas, a resistência não apresentou correlação com a condutividade elétrica, em contrapartida, constata-se uma tendência de queda na resistência com o aumento do pH . Constata-se nesses grupos a alteração incipiente nos plagioclásios, mas o aumento no pH está fortemente associado a presença de minerais secundários, como argilominerais e calcita.

De acordo com estas considerações, o ábaco de pH e de condutividade elétrica proposto tem grande contribuição na caracterização geotécnica de rochas basálticas, principalmente para análise do grau de alteração. Para basaltos densos e com condutividade elétrica de abrasão entre 0 e 15 $\mu S/cm$, sugere-se a seguinte classificação de alteração:

- A1 (rocha inalterada): $7 > pH \leq 8$, amostras 1E, 7C_C, 7C_R e 5D_C;
- A2 (rocha levemente alterada): $8 > pH \leq 10$, amostras 10B e 5D_B;
- $pH > 10$, deve-se analisar a rocha em microscópio para classificação da alteração.

Para os basaltos vesículo-amigdaloidais e brechas sugere-se:

- A2 (rocha levemente alterada): $7 > pH \leq 8$ e $10 > CE \leq 30$, grupos 6C e 9B;
- A3 (rocha moderadamente alterada): $8 > pH \leq 9$ e $30 > CE \leq 40$, grupos 3D e 6C';
- Os grupos de rocha 2D_V, 4D e 8B devido à composição mineralógica peculiar devem ser analisados isoladamente.

Acrescenta-se que o presente trabalho foi desenvolvido com o intuito de fornecer respostas em curto prazo e com técnicas de baixo custo, o que o caracteriza como um estudo de caráter preliminar. Neste sentido, para obras de grande magnitude ou que envolvem alto risco geotécnico, estudos mais detalhados e com maior controle tecnológico devem ser desenvolvidos de acordo com a finalidade da investigação geológico-geotécnica pretendida.

Para trabalhos futuros recomenda-se repetir este estudo em amostras com diferentes graus de alteração, para cada litotipo analisado: A1 (rocha sã, sem exposição ao intemperismo), A2 (rocha levemente alterada), A3 (rocha moderadamente alterada) e A4 (rocha muito alterada). Isto permitiria desenvolver as curvas de alterabilidade e avaliar o comportamento geotécnico destas rochas ao longo dos 36 anos de alteração natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS²

AGUILLAR FILHO, D.; TEZUKA, Y. Contribuição ao estudo da viabilidade técnica da utilização de basaltos desagregáveis como agregado para concreto massa. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 21 p., 1993.

AIRES-BARROS, L.. **Alteração e Alterabilidade de rocha ígneas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1971. 57 p.

ANGELI, M.; BIGAS, J. P.; MENÉNDEZ, B.; HÉBERT, R.; DAVID, C.. Influence of capillary properties and evaporation on salt weathering of sedimentary rocks. **Heritage Weathering and Conservation**, Madrid, 7 p., 2006.

ASSOCIAÇÃO Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). **NBR 6023**: Informação e documentação - Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 12695**: Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem natural. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12696**: Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12697**: Agregados – Verificação do comportamento mediante ciclagem com etilenoglicol. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15845**: Rochas para revestimento – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

BECK, B. F.. Sinkhole terminology. In: BECK, B. F. (Ed.). **SINKHOLES: THEIR GEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACT**. **Proceedings...** Boston: A. A. Balkema, 1984, p. 9-10.

BENAVENTE, D.; DEL CURA, M. A. G.; BERNABÉU, A.; ORDÓNEZ, S.. Quantification of salt weathering in porous stones using na experimental continuous partial immersion method. **Engineering Geology**, Elsevier, n. 59, p. 313-325, 2001.

BIRID, K. Geotechnical investigations to assess subsurface stratigraphy of West Coast of Mumbai: A case study. **International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)**, n.35, p.1-7, 2006.

BONUCCELLI, T. J.; ZUQUETTE, L. V. . Movimentos Gravitacionais de Massa e Erosões na Cidade Histórica de Ouro Preto, Brasil. **Geotecnia**, Lisboa, v. 85, p. 59-80, 1999.

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

BREKKE, T. L. On the measurement of the relative potential swellability of hydrothermal montmorillonite clay from joints and faults in Pre-Cambrian and Paleozoic rocks in Norway. In: **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, v.2, p.155-165, 1965.

² De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023/2002.

CARNERO, E. G. C. **A cimentação natural de sedimentos arenosos e sua influência nas obras civis**. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

CARROLL, D. **Rock weathering**. New York: Plenum Press, 1970. 203 p.

CASAGRANDE, A. Desaggregation of basalt at Jupia dam. **Relatório Técnico**. Foz do Iguaçu, ITAIPU Binacional, n. 2112.50.15000.I.R0A, 1976.

CERYAN, S. New chemical weathering indices for estimating the mechanical properties of rocks: a case study from the kurtün granodiorite, NE Turkey. **Turkish Journal of Earth Science**, v.17, p.187-207, 2008.

CENTRAIS Elétricas de São Paulo (CESP). Abertura de poços para observação periódica no enrocamento de Jupia. **Relatório Técnico**. Foz do Iguaçu, ITAIPU Binacional, n. 2073.50.00251.P.R0, 1976.

CHEN, F. H. **Foundations on expansive soils**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 280 p.

CHEN, J.; BLUME, H. P.; BEYER, L. Weathering of rocks induced by lichen colonization: a review. **Catena**, Elsevier, v. 39, p. 121-146, 2000.

CHORLEY, R. J. (Ed.). **Introduction to fluvial processes**. Bungay: Methuen, 1969.

CLARK, J. H.; KYBETT, A. P.; MACQUARRIE, D. J. **Supported eagents : preparation, analysis, and applications**. New York : VCH, 1992.

CRUZ, P. T. C.; NIEBLE, C. M.. Engineering properties of residual soils and granular rocks originated from basalts – Capivara Dam – Brasil. In: CONGRESSO REGIONAL AFRICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÃO, 5., 1971, Angola. 22 p.

DAY, H. L.. A progress report on studies of degrading basalt aggregate bases. **Highway Research Board Bulletin**, n. 344, p.8-16, 1962.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J.. **Minerais constituintes das rochas: uma introdução**. London: Longmans, Green and Co., Ltd , p. 274-299, 1966.

DEL LAMA, E. A.; SZABÓ, G. A. J.; DEHIRA, L. K.; KIHARA, Y. Impacto do Intemperismo no Arenito de Revestimento do Teatro Municipal de São Paulo. **Revista do Instituto de Geociências**, São Paulo, v. 8, n. 1, p.75-86, 2008.

DELGADO RODRIGUES, J. Previsão da alterabilidade de materiais rochosos naturais. **Revista Portuguesa de Geotecnia**, n. 20, 1977, p. 53-68.

DEPARTAMENTO Nacional De Estradas De Rodagem (DNER). **DNER-ME 399/99: Agregados – determinação da perda ao choque no aparelho Treton**. Rio de Janeiro, 1999.

DOEHNE, E; PRICE, C. A. **Stone conservtion: an overview of current research**. 2. ed. Los Angeles: Getty Publications, 2010.

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, 1971a.

FARJALLAT, J. E. S. Estudos Experimentais sobre Desagregação do Basalto Compacto usado no Enrocamento do Aterro da Ponte do Rio Sucuriú. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 1, São Paulo. **Anais...**São Paulo: APGA, v.3, 1971b. 9 p.

- FARJALLAT, J. E. S. Desagregabilidade de rochas e problemas relativos à sua aplicabilidade: Sessão 1 - Relato sobre o tema. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972, São Paulo. **Anais...** São Paulo: APGA, 1972. p. 19-54.
- FARJALLAT, J. E. S.; MONTEZZO NETO, V.; RATTI, G. Relação entre teores de minerais argilosos expansivos e desagregação de rochas basálticas. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972a, São Paulo. **Anais...** São Paulo: APGA, 1972a. p. 123-143.
- FARJALLAT, J. E. S.; PAES DE BARROS, F.; YOSHIDA, R.; OLIVERIA, J. A. N. Alguns problemas de degradação dos basaltos da barragem de Capivara, Rio Paranapanema. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972b, São Paulo. **Anais...** São Paulo: APGA, 1972b. p. 73-102.
- FARRAN, J.; THENOZ, B. L'alterabilité des roches, ses facteurs, sa prévision. In: L'INSTITUT DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS, 215, 1965. **Annales...** Paris: La Société de Diffusion des Techniques du Batiment et des Travaux Publics, n. 215, 1965. p.1534-1548.
- FEDO, C. M.; NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Unravelling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. **Geology**, Elsevier, v.23, n.10, p. 921-924, 1995.
- FERREIRA, P. A. P. S. **Alteração e alterabilidade das rochas:** implicações em obras de engenharia. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2000.
- FOOKES, P. G.; GOURLEY, C. S.; OHIKERE, C. Rock Weathering in Engineering Time. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, London, vol. 21, p. 33-57, 1988.
- FRAZÃO, E. B. 1981. **Contribuição à metodologia para determinação da pressão de expansão em solos e rochas.** Dissertação (mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.
- 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.
- FREITAS NETO, O. ; SIMÕES DE OLVEIRA, A. G. ; BEGGIATO, L. D. ; JESUS, A. C. ; JAMAL, F. G. . Caracterização geotécnica do basalto da Formação Serra Geral para utilização na construção civil . In: II GEOJOVEM - Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnico, Nova Friburgo. **Anais...** Nova Friburgo: Geojovem, 2006. 5 p. CD-ROM.
- FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E.; CHAVES NETO, A.; HINDI, E. C. A influência das atividades mineradoras na alteração do pH e da alcalinidade em águas fluviais: o exemplo do rio Capivari, região do carste paranaense. **Eng. Sanit. Ambient**, v.14, n. 3, p. 381-390, 2009.
- FUKUSHIMA, H. **Examples of the tunnel portal collapse excavated highly weathered granite.** Japan: APEC Registered Engineer, Hai Van Pass Tunnel Construction Project, 2002.
- GOLDICH, S.S. A study in rock-weathering. **Journal of Geology**, v. 46, p. 17-58, 1938.
- GOMES, R. L. **Características tecnológicas e alterabilidade dos compartimentos entablamento e colunata de derrames basálticos da porção setentrional da Bacia do Paraná.** Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

- GRANT, W. H. Weathering of stone mountain granite. **Clays and Clay Minerals**. Pergamon Press, Britain, v. 11, p. 65-73, 1963.
- GRANT, W. H. Chemical weathering of biotite-plagioclase gneiss. **Clays and Clay Minerals**. Pergamon Press, Britain, v.12, p. 455-463, 1964.
- GRANT, W. H. Abrasion pH, an index of chemical weathering. **Clays and Clay Minerals**. Pergamon Press, Britain, v. 17, p. 151-155, 1969.
- GUEDES, S. A. Breve estudo sobre o comportamento da calcedônia nos ensaios de reatividade potencial do agregado e reatividade dos álcalis do cimento com o agregado - porcentagens deletérias de um mineral. . In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972, São Paulo. **Anais...** São Paulo: APGA, 1972, p. 173-181.
- GUIDICINI, G.; SANTOS OLIVEIRA, A. M.; PIRES DE CAMARGO, F.; KAJI, N. Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972, São Paulo. **Anais...** São Paulo: APGA, 1972, p. 275-284.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgar Blucher, 1976.
- GUPTA, A. S.; RAO, S. K.. Index properties of weathered rocks: interrelationships and applicability. **Bull. Eng. Geol. Env.**, v. 57, p.161-172, 1998.
- GUROCAK, Z.; KILIC, R. Effect of weathering on the geomechanical properties of the Miocene basalts in Malatya, Eastern Turkey. **Bull. Eng. Geol. Env.**, v.64, p.373-381, 2005.
- GUZZI, T. C. E. **Índice de alteração e alterabilidade de rochas, aplicação para amostras de basalto da Pedreira Bandeirantes, São Carlos (SP)**. Dissertação (mestrado) - Departamento de Geotecnia da 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, 1961, p. 771-774.
- HARNOIS, L. The CIW index - a new chemical index of weathering. **Sedimentary Geology**, n. 55, p. 319-322, 1988.
- HOEK, E.; BRAY, J. **Rock slope engineering**. 3. ed. London : E & FN Spon, 1997, 358 p.
- HYPOLITO, R.; VALARELLI, J. V. 1972. Alteração Experimental de Diabásios. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972a, São Paulo. **Anais...** São Paulo: APGA, 1972, p. 103-122.
- ILIEV, I. G. An attempt to estimate degree of weathering of intrusive rocks from their physic-mechanical properties. In: CONGRESS OF THE ISRM, 1. **Proceedings...**, Lisboa: ISRM, n. 1, p. 109-114, 1966.
- INSTITUTO Agrônomo do Paraná (IAPAR). **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina, PR, Instituto Agrônomo do Paraná, 2000. 38p. CD-ROM.
- INSTITUTO de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Estudos geológico-geotécnicos para caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens). **Relatório**. São Paulo: IPT, n. 19569, 1984.

INTERNATIONAL Society For Rock Mechanics (ISRM). **Suggested method for determining point load strength.** Oxford: ISRM Suggested Methods, E.T. Brown ed., Pergamon Press, 1972.

_____. **Rock Characterization, Testing and Monitoring.** Oxford: ISRM Suggested Methods, E.T. Brown ed., Pergamon Press, 1981.

ITAIPU Binacional. **Aprovechamiento hidroelectro de Itaipu:** ensayos de desagregacion em gran escala y em laboratório. Sistema de Arquivo Técnico, 2112.50.01100-E. Foz do Iguaçu, 1975. 15p.

_____. **Relatório técnico mensal:** julho/76. Sistema de Arquivo Técnico, 2080.54.00050-P, Foz do Iguaçu, 1976.

_____. **Mapeamento geológico final:** legenda geológica. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, Sistema de Arquivo Técnico, n. 2084.DI.01500, 1977. 1p.

_____. **Relatório técnico mensal:** maio/70. Sistema de Arquivo Técnico, 2112.50.01753-P(1)R0, Foz do Iguaçu, 1978a.

_____. **Enrocamento experimental:** poço nº7. Sistema de Arquivo Técnico, 2112.50.01754-P, Foz do Iguaçu, 1978b. 18p.

_____. **Aprovechamiento Hidroelectro de Itaipu:** presa de enrocado – informe final. Sistema de Arquivo Técnico, 4270.50.1003-E. Foz do Iguaçu, 1978c. 129p.

_____. **Ciclagem natural em grande escala:** 9ª observação. Sistema de Arquivo Técnico, 2073.50.01760-P, Foz do Iguaçu, 1981. 22p.

_____. **Hydroelectric Project:** Engineering features. Chapter 4: Geology, geotechnical investigation and subsurface treatment. Curitiba, Paraná, 1994. p. 4.1-4.17.

_____. **Usina Hidrelétrica de Itaipu:** aspectos técnicos das estruturas civis. Superintendência de engenharia - diretoria técnica. Organização e revisão: FIORINI, A. S. (Org.). Foz do Iguaçu, 2008. 133p.

_____. **Caracterização mineralogical e petrográfica de testemunhos de sondagens enviados pela Fundação Parque Tecnológico Itaipu.** Rio Claro: UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2010. 46p.

JACOBS, D. **Hazards in tunneling and on falsework.** Cap. 3: Some tunnel failures and what they have taught. Institution of Civil Engineers, ICE Virtual Library, p. 37-46, 1975.

JENNY, H. **Factors of soil formation:** a system of quantitative pedology. New York, London: McGraw-Hill Book Company, 1941.

KWAAD, F. J. P. M. **Experiments on the granular disintegration of granite by salt action.** Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium from field to laboratory. n. 16, 1970.

LADEIRA, F. L.; MINETTE, E. A Quantificação da Alteração e da Alterabilidade de Rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4., 1984a, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: ABGE, v. 3, 1984a, p. 351-358.

LADEIRA, F. L.; MINETTE, E. Índices físicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4., 1984b, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: ABGE, v. 3, 1984b, p. 359-366.

LADEIRA, F. L.; MINETTE, E. Índices geomecânicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4., 1984c, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: ABGE, v. 3, 1984c, p. 367-370.

LATHAN, J. P.. Degradation model for rock armour in coastal engineering. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, n.24, p.101-118, 1991.

LATHAN, J. P.; LIENHART, D.; DUPRAY.. Rock quality, durability and service life prediction of armourstone. **Engineering Geology**, Elsevier, n. 87, p. 122-140, 2006.

LEE, M. R.; PARSONS, I. Biomechanical and bioquematical weathering of lichen-encrusted granite: textural controls on organic-mineral interactions and deposition of silica-rich layers. **Chemical Geology**, Elsevier, n. 161, p. 385-397, 1999.

LEINZ, V.; AMARAL, S. E. **Geologia Geral**. 4. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1969.

LEINZ, V.; BARTORELLI, A.; SADOWSKI, G. R.; ISOTTA, C. A L.. Sobre o comportamento espacial do trapp basáltico da Bacia do Paraná. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v.15, n.4, p.79-91, 1966.

LOUGHNAN, F. C. **Chemical weathering of the silicate minerals**. New York: American Elsevier Publishing Company, 1969. 154 p.

MAACK, K.. Die Entwicklung der Gondwanaschichten Südbrasilien und ihre Beziehungen zur Karoo-Formation Südafrikas. In: INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, SYMPOSIUM SUR LES SÉRIES DE GONDWANAINTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 19, p.339-372, 1952.

MADRID – Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transportes, Comunidad de Madrid. **Informe sobre el NATM del health e safety executive, de Inglaterra, 1996**. Comunidad de Madrid, 1996. Disponível em <<http://www.madrid.org/metro/infonatm.html>>, acesso em 21, fev, 2012.

MAIA, P. C. A. **Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos**. Tese (doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2001.

MAIA, P. C. A. ; SAYÃO, A.S.F.J. ; NUNES, A. L. L. S.; ANTUNES, F. S. Avaliação experimental da alteração de enrocamentos. **Solos e Rochas**, n. 24, v. 2, p. 129-139, 2001.

MAIA, P. C. A. ; SAYÃO, A.S.F.J. ; NUNES, A. L. L. S.; ANTUNES, F. S. Alterabilidade de rochas basálticas: caracterização petrográfica e física. **Solos e Rochas**, n. 25, v. 3, p. 207-220, 2002.

MAIA, P. C. A. ; SAYÃO, A.S.F.J. ; NUNES, A. L. L. S. Alterabilidade de rochas basálticas: caracterização mecânica. **Solos e Rochas**, n. 3, v. 26, p. 205-216, 2003.

MALOMO, S.. Abrasive pH of feldspars as an engineering index for weathered granite. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, n.22, p.207-211, 1980.

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

MARRANO, A. ; PARAGUASSÚ, A. B. . Caracterização Tecnológica das Rochas Basálticas da Usina Hidrelétrica Canoas I, Rio Parapanema, SP/BR, Brasil. **Solos e Rochas**, São Paulo, v. 21, n. 3, p. 143-164, 1998.

- MARSAL, R. J.. Particle Breakage in Coarse Granular Soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 7, Mexico, Specialty Session n.13, p. 155-165, 1969.
- MARTINI, I. P.; CHESWORTH, W. (Ed.). **Developments in earth surface processes: weathering, soils e paleosols**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., n. 2, 1992.
- MEHTA, P. K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.
- MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M.; NARDY, A. J. R.. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin – an introduction. **The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects**. PICCIRILLO, E. M; MELFI, A. J. (Ed.). São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1988. p.1-13.
- MENDES, F.; AIRES-BARROS, L. ; RODRIGUES, F. ;P.. The Use of Modal Analysis in the Mechanical Characterization of Rock Masses. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, 1. **Proceedings...** Lisbon: n. 25, v.1, 1966.
- MOON, V.; JAYAWARDANE, J. Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. **Engineering Geology**, Elsevier, v.74, p. 57-72, 2004.
- MUNSELL Color Chips. Geological rock-color chart. Munsell Color, 2009. 12p.
- NASCIMENTO, Ú. **Problema da alterabilidade das rochas em engenharia civil**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Ministério das Obras Públicas, Memória n. 363, 1970.
- NATIONAL Geographic News (NGN). **Sinkhole in Guatemala: Giant Could Get Even Bigger**. Net, jun. 2010. Daily News. Disponível em <<http://news.nationalgeographic.com/news/2010/06/100603-science-guatemala-sinkhole-2010-humans-caused/>>. Acesso em 5 fev. 2012.
- NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, n. 299, p. 715-717, 1982.
- NEVES, E. M. Algumas considerações sobre a mecânica dos enrocamentos. **Solos e Rochas**, n. 3, v. 25, p. 161-203, 2002.
- NEWTON, J. G.. Sinkhole terminology. In: BECK, B. F. (Ed.). **SINKHOLES: THEIR GEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL IMPACT. Proceedings...** Boston: A. A. Balkema, 1984, p. 3-9.
- NISHII, R.; MATSUOKA, N.. Monitoring rapid head scarp movement in an alpine rockslide. **Engineering Geology**, Elsevier, v. 115, p. 49-57, 2010.
- OLANA, J.; PULGAR, J. A.; FERNÁNDEZ-VIEJO, G.; LÓPEZ-FERNÁNDEZ, C.; GONZÁLEZ-CORTINA, J. M. Weathering variations in a granitic massif and related geotechnical properties through seismic and electrical resistivity methods. **Near Surface Geophysics**, v. 8, p. 585-599, 2010.
- OLLIER, C. N. **Weathering**. London : Longman, 1975.
- PAES DE BARROS, F. Propriedades tecnológicas do material G.M. e sua utilização na barragem de Capivara. . In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972, São Paulo. Anais... São Paulo: APGA, 1972, p. 55-72.

PÁNEK, T.; ŠILHÁN, K.; TÁBOŘÍK, P.; HRADECKÝ, J.; SMOLKOVÁ, V.; LENART, L.; BRÁZDIL, R.; KAŠIČKOVÁ, L.; PAZDUR, A.. Catastrophic slope failure and its origins: Case of the May 2010 Girová Mountain long-runout rockslide (Czech Republic). **Geomorphology**, Elsevier, n. 130, p. 352-364, 2011.

PARKER, A. An index of weathering for silicate rocks. **Geological Magazine**, v.170, n.6, p.501-504, 1970.

PATIAS, J. SILVA, P. C.; ZUQUETTE, L. V.; WAICHEL, B. L. Historical survey of the Experimental Rockfill developed by Itaipu Binacional. In: IAEG CONGRESS, 11, 2010, Auckland. IAEG CONGRESS, 2010, p.2329-2336.

PEDRO, G.. Distribution des principaux types d'alteration chimie à la surface du globe. Présentation d'une esquisse géographique. **Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique**, v. 5, n.10, p.457-470, 1968.

PELTIER, L. C. The geographical cycle in periglacial regions as it is related to climatic geomorphology. In: ASSOCIATION OF AMERICAN GEOGRAPHERS. **Annales... AAG**, 1950, v.40, n.3, p.214-236.

PICHLER, E. A Petrologia e os Ensaios Tecnológicos de Rochas. **Separata do Boletim do Departamento de Estradas de Rodagem**. São Paulo: DER, 1942.

PICHLER, E. **Argilas**. Separata dos anais da ABMS. São Paulo: IPT, 1951.

PRICE, D. G.. Weathering and weathering processes. **Quarterly Journal of Engineering Geology**, n. 28, p. 243-252, 1995.

REICHE, P.. Graphic representation of chemical weathering. **Journal of Sedimentary Petrology**, v.13, n.2, p.58-68, 1943.

RIBEIRO NETO, F.; KOCHEN, R.. Segurança, ruptura e colapso de túneis urbanos em NATM. **Engenharia**, n.540, p.55-62, 2000.

ROCHA, M. **Mecânica das Rochas**. Lisboa: LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal, 1971.

ROFFMAN, H. L. **Natural and experimental weathering basalts**. Dissertation (doctor of philosophy in Geoscience), New Mexico Institute of Mining and Technology, 1971.

RUIZ, M. D. Mecanismo de desagregação de rochas basálticas semi-alteradas. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 2., 1963, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABMS, 1963, v. 1, p. 533-543.

SADISUN, A.; SHIMADA, H.; ICHINOSE, M.; MATSUI, K. Study on the physical desintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test. **Geotechnical and Geological Engineering**, n. 23, p. 199-218, 2005.

SCHNEIDER, A. W.; ROCHA, F. X. S. P.. **Emprêgo de basaltos em pavimentação rodoviária**. Publicação 433. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1968. 43 p.

SCOTT, L. E. Secondary minerals in rocks as a cause of pavement and base failure. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD, 34., 1955. **Proceedings...** Washington: NAS-NRC 1955, n. 34, p. 412-417.

SEIDENFUSS, T. **Collapses in tunnelling**. Master degree. Foundation Engineering and Tunnelling. Germany, 2006.

SHALKOWSKI, A.; KODAMA, Y.; NAKANO, S.. The assessment of weathering stages in granites using an EC/pH meter. **Geomorphology**, Elsevier, n. 105, p. 253-260, 2009.

- SILVA, G. A. **Recuperação de blocos decoroamento afetados pela reação álcali-agregado**. Dissertação (mestrado), Universidade Católica de Pernambuco. Recife, PE, 2007.
- SMITH, M. R. (Ed.). **Stone: building stone, rock fill and armourstone in construction**. Engineering Geology Special Publication, 16. London: Geological Society, 1999.
- STANTON, T. E. Expansion of Concrete Through Reaction between Cement and Aggregate. **Proceedings...**American Society of Civil Engineers, 1940, v. 66, p. 1781-1811.
- STRUILLOU, R. 1969. Prévission de l'Altérabilité des Matériaux Employées en génie civil. **Coloque de Géotechnique**, Toulouse, p. 35-46, 1969.
- STURZENEGGER, M.; STEAD, D. The Palliser rockslide, Canadian rocky mountains: characterization and modeling of a stepped failure surface. **Geomorphology**, Elsevier, n. 138, p. 145-161, 2012.
- THENOZ, B.; FARRAN, J. C.; CARDECOMME, L.. Rôle des argiles dans le comportement des roches cristallines misesau contact de l'eau. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, 1. **Proceedings...** Lisbora: Congress of the International Society of Rock Mechanics, 1966, v.1, p.717-719.
- TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.
- TÜRKMENA, S.; ÖZGÜZELB, N.. Grouting a tunnel cave-in from the surface: a case study on Kurtkulag~I irrigation tunnel, Turkey. **Tunnelling and Underground Space Technology**, n.18, p.365-375, 2003.
- VERHOEF, P. N. W.; VAN DE WALL, A.. **Application of Petrography in Durability assessment of Rock Construction Materials Aggregate Resources**. Balkema, 1998, p.307-330.
- VILES, H. A; GOUDIE, A. S. Rapid salt weathering in the coastal Namib desert: implications for landscape development. **Geomorphology**, Elsevier, n. 85, p. 49-62, 2007.
- WAKIZAKA, Y. Alkali-silica of Japanese rocks. **Developments in Geotechnical Engineering**, Elsevier, v.84, p.293-303, 2000.
- WEINERT, H. H. Engineering Petrology for Roads in South Africa. **Engineering Geology**, Elsevier, v. 2, n. 6, p. 363-95, 1968.
- WOODRUFF, S.D. **Methods of working coal and metals mine**. New York : Pergamon Press, v.1, cap. 9, 1966.
- YOSHIDA, R. . **Contribuição ao Conhecimento das Características Tecnológicas dos Materiais Rochosos**. São Paulo. Tese (doutorado) - Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, 1972 .
- YOSHIDA, R.; FARJALLAT, J. E. S.; CARUSO, L. G.; FRAZÃO, E. B.. Sugestão de roteiro e escolha de ensaios tecnológicos. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4., 1972, São Paulo. **Anais...** São Paulo: APGA, 1972, p. 199-236.
- YOSHIDA, H.; SUGAI, T.; OHMORI, H.. Size-distance relationships for hummrocks on volcanic rockslide-debris avalanche deposists in Japan. **Geomorphology**, Elsevier, n. 136, p. 76-87, 2012.
- ZHANG, H.; YUAN, Y.. Study on effects of softrock-contained rockfill for stress and deformation of high core rockfill dam. **Applied mechanics and materials**, v. 90-93, p. 2516-2520, 2011.