Campus de São Carlos

**Caracterização tecnológica das rochas
basálticas da Usina Hidroelétrica Canoas I,
rio Paranapanema, SP/PR**

Antonio Marrano

Orientador: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassu

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

T 161/97

V

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS ROCHAS BASÁLTICAS DA
USINA HIDROELÉTRICA CANOAS I, RIO PARANAPANEMA, SP/PR.**

GEÓL. ANTONIO MARRANO

DEDALUS - Acervo - EESC

31100035767

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

Orientador: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassu

São Carlos
1997

Class. TESE. CCSC
Cott. 3378
Tombo T161193

Área: Geotecnia

at 927480

M358c

Marrano, Antonio

Caracterização tecnológica das rochas basálticas da Usina Hidroelétrica Canoas I, rio Paranapanema, SP/PR / Antonio Marrano. São Carlos, 1997.

208p

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1997

Orientador: Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassu

1. Material de construção. 2. Rocha basáltica. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 23-4-1997
pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular **ANTENOR BRAGA PARAGUASSU (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Prof. Doutor **JOSÉ EDUARDO RODRIGUES**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

Doutor **ELY BORGES FRAZÃO**
(Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT)

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Coordenador da Área de Geotecnia

JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Aos meus pais, Miguel
(in memorian) e Idalina.*

AGRADECIMENTOS

O autor expressa seus sinceros agradecimentos a todos aqueles que, direta ou indiretamente, viabilizaram a realização desta pesquisa.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, através da Divisão de Geologia - Digeo, pela oportunidade e apoio em todas as etapas do trabalho.

À Cesp - Companhia Energética de São Paulo, em especial ao corpo técnico da Diretoria de Planejamento, Engenharia e Construção, pela cessão e autorização para a divulgação dos dados técnicos compilados.

Ao Prof. Dr. Antenor Braga Paraguassu, nosso orientador, pela atenção, estímulo e confiança demonstradas durante o transcorrer do trabalho.

Ao Prof. Dr. José Carlos Angelo Cintra, coordenador do curso de pós-graduação em Geotecnia, pela paciência em aguardar a conclusão de uma tarefa aparentemente interminável (!).

Ao Geól. Edgar Serra Jr., MSc, à época funcionário da Digeo, que, na qualidade de residente de obra na UHE Canoas I, muito colaborou com suas acuradas observações de campo e instigantes discussões.

Ao Geól. Ely Borges Frazão, Dr., funcionário da Digeo, pelas valiosas sugestões que, em muito, contribuíram para a homogeneização da terminologia empregada neste trabalho.

Ao Matemático Carlos César Tanaka e ao Físico Shintaru Furumoto, pelo tratamento matemático dos dados de ensaios.

Ao Aroldo Ribeiro da Silva, técnico da Digeo, pela confecção de todas as ilustrações em CAD.

Ao Luiz Celso Coutinho, técnico da Digeo, pela confecção de todas as ilustrações em Excel.

À Marlene Santana, secretária do IPT, pelo trabalho de digitação e revisão editorial.

À minha família, ao Grupo da Márcia e da Ziza, aos amigos e, em especial, ao Sérgio, pelo apoio e por compartilharem, ainda que involuntariamente, as minhas ansiedades durante a fase de redação desta dissertação.

SUMÁRIO

	p.
ÍNDICE.....	vi
LISTA DE QUADROS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE ANEXOS.....	xix
LISTA DE APÊNDICES.....	xx
RESUMO.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
1 INTRODUÇÃO	1
2 ASPECTOS RELEVANTES SOBRE A ALTERAÇÃO E A ALTERABILIDADE DAS ROCHAS	3
3 O COMPLEXO HIDROELÉTRICO CANOAS.....	56
4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA	59
5 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MATERIAL ROCHOSO	67
6 ENSAIO DE ALTERABILIDADE NATURAL DE TESTEMUNHOS DE SONDAGENS	72
7 CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DOS TIPOS LITOLÓGICOS....	77
8 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	81
9 EMPREGO DAS ROCHAS BASÁLTICAS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO NA UHE CANOAS I	145
10 CONCLUSÕES	152
ANEXOS	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199
APÊNDICES.....	I

ÍNDICE

	p.
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ASPECTOS RELEVANTES SOBRE A ALTERAÇÃO E A ALTERABILIDADE DAS ROCHAS.....	3
2.1 Seleção da escala de tempo.....	3
2.2 Terminologia.....	4
2.3 Processos intempéricos naturais	6
2.3.1 Intemperismo físico	7
2.3.2 Intemperismo químico	8
2.3.3 Influência das condições ambientais.....	11
2.4 Fatores intervenientes na alteração e na alterabilidade.....	13
2.4.1 Composição mineralógica	15
2.4.2 Descontinuidades da rocha.....	18
2.4.3 Argilominerais expansivos.....	22
2.5 Variação das propriedades das rochas com a alteração	27
2.6 Atuação dos processos de degradação no tempo de engenharia	31
2.7 Índices quantificadores da alteração e da alterabilidade	33
2.7.1 Índices geoquímicos de alteração.....	34
2.7.2 Índices petrográficos de alteração	35
2.7.3 Índices físicos e mecânicos de alteração.....	37
2.7.4 Índices de alterabilidade.....	39
2.8 Critérios de previsão de comportamento e de seleção dos materiais rochosos	44
2.8.1 Ensaio de alterabilidade	45
2.8.2 Critérios de seleção.....	47
2.9 Exemplos de implicações da alteração e da alterabilidade em obras de engenharia	52
2.9.1 Barragem de Capivara	52
2.9.2 Barragem de Keene Creek.....	53
2.9.3 Barragens de Rosana e de Porto Primavera	53
2.9.4 Barragem de Taquaruçu	54
2.9.5 Usina Hidroelétrica Serra Quebrada	55

3 O COMPLEXO HIDROELÉTRICO CANOAS	56
3.1 Dados gerais	56
3.2 Breve histórico.....	56
4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA.....	59
4.1 Aspectos geológicos regionais.....	59
4.2 Geologia local	60
4.2.1 Derrames basálticos da fundação.....	60
4.2.2 Feição <i>anomalia</i>	64
4.3 Geomorfologia e clima	64
5 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MATERIAL ROCHOSO	67
5.1 Estudos efetuados	67
5.2 Procedimentos adotados.....	67
5.2.1 Determinação de índices físicos	68
5.2.2 Determinação da velocidade de propagação de ondas	68
5.2.3 Ensaio de compressão uniaxial.....	68
5.2.4 Ensaio de compressão diametral	68
5.2.5 Determinação do módulo de elasticidade estático	69
5.2.6 Ensaio de abrasão <i>Los Angeles</i>	69
5.2.7 Análises petrográfica e difratométrica	69
5.2.8 Ensaio de alterabilidade.	69
5.2.8.1 Alterabilidade acelerada.....	70
5.2.8.2 Alterabilidade natural.....	71
6 ENSAIO DE ALTERABILIDADE NATURAL DE TESTEMUNHOS DE SONDAGENS	72
6.1 Documentação fotográfica	73
6.2 Disposição das amostras no pátio de ensaio.....	73
6.3 Acompanhamento do ensaio.....	74
7 CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DOS TIPOS LITOLÓGICOS	77

p.

8 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.	81
8.1 Tratamento dos dados	81
8.2 Ensaio físicos e mecânicos	82
8.3 Ensaio de alterabilidade	93
8.3.1 Imersão em etileno-glicol	93
8.3.2 Alterabilidade água-estufa.....	96
8.3.3 Alterabilidade natural em fragmentos de rocha.....	102
8.3.4 Alterabilidade natural em testemunhos de sondagens	115
8.3.4.1 Considerações iniciais.....	115
8.3.4.2 Características geológico-geotécnicas das amostras no início do ensaio	115
8.3.4.3 Condições ambientais	119
8.3.4.4 Comportamento da brecha basáltica	120
8.3.4.5 Comportamento do basalto vesicular e/ou amigdaloidal.....	125
8.3.4.6 Comportamento do basalto compacto	128
8.3.4.7 Síntese do comportamento	135
8.3.5 Comparação entre os resultados quantitativos	135
9 EMPREGO DAS ROCHAS BASÁLTICAS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO NA UHE CANOAS I	145
9.1 Origem dos materiais	145
9.2 Destino do material	145
9.3 Balanceamento dos materiais rochosos	148
10 CONCLUSÕES	152
10.1 Sobre as características geológicas e tecnológicas.....	153
10.2 Sobre os procedimentos de ensaios	153
10.3 Sobre os critérios de classificação das amostras.....	154
10.4 Sobre o tratamento dos dados	154
10.5 Sobre os parâmetros.....	155
10.6 Sobre os critérios de comparação dos resultados de ensaios	156

	p.
10.7 Sobre a seleção dos materiais rochosos de construção.....	156
ANEXOS.....	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	199
APÊNDICES.....	I

LISTA DE QUADROS

p.

Quadro 1 - Escalas de tempo para observação dos processos de alteração das rochas (FOOKES <i>et al.</i> , 1988, modif.).....	4
Quadro 2 - Fatores e processos atuantes no intemperismo (<i>in</i> BRUNSDEN, 1979 modif. <i>apud</i> FOOKES <i>et al.</i> , 1988).....	7
Quadro 3 - Associação entre argilominerais e minerais primários em basaltos e diabásios da Bacia do Paraná (ROISENBERG <i>et al.</i> , 1984 modif.).....	27
Quadro 4 - Principais propriedades das rochas, passíveis de ser modificadas com a alteração (baseado em YOSHIDA <i>et al.</i> , 1972).....	28
Quadro 5 - Classificação das propriedades físico-mecânicas das rochas de acordo com o grau de influência dos processos intempé-ricos (ILIEV, 1966).....	31
Quadro 6 - Fatores que afetam a durabilidade dos materiais e agregados rochosos (FOOKES <i>et al.</i> , 1988).....	32
Quadro 7 - Exemplos de índices geoquímicos propostos para avaliar o grau de alteração.....	35
Quadro 8 - Exemplos de índices petrográficos propostos para avaliar o grau de alteração.....	36
Quadro 9 - Exemplos de índices físicos e mecânicos propostos para avaliar o grau de alteração.....	37
Quadro 10 - Índice de alterabilidade proposto por FARJALLAT (1971).....	41
Quadro 11 - Índice de alterabilidade proposto por YOSHIDA (1972).....	42
Quadro 12 - Critérios de utilização de rochas graníticas para diversas finalidades segundo a micropermeabilidade, a superfície interna específica e a reatividade entre a rocha e a água (FARRAN & THENOZ, 1965 modif.).....	48
Quadro 13 - Limites propostos para aceitação de agregados basálticos para fins rodoviários de acordo com o conteúdo de minerais secundários.....	48
Quadro 14 - Classificação tentativa da durabilidade potencial de acordo com os valores de RDI _s e RDI _d (FOOKES <i>et al.</i> , 1988).....	50
Quadro 15 - Coluna estratigráfica regional (IPT, 1992, <i>apud</i> IPT, 1995).....	59
Quadro 16 - Coluna estratigráfica do maciço rochoso da fundação da UHE Canoas I (baseado em IPT, 1995).....	62

	p.
Quadro 17 - Graus de alteração e coerência (IPT, 1995 modif.).....	63
Quadro 18 - Classificação do maciço basáltico (IPT, 1995 modif.).....	63
Quadro 19 - Sondagens rotativas submetidas ao ensaio de alterabilidade natural.....	72
Quadro 20 - Descrição dos tipos litológicos.....	74
Quadro 21 - Categorias de materiais rochosos de construção das estruturas de concreto, terra e enrocamento.....	149

LISTA DE TABELAS

	p.
Tabela 1 - Comparação das forças típicas exercidas pelos processos de intemperismo físico (OLLIER, 1984 <i>apud</i> FOOKES <i>et al.</i> , 1988, modif.).....	8
Tabela 2 - Composição mineralógica de amostras de diabásio do Estado de São Paulo, exibindo diferentes estágios de alteração (% em volume) (MELFI & LEVI, 1971).....	17
Tabela 3 - Distribuição granulométrica hipotética, em área, de um cubo de 1 cm ² de lado, após fragmentação sucessiva (BAVER, 1956 <i>apud</i> CARROLL, 1970).....	20
Tabela 4 - Relações entre micropermeabilidade e alterabilidade (avaliação de campo) obtidas com amostras de granito e de basalto.....	22
Tabela 5 - Variação hipotética do índice IQ em função do tipo de descontinuidade presente na rocha.....	38
Tabela 6 - Comparação entre os parâmetros climáticos dos locais de realização dos ensaios tecnológicos e do sítio do empreendimento.....	65
Tabela 7 - Dados hidroclimatológicos médios anuais representativos do local da UHE Canoas I.....	66
Tabela 8 - Quantidade (em metros) de amostras de testemunhos de sondagens submetidas ao ensaio de alterabilidade natural.....	73
Tabela 9 - Quantidade de ensaios e determinações por categoria de amostras.....	83
Tabela 10 - Tipos de curvas de regressão possíveis por categoria de amostras.....	83
Tabela 11 - Resultados dos ensaios de caracterização tecnológica dos tipos litológicos (incluindo a feição <i>anomalia</i>).....	88
Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização tecnológica das amostras remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.....	90
Tabela 13 - Classificação dos tipos litológicos por ordem decrescente de qualidade tecnológica.....	92
Tabela 14 - Variação de algumas das propriedades físicas e mecânicas por categoria de amostras.....	94
Tabela 15 - Quantidades de ensaios de alterabilidade por categoria de amostras.....	95

p.

Tabela 16 - Porcentagens de perdas acumuladas em diversos ciclos no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MCA-14).....	103
Tabela 17 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-01: ensaio nº 1.....	105
Tabela 18 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-01: ensaio nº 2.....	106
Tabela 19 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-04.....	107
Tabela 20 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-05.....	108
Tabela 21 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-07.....	109
Tabela 22 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 1.....	110
Tabela 23 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 2.....	111
Tabela 24 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 3.....	112
Tabela 25 - Correlação entre perda d'água específica (PE) e coeficiente de permeabilidade (K) para o maciço rochoso da UHE Canoas I (CESP, 1990).....	117
Tabela 26 - Distribuição da superfície específica por metro linear nos testemunhos de sondagens submetidos ao ensaio de alterabilidade natural.....	118
Tabela 27 - Caracterização geológico-geotécnica dos horizontes de brecha basáltica.....	124
Tabela 28 - Caracterização geológico-geotécnica dos horizontes de basalto vesicular e/ou amigdaloidal.....	127

p.

Tabela 29 - Caracterização geológico-geotécnica dos horizontes de basalto compacto.....	133
Tabela 30 - Intervalos de variação das porcentagens de fenômenos de fragmentação e de desintegração ao final do ensaio de alterabilidade natural (3121º ciclo).....	136
Tabela 31 - Origem e destino dos materiais rochosos utilizados nas obras de terra e estruturas de concreto.....	151

LISTA DE FIGURAS

	p.
Figura 1 - Processos e produtos de alteração química (MELLON, 1985 <i>apud</i> FOOKES <i>et al.</i> , 1988).....	9
Figura 2 - Solubilidade do quartzo, da sílica amorfa e da alumina de acordo com o pH (<i>apud</i> CARROLL, 1970).....	10
Figura 3 - Correlação entre os regimes de precipitação anual e a temperatura (PELTIER, 1950 <i>apud</i> FOOKES <i>et al.</i> , 1971).....	12
Figura 4 - Curvas de contorno do índice N para o sul da África, abaixo da latitude 16°S (WEINERT, 1968).....	13
Figura 5 - Séries de estabilidade química dos minerais nas condições de superfície (GOLDICH, 1938).....	15
Figura 6 - Seqüência de reações de cristalização dos minerais no líquido magmático (BOWEN, 1922 <i>apud</i> AIRES-BARROS, 1971, modif.)...	18
Figura 7 - Espectro de porosidade e métodos de investigação e de obtenção da superfície interna específica.....	20
Figura 8 - Representação esquemática da estrutura de alguns argilo-minerais (<i>apud</i> FRAZÃO & GOULART, 1976 modif.).....	24
Figura 9 - Variação da resistência à compressão uniaxial (σ_c) com a porosidade (η), em amostras de granito de Portugal (FERREIRA, 1990).....	30
Figura 10 - Variação do índice de qualidade da rocha (IQ) em função da porosidade aparente (TOURENQ & FOURMAINTRAUX, 1974).....	38
Figura 11 - Curvas hipotéticas de alterabilidade de rochas ígneas (LADEIRA & MINETTE, 1984a modif.).....	40
Figura 12 - Variação do índice de elasticidade (I_E) de um diorito nos ensaios de alterabilidade acelerada e natural (LADEIRA & MINETTE, 1984a).....	43
Figura 13 - Linhas de durabilidade para doleritos da África do Sul para uso rodoviário (WEINERT, 1984).....	49
Figura 14 - Critério de aceitação de agregado basáltico alterado, segundo CERATTI <i>et al.</i> (1994).....	51
Figura 15 - Critério de seleção do basalto para as obras do projeto Lesotho Highlands Water Project, no Lesoto, sul da África (VAN ROOY, 1994).....	51
Figura 16 - Mapa de situação do Complexo Canoas.....	57

	p.
Figura 17 - Arranjo geral da UHE Canoas I.....	58
Figura 18 - UHE Canoas I: seção geológico-geotécnica pelo eixo da barragem (IPT, 1995 modif.).....	61
Figura 19 - Representação esquemática dos fenômenos observados no ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.....	78
Figura 20 - Perfil parcial de acompanhamento da sondagem SR-1003 no ensaio de alterabilidade natural. Registro das avaliações no 140° (14/07/83), 1443° (25/02/87) e 3121° ciclos (22/10/91 - final do ensaio).....	79
Figura 21 - Perfil parcial de acompanhamento da sondagem SR-402A no ensaio de alterabilidade natural. Registro das avaliações no 140° (14/07/83), 1206° (30/06/86) e 3121° ciclos (22/10/91 - final do ensaio).....	80
Figura 22 - Representação esquemática das correlações obtidas entre as propriedades físicas e mecânicas.....	87
Figura 23 - Porcentagens de perdas acumuladas em diversos ciclos do ensaio de alterabilidade água-estufa (Método LCEC/MCA-13).....	97
Figura 24 - Variação do coeficiente angular das curvas de alterabilidade do ensaio água-estufa.....	99
Figura 25 - Comparação entre as velocidades médias de alteração referentes ao 84° ciclo do ensaio de alterabilidade água-estufa.....	101
Figura 26 - Porcentagens de perdas acumuladas em diversos ciclos no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MCA-14).....	103
Figura 27 - Variação do coeficiente angular das curvas de alterabilidade do ensaio natural (Método LCEC/MCA-14).....	104
Figura 28 - Comparação entre as velocidade médias de alteração referentes aos 84° e 360° ciclos do ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MCA-14).....	104
Figura 29 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-01: ensaio nº 1.....	105
Figura 30 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-01: ensaio nº 2.....	106

p.

Figura 31 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-04.....	107
Figura 32 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-05.....	108
Figura 33 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-07.....	109
Figura 34 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 1.....	110
Figura 35 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 2.....	111
Figura 36 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 3.....	112
Figura 37 - Comparação entre as velocidades médias de alteração referentes aos 84º e 360º ciclos do ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01).....	114
Figura 38 - Condições ambientais no local de execução do ensaio de alterabilidade natural.....	119
Figura 39 - Gráficos de acompanhamento do ensaio de alterabilidade natural dos tipos litológicos representativos da brecha basáltica.....	121
Figura 40 - Gráficos de acompanhamento do ensaio de alterabilidade natural dos tipos litológicos representativos do basalto vesicular e/ou amigdaloidal.....	126
Figura 41 - Gráficos de acompanhamento do ensaio de alterabilidade natural dos tipos litológicos representativos do basalto compacto.....	129
Figura 42 - Comparação entre as velocidades médias de alteração referentes aos 84º, 360º e 3.121º ciclos do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.....	137
Figura 43 - Curvas teóricas obtidas a partir de diferentes métodos de ensaio de alterabilidade.....	139

p.

Figura 44 - Histogramas de variação das velocidades médias finais de alteração em amostras dos tipos litológicos submetidos a diferentes métodos de ensaios de alterabilidade.....	143
Figura 45 - Seções transversais típicas pelas estruturas.....	147

LISTA DE ANEXOS

	p.
Anexo A - Avaliação semiquantitativa do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.....	158
Anexo B - Características petrográficas dos tipos litológicos.....	165
Anexo C - Resultados dos ensaios de caracterização tecnológica.....	167
Anexo D - Tipos de curvas de regressão possíveis por categoria de amostras.....	172
Anexo E - Porcentagens de perdas acumuladas para diversos ciclos do ensaio de alterabilidade água-estufa (Método LCEC/MCA-13).....	178
Anexo F - Cálculo da equivalência entre as faixas granulométricas prescritas por diferentes métodos de ensaios de alterabilidade.....	180
Anexo G - Características geológico-geotécnicas das amostras no início do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.....	185
Anexo H - Cálculo da superfície específica inicial das amostras submetidas ao ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens, atribuída ao fraturamento original do maciço rochoso.....	190
Anexo I - Comparação entre os produtos massa-superfície específica obtidos para amostras submetidas a diferentes métodos de ensaios de alterabilidade.....	195

LISTA DE APÊNDICES

p.

Apêndice 1 - Documentação fotográfica	II
---	----

RESUMO

MARRANO, A. 1997. *Caracterização tecnológica das rochas basálticas da Usina Hidroelétrica Canoas I, rio Paranapanema, SP/PR*. São Carlos. 208p. (Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP).

Tipos litológicos basálticos provenientes do maciço de fundação da UHE Canoas I foram submetidos a ensaios de caracterização tecnológica com o propósito do seu emprego como material de construção. Foram determinados os valores dos índices físicos (massa específica, porosidade, absorção d'água), da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas e efetuados ensaios de compressão uniaxial e diametral, entre outros, além de análises petrográficas. Executaram-se, também, ensaios de alterabilidade acelerada (água-estufa, imersão em etileno-glicol) e de alterabilidade natural, tanto em fragmentos de rocha como em testemunhos de sondagens rotativas. São descritos, em maior detalhe, os procedimentos utilizados para a realização do ensaio de alterabilidade natural em testemunhos de sondagens rotativas. Analisa-se a influência de uma feição geológica (caixa de falha com cerca de 10 m de espessura e 20° de ângulo de mergulho), presente na fundação, nas propriedades tecnológicas dos tipos litológicos por ela interceptados. São indicados os tipos litológicos selecionados para a utilização como material de construção.

Palavras-chave: Usina Hidroelétrica - Canoas I; rio Paranapanema; basalto; material de construção; caracterização tecnológica; ensaio de alterabilidade.

ABSTRACT

MARRANO A. 1997. *Technological characterization of basaltic rocks of Canoas I Hydroelectric Power Plant, Paranapanema river, SP/PR*. São Carlos. 208p. (Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Basaltic litotypes from the rock mass foundation of Canoas I Hydroelectric Power Plant were submitted to technological characterization tests, in order to verify their suitability as construction material. Physical and mechanical properties (density, porosity, water absorption, ultrasonic velocity, compressive and splitting tensile strength, among others) were determined, besides petrographic analyses. Weatherability tests were also performed, not only through wetting-drying cycles and by immersion in ethylene glycol but by outdoor exposure as well, using crushed and core drilled specimens. Detailed procedures for the weatherability test using core specimens from rotary drilling are given. It is analysed the influence of a geological feature (fault zone, about 10 meters thick and 20 degrees dip), that occurs in the rock mass foundation, on the technological properties of these rocks. Basaltic litotypes selected as construction material are then pointed out.

Keywords: Hydroelectric Power Plant - Canoas I; Paranapanema river; basalt; construction material; technological characterization; weatherability test.

1 INTRODUÇÃO

O emprego das rochas como fonte de material de construção requer o conhecimento de algumas de suas propriedades, quer sejam químicas, físicas, geológicas ou mecânicas, de maneira a se poder prever, com boa margem de segurança, o seu comportamento quando submetidas às solicitações impostas pelo tipo de obra para a qual se destinam.

Para tanto, dispõe-se de diversos tipos de ensaios e determinações, com procedimentos freqüentemente normatizados, cujos resultados, quando devidamente correlacionados entre si, auxiliam na tarefa de qualificar ou rejeitar o uso de determinado material rochoso, em virtude das exigências e especificidades de cada projeto.

Aliada à qualidade do material, há que se avaliar a sua durabilidade, definida como a capacidade de o material rochoso resistir à degradação, quando em uso (FOOKES *et al.*, 1988). Essa propriedade depende de inúmeros parâmetros, entre os quais, o grau de alteração original do maciço rochoso, a intensidade dos esforços impostos pelo desmonte, transporte, estocagem e utilização, bem como das condições ambientais do local de aplicação.

A maior ou menor durabilidade do material rochoso depende da sua suscetibilidade à alteração, ou seja, da sua alterabilidade (HAMROL, 1961), que é definida como a taxa de variação do grau de alteração ao longo do tempo.

Daí a importância, para a geologia de engenharia, da previsão da alterabilidade das rochas com vista no seu emprego como enrocamento, agregados para concreto, bases e sub-bases de rodovias, lastros de ferrovias e outros. Dessa forma, os fatores determinantes do processo de alteração e a velocidade com que atuam são particularmente importantes, por implicar diminuição das propriedades mecânicas das rochas, bem como por ocorrer a intervalos de tempo por vezes comprometedores para uma determinada obra.

No caso de grandes barragens, devido aos consideráveis volumes escavados, é imprescindível que os materiais, mesmo aqueles de características tecnológicas inferiores, sejam aproveitados, o que certamente justifica a necessidade de prever o seu comportamento quanto à alterabilidade, para a separação conveniente durante as escavações e estocagem seletiva.

No Brasil, as pesquisas sobre alterabilidade de rochas, com enfoque geotécnico, foram desenvolvidas, em sua maior parte, para basaltos devido à execução, a partir da década de 1960, de diversos projetos hidroelétricos, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, onde esta litologia tem expressiva ocorrência. Entretanto, a evolução dos ensaios de caracterização da alterabilidade foi muito rápida, não permitindo a sua padronização e correta assimilação, para a compreensão do fenômeno e otimização dos ensaios (INFANTI JR., 1983).

FRAZÃO & CARUSO (1983) apresentaram uma síntese do conhecimento sobre a alterabilidade de rochas basálticas utilizadas como

material de construção em algumas barragens da Bacia do Paraná, a saber: Água Vermelha, Ilha Solteira, Jupia, Promissão, Nova Avanhandava, Capivara, Taquaruçu, Rosana, Foz do Areia, Salto Santiago e Salto Osório. Constataram que, embora tenha sido dada a devida atenção quanto à alterabilidade dessas rochas, a experiência acumulada foi pouco divulgada e, quando tal, os registros mostravam-se incompletos, tanto em relação à metodologia quanto ao acompanhamento da evolução do material em uso.

A partir de então, poucos foram os estudos divulgados no meio técnico nacional, ainda que se constituíssem de experiências isoladas. São, porém, dignos de comentários os trabalhos de OLIVEIRA *et al.* (1987), SERRA JR. & AZEVEDO (1990) e FERREIRA *et al.* (1990), relativos, respectivamente, às barragens de Rosana/Porto Primavera, Taquaruçu e Serra Quebrada. Nesses estudos, podem ser destacadas algumas particularidades metodológicas que representaram avanços na caracterização da alterabilidade, quais sejam:

- a) realização de ensaios de alterabilidade, natural e/ou artificial, com amostras não-britadas, obtidas a partir de testemunhos de sondagens rotativas, quer completas ou em trechos previamente selecionados, permitindo, por vezes, a definição de horizontes mais suscetíveis à alteração; e
- b) execução de ensaios de simulação das condições intempéricas utilizando-se de blocos de rochas provenientes das escavações obrigatórias, submetendo-os às condições próximas daquelas nas quais o material estaria sujeito quando da sua real utilização.

Apesar do avanço que representam, tais ensaios têm favorecido avaliações de caráter puramente qualitativo.

Por outro lado, é possível encontrar, na literatura técnica, diversas alternativas para a quantificação da alteração e da alterabilidade das rochas através de índices numéricos, na tentativa de comparar e de prever o comportamento de diferentes tipos litológicos. Do ponto de vista da geotecnia, os índices considerados mais promissores são aqueles obtidos através de ensaios de alteração conjugados com um parâmetro quantificador da variação da resistência mecânica, destacando-se os trabalhos de FARJALLAT (1971), YOSHIDA (1972) e FRAZÃO (1993).

Conforme já citado, as obras de construção de barragens, no Brasil, têm ensejado o avanço no conhecimento dos mecanismos intervenientes na alteração e alterabilidade das rochas. Sob este enfoque, serão aqui analisados os estudos desenvolvidos para a caracterização tecnológica dos litotipos basálticos da Usina Hidroelétrica Canoas I, rio Paranapanema, SP/PR. Para tanto, o trabalho foi direcionado para a consecução das seguintes metas:

- a) descrever os estudos realizados para a determinação das propriedades tecnológicas das rochas basálticas provenientes da área de construção da barragem, com ênfase àqueles relativos à avaliação da alteração e da alterabilidade;
- b) correlacionar os resultados obtidos a partir dos diversos procedimentos de ensaios; e
- c) analisar as características tecnológicas dos tipos litológicos selecionados para utilização como material de construção.

2 ASPECTOS RELEVANTES SOBRE A ALTERAÇÃO E A ALTERABILIDADE DAS ROCHAS

2.1 Seleção da escala de tempo

Para diversos ramos das geociências, tais como geologia, geomorfologia, pedologia, os processos de alteração são analisados levando-se em conta a *escala de tempo geológico*, uma vez que as transformações dos materiais rochosos da crosta terrestre demandam períodos de milhões a bilhões de anos para ser processadas.

Entretanto, do ponto de vista da geotecnia, tal escala é utilizada apenas para aferir a atuação dos processos de degradação da rocha *in situ*, enquanto que a *escala de tempo de engenharia* (FOOKES *et al.*, 1988) permite avaliar o comportamento dos materiais rochosos a partir da sua utilização como material de construção. Nesse caso, o intervalo considerado varia da ordem de algumas dezenas de anos, tempo compatível com a vida útil das obras civis.

Por outro lado, tem-se lançado mão de ensaios de alteração experimental de rochas na tentativa de prever o seu comportamento em presença de um dado ambiente, utilizando-se, para tanto, de uma *escala de tempo experimental*, cujos intervalos variam da ordem de grandeza de dias e meses. Resta, contudo, a dificuldade de relacionar a escala de tempo experimental com a de engenharia.

Em resumo, o estudo da alteração dos materiais rochosos comporta observações que levem em conta diferentes escalas de tempo, de acordo com as velocidades com que as transformações ocorrem (Quadro 1).

OBJETO DE OBSERVAÇÃO	ESCALA DE TEMPO	EXEMPLO
materiais geológicos	tempo geológico	intemperismo de depósitos e materiais geológicos
estruturas construídas	tempo de engenharia	construções civis, monumentos históricos
experimental	tempo experimental	ensaios de alteração acelerados

QUADRO 1 - Escalas de tempo para observação dos processos de alteração das rochas (FOOKES *et al.*, 1988, modif.).

2.2 Terminologia

Diversos são os termos encontrados na literatura para designar as modificações pelas quais passa uma rocha sob a ação de agentes intempéricos, sendo correntes: alteração, degradação, intemperização, meteorização, desagregação, pulverização, decomposição, entre outros (FARJALLAT, 1972).

Em geologia, o termo mais difundido é *intemperismo*, que tem por sinônimos meteorização e climatização, entendido como um conjunto de processos que ocasionam a desintegração e a decomposição das rochas e dos minerais graças à ação de agentes atmosféricos e biológicos (LEINZ & LEONARDOS, 1977). Por desintegração, entende-se o intemperismo causado por agentes físicos, enquanto que decomposição, o ocasionado por agentes químicos.

O termo *alteração*, também de uso freqüente, tem sido empregado com significados variados, refletindo a diversidade de pontos de vista entre os geocientistas. Reproduzem-se, a seguir, algumas de suas definições com interesse geotécnico.

Para AIRES-BARROS (1971), a alteração de uma rocha é a sua desagregação e decomposição decorrentes de agentes físicos e químicos naturais, que a transformam em outro produto natural, agora em equilíbrio físico-químico com o meio ambiente. Reconhece, ainda, dois tipos de alteração:

- a) *primária ou deutérica*, que abrange as transformações minerais originadas nos estágios tardios de consolidação magmática; e
- b) *secundária ou meteórica*, que corresponde às transformações minerais necessárias à adaptação da rocha das condições endógenas para as condições de equilíbrio com um dado ambiente

geológico exógeno. A marcha para o novo equilíbrio é o mecanismo de meteorização.

Nesse caso, o fator tempo é aferido na escala de tempo geológico, em virtude da extrema lentidão com que essas transformações ocorrem.

YOSHIDA (*op. cit.*) restringiu o conceito de alteração para o conjunto de modificações sofridas pelas rochas na sua composição mineralógica, estrutura e propriedades, *quando em uso*, como resultado da interação de complexos processos físico-químicos.

Na mesma linha de raciocínio, FOOKES *et al.* (1988) definiram a alteração do material rochoso como a degradação ou deterioração do material de construção de ocorrência natural sob a direta influência da atmosfera, hidrosfera e das atividades do homem, dentro da escala de tempo de engenharia.

LADEIRA & MINETTE (1984a) reforçaram a atuação de agentes exógenos, naturais e/ou artificiais, na alteração das rochas. Consideram a alteração como a modificação das propriedades físicas, químicas, geomecânicas ou dinâmicas, causadas por agentes externos, que podem ser: atmosféricos, forças tectônicas, forças dinâmicas (desmonte com explosivos, por exemplo) ou quaisquer outras que atenuem as forças intermoleculares dos constituintes mineralógicos.

Para FRAZÃO (*op. cit.*), a alteração de uma rocha, do ponto de vista de engenharia, é todo processo que leve a modificações do seu desempenho. A intensidade dessas modificações depende da litologia considerada, do grau de alteração da rocha e dos fatores ambientais a que a rocha estará submetida quando da sua aplicação.

O termo *alterabilidade* é utilizado para designar a suscetibilidade da rocha à alteração, ou seja, maior ou menor aptidão para modificação das suas propriedades ao longo do tempo, considerando-se a escala de tempo de engenharia (FOOKES *et al.*, 1971; AIRES-BARROS, *op. cit.*).

AIRES-BARROS (*op. cit.*) enfatizou o caráter da dinâmica temporal desse conceito. Para o autor, o estudo da alterabilidade serve-se de técnicas e princípios do estudo da alteração (processo estático, porque avalia um determinado estado e não a sua evolução no tempo), adaptados à introdução da variável tempo.

Anteriormente, HAMROL (*op. cit.*) já havia apresentado os conceitos de grau de alteração e alterabilidade, assim enunciados:

- a) *grau de alteração*: certo volume de uma rocha é dito ser mais alterado do que outro da mesma rocha se as características mecânicas da primeira forem inferiores; e
- b) *alterabilidade*: uma rocha é mais alterável que outra se, ambas, tendo sido sujeitas aos mesmos agentes intempéricos, durante o mesmo período de tempo, o grau de alteração for mais avançado na primeira.

Deve-se observar que os dois conceitos são relativos, ou seja, são referidos por comparação entre os estados de alteração de uma mesma rocha ou ainda entre tipos litológicos distintos.

O termo desagregabilidade é também utilizado como sinônimo de alterabilidade, sugerindo, já na sua designação, as conseqüências da redução das características mecânicas das rochas quando aplicadas em obras de engenharia.

FOOKES *et al.* (1988) conceituaram, ainda, o termo *durabilidade* como a capacidade de o material rochoso resistir à degradação durante a sua utilização. Para MINTY & MONK (1966 *in* FOOKES *et al.*, 1988), a durabilidade, entendida como a qualidade de o material rochoso durar sem desgaste, depende da sua resistência aos processos de alteração, naturais ou impostos, ou ainda a qualquer outro fator que possa atuar para a redução da sua vida útil. Assim, o termo durabilidade é, conceitualmente, o inverso de alterabilidade.

No contexto deste trabalho, o termo alteração será utilizado para designar o conjunto das modificações das propriedades físicas, químicas, geológicas e mecânicas das rochas, a partir do seu emprego como material de construção, pelas condições intempéricas do ambiente criado pela obra a que este se destina.

2.3 Processos intempéricos naturais

As rochas, especialmente as ígneas e metamórficas, são geradas a grandes profundidades e em ambientes que envolvem altas temperaturas e pressões. Entretanto, quando expostas na superfície terrestre ou próximo desta, estão sujeitas a um conjunto de transformações para adquirir a estabilidade compatível com as novas condições ambientais.

Tais transformações, denominadas genericamente de intemperismo, necessitam de longos períodos do tempo geológico para ser processadas e ocorrem segundo dois mecanismos principais, um físico e outro químico (Quadro 2).

O intemperismo físico resulta, basicamente, na desintegração da rocha, sem mudanças mineralógicas significativas, enquanto que o intemperismo químico provoca a decomposição dos minerais constituintes em novos minerais, estáveis ou metaestáveis.

Embora seja comum a ocorrência dos dois processos simultaneamente, a predominância de um deles é função do clima e da composição mineralógica.

<i>Principais Controles</i>		<i>Intemperismo Físico</i>	<i>Resposta do Material</i>
<i>Ambiente Intempérico</i> Clima Atmosfera Hidrosfera	<i>ambiente físico</i> ⇒	Processos de cristalização* Saturação e secagem* Processos coloidais (Processos orgânicos) (Escamação, descarregamento e lasqueamento)* Insolação* ⇒	Desintegração Cominuição Mudança de volume Mudança de granulometria Mudança de superfície específica Consolidação
<i>Fatores locais</i> (topografia, drenagem, nível d'água)			
Litosfera Litologia Rocha-matriz Estrutura Clima Atmosfera	<i>ambiente químico</i> ⇒	<i>Intemperismo químico</i> Hidratação Hidrólise Solução* Oxidação* Redução* Carbonatação*	Minerais não afetados devido à baixa intensidade de atuação dos agentes FIGURA 1 Decomposição, recombinação e reações de mudança de cátions
Hidrosfera Estrutura cristalina		Quelação Fixação	Lixiviação Íons dissolvidos

QUADRO 2 - Fatores e processos atuantes no intemperismo (*in* BRUNSDEN, 1979 modif. *apud* FOOKES *et al.*, 1988) (* indica os processos considerados mais aplicáveis à escala de tempo de engenharia)

2.3.1 Intemperismo físico

REICHE (1950 *apud* FOOKES *et al.*, 1988) define o intemperismo físico como qualquer processo que cause essencialmente a fragmentação da rocha e a sua cominuição *in situ*, sem mudanças químicas significativas. Como consequência, a rocha sofre progressiva perda de coesão, resultando na individualização dos seus constituintes minerais, sem haver necessariamente a modificação da sua natureza (FRAZÃO *et al.*, *op. cit.*).

O intemperismo físico provoca a quebra do material por fadiga, através da aplicação de séries de esforços cíclicos, tais como aquecimento-resfriamento, congelamento-degelo, saturação-secagem.

Os principais mecanismos causadores da desintegração ou desagregação da rocha são representados por forças de tração geradas por:

a) *dilatação/contração*: os materiais rochosos são pobres condutores de calor, e o aquecimento da superfície externa por insolação pode desenvolver gradientes térmicos entre a superfície e o interior. Como os minerais possuem diferentes coeficientes de expansão térmica, as expansões diferenciais em uma rocha poliminerálica podem gerar tensões nos contatos entre grãos que, por sua vez, podem resultar no desenvolvimento de microfraturas e, por fim, na desintegração granular (FOOKES *et al.*, 1988);

b) *cristalização de sais*: em climas áridos e semi-áridos, os sais solúveis (carbonatos, sulfatos, etc.) não são removidos, devido à

baixa precipitação pluviométrica, sendo, porém, trazidos próximos da superfície pela ação capilar das poucas águas percoladas. Quando a água se evapora, estes são precipitados nas descontinuidades das rochas, gerando esforços laterais em decorrência do crescimento dos cristais (LEINZ & AMARAL, 1975). Pressão de hidratação, retenção de água higroscópica e expansão-contratação devido a mudanças de temperatura e umidade são outros fenômenos associados à ação deletéria dos sais sobre os materiais rochosos (FOOKES *et al.*, 1988) (Tabela 1);

c) *congelamento da água*: a água, ao se cristalizar, provoca expansão de 9% em seu volume (LEINZ & AMARAL, *op.cit.*), exercendo, portanto, esforço lateral considerável quando presente nas fraturas das rochas (Tabela 1);

d) *variação de volume devido à expansão de minerais por absorção d'água*: CAWSEY & MELLON (1983 *apud* FOOKES *et al.*, 1988) citam expansões lineares de 0,015-0,020% em basaltos quando submetidos à saturação.

TABELA 1 - Comparação das forças típicas exercidas pelos processos de intemperismo físico (OLLIER, 1984 *apud* FOOKES *et al.*, 1988 modif.).

PROCESSO	PRESSÃO EXERCIDA (MPa)
Congelamento (máximo a -20°C)	200
Cristalização de sais	2 - 20
Hidratação de sais	100

2.3.2 Intemperismo químico

É caracterizado por um conjunto de reações químicas entre a rocha e soluções aquosas diversas, que ocasionam a progressiva modificação da sua constituição mineralógica e, conseqüentemente, a sua decomposição.

A intensidade do intemperismo químico é, pois, função da quantidade de água disponível para a lixiviação das rochas. Dessa forma, a decomposição será potencialmente maior onde o regime climático for quente e úmido e em operação durante longos períodos do tempo geológico.

LOUGHNAN (1969 *apud* FOOKES *et al.*, 1988) descreveu três processos simultâneos envolvidos no intemperismo químico, a saber:

- a) quebra da estrutura mineral, com a liberação dos elementos constituintes na forma de íons ou moléculas;
- b) remoção, em solução, de alguns dos constituintes liberados; e
- c) reconstituição do resíduo com componentes da atmosfera para a formação de novos minerais em equilíbrio estável ou metaestável com o ambiente.

Segundo MELLON (1985 *apud* FOOKES *et al.*, 1988), os minerais reagem distintamente sob o ataque químico: alguns são insolúveis ou poucos solúveis, denominados resistatos (quartzo, zircão, turmalina, ilmenita, etc.), outros se gelatinizam (olivina, nefelina, zeólitas), e há, ainda, aqueles que são parcialmente dissolvidos, liberando o arcabouço silicoso (micas, argilominerais) (Figura 1).

FIGURA 1 - Processos e produtos de alteração química (MELLON, 1985 *apud* FOOKES *et al.*, 1988) (* indica os processos considerados mais aplicáveis à escala de tempo de engenharia).

Os processos de decomposição podem ser classificados de acordo com a natureza da reação química predominante. Os principais tipos de reações são os representados por dissolução, hidratação (incorporação de moléculas de água na estrutura cristalina do mineral), hidrólise (decomposição de um mineral pela água, originando um ácido ou uma base) e oxirredução.

Os ambientes sob os quais a maior parte do intemperismo ocorre são *oxidantes*, 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 que varia entre 3 e 9, ou seja, de ácida a moderadamente alcalina.

Para CARROLL (*op. cit.*), o intemperismo químico está intimamente associado com a química dos aluminossilicatos, uma vez que, depois do oxigênio, os dois elementos mais abundantes são o silício e o alumínio. Além disso, os principais produtos de alteração são minerais aluminossilicáticos, na forma de argila.

A Figura 2 exibe o gráfico de solubilidade do quartzo, da sílica amorfa e da alumina de acordo com o pH, podendo-se destacar:

- a) a solubilidade da sílica cristalina (quartzo) é cerca de 20 vezes inferior à da sílica amorfa, embora esta última seja menos abundante;
- b) para pH superiores a 9, a solubilidade da sílica aumenta abruptamente, embora este pH seja difícil de ocorrer durante o intemperismo; e
- c) a alumina apresenta dois valores de solubilização: um ácido (pH < 4) e outro básico (pH > 8).

FIGURA 2 - Solubilidade do quartzo, da sílica amorfa e da alumina de acordo com o pH (*apud* CARROLL, 1970).

Portanto, para os valores de pH mais freqüentes durante o intemperismo, a alumina é acumulada, enquanto que a sílica é continuamente lixiviada em pequenas quantidades.

2.3.3 Influência das condições ambientais

Os processos intempéricos naturais estão intimamente relacionados com três importantes fatores macroambientais: hidrosfera, clima e topografia (FOOKES *et al.*, 1988).

A influência da hidrosfera é marcante em decorrência da importância da água de percolação nos processos de degradação das rochas, enquanto que os principais controles climáticos estão relacionados com a precipitação, a evaporação e as variações de temperatura.

A pluviosidade incidente em uma dada área exerce papel determinante na lixiviação dos produtos do intemperismo. Assim, nos locais onde a precipitação excede a evaporação, há disponibilidade potencial de água para promover as reações químicas, resultando em remoção dos elementos solúveis. Por outro lado, nas áreas onde a evaporação excede a precipitação, os elementos solúveis não podem ser completamente removidos dos minerais; nesse caso, o intemperismo químico é muito lento ou até inexistente.

Em geral, a velocidade das reações químicas praticamente duplica para cada 10°C de elevação da temperatura (CARROLL, *op. cit.*), o que dá a dimensão da importância dessa variável climática sobre o tipo de intemperismo.

A tentativa de correlacionar, ou mesmo quantificar, o efeito dos fatores climáticos no tipo de intemperismo atuante em um dado local tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores.

PELTIER (1950 *apud* FOOKES *et al.*, 1971), relacionando precipitação anual e temperatura, reconheceu uma série de regiões climáticas (Figura 3), cujos limites propostos são basicamente hipotéticos, para as quais admitiu a predominância da ação de um determinado tipo de intemperismo.

WEINERT (1964; 1968; 1970; 1984), estudando a durabilidade de rochas ígneas básicas, especialmente os doleritos Karroo (diabásios), para uso como material de construção em rodovias na África do Sul, definiu um índice "N" que relaciona, para as condições climáticas daquele país, a taxa de evaporação durante o mês mais quente (janeiro) - E_j e a precipitação anual total - P_a , através da expressão:

$$N = 12 \frac{E_j}{P_a}. \quad (1)$$

O índice climático N indicaria a disponibilidade potencial de água para os processos intempéricos, ou seja, a quantidade de água precipitada que, de fato, permanece em contato com a rocha.

FIGURA 3 - Correlação entre os regimes de precipitação anual e a temperatura (PELTIER, 1950 *apud* FOOKES *et al.*, 1971): a) limites entre as regiões climáticas; b) importância relativa do tipo de intemperismo em função das condições climáticas.

Segundo o autor, o índice N permitiria distinguir qual tipo de intemperismo atuaria sobre a rocha, se físico ($N > 5$) ou químico ($N < 5$).

Ainda para os doleritos em questão, o autor apresenta detalhes interessantes sobre o mecanismo de decomposição:

- a) para N entre 2 e 5, a montmorilonita tende a ser o produto final da decomposição;
- b) para $N < 2$, a montmorilonita não é mais estável e se decompõe em caulinita depois de perder suas bases; e
- c) para $N < 1$, a caulinita também é instável e se decompõe em alumina hidratada (gibbsita, por exemplo), refletindo a ocorrência de processos de laterização.

A Figura 4 mostra o mapa de distribuição dos valores regionais do índice N para o sul da África. O cálculo do índice foi feito para superfície horizontal, ou seja, as variações topográficas não foram levadas em conta. Entretanto, as diferenças de relevo são determinantes para o escoamento superficial: se este for deficiente, a água de chuva permanece no sistema e será capaz de atuar com maior eficácia sobre a rocha antes de se evaporar, ao contrário do que ocorre em áreas com boas condições de escoamento.

FIGURA 4 - Curvas de contorno do índice N para o sul da África, abaixo da latitude 16°S (WEINERT, 1968).

2.4 Fatores intervenientes na alteração e na alterabilidade

As transformações a que as rochas são submetidas para se adequarem às condições vigentes na superfície terrestre são atribuídas a dois conjuntos de fatores: os intrínsecos e os extrínsecos (AIRES-BARROS, *op. cit.*).

Os fatores intrínsecos estão relacionados com a natureza da rocha, que é determinada pelas seguintes características:

- a) composição mineralógica e, conseqüentemente, a composição química;
- b) textura, estrutura, granulação, grau de cimentação (quando existir); e

c) estado microfissural, relativo à quantidade, distribuição e dimensões das descontinuidades (fissuras), com influência direta sobre a porosidade e a permeabilidade.

Já os fatores extrínsecos se referem ao meio ambiente no qual a alteração se processa e é função tanto das condições climáticas gerais quanto do meio específico onde a rocha se encontra.

Sob este enfoque, AIRES-BARROS (*op. cit.*) apresenta uma interessante correlação entre os fatores intrínsecos (*i*) e extrínsecos (*e*) com a alteração ou o grau de alteração (*m*) de uma rocha através da seguinte expressão:

$$m = f(i, e), \quad (2)$$

sendo os fatores intrínsecos representados por:

$$i = f_1(n, s), \quad (3)$$

em que o parâmetro “*n*” representa a natureza mineralógica da rocha e “*s*”, a superfície exposta às reações; os fatores extrínsecos, por sua vez, são representados por:

$$e = f_2(T, pH, Eh, \ell, b), \quad (4)$$

ou seja, função da temperatura, do potencial hidrogeniônico, do potencial de oxirredução, da quantidade de água disponível para as reações e pelas forças bióticas, respectivamente.

Já a alterabilidade (*m₁*), entendida como a suscetibilidade ou a aptidão de uma rocha para a alteração em função do tempo (*t*), é expressa, segundo aquele autor, por:

$$m_1 = f(i, e, t). \quad (5)$$

Em outras palavras, a alterabilidade (*m₁*) será a taxa de variação do grau de alteração (Δm) num dado intervalo de tempo (Δt), ou seja,

$$m_1 = \frac{\Delta m}{\Delta t}. \quad (6)$$

Ressalta, ainda, o mesmo autor, as diferenças de escalas de tempo em que os fenômenos são observados: enquanto que a alteração se processa no tempo geológico, a alterabilidade ocorre no “tempo humano, à escala do homem e das suas obras de engenharia”.

Dessa forma, a correta análise das causas e dos mecanismos de alteração, bem como seus reflexos nas propriedades físicas e mecânicas das rochas são fundamentais para a avaliação do grau de alteração e da

alterabilidade e para a previsão do comportamento das rochas quando utilizadas como material de construção (YOSHIDA, *op. cit.*).

Nesse sentido, serão a seguir abordados alguns aspectos das características intrínsecas das rochas que influenciam o seu desempenho quando em uso.

2.4.1 Composição mineralógica

GOLDICH (1938), estudando as transformações produzidas pelo intemperismo em rochas de diferentes composições mineralógicas, tais como granito-gnaiss, diabásio e anfibolito, reconheceu uma ordem de estabilidade química dos minerais primários nas condições de superfície.

As séries de GOLDICH (Figura 5), como são conhecidas, dispõem os minerais em ordem crescente de estabilidade, ou seja, de resistência aos processos intempéricos, separados em duas seqüências, uma para os minerais máficos (ferromagnesianos) e outra para os félsicos (silicaluminosos), devido à menor estabilidade dos primeiros em relação aos últimos.

FIGURA 5 - Séries de estabilidade química dos minerais nas condições de superfície (GOLDICH, 1938).

Conseqüentemente, é lícito supor que, dependendo da composição mineralógica, certas rochas terão maior ou menor suscetibilidade à alteração que outras, quando submetidas às mesmas condições ambientais. Assim, um basalto tenderia a se alterar mais facilmente que um granito, uma vez que os minerais essenciais do basalto (plagioclásios e piroxênios) são quimicamente menos estáveis que os do granito (quartzo, ortoclásio e biotita).

MELFI & LEVI (1971) e LEVI & MELFI (1972) investigaram aspectos geoquímicos e mineralógicos dos primeiros estágios do processo de alteração de rochas ígneas básicas, especialmente diabásio, basalto e gabro, sujeitas às condições climáticas subtropicais úmidas no Estado de São Paulo. Os resultados obtidos estão de acordo com as séries de estabilidade de GOLDICH, à exceção dos piroxênios que, nesse caso, se apresentaram mais resistentes.

Petrograficamente, as rochas básicas estudadas por estes autores apresentaram composições semelhantes: plagioclásio (An_{60-75}) e piroxênios (augita e pigeonita) como minerais essenciais e olivina, apatita, quartzo e opacos como acessórios; já as amostras de basalto apresentaram até 20% de matéria vítrea.

Sob o aspecto mineralógico, os autores apontaram as seguintes transformações:

- a) a olivina é o primeiro mineral silicático a se alterar, por vezes em argilomineral esmectítico, seguida pelos plagioclásios;
- b) os plagioclásios, sob condições de boa drenagem, se transformam em gibbsita; sob condições de má drenagem, formam géis amorfos, que se transformam em caulinita;
- c) olivina, anfibólio e piroxênio produzem hidróxido férrico parcialmente amorfo e montmorilonita, que é instável sob condições de drenagem intensa, transformando-se em caulinita, haloisita e goethita; e
- d) gibbsita é o mineral mais abundante nos primeiros estágios de alteração, enquanto que a caulinita é o mineral secundário mais importante nos últimos estágios da alteração.

A Tabela 2 exemplifica a composição mineralógica de duas amostras de diabásio, em diferentes estágios de alteração, quando comparadas com a rocha sã.

Do ponto de vista geoquímico, os autores apontaram tendências médias de comportamento para os elementos químicos durante o processo de alteração. Concluíram que as rochas básicas estudadas sofrem perda gradativa de cálcio, sódio, magnésio, potássio e silício, em ordem decrescente de facilidade.

Retornando às séries de GOLDICH, deve-se ressaltar a sua semelhança, em ordem inversa, com as séries de reação de BOWEN (1922 *apud* AIRES-BARROS, *op. cit.*), que sugerem a ordenação de geração dos minerais no líquido magmático, sob condições de equilíbrio (pressão, temperatura e composição) (Figura 6). Uma comparação entre ambas as séries permite verificar que os minerais gerados nos primeiros estágios da evolução magmática são os que se encontram em desequilíbrio mais pronunciado com as condições vigentes na superfície terrestre e, portanto, se decompõem mais facilmente que os gerados nas fases finais de consolidação do magma (AIRES-BARROS, *op. cit.*). Assim, a estabilidade de uma espécie mineral aumenta proporcionalmente com a diminuição da diferença existente entre a temperatura de cristalização e aquela reinante nas condições superficiais.

TABELA 2 - Composição mineralógica de amostras de diabásio do Estado de São Paulo, exibindo diferentes estágios de alteração (% em volume) (MELFI & LEVI, 1971).

MINERAIS	AMOSTRA 5		AMOSTRA 9	
	ROCHA SÃ	ROCHA ALTERADA	ROCHA SÃ	ROCHA ALTERADA
Plagioclásio	51	-	52	22
Piroxênio	35	-	30	10
Hornblenda	-	-	-	-
Olivina	8	-	5	-
Acessórios	5	15	13	17
Quartzo	tr	8	-	-
Gibbsita	-	35	-	-
Montmorilonita	-	4	-	19
Caulinita	-	22	-	23
Goethita ^(*)	-	16	-	9
Haloisita	-	n.d.	-	n.d.
Amorfos	-	n.d.	-	-

tr - traços n.d.- não determinado ^(*) - goethita + hematita + amorfos

Contudo, conforme ressalta RODRIGUES (1977), as séries de GOLDICH não podem fornecer, diretamente, elementos que permitam avaliar a alterabilidade de um material na escala de tempo de engenharia. Isto porque estas séries foram elaboradas com outra finalidade, a partir das alterações de natureza química ocorridas nos horizontes pedológicos, considerando-se a escala do tempo geológico. Segundo o citado autor, devido à sua extrema lentidão, são de pouca relevância nas transformações que interessam à engenharia civil. A importância da composição mineralógica estaria, então, associada ao grau de alteração em que se encontram os minerais no momento de utilização da rocha, e à natureza e quantidade dos minerais secundários.

FIGURA 6 - Seqüência de reações de cristalização dos minerais no líquido magmático (BOWEN, 1922 *apud* AIRES-BARROS, 1971, modif.).

2.4.2 Descontinuidades da rocha

O termo *descontinuidade* tem sido empregado com enfoques diversos, dependendo da escala e do objetivo da investigação. Assim, num maciço rochoso, serve para designar as estruturas planares que interrompem a continuidade física das rochas, com resistência à tração baixa ou nula, compreendendo juntas, falhas, fraturas, planos de acamamento, entre outros (TOGNON, 1985).

Entretanto, este mesmo termo é utilizado para se referir a uma das características intrínsecas das rochas, a porosidade, representando espaços intersticiais preenchidos ou não por fluidos ou gases, relativamente eqüidimensionais (poros) ou com uma dimensão predominando (fissuras) (WALSH & BRACE, 1966).

PREVOSTEAU *et al.* (1970) subdividiram o espectro de porosidade das rochas (curva de distribuição dos poros, em volume e/ou em área, de acordo com seus raios) em:

- a) *infraporosidade*: constituída por poros com abertura inferior a 300Å, que são os responsáveis pelo desenvolvimento da superfície interna específica da rocha; é o local de ocorrência das principais reações químicas;
- b) *microporosidade*: constituída por poros com abertura entre 300Å e 7,5µm, que são os responsáveis pelas trocas com o meio exterior; e
- c) *macroporosidade*: constituída por poros com abertura superior a 7,5µm, que são os responsáveis pelas permeabilidades mais elevadas.

FARRAN & THENOZ (1965), estudando os mecanismos de alteração e a alterabilidade de rochas ígneas e metamórficas, *in situ* e quando em uso, reconheceram a nítida influência que as descontinuidades exercem nos processos de degradação das rochas. Segundo estes autores,

o efeito da alteração pode ser expresso por uma função, necessariamente empírica, relacionando:

- a) a superfície interna desenvolvida pelas descontinuidades acessíveis ao interior da rocha;
- b) a reatividade do sistema rocha-fluido percolante (em geral, a água);
- c) as condições de emprego do material rochoso (agregado para concreto, pavimento, enrocamento, fundação); e
- d) o fator tempo.

FARRAN & THENOZ (*op.cit.*) classificaram as descontinuidades em duas categorias:

- a) *fissuras*: são caracterizadas por microdescontinuidades de espessuras (e) iguais ou inferiores a $1\mu\text{m}$ e por dimensões longitudinais da ordem de grandeza dos cristais. Constituem a microfissuração matricial da rocha e são distribuídas em todas as direções, sendo neste nível que se situam as grandes superfícies de contato entre uma rocha e um fluido.
- b) *fraturas*: são em bem menor número que as fissuras matriciais, porém de dimensões que, em muito, superam o diâmetro médio dos cristais, além de se apresentarem distribuídas em direções preferenciais. Compreendem as microfraturas ($e \leq 0,1 \text{ mm}$), em geral não distinguíveis a olho nu, e as macrofraturas ($e > 0,1 \text{ mm}$), representadas por fraturas abertas e/ou falhas.

Cada categoria de descontinuidade desempenha papel específico no desenvolvimento do processo de alteração. Assim, as macrofraturas abertas permitem o acesso da água de percolação ao interior do maciço, podendo atacar e lixiviar grandes superfícies internas dos minerais ao longo da microfissuração matricial. As microfraturas, por seu turno, desenvolvem dupla função, a de completar a rede de irrigação interna, tornando possível a total impregnação da matriz, e a de oferecer novas superfícies para a reação entre a rocha e a água de percolação.

A Figura 7 apresenta os espectros de porosidade e os métodos de investigação sugeridos pelos autores anteriormente citados.

Vale ressaltar que o ensaio de porosimetria a injeção de mercúrio se baseia no estabelecimento de uma curva de pressão capilar, a partir da qual se obtém o raio equivalente, graças à lei de JURIN (*apud* BOUSQUIE *et al.*, 1980), sendo:

$$r_e = \frac{2\sigma \cos \varnothing}{P_c} = \frac{7,5}{P_c} \quad (7)$$

em que: r_e = raio equivalente (μm);

σ = tensão superficial;

$\varnothing$ = ângulo de curvatura do menisco;

P_c = pressão capilar (MPa).

$$1\text{Å} = 10^{-10}\text{ m}$$

$$1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{ m} = 0,001\text{ m}$$

FIGURA 7 - Espectro de porosidade e métodos de investigação e de obtenção da superfície interna específica.

Depreende-se, portanto, que o grau de fissuração irá refletir o montante da superfície interna *potencialmente* disponível para as reações químicas. Para ter idéia do efeito multiplicador da superfície interna com o desenvolvimento da fissuração, BAVER (1956 *apud* CARROLL, *op.cit.*) calculou que, se um cubo com faces de 1 cm^2 fosse fragmentado em cubos cada vez menores, a superfície final das partículas na fração de argila coloidal ($\varnothing < 5\text{ }\mu\text{m}$) seria 2.000 vezes superior à da fração areia ($0,125\text{ mm} < \varnothing < 0,25\text{ mm}$), ou 400 vezes àquela da fração silte ($6,2\text{ }\mu\text{m} < \varnothing < 0,125\text{ mm}$), ou ainda 20 vezes à da fração argila ($\varnothing < 6,2\text{ }\mu\text{m}$) (Tabela 3).

TABELA 3 - Distribuição granulométrica hipotética, em área, de um cubo de 1 cm^2 de lado, após fragmentação sucessiva (BAVER, 1956 *apud* CARROLL, 1970).

GRANULOMETRIA $\varnothing$	ÁREA (cm^2)	RELAÇÕES ENTRE ÁREAS		
areia ($0,125\text{ mm} < \varnothing < 0,25\text{ mm}$)	314	1		
silte ($6,2\text{ }\mu\text{m} < \varnothing < 0,125\text{ mm}$)	1.570	5	1	
argila ($\varnothing < 6,2\text{ }\mu\text{m}$)	31.416	100	20	1
argila coloidal ($\varnothing < 5\text{ }\mu\text{m}$)	628.320	2.000	400	20

A avaliação da influência das microdescontinuidades na alteração e na alterabilidade das rochas requer a determinação da sua micropermeabilidade e da sua superfície interna específica (superfície oferecida pelas microdescontinuidades por unidade de volume de rocha).

O cálculo da micropermeabilidade, entendida como a permeabilidade matricial ou intrínseca, pode ser feito a partir do espectro de porosidade, baseando-se em diversos modelos. O mais simples é o de PURCELL (1949 *apud* BOUSQUIE *et al.*, *op.cit.*), que compara o espaço poroso a um feixe de tubos capilares, cilíndricos e paralelos, de raio equivalente r_e . A micropermeabilidade real medida é obtida através de um fator de correção que leva em consideração a forma da seção capilar e a tortuosidade.

FARRAN & THENOZ (*op.cit.*) concluíram que a micropermeabilidade desempenha um papel preponderante em relação à superfície interna específica. Observaram a existência de um valor mínimo de micropermeabilidade, abaixo do qual a percolação d'água não é possível e, com isto, a alteração da rocha seria evitada, mesmo que apresentasse elevada superfície interna específica. Para os granitos estudados pelos autores, o valor mínimo de micropermeabilidade ao ar situa-se em torno de 0,1 milidarcy ($\sim 10^{-7}$ cm/s); acima deste valor, a alterabilidade é proporcional à superfície interna específica, desde que os minerais sejam suscetíveis à alteração.

No estudo da micropermeabilidade de rochas cristalinas, cujo espectro de valores é, em geral, inferior a 0,1 milidarcy, tem sido utilizado um gás, em geral ar, como agente percolante (FARJALLAT, 1974), a fim de se evitar a aplicação de elevadas pressões nos corpos-de-prova, que poderiam modificar o estado de microfissuração, como também evitar a possibilidade de reações entre a rocha e o fluido (água, por exemplo), que se refletiriam nos valores da micropermeabilidade, devido à alteração dos circuitos de passagem.

Outro aspecto a ser considerado é o da reatividade do sistema rocha-água, para a previsão do comportamento da rocha quanto à alterabilidade. Para tanto, FARRAN & THENOZ (*op. cit.*) sugerem a execução de ensaios de percolação forçada de água sob pressão, partindo do pressuposto de que a reação entre a rocha e a água produz uma modificação do coeficiente de permeabilidade durante o ensaio, em geral tendendo à sua redução. Ademais, a análise química da solução percolada permitiria identificar a proveniência dos elementos lixiviados.

A Tabela 4 ilustra e exemplifica a influência da micropermeabilidade ao ar, do grau de microfissuração e da reatividade rocha-água no comportamento da rocha, quando em uso, com relação à alterabilidade.

Por fim, deve ser ressaltada a influência dos processos de desmonte e/ou de extração, ou ainda das condições de utilização, sobre o estado de microfissuração inicial da rocha, com possíveis reflexos na sua alterabilidade. Sob esse aspecto, LADEIRA (1984) relatou a instabilização de taludes rodoviários em granito-gnaiss, que foi atribuída aos desmontes

por explosivos. Segundo o autor, a detonação gerou uma onda de choque dinâmica, que superou em muito a resistência à tração da rocha, provocando a sua micro e macrofraturação, aumentando, dessa maneira, a superfície interna específica. Em consequência, a rocha sofreu processo de intemperismo químico acelerado, que se refletiu na desarticulação de blocos, provocando os deslizamentos.

TABELA 4 - Relações entre micropermeabilidade e alterabilidade (avaliação de campo) obtidas com amostras de granito e de basalto.

Local	Litologia	Permeabilidade aparente ao ar		Sup. Int. Esp. (S.E.) cm ² /cm ³	Porosidade (η) %	Reatividade rocha-água	Alterabilidade	Observações
		milidarcy	cm/s					
Lagoa de Lanoux	granito ⁽¹⁾	0,002	2,0×10 ⁻⁹	18 000	0,40	n.d.	baixa	baixa alterabilidade devido à baixa permeabilidade (K _{ar} < 0,1 milidarcy); superfície interna específica variável
Estuário de Rance (1º setor)		0,020	2,0×10 ⁻⁸	7 000	0,85	considerável	baixa	
Maciço de Auzat		0,032	3,2×10 ⁻⁸	8 800	1,20	fraca	baixa	
Barragem de Tolla		0,073	7,3×10 ⁻⁸	1 700	0,75	fraca	baixa	
Barr. de Saint-Cassien (1º setor)		0,085	8,5×10 ⁻⁸	2 400	1,00	considerável	média	K _{ar} próxima ou superior a 0,1 milidarcy; alterabilidade crescente com a superfície interna específica
Usina de Montpezat		0,120	1,2×10 ⁻⁷	14 000	2,80	muito forte	alta	
Galeria de Luzières (jusante)		0,580	5,8×10 ⁻⁷	28 000	9,10	muito forte	muito alta	
Barragem de Ilha Solteira (*)	basalto ⁽²⁾	0,061	6,1×10 ⁻⁸	n.d.	1,56	n.d.	baixa	K _{ar} < 0,1 milidarcy; baixa alterabilidade
Barragem de Capivara - A (*)		0,159	1,6×10 ⁻⁷	n.d.	2,18	n.d.	média	K _{ar} > 0,1 milidarcy; alterabilidade crescente
Barragem de Capivara - B (**)		1,204	1,2×10 ⁻⁶	n.d.	20,16	n.d.	alta	
Barragem de Capivara - C (*)		5,906	5,9×10 ⁻⁶	n.d.	9,04	n.d.	alta	

Fontes: (1) - FARRAN & THENOZ (1965)

(2) - FARJALLAT (1974)

S.E. - superfície interna específica

n.d. - não determinado

(*) - basalto compacto

(**) - basalto vesicular

2.4.3 Argilominerais expansivos

A presença de argilominerais nas rochas tem sido objeto de preocupação quando da sua utilização, devido ao fato de alguns deles apresentarem marcante característica de expansibilidade por absorção d'água, gerando pressões de expansão que podem afetar a estabilidade e a durabilidade das obras civis.

Os argilominerais são silicatos hidratados de alumínio, podendo conter quantidades variáveis de ferro, magnésio, potássio, sódio, etc. (FRAZÃO & GOULART, 1976). Sua estrutura é geralmente lamelar, variável grau de cristalinidade, com dimensões, em geral, inferiores a 2µm e alto valor da relação área superficial/massa. São, com exceção de raros

membros, formados pela combinação, em diversas proporções, de duas unidades básicas:

- a) *uma camada silicática ou tetraédrica*, constituída de um átomo de silício, posicionado no centro de gravidade do tetraedro, e por quatro átomos de oxigênio, situados nos vértices; e
- b) *uma camada aluminosa (ou magnésiana) ou octaédrica*, formada por um átomo de alumínio (ou magnésio), situado no centro do octaedro e seis átomos de oxigênio ou hidroxila em seus vértices.

Ambas as camadas podem crescer lateralmente de modo indefinido, pela adesão de novas unidades, enquanto que sua espessura somente poderá ser aumentada pela superposição de novas camadas básicas, de forma semelhante a uma pilha de papel.

Os argilominerais mais comuns dos materiais naturais são: caulinita, illita, clorita e esmectita (FRAZÃO & GOULART, *op.cit.*). As principais características destes argilominerais são sumarizadas a seguir (Figura 8):

- a) *grupo da caulinita*: apresenta estrutura 1:1, ou seja, cada placa é formada pela combinação de uma lamela tetraédrica com uma octaédrica, com espaçamento basal de cerca de 7 Å. A expansão da placa é praticamente nula, embora possam ocorrer moléculas de água entre as placas, formando a caulinita hidratada (haloisita);
- b) *grupo da clorita*: formado pela justaposição de uma lamela octaédrica entre duas tetraédricas; entretanto, no espaço entre placas, existe outra lamela octaédrica, cujo cátion pode ser Mg^{2+} ou Fe^{2+} , caracterizando este grupo como de estrutura 2:1:1. O espaçamento basal é de 14 Å;
- c) *grupo das micas e da illita*: constituído, também, pela justaposição de uma lamela octaédrica entre duas tetraédricas, formando uma unidade básica 2:1. As placas são ligadas por cátions de K^+ , que se encaixam muito bem entre elas, originando uma ligação forte, que não permite a sua substituição, tampouco a entrada de moléculas de água. O espaçamento basal é de 10 Å; e
- d) *grupo da esmectita*: também formado pela justaposição de uma lamela octaédrica entre duas tetraédricas, originando uma unidade básica 2:1, com espaçamento basal de 14 Å. A ligação entre placas é fraca e facilmente quebrada pela introdução de moléculas de água ou outras moléculas polares, que provocam a expansão do retículo. O principal mineral do grupo é a montmorilonita; o magnésio substitui o alumínio, enquanto que íons monovalentes balanceiam a carga. Quando a substituição é feita por ferro, a montmorilonita é denominada nontronita.

FIGURA 8 - Representação esquemática da estrutura de alguns argilominerais (*apud* FRAZÃO & GOULART, 1976 modif.).

Devido às suas propriedades elétricas superficiais e estruturais, bem como à sua grande superfície específica, os argilominerais têm forte tendência a adsorver películas de água e, por vezes, como no caso das argilas expansivas, até em as absorver (STRUILLLOU, 1969). Nesse caso, as tensões de expansão desenvolvidas podem atingir valores significativos.

A aplicação de esforços cíclicos de saturação-secagem nas rochas, quando em uso, induz à repetição do fenômeno de absorção de água pelos argilominerais, com a conseqüente repetição das tensões de expansão, introduzindo o efeito de fadiga (STRUILLLOU, *op. cit.*), com o enfraquecimento progressivo das ligações entre os constituintes minerais, levando a rocha à sua desagregação. Nesse caso, a degradação pode ocorrer em curto intervalo de tempo, anos, meses ou mesmo dias, conforme observado em algumas rochas basálticas da Bacia do Paraná (FARJALLAT, 1974).

BREKKE (1965 *apud* FRAZÃO & GOULART, *op. cit.*) atribuiu a expansão dos argilominerais a condicionantes internos e externos à rocha. Como fatores internos, enumerou:

- a) tipo e teor de argilomineral presente nas rochas;
- b) capacidade de troca catiônica (CTC);
- c) concentração de íons disponíveis na fração argila, com reflexos na troca catiônica;
- d) dimensão das partículas: a diminuição do tamanho das partículas conduz ao aumento da superfície específica, ampliando o poder de absorção e, por conseguinte, a expansibilidade;

- e) conteúdo inicial de água: algumas montmorilonitas só se expandem consideravelmente quando o teor de água for superior àquele que determina o seu limite de plasticidade; e
- f) densidade seca: expressa o grau de compactação; as argilas muito compactas apresentam maiores valores de expansão e de pressão de expansão.

Como fatores externos, BREKKE (1965 *apud* FRAZÃO & GOULART, *op. cit.*) relacionou os seguintes:

- a) possibilidade de acesso da água ao argilomineral, que será função do seu grau de fissuração;
- b) possibilidade de expansão do material argiloso confinado, que só ocorrerá caso a pressão de expansão for maior que a contrapressão exercida pelo meio circundante; e
- c) natureza e concentração dos íons dissolvidos na água de percolação que, por vezes, podem reduzir a expansão e a pressão de expansão.

A avaliação da expansão e da pressão de expansão dos argilominerais tem sido feita através de ensaios de laboratório em amostras indeformadas (quando possível) ou então remoldadas (FRAZÃO & GOULART, *op. cit.*).

O ensaio de expansão baseia-se na determinação do aumento percentual de altura ou de volume de um corpo-de-prova imerso em água.

O ensaio de pressão de expansão é conduzido para a determinação da pressão de confinamento necessária para manter constante a altura ou o volume de um corpo-de-prova imerso em água, ou seja, que cause expansão nula.

RUIZ (1963), trabalhando com amostras remoldadas de nontronita, presente na forma de placas nas fraturas dos basaltos de Barragem de Bariri, SP, obteve valores de expansão de 3% para os corpos-de-prova moldados com 200 MPa, quando submetidos a uma pressão de confinamento de 20 MPa. Nesse caso, a pressão de expansão, por extrapolação, alcançou 45 MPa. Foi, ainda, ensaiado um corpo-de-prova constituído por uma única placa de nontronita, com 5,0 cm de diâmetro e 0,3 cm de espessura, previamente submetida à secagem em estufa a 105°C. Nesse caso, após 36 horas de imersão, o corpo-de-prova não acusou qualquer expansão, fazendo supor que a contrapressão exercida pelo maciço basáltico local tenha sido superior à pressão de expansão.

A determinação da natureza e do teor dos argilominerais é, pois, de grande importância, devido a sua influência na degradação das rochas. A petrografia microscópica tem, aqui, uso limitado, devido às pequenas dimensões dos argilominerais, devendo-se recorrer à microscopia de alta resolução (microscopia eletrônica de varredura-SEM, microsonda eletrônica). Dentre os demais métodos usados para o reconhecimento dos

argilominerais, destacam-se as análises por difratometria de raios X, com boa definição para as fases cristalizadas, e a análise térmica diferencial (ATD), que permite a determinação da natureza mineralógica das fases amorfas (WEINERT, 1964).

A gênese dos argilominerais está relacionada com os mecanismos de alteração dos minerais primários (feldspatos e máficos), quer devido a processos hidrotermais ou intempéricos, sendo de grande relevância os condicionantes ambientais, tais como o clima e a intensidade de lixiviação. Em geral, boas condições de drenagem permitem forte lixiviação, intensificando a remoção da sílica, facilitando a permanência dos argilominerais 1:1, com tendência a produzir caulinitas. Por outro lado, lixiviação moderada a fraca, em locais de drenagem restrita, retarda a remoção da sílica e favorece a formação de argilominerais 2:1, tal como as montmorilonitas (FRAZÃO & GOULART, *op. cit.*). Entretanto, os produtos neoformados podem, ainda, se instabilizar e sofrer transformações. Assim, a montmorilonita, por exemplo, pode passar a caulinita com o aumento da intensidade da lixiviação. No caso dos doleritos sul-africanos estudados por WEINERT (*op. cit.*), a transformação da montmorilonita ocorre para valores do índice N inferiores a 2 (ver item 2.3.3).

ROISENBERG *et al.* (1984), estudando os argilominerais de rochas basálticas inalteradas (basaltos e diabásios) da Bacia do Paraná, postularam a origem deutérica para estes, resultante da ação dos resíduos finais da cristalização (intercrescimentos micrográficos e vidro vulcânico intersertal) com as fases cristalinas previamente formadas, dando origem a auréolas de alteração no contato entre as duas fases. Segundo os autores, os argilominerais pertencem, predominantemente, ao grupo das esmectitas (nontronita e montmorilonita), com maior incidência nas frações máficas, enquanto que nas frações félsicas predominam illita, caulinita (rara) e camadas mistas illita-montmorilonita. A confrontação da natureza química permitiu estabelecer as inter-relações entre os produtos argilosos e a alteração dos minerais primários (Quadro 3).

A literatura técnica apresenta diversos exemplos de degradação de rochas basálticas atribuída ao seu conteúdo em argilominerais expansivos.

FARJALLAT *et al.* (1972; 1972a), estudando as características dos basaltos do local da Barragem de Capivara, observaram que os litotipos mais alteráveis apresentavam teores mais elevados de nontronita e de vidro vulcânico. Tal fato foi levado em conta no projeto da barragem de terra e enrocamento, permitindo o zoneamento da seção, com a utilização dos tipos menos alteráveis para a faixa de *rip rap*.

HAYASE *et al.* (1975), DE ALBA & SESANA (1978) e RIMOLDI (1982) apresentaram estudos sobre a degradação de basaltos da Bacia do Paraná, na Argentina. Reconheceram a presença de associações de argilominerais do tipo celadonita-saponita-grifitita, finamente disseminadas na rocha, preferencialmente no topo e na base de basaltos microcristalinos, ou então preenchendo microvesículas. Embora a celadonita (estrutura semelhante à

muscovita) seja estável e inerte, a intercalação com minerais do grupo da esmectita (saponita-grifitita) favorece o processo de degradação dos basaltos, devido ao aumento da capacidade de absorção d'água. Segundo RIMOLDI (*op. cit.*), 10% a 15% de argilominerais disseminados na rocha foram suficientes para dar início ao processo de degradação, enquanto que teores entre 35% e 40% foram responsáveis pela desagregação total da rocha em 90 a 100 dias. No caso da Barragem Ayuí (Aproveitamento Hidroelétrico Salto Grande), entre Argentina e Uruguai, as superfícies de escavação foram protegidas com mistura de cimento e areia nos trechos de maior ocorrência dos argilominerais, a fim de proteger a rocha do processo cíclico de saturação-secagem e, com isto, evitar a sua desagregação (DE ALBA & SESANA, *op. cit.*).

ARGILOMINERAL	MINERAL PRIMÁRIO ASSOCIADO
nontronita	piroxênio, olivina
montmorilonita	piroxênio plagioclásio, hornblenda e resíduos intersertais (inclusive vidro vulcânico)
caulinita	plagioclásio, vidro vulcânico
clorita	piroxênio, plagioclásio
ilita	intercrescimento micrográfico, plagioclásio e vidro vulcânico

QUADRO 3 - Associação entre argilominerais e minerais primários em basaltos e diabásios da Bacia do Paraná (ROISENBERG *et al.*, 1984 modif.).

2.5 Variação das propriedades das rochas com a alteração

As rochas sofrem modificações, com intensidades variáveis, nas suas propriedades químicas, físicas, geológicas e mecânicas (Quadro 4), quer pela atuação dos processos intempéricos, sendo endógenos quanto exógenos, amplamente verificados em perfis geológicos naturais, quer pelo seu emprego como material de construção ou fundação de estruturas, devido às solicitações impostas a estas quando da sua utilização.

A massa específica aparente de uma rocha e a massa específica dos grãos diminuem à medida que a alteração aumenta, com tendência mais acentuada para a primeira e em menor proporção na segunda.

TIPO DE PROPRIEDADE	DESCRIÇÃO
Química	composição química
Física	massas específicas; porosidade, absorção; permeabilidade; dureza; módulo de elasticidade; coeficiente de Poisson; condutibilidade térmica; velocidade de propagação de ondas elásticas.
Geológica	composição mineralógica; estrutura; textura; durabilidade.
Mecânica	resistências: à compressão uniaxial, ao cisalhamento, ao impacto, ao desgaste (abrasão), ao esmagamento (britabilidade).

QUADRO 4 - Principais propriedades das rochas, passíveis de ser modificadas com a alteração (baseado em YOSHIDA *et al.*, 1972).

Por outro lado, a progressão da alteração provoca o aumento da porosidade, seja devido à lixiviação dos elementos dissolvidos, ou ainda pelo aumento da fissuração. Como consequência, a absorção d'água também aumenta, já que essa propriedade está intimamente relacionada com a porosidade.

De modo análogo, as propriedades mecânicas sofrem efeito adverso, traduzido pela queda das características de resistência com o avanço da intensidade da alteração.

ALEKSANDROV (1966 *apud* RODRIGUES, 1975) demonstrou que as propriedades elásticas de uma rocha são determinadas, principalmente, pelas características elásticas de seus minerais constituintes. Com isto, depreende-se que, durante a alteração, quando um mineral é substituído por outro, com diferente velocidade de propagação de ondas elásticas, ou quando aumentam a fissuração e a porosidade, cujas velocidades são relativas ao ar, há considerável modificação na velocidade global de propagação de ondas na rocha (RODRIGUES, *op. cit.*), com redução desse valor em comparação a um estado de alteração menos avançado.

São encontrados, na literatura técnica, diversos estudos correlacionando as variações das propriedades das rochas e seus respectivos graus de alteração. Apresentam-se, a seguir, alguns exemplos de relatos mais significativos.

MIRANDA (1984), estudando os granitos, dioritos e gabros do maciço de Sintra, em Portugal, tanto em perfis naturais como por via experimental (extrator Soxhlet), utilizou a relação molecular $2Fe_2O_3/2Fe_2O_3 + FeO$ para avaliar o grau de oxidação do ferro, associando-a aos valores de massa

específica aparente das rochas. Verificou que, independentemente do tipo litológico, a evolução dos perfis naturais se processou em dois estágios:

- a) na fase inicial do processo de alteração ocorreu aumento brusco da relação molecular, indicativa da oxidação do ferro ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$), acompanhada de ligeira diminuição da massa específica; e
- b) no estágio final, houve diminuição drástica da massa específica, sem que houvesse variação significativa da relação molecular, devido à fixação do Fe^{3+} sob a forma de compostos mais resistentes (óxidos e/ou hidróxidos).

FERREIRA (1990) efetuou estudo bastante abrangente, abordando aspectos da geoquímica da alteração e das propriedades físicas e mecânicas dos granitos utilizados ou utilizáveis na construção de enrocamentos em Portugal, a partir de amostras extraídas de afloramentos, pedreiras e de blocos do paramento da Barragem de Paradela. Verificou que, nos estágios iniciais da alteração, ocorriam pequenas variações das propriedades físicas, com significativa diminuição nos valores das propriedades mecânicas. Por outro lado, nas amostras mais alteradas, as tendências se invertiam, ou seja, as propriedades físicas apresentavam maior intervalo de variação, com pequenas variações das propriedades mecânicas. Concluiu que, nos estágios iniciais, eram reduzidas as perdas de materiais por lixiviação, o que é indicado pela pequena variação da massa específica e da porosidade. Entretanto, os cátions removidos da rede cristalina dos minerais deveriam desempenhar importantes funções estruturais, pelo que sua ausência reduziria drasticamente a resistência da rocha. O exemplo apresentado na Figura 9 ilustra o exposto: para valores de porosidade entre 1% e 2%, a resistência à compressão uniaxial é submetida a uma redução de cerca de 41%, passando de 90 MPa para 53 MPa.

Correlações semelhantes foram obtidas por CHRISTARAS (1991) a partir do estudo das propriedades físicas e mecânicas e das condições de alteração de pedras de construção (calcário) de sítios arqueológicos de Creta (Grécia). Nesse caso, para valores de absorção d'água entre 2% e 3%, ocorreram reduções de 9% na massa específica aparente seca (de 2.150 para 1.950 kg/m³), 11% na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (de 4.500 para 4.000 m/s) e de 23% na resistência à compressão uniaxial (de 56 para 43 MPa).

ONODERA & KUMARA (1980) estudaram a influência da textura de rochas cristalinas nas suas propriedades mecânicas, a partir de rochas graníticas do nordeste da Tailândia, geneticamente semelhantes, porém com diferentes texturas. A análise textural foi feita de acordo com o diâmetro médio, a superfície específica, a forma e o contato dos grãos. Verificaram que as rochas de granulação mais fina, ou seja, de maior superfície específica, apresentavam características mecânicas melhores do que

aquelas de granulação mais grossa, quanto às resistências à compressão uniaxial, à tração e ao cisalhamento.

FIGURA 9 - Variação da resistência à compressão uniaxial (σ_c) com a porosidade (η), em amostras de granito de Portugal (FERREIRA, 1990).

ILIEV (1966) investigou a variação das propriedades físico-mecânicas com a evolução dos processos intempéricos, em amostras de monzonito da Bulgária. Agrupou estas propriedades, de acordo com a ordem de grandeza da variação, em:

- a) fortemente variáveis: aumento ou redução superior a duas vezes;
- b) moderadamente variáveis: aumento ou redução inferior a duas vezes; e
- c) fracamente variáveis: praticamente não são influenciadas pelo intemperismo.

O Quadro 5 apresenta a discriminação das propriedades classificadas. O autor recomendou, ainda, o uso das propriedades fortemente variáveis como indicativas da alteração e, entre elas, a velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, devido à facilidade da sua determinação.

FORTEMENTE VARIÁVEIS	MODERADAMENTE VARIÁVEIS	FRACAMENTE VARIÁVEIS
volume dos poros velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas módulo de elasticidade módulo de deformação tensão máxima de ruptura	massa específica aparente coeficiente de Poisson	massa específica dos grãos

QUADRO 5 - Classificação das propriedades físico-mecânicas das rochas de acordo com o grau de influência dos processos intempéricos (ILIEV, 1966).

A partir da análise petrográfica e dos valores conhecidos das constantes elásticas dos minerais, FOURMAINTRAUX & TOURENQ (1970) calcularam os valores teóricos da velocidade de propagação de ondas longitudinais (V_p) e do módulo de deformação estático (E) de uma centena de tipos litológicos (rochas ígneas, sedimentares e metamórficas) destinados à utilização rodoviária. A diferença entre os valores calculados e medidos foi atribuída ao estado de alteração e às descontinuidades das rochas.

2.6 Atuação dos processos de degradação no tempo de engenharia

A avaliação da durabilidade dos materiais e agregados rochosos, entendida como a capacidade de estes resistirem aos mecanismos de degradação, retendo seu tamanho, forma e características físicas e mecânicas iniciais, por um longo período de tempo (Christaras, *op. cit.*), deve levar em conta tanto os processos de seleção quanto as solicitações do meio, no que se refere a esforços mecânicos impostos e condições ambientais específicas do local de sua utilização.

FOOKES *et al.* (1988) discutem, de forma bastante apropriada e objetiva, alguns aspectos que influenciam a degradação das rochas quando em uso (Quadro 6), que serão parcialmente apresentados a seguir.

Com relação aos critérios de seleção, os citados autores ressaltam o papel determinante dos processos intempéricos, atuantes no tempo geológico, na durabilidade da rocha no tempo de engenharia. Assim, a intensidade de atuação destes processos irá condicionar o perfil geológico natural do maciço rochoso e os respectivos graus de alteração da rocha. Por outro lado, o conhecimento e a interpretação das propriedades tecnológicas dos materiais rochosos se constituirão fatores decisivos para a escolha e adequação destes à destinação final em obras de engenharia.

PROCESSO	LOCALIZAÇÃO	MECANISMO DE DEGRADAÇÃO	EFEITO SOBRE O MATERIAL	ESCALA DE TEMPO
Geológico	<i>in situ</i>	intemperismo <ul style="list-style-type: none"> químico físico biológico; alteração hidrotermal; alteração deutérica.	mineralogia alterada; mudança na granulometria, forma, textura, etc.	geológica
		⇓	⇓	
Produção	pedreira	seleção; desmonte; carregamento; britagem; peneiramento; lavagem	- abrasão, impacto, perda de finos, microfissuras; - mudança nas propriedades físico-mecânicas	de engenharia
		⇓	⇓	
	pilha de estoque	intemperismo estático; contaminação por carregamento	produção de finos; mudança nas propriedades físico-mecânicas	
		⇓	⇓	
Construção	na obra	aquecimento no carregamento/transporte (betume); concretagem; espalhamento; compactação; intemperismo	abrasão, produção de finos, mudança do teor de umidade, agitação, esmagamento, aumento da superfície específica	
		⇓	⇓	
Em uso	depende do tipo de estrutura	intemperismo <ul style="list-style-type: none"> físico químico; abrasão; impacto; carregamento	intemperismo químico reduzido; efeito sobre o material depende dos processos acima e do tipo de estrutura	

QUADRO 6 - Fatores que afetam a durabilidade dos materiais e agregados rochosos (FOOKES *et al.*, 1988).

A partir do momento em que o material é extraído do maciço rochoso, diversos processos de degradação, especialmente mecânicos, são passíveis de ocorrer, cujos efeitos podem ser observados tanto na fase de produção, quanto na fase de construção da obra em questão, com reflexos no desempenho do material quando em uso.

Os processos de degradação durante a produção (extração, processamento e estocagem) podem ter efeitos relevantes nas propriedades físicas e mecânicas, particularmente dos materiais reduzidos a agregados. Tanto a propagação de ondas de choque, geradas por detonações, quanto a britagem da rocha têm a capacidade de induzir ou intensificar o desenvolvimento de microdescontinuidades. Os processos de separação e lavagem, freqüentemente utilizados para a remoção de poeira e materiais pulverulentos, podem causar a degradação da rocha por submetê-la a ciclos de saturação/secagem, abrasão e impacto. Por fim, a estocagem dos agregados também pode contribuir para a sua desagregação, em

decorrência das pressões de carregamento nas pilhas de estoque ou mesmo devido à exposição do material às condições atmosféricas locais.

Os processos de degradação durante a construção estão relacionados com o manuseio. Como exemplo, citam-se os agregados utilizados em pavimentação rodoviária, por estarem sujeitos a esforços de impacto, abrasão e esmagamento, devido às atividades de carregamento, espalhamento e compactação, com reflexos diretos na granulometria final.

Os materiais e agregados rochosos são selecionados segundo suas características inerentes, julgadas apropriadas para determinadas estruturas de engenharia. Dependendo do grau de carregamento a que os mesmos estarão sujeitos, quando em uso, essas estruturas podem ser classificadas em:

- a) *relativamente estáticas*, em que o carregamento é constante, tais como blocos de proteção de taludes, pedras de gabião, agregados para concreto; e
- b) *relativamente dinâmicas*, em que o material sofre variados e repetidos ciclos de carregamento, tais como lastro ferroviário, quebra-ondas, camadas de pavimento rodoviário, com e sem ligante.

Nesses casos, os principais mecanismos de degradação, considerados mais aplicáveis na escala do tempo de engenharia, envolvem esforços de impacto, abrasão, esmagamento, saturação-secagem, entre outros.

Com relação às condições ambientais às quais os materiais e/ou agregados rochosos estarão sujeitos, quando em uso, verifica-se que a posição de uma estrutura de engenharia em relação ao nível d'água, por exemplo, terá reflexos significativos sobre a resistência e a capacidade dos agregados em suportar as cargas impostas.

Por fim, a durabilidade dos materiais e/ou agregados rochosos, quando em uso, também estará condicionada às condições topográficas e climáticas do local de sua utilização. Entretanto, a variabilidade natural da precipitação pluviométrica e da temperatura serve para enfatizar a dificuldade de se tentar quantificar os efeitos do clima, especialmente dentro curto período do tempo de engenharia. Ressaltam-se, contudo, os trabalhos de WEINERT (*op. cit.*) que, utilizando o índice climático N, correlacionou o efeito do clima com a durabilidade dos doleritos alterados sul-africanos, usados para finalidades rodoviárias.

2.7 Índices quantificadores da alteração e da alterabilidade

São encontrados, na literatura técnica, diversos relatos de procedimentos propostos para avaliar o comportamento das rochas ante a alteração e a alterabilidade, sejam qualitativos ou quantitativos.

Entretanto, os métodos qualitativos, por se basearem em critérios estritamente descritivos, conduzem a avaliações subjetivas, que tornam

pouco precisos os estudos comparativos dos efeitos da alteração em materiais rochosos similares.

Dessa forma, têm sido desenvolvidos procedimentos quantitativos para a estimativa do grau de alteração. Tais métodos são baseados em parâmetros numéricos que relacionam, através de índices, valores de uma determinada propriedade de uma mesma rocha, obtidos a partir de amostras supostamente admitidas como tendo diferentes estados ou graus de alteração no momento da sua análise.

Por outro lado, os índices de alterabilidade possibilitam a quantificação da variação sofrida pelo grau de alteração no tempo de engenharia, permitindo comparar a aptidão à alteração de diferentes tipos litológicos. Para tanto, são realizados ensaios de alterabilidade, natural ou acelerada, de laboratório ou no campo, associados a um parâmetro físico ou mecânico passível de indicar a queda de resistência.

Segundo YOSHIDA (*op. cit.*), os principais obstáculos no estudo da alteração e da alterabilidade estão relacionados com as seguintes causas:

- a) influência da granulometria para ensaio;
- b) escolha do parâmetro mecânico quantificador da variação de resistência e procedimento para o cálculo desta variação;
- c) correlação entre os resultados obtidos em ensaios de laboratório e aqueles referentes à desagregação das rochas no campo; e
- d) significado físico dos ensaios realizados, no que diz respeito à validade e aplicabilidade em relação às solicitações impostas ao material rochoso, quando em uso.

COTTESS *et al.* (1971) e IRFAN & DEARMAN (1978a), citados em MARTIN (1986), consideraram que tais ensaios deveriam ser:

- a) rápidos e simples, envolvendo um mínimo de preparação das amostras;
- b) relevantes para as propriedades das rochas;
- c) relevantes para os problemas de engenharia; e
- d) de fácil repetibilidade.

São apresentados, a seguir, alguns dos principais índices de alteração e de alterabilidade citados na literatura.

2.7.1 Índices geoquímicos de alteração

O processo de intemperismo químico conduz à lixiviação dos elementos químicos mais mobilizáveis, cuja intensidade depende, fundamentalmente, do potencial iônico e das condições ambientais.

Esses índices são baseados em análises químicas quantitativas dos elementos maiores, na forma de óxidos, com cálculos de perdas e ganhos, que permitem comparar as composições químicas de amostras com diferentes graus de alteração.

O Quadro 7 exemplifica alguns dos índices geoquímicos propostos para a estimativa do grau de alteração.

Em geral, diversos índices geoquímicos são calculados para um mesmo conjunto de dados de composição química, utilizando-se, por fim, somente aquele(s) mais sensível(eis) e coerente(s) com as modificações das propriedades físico-mecânicas das rochas com o grau de alteração.

ÍNDICE	EXPRESSÃO	OBSERVAÇÕES	VARIAÇÃO	REFERÊNCIA
Índice de alteração potencial (WPI)	$\frac{\text{moles } (K_2O + Na_2O + CaO + MgO - H_2O^+)}{\text{moles } (SiO_2 + Al_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO - H_2O^-)} \cdot 100$	<ul style="list-style-type: none"> - H_2O^+: água combinada quimicamente; perdida somente quando $105^\circ C < T < 1200^\circ C$ - H_2O^-: água livre, perdida quando $T \geq 105^\circ C$ 	valores decrescentes com o aumento do grau de alteração	REICHE (1950 <i>apud</i> CARROLL, 1970)
Índice potencial (PI)	$\frac{\text{moles } SiO_2}{\text{moles } (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO + TiO_2)} \cdot 100$	- redução de PI indica dissolução da sílica		REICHE (1943 <i>apud</i> FERRERA, 1990)
Índice de Parker	$\left[\frac{(Na)_a}{0,35} + \frac{(Mg)_a}{0,90} + \frac{(K)_a}{0,25} + \frac{(Ca)_a}{0,70} \right] \cdot 100$	<ul style="list-style-type: none"> - numerador: proporção atômica do elemento - denominador: força de ligação do elemento com o oxigênio 		PARKER (1970 <i>apud</i> FERRERA, 1990)
Índice de Miura	$\frac{\left[\frac{FeO + MnO + MgO + CaO + Na_2O + K_2O}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + H_2O^+} \right]_{\text{rocha alterada}}}{\left[\frac{FeO + MnO + MgO + CaO + Na_2O + K_2O}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + H_2O^+} \right]_{\text{rocha sã}}}$	—		MIURA (1973 <i>apud</i> FERRERA, 1990)

QUADRO 7 - Exemplos de índices geoquímicos propostos para avaliar o grau de alteração.

2.7.2 Índices petrográficos de alteração

A análise petrográfica constitui-se num dos métodos mais importantes para a caracterização tecnológica dos materiais rochosos. Entretanto, as características petrográficas macroscópicas não são, por si só, suficientes para a avaliação da qualidade da rocha, devendo-se recorrer à análise complementar por microscopia óptica e, quando necessário, às análises mineralógicas indiretas, por meio de difração de raios X, análise térmica diferencial (ATD), microsonda eletrônica, entre outras técnicas.

Paralelamente, a análise modal permite determinar as porcentagens de ocorrência dos minerais presentes numa rocha.

Desse modo, através da microscopia petrográfica, é possível reconhecer e quantificar os minerais são e alterados de uma rocha, bem como avaliar o estado microfissural e a proporção de minerais secundários (FRAZÃO, *op. cit.*), além de detectar a presença de constituintes potencialmente deletérios.

O Quadro 8 ilustra alguns dos índices petrográficos propostos para a avaliação do grau de alteração.

ÍNDICE	EXPRESSÃO	OBSERVAÇÕES	VARIAÇÃO	REFERÊNCIA
Índice de decomposição (X_d)	$\frac{Nq - Nq_o}{1 - Nq_o}$	<ul style="list-style-type: none"> - Nq: relação quartzo/quartzo + feldspato, em peso, no solo - Nq_o: idem, para a rocha sã - $Nq_o \approx 0,33 Nq$ 	valores crescentes com o aumento do grau de alteração	LUMB (1962)
Índice de qualidade micropetrográfico (K)	$\frac{\% \text{ minerais são}}{\% (\text{minerais alterados} + \text{vazios} + \text{microfissuras})}$	porcentagens obtidas através da composição modal	valores decrescentes com o aumento do grau de alteração	AIRES-BARROS <i>et al.</i> (1966 <i>apud</i> FRAZÃO, 1993)

QUADRO 8 - Exemplos de índices petrográficos propostos para avaliar o grau de alteração.

FRAZÃO (*op. cit.*) ressaltou a dificuldade em se garantir representatividade através de lâminas petrográficas, o que dificulta a obtenção de boas correlações com as propriedades físicas e mecânicas e, por conseguinte, limita a sua utilização para a avaliação do grau de alteração das rochas, do ponto de vista geotécnico. Sob esse aspecto, porém, AIRES-BARROS *et al.* (1994) relataram a utilização de técnica de análise de imagens em microscopia de luz refletida para a obtenção de um índice textural. As características texturais de cada superfície rochosa foram estudadas através da aquisição, por câmera de vídeo, de imagem no nível cinza, suscetíveis de ser processadas.

Por fim, FOOKES *et al.* (1988) reforçaram o caráter auxiliar dos índices petrográficos na interpretação dos ensaios de engenharia. Segundo estes autores, tais índices não podem ser usados em substituição aos ensaios físicos e mecânicos, sendo mais adequados à utilização em conjunto ou como controle do desenvolvimento de tais ensaios.

2.7.3 Índices físicos e mecânicos de alteração

Conforme já discutido (item 2.5), os valores das propriedades físicas e mecânicas das rochas sofrem modificações, com intensidades variáveis, em virtude do avanço do processo de alteração. Assim, tomando-se por critério qualquer uma destas propriedades, pode-se verificar a variação sofrida pela rocha através da relação entre o valor obtido num determinado estado de alteração e aquele encontrado, para a mesma rocha, num estado inicial ou menos avançado de alteração.

O Quadro 9 mostra alguns dos índices físicos e mecânicos propostos para a avaliação do grau de alteração.

ÍNDICE		EXPRESSÃO	OBSERVAÇÕES	VARIAÇÃO	REFERÊNCIA
FÍSICO	Índice de massa específica aparente ($I\rho_a$)	$\frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_o}$	ρ - massa específica aparente	Todos os índices variam de zero a 1, sendo: zero - rocha sã ou, comparativamente, de menor grau de alteração;	LADEIRA & MINETTE (1984b)
	Índice de porosidade aparente ($I\eta_a$)	$\frac{\eta_s - \eta_o}{\eta_o}$	η - porosidade aparente ω - absorção d'água		
	Índice de absorção d'água ($I\omega$)	$\frac{\omega_s - \omega_o}{\omega_o}$	V_p - velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas		
	Índice de alteração (K)	$\frac{Vp_s - Vp_o}{Vp_o}$	R - resistência à compressão uniaxial	1 - rocha completamente alterada ou, por comparação, de maior grau de alteração	ILIEV (1966)
MECÂNICO	Índice de resistência (IR)	$\frac{R_s - R_o}{R_o}$	E - módulo de elasticidade S - resistência ao cisalhamento		LADEIRA & MINETTE (1984a)
	Índice de elasticidade (IE)	$\frac{E_s - E_o}{E_o}$	X_o - propriedade da rocha num estado menos avançado de alteração		
	Índice de cisalhamento (IS)	$\frac{S_s - S_o}{S_o}$	X_ω - idem, para um estado mais avançado de alteração		

QUADRO 9 - Exemplos de índices físicos e mecânicos propostos para avaliar o grau de alteração.

TOURENQ & FOURMAINTRAUX (1974) definiram um índice de qualidade das rochas (IQ) a partir do cálculo das velocidades teóricas de propagação de ondas ultra-sônicas (V_{pc}) e as velocidades determinadas experimentalmente (V_{pm}), ou seja:

$$IQ = \frac{V_{pm}}{V_{pc}} \cdot 100 \quad (8)$$

Verificaram que, em todos os casos, o valor teórico era maior que o experimental, sendo a diferença atribuída ao estado de alteração e às descontinuidades das rochas (poros e fissuras). O índice IQ varia, portanto, entre zero (rocha completamente alterada) e 100 (rocha sã, isenta de descontinuidades).

Os autores apresentaram, ainda, um gráfico que relaciona o índice IQ com a porosidade aparente (η), através do qual é possível fazer a separação entre a porosidade de poros (η_p) e a de fissuras (η_f), já que as leis de variação da velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas são bastante diferentes, dependendo do tipo de descontinuidade (Figura 10). No gráfico a seguir, verifica-se que uma redução de 50% no valor do índice IQ (de 80 para 40) se pode dever tanto a uma variação da porosidade aparente de 15% (da condição A para a condição B) como de 201% (da condição A para a condição C), dependendo do tipo de descontinuidade presente na rocha (Tabela 5).

FIGURA 10 - Variação do índice de qualidade da rocha (IQ) em função da porosidade aparente (TOURENQ & FOURMAINTRAUX, 1974).

TABELA 5 - Variação hipotética do índice IQ em função do tipo de descontinuidade presente na rocha.

PARÂMETROS	CONDIÇÃO DA ROCHA		
	A	B	C
IQ	80	40	40
η	12,3%	14,1%	37,1%
η_f	0,0%	1,8%	0,0%
η_p	12,3%	12,3%	37,1%

Obs.: valores extraídos da Figura 10

É nítida, portanto, a marcante influência da porosidade de fissura na variação do índice IQ e, conseqüentemente, no comportamento mecânico das rochas. TOURENQ & FOURMAINTRAUX (*op. cit.*) forneceram, ainda, uma expressão numérica relacionando o índice IQ com a porosidade da rocha, conforme segue:

$$IQ = 100 - 2 \eta_p - 25 \eta_f \quad (9)$$

sendo $\eta = \eta_p + \eta_f \quad (10)$

2.7.4 Índices de alterabilidade

O estudo dos índices quantificadores da alterabilidade das rochas comporta uma abordagem prévia dos aspectos relacionados com a escolha do parâmetro indicativo da variação do grau de alteração, bem como da correlação entre a escala de tempo de laboratório, nos ensaios de envelhecimento, e a escala de tempo de engenharia.

Devido às condições específicas nas quais os materiais rochosos são utilizados nas obras de engenharia, podem ocorrer fenômenos muito variados, tornando-os particularmente sensíveis a modificações que, por sua vez, produzem transformações no seu estado de equilíbrio natural (STRUILLLOU, *op. cit.*). Sob esse aspecto, deve-se considerar que os mecanismos de alteração tidos como mais importantes para uma determinada obra são justamente aqueles passíveis de introduzir modificações nas características dos materiais no tempo de engenharia, em virtude das repercussões técnicas e econômicas que podem acarretar (STRUILLLOU, *op. cit.*; RODRIGUES, 1975).

A alterabilidade será, então, representada por um valor numérico resultante da relação entre a taxa de variação do parâmetro de alteração, num dado intervalo de tempo. Nesse caso, são utilizadas simulações em que a rocha se encontra sujeita a um processo de alteração, natural ou em laboratório, através de ensaios de alterabilidade.

LADEIRA & MINETTE (1984a) apresentaram curvas hipotéticas de alterabilidade para diferentes tipos de rochas ígneas (Figura 11), quando submetidas aos mesmos agentes. Verifica-se, pois, que a alterabilidade diminui com o aumento do teor em sílica que entra na composição mineral, ou seja, a ordem decrescente de alterabilidade das rochas ígneas é a seguinte: rochas ultrabásicas ($\text{SiO}_2 < 45\%$), rochas básicas ($45\% < \text{SiO}_2 < 52\%$), rochas intermediárias ($52\% < \text{SiO}_2 < 65\%$) e rochas ácidas ($\text{SiO}_2 > 65\%$) (FRAZÃO & AUGUSTO JR., 1994). Isto significa dizer, também, que as velocidades de alteração são progressivamente decrescentes em direção às rochas ácidas.

FIGURA 11 - Curvas hipotéticas de alterabilidade de rochas ígneas (LADEIRA & MINETTE, 1984a modif.)

De outra forma, pode-se notar (FIGURA 11) que a velocidade de alteração natural é variável no tempo. Entretanto, a intervalos de tempo muito curtos, esta velocidade pode ser considerada linear e, portanto, constante (RODRIGUES, 1975; LADEIRA & MINETTE, 1984a).

O tempo necessário para que qualquer desses tipos litológicos se transforme por completo vai depender do grau de alteração inicial da rocha, ou seja, do ponto de partida A ou B exemplificado na Figura 11.

Vale ressaltar que, embora tais modificações demandem longos intervalos do tempo geológico para ser processadas na natureza, as diferenças de alterabilidade e de velocidades de alteração entre esses tipos litológicos serão conceitualmente válidas na escala de tempo de engenharia (FRAZÃO & AUGUSTO JR., *op. cit.*)

Para a avaliação da alterabilidade, FARJALLAT (1971) sugeriu a utilização de um parâmetro mecânico quantificador das modificações introduzidas pelo processo de alteração, em detrimento da abordagem química ou mineralógica. Para tanto, apresentou as seguintes justificativas:

- a) pequena variação química ou mineralógica pode produzir grandes variações no comportamento mecânico, e estas são mais facilmente detectáveis; e
- b) as variações das características mecânicas são mais importantes para o estudo tecnológico de rochas do que as químicas e mineralógicas.

Os Quadros 10 e 11 exemplificam alguns dos índices propostos para a quantificação da alterabilidade das rochas.

Índice	Coefficiente de alterabilidade - $K_{\Delta t}$
Critério	relação entre as somas das perdas (em porcentagem de material desagregado) devido à alteração e à queda de resistência mecânica, entre dois ensaios de alteração, natural ou experimental
Ensaio utilizados	de alteração: lixiviação contínua em extrator Soxhlet mecânico: abrasão <i>Los Angeles</i>
Expressão	$\frac{(200 - I) - (200 - F)}{(200 - I)} = 1 - \frac{(200 - F)}{(200 - I)}$ <p>I - soma das perdas por alteração (*) e por abrasão, da amostra <i>in natura</i> (*) - iguais a zero F - idem para a amostra após o ensaio de alteração</p>
Justificativa	as perdas por desagregação de um agregado rochoso podem ser medidas em porcentagem de material passante na peneira de abertura mínima utilizada. As perdas variam entre 0 e 100%, tanto no ensaio de alteração como no ensaio mecânico. A soma dos limites máximos de perdas, em ambos os ensaios, é igual a 200.
Variação do índice	entre 0 e 1. Quanto menor for o valor, menos alterável será a rocha
Referências	FARJALLAT (1971); FRAZÃO (1993)

QUADRO 10 - Índice de alterabilidade proposto por FARJALLAT (1971).

Índice	Coeficiente de alterabilidade específica - K
Critério	relação entre o material retido devido à alteração e sua resistência mecânica, considerando-se dois ensaios de alteração, natural ou experimental
Ensaio realizado	de alteração : água-estufa; etileno-glicol; lixiviação em extrator Soxhlet; imersão em sulfato de sódio; alterabilidade natural mecânico: impacto Treton
Expressão	$K = \frac{R_i - R_f}{R_i} = 1 - \frac{R_f}{R_i} = 1 - \frac{(100 - P_2) R_2}{100 R_1}$ <p> $R_i = (100 - P_1) R_1 = 100 R_1$ R_i = resistência mecânica inicial (amostra <i>in natura</i>) P_1 - perdas por alteração ($P_1 = 0$) R_1 - resistência mecânica inicial do material retido $R_f = (100 - P_2) R_2$ R_f = resistência mecânica ao final do intervalo de tempo considerado P_2 - perdas por alteração R_2 - resistência mecânica final do material retido. </p>
Justificativa	A resistência à desagregação de um agregado rochoso pode ser medida em porcentagem acumulada de material retido na peneira de abertura mínima utilizada. As porcentagens retidas variam de 0 a 100, tanto no ensaio de alteração como no ensaio mecânico.
Variação do índice	entre 0 e 1. Quanto menor for o valor, menos alterável será a rocha.
Referências	YOSHIDA (1972); FRAZÃO (1993)

QUADRO 11 - Índice de alterabilidade proposto por YOSHIDA (1972).

LADEIRA & MINETTE (1984a) apresentaram metodologia para a quantificação da alterabilidade a partir da correlação entre as velocidades de alteração em ensaios de alterabilidade acelerada e natural. Estes autores submeteram amostras de diorito a ensaio em extrator Soxhlet durante 2.100 ciclos, com a determinação do módulo de elasticidade (E) a intervalos regulares de tempo. Foi construída uma curva experimental representativa da variação do índice de elasticidade (I_E) ao longo do ensaio. Paralelamente, amostras de diorito foram expostas às condições intempéricas naturais durante 11 meses, com a determinação do módulo de elasticidade no início e ao final do período e cálculos do índice de elasticidade natural ($I_E = 0,2016$) e da respectiva velocidade de alteração natural anual ($v = 0,22 I_E/\text{ano}$). O valor desta velocidade foi plotado na curva experimental (Figura 12), permitindo correlacionar as escalas de tempo experimental (em ciclos) e natural (em anos). Nesse caso, 170 ciclos do ensaio acelerado corresponderam a 1 ano do ensaio natural. Segundo os autores, uma vez conhecida a alterabilidade de uma determinada rocha utilizada como material de construção, poder-se-ia conhecer a variação experimentada pelo seu coeficiente de segurança no tempo de engenharia.

FIGURA 12 - Variação do índice de elasticidade (I_E) de um diorito nos ensaios de alterabilidade acelerada e natural (LADEIRA & MINETTE, 1984a).

2.8 Critérios de previsão de comportamento e de seleção dos materiais rochosos

Do ponto de vista da geotecnia, a alteração das rochas é normalmente encarada sob dois aspectos: o da caracterização dos materiais e o da previsão do seu comportamento, considerando-se a escala de tempo de engenharia (MIRANDA, 1986).

A previsão do comportamento tem a finalidade de permitir um prognóstico a respeito da durabilidade de uma rocha ou agregado rochoso, quando da sua real utilização. Para tanto, são executados ensaios de alterabilidade acelerada (envelhecimento acelerado), em geral no laboratório, nos quais as rochas são submetidas a variações de condições ambientais cíclicas e, tanto quanto possível, drásticas, simulando, de forma breve, através do processo de fadiga, ações que normalmente requerem grandes intervalos de tempo para que suas conseqüências sejam perceptíveis (MIRANDA, 1986).

Entretanto, tais ensaios, embora de grande utilidade, esbarram no problema da correlação entre as escalas do tempo experimental e de engenharia, já que estes impõem condições bastante severas quando comparadas àquelas a que a rocha vai estar efetivamente submetida (OLIVEIRA *et al.*, 1987).

Para superar esse inconveniente, pode-se lançar mão de ensaios de alterabilidade natural, nos quais a rocha é submetida às condições intempéricas naturais, em geral no local onde deverá ser utilizada, com o acompanhamento quali e/ou quantitativo das transformações ocorridas. Nesse caso, a escala do tempo experimental será a própria escala do tempo de engenharia.

Ainda assim, a grande limitação de todos os ensaios reside na determinação do intervalo de tempo necessário para conseguir resultados com mínimo de representatividade.

Por outro lado, o grande número de parâmetros envolvidos no mecanismo de alteração (composição química, pH, Eh, temperatura, etc.), aliado à dificuldade de reprodução de alguns deles, conduz à simplificação das variáveis dos ensaios, tornando-os, por vezes, pouco representativos das solicitações a que as rochas estarão submetidas, quando em uso. Por isso, nenhum ensaio de alteração e/ou de alterabilidade pode ser considerado indicador absoluto da durabilidade potencial da rocha ou do agregado rochoso (FOOKES *et al.*, 1988; MARTIN, *op. cit.*).

Desse modo, a utilização deste tipo de material, em qualquer obra de engenharia, passa pela definição de critérios de seleção que levem em conta tanto as especificidades de cada projeto, como a experiência acumulada com a realização de ensaios, aliada à observação de situações concretas de uso, tanto quanto possível semelhantes àquela que se pretende estudar.

São apresentados, a seguir, procedimentos experimentais utilizados para a previsão do comportamento, bem como alguns dos critérios de seleção de rochas e agregados rochosos, encontrados na literatura.

2.8.1 Ensaio de alterabilidade

Conforme já citado, tais ensaios podem ser classificados em alterabilidade acelerada ou natural, segundo a velocidade em que as solicitações são impostas às amostras.

Os principais tipos de ensaios de alterabilidade acelerada são descritos sucintamente, conforme segue:

a) **água-estufa**: cada ciclo é constituído de um período de saturação em água e secagem em estufa. Este ensaio exerce solicitações através da combinação de dois fatores: variação da temperatura e da umidade. Os resultados dos ensaios são afetados pela porosidade, textura, teor de minerais secundários e descontinuidades da rocha (FOOKES *et al.*, 1988);

b) **saturação em solução de sulfato de sódio ou de magnésio e secagem em estufa**: exerce solicitações através de ciclos de tensões de tração causadas pelo aumento de volume quando da cristalização destes sais, bem como devido à dilatação diferencial dos minerais por aquecimento. As rochas porosas, com superfícies rugosas, permitem o crescimento destes sais nos poros e descontinuidades, provocando estilhaçamento e desagregação superficiais contínuos, enquanto que em rochas compactas, com superfícies relativamente lisas, haverá simplesmente a deposição dos cristais (YOSHIDA, *op. cit.*). Os resultados dos ensaios são afetados pela compactidade, porosidade, forma/angularidade dos fragmentos, teor de minerais secundários e descontinuidades da rocha (FOOKES *et al.*, 1988). Ainda persiste o problema da reprodutibilidade do ensaio, atribuído à capacidade de o sulfato de sódio se cristalizar em duas formas distintas (FOOKES *et al.*, 1988). Os processos intempéricos por cristalização de sais são típicos de regiões áridas e/ou costeiras (FOOKES *et al.*, 1988), o que limita a utilização deste tipo de ensaio;

c) **imersão em etileno-glicol**: cada ciclo é constituído de um período de imersão em etileno-glicol e secagem em estufa. Este ensaio é especialmente indicado para a investigação da durabilidade de rochas contendo argilominerais expansivos, já que o etileno-glicol tem a propriedade de produzir a sua expansão reticular, gerando tensões de tração nos espaços intergranulares (FRAZÃO & AUGUSTO JR., *op. cit.*; YOSHIDA, *op. cit.*);

- d) **lixiviação contínua em extrator Soxhlet**: permite a simulação das condições naturais de alteração, porém em velocidade bem maior, devido à percolação de água aquecida em torno de 70°C. No "clima" deste aparelho, distinguem-se duas regiões: uma zona atmosférica, onde as amostras nunca estão submersas, com elevada velocidade de percolação, e uma zona de flutuação do nível freático, onde as amostras permanecem, alternadamente, imersas e emersas (YOSHIDA, *op. cit.*). FARJALLAT (1971) introduziu, a título experimental, uma terceira zona, de saturação permanente. O aparelho permite a reprodução do ciclo da água, através dos mecanismos de precipitação, infiltração, drenagem, acumulação e evaporação, para dar início a novo ciclo (MIRANDA, 1986). O ensaio simula as condições de um clima tropical oceânico exagerado (PÉDRO, 1964 *apud* YOSHIDA, *op. cit.*), muito embora a aceleração das diversas variáveis seja feita às custas da fidelidade do mecanismo (RODRIGUES, 1975);
- e) **congelamento-degelo**: exerce solicitações através de ciclos de tensões de tração geradas pela pressão de cristalização durante o congelamento da água nos poros e fissuras da rocha; e
- f) **fadiga térmica**: cada ciclo de ensaio é constituído de um período de "insolação" a cerca de 70°C, através de lâmpada de infravermelho, seguido de imersão em água destilada (AIRES-BARROS *et al.*, *op. cit.*).

Com relação ao ensaio de alterabilidade natural, como já foi descrito, não se entrará em pormenores.

De maneira geral, estes ensaios fornecem apenas resultados qualitativos, ainda que expressos de forma numérica, referentes aos efeitos macroscópicos ocasionados pelos mecanismos de alteração (lasqueamento, fragmentação, desintegração, etc.). Outra forma de apresentação é através de valores das perdas de massa, calculadas a intervalos regulares de tempo, durante os ensaios.

Entretanto, ainda é pouco usual, senão rara, a conjugação de ensaios mecânicos aos de alterabilidade, para a avaliação da queda da resistência mecânica da rocha ou agregado rochoso, o que permitiria a quantificação da alteração e da alterabilidade.

Em 1972, YOSHIDA já apontava uma série de problemas, alguns dos quais ainda não solucionados, relativos à determinação das propriedades tecnológicas em rochas, entre as quais a alteração e alterabilidade se inserem, destacando-se:

- a) ausência de sistematização adequada;
- b) não-concordância de resultados devido à variabilidade de padronizações adotadas;

- c) falta de representação matemática das propriedades físicas das rochas;
- d) pouco conhecimento da dependência entre as propriedades tecnológicas e as características petrográficas; e
- e) duração demasiadamente elevada na execução de alguns ensaios.

Assim, de acordo com YOSHIDA (*op. cit.*), “a aceitação dos materiais rochosos com base nos resultados obtidos com os ensaios citados fica quase que exclusivamente na dependência de limites empíricos, variáveis conforme a responsabilidade da obra”.

2.8.2 Critérios de seleção

Diversos procedimentos foram até hoje propostos para fundamentar a seleção de rochas e agregados rochosos em obras de engenharia, muitos dos quais baseados na observação do desempenho destes materiais quando em uso ou ainda na investigação das causas dos eventuais insucessos. Por isso, na maioria dos casos, tais procedimentos fornecem valores considerados aceitáveis para determinados resultados de ensaios, ou intervalos de valores em que estes resultados deverão estar situados, ou ainda relações numéricas entre eles.

São apresentados, a seguir, alguns dos critérios de seleção citados na literatura.

PICHLER (1942) destacou a importância da petrografia na caracterização tecnológica de rochas utilizadas como material de construção. Em estudos realizados com amostras de granito da cidade de São Paulo, estabeleceu a análise petrográfica e a determinação da absorção d'água como critérios de previsão da alterabilidade e de seleção dos materiais. Assim, se a análise petrográfica indicasse alteração pronunciada e a absorção d'água fosse superior a 0,5%, a rocha seria considerada de má qualidade e deveria ser rejeitada.

FARRAN & THENOZ (*op. cit.*) estabeleceram quatro classes de rochas graníticas, levando em consideração a superfície interna específica e a reatividade do sistema rocha-água, conforme a finalidade a que se destinam (Quadro 12).

Estudos realizados com agregados basálticos utilizados em pavimentação rodoviária indicaram a presença de minerais secundários em teores elevados, bem como a natureza destes minerais, como as causas principais da degradação da rocha e, conseqüentemente, da deterioração da obra (SCHNEIDER & ROCHA, 1968). Em presença de água, sob a ação do tráfego, originam-se acumulações de finos, ocasionando a queda do poder de suporte e deformações plásticas do pavimento. Assim, aliada aos resultados dos ensaios de caracterização tecnológica, a seleção de basaltos

para finalidades rodoviárias tem-se apoiado em análises petrográficas e na determinação da natureza dos minerais secundários (Quadro 13).

FATORES DA ALTERABILIDADE			CRITÉRIOS DE UTILIZAÇÃO			
Micropermeabilidade	Superfície interna específica	Reatividade rocha-água	Agregado para concreto	Pedras de revestimento	Vias de passagem (túnel, galeria)	Fundação
microfissuras não-acessíveis à água	pequena	fraca	utilizável	em geral utilizável	nenhum revestimento	nenhum trabalho especial
		forte	impróprio	impróprio	- revestimento nem sempre necessário (função do tipo de alteração) - bloquear a macrofissuração	trabalhos reparadores para tornar o maciço mais compacto
microfissuras numerosas e acessíveis à água	grande	fraca	utilizável	em geral não-utilizável	trabalhos freqüentemente necessários para assegurar a estabilidade mecânica	
		forte	impróprio	impróprio	trabalhos reparadores necessários para garantir o maciço, tanto em grande escala quanto matricialmente: anel concretado e injeções	injeções

QUADRO 12 - Critérios de utilização de rochas graníticas para diversas finalidades segundo a micropermeabilidade, a superfície interna específica e a reatividade entre a rocha e a água (FARRAN & THENOZ, 1965 modif.).

Teor de minerais secundários (%)	Qualidade da rocha / Previsão do comportamento		
5	pequeno efeito	boa qualidade	adequada
10			adequada, se M.S. não expansivos
15		transição	ensaios de durabilidade necessários
20			
25	algumas falhas na utilização	qualidade inferior	
30			
35	provável insucesso		
>35			
Fonte	SCOTT (1955)	DAY (1962)	
Referência	SCHNEIDER & ROCHA (1968)		

M.S. minerais secundários

QUADRO 13 - Limites propostos para aceitação de agregados basálticos para fins rodoviários de acordo com o conteúdo de minerais secundários.

WEINERT (1964; 1968; 1970; 1984) desenvolveu uma relação entre o conteúdo de minerais secundários e seu índice climático N (Figura 13), que permite prever a durabilidade de rochas ígneas básicas alteradas da África do Sul, especialmente os doleritos Karroo, utilizadas em obras rodoviárias. Segundo o autor, tais rochas, mesmo quando alteradas, constituem-se na principal e, por vezes, única fonte de material de construção para rodovias em boa parte do território daquele país. Concluiu que o desempenho satisfatório é dependente tanto da condição inicial em que a rocha se encontra, quanto do ambiente no qual será utilizada. Por isso, dividiu o território sul-africano em zonas climáticas (Figura 4) e indicou, para cada zona, o conteúdo máximo admissível de minerais secundários presentes na rocha.

FIGURA 13 - Linhas de durabilidade para doleritos da África do Sul para uso rodoviário (WEINERT, 1984).

FOOKES *et al.* (1988) propuseram dois indicadores de durabilidade da rocha (**RDI**) para a avaliação da durabilidade potencial de rochas e agregados submetidos a solicitações estáticas ou dinâmicas, em qualquer estágio da vida útil de uma estrutura já construída. Tais indicadores foram desenvolvidos a partir de um conjunto abrangente de ensaios em granitos e doleritos da Grã-Bretanha. Os indicadores de durabilidade da rocha - caso estático (**RDI_s**) e caso dinâmico (**RDI_d**) - foram definidos pelas seguintes expressões:

$$RDI_s = \frac{Is_{50} - 0,1(SST + 5WA)}{SG_{ssd}} ; e \quad (11)$$

$$RDI_d = \frac{0,1 M.AIV + 0,5WA}{SG_{ssd}} , \quad (12)$$

em que:

- Is_{50} = média entre os resultados dos ensaios de carga pontual nas condições seca e saturada (ISRM, 1985);
- SST = perdas no ensaio de sanidade ao sulfato de magnésio (HOSKING & TUBEY, 1969);
- WA = absorção d'água (BS 812);
- SG_{ssd} = massa específica saturada e superfície seca (BS 812);
- M.AIV = perdas no ensaio de impacto em agregado - modificado (HOSKING & TUBEY, 1969).

O Quadro 14 mostra a classificação proposta pelos autores para a durabilidade potencial, de acordo com os valores de RDI_s e RDI_d .

VALOR	RDI_s	RDI_d	
4	excelente	pobre	RDI_s - indicador da durabilidade da rocha: caso estático
3		razoável	
2	bom	bom	RDI_d - indicador da durabilidade da rocha: caso dinâmico
1			
0	razoável	excelente	
-1			
-2	pobre		
-3			

QUADRO 14 - Classificação tentativa da durabilidade potencial de acordo com os valores de RDI_s e RDI_d (FOOKES *et al.*, 1988).

CERATTI *et al.* (1994), partindo da caracterização tecnológica de basaltos alterados empregados em bases e sub-bases de estradas secundárias do Rio Grande do Sul, estabeleceram uma relação conveniente entre os valores de resistência à carga pontual (Is_{50}) nas condições seca e saturada como critério de aceitação dessas rochas (Figura 14). O ensaio foi utilizado para avaliar a resistência mecânica do esqueleto mineral, enquanto que a relação foi usada como indicação da capacidade de o agregado resistir às forças expansivas dos argilominerais.

VAN ROOY (1994) apresentou os critérios de seleção do basalto Drakensberg (Bacia do Karroo) para uso como agregado para concreto, *nip rap* e para fins rodoviários no Lesoto (sul da África). O material rochoso está sendo utilizado nas obras do projeto LHWP - Lesotho Highlands Water Project, que envolve a construção de cinco grandes barragens, uma usina hidrelétrica, 225 km de túneis e 650 km de estrada, num período de 25 anos, com o objetivo de desviar águas das terras altas do Lesoto para o centro industrial da África do Sul. A seleção do basalto está sendo feita de acordo com os conteúdos de argilominerais e de amígdalas, bem como o desempenho da rocha quando submetida a ensaios tecnológicos (Figura 15).

FIGURA 14 - Critério de aceitação de agregado basáltico alterado, segundo CERATTI *et al.* (1994).

FIGURA 15 - Critério de seleção do basalto para as obras do projeto Lesotho Highlands Water Project, no Lesoto, sul da África (VAN ROOY, 1994).

2.9 Exemplos de implicações da alteração e da alterabilidade em obras de engenharia

FARJALLAT (1969) relatou a completa desagregação *in situ*, após alguns meses, do enrocamento do aterro da ponte sobre o rio Sucuriú, obra complementar da Usina Jupiá, rio Paraná, SP/MS. O material empregado foi rocha basáltica compacta, aparentemente sã antes da sua utilização. O processo de desagregação conferiu grande fragilidade aos blocos de rocha, tanto ao choque quanto à pressão dos dedos. A alta desagregabilidade foi atribuída à ação dos argilominerais expansivos, devido às oscilações de umidade e temperatura ambientais, bem como à devitrificação do vidro intersticial.

Para CABRERA & BARBI (1981), as rochas basálticas desagregáveis mantêm-se estáveis em enrocamentos se forem protegidas por outras mais resistentes à desagregação, mesmo quando a camada de proteção for pouco espessa. Tal fato se deve à retenção de certa quantidade de umidade, que impede as variações de volume dos argilominerais expansivos. Segundo os autores, a compreensão desse comportamento tem permitido a utilização de basaltos com características tecnológicas julgadas inicialmente como inadequadas, ensejando a seleção de alternativas de projeto mais econômicas.

São apresentados, a seguir, alguns casos de condicionantes de projetos de barragens relacionados com a alteração e a alterabilidade de rochas basálticas.

2.9.1 Barragem de Capivara

A alterabilidade dos basaltos provenientes da escavação para a implantação da Barragem de Capivara, rio Paranapanema, SP/PR, influenciou decisivamente nos critérios do projeto do enrocamento.

FARJALLAT *et al.* (1972a) caracterizaram os três tipos principais de basaltos, denominados de: "A" (compacto, cinza-esverdeado, de alta resistência mecânica e baixa alterabilidade); "B" (vesículo-amigdaloidal, acinzentado, de baixa resistência mecânica e alta alterabilidade) e "C" (compacto a microamigdaloidal, cinza-esverdeado, com características variáveis). Os autores constataram haver, nos basaltos mais alteráveis, uma correlação positiva entre alterabilidade e porcentagem de argilominerais expansivos.

NIEBLE & CRUZ (1970) e CRUZ & NIEBLE (1971), citados em FRAZÃO (*op. cit.*), notaram deformabilidade excessiva e diminuição da resistência ao cisalhamento, requerendo cuidados especiais para o uso desse material como enrocamento. A solução adotada foi a de se utilizar os tipos de menor resistência no corpo do enrocamento e os mais resistentes como camada externa de proteção.

2.9.2 Barragem de Keene Creek

HIGGS (1976) descreveu os problemas relativos à utilização de rocha basáltica na Barragem de Keene Creek (Estado de Oregon, Estados Unidos). Trata-se de uma barragem de enrocamento com cerca de 400 m de comprimento e 15 m de altura.

A superfície exposta dos blocos de rocha foi distribuída, porcentualmente, em quatro categorias progressivas de deterioração: sólida (38%); fissurada (40%); muito fissurada, lasqueada e com alteração esferoidal, conferindo aspecto de rocha branda (13%) e completamente desagregada (9%).

A desagregabilidade dos basaltos foi atribuída à pressão de expansão exercida pela montmorilonita. Segundo o autor, a desagregação se deveu aos esforços de tensão causados por este argilomineral, que deve superar a resistência à tração da rocha, estimada em 14 MPa.

A montmorilonita seria principalmente de origem deutérica, resultante da alteração da olivina ou da devitrificação de vidro vulcânico em palagonita.

2.9.3 Barragens de Rosana e de Porto Primavera

OLIVEIRA *et al.* (1987) relataram os métodos utilizados e os resultados obtidos com ensaios de alterabilidade natural realizados tanto em testemunhos de sondagens como em blocos de rochas basálticas, provenientes das escavações do Aproveitamento Hidrelétrico de Rosana, rio Paranapanema, SP/PR, e Usina e Eclusa Porto Primavera, rio Paraná, SP/MS.

No A.H. de Rosana foram executados, entre outros, ensaios com blocos de rocha ($\varnothing_m = 30$ cm) e com britas, subdivididos em pilhas de estoque, que foram submetidas a uma das seguintes solicitações:

- a) exposição às condições ambientais;
- b) idem, porém com umedecimento diário; e
- c) cobertura com proteção impermeável (lona plástica).

Na UHE Porto Primavera foi efetuado, entre outros ensaios, o acompanhamento de seis pilhas de estoque, nas quais selecionaram-se áreas de exposição, sendo que, em cada área, foram escolhidos diversos blocos de rocha para avaliações periódicas.

A interpretação dos resultados de todos os ensaios executados convergiu para a constatação da alta desagregabilidade dos litotipos basálticos de ambos os empreendimentos, que condicionaram à adoção das seguintes soluções de projeto:

- a) utilização de cascalho como agregado para concreto. O cascalho para o A.H. de Rosana foi dragado do rio Paranapanema, enquanto que para a UHE Porto Primavera, foi extraído do rio Paraná¹;
- b) utilização de solo-cimento para a proteção do talude de montante das barragens de terra¹;
- c) emprego de concreto compactado a rolo (CCR) para a proteção de trechos do talude de jusante da barragem de Porto Primavera nos locais onde seriam necessários blocos de rocha de grandes dimensões, não disponíveis nas obras (THEMAG, 1986; LEITE *et al.*, 1995); e
- d) emprego de rocha menos desagregável para a proteção da zona de *rip rap* do talude de jusante das barragens de terra de Porto Primavera, nos trechos da planície aluvionar e do leito do rio. Nesses casos, a espessura da camada de enrocamento foi aumentada em relação àquela definida para atender as exigências hidráulicas, para compensar os índices de desagregação de blocos estimados através de estudos estatísticos. Assim, a espessura do enrocamento foi aumentada de 50% no trecho da planície aluvionar e duplicada no trecho do leito do rio (THEMAG, *op. cit.*).

OLIVEIRA *et al.* (1992) relataram as observações feitas por mais de 10 anos em blocos e corpos-de-prova de concreto preparados com o basalto desagregável de Porto Primavera. Os resultados foram comparados com aqueles em que se utilizou o basalto são da UHE Água Vermelha. Os autores concluíram que o concreto feito com o basalto desagregável tem comportamento satisfatório quando aplicado em estruturas envelopadas, ou seja, quando protegido, em suas faces expostas, por concreto de melhor qualidade.

2.9.4 Barragem de Taquaruçu

SERRA JR. & AZEVEDO (*op. cit.*) apresentaram o método empregado e analisaram os resultados do ensaio de alterabilidade natural executado com blocos de basalto compacto extraídos das escavações obrigatórias da UHE Taquaruçu, rio Paranapanema, SP/PR, tendo em vista sua utilização como enrocamento e agregado para concreto.

Os ensaios de laboratório, com amostras britadas, indicaram a adequação do material para uso em concreto. Entretanto, tais resultados não foram conclusivos para o emprego da rocha como enrocamento, devido às reduzidas dimensões das amostras, aliada à elevada densidade de fraturamento exibida especialmente por esse tipo litológico.

O ensaio de alterabilidade natural, com duração de 30 meses, foi executado com blocos de rocha de várias dimensões, separados em três grupos compostos de frações granulométricas compatíveis com as do

¹ J.S. ARAÚJO (1995) - comunicação pessoal

enrocamento. Para simular as condições presentes no enrocamento, cada grupo de amostras foi submetido a uma das seguintes condições:

- a) exposição às condições intempéricas naturais (simulação da situação acima do nível d'água);
- b) idem, com molhagem diária (simulação da zona do *rip rap*); e
- c) permanentemente submerso (simulação das condições abaixo do nível d'água).

À exceção daquelas mantidas submersas, que não apresentaram quaisquer modificações, as demais amostras ensaiadas sofreram processo contínuo de abertura de fraturas, provocando a subdivisão em vários blocos menores, ocasionando redução de cerca de 30% das suas dimensões médias iniciais.

Os autores atribuíram a causa principal do fenômeno à expansão térmica das amostras, provocando a abertura das fraturas preexistentes. A água teria sua importância ligada ao choque térmico a que a amostra foi submetida quando da sua molhagem.

O ensaio de alterabilidade natural permitiu avaliar satisfatoriamente o comportamento do basalto para sua utilização em enrocamento, o que possibilitou a sua seleção para tal fim.

2.9.5 Usina Hidroelétrica Serra Quebrada

FERREIRA *et al.* (*op. cit.*) apresentaram os estudos de desagregabilidade dos subderrames basálticos presentes na fundação da Usina Hidroelétrica (UHE) Serra Quebrada, rio Tocantins, MA, desenvolvidos para o projeto de viabilidade, com vista na sua utilização como material de construção.

Como particularidade metodológica, ressalta-se a execução do ensaio de alterabilidade natural em amostras de sondagens rotativas, nas quais os testemunhos foram serrados ao longo do seu comprimento; uma das metades foi ensaiada, mantendo-se a outra na caixa de sondagem para preservar as informações originais e permitir comparações.

Da análise dos resultados de todos os ensaios efetuados, os autores concluíram que 90% do material era passível de ser utilizado sem restrições, enquanto que os 10% restantes poderiam se desagregar, porém, por estar situados no topo do pacote de subderrame, haveria a possibilidade de remoção por escavação seletiva.

Os autores atribuíram a desagregabilidade ao estado microfissural, a partir da verificação de que amostras com teores mais elevados de argilominerais, porém em matriz sã e sem microfissuras, se mantiveram intactas após mais de dois anos de ensaio. Constataram, ainda, que a alterabilidade era mais intensa nos períodos de chuva, tendendo a se estabilizar durante a estiagem; nas épocas de chuva, o gradiente térmico chegou a atingir 50°C por até mais de uma vez ao dia.

3 O COMPLEXO HIDROELÉTRICO CANOAS

3.1 Dados gerais

O Complexo Hidroelétrico Canoas está sendo construído no rio Paranapanema, na divisa dos Estados de São Paulo e Paraná, a jusante da Usina Hidroelétrica (UHE) de Salto Grande e a montante da UHE de Capivara. Compreende as UHE Canoas I, no remanso do reservatório de Capivara, e Canoas II, 27 km a montante da primeira (Figura 16).

A UHE Canoas I está disposta cerca de 1 km a montante da foz do rio das Cinzas, nos municípios de Cândido Mota, SP, e Itambaracá, PR, aproximadamente nas coordenadas geográficas 22°56'S e 50°31'W.

O acesso ao local, tomando-se por referência a cidade de São Paulo, pode ser feito pela rodovia Castelo Branco (SP-280) até o trevo que a interliga com a rodovia Raposo Tavares (SP-270), seguindo-se em direção à Cândido Mota e daí até o canteiro de obras, com extensão total aproximada de 450 km.

O arranjo geral das obras é resultado de estudos técnicos e econômicos de alternativas de localização, que envolveram análises de esquemas de desvio e construção, variações das estruturas de concreto e obras de terra e possibilidades de instalação de diferentes tipos de equipamentos eletromecânicos (IPT, 1995). Como produto daqueles estudos, definiram-se, em relação às obras civis, barragens de concreto-gravidade e de enrocamento com núcleo argiloso (Figura 17).

3.2 Breve histórico

O aproveitamento desse trecho do rio Paranapanema, com cerca de 32 m de queda, foi inicialmente concebido através da construção de um único barramento (Canoas Alta), com área de inundação de 95 km².

Entretanto, após a elaboração do projeto básico, o enfoque das condições socioeconômicas da área de influência da usina sofreu profundas transformações que, aliadas à própria expansão local da agricultura, resultou em contestações significativas, devido à possibilidade de inundação de áreas produtivas, tanto paulistas quanto paranaenses (SIMÕES *et al.*, 1991).

Tais fatos sugeriram o reexame da divisão de quedas já aprovada, que resultou na decisão de implantação de dois barramentos no trecho em questão, denominados UHE Canoas I e Canoas II, com quedas líquidas nominais de 16,3 m e 14,5 m respectivamente, mantendo-se praticamente a mesma energia firme para o sistema (101 MW médios), porém restringindo a área inundada de 95 para 53 km², praticamente confinada à calha do rio.

Ressalta-se que a UHE Canoas I, cuja construção foi iniciada em junho/92, está situada no mesmo sítio da alternativa Canoas Alta, muito embora o arranjo geral das estruturas tenha sido modificado de maneira a se adequar à nova realidade do projeto. Assim, os estudos geológico-geotécnicos e os de

Fonte: CESP (1990, mod.) - Des. CAN3-RC04-10.081

Nota : Para seções, ver Figura 45.

FIGURA 17 - Arranjo geral da UHE Canoas I.

caracterização tecnológica do material rochoso, desenvolvidos anteriormente, serviram como importante subsídio ao projeto atual.

4 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

Em recente trabalho de síntese, IPT (1995) compilou as principais características geológicas regionais de interesse ao empreendimento, bem como abordou aspectos da geologia da área da UHE Canoas I, que serão sumarizados a seguir.

4.1 Aspectos geológicos regionais

A área do Complexo Canoas está inserida no contexto geológico da Bacia Sedimentar do Paraná. Esta, por sua vez, corresponde a uma grande unidade geotectônica, com extensão da ordem de 1.750.000 km², dos quais 60% pertencem ao território brasileiro. A coluna estratigráfica regional registra acúmulo de sedimentos paleozóicos, lavas basálticas e sedimentos mesozóicos (Quadro 15).

ERA	PERÍODO	UNIDADE ESTRATIGRÁFICA PRINCIPAL		LITOLOGIA	ESPESSURA NA ÁREA (m)	AMBIENTE DEPOSICIONAL
CENO-ZÓICO	Quaternário	Aluviões e cascalheiras		areias, argilas e cascalhos	6 a 8	fluvial: depósitos de canal e várzea
M E S O Z Ó I C O	Cretáceo Superior	Grupo Bauru	Formação Marília	arenitos finos a médios, maciços, com cimentação carbonática, subordinadamente pelitos	100	leques aluviais
			Formação Adamantina	arenitos finos, maciços, com estratificação cruzada e plano-paralela; lamitos arenosos	60	fluvial meandrante e/ou entrelaçado; lacustre
	Cretáceo Inferior Jurássico/ Triássico	Grupo São Bento	Formação Serra Geral	basaltos; subordinadamente arenitos e siltitos intertrapeanos	900	—
			Formação Botucatu	arenitos com granulação fina a média, bem selecionados, grãos fosclos, com estratificação cruzada de grande porte	280	eólico
			Formação Pirambóia	arenitos de granulação fina, com níveis conglomeráticos e lamitos; estratificação plano-paralela	50	eólico
PALEO-ZÓICO	Permiano	Grupo Passa Dois	Formação Rio do Rasto / Membro Serrinha	siltitos e argilitos de cores esverdeada, subordinadamente avermelhada e arroxeada, com níveis de calcários oolíticos, de sílex e de coquinas	360	costeiro

QUADRO 15 - Coluna estratigráfica regional (IPT, 1992, *apud* IPT, 1995).

A Formação Serra Geral, principal unidade estratigráfica presente na área, é representada por rochas basálticas individualizadas em derrames sucessivos, por vezes separados entre si através de delgadas camadas de rochas clásticas. Tais rochas exibem variado grau de fraturamento, tanto de origem atectônica (disjunção colunar, juntas de alívio) como tectônica (associada a zonas de movimentação relacionadas com estruturas regionais).

A estruturação tectônica regional é marcada pela justaposição de blocos delimitados por suturas e lineamentos. As suturas são feições lineares extensas, classificadas como de primeira ordem, que correspondem a zonas de articulação de grandes blocos crustais, enquanto que os lineamentos seccionam tais blocos com componentes de deslocamento direcional. A única sutura na área é a de Ribeirão Preto, com direção NE-SW, que é seccionada e deslocada pelo lineamento de Guapiara, com direção NW-SE. Outro lineamento presente, designado Jacutinga, ocorre com direção ENE-WSW, acompanhando aproximadamente o curso do rio Paranapanema.

4.2 Geologia local

O maciço rochoso de fundação da UHE Canoas I é composto por uma sucessão de derrames basálticos superpostos que, nas ombreiras, são recobertos por solos coluviais e de alteração de basalto, e nas baixadas, próximas ao rio, por aluviões de deposição recente (Figura 18).

Uma estrutura geológica, denominada **anomalía**, secciona indistintamente os derrames basálticos. No seu interior, os basaltos exibem características marcadamente diferentes daquelas dos basaltos externos à estrutura.

4.2.1 Derrames basálticos da fundação

Até as profundidades atingidas pelas sondagens, foram identificados seis derrames basálticos, designados, de baixo para cima, de A, B, C, D, E e F.

As escavações para preparo das fundações das estruturas de concreto expuseram parcialmente os derrames superiores (F, E e D), além da região de topo da **anomalía**.

O Quadro 16 exhibe a coluna estratigráfica do maciço rochoso da fundação da UHE Canoas I, cuja descrição corresponde à porção não-interceptada pela feição **anomalía**. Os Quadros 17 e 18 fornecem os critérios e parâmetros geológico-geotécnicos utilizados na descrição.

Duas outras feições reconhecidas no maciço basáltico são dignas de comentários:

- a) a junta J1D se desenvolve no interior do horizonte de basalto vesículo-amigdaloidal cinza-claro, situado na base da região superior

FIGURA 18 - UHE Canoas I: seção geológico-geotécnica pelo eixo da barragem (IPT, 1995 modif.).

COTA (m)	DERRAME	LITOLOGIA		CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS (*1)	K (cm/s)	JUNTAS (*2)	OBSERVAÇÕES
				RS/C1 a RAD/C2 ? - ? - ?			(*1) os critérios e parâmetros geológico-geotécnicos estão contidos nos QUADROS 17 e 18.
350	(*3) F		cinza, localmente cinza avermelhado; por vezes com disjunção colunar proeminente, do tipo leque invertido	RS/C1 pouco fraturado	$\leq 10^{-5}$		(*2) juntas subhorizontais de grande persistência lateral; espessuras variando de 0,05 a 0,5 m; correspondem a zonas intensamente fraturadas (III*).
340	espessura remanescente $\approx 33,0$ m.	Basalto Compacto				J1F	
333						J2F	Derrame F
330	contato bem definido e aberto; oscila entre as cotas 330 e 324 m.	Brecha basáltica aglomerática BVA	cast.-averm.	RS/C1 A RAD/C1-C2	10^{-4} 10^{-3}	J3F	(*3) topo erodido. Nos ombreiros é encontrado até a cota 360 m e no leito do rio em torno da cota 332 m.
320	espessura média $\approx 8,0$ m.	Basalto Compacto	cz-esverdeado		$\sim 10^{-5}$		Derrame D
	contato bem definido e selado	Brecha basáltica aglomerática BVA		RAD/C2		J1D	(*4) brecha basáltica aglomerática, constituída por BVA com estruturas fluidal e brechada; contém porções descontínuas de brecha basáltica silteosa e, localmente, brecha silicática.
314		Basalto Compacto		RS/C1 RAD/C2	$< 10^{-4}$	J1D	
310	D		cz-esverdeado, com amígdalas disseminadas	RS/C1 pouco fraturado	$\leq 10^{-5}$ $\sim 10^{-3}$	J2D	
308	espessura $\approx 19,0$ m.	Basalto Compacto			$\leq 10^{-4}$	J3D	(*5) o horizonte de basalto compacto tem espessura em torno de 1,0 m, podendo não ocorrer; cor cinza esverdeado, por vezes com minerais verdes disseminados.
304			cinza, com pontos pretos disseminados, leptoclosado				
300	contato pouco nítido e selado	BVA	cz.-averm.; vesículas e amígdalas com minerais verdes	RAD/C2 pouco fraturado	$< 10^{-5}$ $\sim 10^{-3}$	J1C J2C	
297							
294	C	Basalto Compacto	cz.-avermelhado (cz.-amarelado a esverdeado na região do núcleo)	RS/C1 pouco fraturado	$< 10^{-4}$ $\sim 10^{-4}$	J3C	(*6) BVA cinza clara; amígdalas e vesículas com diâmetro de 2 a 8 cm.
290	espessura $\approx 18,0$ m.						
288							
280	contato bem definido e selado	Brecha basáltica areno-silteosa BVA	m.-averm. cz.-clara	RAD/C2 pouco fraturado	$\sim 10^{-4}$		OBS: Esta descrição dos derrames basálticos e válida apenas para as porções do maciço rochoso situadas fora da feição anômala
270	B						
	espessura $\approx 29,0$ m.	Basalto Compacto	cz.-escuro (núcleo) cz.-clara (base)	RS/C1 pouco fraturado, com trechos extremamente fraturados	impermeável		
260							
250	contato bem definido e selado	Brecha basáltica silte-arenosa BVA	cz.-averm. cz.-clara	RAM/C1 RAD/C2 pouco fraturado	$\sim 10^{-4}$		BVA - Basalto vesicular e/ou amigdaloidal
	A	Basalto Compacto	cz.-escuro, com minerais verdes e pretos disseminados	RS/C1 fraturamento pouco desenvolvido	impermeável		K - Condutividade hidráulica cast. - castanho cz - cinza m - marrom
240	espessura prospectada $\approx 16,0$ m.						

Fonte: IPT (1995)

QUADRO 16 - Coluna estratigráfica do maciço rochoso da fundação da UHE Canoas I (baseado em IPT, 1995).

PARÂMETRO	SIGLA		DENOMINA- ÇÕES	CARACTERÍSTICAS DA ROCHA
A L T E R A Ç Ã O	A1	RS	rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alterações ou com transformações físicas e químicas incipientes. No segundo caso, a rocha é ligeiramente descolorida.
	A2	RAD	rocha medianamente alterada	Apresenta minerais medianamente alterados. A rocha é bastante descolorida.
	A3	RAM	rocha muito alterada	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
	A4	REA	rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente alterados. A rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo. Mantém a estrutura da rocha de origem.
C O E R Ê N C I A	C1		rocha coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável com lâmina de aço. Somente escavável a fogo.
	C2		rocha medianamente coerente	Quebra com relativa dificuldade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço. Escavável a fogo.
	C3		rocha pouco coerente	Quebra com facilidade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície facilmente riscável com lâmina de aço. Escarificável.
	C4		rocha incoerente	Quebra sob a pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina.

QUADRO 17 - Graus de alteração e coerência (IPT, 1995 modif.).

CLASSE	GRAU DE FRATURAMENTO	FREQÜÊNCIA DE FRATURAS (fraturas/m)	GRAU DE ALTERAÇÃO
I	F1	< 1	rocha sã (RS ou A1) a medianamente alterada (RAD ou A2)
II	F2	1 a 2	
	F3	2 a 10	
III	F4	10 a 20	
III*	F5	> 20	
IV			
V	fraturamento obliterado		extremamente alterada (REA ou A4)

QUADRO 18 - Classificação do maciço basáltico (IPT, 1995 modif.).

do derrame D. Abaixo da junta, as vesículas e/ou amígdalas não exibem padrão definido de distribuição, ou então se apresentam levemente orientadas no sentido horizontal (padrão de topo de derrame). Entretanto, logo acima da junta, as vesículas e amígdalas ocorrem alongadas no sentido vertical, inclinadas e comumente deformadas (vesículas "cachimbo"), estrutura típica de base de derrame. Tais características, aliadas à estratigrafia e aos litotipos da região superior do derrame, sugerem tratar-se de um derrame secundário; e

b) além de variações na cor, que pode mudar para cinza-avermelhado, o basalto compacto do derrame E contém, próximo da base, intercalações vesículo-amigdaloidais, estrutura fluidal e porções de brecha, por vezes com parcelas do derrame inferior, insinuando a ocorrência de estruturas em espiráculo.

4.2.2 Feição *anomalia*

A estrutura geológica designada ***anomalia*** é constituída por uma caixa de falha com espessura em torno de 10 m, direção WNW-ESE, de baixo mergulho, cerca de 20° para o rumo N40°E. O falhamento é do tipo inverso, de empurrão ou cavalgamento, com rejeito vertical não superior a 1,6 m.

Essa ***anomalia*** exhibe topo e base bem definidos, assim como padrão geral de descontinuidades, que delimitam corpos basálticos com forma amendoada. A intersecção da caixa de falha com a superfície natural do maciço rochoso é delineada, *grosso modo*, por um canal profundo.

No seu interior, os basaltos exibem elevado fraturamento, freqüentemente com fraturas estriadas, além de alta permeabilidade, com valores em torno de 10^{-2} cm/s ou superiores.

4.3 Geomorfologia e clima

De acordo com o mapa geomorfológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981), a área da UHE Canoas I enquadra-se na unidade designada Planalto Ocidental.

A fisiografia local, condicionada pelos derrames basálticos, tem por base o relevo de *colinas amplas*, onde predominam declividades inferiores a 15%, amplitudes que não ultrapassam 100 m e vales abertos. Os topos destas colinas são extensos e aplainados, e as vertentes exibem perfis retilíneos a convexos.

A drenagem é caracterizada pela baixa densidade, ou seja, com até cinco cursos d'água perenes numa área de 10 km², de padrão subdendrítico.

A classificação do Sistema Internacional de Köppen, empregada por SETZER (1966) na elaboração da carta climatológica do Estado de São Paulo, confere à área de estudo a predominância de clima da categoria **Cfa**, de caráter temperado úmido, sem estação seca definida, com verão quente e inverno relativamente frio.

Como se discutirá em item específico do texto, os ensaios de alterabilidade foram realizados, em sua maioria, no Laboratório Central de Engenharia Civil - LCEC da Companhia Energética de São Paulo - Cesp, no município de Ilha Solteira, bem como no então canteiro de obras da Usina Nova Avanhandava, no município de Buritama (Figura 16). Decorre daí a necessidade de comparar as condições climáticas desses locais com aquelas atuantes no sítio da UHE Canoas I.

Em ambos os municípios citados, predomina o clima da categoria **Aw**, de caráter tropical úmido, com verão quente e estiagem de inverno.

A Tabela 6 mostra os dados comparativos das características climáticas das três localidades, não indicando diferenças significativas entre elas, sugerindo que as amostras ensaiadas tenham sido submetidas a condições ambientais similares àquelas a que o material rochoso estará sujeito quando em uso.

TABELA 6 - Comparação entre os parâmetros climáticos dos locais de realização dos ensaios tecnológicos e do sítio do empreendimento.

LOCAL \ PARÂMETRO	UHE CANOAS I	BURITAMA	ILHA SOLTEIRA
Classe de clima	Cfa	Aw	Aw
Temperaturas médias anuais (°C)	21-22	~ 22	~ 23
Temperaturas médias no mês mais quente (janeiro) (°C)	24-25	~ 25	> 25
Temperaturas médias no mês mais frio (julho) (°C)	16-17	~ 18-19	> 19
Médias das temperaturas máximas no mês mais quente (janeiro) (°C)	30-31	~ 31	> 32
Médias das temperaturas mínimas no mês mais frio (julho) (°C)	11-12	~ 12	~ 14
Precipitação anual (mm)	~ 1250	~ 1250	> 1250
Diferença entre chuvas e evapo-transpiração (mm)	~ 200	50-100	< 50

Fonte: SETZER (1966)

Entretanto, deve ser considerado que, embora a precipitação anual seja da mesma ordem de grandeza para os três locais, temperaturas mais elevadas ocasionam o aumento da evapotranspiração, reduzindo, dessa maneira, o montante de água disponível para os processos intempéricos (SETZER, *op. cit.*). Sob este aspecto, poder-se-ia imaginar que tais processos (intemperismo químico) seriam, comparativamente, mais intensos no sítio da obra e atuariam com menor intensidade em Ilha Solteira, em virtude das diferenças entre os totais de chuvas e a evapotranspiração nestas duas localidades, estando Buritama numa situação intermediária.

O relatório do projeto básico do Complexo Canoas (CESP, 1990) fornece alguns parâmetros hidroclimatológicos médios, tomados como representativos para a caracterização climática do local (Tabela 7).

TABELA 7 - Dados hidroclimatológicos médios anuais representativos do local da UHE Canoas I.

PARÂMETRO	PERÍODO DE OBSERVAÇÃO	VALOR
Temperatura	1972-1980	22°C
Evaporação anual	1973-1980	1657 mm ^(*)
Umidade relativa	1972-1980	76%
Precipitação anual	1970-1980	1195 mm ^(*)

Fonte: CESP (1990)

(*) região do reservatório

Plotando-se esses valores nos diagramas apresentados na Figura 3, verifica-se que o sítio do empreendimento se situa na região climática definida como *moderada* por PELTIER (1950 *apud* FOOKES *et al.*, 1971), estando sujeita à ação predominante de intemperismo químico moderado.

Da mesma maneira, admitindo-se o índice climático N de WEINERT (*op. cit.*) como passível de ser aplicado à área de estudo, ter-se-ia, para a região do reservatório da UHE Canoas I (CESP, 1990):

- a) evaporação média do mês de janeiro (E_j) = 167 mm;
b) precipitação média anual (P_a) = 1.195 mm (Tabela 7);

$$c) N = 12 \frac{E_j}{P_a} = \frac{2004}{1195}, \text{ portanto } N \cong 2. \quad (13)$$

Ressalta-se que a área de estudo, pelo seu regime climático, apresenta similaridade de tipo de intemperismo com a faixa sudeste da África, abaixo da latitude 16° S (Figura 4) onde, de acordo com o índice climático N, predominariam os processos intempéricos químicos.

5 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MATERIAL ROCHOSO

5.1 Estudos efetuados

Os estudos de caracterização tecnológica do material rochoso foram conduzidos em um período de 10 anos, compreendendo tanto aqueles realizados ainda na fase do projeto básico do empreendimento Canoas Alta como também aqueles executados durante o projeto básico e parte do período construtivo da UHE Canoas I, incluindo-se o hiato de tempo utilizado para o reexame do projeto.

Tais estudos envolveram a determinação de índices físicos, realização de ensaios mecânicos e de análises petrográficas, avaliação da alterabilidade, entre outros. Considerações a respeito do estudo sobre a reatividade álcali-agregados não serão aqui abordadas por ultrapassar o escopo deste trabalho.

As amostras utilizadas foram provenientes de sondagens rotativas executadas com barriletes tipo duplo-livre, série D-Craelius, coroa de diamante e diâmetro de 86 mm, obtendo-se testemunhos com 72 mm de diâmetro, com elevado grau de recuperação.

Todas as amostras foram, a princípio, classificadas segundo a litologia, cor, presença de minerais verdes disseminados na matriz e respectiva posição estratigráfica.

O ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens foi, entre os demais, o que forneceu resultados para todos os tipos litológicos, excetuando-se aqueles específicos do derrame A, mais profundo e interceptado parcialmente por uma única sondagem.

5.2 Procedimentos adotados

Praticamente todos os ensaios e determinações foram realizados pelo Laboratório Central de Engenharia Civil (LCEC) da Cesp, em Ilha Solteira, SP, à exceção das análises petrográficas, executadas pelo IPT, em São Paulo, e de parte dos ensaios de alterabilidade, realizados no então canteiro de obras da Usina Nova Avanhandava, em Buritama, SP.

Os procedimentos utilizados foram os constantes em normas nacionais e internacionais relativas ao assunto, quando indicadas nas especificações do projeto, além de métodos e/ou critérios específicos do LCEC, bem como de outros desenvolvidos para o presente estudo, que serão discriminados e descritos sucintamente a seguir.

5.2.1 Determinação de índices físicos

Os índices físicos (massa específica - ρ , porosidade - η e absorção d'água - ω) foram determinados a partir de corpos-de-prova destinados a ensaios de compressão uniaxial e diametral, e em amostras posteriormente submetidas a ensaios de alterabilidade. No primeiro caso, os valores obtidos correspondem a uma única determinação para cada amostra; no segundo, as determinações foram efetuadas em três segmentos de testemunhos de sondagens, com 10 cm de altura cada, tendo o resultado final sido considerado como a média destes três valores.

As determinações foram conduzidas através de procedimentos normatizados internamente pelo LCEC ou então de acordo com o método C 127 da American Society for Testing and Materials - ASTM.

5.2.2 Determinação da velocidade de propagação de ondas

A velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (V_p) foi determinada de acordo com os procedimentos do método D 2845 da ASTM, através da emissão de ondas utilizando-se o aparelho Pundit (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Tester), com cabeçotes emissor-receptor de 54 kHz acoplados no topo e na base das amostras.

Foram usados corpos-de-prova, no estado seco, destinados aos ensaios de compressão uniaxial e de resistência à tração por compressão diametral.

5.2.3 Ensaio de compressão uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial (σ_c) foram executados de acordo com os procedimentos do método MRL-16 do LCEC, a partir de amostras, no estado seco, obtidas de testemunhos de sondagens usados na determinação da velocidade de propagação, como também em outras, posteriormente submetidas a ensaios de alterabilidade.

Os corpos-de-prova foram regularizados numa retífica de rebolo diamantado, acoplada a um torno mecânico, de forma a garantir o perfeito acabamento do topo e base e a perpendicularidade entre as faces. A relação base:altura foi, aproximadamente, de 1:2,5 (6,8 cm x 17,0 cm).

Foi utilizada prensa hidráulica Kratos com capacidade para 100 t. Os corpos-de-prova foram submetidos a esforços crescentes, com velocidade de carregamento de 5 MPa/min, até a ruptura.

5.2.4 Ensaio de compressão diametral

Os ensaios de tração (σ_t) por compressão diametral foram executados conforme os procedimentos do método D 3967 da ASTM, em corpos-de-prova no estado seco, previamente utilizados para a

determinação da velocidade de propagação. A relação base:altura foi cerca de 1:0,5 (7,0 cm x 3,5 cm).

5.2.5 Determinação do módulo de elasticidade estático

O módulo de elasticidade estático (E) foi determinado de acordo com os procedimentos do método D 2845 da ASTM, em parte dos corpos-de-prova submetidos à compressão uniaxial.

Os valores finais corresponderam à média de, no mínimo, três determinações efetuadas em testemunhos de sondagens, com 10 cm de altura cada.

5.2.6 Ensaio de abrasão *Los Angeles*

Os ensaios de abrasão *Los Angeles* (LA) foram conduzidos de acordo com os procedimentos da norma NBR-6465 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

Cada amostra, com massa total de cerca de 10.000 g, foi preparada para se enquadrar na graduação E deste ensaio, que consiste em fragmentos nas seguintes faixas granulométricas: 76 a 63 mm (2.500 g), 63 a 50 mm (2.500 g) e 50 a 38 mm (5.000 g).

O desgaste foi expresso em porcentagem, em massa, do material que, após o ensaio, passou pela peneira nº 12 (1,7 mm).

5.2.7 Análises petrográfica e difratométrica

As análises petrográficas foram realizadas em seções delgadas ao microscópio de luz transmitida, a partir de segmentos de testemunhos de sondagens previamente selecionados.

As análises por difratometria de raios X, utilizadas para a identificação dos argilominerais presentes na rocha, foram executadas com material da dimensão da fração argila ($< 2 \mu\text{m}$). Após o devido preparo, as amostras foram submetidas às análises nas seguintes condições: natural, após saturação com etileno-glicol e após aquecimento a 350°C, durante 3 horas.

Em ambos os casos, as análises seguiram procedimentos internos do IPT.

5.2.8 Ensaio de alterabilidade

Os ensaios de alterabilidade foram realizados em amostras de testemunhos de sondagens rotativas, seja na sua forma inicial ou então fragmentados e distribuídos em granulometrias predeterminadas.

Quanto às condições de simulação, executaram-se tanto ensaios de alterabilidade acelerada como natural.

5.2.8.1 Alterabilidade acelerada

Esses ensaios foram conduzidos em laboratório de acordo com os seguintes procedimentos:

a) **ensaio de imersão em água e secagem em estufa em fragmentos de rocha:** consistiu em submeter 50 fragmentos, situados na faixa granulométrica de 25 a 19 mm (1" a 3/4"), à imersão em água por 13 horas e posterior secagem em estufa à temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 10 horas, deixando-os resfriar a temperatura ambiente durante uma hora, reiniciando-se, então, o ciclo de imersão. Assim, cada ciclo de ensaio correspondeu a um dia, adaptado para as condições de operação rotineira em laboratório. Foram efetuadas avaliações periódicas quali e quantitativas, esta última baseada na perda de massa do material retido na peneira de malha 19 mm (3/4"). A duração máxima do ensaio foi fixada em 140 ciclos (140 dias), tendo sido executado de acordo com o método MCA-13 do LCEC;

b) **ensaio de imersão em água e secagem em estufa em testemunhos de sondagens:** os testemunhos do trecho de ensaio foram inicialmente pesados e acondicionados em bandejas de aço galvanizado, perfuradas na base, na mesma posição em que se encontravam nas caixas de sondagens. As amostras foram imersas em água por 24 horas, posteriormente submetidas à secagem em estufa à temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ por 12 horas e resfriadas a temperatura ambiente por uma hora. Dessa forma, cada ciclo teve duração de 37 horas. O ensaio foi dado por encerrado após 70 ciclos (108 dias), com avaliações periódicas quali e quantitativas, esta última correspondendo à perda de massa do material retido nas bandejas. O ensaio foi executado conforme procedimento interno do LCEC;

c) **ensaio de imersão de fragmentos de rocha em etileno-glicol:** consistiu em colocar 6 a 8 fragmentos, situados na faixa granulométrica de 25 a 19 mm (1" a 3/4"), em recipientes de vidro, dotados de tampas estanques, nos quais as amostras ficaram imersas em etileno-glicol. O ensaio teve duração máxima de 15 dias, com cinco períodos de imersão de três dias cada, com avaliações quali e quantitativas finais. Foram seguidos os procedimentos do método MRL-04 do LCEC; e

d) **ensaio de imersão de testemunhos de sondagem em etileno-glicol:** os testemunhos do trecho de ensaio foram inicialmente pesados e acondicionados em canaletas de PVC na mesma posição em que se encontravam nas caixas de sondagens, desprezando-se os fragmentos de dimensão inferior a 19 mm (3/4"). As canaletas possuíam diâmetro superior ao dos testemunhos, permitindo a sua

completa imersão. O ensaio teve duração máxima de 15 dias, com cinco períodos de imersão de três dias cada, com avaliações quali e quantitativas finais, conforme procedimento interno do LCEC.

5.2.8.2 Alterabilidade natural

Os ensaios de alterabilidade natural foram executados conforme segue:

- a) **em fragmentos de rocha, com faixa granulométrica única:** consistiu em submeter 50 fragmentos, situados na faixa granulométrica de 25 a 19 mm (1" a 3/4"), às condições intempéricas naturais, com avaliações quali e quantitativas periódicas. Assim, cada ciclo de ensaio correspondeu a um dia. O exame quantitativo foi efetuado levando-se em conta perdas de massa do material retido na peneira de malha 19 mm (3/4"). A duração máxima do ensaio foi 365 ciclos (365 dias), tendo sido executado de acordo com o método MCA-14 do LCEC; e
- b) **em fragmentos de rocha, distribuídos em seis faixas granulométricas:** semelhante ao procedimento anterior, porém realizado para as seguintes faixas granulométricas:

FAIXA GRANULOMÉTRICA	QUANTIDADE
(P1) 76 a 50 mm (3" a 2")	2.000 g
(P2) 50 a 25 mm (2" a 1")	1.500 g
(P3) 25 a 12,5 mm (1" a 1/2")	1.000 g
(P4) 12,5 a 9,5 mm (1/2" a 3/8")	500 g
(P5) 9,5 a 4,8 mm (3/8" a # n° 4)	500 g
(P6) 4,8 a 1,2 mm (# n° 4 a # n° 16)	500 g

Nota: P1 a P6 são as denominações das faixas granulométricas

A avaliação qualitativa, mensal, foi feita apenas para os fragmentos com dimensão superior a 9,5 mm (3/8"), enquanto que nos exames quantitativos, também mensais, foram computadas as perdas de massa do material retido em cada peneira. Cada ciclo de ensaio correspondeu a um dia. A duração máxima foi 365 ciclos (365 dias), tendo sido realizado conforme o método MRL-01 do LCEC.

6 ENSAIO DE ALTERABILIDADE NATURAL DE TESTEMUNHOS DE SONDAGENS

Embora parte integrante da caracterização tecnológica do material rochoso da UHE Canoas I e seja classificado como de alterabilidade natural, julgou-se oportuna a descrição deste ensaio com maior grau de detalhe, em virtude de algumas peculiaridades dos procedimentos utilizados.

O ensaio consistiu, basicamente, na exposição contínua de testemunhos de sondagens rotativas às condições intempéricas naturais, observando-se, de forma sistemática, a evolução das modificações ocorridas nos diferentes tipos litológicos.

Para a sua realização, foram selecionados os testemunhos de cinco sondagens, executadas nas áreas das estruturas de concreto e na pedreira da margem direita (Quadro 19).

SONDAGEM nº	LOCALIZAÇÃO	ESTACA	AFASTAMENTO (m)	COTA DE BOCA (m)	PROFUNDIDADE TOTAL (m)
SR-204	Barragem de Gravidade (MD)	11 + 10,00 m	eixo	335,470	62,92
SR-208	Casa de Força (MD)	15 + 10,00 m	50,00 m J	337,090	61,02
SR-402 A	Barragem de Terra (LR)	21 + 3,70 m	eixo	327,650	51,82
SR-602	Barragem de Terra (ME)	27 + 10,00 m	eixo	336,076	38,95
SR-1003	Pedreira (MD)	-31 + 17,50 m	662,88 m J	367,690	52,50

MD - margem direita

ME - margem esquerda

LR - leito do rio

J - jusante

QUADRO 19 - Sondagens rotativas submetidas ao ensaio de alterabilidade natural.

Excetuando-se o horizonte superficial do perfil geológico local, representado pelos aluviões, solos coluviais e de alteração e a rocha alterada, foi submetido ao ensaio o total de 255,25 m de rochas basálticas, extraídas dos derrames F ao B (Tabela 8).

Para possibilitar o adequado acompanhamento do ensaio e a interpretação dos resultados, esse conjunto de amostras foi subdividido em 15 tipos litológicos, denominados TL-01 a TL-15 (Quadro 20), levando em consideração não somente as litologias presentes em cada um dos derrames como também as particularidades macroscopicamente identificáveis em cada litologia, julgadas passíveis de interferir no desempenho do material, quando em uso. Esse critério foi, posteriormente, aplicado na interpretação de todos os demais ensaios.

TABELA 8 - Quantidade (em metros) de amostras de testemunhos de sondagens submetidas ao ensaio de alterabilidade natural.

Derrame Litologia	F	E	D	C	B	Total	
brecha	-	8,96	10,57	-	14,16	33,69	13%
basalto ve- sicular e/ou amigdaloidal	-	1,70	3,30	4,93	0,62	10,55	4%
basalto compacto	69,11	22,75	61,50	50,19	7,46	211,01	83%
Total	69,11	33,41	75,37	55,12	22,24	255,25	
	27%	13%	29%	22%	9%	100%	

A sequência das atividades desenvolvidas para o preparo e acompanhamento do ensaio será apresentada a seguir.

6.1 Documentação fotográfica

Inicialmente, fotografaram-se todos os testemunhos de sondagens escolhidos para o ensaio, ainda acondicionados em suas respectivas caixas, conforme critérios de padronização de registro fotográfico (CESP, 1981).

As fotografias foram ampliadas para as dimensões aproximadas de 14 x 20 cm, reproduzindo-se, tanto quanto possível, as cores originais dos testemunhos, que puderam ser controladas através de um padrão fixado no painel de apoio das caixas de sondagens.

Assim, foi possível registrar, com bom grau de nitidez, todas as informações contidas nas amostras, permitindo o adequado acompanhamento das modificações ocorridas ao longo do ensaio.

6.2 Disposição das amostras no pátio de ensaio

As amostras foram espalhadas num pátio a céu aberto especialmente preparado para o ensaio, localizado no então canteiro de obras da Usina Nova Avanhandava, em Buritama, SP. O pátio, de dimensões de 25 x 9 m, foi dotado de cerca de proteção, drenagem de águas pluviais e regularização da superfície através de uma camada de brita. Além disso, removeram-se todos os obstáculos existentes ao seu redor para impedir a formação de zonas de sombras, permitindo a incidência, tanto dos raios solares quanto das chuvas, de forma direta e uniforme.

DERRAME	DESCRIÇÃO	TIPO LITOLÓGICO	QUANTIDADE (m)
F	Basalto compacto, cinza-claro (núcleo e base)	TL - 01	69,11
E	Brecha aglomerática, cinza-claro (topo)	TL - 02	8,96
	Basalto vesicular e/ou amigdaloidal, cinza-claro (topo)	TL - 03	1,70
	Basalto compacto, cinza-claro, com minerais verdes disseminados (núcleo e base)	TL - 04	22,75
D	Brecha aglomerática ^(*) , cinza-claro (topo)	TL - 05	10,57
	Basalto vesicular e/ou amigdaloidal, cinza-claro (topo)	TL - 06	3,30
	Basalto compacto ^(**) , cinza-claro a cinza-amarelado (núcleo)	TL - 07	9,39
	Basalto compacto, cinza-escuro, com minerais verdes disseminados (núcleo)	TL - 08	47,66
	Basalto compacto, cinza-claro (base)	TL - 09	4,45
C	Basalto vesicular e/ou amigdaloidal, cinza-avermelhado (topo)	TL - 10	4,93
	Basalto compacto, cinza-claro a cinza-amarelado (núcleo)	TL - 11	13,45
	Basalto compacto, cinza-avermelhado (núcleo e base)	TL - 12	36,74
B	Brecha basáltica arenosa/siltosa, cinza-avermelhado (topo)	TL - 13	14,16
	Basalto vesicular e/ou amigdaloidal, cinza-claro (topo)	TL - 14	0,62
	Basalto compacto, cinza-claro (núcleo)	TL - 15	7,46

(*) - com porções descontínuas de brecha basáltica siltosa e, localmente, brecha silicática.

(**) - com vesículas e amígdalas disseminadas

QUADRO 20 - Descrição dos tipos litológicos.

As amostras foram espalhadas na mesma seqüência encontrada nas caixas, formando colunas espaçadas de 30 cm, dispostas aproximadamente na direção N-S, possibilitando a exposição mais adequada aos raios solares.

6.3 Acompanhamento do ensaio

O ensaio de alterabilidade natural, iniciado em fevereiro/83, teve duração de 3.121 dias, ou seja, cerca de oito anos e sete meses. A longa duração deveu-se às particularidades do cronograma do projeto do

Complexo Canoas e à disponibilidade de equipe técnica para a manutenção do pátio e para o acompanhamento do ensaio.

Durante esse período, realizaram-se 12 inspeções, com periodicidade variável. Os procedimentos adotados para o acompanhamento do ensaio consistiram em:

- a) anotação diária das temperaturas máxima e mínima e da precipitação pluviométrica; e
- b) registro fotográfico periódico, acompanhado de avaliação qualitativa, que consistiu na verificação visual das transformações ocorridas em cada tipo litológico em relação às condições iniciais do ensaio, a partir da comparação com as fotografias dos testemunhos de sondagens.

As amostras foram observadas quanto à mudança ou esmaecimento da cor, desgaste superficial, surgimento e desenvolvimento de trincas e perdas de material.

A terminologia utilizada para a descrição das modificações ocorridas em cada tipo litológico baseou-se em critérios adotados pelo Laboratório Central de Engenharia Civil (LCEC) da Cesp, que foram, porém, aprimorados no decorrer do ensaio, para atender o nível de detalhe descritivo adotado nas avaliações qualitativas. Os fenômenos observados foram classificados, em ordem crescente de intensidade, nas seguintes categorias e subníveis:

- a) **sem ataque (SA):** é a não-constatação de qualquer mudança macroscopicamente visível na amostra, em relação ao seu aspecto no início do ensaio;
- b) **rachadura (R):** efeito que se manifesta através do aparecimento de fissuras, sem que ocorra a divisão da amostra em partes menores;
 - *pouco intenso*: apenas a constatação do fenômeno, através do surgimento de algumas fissuras descontínuas, caoticamente distribuídas, com extensão inferior ao raio do testemunho;
 - *medianamente intenso*: discreto aumento na quantidade de fissuras que, por vezes, se interceptam e/ou se subdividem; distribuição caótica e extensão menor ou igual ao raio do testemunho;
 - *muito intenso*: fissuras em grande quantidade, que se interceptam, formando polígonos irregulares, conferindo aspecto dendrítico à amostra, porém preservando a coesão entre as partes compartimentadas; várias fissuras com extensão igual ou superior ao raio do testemunho;
- c) **fendilhamento (Fe):** é a abertura de descontinuidades preexistentes ou surgidas durante o ensaio, sem que ocorra a divisão da amostra em partes menores; do ponto de vista descritivo,

os subníveis *pouco/medianamente/muito intenso* são idênticos àqueles do fenômeno anterior, embora seja nítido o alargamento das paredes das descontinuidades;

d) **lasqueamento (L):** é a separação de partes da amostra, macroscopicamente identificáveis com facilidade, nas quais uma dimensão predomina; as dimensões das lascas não implicam redução significativa da granulometria inicial da amostra;

- *pouco intenso*: apenas a constatação do fenômeno; aparecimento de peças finas e alongadas, de extensão centimétrica, por vezes com paredes conchoidais, formadas devido à abertura de descontinuidades preexistentes ou daquelas surgidas durante o ensaio;

- *medianamente intenso*: discreto aumento na quantidade de lascas, em geral com aspecto de cunhas e em sua maioria formadas durante o ensaio;

- *muito intenso*: aumento da quantidade de lascas, devido à incidência do fenômeno em novas descontinuidades como também naquelas anteriormente formadas;

e) **fragmentação (Fr):** é a separação de partes macroscopicamente identificáveis com facilidade, com redução da granulometria inicial da amostra e sensível perda de coesão;

- *pouco intenso*: apenas a constatação do fenômeno; fragmentos soltos porém imbricados, com diâmetro de até 5 cm, intensamente rachados;

- *medianamente intenso*: discreto aumento da superfície afetada pelo fenômeno; os fragmentos se destacam da amostra, expondo novas superfícies ao processo de alteração; as partes destacadas começam a perder coesão, reduzindo a granulometria;

- *muito intenso*: sensível aumento da superfície afetada pelo fenômeno; os fragmentos se destacam da amostra que, por sua vez, começa a perder a forma cilíndrica;

f) **desintegração (D):** é a separação, em partes extremamente pequenas, dos fragmentos originais da amostra, considerados individualmente como um todo, com a conseqüente produção de finos; é a cominuição da amostra;

- *pouco intenso*: o testemunho perde parcialmente a forma cilíndrica; fragmentos, praticamente incoesos, se acumulam ao redor da amostra remanescente;

- *medianamente intenso*: o testemunho perde totalmente a forma cilíndrica; fragmentos incoesos se acumulam ao redor da amostra remanescente;

- *muito intenso*: os fragmentos se convertem em diminutas partículas, que são transportadas pelo vento e pela água das chuvas; a amostra, nesse trecho, desaparece por completo.

A Figura 19 procura reproduzir, de forma esquemática, o aspecto visual das amostras de testemunhos de sondagens atingidas pelos fenômenos anteriormente descritos.

As informações coletadas nas avaliações periódicas foram lançadas em perfis individuais de acompanhamento, no que diz respeito a tipo e intensidade dos fenômenos incidentes por trechos de testemunhos de sondagens identificados pelos seus respectivos tipos litológicos (TL-01 ao TL-15). As Figuras 20 e 21 ilustram o registro das observações de algumas das avaliações periódicas, através da reprodução parcial dos perfis de acompanhamento das sondagens SR-1003 e SR-402A, respectivamente.

Assim, aliado ao registro fotográfico periódico, tais perfis permitiram documentar satisfatoriamente a evolução dos processos de alteração no decorrer do ensaio.

Os dados coligidos foram transformados em resultados semiquantitativos, que indicam, para cada tipo litológico, as porcentagens de amostras que desenvolveram determinado fenômeno em relação à quantidade total de amostras daquele tipo litológico presente no ensaio (Anexo A). Ressalta-se que o caráter semiquantitativo desses resultados deve-se ao fato de serem expressões numéricas das avaliações qualitativas, portanto subjetivas, não calcados em parâmetros mensuráveis através de ensaios físicos ou mecânicos.

Deve ser ainda levado em consideração que o registro detalhado das avaliações periódicas nos perfis individuais de acompanhamento possibilitou a posterior discriminação dos resultados semiquantitativos de acordo com as categorias das amostras, ou seja, se interceptadas ou não pela feição *anomalia*, uma vez que esta somente foi reconhecida no período cronologicamente coincidente com o final do ensaio de alterabilidade natural.

7 CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DOS TIPOS LITOLÓGICOS

Análises petrográficas pormenorizadas (IPT, 1983), realizadas em cinco amostras obtidas a partir de testemunhos de sondagens, possibilitaram a obtenção de informações a respeito das características petrográficas de algumas das litologias, posteriormente associadas aos tipos litológicos dos derrames F (TL-01), E (TL-04) e D (TL-07 e TL-08) (Anexo B).

Petrograficamente, tais tipos litológicos classificam-se como basalto e são compostos por cristais ripiformes de plagioclásio (labradorita e, secundariamente, andesina), entre os quais ocorrem cristais prismáticos de piroxênio (augita) e, por vezes, minerais opacos, configurando arranjo textural intergranular. Concentrações intersticiais de vidro parcialmente devitrificado e argilominerais dão à rocha, localmente, aspectos de textura intersertal.

FENÔMENO \ INTENSIDADE			
	Pouco intenso	Medianamente intenso	Muito intenso
RACHADURA			
FENDILHAMENTO			
LASQUEAMENTO			
FRAGMENTAÇÃO			
DESINTEGRAÇÃO			

LEGENDA

	— traço de fissura ou trinca principal (fechada)
	- - - traço de fissura ou trinca secundária (fechada)
	- - - - traço de fissura ou trinca principal (aberta)
	- - - - traço de fissura ou trinca secundária (aberta)
	- traço de descontinuidade preexistente, que delimita uma lasca
	- traço de uma fissura ou trinca aberta, que delimita uma lasca, com rachaduras internas
	- fragmento separado da amostra, intensamente rachado e fendilhado, com baixa coesão
	- partículas incoesas
	- contorno original do testemunho de sondagem

FIGURA 19 - Representação esquemática dos fenômenos observados no ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.

FIGURA 20 - Perfil parcial de acompanhamento da sondagem SR-1003 no ensaio de alterabilidade natural. Registro das avaliações no 140° (14/07/83), 1443° (25/02/87) e 3121° ciclos (22/10/91 - final do ensaio).

FIGURA 21 - Perfil parcial de acompanhamento da sondagem SR-402A no ensaio de alterabilidade natural. Registro das avaliações no 140° (14/07/83), 1206° (30/06/86) e 3121° ciclos (22/10/91 - final do ensaio).

A alteração hidrotermal e/ou deutérica varia de média a fraca, enquanto que a alteração intempérica é sugerida pela presença de hidróxidos de ferro. O plagioclásio encontra-se fracamente alterado, por vezes com microfissuras intragranulares soldadas por filossilicato verde e/ou hidróxido de ferro.

Amígdalas (sub)milimétricas perfazem até 15% do volume da rocha, estando preenchidas por argilominerais verde e/ou castanho, ora acompanhados por quartzo e/ou sílica microcristalina, ora por calcedônia e carbonato.

É relativamente comum a presença de filossilicatos, provavelmente originados da devitrificação do vidro intersticial, ocupando espaços intra e intergranulares.

Argilominerais, principalmente do grupo da esmectita e, subordinadamente, dos grupos da illita, caulinita e illita-esmectita, ocorrem associados à mesóstase vítreo-argilosa ou então preenchendo microfissuras.

Em rigor, as análises petrográficas não sugeriram diferenças significativas que pudessem justificar comportamentos distintos desses tipos litológicos, ao contrário do apontado pelos resultados dos demais ensaios tecnológicos, conforme será apresentado em item subsequente do texto. Entretanto, a aparente(?) discordância pode estar associada à reduzida quantidade de análises petrográficas efetuadas, com reflexos diretos na representatividade dos seus resultados. Para superar tal inconveniente, FRAZÃO *et al.* (1993) propõem, nesses casos, a execução dessas análises a partir de uma quantidade de seções delgadas definidas com base estatística, mitigando-se, assim, o efeito da reconhecida variabilidade composicional dos litotipos basálticos. Além disso, a investigação do estado microfissural e a determinação do tipo e teor de argilominerais presentes na rocha, bem como a sua distribuição espacial, por certo forneceriam importantes subsídios para a adequada discriminação dos tipos litológicos.

8 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

8.1 Tratamento dos dados

A facilidade de apoio técnico proporcionado pelo Laboratório Central de Engenharia Civil (LCEC) da Cesp possibilitou a execução de razoável quantidade de ensaios nas diversas etapas do projeto, com a conseqüente geração de vasta e diversificada gama de dados.

Inicialmente, todos os resultados de ensaios foram associados aos seus respectivos tipos litológicos (Quadro 20), para facilitar a adequada compilação dos dados. Para tal, utilizaram-se tanto as seções geológico-geotécnicas, devidamente atualizadas após a escavação para a instalação das estruturas de concreto, como também os mapeamentos das próprias superfícies de escavação. Também, quando possível, foram usadas fotografias dos testemunhos de sondagens para dirimir dúvidas quanto à identificação das amostras submetidas a ensaios.

Alguns dados foram suprimidos da compilação em virtude de terem sido obtidos a partir de amostras constituídas de litotipos similares, porém de derrames distintos, devido à insuficiência de material. Assim, os dados dos ensaios analisados ficaram restritos àqueles executados em amostras compostas por um único tipo litológico.

Posteriormente, todos os resultados de ensaios foram classificados segundo a relação estratigráfica das respectivas amostras com a feição *anomalia*, permitindo averiguar o nível de interferência desta nas características tecnológicas dos litotipos basálticos.

Por fim, todos os dados foram interpretados estatisticamente, no que se refere a valores médios, medidas de dispersão, bem como através de expressões matemáticas e diagramas de regressão, de maneira a se caracterizar o grau de influência da alteração e da alterabilidade sobre as propriedades físicas e mecânicas das diversas litologias estudadas.

8.2 Ensaios físicos e mecânicos

De acordo com a posição estratigráfica das respectivas amostras, os resultados dos ensaios (Anexo C) foram agrupados nas seguintes categorias:

- a) aqueles realizados em amostras não interceptadas pela feição *anomalia*;
- b) aqueles realizados em amostras interceptadas pela feição *anomalia* ; e
- c) aqueles realizados em amostras remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.

A Tabela 9 resume as quantidades de ensaios realizados em cada uma das categorias. Apesar do total de ensaios executados, sua natureza e quantidade, para cada tipo litológico, não obedeceram a um único critério, tendo, por vezes, privilegiado a disponibilidade de amostras resultantes de outros ensaios ou então as litologias posicionadas acima da linha de escavação, por serem estas o alvo preferencial da escolha para utilização como material de construção.

Esse conjunto de dados permitiu a obtenção de curvas de regressão (Anexo D) compatíveis com as populações de amostras consideradas; representam, aproximadamente, relações entre os valores das diversas propriedades, sugerindo, por sua vez, ***leis sistemáticas de comportamento***.

Para facilidade de interpretação, tais curvas foram reunidas conforme os tipos de regressão (linear ou não-linear) e de acordo com os tipos de função que estas representam (crescente ou decrescente), levando-se em conta as devidas categorias de amostras (Tabela 10).

TABELA 9 - Quantidade de ensaios e determinações por categoria de amostras.

Categoria das amostras \ Ensaios e determinações	ρ			η	ω	LA	V_p	σ_c	E	σ_t	TOTAL
	ρ_n	ρ_d	ρ'_d								
não interceptadas pela feição <i>anomia</i> (dados da Tabela 11)	23	6	6	6	23	5	6	15	9	-	99
interceptadas pela feição <i>anomia</i> (dados da Tabela 12)	17	2	2	2	17	2	2	2	-	-	46
remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens (dados da Tabela 13)	31	31	31	31	31	-	31	-	-	31	217
TOTAL	71	39	39	39	71	7	39	17	9	31	362

Simbologia

(válida para as Tabelas 10 a 12; 14; Figura 22 e Anexo C)

 ρ - massa específica (kg/m³) ρ_n - natural ρ_d - seca ρ'_d - aparente seca η - porosidade aparente (%) ω - absorção d'água (%) σ_c - resistência à compressão uniaxial (MPa)

E - módulo de elasticidade estático (GPa)

 σ_t - resistência à tração por compressão diametral (MPa)

LA - perdas no ensaio de abrasão "Los Angeles" (%)

 V_p - velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (m/s)

EG - comportamento no ensaio por imersão em etileno-glicol (afetado/parcialmente afetado/não afetado)

rach. - rachadura

lasq. - lasqueamento

AE - perdas no ensaio água-estufa (%)

TABELA 10 - Tipos de curvas de regressão possíveis por categoria de amostras.

Categoria das amostras \ Função	Regressão		não-linear					
	linear		exponencial		logarítmica		potencial	
	crescente	decrecente	crescente	decrecente	crescente	decrecente	crescente	decrecente
não interceptadas pela feição <i>anomia</i> (dados da Tabela 1 do Anexo C)	-	$\rho_n \times \eta$ $\sigma_c \times LA$ $E \times LA$	$LA \times \omega$ $AE \times \omega$ $\sigma_c \times \rho_n$ $E \times \sigma_c$	$V_p \times \omega$ $V_p \times \eta$ $LA \times \rho_n$ $AE \times \rho_n$	-	$\rho_n \times \omega$ $\sigma_c \times \omega$	$\omega \times \eta$ $V_p \times \rho_n$	-
interceptadas pela feição <i>anomia</i> (dados da Tabela 2 do Anexo C)	-	-	-	-	-	$\rho_n \times \omega$	-	-
remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens (dados da Tabela 3 do Anexo C)	-	$\rho_n \times \eta$	$V_p \times \rho_n$ $\sigma_t \times \rho_n$	$\rho_n \times \omega$ $\sigma_t \times \omega$	-	$V_p \times \omega$ $V_p \times \eta$ $\sigma_t \times \eta$	$\omega \times \eta$	-
	-	Figura 1 (Anexo D)	Figura 2 (Anexo D)	Figura 3 (Anexo D)	-	Figura 4 (Anexo D)	Figura 5 (Anexo D)	-

Nota: Para simbologia, ver Tabela 9.

O significado físico dessas expressões matemáticas pode ser assim entendido:

a) *regressões lineares*: a relação entre os valores das propriedades analisadas se mantém constante, ou seja, a curva de regressão, nesse caso representada por uma reta, não apresenta variação no seu coeficiente angular.

b) *regressões não-lineares*: variações de mesma magnitude nos valores de uma das propriedades implicam, por sua vez, variações de diferentes magnitudes nos valores da outra propriedade.

Nesse caso, as expressões obtidas podem ser, entre outras, dos seguintes tipos:

- regressão exponencial

$$y = a \cdot e^{bx} \quad (a > 0; b \neq 0) \quad (14);$$

- regressão logarítmica

$$y = a + \ln x \quad (b \neq 0; x > 0) \quad (15); e$$

- regressão potencial

$$y = a \cdot x^b \quad (a > 0; b \neq 0) \quad (16),$$

sendo x e y as variáveis aleatórias e a e b os coeficientes de regressão;

c) *funções crescentes*: o(a) aumento(redução) no valor de uma propriedade implica o(a) aumento(redução) do valor da outra propriedade; e

d) *funções decrescentes*: o(a) aumento(redução) no valor de uma propriedade implica a(o) redução(aumento) do valor da outra propriedade.

Verifica-se que, embora muitas das curvas de regressão (Anexo D) tenham apresentado baixos coeficientes de correlação, a sua forma não contradiz os dados experimentais, sugerindo que as tendências de comportamento tenham sido mantidas. Em linhas gerais, baixos coeficientes de correlação podem ser indicativos, entre outros, de:

- a) pequena relação de dependência entre as propriedades consideradas;
- b) dimensão inadequada da população de amostras;
- c) heterogeneidade dos materiais rochosos (YOSHIDA, *op. cit.*; FOOKES *et al.*, 1988);
- d) variações nos procedimentos de ensaios e/ou falta de uniformidade na preparação dos corpos-de-prova (YOSHIDA, *op. cit.*).

A Figura 22 exhibe, esquematicamente, os diversos tipos de correlações obtidas, propiciando a visualização geral das *leis de comportamento das propriedades físicas e mecânicas analisadas*. Verifica-se que os tipos litológicos mais densos se apresentam menos porosos, com menor absorção d'água e com maiores valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, de resistências à compressão uniaxial e à tração e de módulo de elasticidade estático, bem como menores perdas por abrasão *Los Angeles* e no ensaio de alterabilidade água-estufa. Analogamente, nos tipos litológicos menos densos, estas relações se invertem por completo. Por outro lado, constata-se que, nos tipos litológicos mais densos, o ligeiro aumento da absorção d'água provoca significativa redução na resistência mecânica (σ_c e σ_t) e na velocidade de propagação de ondas (V_p). O mesmo não ocorre com aqueles menos densos, nos quais sensíveis variações da absorção d'água são acompanhadas por ligeira diminuição da resistência mecânica. Tal comportamento sugere que, nos tipos litológicos mais densos, pequenas variações físicas implicam significativa redução das propriedades mecânicas, com representação matemática na forma de regressões não-lineares.

As Tabelas 11 e 12 fornecem resultados estatísticos, quanto a média, desvio padrão e coeficiente de dispersão, para os diversos ensaios físicos e mecânicos realizados, agrupados por tipo litológico e categoria de amostra. A análise conjunta destas tabelas e das curvas de regressão dá suporte às seguintes considerações:

- a) a densidade de dados de ensaios, para os vários tipos litológicos, mostra-se heterogênea e irregular, a julgar pelas diversas lacunas existentes nestas tabelas; e
- b) a quantidade (N) de resultados, para cada tipo de ensaio e/ou determinação, parece ter sido insuficiente para a adequada definição dos intervalos de variação das propriedades físicas e mecânicas, o que se refletiu, sobretudo, nos elevados coeficientes de dispersão e baixos coeficientes de correlação. Dessa maneira, os parâmetros estatísticos apresentados podem não ser apropriadamente representativos das suas respectivas populações. Para superar esse obstáculo, poderia ter-se lançado mão, em fases anteriores do projeto, do dimensionamento do número de ensaios a partir de procedimentos estatísticos que, por certo, possibilitaria a obtenção de estimativas com níveis de precisão pré-fixados.

A Tabela 13 relaciona os tipos litológicos em ordem decrescente de qualidade tecnológica, de acordo com as categorias de amostras e das litologias geralmente presentes nos derrames basálticos. Analisando-se apenas os tipos litológicos representativos de basalto compacto não-interceptados pela feição *anomalia* e situados acima da linha de escavação, passíveis, portanto, de ser utilizados como material de construção, é possível fazer as seguintes distinções, no que se refere a valores médios (Tabela 11):

Nota : Para simbologia, ver Tabela 12.

FIGURA 22 - Representação esquemática das correlações obtidas entre as propriedades físicas e mecânicas.

TABELA 11 - Resultados dos ensaios de caracterização tecnológica dos tipos litológicos (incluindo a feição *anormalia*).

DERRAME	DESCRIÇÃO	TIPO LITOLÓGICO		ρ (kg/m ³)			η (%)	ω (%)	LA (%)
				ρ_n	ρ_d	ρ'_d			
F	Basalto Compacto cinza claro (núcleo e base)	TL-01	(A)	2857 ± 77 (2,7%) N=5	-	-	-	1,5 ± 1,6 (106,7%) N=5	15 ± 0,0 (0,0%) N=2
			(B)	-	-	-	-	-	-
E	Basalto Vesicular e/ou Amigdaloidal cinza claro (topo)	TL-03	(A)	2593 ± 18 (0,7%) N=2	-	-	-	3,6 ± 0,1 (2,8%) N=2	-
			(B)	-	-	-	-	-	-
	Basalto Compacto cinza claro com minerais verdes disseminados (núcleo e base)	TL-04	(A)	2670 ± 42 (1,6%) N=5	-	-	-	3,0 ± 0,5 (16,7%) N=5	20,5 ± 0,7 (3,4%) N=2
			(B)	2505 ± 158 (6,3%) N=7	-	-	-	6,2 ± 2,5 (40,3%) N=7	18,5 ± 3,5 (18,9%) N=2
D	Brecha Aglomerática cinza clara (topo)	TL-05	(A)	2438 ± 116 (4,8%) N=2	-	-	-	6,5 ± 2,9 (44,6%) N=2	-
			(B)	2427 ± 109 (4,5%) N=6	-	-	-	7,4 ± 2,6 (35,1%) N=6	-
	Basalto Compacto cinza claro a cinza amarelado (núcleo)	TL-07	(A)	2522 ± 64 (2,5%) N=2	-	-	-	6,0 ± 2,3 (38,3%) N=2	-
			(B)	2386 ± 16 (0,7%) N=2	-	-	-	10,4 ± 0,8 (7,7%) N=2	-
	Basalto Compacto cinza escuro com minerais verdes disseminados (núcleo)	TL-08	(A)	2630 ± 61 (2,3%) N=7	2491 ± 83 (3,3%) N=6	2477 ± 114 (4,6%) N=6	15,9 ± 4,2 (26,4%) N=6	6,0 ± 2,3 (38,3%) N=7	20 N=1
			(B)	2524 ± 49 (1,9%) N=2	2447 ± 11 (0,4%) N=2	2423 ± 33 (1,4%) N=2	15,6 ± 2,6 (16,7%) N=2	6,5 ± 1,2 (18,5%) N=2	-

Notas: Para legenda, ver página 91
Para simbologia, ver Tabela 9.

(continua)

(continuação)

TABELA 11 - Resultados dos ensaios de caracterização tecnológica dos tipos litológicos (incluindo a feição *anomalia*).

DERRAME	DESCRIÇÃO	TIPO LITOLÓGICO		V _p (m/s)	EG	AE (%)	σ _c (MPa)	E (GPa)
F	Basalto Compacto cinza claro (núcleo e base)	TL-01	(A)	-	parcialmente afetado N=1 não afetado N=3	1,0 ± 0,1 (10,0%) N=2	108,0 ± 13,7 (12,7%) N=2	82,7 ± 0,8 (1,0%) N=2
			(B)	-	-	-	-	-
E	Basalto Vesicular e/ou Amigdaloidal cinza claro (topo)	TL-03	(A)	-	parcialmente afetado N=1	-	53 N=1	24,9 N=1
			(B)	-	-	-	-	-
	Basalto Compacto cinza claro com minerais verdes disseminados (núcleo e base)	TL-04	(A)	-	afetado (N=2) parcialmente afetado (N=1) não afetado (N=1)	47,5 ± 64,9 (136,6%) N=2	60,8 ± 6,6 (10,9%) N=2	33,5 ± 6,2 (18,5%) N=2
			(B)	-	afetado (N=5) parcialmente afetado (N=2)	64,2 ± 23,4 (36,4%) N=5	-	-
D	Brecha Aglomerática cinza clara (topo)	TL-05	(A)	-	afetado (N=1) não afetado (N=1)	54,3 N=1	-	-
			(B)	-	afetado (N=6)	95,4 N=1	-	-
	Basalto Compacto cinza claro a cinza amarelado (núcleo)	TL-07	(A)	-	afetado (N=1)	-	21,4 ± 6,5 (30,4%) N=2	96,5 ± 4,9 (5,1%) N=2
			(B)	-	afetado (N=2)	-	-	-
	Basalto Compacto cinza escuro com minerais verdes disseminados (núcleo)	TL-08	(A)	3273 ± 459 (14,0%) N=6	-	-	43,7 ± 17,8 (40,7%) N=8	21,8 ± 4,0 (18,3%) N=2
			(B)	3403 ± 189 (5,6%) N=2	-	-	48,6 ± 6,4 (13,2%) N=2	-

Notas: Para legenda, ver página 91.

Para simbologia, ver Tabela 9.

TABELA 12 - Resultados dos ensaios de caracterização tecnológica das amostras remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.

DERRAME	DESCRIÇÃO	TIPO LITOLÓGICO		ρ (kg/m ³)			η (%)	ω (%)	V_p (m/s)	σ_t (MPa)	ETILENO-GLICOL PERDAS (%)
				ρ_n	ρ_d	$\rho'd$					
F	Basalto Compacto cinza claro (núcleo e base)	TL-01	(A)	2929 $\pm$ 43 (1,5%) N = 5	2910 $\pm$ 60 (2,1%) N = 5	2891 $\pm$ 80 (2,8%) N = 5	2,4 $\pm$ 2,6 (108,3%) N = 5	0,9 $\pm$ 1,0 (111,1%) N = 5	4952 $\pm$ 750 (15,1%) N = 5	14,8 $\pm$ 4,0 (27,0%) N = 5	0 N = 5
E	Brecha Aglomerática cinza clara (topo)	TL-02	(A)	2566 $\pm$ 138 (5,4%) N = 2	2516 $\pm$ 133 (5,3%) N = 2	2513 $\pm$ 139 (5,5%) N = 2	13,1 $\pm$ 1,3 (9,9%) N = 2	5,2 $\pm$ 0,8 (15,4%) N = 2	3565 $\pm$ 247 (6,9%) N = 2	4,5 $\pm$ 0,7 (15,6%) N = 2	0 N = 2
	Basalto Compacto cinza claro com minerais verdes disseminados (núcleo e base)	TL-04	(A)	2528 $\pm$ 140 (5,5%) N = 5	2468 $\pm$ 135 (5,5%) N = 5	2494 $\pm$ 97 (3,9%) N = 5	13,7 $\pm$ 1,4 (10,2%) N = 5	5,5 $\pm$ 0,7 (12,7%) N = 5	3488 $\pm$ 210 (6,0%) N = 5	4,4 $\pm$ 1,1 (25,0%) N = 5	0 N = 5
D	Brecha Aglomerática cinza clara (topo)	TL-05	(A)	2209 N = 1	2105 N = 1	2057 N = 1	24,1 N = 1	11,7 N = 1	2760 N = 1	3,0 N = 1	0 N = 1
	Basalto Vesicular e/ou Amigdaloidal cinza claro (topo)	TL-06	(A)	2552 N = 1	2510 N = 1	2498 N = 1	9,6 N = 1	3,9 N = 1	3910 N = 1	6,0 N = 1	0 N = 1
	Basalto Compacto cinza escuro com minerais verdes disseminados (núcleo)	TL-08	(A)	2504 $\pm$ 0 (0,0%) N = 3	2412 $\pm$ 19 (0,8%) N = 3	2415 $\pm$ 35 (1,4%) N = 3	17,9 $\pm$ 1,8 (10,1%) N = 3	7,4 $\pm$ 0,9 (12,2%) N = 3	3077 $\pm$ 64 (2,1%) N = 3	2,7 $\pm$ 0,6 (22,2%) N = 3	2,0 $\pm$ 1,7 (85,0%) N = 3
	Basalto Compacto cinza claro (base)	TL-09	(A)	2439 $\pm$ 47 (1,9%) N = 2	2365 $\pm$ 10 (0,4%) N = 2	2403 $\pm$ 61 (2,5%) N = 2	16,5 $\pm$ 2,2 (13,3%) N = 2	6,9 $\pm$ 1,1 (15,9%) N = 2	3350 $\pm$ 552 (16,5%) N = 2	4,5 $\pm$ 2,1 (46,7%) N = 2	0 N = 2
C	Basalto Vesicular e/ou Amigdaloidal cinza avermelhado (topo)	TL-10	(A)	2704 $\pm$ 51 (1,9%) N = 3	2676 $\pm$ 59 (2,2%) N = 3	2681 $\pm$ 66 (2,5%) N = 3	7,7 $\pm$ 0,8 (10,4%) N = 3	2,9 $\pm$ 0,4 (13,8%) N = 3	3730 $\pm$ 95 (2,5%) N = 3	6,0 $\pm$ 1,0 (16,7%) N = 3	0 N = 3
	Basalto Compacto cinza claro a cinza amarelado (núcleo)	TL-11	(A)	2748 N = 1	2704 N = 1	2706 N = 1	5,6 N = 1	2,1 N = 1	4180 N = 1	6,0 N = 1	0 N = 1
			(B)	2752 N = 1	2694 N = 1	2676 N = 1	5,6 N = 1	2,3 N = 1	3780 N = 1	8,0 N = 1	5,0 N = 1
	Basalto Compacto cinza avermelhado (núcleo e base)	TL-12	(A)	2829 $\pm$ 127 (4,5%) N = 7	2793 $\pm$ 145 (5,2%) N = 7	2770 $\pm$ 148 (5,3%) N = 7	5,8 $\pm$ 4,0 (69,0%) N = 7	2,2 $\pm$ 1,6 (72,7%) N = 7	4339 $\pm$ 574 (13,2%) N = 7	9,4 $\pm$ 3,1 (33,0%) N = 7	3,6 $\pm$ 8,2 (227,8%) N = 7
B	Basalto Compacto cinza claro (núcleo)	TL-15	(A)	2797 N = 1	2739 N = 1	2727 N = 1	8,6 N = 1	3,2 N = 1	4140 N = 1	6,0 N = 1	0 N = 1

Notas : - Para legenda, ver página 91.
- Para simbologia, ver Tabela 9.

Legenda das Tabelas 11 e 12

(A) - amostras não interceptadas pela feição *anomalia*

(B) - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

2857 $\pm$ 77 (2,7%)
N = 5

2857 - média ($\bar{x}$)
77 - desvio padrão (σ)
2,7% - coeficiente de dispersão (CD)
N - número de ensaios/determinações

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (17)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (\text{para } N < 30) \quad (18)$$

$$CD = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (19)$$

TABELA 13 - Classificação dos tipos litológicos por ordem decrescente de qualidade tecnológica.

Litologia Categoria das amostras	Brecha Basáltica	Basalto Vesicular e/ou Amigdaloidal	Basalto Compacto
não interceptadas pela feição <i>anomalia</i> (dados da Tabela 11)	—	—	TL-01 → TL-04 → TL - 08 → TL - 07
interceptadas pela feição <i>anomalia</i> (dados da Tabela 11)	—	—	TL-04 → TL-08 → TL-07
remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens (dados da Tabela 12)	TL - 13 → TL - 02 → TL - 05	TL - 10 → TL - 06	TL-01 → TL-12/TL-11 → TL-04 → TL-09 → TL-08

Nota: Para descrição dos tipos litológicos, ver Quadro 20.

a) o material do derrame F (TL-01) se destaca pelas suas elevadas características tecnológicas, com alta massa específica natural ($2.857 \pm 77 \text{ kg/m}^3$), baixa absorção d'água ($1,5 \pm 1,6\%$), alta resistência à compressão uniaxial ($108,0 \pm 13,7 \text{ MPa}$), alto módulo de elasticidade estático ($82,7 \pm 0,8 \text{ GPa}$), baixas perdas tanto no ensaio de abrasão *Los Angeles* (15%) como no ensaio de alterabilidade água-estufa ($1,0 \pm 0,1\%$);

b) o material do derrame E (TL-04) apresenta características comparativamente inferiores, com massa específica natural de $2.670 \pm 42 \text{ kg/m}^3$, absorção d'água de $3,0 \pm 0,5\%$, resistência à compressão uniaxial de $60,8 \pm 6,6 \text{ MPa}$, módulo de elasticidade estático de $33,5 \pm 6,2 \text{ GPa}$, perdas por abrasão *Los Angeles* de $20,5 \pm 0,7\%$ e de $47,5 \pm 64,9\%$ no ensaio água-estufa;

c) os materiais do derrame D (TL-08 e TL-07) apresentam, em relação aos anteriores, as mais baixas características tecnológicas, sendo as do TL-07 ainda mais inferiores àquelas do TL-08, conforme segue:

ca) TL-08: massa específica natural de $2.630 \pm 61 \text{ kg/m}^3$, porosidade aparente de $15,9 \pm 4,2\%$, absorção d'água de $6,0 \pm 2,3\%$, velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas de $3.273 \pm 459 \text{ m/s}$, resistência à compressão uniaxial de $43,7 \pm 17,8 \text{ MPa}$, módulo de elasticidade estático de $21,8 \pm 4,0 \text{ GPa}$ e perdas por abrasão *Los Angeles* de 20%;

cb) TL-07: massa específica natural de $2.522 \pm 64 \text{ kg/m}^3$, absorção d'água de $6,0 \pm 2,3\%$ e resistência à compressão uniaxial de $21,4 \pm 6,5 \text{ MPa}$.

Os resultados dos ensaios executados com amostras provenientes do interior da feição *anomalia* (Tabela 2 do Anexo C e Tabela 11) mostram, em geral, valores inferiores aos obtidos com amostras do mesmo tipo litológico, porém não atingidas por aquela feição (Tabela 1 do Anexo C e Tabela 11), refletindo sua influência na redução das propriedades tecnológicas dos litotipos basálticos por ela interceptados. É plausível admitir que o reconhecido aumento do fraturamento e da permeabilidade nessas porções do maciço rochoso, provocado pelos esforços tectônicos geradores desta feição, tenham aumentado a superfície interna específica e, conseqüentemente, os caminhos de percolação, favorecendo reações químicas diversas, provocando o aumento da porosidade, da absorção d'água e das perdas de massa nos ensaios de alterabilidade. A Tabela 14 sugere esse padrão de comportamento, ao confrontar os valores médios de certas propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos litológicos, separados por categorias de amostras.

8.3 Ensaios de alterabilidade

8.3.1 Imersão em etileno-glicol

Foram executados 141 ensaios (Tabela 15), sendo 71 deles (~50%) apenas com avaliação qualitativa, concernentes a tipos de ataques mais freqüentes, e os 70 restantes (~50%) acrescidos do exame quantitativo, relativo às perdas percentuais de massa e de partículas afetadas ao final de 15 dias.

Em síntese, o comportamento dos diversos tipos litológicos pode ser assim discriminado:

a) derrame F:

TL-01 - na avaliação qualitativa mostrou-se não afetado ou pouco afetado, com desenvolvimento eventual de rachaduras e lasqueamento, mantendo, porém, a resistência mecânica. O exame quantitativo apresentou comportamento semelhante, sendo que, em 44 ensaios, os valores médios de perda de massa foram de $6 \pm 12\%$ (de 0 a 62%) e de partículas afetadas de $36 \pm 31\%$ (de 0 a 100%);

b) derrame E:

TL-02 - pouco afetado, com desenvolvimento eventual de rachaduras, fendilhamento e lasqueamento, exceto em trecho (~10 cm) localizado, em que ocorreu expansão da amostra;

TL-03 - parcialmente afetado, com trecho (~10 cm) localizado, no qual houve expansão da amostra;

TABELA 14 - Variação de algumas das propriedades físicas e mecânicas por categoria de amostras.

Ensaio e determinações	Denominação Tipo Litológico	F	E	D		
		TL - 01	TL - 04	TL - 05	TL - 07	TL - 08
ρ_n (kg/m ³)	(A)	2857 ± 77	2670 ± 42	2438 ± 116	2522 ± 64	2630 ± 61
	(B)	—	2505 ± 158	2427 ± 109	2386 ± 16	2524 ± 49
	(C)	2929 ± 43	2528 ± 140	2209	—	2504
η (%)	(A)	—	—	—	—	15,9 ± 4,2
	(B)	—	—	—	—	15,6 ± 2,6
	(C)	2,4 ± 2,6	13,7 ± 1,4	24,1	—	17,9 ± 1,8
ω (%)	(A)	1,5 ± 1,6	3,0 ± 0,5	6,5 ± 2,9	6,0 ± 2,3	6,0 ± 2,3
	(B)	—	6,2 ± 2,5	7,4 ± 2,6	10,4 ± 0,8	6,5 ± 1,2
	(C)	0,9 ± 1,0	5,5 ± 0,7	11,7	—	7,4 ± 0,9
V_p (m/s)	(A)	—	—	—	—	3273 ± 459
	(B)	—	—	—	—	3403 ± 189
	(C)	4952 ± 750	3488 ± 210	2760	—	3077 ± 64
σ_c (MPa)	(A)	108,0 ± 13,7	60,8 ± 6,6	—	21,4 ± 6,5	43,7 ± 17,8
	(B)	—	—	—	—	48,6 ± 6,4
	(C)	—	—	—	—	—
AE (%)	(A)	1,0 ± 0,1	47,5 ± 64,9	54,3	—	—
	(B)	—	64,2 ± 23,4	95,4	—	—
	(C)	—	—	—	—	—

(A) - amostras não interceptadas pela feição *anomalia*

(B) - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

(C) - amostras remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens, não interceptadas pela feição *anomalia*

Notas - a) Para simbologia, ver Tabela 9,

b) Para descrição dos tipos litológicos, ver Quadro 20.

TL-04 - afetado, por vezes com fragmentação e desintegração, tornando-se friável. Também aqui ocorreu expansão da amostra em trecho (~10 cm) localizado;

c) derrame D:

TL-05 - afetado, por vezes com início de fragmentação;

TL-06 - pouco afetado, por vezes com a ocorrência de rachaduras;

TL-07 - afetado;

TL-08 - afetado, por vezes com início de fragmentação, apresentando trechos restritos com expansão da amostra;

TL-09 - não afetado;

d) derrame C:

TL-10/TL-11 - não afetados;

TL-12 - pouco afetado, com eventual desenvolvimento de rachadura e/ou lasqueamento;

e) derrame B:

TL-13/TL-14 - não ensaiados; e

TL-15 - pouco afetado, com eventual desenvolvimento de rachadura e/ou lasqueamento.

TABELA 15 - Quantidades de ensaios de alterabilidade por categoria de amostras.

Tipo de ensaio de alterabilidade Categoria das amostras	Acelerada				Natural		TOTAL
	Etileno-Glicol		Água-Estufa		MCA-14	MRL-01	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(3)	
não interceptadas pela feição <i>anomalia</i> (inclusive dados do Anexo C)	69	25	22	2	6	8	132
interceptadas pela feição <i>anomalia</i> (inclusive dados do Anexo C)	16	—	13	1	1	—	31
remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens (inclusive dados do Anexo C)	31	—	—	—	—	—	31
TOTAL	116	25	35	3	7	8	194

(1) -ensaio executado em fragmentos de rocha, em geral com diâmetro entre 25 e 19 mm (1" e 3/4")

(2) -ensaio executado em testemunhos de sondagens

(3) -ensaio executado em fragmentos de rocha, distribuídos em 6 faixas granulométricas, variando de 76 mm (3") a 1,2 mm

-MCA-14 e MRL-01 - métodos de ensaios de alterabilidade do Laboratório Central de Engenharia Civil (LCEC) da Cesp.

A classificação dos ensaios por categoria de amostras revelou-se, nesse caso, ineficaz, por não ter sugerido contrastes de comportamento. Entretanto, quando conjugados com os valores dos índices físicos (Tabelas 1, 2 e 3 do Anexo C), os tais ensaios mostraram que os tipos litológicos mais densos e, portanto, menos porosos e de menor absorção d'água, foram os menos sensíveis ao ataque do etileno-glicol.

8.3.2 Alterabilidade água-estufa

Foram executados 38 ensaios (Tabela 15), com duração variando de 96 a 140 dias; 24 destes (63%) com acompanhamento das perdas de massa em ciclos predeterminados, e os 14 restantes (37%) foram avaliados, dos pontos de vista quali e quantitativo, apenas no final do período de ensaio.

A Tabela 11 fornece os resultados médios de um conjunto de 11 amostras, podendo-se verificar que:

- a) o basalto compacto do derrame F (TL-01) praticamente não foi afetado pelo ensaio, com perdas de massa da ordem de $1,0 \pm 0,1\%$;
- b) o basalto compacto do derrame E (TL-04) e a brecha aglomerática do topo do derrame D (TL-05) apresentaram perdas médias elevadas, de $47,5 \pm 64,9\%$ e $54,3\%$ respectivamente. Em ambos os casos, o comportamento das amostras extraídas do trecho do maciço rochoso interceptado pela feição *anomalia* mostrou-se ainda mais insatisfatório, com valores médios de $64,2 \pm 23,4\%$ e $95,4\%$ respectivamente.

O desempenho dos tipos litológicos, neste ensaio, também está diretamente associado às suas características físico-mecânicas. Assim, aqueles mais densos, menos porosos e, conseqüentemente, com menor absorção d'água, apresentaram-se menos afetados. Comportamento análogo foi, também, verificado nos ensaios realizados em testemunhos de sondagens.

A Figura 23 apresenta as curvas de alterabilidade² obtidas a partir de 24 ensaios realizados com amostras dos tipos litológicos TL-01, TL-04, TL-05, TL-07 e TL-08 (Anexo E). Interessante notar que, para todos os tipos litológicos, as porcentagens de perdas mais acentuadas, independentemente de seus valores absolutos, ocorreram, em geral, a partir dos primeiros ciclos; em seguida, as curvas de alterabilidade mostraram tendência à estabilização, representada por assíntotas paralelas a determinados valores de perdas, algumas delas, até mesmo, indicativas de desagregação total (perdas acumuladas próximas a 100%). Esse comportamento torna-se mais evidente ao se relacionar a variação do coeficiente angular representativo de determinados intervalos de ciclos ao

² O método de análise dos ensaios de alterabilidade (água-estufa, natural e de meteorização) baseou-se em YOSHIDA (1972).

Obs: Dados do Anexo E

FIGURA 23 - Porcentagens de perdas acumuladas em diversos ciclos do ensaio de alterabilidade água-estufa (Método LCEC/MCA-13).

longo do ensaio (Figura 24), que reflete, por sua vez, a velocidade em que os processos de alteração atuaram nos diferentes tipos litológicos. Verifica-se, pois, que estas curvas podem ser expressas, básica e aproximadamente, por duas funções do tipo exponencial, a saber:

$$\text{a) } y = \frac{a}{e^{b/x}} \quad (x > 0) \quad (20)$$

Nesse caso, as porcentagens de perdas, independentemente dos valores absolutos, se processam de forma rápida nos ciclos iniciais para, em seguida, se estabilizarem segundo determinada assíntota;

$$\text{b) } y = \frac{1}{a + \frac{b}{e^x}} \quad (x > 0) \quad (21)$$

Também nesse caso, as porcentagens de perdas, independentemente dos valores absolutos, se processam de maneira lenta nos ciclos iniciais para, em seguida, crescerem de forma rápida durante os ciclos intermediários, estabilizando-se, finalmente, segundo determinada assíntota.

TL-01

TL-04

TL-05/TL-07

TL-08

FIGURA 24 - Variação do coeficiente angular das curvas de alterabilidade do ensaio água-estufa.

Tal comportamento poderia ser associado às variações das propriedades físicas e mecânicas mostradas na Figura 22, ou seja:

a) os gráficos representados pela equação 20 são sugestivos de que, nos ciclos iniciais, os efeitos do ensaio exerceram grande influência sobre as características tecnológicas das rochas, de tal forma que pequenas variações nos índices físicos (porosidade e absorção d'água, por exemplo) teriam provocado sensível redução nos valores das demais propriedades, refletindo no significativo aumento da velocidade de alteração. Posteriormente, a partir de determinado ciclo, a trajetória das curvas se modifica no sentido da estabilização das perdas e, por conseguinte, da velocidade de alteração, indicando baixa influência do ensaio sobre as propriedades físicas e mecânicas dos tipos litológicos considerados. Os valores absolutos das perdas de massa (Anexo E; Figura 23) e do coeficiente angular das curvas (Figura 24) refletem, por sua vez, as diferentes intensidades em que estes tipos litológicos foram afetados pelo ensaio, sendo menor para o TL-01 e maior para os demais;

b) os gráficos representados pela equação 21 sugerem que a rocha tenha oferecido maior resistência aos efeitos do ensaio por maior período, durante os ciclos iniciais. Posteriormente, a partir de determinado ciclo, é provável que as propriedades físicas e mecânicas tenham sofrido modificações substanciais, que aceleraram sobremaneira os processos de alteração. A partir desse estágio, a evolução do ensaio se assemelha à das curvas da equação 20, indicando a estabilização da velocidade de alteração. Também aqui, os valores absolutos traduzem as diferentes intensidades em que os tipos litológicos foram afetados pelo ensaio, sendo menor para o TL-01 e maior para os demais.

Não se dispõe dos valores das propriedades físicas e mecânicas ao longo do ensaio de alterabilidade água-estufa, que pudessem dar suporte a essa interpretação, o que a torna meramente especulativa.

A partir dos dados dos ensaios (Anexo E), 21, foram extraídos os coeficientes angulares médios das curvas de alterabilidade para o 84º ciclo, que é comum a todos os ensaios. Esses valores, que representam a velocidade média de alteração num dado instante do ensaio, foram comparados entre si (Figura 25), permitindo diferenciar o desempenho dos vários tipos litológicos. Além disso, foram também relacionados à escala de tempo experimental, considerando-se o tempo necessário para a desagregação total das amostras, ou seja, para as perdas acumuladas de massa atingirem 100%. Do universo de 24 ensaios, verificou-se que 13 deles (54%) apresentaram velocidades médias de alteração acima de 0,27% de perda/ciclo, que corresponde ao período de tempo experimental inferior a um ano para a completa desagregação das amostras; incluem-se, nesse caso, os ensaios realizados com amostras do TL-08, TL-07, TL-05 (parcial)

e TL-04 (parcial). Os 11 ensaios restantes (46%) apresentaram velocidades médias de alteração inferiores a 0,27% de perda/ciclo, com períodos de tempo experimental variando de 1 a 30 anos para as perdas de massa atingirem 100%; esse grupo é composto das amostras do TL-01, TL-04 (parcial) e TL-05 (parcial).

- Notas:
- 1 ciclo = 1 dia;
 - Tempo experimental necessário para a desagregação total (perdas acumuladas = 100%);
 - Valores extraídos do Anexo E

FIGURA 25 - Comparação entre as velocidades médias de alteração referentes ao 84º ciclo do ensaio de alterabilidade água-estufa.

8.3.3 Alterabilidade natural em fragmentos de rocha

Executaram-se 15 ensaios (Tabela 15), com duração de um ano cada e avaliações quali e quantitativas mensais. Desse total, sete deles (47%) foram realizados para uma única faixa granulométrica (Método LCEC/MCA-14); nos oito restantes (53%), foram utilizados fragmentos de rocha distribuídos em seis faixas granulométricas predeterminadas (Método LCEC/MRL-01).

A Tabela 16 fornece as porcentagens de perdas acumuladas, para diversos ciclos, nos sete ensaios realizados conforme o método MCA-14, nos tipos litológicos TL-01, TL-04 e TL-08, a partir de amostras constituídas de 50 fragmentos situados na faixa granulométrica de 25 a 19 mm (1" a 3/4"). A Figura 26 apresenta as curvas de alterabilidade obtidas a partir destes ensaios, enquanto que a Figura 27 exhibe, de forma gráfica, as variações dos coeficientes angulares destas curvas, característicos para determinados intervalos de tempo ao longo dos ensaios.

Nota-se, *grosso modo*, que os processos de alteração atuantes nesses tipos litológicos são passíveis de ser expressos pelas mesmas funções exponenciais teóricas obtidas a partir das curvas de alterabilidade do ensaio água-estufa (equações 20 e 21). Entretanto, no presente caso, estas curvas parecem não ter atingido o estágio indicativo da estabilização das perdas, representado pelo seu andamento assintótico. Tal comportamento sugere que esse método tenha sido menos enérgico, quando comparado ao ensaio água-estufa e, portanto, conferido menor velocidade de alteração aos tipos litológicos analisados. De fato, os coeficientes angulares médios das curvas de alterabilidade para o 84º ciclo - K_{84} (Figura 28) mostram que todos os sete ensaios apresentaram velocidades médias de alteração inferiores a 0,1% de perda/ciclo, com períodos de tempo experimental variando de 3 a 274 anos para a completa desagregação das amostras. Ao final do ensaio, no 360º ciclo, as velocidades médias (K_{360}) permaneceram entre 0,17% e 0,002% de perdas/ciclo, que correspondem a períodos de tempo experimental que variam de 1,6 a 137 anos.

Ressalta-se, ainda, outra peculiaridade de comportamento, que pode ser assim expressa:

- a) quando $K_{360} < K_{84}$, os ensaios são adequadamente representados pela equação 20; e
- b) quando $K_{360} > K_{84}$, os ensaios são mais bem representados pela equação 21.

As Tabelas 17 a 24 fornecem as porcentagens de perdas acumuladas, para diversos ciclos, em oito ensaios realizados segundo o método MRL-01, com os tipos litológicos TL-01, TL-04, TL-05, TL-07 e TL-08, a partir de amostras distribuídas em seis faixas granulométricas, que variam entre 76 e 1,2 mm (de 3" até material retido na peneira nº 16). As Figuras 29 a 36 apresentam as respectivas curvas de alterabilidade destes ensaios, exibidas, para cada caso, tanto na versão experimental quanto teórica, esta última obtida por regressão potencial e disposta em gráfico bilogarítmico.

TABELA 16 - Porcentagens de perdas acumuladas em diversos ciclos no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MCA-14).*

TL \ CICLO**													
	C ₀	C ₃₀	C ₆₀	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₀	C ₁₈₀	C ₂₁₀	C ₂₄₀	C ₂₇₀	C ₃₀₀	C ₃₃₀	C ₃₆₀
TL-01	0,00	4,80	5,16	5,29	6,03	7,77	8,91	9,59	9,66	12,00	12,05	14,40	14,40
(1)	0,00	0,04	0,06	0,11	0,29	0,46	0,46	0,55	0,55	1,41	1,43	1,06	1,06
(2)	0,00	0,00	0,00	0,06	0,06	0,09	0,09	0,25	0,25	0,72	0,72	0,72	0,72
TL-04 (3)	0,00	0,12	0,16	0,16	0,16	0,19	0,45	3,90	7,47	14,31	27,58	29,91	37,81
(4)	0,00	1,38	1,73	1,81	1,97	2,03	2,18	2,20	2,21	2,21	2,21	2,25	2,37
(5)	0,00	2,36	2,36	2,36	13,89	26,91	37,76	39,49	53,75	57,92	60,81	60,81	61,37
TL-08	0,00	0,00	0,09	3,82	4,09	5,15	5,40	7,18	13,33	14,59	16,19	16,65	18,42

OBS: * 19 mm < ϕ < 25 mm (3/4" < ϕ < 1")
 ** 1 ciclo = 1 dia

FIGURA 26 - Porcentagens de perdas acumuladas em diversos ciclos no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MCA-14).

FIGURA 27 - Variação do coeficiente angular das curvas de alterabilidade do ensaio natural (Método LCEC/MCA-14).

Tipo Litológico e número do ensaio		$K_{\text{acumulado}}$ (% perdas/ciclo)					
TL-01	—						
TL-04	(1)	*					
	(2)	*					
	(3)						
	(4)						
	(5)						
TL-08	—						
$K_{\text{acumulado}}$ (% perdas/ciclo)		0,001	0,0027	0,01	0,027	0,1	0,27
Escala de tempo experimental	dias	100000	10000			1000	100
	anos	500	100	50	10	5	1

- Notas:
- 1 ciclo = 1 dia;
 - Tempo experimental necessário para desagregação total (perdas acumuladas = 100%);
 - Valores obtidos, diretamente e por interpolação, da Tabela 16
 - * — velocidade média no 84º ciclo
 - Δ — idem, no 360º ciclo

FIGURA 28 - Comparação entre as velocidades médias de alteração referentes aos 84º e 360º ciclos do ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MCA-14).

TABELA 17 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-01: ensaio nº 1.

FAIXA GRANULOMÉTRICA	CICLO PERDAS	C ₀	C ₃₁	C ₅₉	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₁	C ₁₈₁	C ₂₁₂	C ₂₄₃	C ₂₇₃	C ₃₀₄	C ₃₃₄	C ₃₆₅
76 mm - 50 mm / 3" - 2"	P1	0,00	0,08	0,16	1,83	26,29	26,62	26,93	27,02	27,08	44,61	44,72	44,80	44,86
50 mm - 25 mm / 2" - 1"	P2	0,00	0,13	0,19	0,20	0,21	0,32	0,32	0,39	0,42	0,45	0,46	0,46	0,52
25 mm - 12,5 mm / 1" - 1/2"	P3	0,00	0,49	0,63	0,95	0,96	1,25	1,47	1,62	2,90	2,91	2,94	3,43	3,45
12,5 mm - 9,5 mm / 1/2" - 3/8"	P4	0,00	4,90	12,97	15,06	16,63	18,76	20,68	20,72	21,27	21,89	24,34	27,89	28,86
9,5 mm - 4,8 mm / 3/8" - Nº 4	P5	0,00	1,77	4,22	5,79	7,17	8,98	9,81	9,89	10,13	10,91	11,01	11,09	12,48
4,8 mm - 1,2 mm / Nº 4 - Nº 16	P6	0,00	1,83	10,72	11,11	13,62	14,14	14,51	18,75	20,54	21,21	23,96	27,32	29,80

OBS: 1 ciclo = 1 dia

a) curva experimental

b) curva teórica

FIGURA 29- Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-01: ensaio nº 1.

TABELA 18 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-01: ensaio nº 2.

FAIXA GRANULOMÉTRICA	CICLO PERDAS	C ₀	C ₃₁	C ₅₉	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₁	C ₁₈₁	C ₂₁₂	C ₂₄₃	C ₂₇₃	C ₃₀₄	C ₃₃₄	C ₃₆₅
76 mm - 50 mm / 3" - 2"	P1	0,00	0,18	0,19	0,24	0,25	0,32	0,33	0,37	0,40	0,41	0,41	0,43	0,45
50 mm - 25 mm / 2" - 1"	P2	0,00	0,15	0,17	0,21	0,22	0,32	0,33	0,37	0,40	0,45	0,47	0,47	0,50
25 mm - 12,5 mm / 1" - 1/2"	P3	0,00	0,40	0,48	0,61	0,62	0,77	0,86	1,02	1,07	1,12	1,29	1,31	1,42
12,5 mm - 9,5 mm / 1/2" - 3/8"	P4	0,00	4,64	10,41	12,20	16,40	19,60	20,80	24,38	24,72	27,14	27,34	33,63	36,44
9,5 mm - 4,8 mm / 3/8" - Nº 4	P5	0,00	2,09	2,97	5,64	5,68	6,04	6,14	6,16	6,25	8,47	8,55	8,96	9,12
4,8 mm - 1,2 mm / Nº 4 - Nº 16	P6	0,00	3,93	12,54	12,90	14,52	16,08	16,12	19,23	23,83	24,53	28,58	32,10	35,79

OBS: 1 ciclo = 1 dia

a) curva experimental

b) curva teórica

FIGURA 30 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-01: ensaio nº 2.

TABELA 19 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-04.

FAIXA GRANULOMÉTRICA	CICLO PERDAS	C ₀	C ₃₁	C ₅₉	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₁	C ₁₈₁	C ₂₁₂	C ₂₄₃	C ₂₇₃	C ₃₀₄	C ₃₃₄	C ₃₆₅
76 mm - 60 mm / 3' - 2'	P1	0,00	0,48	0,71	0,79	0,80	0,97	1,02	1,16	1,19	1,20	1,20	1,20	1,21
50 mm - 25 mm / 2' - 1'	P2	0,00	0,76	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,02	1,06	1,14	1,14	1,15	1,15
25 mm - 12,5 mm / 1' - 1/2'	P3	0,00	1,06	1,19	1,22	1,25	1,26	1,46	1,47	1,50	1,52	1,61	1,62	1,62
12,5 mm - 9,5 mm / 1/2' - 3/8"	P4	0,00	4,12	10,15	10,21	10,29	10,37	11,31	14,93	16,44	19,36	20,70	21,32	22,20
9,5 mm - 4,8 mm / 3/8" - Nº 4	P5	0,00	4,76	6,85	10,57	11,95	12,07	12,41	12,43	12,47	12,49	12,53	12,55	12,89
4,8 mm - 1,2 mm / Nº 4 - Nº 16	P6	0,00	2,63	6,71	8,18	14,15	14,17	14,25	17,39	20,72	21,14	22,93	25,31	26,15

OBS: 1 ciclo = 1 dia

a) curva experimental

b) curva teórica

FIGURA 31 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-04.

TABELA 20 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-05.

FAIXA GRANULOMÉTRICA	CICLO PERDAS	C ₀	C ₃₁	C ₅₉	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₁	C ₁₈₁	C ₂₁₂	C ₂₄₃	C ₂₇₃	C ₃₀₄	C ₃₃₄	C ₃₆₅
75 mm - 50 mm / 3" - 2"	P1	0,00	0,82	0,89	0,94	0,99	1,25	1,36	1,51	1,56	1,58	1,72	1,78	1,78
50 mm - 25 mm / 2" - 1"	P2	0,00	0,64	0,71	0,80	0,90	1,22	1,48	1,50	1,67	1,69	1,82	2,47	3,04
25 mm - 12,5 mm / 1" - 1/2"	P3	0,00	0,75	0,83	0,94	1,97	2,44	2,97	3,82	5,44	5,49	5,60	9,56	9,60
12,5 mm - 9,5 mm / 1/2" - 3/8"	P4	0,00	5,29	14,26	19,31	28,35	30,09	33,83	34,50	36,86	42,57	46,25	50,60	53,99
9,5 mm - 4,8 mm / 3/8" - Nº 4	P5	0,00	4,34	7,83	14,13	14,68	19,63	19,71	21,38	21,92	24,15	25,14	29,97	30,26
4,8 mm - 1,2 mm / Nº 4 - Nº 16	P6	0,00	2,85	10,01	11,18	16,64	18,52	18,74	19,31	21,79	22,78	25,21	26,21	27,85

OBS: 1 ciclo = 1 dia

a) curva experimental

b) curva teórica

FIGURA 32 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-05.

TABELA 21 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-07.

FAIXA GRANULOMÉTRICA	CICLO PERDAS	C ₀	C ₃₁	C ₅₉	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₁	C ₁₈₁	C ₂₁₂	C ₂₄₃	C ₂₇₃	C ₃₀₄	C ₃₃₄	C ₃₆₅
76 mm - 50 mm / 3" - 2"	P1	0,00	1,11	2,04	2,72	4,80	15,09	16,56	16,58	17,03	24,67	25,08	25,10	25,11
50 mm - 25 mm / 2" - 1"	P2	0,00	1,78	4,65	7,72	26,47	40,11	46,98	49,52	65,26	66,21	71,72	71,76	71,79
25 mm - 12,5 mm / 1" - 1/2"	P3	0,00	2,66	8,01	19,17	55,53	58,04	59,61	60,59	69,24	73,04	74,57	75,83	78,17
12,5 mm - 9,5 mm / 1/2" - 3/8"	P4	0,00	17,07	40,46	55,29	64,98	65,80	65,92	68,38	69,20	70,18	71,10	73,66	74,82
9,5 mm - 4,8 mm / 3/8" - Nº 4	P5	0,00	15,30	25,29	48,79	53,58	55,46	55,64	56,51	57,03	59,01	60,86	62,86	63,34
4,8 mm - 1,2 mm / Nº 4 - Nº 16	P6	0,00	10,94	27,94	32,02	42,89	44,05	45,03	50,20	52,48	56,67	58,74	59,62	60,98

OBS: 1 ciclo = 1 dia

a) curva experimental

b) curva teórica

FIGURA 33 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-07.

TABELA 22 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 1.

FAIXA GRANULOMÉTRICA	CICLO PERDAS	C ₀	C ₃₁	C ₅₉	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₁	C ₁₈₁	C ₂₁₂	C ₂₄₃	C ₂₇₃	C ₃₀₄	C ₃₃₄	C ₃₆₅
76 mm - 50 mm / 3" - 2"	P1	0,00	0,81	0,97	1,01	1,15	1,69	1,96	1,97	2,19	15,27	16,43	33,00	33,14
50 mm - 25 mm / 2" - 1"	P2	0,00	0,94	1,41	1,73	11,64	13,14	14,59	18,16	35,62	38,99	42,23	46,60	51,60
25 mm - 12,5 mm / 1" - 1/2"	P3	0,00	1,12	1,95	2,15	3,19	4,87	6,65	8,08	13,60	17,12	20,62	30,03	37,91
12,5 mm - 9,5 mm / 1/2" - 3/8"	P4	0,00	3,33	14,41	18,39	23,52	33,30	39,37	40,93	43,62	56,32	58,18	66,34	70,39
9,5 mm - 4,8 mm / 3/8" - Nº 4	P5	0,00	3,30	9,29	14,62	17,99	24,33	26,52	26,58	30,28	33,35	36,11	42,72	45,60
4,8 mm - 1,2 mm / Nº 4 - Nº 16	P6	0,00	3,15	7,59	8,15	13,92	14,70	15,14	17,63	20,43	21,75	24,68	27,78	29,19

OBS: 1 ciclo = 1 dia

a) curva experimental

b) curva teórica

FIGURA 34 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 1.

TABELA 23 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 2.

FAIXA GRANULOMÉTRICA	CICLO PERDAS	C ₀	C ₃₁	C ₅₉	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₁	C ₁₈₁	C ₂₁₂	C ₂₄₃	C ₂₇₃	C ₃₀₄	C ₃₃₄	C ₃₆₅
76 mm - 50 mm / 3" - 2"	P1	0,00	1,19	19,52	45,49	46,80	47,17	72,23	73,28	73,30	73,31	73,43	90,56	90,59
50 mm - 25 mm / 2" - 1"	P2	0,00	5,89	41,13	48,40	49,75	50,05	56,17	56,34	58,15	58,19	58,39	59,21	60,06
25 mm - 12,5 mm / 1" - 1/2"	P3	0,00	3,93	25,67	48,47	52,36	54,85	54,87	56,15	57,14	58,33	59,44	60,55	61,48
12,5 mm - 9,5 mm / 1/2" - 3/8"	P4	0,00	21,79	48,27	58,43	60,91	64,95	64,99	66,14	67,61	69,52	72,64	73,02	74,25
9,5 mm - 4,8 mm / 3/8" - Nº 4	P5	0,00	23,07	43,21	54,12	54,32	58,25	58,34	58,88	59,56	61,62	61,95	62,69	64,45
4,8 mm - 1,2 mm / Nº 4 - Nº 16	P6	0,00	9,27	20,61	21,87	30,82	30,98	31,98	36,51	39,48	43,42	47,83	54,50	58,14

OBS: 1 ciclo = 1 dia

a) curva experimental

b) curva teórica

FIGURA 35 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - TL-08: ensaio nº 2.

TABELA 24 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - **TL-08: ensaio nº 3.**

FAIXA GRANULOMÉTRICA	CICLO PERDAS	C ₀	C ₃₁	C ₅₉	C ₉₀	C ₁₂₀	C ₁₅₁	C ₁₈₁	C ₂₁₂	C ₂₄₃	C ₂₇₃	C ₃₀₄	C ₃₃₄	C ₃₆₅
76 mm - 50 mm / 3" - 2"	P1	0,00	0,88	0,93	1,32	1,33	1,51	1,51	1,54	1,58	1,60	2,13	2,13	39,51
50 mm - 25 mm / 2" - 1"	P2	0,00	0,74	0,80	0,87	0,89	1,56	1,61	1,62	1,71	1,74	1,90	2,25	4,61
25 mm - 12,5 mm / 1" - 1/2"	P3	0,00	1,10	1,31	2,68	2,72	2,86	3,33	3,34	3,50	4,15	6,14	10,05	14,84
12,5 mm - 9,5 mm / 1/2" - 3/8"	P4	0,00	4,26	9,61	13,73	18,11	23,11	24,79	25,40	29,10	40,42	43,33	48,27	54,87
9,5 mm - 4,8 mm / 3/8" - Nº 4	P5	0,00	4,27	6,55	10,08	13,74	17,05	17,09	17,13	21,46	21,56	22,42	24,94	26,47
4,8 mm - 1,2 mm / Nº 4 - Nº 16	P6	0,00	4,34	10,55	11,02	15,76	15,98	17,37	21,01	23,40	25,19	28,02	29,67	29,75

OBS: 1 ciclo = 1 dia

a) curva experimental

b) curva teórica

FIGURA 36 - Porcentagens de perdas acumuladas em diferentes granulometrias no ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) - **TL-08: ensaio nº 3.**

As curvas experimentais indicam que o comportamento dos tipos litológicos, neste ensaio, foi similar àquele dos demais métodos utilizados (água-estufa/MCA-13; alterabilidade natural/MCA-14), sugerindo que as mesmas funções exponenciais teóricas (equações 20 e 21) possam ser aqui empregadas.

Verifica-se, também nesse caso, que as porcentagens de perdas mais acentuadas, independentemente dos seus valores absolutos, ocorreram, em geral, a partir dos ciclos iniciais, diminuindo no decorrer do ensaio. Esse comportamento torna-se mais evidente através das curvas teóricas de alterabilidade, devido à redução do coeficiente angular, ou seja, da velocidade de alteração, ao longo do ensaio.

As curvas de alterabilidade mostram claramente a influência da granulometria no processo de alteração. De fato, para qualquer ciclo de ensaio tomado por referência, constata-se que as perdas acumuladas aumentam em direção às frações granulométricas menores. Isso significa dizer que a alteração se processa, comparativamente, de forma mais lenta para as granulometrias maiores, sendo, portanto, necessário maior número de ciclos de ensaio para atingir os valores de perdas acumuladas idênticos àqueles alcançados pelas frações granulométricas menores. Exemplificando: no caso do TL-07 (Figura 33b), para se obterem perdas acumuladas de 10%, são necessários:

- a) 161 dias para a faixa granulométrica P1;
- b) 84 dias para a faixa granulométrica P2;
- c) 59 dias para a faixa granulométrica P3;
- d) 16 dias para a faixa granulométrica P6;
- e) 8 dias para a faixa granulométrica P5; e
- f) 4,5 dias para a faixa granulométrica P4.

Embora se admita que as frações P1 a P6 representem, nessa ordem, a seqüência crescente de velocidade para a completa desagregação das amostras, verificaram-se, entretanto, nos oito ensaios analisados, as seguintes porcentagens de ocorrência de cada uma destas frações nas suas respectivas posições:

P1	P2	P3	P4	P5	P6
37,5%	25%	50%	25%	0%	12,5%

As porcentagens sugerem que a seqüência experimental ocorre segundo ordenamento distinto do anteriormente suposto. De fato, a seqüência experimental está disposta conforme segue:

P1/P2	P3	P5	P6	P4
62,5%	50%	62,5%	50%	50%

velocidade de alteração crescente →

Verifica-se que apenas as granulometrias maiores (P1 a P3) se mantiveram nas posições inicialmente admitidas, o mesmo não ocorrendo com as frações granulométricas menores (P4 a P6). Nesse último caso, é provável que as características intrínsecas (mineralogia, granulometria, textura, microfissuras) tenham exercido papel preponderante no desempenho dos tipos litológicos sob as solicitações impostas por esse método de ensaio.

Interessante notar que, para o TL-07 (Figura 33b) e TL-08 (apenas Figuras 34b e 35b), ocorre nítida convergência das curvas de alterabilidade em direção à desagregação completa, e que o aumento do tempo de ensaio diminuiu drasticamente a influência do efeito de escala, uma vez que o comportamento das amostras torna-se independente da granulometria considerada.

Com o intuito de possibilitar a comparação do desempenho dos tipos litológicos sob os diferentes métodos de ensaio de alterabilidade utilizados, efetuou-se o cálculo de equivalência das faixas granulométricas do ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01) com aquela utilizada nos outros ensaios (Anexo F). Assim, concluiu-se que os demais ensaios executados com amostras do TL-01 deveriam ser comparados com a faixa P2, enquanto que os TL-04, 05, 07 e 08, confrontados com a fração P1.

A Figura 37 mostra que as velocidades médias de alteração para o 84° (K_{84}) e 360° (K_{360}) ciclos permaneceram, respectivamente, entre 0,482 - 0,002% e 0,250 - 0,001% de perdas/ciclo, que correspondem a períodos de tempo experimental variando de 0,6 - 137 anos e 1,1 - 274 anos, respectivamente, para a desagregação total das amostras.

São, aqui, válidos os comentários referentes à adequada representação dos ensaios pelas equações 20 e 21, em função dos valores das velocidades médias dos dois ciclos tomados por referência.

- Notas:
- 1 ciclo = 1 dia;
 - Tempo experimental necessário para desagregação total (perdas acumuladas = 100%);
 - Valores obtidos, por interpolação, das Tabelas 17 a 24
 - $*$ — velocidade média no 84° ciclo
 - Δ — idem, no 360° ciclo

FIGURA 37 - Comparação entre as velocidades médias de alteração referentes aos 84° e 360° ciclos do ensaio de alterabilidade natural (Método LCEC/MRL-01).

8.3.4 Alterabilidade natural em testemunhos de sondagens

8.3.4.1 Considerações iniciais

Foram submetidos a este ensaio cerca de 255 m de testemunhos de cinco sondagens rotativas.

A seleção das sondagens contemplou tanto a abrangência das áreas de instalação das estruturas de concreto e da pedreira da margem direita, sugeridas nas fases iniciais do projeto e confirmadas nas etapas posteriores, como também praticamente todos os tipos litológicos reconhecidos nas investigações realizadas, independentemente da sua posição estratigráfica em relação à linha de escavação. Assim, foi possível mitigar o efeito da subjetividade na escolha das amostras, ensaiando-se *uma parcela representativa de todo o maciço rochoso*, conseqüentemente com características geológico-geotécnicas distintas. Dessa forma, a interpretação dos resultados deste ensaio procurou levar em consideração, tanto quanto possível, os dois conjuntos de fatores intervenientes na alteração e alterabilidade de rochas reconhecidos por AIRES-BARROS (*op. cit.*), a saber:

- a) fatores intrínsecos, aqui representados pelas características geológico-geotécnicas dos 15 tipos litológicos (TL-01 ao TL-15) **no início do ensaio**; e
- b) fatores extrínsecos, aqui reproduzidos pelas condições ambientais do local onde o ensaio foi realizado.

8.3.4.2 Características geológico-geotécnicas das amostras no início do ensaio

Foram elaborados histogramas típicos das características geológico-geotécnicas das amostras dos 15 tipos litológicos no início do ensaio (Anexo G), quanto a graus de alteração, coerência, fraturamento e valores de permeabilidade. Para cada tipo litológico, os histogramas foram construídos levando-se em consideração as amostras interceptadas ou não pela feição *anomalia*.

O efeito desta feição nas características geológico-geotécnicas dos tipos litológicos fica evidente através destes histogramas; as amostras interceptadas pela feição apresentam-se:

- a) mais fraturadas em 91% dos casos;
- b) com permeabilidades mais elevadas em 100% dos casos;
- c) com graus de alteração maiores ou iguais àqueles das amostras não atingidas pela feição, em 82% dos casos; e
- d) com graus de coerência menores ou iguais àqueles das amostras não atingidas pela feição, em 82% dos casos.

Entretanto, deve-se lembrar que esses parâmetros foram utilizados especificamente para a classificação geológico-geotécnica do maciço rochoso e para a elaboração dos modelos geomecânico e hidrogeotécnico

da fundação das estruturas de concreto, com o propósito de se verificar tanto a capacidade de suporte como a sua estanqueidade. Por esse motivo, são de alcance limitado quando utilizados para a avaliação da alteração e da alterabilidade de tipos litológicos. Tomando-se por base apenas os parâmetros grau de fraturamento e permeabilidade, podem-se apontar as seguintes limitações:

a) **grau de fraturamento**: é utilizado para definir a frequência de fraturas, ou seja, o número de descontinuidades naturais por metro linear de testemunho de sondagem, considerando-se cada trecho de fraturamento homogêneo.

Analisando-se a partir da Figura 7 (item 2.4.2), verifica-se que esse parâmetro cobre apenas parcialmente o espectro de porosidade, ou seja, representaria o domínio das macrofraturas e apenas parte do de microfraturas de FARRAN & THENOZ (*op. cit.*), ou o da macroporosidade de PREVOSTEAU *et al.* (*op. cit.*), ainda que não na sua totalidade.

Portanto, já a partir da sua própria concepção, esse parâmetro exclui parcelas significativas do espectro de porosidade com interesse à alteração e à alterabilidade de rochas, justamente aquelas consideradas responsáveis pelas grandes superfícies de contato entre uma rocha e um fluido (FARRAN & THENOZ, *op. cit.*), bem como pelas trocas com o meio exterior e como local de ocorrência das principais reações químicas (PREVOSTEAU *et al.*, *op. cit.*);

b) **coeficiente de permeabilidade**: em quatro dos cinco furos de sondagens, cujos testemunhos se utilizaram para o estudo de alterabilidade, foram executados ensaios de perda d'água sob pressão (OLIVEIRA *et al.*, 1975), calculando-se os valores de perda d'água específica (PE), expressos em $\ell/\text{min.m.}(\text{kg}/\text{cm}^2)$, para cada um dos cinco estágios de pressão (mínima, intermediária, máxima, intermediária e mínima) aplicada em cada trecho de ensaio, em geral com comprimento de 3 m. A média aritmética dos valores de PE obtidos nas pressões intermediárias, em cada trecho de ensaio, determinou a condutividade hidráulica (H) do trecho em questão, que foi, por fim, ajustada para a obtenção do coeficiente de permeabilidade-K (Tabela 25).

O critério de pressão adotado para a execução dos ensaios foi:

- ba) pressão mínima: $0,1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ($0,010 \text{ MPa}$);
- bb) pressão intermediária: metade do valor da pressão máxima; e
- bc) pressão máxima: $0,25 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ($0,025 \text{ MPa}$) por metro de profundidade de sondagem, medido na vertical, contado a partir da boca do furo até a metade do trecho ensaiado, para compensar a carga exercida pelo maciço rochoso.

Comparando-se esses níveis de pressão aplicada no maciço com os valores de pressão capilar utilizados nos ensaios de porosimetria a

injeção de mercúrio (Figura 7), constata-se, também nesse caso, que os ensaios de permeabilidade executados com finalidades (hidro)geotécnicas excluem parcelas importantes e significativas do espectro de porosidade. A título de ilustração, verifica-se que o maciço rochoso da UHE Canoas I foi considerado, do ponto de vista geotécnico, impermeável para valores de permeabilidade inferiores a 10^{-5} cm/s (Anexo G e Tabela 25). Entretanto, do ponto de vista da alteração e da alterabilidade de rochas, valores de permeabilidade ao ar superiores a 10^{-7} cm/s foram considerados altos e responsáveis pela elevada alterabilidade de determinados tipos litológicos graníticos e basálticos (Tabela 4).

TABELA 25 - Correlação entre perda d'água específica (PE) e coeficiente de permeabilidade (K) para o maciço rochoso da UHE Canoas I (CESP, 1990).

Símbolo	Perda d'água específica - PE $\ell.\text{min.m.}(\text{kg}/\text{cm}^2)$	Coeficiente de permeabilidade - K (cm/s)
H1	$\text{PE} < 0,1$	$\text{K} < 10^{-5}$
H2	$0,1 \leq \text{PE} < 1,0$	$10^{-5} \leq \text{K} < 10^{-4}$
H3	$1,0 \leq \text{PE} < 5,0$	$10^{-4} \leq \text{K} < 5.10^{-4}$
H4	$5,0 \leq \text{PE} < 10,0$	$5.10^{-4} \leq \text{K} < 10^{-3}$
H5	$10,0 \leq \text{PE} < 50,0$	$10^{-3} \leq \text{K} < 5.10^{-3}$
H6	$\text{PE} \geq 50,0$	$\text{K} \geq 5.10^{-3}$

Contudo, esses parâmetros geológico-geotécnicos, quando devidamente utilizados, fornecem importantes subsídios para a avaliação da alteração e da alterabilidade das rochas, mesmo com as limitações apontadas anteriormente; por tal razão, não devem ser menosprezados.

Através dos perfis geológicos das cinco sondagens submetidas ao ensaio (SR-204/208/402A/602/1003), foi possível calcular a *parcela da superfície específica inicial de cada tipo litológico atribuída ao fraturamento original do maciço rochoso* (Anexo H). Foram, também, obtidos os valores de superfície específica por metro linear (Tabela 26), para possibilitar a análise comparativa. Também nesse caso, a influência da feição *anomalia* fica bastante evidente: para cada tipo litológico, as amostras por ela interceptadas apresentaram valores mais elevados de superfície específica por metro linear, variando de 3 a 37 vezes em relação àqueles das amostras não atingidas pela feição.

TABELA 26 - Distribuição da superfície específica por metro linear nos testemunhos de sondagens submetidos ao ensaio de alterabilidade natural.

Tipo Litológico		Superfície específica (m^{-1}) [1]	Quantidade (m) [2]	[1] : [2] (m^{-2}) [3]	[3](A) : [3](B)	[3](B) : [3](A)
TL - 01	A	77 093,43	69,11	1 115,52	—	—
TL - 02	A	468,07	7,06	66,30	—	~18
	B	2 225,01	1,90	1 171,06		
TL - 03	A	56,73	1,70	33,37	—	—
TL - 04	A	1 414,76	18,20	77,73	—	~8,5
	B	2 952,88	4,55	648,98		
TL - 05	A	1 403,21	9,62	145,86	—	~9,5
	B	1 328,85	0,95	1 398,79		
TL - 06	A	326,54	3,30	98,95	—	—
TL - 07	A	2 194,81	4,89	448,84	—	~3,5
	B	6 719,18	4,50	1 493,15		
TL - 08	A	8 210,40	37,08	221,42	—	~6,5
	B	14 990,62	10,58	1 416,88		
TL - 09	A	639,36	3,25	196,73	~4	—
	B	57,22	1,20	47,68		
TL - 10	A	207,78	2,67	77,82	—	~20
	B	3 455,78	2,26	1 529,11		
TL - 11	A	2 780,85	6,34	438,62	—	~3
	B	9 861,45	7,11	1 386,98		
TL - 12	A	11 463,89	35,91	319,24	—	~7
	B	1 833,76	0,83	2 209,35		
TL - 13	A	6 445,66	10,93	589,72	—	~8,5
	B	15 992,40	3,23	4 951,21		
TL - 14	A	590,31	0,62	952,11	—	—
TL - 15	A	59,97	0,77	77,88	—	~37
	B	19 308,17	6,69	2 886,12		

Fonte: Anexo H

Nota: A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*
B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

8.3.4.3 Condições ambientais

A Figura 38 mostra a variação da precipitação pluviométrica e das temperaturas máxima/mínima ambientais durante o ensaio, incidentes no então canteiro de obras da Usina Nova Avanhandava, no município de Buritama, SP, local onde este foi executado.

FIGURA 38 - Condições ambientais no local de execução do ensaio de alterabilidade natural.

As temperaturas foram lidas em termômetro instalado em local abrigado; portanto, apresentaram valores inferiores àqueles a que as amostras estiveram realmente submetidas, devido à influência da insolação. Os dados das chuvas de 24 horas foram obtidos da estação hidrometeorológica daquela Usina.

As variações de temperatura ocorreram segundo uma função periódica ao longo do tempo, quer se considere o período integral do ensaio ou ainda cada ciclo seu. A temperatura ambiente média diária atingiu valores máximo de 30°C e mínimo de 21°C, com variação diária da ordem de 10°C.

O total máximo de chuva diária alcançou 165 mm, no 2.139º dia.

Para se ter idéia da magnitude com que esses parâmetros ambientais podem atuar, bem como o seu efeito no comportamento das amostras submetidas ao ensaio, recorreu-se ao sugestivo trabalho de

SERRA JR. & AZEVEDO (*op. cit.*) (item 2.9.4). Estes autores efetuaram medidas de temperaturas através de termopares instalados nas faces de duas amostras de basalto sujeitas a diferentes condições de insolação. Constataram que, enquanto a temperatura ambiente atingiu valores máximo e mínimo de 30,4°C e 16,1°C, respectivamente, a temperatura nas faces de uma das amostras chegou a valores de 55,7°C e 20,4°C, com diferença de temperatura entre essas faces oscilando de 0,1°C a 16°C. Essas variações de temperatura e de gradientes térmicos teriam causado constantes dilatações, provocando a abertura de fraturas preexistentes e a conseqüente redução das dimensões iniciais dos blocos. A água teria importância ligada ao choque térmico a que a amostra foi submetida.

Deve, ainda, ser lembrado (item 4.3) que as condições ambientais do local onde o ensaio foi executado são comparativamente mais brandas, do ponto de vista de intemperismo químico, que aquelas do sítio da UHE Canoas I.

8.3.4.4 Comportamento da brecha basáltica

A Figura 39 ilustra os gráficos de acompanhamento do ensaio para os tipos litológicos TL-02/05/13, dos horizontes de brecha basáltica do topo do derrame.

Macroscopicamente, estes tipos litológicos puderam ser agrupados em duas descrições:

- a) *brecha aglomerática*: cinza-claro, constituída por fragmentos mili a decimétricos, irregulares, de basalto vesicular e/ou amigdaloidal, envoltos por matriz de brecha basáltica, por vezes com porções descontínuas de brecha basáltica siltosa e, localmente, brecha silicática; é representada pelo TL-02 e TL-05; e
- b) *brecha basáltica arenosa/siltosa*: cinza/marrom-avermelhado, constituída por fragmentos mili a decimétricos de basalto vesicular e/ou amigdaloidal, medianamente alterado, envoltos por matriz siltosa/arenosa/areno-siltosa, medianamente a pouco coerente; está representada pelo TL-13.

Do ponto de vista qualitativo e para ambas as categorias de amostras, a evolução da velocidade de ataque ao longo do ensaio incidiu com coeficientes angulares progressivamente decrescentes, na maioria dos casos, intercalados com patamares nos quais a velocidade se manteve praticamente constante (coeficiente angular nulo), conforme esquematizado a seguir:

FIGURA 39 - Gráficos de acompanhamento do ensaio de alterabilidade natural dos tipos litológicos representativos da brecha basáltica.

O significado físico desse comportamento sugere a evolução cíclica e contínua do processo de alteração. As primeiras superfícies submetidas à alteração são compostas pelas faces dos testemunhos de sondagens e pelas discontinuidades preexistentes. À medida que o processo evolui nessas superfícies, as características físicas e mecânicas são modificadas, ocasionando o incremento da superfície específica inicial; com isso, novas superfícies, mais internas às amostras, são, então, oferecidas ao mecanismo da alteração. Dessa forma, pode-se imaginar as amostras como constituídas de diversas "camadas", a exemplo da esfoliação esferoidal, cada uma com intensidade de ataque progressivamente decrescente em direção ao "núcleo". A desintegração total ocorrerá quando todas as "camadas" estiverem submetidas à intensidade máxima de ataque. Assim, cada patamar indicaria o hiato de tempo necessário para que novas superfícies, mais internas, sejam atingidas pelos processos de alteração.

Para os tipos litológicos em questão, a quantidade de patamares variou de um a quatro; a duração dos patamares inicial e intermediário foi entre 69 e 701 dias (valor médio: 331 ± 213 dias, $N = 7$) e a do patamar final foi entre 501 e 2.182 dias (valor médio: 1.894 ± 996 dias; $N = 6$).

Para as amostras não atingidas pela feição *anomalia*, verificou-se que a natureza da matriz exerce significativa influência sobre o seu comportamento no ensaio. Nesse caso, os fenômenos que atuaram com maior intensidade foram os de lasqueamento/fendilhamento e rachadura para o TL-02 (48%, ao final do ensaio) e TL-05 (84%, idem), enquanto que para o TL-13, foram os de fragmentação e desintegração, com 63% ao final do ensaio. Para o TL-13, os fenômenos incidiram basicamente sobre a matriz arenosa/siltosa. Entretanto, para as amostras interceptadas por esta feição, a natureza da matriz não distingue, *a priori*, o seu comportamento; os fenômenos que agiram mais intensamente foram os de desintegração e fragmentação, alcançando valores de 100% ao final do ensaio, para o TL-13 e TL-05, e de 40% para o TL-02.

Os gráficos da Figura 39 mostram, também, que a velocidade com que os fenômenos de desintegração e fragmentação incidiram sobre as amostras foi sensivelmente maior naquelas interceptadas pela feição.

Com relação ao aspecto interpretativo do comportamento desses tipos litológicos, utilizaram-se, *experimentalmente*, os seguintes parâmetros:

- a) grau de alteração/coerência/fraturamento e permeabilidade (Anexo G);
- b) superfície específica por metro linear de testemunho de sondagem - SE/m (Tabela 26);
- c) parcela, em porcentagem, da superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5 - SE_{F4+F5} (Anexo H); e
- d) porcentagem, ao final do ensaio, de amostras atingidas pelos fenômenos de fragmentação e desintegração - $Fr+D$ (Anexo A), indicativos da redução de granulometria e da perda de material.

A Tabela 27 apresenta a conjugação desses parâmetros; sua análise permite efetuar as seguintes considerações:

- a) as porcentagens de amostras atingidas pelos fenômenos de fragmentação e desintegração são, *grosso modo*, crescentes com o aumento da superfície específica por metro, com a parcela de superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5, bem como com o aumento do coeficiente de permeabilidade;
- b) inversões nessas tendências podem estar relacionadas com variações do coeficiente de permeabilidade. A Tabela 27 (linhas A2 e A1) mostra que, embora o TL-05 apresente maior valor de SE/m , sua parcela de amostras atingidas pelos fenômenos de fragmentação e desintegração é bastante inferior àquela do TL-02, talvez pelo fato de a permeabilidade do TL-05 ser inferior à do TL-02;
- c) inversões nessas tendências podem, também, estar relacionadas com a natureza da matriz. A Tabela 27 (linhas B1 e A3) mostra que, embora o TL-02, interceptado pela *anomalia*, apresente maior permeabilidade e o dobro do valor de SE/m que o TL-13 não atingido pela feição, a parcela afetada pelos fenômenos de fragmentação e desintegração foi menor que aquela do TL-13, provavelmente em função da sua matriz arenosa/siltosa;

TABELA 27 - Caracterização geológico-geotécnica dos horizontes de brecha basáltica

Catego ria das amostras		Descri ção		SE/m (m ⁻²)	Grau de Alteração	Grau de Coerência	Grau de Fraturamento	Permeabi- lidade (cm/s)	SE _(F4+F5) (%)	Fr + D (%)
A	1	brecha aglomerática	TL-02	66,30	A1 - 32% A2 - 68% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 64% F2 - 13% F3 - 23% F4 - 0% F5 - 0%	$\leq 10^{-5}$ - 74% 10^{-4} - 26% 10^{-3} - 0% 10^{-2} - 0%	0	11
	2		TL-05	145,86	A1 - 49% A2 - 51% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 84% C2 - 16% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 22% F2 - 38% F3 - 37% F4 - 3% F5 - 0%	$\leq 10^{-5}$ - 100% 10^{-4} - 0% 10^{-3} - 0% 10^{-2} - 0%	23	6
	3	brecha basáltica arenosa/silosa	TL-13	589,72	A1 - 0% A2 - 100% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 0% C2 - 100% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 29% F3 - 51% F4 - 14% F5 - 6%	$\leq 10^{-5}$ - 38% 10^{-4} - 62% 10^{-3} - 0% 10^{-2} - 0%	78	63
B	1	brecha aglomerática	TL-02	1 171,06	A1 - 0% A2 - 0% A3 - 100% A4 - 0%	C1 - 0% C2 - 100% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 0% F3 - 68% F4 - 16% F5 - 16%	$\leq 10^{-5}$ - 0% 10^{-4} - 0% 10^{-3} - 100% 10^{-2} - 0%	88	40
	2		TL-05	1 398,79	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 0% F3 - 68% F4 - 11% F5 - 21%	$\leq 10^{-5}$ - 0% 10^{-4} - 0% 10^{-3} - 0% 10^{-2} - 100%	90	100
	3	brecha basáltica arenosa/silosa	TL-13	4 951,21	A1 - 0% A2 - 0% A3 - 100% A4 - 0%	C1 - 0% C2 - 0% C3 - 100% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 0% F3 - 7% F4 - 6% F5 - 87%	$\leq 10^{-5}$ - 0% 10^{-4} - 0% 10^{-3} - 0% 10^{-2} - 100%	99	100

Legenda:

A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

SE/m - superfície específica por metro linear de testemunho de sondagem

SE_(F4+F5) - parcela da superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5

Fr + D - parcela de incidência dos fenômenos de fragmentação e de desintegração ao final do ensaio (3121º ciclo)

Nota: Para a legenda dos parâmetros geológico-geotécnicos, ver Quadros 17 e 18.

d) a influência da feição *anomalia* sobre o comportamento dos tipos litológicos é tanto maior quanto menor for a parcela referente aos fenômenos de fragmentação e desintegração, nas amostras por ela não interceptadas, o que pode ser verificado conforme segue:

Categoria das amostras	Fragmentação + Desintegração (%)		
	TL - 05	TL - 02	TL - 13
A	6	11	63
B	100	40	100
B/A	16,7	3,6	1,6

A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*

B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

A parcela de amostras afetadas por esses dois fenômenos, no caso do TL-05, que era inicialmente baixa, aumentou cerca de 17 vezes, enquanto que, para o TL-13, essa parcela, inicialmente alta, aumentou cerca de duas vezes.

8.3.4.5 Comportamento do basalto vesicular e/ou amigdaloidal

A Figura 40 exhibe os gráficos de acompanhamento do ensaio para os tipos litológicos TL-03/06/10/14, dos horizontes de basalto vesicular e/ou amigdaloidal, cinza-claro a cinza-avermelhado, com amígdalas mili a centimétricas preenchidas por mineral verde e/ou material argilo-siltoso, sedoso, preto, de contornos esverdeados.

Também nesse caso, a velocidade de ataque, para ambas as categorias de amostras, incidiu com coeficientes angulares geralmente decrescentes, intercalados por patamares com coeficientes praticamente nulos. A quantidade de patamares variou de um a três; a duração dos patamares inicial e intermediário foi entre 289 e 1.621 dias (valor médio: 642 ± 564 dias; $N = 5$) e a do patamar final, entre 501 e 2.981 dias (valor médio: 1.952 ± 904 dias; $N = 5$).

Os fenômenos que atuaram mais intensamente foram os de rachadura e fendilhamento, para os TL-03/06/10 e de fragmentação, para o TL-14. No caso do TL-06 e do TL-10, a porcentagem de amostras não afetadas durante o ensaio foi superior a 50%.

A Tabela 28 mostra a conjugação dos parâmetros utilizados para a análise do comportamento desses tipos litológicos no ensaio. Para os TL-03/06/10, não interceptados pela feição, as porcentagens de amostras afetadas pelos fenômenos de fragmentação e desintegração, ao final do ensaio, foram nulas ou inferiores a 5%; nesses casos, embora os valores de

FIGURA 40 - Gráficos de acompanhamento do ensaio de alterabilidade natural dos tipos litológicos representativos do basalto vesicular e/ou amigdaloidal.

TABELA 28 - Caracterização geológico-geotécnica dos horizontes de basalto vesicular e/ou amigdaloidal

Catego ria das amostr as		Descri ção		SE/m (m ⁻²)	Grau de Alteração	Grau de Coerência	Grau de Fraturamento	Permeabi- lidade (cm/s)	SE _(F4+F5) (%)	Fr + D (%)
A	1	cinza-claro	TL-03	33,37	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 100% F2 - 0% F3 - 0% F4 - 0% F5 - 0%	≤10 ⁻⁵ - 100% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 0%	0	0
	2		TL-06	98,95	A1 - 58% A2 - 42% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 79% C2 - 21% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 30% F2 - 48% F3 - 22% F4 - 0% F5 - 0%	≤10 ⁻⁵ - 100% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 0%	0	0
	3		TL-14	952,11	A1 - 0% A2 - 100% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 0% C2 - 100% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 0% F3 - 16% F4 - 84% F5 - 0%	≤10 ⁻⁵ - 100% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 0%	97	100
	4	cinza-avermelhado	TL-10	77,82	A1 - 0% A2 - 100% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 64% C2 - 36% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 73% F2 - 0% F3 - 27% F4 - 0% F5 - 0%	≤10 ⁻⁵ - 100% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 0%	0	5
B	1	cinza-avermelhado	TL-10	1 529,11	A1 - 0% A2 - 100% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 9% F2 - 0% F3 - 51% F4 - 18% F5 - 22%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 100% 10 ⁻² - 0%	91	7

Legenda:

A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

SE/m - superfície específica por metro linear de testemunho de sondagem

SE_(F4+F5) - parcela da superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5

Fr + D - parcela de incidência dos fenômenos de fragmentação e de desintegração ao final do ensaio (3121º ciclo)

Nota: Para a legenda dos parâmetros geológico-geotécnicos, ver Quadros 17 e 18.

SE/m sejam crescentes, ainda que de pequena magnitude, as amostras apresentaram-se com os mais baixos valores de permeabilidade, dentro do espectro investigado, e com valores nulos das parcelas da superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5.

Por outro lado, as inversões nas tendências registradas no TL-14 (fora da *anomalia*) e no TL-10 (interceptado pela feição) não são passíveis de ser analisadas apenas pelos parâmetros aqui utilizados, sugerindo a atuação de outros fatores, tais como variação na composição mineralógica e/ou textura, estado microfissural, entre outros.

8.3.4.6 Comportamento do basalto compacto

A Figura 41 ilustra os gráficos de acompanhamento do ensaio para os tipos litológicos TL-01/04/07/08/09/11/12/15, dos horizontes de basalto compacto dos derrames F a B.

Com relação à velocidade de ataque das amostras ao longo do ensaio, verificou-se, também neste caso, comportamento similar aos descritos anteriormente (itens 8.3.4.4 e 8.3.4.5). Ademais, a maior quantidade de ensaios aqui analisados (15 ao todo) permitiu melhor diferenciação entre os tipos de comportamento da velocidade de ataque, a saber:

- a) elevado coeficiente angular, da ordem de 0,7% de ataque/ciclo nos primeiros 4,5 meses de ensaio (até o 140º ciclo), que corresponde a 100% das amostras atacadas nesse período, seguido por um patamar final, com duração de cerca de 2.981 dias, a exemplo dos tipos litológicos TL-08/09/11/15/12/07, nos trechos interceptados pela *anomalia*;
- b) elevado coeficiente angular, da ordem de 0,5% de ataque/ciclo nos primeiros 4,5 meses de ensaio (até o 140º ciclo), que corresponde a cerca de 70% de amostras atacadas nesse período, seguido por um trecho de transição, com coeficiente angular da ordem de 5% do anterior, para, então, atingir o patamar final, com duração variando de 1.678 a 2.692 dias (valor médio: 2.117 ± 435 dias; $N = 4$). Enquadram-se nessa descrição os tipos litológicos TL-01/04/07/08 não interceptados pela *anomalia*; e
- c) curvas constituídas de dois a três patamares, separados por trechos com coeficientes angulares variáveis, ora crescentes, ora decrescentes. A duração dos patamares inicial e intermediário foi entre 69 e 1.175 dias (valor médio: 455 ± 403 dias; $N = 7$) e a do patamar final foi entre 501 e 2.535 dias (valor médio: 1.671 ± 804 dias; $N = 5$). Incluem-se nessa descrição os TL-09/11/12/15, não interceptados pela *anomalia* e o TL-04, atingido por essa feição.

FIGURA 41 - Gráficos de acompanhamento do ensaio de alterabilidade natural dos tipos litológicos representativos do basalto compacto.

(continua)

(continuação)

FIGURA 41 - Gráficos de acompanhamento do ensaio de alterabilidade natural dos tipos litológicos representativos do basalto compacto.

(continua)

(continuação)

Notas:

(A)– amostras não–interceptadas pela feição *anomalia*

(B)– amostras interceptadas pela feição *anomalia*

Fonte: Anexo A

FIGURA 41 - Gráficos de acompanhamento do ensaio de alterabilidade natural dos tipos litológicos representativos do basalto compacto.

Interessante ressaltar que, de todos os gráficos analisados, apenas o TL-09, fora da feição, iniciou o ensaio com coeficiente angular nulo durante os primeiros 14 meses (429º ciclo).

Para as amostras não interceptadas pela *anomalia*, os fenômenos que atuaram com maior intensidade foram os de lasqueamento, rachadura e fendilhamento, para os TL-01/04/09/11/12/15, com valores individuais variando de 25% a 62% ao final do ensaio, e os de desintegração para os TL-07/08, com valores da ordem de 40%.

No caso das amostras interceptadas pela feição, os fenômenos que incidiram com maior intensidade foram os de desintegração, para os TL-07/08/11/12/15 (de 36% a 78% ao final do ensaio), e de rachadura, para os TL-04/09 (51% e 77% ao final do ensaio, respectivamente).

A análise do desempenho desses tipos litológicos apresentou obstáculo adicional, relativo ao estabelecimento do critério de sua hierarquização. Além do agrupamento por categorias de amostras, tentou-se, também, o ordenamento conforme a tonalidade (cinza-claro, cinza-avermelhado, cinza-claro/amarelado e cinza-escuro com minerais verdes disseminados pela matriz), partindo-se do pressuposto de que tal critério pudesse sugerir variações na composição mineralógica capazes de interferir no desempenho. Entretanto, essa premissa, embora válida como linha de raciocínio, revelou-se ineficaz para o propósito em questão. Tampouco a disposição em ordem crescente de valores de superfície específica por metro linear (SE/m) alcançou o objetivo pretendido. Dessa maneira, a Tabela 29 mostra a conjugação dos parâmetros utilizados para a análise do comportamento dos tipos litológicos, dispostos segundo as categorias de amostras e das porcentagens referentes aos fenômenos de fragmentação e desintegração ao final do ensaio.

Para as amostras não interceptadas pela *anomalia*, os resultados podem ser reunidos em três subgrupos:

1º) baixa porcentagem de incidência dos fenômenos de fragmentação e desintegração ao final do ensaio, inferior a 10%, e SE/m variável. Nesse caso, as porcentagens de perdas estão, *grosso modo*, associadas ao aumento da permeabilidade e da parcela de superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5 (SE_{F4+F5}). Enquadram-se nesse subgrupo os TL-09/15/04/11;

2º) alta porcentagem de ocorrência dos fenômenos de fragmentação e desintegração ao final do ensaio, superior a 50%, e valores crescentes de SE/m e de SE_{F4+F5} . Incluem-se nesse subgrupo os TL-08/07; e

3º) baixa porcentagem de ocorrência dos fenômenos de fragmentação e desintegração ao final do ensaio, inferior a 10%, valores crescentes, comparativamente os mais elevados, de SE/m, de SE_{F4+F5} , bem como de permeabilidade, a exemplo dos TL-12/01.

TABELA 29 - Caracterização geológico-geotécnica dos horizontes de basalto compacto

Catego ria das amostr as		Descri ção		SE/m (m ²)	Grau de Alteração	Grau de Coerência	Grau de Fraturamento	Permeabi- lidade (cm/s)	SE _(F4+F5) (%)	Fr + D (%)
A	1	cinza-claro	TL-09	196,73	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 40% F2 - 0% F3 - 53% F4 - 7% F5 - 0%	≤10 ⁻⁵ - 100% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 0%	34	4
	2		TL-15	77,78	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 100% F3 - 0% F4 - 0% F5 - 0%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 100% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 0%	0	5
	3	cinza-claro, com minerais verdes disseminados	TL-04	77,73	A1 - 90% A2 - 10% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 51% F2 - 43% F3 - 5% F4 - 0% F5 - 1%	≤10 ⁻⁵ - 100% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 0%	38	7
	4	cinza-claro a amarelado	TL-11	438,62	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 14% F2 - 18% F3 - 60% F4 - 3% F5 - 5%	≤10 ⁻⁵ - 71% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 29% 10 ⁻² - 0%	66	10
	5	cinza-escuro, com minerais verdes disseminados	TL-08	221,42	A1 - 98% A2 - 2% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 36% F2 - 14% F3 - 46% F4 - 2% F5 - 2%	≤10 ⁻⁵ - 92% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 8% 10 ⁻² - 0%	52	52
	6	cinza-claro a amarelado	TL-07	448,84	A1 - 0% A2 - 100% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 73% C2 - 27% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 47% F2 - 8% F3 - 37% F4 - 2% F5 - 6%	≤10 ⁻⁵ - 100% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 0%	79	62
	7	cinza-avermelhado	TL-12	319,24	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 12% F2 - 25% F3 - 58% F4 - 2% F5 - 3%	≤10 ⁻⁵ - 71% 10 ⁻⁴ - 9% 10 ⁻³ - 20% 10 ⁻² - 0%	56	7
	8	cinza-claro	TL-01	1 115,52	A1 - 98% A2 - 2% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 98% C2 - 2% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 7% F2 - 19% F3 - 44% F4 - 15% F5 - 15%	≤10 ⁻⁵ - 79% 10 ⁻⁴ - 8% 10 ⁻³ - 13% 10 ⁻² - 0%	90	7

(continua)

(continuação)

TABELA 29 - Caracterização geológico-geotécnica dos horizontes de basalto compacto

Categoria das amostras		Descrição		SE/m (m ⁻²)	Grau de Alteração	Grau de Coerência	Grau de Fraturamento	Permeabilidade (cm/s)	SE _(F4+F5) (%)	Fr + D (%)
B	1	cinza-claro	TL-09	47,68	A1 - 0% A2 - 100% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 100% F2 - 0% F3 - 0% F4 - 0% F5 - 0%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 100% 10 ⁻² - 0%	0	0
	2	cinza-claro, com minerais verdes disseminados	TL-04	648,98	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 0% F3 - 82% F4 - 11% F5 - 7%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 0% 10 ⁻² - 100%	74	25
	3	cinza-claro a amarelado	TL-11	1 386,98	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 27% F3 - 32% F4 - 21% F5 - 20%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 100% 10 ⁻² - 0%	94	43
	4	cinza-avermelhado	TL-12	2 209,35	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 0% F3 - 54% F4 - 11% F5 - 35%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 100% 10 ⁻² - 0%	95	68
	5	cinza-claro a amarelado	TL-07	1 493,15	A1 - 33% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 67%	C1 - 33% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 67%	F1 - 20% F2 - 0% F3 - 51% F4 - 5% F5 - 24%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 100% 10 ⁻² - 0%	92	76
	6	cinza-escuro, com minerais verdes disseminados	TL-08	1 416,88	A1 - 100% A2 - 0% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 100% C2 - 0% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 20% F3 - 42% F4 - 17% F5 - 21%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 0% 10 ⁻³ - 100% 10 ⁻² - 0%	93	85
	7	cinza-claro	TL-15	2 886,12	A1 - 45% A2 - 55% A3 - 0% A4 - 0%	C1 - 45% C2 - 55% C3 - 0% C4 - 0%	F1 - 0% F2 - 0% F3 - 39% F4 - 12% F5 - 49%	≤10 ⁻⁵ - 0% 10 ⁻⁴ - 54% 10 ⁻³ - 46% 10 ⁻² - 0%	97	85

Legenda:

A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

SE/m - superfície específica por metro linear de testemunho de sondagem

SE_(F4+F5) - parcela da superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5

Fr + D - parcela de incidência dos fenômenos de fragmentação e de desintegração ao final do ensaio (3121º ciclo)

Nota: Para a legenda dos parâmetros geológico-geotécnicos, ver Quadros 17 e 18.

Fica nítido que os parâmetros aqui utilizados foram insuficientes para a interpretação do comportamento dos tipos litológicos, principalmente no caso do terceiro subgrupo, reforçando o argumento a favor da atuação conjunta de outros fatores associados às características petrográficas, tais como composição mineralógica, estrutura, textura, estado microfissural, entre outros.

Para as amostras interceptadas pela feição *anomia*, as porcentagens progressivamente crescentes de incidência dos fenômenos de fragmentação e desintegração sugerem estar diretamente relacionadas com o aumento dos valores de SE/m , de SE_{F4+F5} e da permeabilidade. Nesse caso, é razoável admitir que a influência desta feição tenha superado aquela exercida pelas características intrínsecas que particularizaram o comportamento dos tipos litológicos, tornando-os, assim, mais homogêneos do ponto de vista do desempenho nesse ensaio.

8.3.4.7 Síntese do comportamento

Analisando-se conjuntamente os dados das Tabelas 27 a 29, nota-se que, para cada categoria de amostras, é possível reconhecer alguns intervalos de variação das porcentagens de fenômenos de fragmentação e desintegração incidentes ao final do ensaio (Tabela 30). Além disso, verifica-se, novamente, que o desempenho dos tipos litológicos está vinculado, ainda que de maneira não-exclusiva, aos parâmetros utilizados na análise do seu comportamento.

A Figura 42 exibe as velocidades médias de alteração para o 84° (K_{84}), 360° (K_{360}) e 3.121° ($K_{3.121}$) ciclos de ensaio. Para as amostras não interceptadas pela *anomia*, as velocidades médias permaneceram, respectivamente, entre 0,1071-0,0004%, 0,0850-0,0004% e 0,0320 - 0,0004% de perdas por ciclo, que correspondem a períodos de tempo experimental variando de 2,6 - 685 anos, 3,2 - 685 anos e 8,8 - 685 anos para a desagregação total. No caso das amostras interceptadas pela feição, as velocidades médias situaram-se, respectivamente, entre 0,5643 - 0,0004%, 0,2539 - 0,0004% e 0,0320 - 0,0004% de perdas por ciclo, com períodos de tempo experimental variando de 0,5 - 685 anos, 1,1 - 685 anos e 8,8 - 685 anos para a desagregação completa.

8.3.5 Comparação entre os resultados quantitativos

A Figura 43 reúne as curvas teóricas de alteração obtidas a partir dos ensaios de alterabilidade água-estufa e natural, realizados com fragmentos de rocha e em testemunhos de sondagens, com amostras dos TL-01/04/05/07/08, não interceptados pela feição *anomia*.

TABELA 30 - Intervalos de variação das porcentagens de fenômenos de fragmentação e de desintegração ao final do ensaio de alterabilidade natural (3121º ciclo).

Categoria de amostras	Fr+D (%)	SE/m (m ⁻²)	SE _(F4+F5) (%)	K (cm/s)
A	≤ 11 N = 11	≤ 200 - 73% 200 - 500 - 18% 500 - 1500 - 9%	≤ 60 - 82% > 60 - 18%	≤ 10 ⁻⁵ - 81% 10 ⁻⁴ - 13% 10 ⁻³ - 6%
	~ 50 N = 1	200 - 500 - 100%	20 - 60 - 100%	10 ⁻⁵ - 92% 10 ⁻³ - 8%
	≥ 60 N = 3	500 - 1500 - 100%	> 60 - 100%	10 ⁻⁵ - 79% 10 ⁻⁴ - 21%
B	≤ 7 N = 2	≤ 200 - 50% 1500 - 3000 - 50%	≤ 60 - 50% > 60 - 50%	10 ⁻³ - 100%
	25 - 43 N = 3	500 - 1500 - 100%	> 60 - 100%	10 ⁻³ - 66% 10 ⁻² - 34%
	≥ 60 N = 6	500 - 1500 - 50% 1500 - 3000 - 33% 3000 - 5000 - 17%	> 90 - 100%	10 ⁻⁴ - 9% 10 ⁻³ - 58% 10 ⁻² - 33%

Fonte: Tabelas 27 a 29

Legenda:

A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*

B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

Fr + D - parcela de incidência dos fenômenos de fragmentação e de desintegração ao final do ensaio (3121º ciclo)

SE/m - superfície específica por metro linear de testemunho de sondagem

SE_(F4+F5) - parcela da superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5

K - coeficiente de permeabilidade

Tipo Litológico e número do ensaio		K _{acumulado} (% perdas/ciclo)				
TL-01	(A)	Δ□				
TL-02	(A)		□ Δ *			
	(B)		□	Δ *		
TL-03	(A)					
TL-04	(A)	□	Δ *			
	(B)		* □ Δ			
TL-05	(A)	□	Δ *			
	(B)			□ * Δ		
TL-06	(A)					
TL-07	(A)		□	Δ *		
	(B)		□	Δ *	*	
TL-08	(A)		* Δ □			
	(B)		Δ □			
TL-09	(A)	□				
	(B)					
TL-10	(A)	□				
	(B)	□				
TL-11	(A)		Δ □ *			
	(B)		□	Δ *		
TL-12	(A)	□	Δ *			
	(B)		□	Δ		
TL-13	(A)		□	Δ *		
	(B)			□	Δ *	
TL-14	(A)			□	Δ	
TL-15	(A)	□				
	(B)		□	Δ *		
K _{acumulado} (% perdas/ciclo)		0,001	0,0027	0,01	0,027	0,1 0,27 1
Escala de tempo experimental	dias	100.000	10.000	1.000	100	
	anos	500	100 50	10 5	1	

- Notas: - 1 ciclo = 1 dia;
 - Tempo experimental necessário para desagregação total (perdas acumuladas dos fenômenos de fragmentação e desintegração = 100 %);
 - Valores obtidos, por interpolação, do Anexo A.
 - As velocidades médias não plotadas correspondem a valores de K_{acumul.} inferiores a 0,0004 % de perdas/ciclo
- Legenda: - (A) - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*
 - (B) - amostras interceptadas pela feição *anomalia*
 * - velocidade média no 84º ciclo
 Δ - idem, no 360º ciclo
 □ - idem, no 3121º ciclo

FIGURA 42 - Comparação entre as velocidades médias de alteração referentes aos 84º, 360º e 3121º ciclos do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.

Para cada tipo litológico, estas curvas foram agrupadas de acordo com os seguintes critérios:

- a) equivalência entre faixas granulométricas, no caso dos ensaios com fragmentos de rocha; e
- b) porcentagens de fenômenos de fragmentação e desintegração incidentes no ensaio com testemunhos de sondagens. Esses valores (Anexo A) foram tomados como referência para a análise da redução de granulometria e da perda de material.

Entretanto, há que se ressaltar, ainda, dois outros aspectos que interferiram na comparação dos resultados:

- a) as curvas teóricas obtidas a partir do ensaio realizado em testemunhos de sondagens não puderam ser diretamente relacionadas com as dos demais ensaios, em virtude das grandes distorções produzidas pelo efeito de escala (Anexo I); e
- b) as perdas de massa resultantes dos ensaios água-estufa e natural (faixa granulométrica única) foram calculadas a partir do material retido na peneira de malha 19 mm (3/4") (itens 5.2.8.1a e 5.2.8.2a). Entretanto, para o ensaio de alterabilidade natural com seis faixas granulométricas, tais perdas foram obtidas a partir do material retido na peneira de malha 25 mm (1"), no caso do TL-01, e na peneira de malha 50 mm (2"), para os ensaios com os TL-04/05/07/08, a fim de atender ao critério de equivalência entre as faixas granulométricas (Anexo F). Conseqüentemente, as perdas acumuladas desse último ensaio apresentaram defasagem sistemática em relação aos outros dois métodos, por ter sido computado como perdas o material situado entre as faixas granulométricas 50/25 mm e 19 mm. Por isso, a defasagem foi maior para os TL-04/05/07/08, e menor para o TL-01. Caso as massas de material daquela faixa granulométrica não tivessem sido excluídas do cálculo, os valores das perdas acumuladas teriam sido menores, sendo provável que as curvas teóricas então obtidas fossem paralelas às indicadas na Figura 43, estando, porém, posicionadas à sua direita.

Comparando-se os resultados dos ensaios de alterabilidade água-estufa e natural (com uma e seis faixas granulométricas) e levando-se em consideração as ressalvas anteriormente apresentadas, verificaram-se, de maneira geral, os seguintes padrões de comportamento:

- a) as velocidades de alteração imprimidas por tais ensaios são respectivamente decrescentes, nessa ordem. Assim, para obter a mesma porcentagem de perda acumulada, é necessário maior número de ciclos (dias) nos ensaios de alterabilidade natural que no de água-estufa. Exemplificando: para alcançar perdas acumuladas

FIGURA 43 - Curvas teóricas obtidas a partir de diferentes ensaios de alterabilidade.

(continua)

(continuação)

FIGURA 43 - Curvas teóricas obtidas a partir de diferentes ensaios de alterabilidade.

(continua)

LEGENDA

Gráfico	Ensaio	Método	Referência
(X)	— água-estufa	LCEC/MCA-13	Anexo E
	- - - alterabilidade natural	LCEC/MCA-14	Tabela 16
	- . - meteorização	LCEC/MRL-01	Tabelas 17 a 24
(Y)	- - - alterabilidade natural de testemunhos de sondagens	item 6 deste trabalho	Anexo A

(1) (2) (3) - número do ensaio (consultar os Anexos A e E e as Tabelas 16 a 24).

- Notas:
- 1) As curvas mostradas nos gráficos - (X), de cada tipo litológico, são aquelas que apresentam equivalência entre as faixas granulométricas dos respectivos métodos de ensaios. Para detalhes, ver Anexo F.
 - 2) As curvas dos gráficos - (Y) não podem ser diretamente relacionadas, sob o aspecto quantitativo, àquelas dos gráficos - (X), devido às distorções produzidas pelo efeito de escala. Para detalhes, ver Anexo I.

FIGURA 43 - Curvas teóricas obtidas a partir de diferentes ensaios de alterabilidade.

de 10% com amostras do TL-01, são necessários 58 dias no ensaio água-estufa (Anexo E; ensaio nº 1) e 218 dias no de alterabilidade natural com faixa granulométrica única (Tabela 16). Nesse caso, o ensaio água-estufa acelerou o processo de alteração em cerca de quatro vezes;

b) as velocidades de alteração imprimidas por esses ensaios são diferentes em cada tipo litológico. Exemplificando: para atingir 10% de perdas acumuladas com amostras do TL-08, são necessários 20 dias no ensaio água-estufa (Anexo E; ensaio nº 1) e 227 dias no de alterabilidade natural com faixa granulométrica única (Tabela 16). Aqui, o ensaio água-estufa acelerou em cerca de 11 vezes o processo de alteração; e

c) o maior paralelismo observado entre algumas das curvas obtidas a partir desses métodos de ensaio parece sugerir que as condições de simulação tenham sido similares. No caso do TL-01 (Figura 43), esse padrão ocorre entre o ensaio nº 5 de alterabilidade água-estufa e aqueles realizados pelos demais métodos. Para o TL-04, ocorre o paralelismo das curvas nº 4 e nº 9 do ensaio água-estufa com aquela do ensaio de alterabilidade natural com seis faixas granulométricas, bem como das curvas nº 1, nº 7 e nº 6 do ensaio água-estufa com as curvas nº 2, nº 3 e nº 4 do ensaio de alterabilidade natural com faixa granulométrica única, respectivamente. Para o TL-05, verifica-se esse padrão entre a curva nº 1 do ensaio água-estufa com aquela do ensaio de alterabilidade natural com seis faixas granulométricas. Finalmente, no caso do TL-08, o paralelismo se verifica entre as curvas nº 1, nº 3 e nº 4 do ensaio água-estufa com as curvas nº 28 e nº 29 do ensaio de alterabilidade natural com seis faixas granulométricas.

Para as curvas teóricas do ensaio de alterabilidade natural em testemunhos de sondagens, ainda que não passíveis de ser diretamente comparadas com aquelas obtidas pelos demais métodos, foi, também, verificado o mesmo padrão de comportamento no que se refere às diferenças de velocidades de alteração em cada tipo litológico, bem como ao paralelismo destas com algumas das curvas teóricas dos outros ensaios.

A Figura 44 exhibe a distribuição das velocidades médias finais de alteração em 44 ensaios de alterabilidade realizados com amostras dos TL-01/04/05/07/08. *Entende-se por velocidade média final o valor do coeficiente angular da curva teórica de alteração para a perda acumulada de massa igual a 100%.*

Notas:

- escala horizontal: velocidade média final (% de perdas/ciclo) para perdas acumuladas iguais a 100 %. Valores obtidos a partir das curvas teóricas de alterabilidade.
- escala vertical: percentagem de incidência da velocidade média final.
- N: número de ensaios

FIGURA 44 - Histogramas de variação das velocidades médias finais de alteração em amostras dos tipos litológicos submetidos a diferentes métodos de ensaios de alterabilidade.

A análise comparativa dos resultados de tais ensaios foi feita levando-se em consideração as restrições já apontadas, o que permitiu agrupá-los conforme segue:

a) **alterabilidade água-estufa e natural (faixa granulométrica única)**: os histogramas totais revelam que, em cerca de 50% dos ensaios, as velocidades médias finais foram iguais ou superiores a 0,1% de perda/ciclo, que corresponde ao período de tempo experimental de 1.000 ciclos, aproximadamente três anos, para a completa desagregação das amostras. Enquadram-se nessa descrição os TL-04/05/07/08, enquanto que, para o TL-01, essas velocidades finais foram inferiores a 0,01% de perda/ciclo, ou seja, período de tempo experimental superior a 10.000 ciclos, aproximadamente 27,5 anos, para a desagregação total.

Os histogramas sugerem, também, que o ensaio água-estufa tenha sido mais enérgico que o de alterabilidade natural, a julgar pelas maiores velocidades finais, superiores a 0,1% de perda/ciclo no primeiro (54%) que no segundo (43%);

b) **ensaio de alterabilidade natural (seis faixas granulométricas)**: os histogramas totais indicam que as velocidades médias finais de alteração estão posicionadas, em igual porcentagem, nos intervalos 0,1 - 0,001 e 10^{-5} - 10^{-6} % de perda/ciclo. Os tipos litológicos TL-07/08 enquadram-se no primeiro intervalo, com período de tempo experimental variando de 1.000 a 100.000 ciclos (de 3 a 274 anos) para a desagregação total, enquanto que os TL-01/04/05 se ajustam no segundo; e

c) **ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens**: as velocidades médias finais situaram-se no intervalo de 0,01 a 0,0001% de perda/ciclo, com período de tempo experimental variando de 10.000 a 1.000.000 de ciclos (27,5 a 2.740 anos) para a desagregação completa. As velocidades mais elevadas estão associadas aos TL-07/08, enquanto que os ensaios com amostras dos TL-01/04/05 indicaram velocidades menores.

Em síntese, os TL-01/04/08/07, representativos de alguns dos horizontes de basalto compacto, exibiram, nessa ordem, velocidades médias finais progressivamente crescentes, indicando, assim, suscetibilidade crescente à alteração. O ordenamento obtido através desses ensaios corrobora aquele apresentado na Tabela 13, relativo à hierarquização dos tipos litológicos segundo algumas de suas propriedades físicas e mecânicas.

9 EMPREGO DAS ROCHAS BASÁLTICAS COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO NA UHE CANOAS I

9.1 Origem dos materiais

O projeto da UHE Canoas I contemplou a utilização de materiais rochosos provenientes das *escavações obrigatórias*, de *pedreiras*, situadas em ambas as margens, e de *remanuseio de estoques* formados para a alimentação da central de britagem e para a execução de obras futuras (desvio do rio de segunda fase, por exemplo).

As *escavações obrigatórias*, necessárias para a implantação das estruturas, atingiram os basaltos dos derrames F, E e D (Figura 18).

As *pedreiras*, planejadas para a extração do basalto compacto do derrame F (TL-01), são três: uma na margem direita (PE-D1), em exploração, e duas na margem esquerda (PE-E1 e PE-E2), ainda não instaladas. Situam-se a jusante da obra, com distâncias variando de 500 a 1.500 m do eixo da barragem; o topo rochoso não se desenvolve entre 2 e 13 m de profundidade.

Os *estoques da central de britagem* estão sendo utilizados para o processamento dos agregados graúdos e de areia artificial, destinados à produção de concreto e à construção de transições e filtros das barragens de terra e enrocamento.

Na margem esquerda, foi estocado parte do material escavado no canal de desvio (basalto compacto de derrame F), além daquele transportado a partir do estoque da margem direita, necessários para a execução do desvio do rio de segunda fase; tais volumes, acrescidos dos extraídos da(s) pedreira(s) da margem esquerda, deverão, também, atender às necessidades relativas à construção da barragem principal (barragem de terra da margem esquerda).

9.2 Destino do material

A utilização de material rochoso em obras de construção de barragens, tal como ocorre na UHE Canoas I, destina-se, basicamente, ao fornecimento de agregados para concreto e à construção de enrocamentos e transições.

O projeto da UHE Canoas I previu a utilização de cerca de 145.000 m³ de concreto para as obras de geração e extravasão, dos quais 71% já haviam sido executados até setembro/94 (CESP, s.d.).

As *estruturas de concreto* possuem extensão aproximada de 180 m e altura máxima de 49 m, a partir da fundação, no local do poço de drenagem.

Os agregados para concreto estão sendo obtidos através da britagem do basalto compacto do derrame F (TL-01), complementados com areia artificial. Quanto à sua graduação granulométrica, foram classificados conforme segue:

Tipo de agregado		Faixa granulométrica
grauído	brita nº 4	152 mm - 76 mm / 6" - 3"
	brita nº 3	76 mm - 38 mm / 3" - 1 1/2"
	brita nº 2	38 mm - 19 mm / 1 1/2" - 3/4"
	brita nº 1	19 mm - 4,8 mm / 3/4" - # nº 4"
miúdo	areia artificial	4,8 mm - 0,075 mm / # nº 4" - nº 200"

Fonte: CESP (1990)

Obs: #nº 4 - peneira nº 4

Não foram observadas, nos entornos da obra, ocorrências de cascalheiras com as quantidades e características tecnológicas exigidas pelo projeto (CESP, 1990).

Com relação à areia natural, são escassas as fontes disponíveis na região e, quando detectadas, são imediatamente exploradas por terceiros. Os volumes estão aquém das necessidades da obra, além de apresentar granulação fina, não se enquadrando na faixa granulométrica exigida para o agregado miúdo destinado ao concreto (CESP, 1990). Em virtude disso, aliado às distâncias de transporte, com reflexos diretos nos custos, optou-se pela utilização de areia artificial.

Para a execução das estruturas de desvio e dos aterros compactados, está prevista a exploração de, aproximadamente, 232.500 m³ (CESP, 1992) de material rochoso para *enrocamento, transições e filtros*, que deverão ser obtidos a partir das escavações obrigatórias e das pedreiras. Até setembro/94, já haviam sido executados 42% dessas obras (CESP, s.d.).

Os principais segmentos da barragem (obras definitivas) onde os materiais estão sendo ou deverão ser empregados são:

- a) *barragem da margem direita*: do tipo seção mista, de enrocamento com núcleo argiloso, apoiada sobre o topo rochoso, com extensão aproximada de 71,5 m e altura de 21,3 m, a partir da fundação (Figuras 17 e 45a);
- b) *barragem principal*: do tipo seção mista, de solo e enrocamento compactados, apoiada sobre rocha sã, nos trechos do leito do rio e do canal de desvio, e com fundação em rocha extremamente alterada e coluvião, em direção à ombreira esquerda. Possui cerca de 420 m de comprimento e altura máxima de 28 m (Figuras 17 e 45b e 45c); e
- c) *pátio de manobras e subestação*.

Além dessas estruturas, os materiais foram e serão, também, utilizados em obras provisórias, relativas à construção das ensecadeiras de primeira e segunda fases.

LEGENDA

S1 - SOLO COMPACTADO	E2A - ENROC. NÃO-DESAGREG., COMPACT., $D_{50} = 0,60m$ (P/ R/P RAP)
F - FILTRO DE AREIA ARTIFICIAL, COMPACTADO	E2B - ENROC. NÃO-DESAGREG., COMPACT., $D_{50} = 0,50m$ (P/ R/P RAP)
T1 - TRANSIÇÃO FINA, COMPACTADA	----- PERFIL NATURAL DO TERRENO
T2 - TRANSIÇÃO GROSSA, COMPACTADA	----- PERFIL NATURAL DA ROCHA Sã
T3/T4 - TRANSIÇÃO AMPLA, COMPACTADA	----- PERFIL NATURAL DA ROCHA ALTERADA
E1 - ENROCAMENTO NÃO-DESAGREGÁVEL, COMPACTADO (P/ MACIÇO)	----- JUNTA SUB-HORIZONTAL
- NOTA: PARA LOCAÇÃO DAS SEÇÕES, VER FIGURA 17.

FIGURA 45 - Seções transversais típicas pelas estruturas.

O Quadro 21 mostra as categorias de material rochoso de construção das estruturas de concreto, terra e enrocamento, suas fontes de obtenção, locais de aplicação e métodos de colocação, devendo ser ressaltado que:

a) as dimensões dos enrocamentos das barragens foram as seguintes:

Estrutura	Espaldar	Granulometria (m)		
		d _{mín.}	d ₅₀	d _{máx.}
Barragem	montante	0,30	0,50	0,75
Principal	jusante	0,20	0,30	0,45
Barragem da Margem Direita	montante e jusante	0,30	0,50	0,75

Fonte: CESP (1995)

Legenda: d_{mín.} - diâmetro mínimo
d_{máx.} - diâmetro máximo
d₅₀ - diâmetro tal que 50% dos blocos apresentam diâmetros maiores ou menores;

b) os blocos de maior diâmetro foram concentrados e espalhados próximo dos espaldares e incorporados às zonas de grandes blocos;

c) os blocos de rocha foram controlados visualmente durante o carregamento, lançamento e compactação, para evitar possíveis contaminações com blocos mais desagregáveis (CESP, 1995); e

d) a produção de areia artificial, a partir do basalto compacto do derrame F (TL-01), foi feita utilizando-se o mesmo arranjo das instalações de britagem destinadas à obra principal, otimizando-se, porém, o processo, através da sua lavagem em equipamento do tipo "rosca-sem-fim", convenientemente acoplado ao esquema de produção, com o objetivo de reduzir a fração pulverulenta (diâmetro $\leq 0,075$ mm). Esta fração, da ordem de 16% antes da lavagem, ficou reduzida a cerca de 2% (CESP, 1995a), garantindo-se, assim, a manutenção dos coeficientes de permeabilidade das zonas de filtro com valores iguais ou superiores a 10^{-2} cm/s.

9.3 Balanceamento dos materiais rochosos

Durante a etapa do projeto executivo da UHE Canoas I, foi reanalisado o balanceamento dos materiais (CESP, 1992), no que se refere à disponibilidade dos volumes obtidos a partir das escavações obrigatórias, da exploração das jazidas e do remanuseio dos estoques, para atendimento

Material	Tipo	Descrição	Fontes de obtenção	Local de aplicação	Colocação
Enrocamento	E1	blocos resistentes, duráveis e não-desagregáveis de basalto compacto, basalto vesicular e/ou amigdaloidal e brecha aglomerática dos derrames F e E	- escavações obrigatórias; - pedreiras das margens direita e esquerda	barragem principal	compactado
				barragem da margem direita	
				ensecadeiras de 1ª e 2ª fases	lançado
	E2	blocos selecionados, duráveis e não-desagregáveis de basalto compacto do derrame F (<i>rip rap</i>)		barragem principal	compactado
				barragem da margem direita	
	E3	blocos de basalto compacto, basalto vesicular e/ou amigdaloidal e brecha aglomerática do derrame D		aterro do pátio de manobras	
Transição	T1	transição fina; brita graduada ($\varnothing_{\text{máx}} = 25\text{mm}$)	central de britagem	barragens principal e da margem direita	compactado
	T2	transição grossa; brita graduada ($\varnothing_{\text{máx}} = 100\text{mm}$)			
	T4	transição ampla; brita graduada ($\varnothing_{\text{máx}} = 100\text{mm}$)			
	T3	transição ampla de saprolito de basalto; brita graduada ($\varnothing_{\text{máx}} = 100\text{mm}$)	- áreas de empréstimo; - central de britagem	ensecadeiras de 1ª e 2ª fases	lançado
Filtro	F	areia artificial	central de britagem	barragens principal e da margem direita	compactado

Fonte: Des. CN1-5GE-C54-001-A1, Rev.2

QUADRO 21 - Categorias de materiais rochosos de construção das estruturas de concreto, terra e enrocamento.

das demandas construtivas dos diversos segmentos do empreendimento. Assim, foi possível, também, avaliar o volume de bota-fora, ou seja, de material escavado e não aproveitado por apresentar características tecnológicas incompatíveis com os parâmetros do projeto.

Para tornar viável o correto dimensionamento das exigências de materiais pétreos, transformaram-se os volumes das obras, medidos nas seções de projeto, em *volumes necessários no corte*, incluindo-se, então, as perdas previstas durante a escavação, carregamento, transporte e, no caso

dos materiais britados, no beneficiamento. Dessa maneira, foram calculados alguns índices que correlacionam as necessidades nos cortes e nas seções de projeto, conforme segue:

Volume na seção (2) Volume no corte (1)	Concreto	Enrocamento		Transição ou filtro, compactados
		compactado	lançado	
	(1) : (2)			
rocha	0,92	0,83	0,75	0,85

Fonte: CESP, 1992

A partir dos volumes necessários no corte, foram, finalmente, calculados os que serão, de fato, utilizados (*volumes utilizados medidos no corte*), descontando-se os volumes de bota-fora, referentes à decapagem de jazidas e demais materiais inadequados para o uso.

A utilização desses critérios possibilitou a elaboração de uma *planilha de origem-destino dos materiais*, da qual foi extraído o balanceamento do material rochoso (Tabela 31). A análise dos dados desta Tabela permite efetuar as seguintes ponderações:

- o volume total de rocha a ser movimentado é de, aproximadamente, 456.381 m^3 , sendo 82% (374.785 m^3) proveniente das escavações obrigatórias e 18% (81.596 m^3) originado da exploração de pedreiras;
- do montante de material das escavações obrigatórias, 22% (82.202 m^3) foi descartado por não apresentar características adequadas para utilização. Esse volume é composto de 77% de rocha extremamente alterada (63.444 m^3) e de 23% de rocha pertencente ao derrame D (18.758 m^3). Além destes, cerca de 2% (7.206 m^3) de rocha extremamente alterada foi utilizada como transição em obras provisórias;
- do total de material procedente das pedreiras, 20% (16.660 m^3) é constituído de rocha extremamente alterada; deste total, 62% (10.401 m^3) foi encaminhado para as áreas de bota-fora, enquanto que os restantes 38% (6.259 m^3), utilizados como transição em obras provisórias;
- dos 285.377 m^3 oriundos das escavações obrigatórias e com características tecnológicas compatíveis com as exigências do projeto, 60% (171.520 m^3) pertencem ao derrame F, 36% (103.452 m^3) ao derrame E e apenas 4% (10.405 m^3) ao derrame D;
- 100% do volume de rocha (a ser) extraído de pedreiras (64.936 m^3) é procedente do derrame F;

Destino	Origem	OBRAS				DESVIO								BARRAGENS						ATERROS	ESTRU- TURAS DE CON- CRETO	ESTOQUES				BOTA-FORA	
						Ensecadeira de 1ª fase				Pré-ensecadeiras de 2ª fase				Barragem principal			Barragem da margem direita					Margem Direita		Margem Esquerda	Margem Direita	Margem Esquerda	
Tramo longitudinal						Tramos transversais		Principais		Auxiliar		p/ britagem	p/obras de terra									p/obras de terra					
LOCAL DE ESCAVAÇÃO						Tipo de material				T	E	T	E	T	E	T	E	F	T			E	random	rocha	rocha	rocha	rocha
Escavações obrigatórias	Canal de desvio do rio	REA	68.600	5616	5616																					62.984	
		Rocha (F)	59.250	59.250		29.666																			29.584		
	Barragens: principal e da margem direita	REA	1590	1590					1.590																	460	
			460	-																							
	Estruturas de concreto	rocha (derrames)	F	112.270	112.270															112.270							
			E	103.452	103.452															29.415	74.037						
			D	29.163	10.405																	10.405		18.758			
	Lazidas	Pedreira - PE-D1	REA	8480	6049				6.049																	2.431	
			Rocha (F)	53.005	53.005				34.532												18.473						
		Pedreira - PE-E2	REA	8.180	210					210																	7970
Rocha (F)			11.931	11.931											11.931												
Remanuseio de estoques	Estoque da margem direita p/ obras de terra	rocha (derrames)	E	74.037	74.037						5.420			29.067			21.314	18.236									
			D	10.405	10.405														10.405								
	Central de britagem	areia	-	53.245									12.504			909			39.832								
		brita	-	106.913							774			13.770			2.959			89.410							
	Estoque de margem esquerda p/ obras de terra	rocha (F)	29.584	29.584						19.935					9.649												

Fonte: Des. CN1-5GE-C50-002-A1
Rel. CN1-5GE-C50-001-RE

Legenda: T - transição F - filtro
E - enrocamento REA - rocha extremamente alterada

TABELA 31- Origem e destino dos materiais rochosos utilizados nas obras de terra e estruturas de concreto

f) dos 363.778 m³ de rocha efetivamente destinada ao uso em obras definitivas e provisórias, a distribuição por categoria de material é a seguinte:

Local de utilização	Categoria de material	Volume (m ³)	%
Estruturas de Concreto	agregados (brita + areia)	129.242	36
Obras de Terra	transições	30.968	8
	filtros	13.413	4
	enrocamentos	190.155	52

g) dos 129.242 m³ de agregados para as obras de concreto, 69% (89.410 m³) correspondem às necessidades de britas (nº 1 a nº 4), enquanto que os 31% restantes (39.832 m³) se referem à areia artificial, considerando-se o traço médio previsto (cimento:areia:brita $\cong 1 : 3,4 : 7,7$); e

h) dos 53.245 m³ de areia artificial procedentes da central de britagem, 25% (13.413 m³) se destina à construção de filtros e tapetes drenantes das obras de terra definitivas, enquanto que os 75% restantes (39.832 m³) deverão ser empregados na produção de concreto.

No caso da UHE Canoas I, deve ser enfatizado que a escolha do material pétreo de construção foi amplamente favorecida pelo quadro geológico local. Dessa maneira, os tipos litológicos com melhores características tecnológicas, tal como o basalto compacto do derrame F (TL-01), estavam estratigraficamente posicionados em níveis coincidentes com o maior volume das escavações obrigatórias, reduzindo sobremaneira a necessidade de complementação através da exploração de pedreiras.

10 CONCLUSÕES

A análise dos dados coligidos nessa pesquisa deu suporte a um elenco de conclusões pertinentes às características tecnológicas das rochas basálticas presentes na área de implantação da UHE Canoas I, bem como aos métodos de ensaios utilizados para tal fim, que serão sumarizados a seguir.

10.1 Sobre as características geológicas e tecnológicas

- a) Os resultados dos ensaios executados refletiram a influência da feição *anomalia* na redução dos valores das propriedades tecnológicas dos tipos litológicos por ela interceptados.
- b) As propriedades tecnológicas apresentaram valores decrescentes na seguinte seqüência:
 - ba) amostras não interceptadas pela feição *anomalia*;
 - bb) amostras interceptadas pela feição *anomalia*; e
 - bc) amostras remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens, não interceptadas pela feição *anomalia*.
- c) Considerando apenas os resultados dos ensaios realizados com os tipos litológicos representativos do basalto compacto não interceptado pela feição *anomalia* e situados acima da linha de escavação, verificou-se a seguinte ordem decrescente de qualidade tecnológica:
 - ca) basalto compacto, derrame F (TL-01);
 - cb) idem. derrame E (TL-04);
 - cc) idem. derrame D (TL-08); e
 - cd) idem, derrame D (TL-07).
- d) As análises petrográficas realizadas não indicaram diferenças significativas que pudessem justificar comportamentos distintos dos diversos tipos litológicos, ao contrário do apontado pelos resultados dos demais ensaios tecnológicos.
- e) Tipos litológicos com características mineralógicas e/ou petrográficas semelhantes apresentaram comportamentos tecnológicos diferenciados.

10.2 Sobre os procedimentos de ensaios

- a) A interpretação dos resultados de ensaios de alterabilidade requereu o emprego adequado dos conceitos de *ciclo de ensaio* e de *inspeção periódica*. O termo ciclo de ensaio se referiu ao menor período de tempo no qual as amostras foram submetidas, tanto quanto possível, às mesmas condições de simulação; assim, cada ensaio foi constituído por uma sucessão de ciclos, determinada ou não previamente, cujo período de tempo foi, em geral, medido em horas ou dias. Por outro lado, o termo inspeção periódica se referiu ao intervalo de tempo em que foram feitas avaliações quali e/ou quantitativas; em geral, esse intervalo era composto por um número predeterminado de ciclos, variável ou não no transcorrer do ensaio, de acordo com a velocidade de alteração.
- b) A realização de ensaios de alterabilidade água-estufa e de imersão em etileno-glicol em testemunhos de sondagens, pela própria característica das

amostras, facilitou a observação de intervalos contínuos de material rochoso, ressaltando, inclusive, a ocorrência de fenômenos de expansão das amostras, de difícil detecção em ensaios utilizando fragmentos britados e/ou afeiçãoados manualmente.

c) A representação esquemática dos fenômenos observados no ensaio de alterabilidade natural em testemunhos de sondagens, bem como a sua classificação segundo categorias e níveis de intensidade, foram, ainda, tentativas sujeitas a ser aprimoradas, tendo sido utilizadas com o propósito de mitigar o subjetivismo intrínseco à descrição puramente qualitativa.

10.3 Sobre os critérios de classificação das amostras

a) A discriminação de cada amostra com os critérios de categoria (se interceptada ou não pela feição *anomalia*) e de tipo litológico mostrou-se adequada para a compilação dos dados, acompanhamento dos ensaios e interpretação dos resultados.

10.4 Sobre o tratamento dos dados

a) O tratamento matemático/estatístico permitiu representar as relações entre as diversas propriedades tecnológicas, sugerindo, por sua vez, **leis sistemáticas de comportamento**, a saber:

aa) os tipos litológicos mais densos se apresentaram menos porosos, com menor absorção d'água e com maiores valores de velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas, de resistências à compressão uniaxial e à tração, de módulo de elasticidade estático, bem como menores perdas, tanto por abrasão *Los Angeles* como nos ensaios de alterabilidade. Analogamente, nos tipos litológicos menos densos, estas relações se inverteram por completo; e

ab) o comportamento das curvas de regressão sugere que, nos tipos litológicos mais densos, pequenas variações nos valores das propriedades físicas implicam significativa redução dos valores das propriedades mecânicas, com representação matemática na forma de regressões não-lineares.

b) As curvas de alterabilidade indicaram claramente a influência da granulometria no processo de alteração. Assim, para qualquer ciclo tomado como referência, constatou-se que as perdas acumuladas aumentaram em direção às frações granulométricas menores.

c) As curvas de alterabilidade obtidas nos ensaios água-estufa e natural indicaram, *grosso modo*, que os processos de alteração são passíveis de ser expressos pelas mesmas funções exponenciais teóricas. Verificou-se, de maneira geral, que as velocidades de alteração imprimidas por esses ensaios eram, respectivamente, decrescentes, além de diferentes para cada tipo litológico.

- d) O maior paralelismo observado entre algumas das curvas de alterabilidade pareceu sugerir que as condições de simulação tenham sido similares.
- e) Algumas das curvas obtidas no ensaio de alterabilidade natural utilizando seis faixas granulométricas indicaram que ocorreu nítida convergência em direção à desagregação completa, e que o aumento do tempo de ensaio diminuiu drasticamente o efeito de escala, uma vez que o comportamento das amostras tornou-se independente da granulometria considerada.
- f) A descrição do comportamento das curvas de alterabilidade do ensaio realizado com testemunhos de sondagens, no que se refere à quantidade e duração dos patamares e à variação dos coeficientes angulares entre os patamares, sugeriu que estas eram passíveis de ser representadas por funções matemáticas indicativas de *leis gerais de comportamento*.
- g) *A compreensão dos fenômenos descritos nos itens 10.4, alínea e, e 10.4, alínea f. poderá, por sua vez, conduzir à determinação do intervalo de tempo necessário para se obterem resultados com um mínimo de representatividade.*

10.5 Sobre os parâmetros

- a) Os parâmetros geotécnicos grau de fraturamento e coeficiente de permeabilidade foram de alcance limitado quando utilizados para a avaliação da alteração e da alterabilidade.
- b) O parâmetro grau de fraturamento revelou-se menos sensível que aquele indicativo da parcela de superfície específica atribuída aos graus de fraturamento F4 e F5 (SE_{F4+F5}).
- c) Os parâmetros utilizados experimentalmente na interpretação do comportamento dos tipos litológicos no ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens mostraram-se eficientes, porém não suficientes, reforçando o argumento a favor da atuação conjunta de outros fatores associados às características petrográficas, tais como composição mineralógica, textura, estado microfissural, entre outros.
- d) O cálculo da superfície específica inicial das amostras submetidas ao ensaio de alterabilidade em testemunhos de sondagens permitiu avaliar, ainda que parcialmente, o grau de fissuração das amostras e, por conseguinte, o montante de superfície específica potencialmente disponível para as reações químicas. Neste contexto, a utilização da grandeza **SE/metro linear** possibilitou a análise comparativa entre o comportamento dos diversos tipos litológicos.

10.6 Sobre os critérios de comparação dos resultados de ensaios

a) A análise comparativa do desempenho dos tipos litológicos em cada ensaio de alterabilidade somente será válida se atender aos seguintes requisitos:

- aa) ser efetuada para o mesmo período de tempo experimental; e
- ab) apresentar equivalência de valores do produto ***massa-superfície específica***, para minimizar o efeito de escala.

b) Os resultados do ensaio de alterabilidade natural em testemunhos de sondagens não puderam ser diretamente relacionados, do ponto de vista quantitativo, àqueles dos demais ensaios de alterabilidade realizados, devido às grandes distorções produzidas pelo efeito de escala.

10.7 Sobre a seleção dos materiais rochosos de construção

a) A análise dos resultados dos ensaios de caracterização tecnológica convergiu para a definição do basalto compacto do derrame F (TL-01) para a utilização na produção de agregados para concreto e de areia artificial; para os enrocamentos selecionados, a escolha incidiu sobre o basalto compacto dos derrames F (TL-01) e E (TL-04).

b) A complexidade do fluxograma de balanceamento dos materiais rochosos reforça a importância do adequado conhecimento de suas características tecnológicas, entre as quais a alteração e a alterabilidade se inserem.

ANEXOS

ANEXO A

Avaliação semiquantitativa do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens

Nota: A - amostras não-interceptadas pela feição *anomia*
 B - amostras interceptadas pela feição *anomia*

TL-01

A = 69,11 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	22	18	14	13	6	6	3	3	3	3	2	2
Rachadura (R)	0	31	29	19	18	19	17	18	18	17	16	17	17
Fendilhamento (Fe)	0	42	44	37	37	29	28	26	24	13	14	13	12
Lasqueamento (L)	0	5	9	29	29	43	44	48	50	62	62	61	62
Fragmentação (Fr)	0	0	0	1	2	2	4	4	4	4	4	4	4
Desintegração (D)	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	3	3
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-02

A = 7,06 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	74	57	56	49	43	42	42	42	42	42	42	41
Rachadura (R)	0	23	5	5	9	0	0	0	0	0	0	0	0
Fendilhamento (Fe)	0	0	35	36	35	49	49	47	47	42	31	31	32
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	2	2	0	0	0	5	16	16	16
Fragmentação (Fr)	0	3	3	3	5	6	5	6	6	6	6	6	6
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	4	5	5	5	5	5	5
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-02

B = 1,90 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	53	53	39	39	39	39	18	18	16	0	0	0
Rachadura (R)	0	27	27	27	27	27	27	48	48	42	58	58	42
Fendilhamento (Fe)	0	10	10	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Lasqueamento (L)	0	0	0	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0
Fragmentação (Fr)	0	10	10	13	13	8	5	3	3	3	3	0	0
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	5	8	13	13	21	21	24	40
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-03

A = 1,70 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	82	74	65	65	65	65	65	12	12	12	12	12
Rachadura (R)	0	0	0	6	6	6	6	6	59	53	53	53	53
Fendilhamento (Fe)	0	18	26	29	29	29	29	29	29	35	35	26	26
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9
Fragmentação (Fr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(continua)

(continuação)

Nota: A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*
 B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

TL-04

A = 18,20 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	65	61	57	50	47	45	42	40	39	39	39	39
Rachadura (R)	0	14	17	13	20	23	25	26	28	28	28	24	24
Fendilhamento (Fe)	0	20	18	26	25	22	20	22	22	23	23	26	26
Lasqueamento (L)	0	0	2	2	3	6	5	5	5	5	5	4	4
Fragmentação (Fr)	0	1	2	2	2	2	4	3	3	3	3	5	5
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-04

B = 4,55 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	41	40	26	26	24	24	24	18	0	0	0	0
Rachadura (R)	0	52	53	67	67	61	57	56	62	79	78	68	51
Fendilhamento (F)	0	1	1	1	1	5	0	0	0	0	0	3	0
Lasqueamento (L)	0	5	5	0	0	0	5	4	4	0	0	7	24
Fragmentação (Fr)	0	1	1	6	6	10	10	6	6	11	10	6	1
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	4	10	10	10	12	16	24
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-05

A = 9,62 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	32	32	32	30	30	23	23	20	20	19	10	10
Rachadura (R)	0	22	22	19	18	18	24	24	27	22	22	29	29
Fendilhamento (Fe)	0	45	45	24	23	19	13	12	12	15	16	18	18
Lasqueamento (L)	0	0	0	23	25	29	35	35	35	37	37	37	37
Fragmentação (Fr)	0	0	0	0	2	2	2	3	3	3	3	3	3
Desintegração (D)	0	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-05

B = 0,95 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rachadura (R)	0	35	34	34	34	34	34	34	34	0	0	0	0
Fendilhamento (Fe)	0	55	33	11	11	0	0	0	0	0	0	0	0
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fragmentação (Fr)	0	10	33	55	55	44	33	23	23	57	22	0	0
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	22	33	43	43	43	78	100	100
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-06

A = 3,30 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	79	79	79	79	68	59	59	59	59	59	59	59
Rachadura (R)	0	0	0	0	0	11	20	20	20	20	20	20	20
Fendilhamento (Fe)	0	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fragmentação (Fr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(continua)

(continuação)

Nota: A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*
 B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

TL-07

A = 4,89 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	24	19	11	11	11	11	11	11	11	11	10	10
Rachadura (R)	0	29	15	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Fendilhamento (Fe)	0	32	34	42	33	31	20	20	18	18	17	17	17
Lasqueamento (L)	0	0	9	10	21	22	12	9	10	10	10	10	10
Fragmentação (Fr)	0	15	19	22	4	2	17	18	18	18	18	19	19
Desintegração (D)	0	0	4	12	30	33	39	41	42	42	43	43	43
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-07

B = 4,50 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rachadura (R)	0	11	19	11	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Fendilhamento (Fe)	0	41	41	49	40	35	33	30	23	23	23	18	18
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	0	5	3	5	0	0	0	0	0
Fragmentação (Fr)	0	27	24	24	27	22	13	14	19	19	5	2	2
Desintegração (D)	0	13	16	16	27	32	45	45	52	52	66	74	74
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-08

A = 37,08 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	21	19	14	13	12	10	10	10	10	10	10	10
Rachadura (R)	0	29	21	10	7	8	4	3	3	3	3	3	2
Fendilhamento (Fe)	0	44	50	40	29	15	11	12	12	12	12	8	8
Lasqueamento (L)	0	5	9	29	33	43	37	37	37	36	34	32	28
Fragmentação (Fr)	0	1	1	6	14	14	22	21	17	17	17	16	12
Desintegração (D)	0	0	0	1	4	8	16	17	21	22	24	31	40
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-08

B = 10,58 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rachadura (R)	0	46	34	12	12	12	12	6	6	6	1	1	1
Fendilhamento (Fe)	0	48	55	72	43	18	7	2	2	2	0	0	0
Lasqueamento (L)	0	3	5	8	20	35	35	37	37	31	28	18	14
Fragmentação (Fr)	0	3	5	7	19	27	27	29	27	32	28	17	7
Desintegração (D)	0	0	1	1	6	8	19	26	28	29	43	64	78
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(continua)

(continuação)

Nota: A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*
 B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

TL-09

A = 3,25 m

Ciclo (dias)	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Fenômeno													
Sem Ataque (SA)	100	100	100	100	75	75	75	75	75	75	75	60	60
Rachadura (R)	0	0	0	0	25	25	25	25	25	23	23	34	34
Fendilhamento (Fe)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
Fragmentação (Fr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-09

B = 1,20 m

Ciclo (dias)	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Fenômeno													
Sem Ataque (SA)	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rachadura (R)	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	77
Fendilhamento (Fe)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
Fragmentação (Fr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-10

A = 2,67 m

Ciclo (dias)	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Fenômeno													
Sem Ataque (SA)	100	77	77	76	76	76	76	76	76	76	76	57	57
Rachadura (R)	0	23	23	14	12	12	7	7	7	7	7	26	26
Fendilhamento (Fe)	0	0	0	10	10	10	14	14	10	10	10	10	10
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	0	0	1	1	5	5	2	2	2
Fragmentação (Fr)	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	5	5	5
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-10

B = 2,26 m

Ciclo (dias)	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Fenômeno													
Sem Ataque (SA)	100	61	61	61	44	44	0	0	0	0	0	0	0
Rachadura (R)	0	39	39	23	39	39	83	83	83	83	83	83	83
Fendilhamento (Fe)	0	0	0	16	16	16	10	10	10	10	10	10	10
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0
Fragmentação (Fr)	0	0	0	0	1	1	4	4	7	7	7	7	7
Desintegração (D)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(continua)

(continuação)

Nota: A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*
 B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

TL-11

A = 6,34 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	23	23	23	23	17	17	17	17	17	17	17	17
Rachadura (R)	0	62	61	26	26	30	24	24	24	24	24	24	24
Fendilhamento (Fe)	0	14	15	40	17	18	24	24	24	24	24	24	24
Lasqueamento (L)	0	0	0	10	30	31	26	25	25	25	25	25	25
Fragmentação (Fr)	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5
Desintegração (D)	0	1	1	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-11

B = 7,11m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rachadura (R)	0	60	54	48	47	47	43	43	43	43	40	40	29
Fendilhamento (Fe)	0	33	38	37	27	20	13	9	6	6	6	6	6
Lasqueamento (L)	0	0	0	0	10	14	18	18	20	20	16	16	22
Fragmentação (Fr)	0	4	4	5	5	7	8	9	8	6	13	10	7
Desintegração (D)	0	3	4	10	11	12	18	21	23	25	25	28	36
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-12

A = 35,91 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	31	31	30	24	23	21	20	19	17	15	15	15
Rachadura (R)	0	51	48	29	30	30	28	12	13	14	16	16	16
Fendilhamento (Fe)	0	15	14	26	24	24	24	38	31	32	32	28	18
Lasqueamento (L)	0	2	6	13	17	18	22	23	30	30	30	34	44
Fragmentação (Fr)	0	1	1	2	4	4	4	4	4	3	3	3	3
Desintegração (D)	0	0	0	0	1	1	1	3	3	4	4	4	4
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-12

B = 0,83 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rachadura (R)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fendilhamento (Fe)	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lasqueamento (L)	0	50	50	50	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Fragmentação (Fr)	0	0	0	50	50	50	50	50	50	50	50	32	32
Desintegração (D)	0	0	0	0	18	18	18	18	18	18	18	36	36
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

TL-13

A = 10,93 m

Ciclo (dias) Fenômeno	C ₀	C ₁₄₀	C ₂₀₉	C ₄₂₉	C ₅₈₆	C ₈₄₁	C ₉₃₉	C ₁₀₂₆	C ₁₂₀₆	C ₁₄₄₃	C ₁₇₆₁	C ₂₆₂₀	C ₃₁₂₁
Sem Ataque (SA)	100	65	48	48	16	13	13	13	13	4	0	0	0
Rachadura (R)	0	27	38	21	36	29	29	29	29	25	26	17	17
Fendilhamento (Fe)	0	1	1	12	22	31	22	20	16	13	10	18	18
Lasqueamento (L)	0	0	3	6	1	0	0	0	0	0	1	2	2
Fragmentação (Fr)	0	5	8	9	21	23	22	24	27	39	39	39	39
Desintegração (D)	0	2	2	4	4	4	14	14	15	19	24	24	24
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

(continua)

ANEXO B

Características petrográficas dos tipos litológicos

DERRAME	F	E	D		
TIPO LITOLÓGICO	TL - 01	TL - 04	TL - 08	TL - 08 (?)	TL - 07 (?)
AMOSTRA	SR - 1002	SR - 207	SR - 205	SR - 205	SR - 205
TEXTURA	intersertal	intergranular a intersertal	intersertal	intergranular (localmente intersertal)	intergranular (localmente intersertal)
GRANULAÇÃO	finas; plagioclásio (0,05-0,30mm)/ piroxênio (0,05-0,15mm)	finas; plagioclásio (0,15 - 0,60mm)/ piroxênio (0,05 - 0,40mm)	finas; plagioclásio (0,05 - 0,40mm)/ piroxênio (0,05 - 0,15mm)	finas; plagioclásio (0,15 - 0,75mm)/ piroxênio (0,05 - 0,30mm)	finas; plagioclásio (0,15 - 0,60mm)/ piroxênio (0,05 - 0,30mm)
MINERALOGIA (%)	plagioclásio (An ₅₅ , labradorita) 31 clinopiroxênio (augita) 14 argilominerais + vidro parcialmente devitrificado + opacos + hidróxidos de ferro 55	plagioclásio (An ₅₀ , andesina - labradorita) 33 clinopiroxênio (augita) 23 argilominerais + vidro parcialmente devitrificado + opacos 13	plagioclásio (An ₅₅ , labradorita) 29 clinopiroxênio (augita) 14 argilominerais + vidro parcialmente devitrificado + opacos + hidróxidos de ferro 57	plagioclásio (An ₅₅ , labradorita) 37 clinopiroxênio (augita) 24 argilominerais + vidro parcialmente devitrificado + opacos + hidróxidos de ferro 26 opacos 13	plagioclásio (An ₅₅ , labradorita) 39 clinopiroxênio (augita) 25 argilominerais + vidro parcialmente devitrificado + hidróxidos de ferro 26 opacos 10
ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E/OU DEUTÉRICA	média	média	fraca a média	média	fraca a média
AMÍGDALAS	esparças, submilimétricas, preenchidas por argilominerais verdes	cerca de 5% do volume; submilimétricas a milimétricas; preenchidas por argilominerais castanho e verde e, por vezes, quartzo	cerca de 15% do volume; submilimétricas a milimétricas; preenchidas por argilominerais verde e castanho, localmente com quartzo e/ou sílica microcristalina	cerca de 10% do volume; submilimétricas a milimétricas; preenchidas por argilominerais castanho e verde, com calcedônia associada	cerca de 15% do volume; submilimétricas a milimétricas; preenchidas por argilominerais verdes, por vezes associados à calcedônia e/ou carbonato
ARGILOMINERAIS	podem ocorrer associados à mesóstase vítreo-argilosa ou preenchendo fraturas submilimétricas; natureza: esmectita.	associados à mesóstase vítreo-argilosa ou preenchendo microfissuras natureza: esmectita e traços de illita	associados à mesóstase vítreo-argilosa ou preenchendo microfissuras natureza: esmectita e traços de illita	associados à mesóstase vítreo-argilosa ou preenchendo microfissuras natureza: esmectita e traços de illita	associados à mesóstase vítreo-argilosa ou correspondendo à alteração parcial de plagioclásios e piroxênios natureza: esmectita; pequenas proporções de caulinita, illita e illita-esmectita
ESTADO MICROFISSURAL	plagioclásios não exibem microfissuramento e, quando apresentam, não se observa alteração	plagioclásios exibem microfissuras, geralmente soldadas por filossilicato verde	plagioclásios com alteração incipiente em filossilicato; alteração associada ao microfissuramento	plagioclásios exibem microfissuramento, por vezes intenso; microfissuras soldadas por filossilicato verde e/ou hidróxidos de ferro	plagioclásios não exibem microfissuramento
OBSERVAÇÕES	hidróxidos de ferro associados à mesóstase (vidro/ opacos/ argilominerais)	hidróxidos de ferro associados à mesóstase (vidro/argilominerais)	hidróxidos de ferro associados à mesóstase (vidro/ opacos/ argilominerais)	hidróxidos de ferro associados à mesóstase (vidro/ argilominerais); localmente, presença de pseudomorfos argilosos de piroxênio(?)	hidróxidos de ferro associados à mesóstase (argilominerais/vidro)

ANEXO C

Resultados dos ensaios de caracterização tecnológica

Simbologia

- ρ - massa específica (kg/m^3)
 ρ_n - natural
 ρ_d - seca
 ρ'_d - aparente seca
- η - porosidade aparente (%)
- ω - absorção d'água (%)
- σ_c - resistência à compressão uniaxial (MPa)
- E - módulo de elasticidade estático (GPa)
- σ_t - resistência à tração por compressão diametral (MPa)
- LA - perdas no ensaio de abrasão "Los Angeles" (%)
- V_p - velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas (m/s)
- EG - comportamento no ensaio por imersão em etileno-glicol
 (afetado/parcialmente afetado/não afetado)
 rach. - rachadura
 lasq. - lasqueamento
- AE - perdas no ensaio água-estufa (%)

TABELA 1 - Ensaios de caracterização tecnológica dos tipos litológicos não interceptados pela feição *anomalia*.

DERRAME	DESCRIÇÃO	TIPO LITOLÓGICO	ρ (kg/m ³)			η (%)	ω (%)	LA (%)	V_p (m/s)	EG	AE (%)	σ_c MPa	E (GPa)
			ρ_n	ρ_d	ρ'_d								
F	Basalto Compacto cinza claro (núcleo e base)	TL-01	2872	-	-	-	1,40	15	-	não afetado	1,11	-	-
			2925	-	-	-	0,40	-	-	não afetado	-	-	-
			2884	-	-	-	0,80	-	-	não afetado	0,94	-	-
			2724	-	-	-	4,30	-	-	parc. afetado	-	-	-
			2882	-	-	-	0,46	15	-	-	-	98,3 117,7	82,1 83,3
E	Basalto Vesicular e/ou Amigdaloidal cinza claro (topo)	TL-03	2580	-	-	-	3,70	-	-	parc. afetado	-	-	-
			2605	-	-	-	3,57	-	-	-	-	53,0	24,9
	Basalto compacto cinza claro com minerais verdes disseminados (núcleo e base)	TL-04	2726	-	-	-	2,45	20	-	-	-	56,1 65,4	29,1 37,8
			2648	-	-	-	3,20	-	-	afetado	93,44	-	-
			2642	-	-	-	3,60	-	-	parc. afetado	-	-	-
			2703	-	-	-	2,50	21	-	não afetado	1,64	-	-
			2631	-	-	-	3,40	-	-	afetado	-	-	-
	Brecha Aglomerática cinza clara (topo)	TL-05	2356	-	-	-	8,50	-	-	não afetado	-	-	-
			2520	-	-	-	4,40	-	-	afetado	54,31	-	-
D	Basalto Compacto cinza claro a cinza amarelado (núcleo)	TL-07	2567	-	-	-	4,30	-	-	afetado	-	-	-
			2477	-	-	-	7,61	-	-	-	-	16,8 26,0	93,0 100,0
	Basalto Compacto cinza escuro com minerais verdes disseminados (núcleo)	TL-08	2678	-	-	-	2,74	20	-	-	-	40,7 42,8	24,6 19,0
			2515	2379	2347	19,31	8,26	-	2670	-	-	84,8	-
			2670	2548	2540	13,08	5,14	-	3964	-	-	34,2	-
			2700	2621	2673	8,58	3,21	-	3332	-	-	29,6	-
			2616	2465	2434	18,20	7,49	-	3559	-	-	44,4	-
			2616	2465	2434	18,20	7,49	-	3185	-	-	44,9	-
			2616	2465	2434	18,20	7,49	-	2930	-	-	28,4	-

TABELA 2 - Ensaios de caracterização tecnológica dos tipos litológicos interceptados pela feição *anomalia*.

DERRAME	DESCRIÇÃO	TIPO LITOLÓGICO	ρ (kg/m ³)			η (%)	ω (%)	LA (%)	V_p (m/s)	EG	AE (%)	σ_c (MPa)
			ρ_n	ρ_d	$\rho'd$							
E	Basalto compacto cinza claro com minerais verdes disseminados (núcleo e base)	TL-04	2387	-	-	-	7,80	-	-	afetado	23,19	-
			2436	-	-	-	5,80	-	-	afetado	-	-
			2399	-	-	-	7,30	-	-	afetado	-	-
			2757	-	-	-	2,30	16	-	parc. afet	76,04	-
			2385	-	-	-	9,40	-	-	afetado	80,89	-
			2706	-	-	-	3,60	21	-	afetado	68,44	-
			2464	-	-	-	7,40	-	-	parc. afet	72,68	-
D	Brecha Aglomerática cinza clara (topo)	TL-05	2515	-	-	-	5,30	-	-	afetado	-	-
			2417	-	-	-	5,90	-	-	afetado	-	-
			2342	-	-	-	9,40	-	-	afetado	95,35	-
			2258	-	-	-	11,50	-	-	afetado	-	-
			2498	-	-	-	6,80	-	-	afetado	-	-
			2529	-	-	-	5,20	-	-	afetado	-	-
	Basalto Compacto cinza claro a cinza amarelado (núcleo)	TL-07	2397	-	-	-	9,80	-	-	afetado	-	-
			2374	-	-	-	11,00	-	-	afetado	-	-
	Basalto compacto cinza escuro com minerais verdes disseminados (núcleo)	TL-08	2489	2455	2446	13,79	5,65	-	3536	-	-	44,0
			2558	2439	2399	17,46	7,29	-	3269	-	-	53,1

TABELA 3 - Ensaios de caracterização tecnológica das amostras remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.

DERRAME	DESCRIÇÃO	TIPO LITOLÓGICO	ρ (kg/m ³)			η (%)	ω (%)	V_p (m/s)	σ_t (MPa)	ENSAIO DE CICLAGEM: ETILENO- GLICOL				
			ρ_n	ρ_d	$\rho'd$					ϕ	DURAÇÃO (DIAS)	PERDAS DE MASSA (%)	PARTÍCULAS AFETADAS (%)	TIPOS DE ATAQUE
F	Basalto Compacto cinza claro (núcleo e base)	TL-01	2946	2936	2916	0,88	0,30	5470	20	1 1/2"	15	0	0	não afetado
			2960	2951	2938	0,99	0,34	5470	14			0	0	não afetado
			2852	2804	2749	6,96	2,54	3700	9			0	0	não afetado
			2941	2934	2938	0,79	0,27	5310	15			0	0	não afetado
			2944	2926	2915	2,29	0,87	4810	16			0	0	não afetado
E	Brecha Aglomerática cinza clara (topo)	TL-02	2468	2422	2415	14,04	5,82	3390	4	1 1/2"	15	0	17	rachadura
			2663	2610	2611	12,17	4,66	3740	5			0	0	não afetado
	Basalto Compacto cinza claro com minerais verdes disseminados (núcleo e base)	TL-04	2641	2578	2565	14,48	5,65	3740	6	1 1/2"	15	0	17	lasqueamento
			2417	2349	2420	14,62	6,06	3290	4			0	0	não afetado
			2417	2349	2420	14,62	6,06	3630	3			0	0	não afetado
			2715	2643	2628	11,36	4,32	3260	4			0	0	não afetado
D	Brecha Aglomerática cinza clara (topo)	TL-05	2209	2105	2057	24,12	11,73	2760	3	1 1/2"	15	0	100	rachadura
			2552	2510	2498	9,64	3,86	3910	6			0	20	rachadura
	Basalto Compacto cinza escuro com minerais verdes disseminados (núcleo)	TL-08	2504	2401	2395	18,95	7,92	3040	3	1 1/2"	15	3	100	rach./lasq.
			2504	2401	2395	18,95	7,92	3040	3			3	100	rach./lasq.
	Basalto Compacto cinza claro (base)	TL-09	2504	2434	2455	15,75	6,42	3150	2			0	17	rachadura
			2405	2358	2446	14,90	6,09	3740	6	1 1/2"	15	0	0	não afetado
C	Basalto Vesicular e/ou Amigdaloidal cinza avermelhado (topo)	TL-10	2472	2372	2360	18,07	7,66	2960	3			0	0	não afetado
			2734	2710	2719	7,26	2,67	3740	6	1 1/2"	15	0	0	não afetado
			2734	2710	2719	7,26	2,67	3820	7			0	0	não afetado
	Basalto Compacto cinza claro a cinza amarelado (núcleo)	TL-11	2645	2607	2605	8,58	3,31	3630	5			0	0	não afetado
			2748	2704	2706	5,59	2,07	4180	6	1 1/2"	15	0	0	não afetado
			2915	2903	2867	3,22	1,12	4620	13			0	0	não afetado
	Basalto Compacto cinza avermelhado (núcleo e base)	TL-12	2750	2677	2666	8,92	3,35	3700	6			0	0	não afetado
			2750	2677	2666	8,92	3,35	3560	5	1 1/2"	15	0	0	não afetado
			2615	2581	2533	11,73	4,68	4090	9			0	0	não afetado
			2876	2848	2843	3,21	1,13	4450	9			0	0	não afetado
			2945	2928	2893	2,38	0,82	4940	13			22	60	rachadura
B	Basalto Compacto cinza claro (núcleo)	TL-15	2955	2936	2924	1,95	0,66	5010	11			3	20	rach./lasq.
			2797	2739	2727	8,62	3,16	4140	6	1 1/2"	15	0	20	lasq/rach

ANEXO D

Tipos de curvas de regressão possíveis por categoria de amostras

LEGENDA

(válida para as Figuras 1 a 5 deste Anexo)

● - TL-01	× - TL-07
□ - TL-04	◇ - TL-12
Δ - TL-08	+ - outros

Categoria das amostras

(A) - não-interceptadas pela feição *anomalia*(B) - interceptadas pela feição *anomalia*

(C) - remanescentes do ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens

1; 2; 3 - numeração sequencial dos gráficos por categoria de amostras

FIGURA 1 - Regressões lineares decrescentes

FIGURA 2 - Regressões exponenciais crescentes

FIGURA 3 - Regressões exponenciais decrescentes

FIGURA 4 - Regressões logarítmicas decrescentes

Nota: Para legenda, ver Figura 1 deste Anexo.

FIGURA 5 - Regressões potenciais crescentes

ANEXO E

*Porcentagens de perdas acumuladas para diversos ciclos
do ensaio de alterabilidade água-estufa (Método
LCEC/MCA-13)*

TL \ CICLO **		C ₀	C ₇	C ₁₂	C ₁₄	C ₂₁	C ₂₄	C ₂₈	C ₃₅	C ₃₆	C ₄₂	C ₄₈	C ₄₉	C ₅₆	C ₆₀	C ₆₃	C ₇₀	C ₇₂	C ₇₇	C ₈₄	C ₉₁	C ₉₆	C ₉₈	C ₁₀₅	C ₁₁₂	C ₁₁₉	C ₁₂₆	C ₁₃₃	C ₁₄₀
TL-01	(1)	0,00	-	3,89	-	-	7,27	-	-	9,50	-	9,50	-	-	9,50	-	-	11,41	-	11,45	-	11,59	-	-	-	-	-	-	-
	(2)	0,00	-	0,50	-	-	0,79	-	-	0,91	-	0,92	-	-	0,92	-	-	0,96	-	0,97	-	1,11	-	-	-	-	-	-	-
	(3)	0,00	-	0,48	-	-	0,49	-	-	0,89	-	0,89	-	-	0,89	-	-	0,92	-	0,93	-	0,94	-	-	-	-	-	-	-
	(4)	0,00	0,72	-	2,03	2,04	-	3,61	3,99	-	4,02	-	4,90	4,95	-	4,95	5,12	-	5,12	5,13	5,86	-	8,17	9,00	9,56	9,63	9,64	9,81	9,94
	(5)	0,00	0,79	-	0,82	0,83	-	0,95	1,08	-	1,13	-	1,74	1,76	-	1,77	1,79	-	1,80	2,09	2,10	-	2,28	2,44	3,16	3,21	3,22	3,23	3,23
TL-04	(1)	0,00	-	0,00	-	-	0,25	-	-	1,17	-	3,88	-	-	5,83	-	-	5,89	-	5,90	-	6,13	-	-	-	-	-	-	-
	(2)	0,00	-	0,00	-	-	0,39	-	-	0,64	-	0,64	-	-	0,64	-	-	0,80	-	0,83	-	1,24	-	-	-	-	-	-	-
	(3)	0,00	-	31,19	-	-	93,42	-	-	93,42	-	93,44	-	-	93,44	-	-	93,44	-	93,44	-	93,44	-	-	-	-	-	-	-
	(4)	0,00	-	29,88	-	-	59,78	-	-	62,26	-	63,27	-	-	63,32	-	-	63,98	-	66,72	-	68,44	-	-	-	-	-	-	-
	(5)	0,00	-	12,52	-	-	57,62	-	-	62,90	-	64,17	-	-	64,32	-	-	68,60	-	71,52	-	72,68	-	-	-	-	-	-	-
	(6)	0,00	-	1,07	-	-	1,07	-	-	1,46	-	1,46	-	-	1,50	-	-	1,54	-	1,58	-	1,64	-	-	-	-	-	-	-
	(7)	0,00	-	0,21	-	-	0,58	-	-	17,21	-	44,08	-	-	64,17	-	-	74,74	-	75,99	-	76,04	-	-	-	-	-	-	-
	(8)	0,00	-	14,44	-	-	31,96	-	-	47,20	-	61,84	-	-	76,22	-	-	78,34	-	80,73	-	80,89	-	-	-	-	-	-	-
	(9)	0,00	-	11,61	-	-	12,85	-	-	14,30	-	14,59	-	-	16,95	-	-	20,11	-	22,84	-	23,19	-	-	-	-	-	-	-
	(10)	0,00	0,35	-	0,36	0,36	-	0,38	0,40	-	0,46	-	0,50	0,69	-	0,70	0,72	-	0,74	0,75	0,82	-	0,82	0,90	0,91	0,91	0,93	0,93	0,93
TL-05	(1)	0,00	-	33,01	-	-	36,61	-	-	44,98	-	45,96	-	-	47,80	-	-	49,91	-	52,04	-	54,31	-	-	-	-	-	-	-
	(2)	0,00	-	87,33	-	-	89,07	-	-	91,65	-	95,32	-	-	95,35	-	-	95,35	-	95,35	-	95,35	-	-	-	-	-	-	-
	(3)	0,00	0,66	-	0,68	0,84	-	0,92	1,07	-	1,12	-	2,18	2,33	-	2,34	2,95	-	3,02	3,05	3,25	-	4,35	5,11	5,54	8,63	9,06	9,24	9,29
TL-07		0,00	-	12,29	-	-	18,95	-	-	34,70	-	40,68	-	-	49,08	-	-	52,82	-	53,24	-	53,35	-	-	-	-	-	-	-
TL-08	(1)	0,00	-	23,47	-	-	28,32	-	-	32,80	-	35,79	-	-	42,45	-	-	47,26	-	50,46	-	57,44	-	-	-	-	-	-	-
	(2)	0,00	0,93	-	4,75	15,43	-	26,95	32,64	-	44,64	-	53,61	63,80	-	66,29	68,58	-	72,51	74,20	75,81	-	79,16	85,12	87,67	87,78	88,52	91,27	91,37
	(3)	0,00	0,65	-	39,95	49,66	-	57,62	60,73	-	63,01	-	66,59	70,10	-	70,13	70,45	-	72,03	74,08	75,21	-	80,18	82,54	82,61	92,42	93,04	93,76	95,12
	(4)	0,00	1,04	-	2,70	18,56	-	45,68	56,27	-	64,00	-	65,80	73,64	-	81,74	84,35	-	89,64	89,66	89,84	-	89,85	89,94	90,18	90,29	92,40	92,42	92,44
	(5)	0,00	0,86	-	3,44	6,20	-	52,61	62,35	-	70,64	-	78,77	81,16	-	81,17	81,73	-	82,11	83,49	84,93	-	86,46	86,67	87,16	87,17	87,22	87,34	87,45

OBS: * 19 mm < ϕ < 25 mm (3/4" < ϕ < 1")

** 1 ciclo = 1 dia

ANEXO F

***Cálculo da equivalência entre as faixas granulométricas
prescritas por diferentes métodos de ensaios de
alterabilidade***

1 INTRODUÇÃO

Os ensaios de alterabilidade, acelerada e natural, com amostras fragmentadas dos basaltos da UHE Canoas I, foram realizados de acordo com os seguintes métodos:

- a) LCEC/MCA-13: "Sanidade do agregado através da ciclagem água-estufa";
- b) LCEC/MCA-14: "Sanidade do agregado através da ciclagem natural"; e
- c) LCEC/MRL-01: "Ensaio de meteorização de rochas".

A descrição dos procedimentos destes ensaios encontra-se no item 5.2.8.2, não sendo, portanto, rerepresentada.

A análise comparativa do desempenho dos tipos litológicos quando submetidos às solicitações impostas por estes ensaios somente será válida se atender aos seguintes requisitos:

- a) ser efetuada para o mesmo período de tempo experimental e
- b) apresentar equivalência de valores do produto *massa-superfície específica*, em decorrência das seguintes relações:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{e} \quad SE = \frac{A}{V}$$

sendo: ρ = massa específica;
 SE = superfície específica;
 M = massa;
 A = área;
 V = volume.

Portanto: $\rho = \frac{M \cdot SE}{A},$

ou então: $M \cdot SE = \rho \cdot A$

A equivalência do produto massa-superfície específica contempla a diversidade de valores de massa específica das amostras submetidas a estes ensaios; leva, também, em consideração as faixas granulométricas especificadas em cada método, minimizando, por conseguinte, o efeito de escala.

No presente caso, a primeira condição foi plenamente satisfeita, uma vez que a escala de tempo experimental foi a mesma para estes ensaios, e

cada ciclo teve a duração de um dia. Entretanto, para o segundo requisito, devido às diferentes faixas granulométricas e quantidades de amostras prescritas em cada um daqueles ensaios, foi necessário efetuar o cálculo do valor do referido produto, conforme apresentado a seguir.

2 MÉTODOS MCA-13 E MCA-14

a) quantidade de amostras

50 fragmentos na faixa granulométrica $19 \text{ mm} < \varnothing < 25 \text{ mm}$ ($3/4" < \varnothing < 1"$);

b) cálculo da superfície específica (**SE**) de cada fragmento;

ba) fragmento pode ser inscrito numa esfera de raio "r".

bb) área da esfera (A)

$$A = 4 \pi r^2 \text{ (m}^2\text{);}$$

bc) volume da esfera (V)

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \text{ (m}^3\text{);}$$

$$\text{bd) SE} = \frac{A}{V} = \frac{3}{r} \text{ (m}^{-1}\text{)}$$

be) raio médio para a faixa granulométrica

$$r = 0,011 \text{ m}$$

$$\text{bf) SE} = \frac{3}{0,011} \therefore \text{SE} = 272,727 \text{ m}^{-1};$$

c) cálculo da massa (M_1) de cada fragmento

$$\text{ca) } \rho = \frac{M}{V}, \text{ sendo: } \rho - \text{ massa específica (kg/m}^3\text{);}$$

M - massa (kg);

V - volume (m³);

$$\text{cb) } M_1 = \rho \cdot V$$

$$M_1 = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot (0,011)^3 \therefore M_1 = 5,58 \times 10^6 \rho \text{ (kg)}$$

d) cálculo da massa de 50 fragmentos (M_{50})

$$M_{50} = 50 \times 5,58 \times 10^{-6} \rho$$

$$M_{50} = 2,79 \times 10^{-4} \rho \quad (\text{kg});$$

e) massa específica (ρ) dos tipos litológicos (ver Tabela 11)

$$\rho_{\text{TL-01}} = 2,857 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_{\text{TL-04}} = 2,670 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_{\text{TL-05}} = 2,438 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_{\text{TL-07}} = 2,522 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_{\text{TL-08}} = 2,630 \text{ kg/m}^3;$$

f) cálculo da massa de 50 fragmentos de cada tipo litológico

$$M_{\text{TL-01}} = 0,797 \text{ kg};$$

$$M_{\text{TL-04}} = 0,745 \text{ kg};$$

$$M_{\text{TL-05}} = 0,680 \text{ kg};$$

$$M_{\text{TL-07}} = 0,704 \text{ kg};$$

$$M_{\text{TL-08}} = 0,734 \text{ kg};$$

g) cálculo do produto massa-superfície específica (**M.SE**)

$$M.\text{SE}_{\text{TL-01}} = 217,363 \text{ kg/m};$$

$$M.\text{SE}_{\text{TL-04}} = 203,182 \text{ kg/m};$$

$$M.\text{SE}_{\text{TL-05}} = 185,454 \text{ kg/m};$$

$$M.\text{SE}_{\text{TL-07}} = 192,000 \text{ kg/m};$$

$$M.\text{SE}_{\text{TL-08}} = 200,182 \text{ kg/m};$$

3 MÉTODO MRL-01

Faixa granulométrica ϕ		Raio médio r (m)	Massa M (kg)	SE 3/r (m^{-1})	M.SE (kg/m)
P1	76 mm - 50 mm 3" - 2"	0,032	2,0	93,750	187,500
P2	50 mm - 25 mm 2" - 1"	0,019	1,5	157,895	236,843
P3	25 mm - 12,5 mm 1" - 1/2"	0,009	1,0	333,333	333,333
P4	12,5 mm - 9,5 mm 1/2" - 3/8"	0,006	0,5	500,000	250,000
P5	9,5 mm - 4,8 mm 3/8" - # n° 4	0,004	0,5	750,000	375,000
P6	4,8 mm - 1,2 mm # n° 4 - # n° 16	0,002	0,5	1.500,000	750,000

4 EQUIVALÊNCIAS DOS PRODUTOS MASSA-SUPERFÍCIE ESPECÍFICA

Comparando-se os valores destes produtos (itens 2, alínea *g*, e 3), verifica-se que a equivalência ocorre nas faixas granulométricas P1 e P2, conforme segue:

	Métodos MCA-13 e MCA-14					Método MRL-01	
	TL-01 x_1	TL-04 x_2	TL-05 x_3	TL-07 x_4	TL-08 x_5	P1	P2
M.SE (kg/m)	217,363	203,182	185,454	192,000	200,182	187,500	236,843
$ x_i - P1 $	29,863	15,682	2,046	4,500	12,682	-	-
$ x_i - P2 $	19,480	33,661	51,389	44,843	36,661	-	-

Conclui-se, portanto, que os ensaios anteriormente realizados com o tipo litológico TL-01 são comparáveis àqueles da faixa granulométrica P2, enquanto que, para os demais, a equivalência ocorre com a faixa P1.

ANEXO G

***Características geológico-geotécnicas das amostras no início do
ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens***

Derrame	Tipo Litológico	Grau de Alteração	Grau de Coerência	Permeabilidade- K (cm/s)	Grau de Fraturamento
F	TL-01 (A)				
E	(A)				
	(B)				
	TL-03 (A)				
	TL-04 (A)				
	(B)				

(continua)

(continuação)

Derrame	Tipo Litológico	Grau de Alteração	Grau de Coerência	Permeabilidade K (cm/s)	Grau de Fraturamento
D	TL-05	(A)			
		(B)			
	TL-06	(A)			
		(B)			
	TL-07	(A)			
		(B)			
	TL-08	(A)			
		(B)			

(continua)

(continuação)

Derrame	Tipo Litológico	Grau de Alteração	Grau de Coerência	Permeabilidade - K (cm/s)	Grau de Fraturamento	
D	TL-09	(A)
		(B)
C	TL-10	(A)
		(B)
	TL-11	(A)
		(B)

(continua)

(continuação)

Fonte: Perfis individuais das sondagens SR-204/208/402A/602/1003.

Nota: (A) - amostras não-interceptadas pela feição *anomia*(B) - amostras interceptadas pela feição *anomia*

Obs.: Para legenda dos parâmetros, ver Quadros 17 e 18.

ANEXO H

Cálculo da superfície específica inicial das amostras submetidas ao ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens, atribuída ao fraturamento original do maciço rochoso.

1 CÁLCULO DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (SE) DE UM TRECHO UNITÁRIO DE TESTEMUNHO DE SONDAGEM

Um dado trecho de testemunho de sondagem, de raio r e comprimento unitário ℓ , apresenta os seguintes valores de área (A) e volume (V):

a) $A = A_1 + A_2$, sendo:

A_1 - área da superfície lateral; e

A_2 - áreas dos círculos que delimitam o testemunho;

b) $A_1 = 2 \pi r \ell$

$A_2 = 2 \pi r^2$;

c) $A = 2 \pi r (\ell + r)$

$V = \pi r^2 \ell$;

d) $SE = \frac{A}{V} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r (\ell + r)}{\pi \cdot r^2 \cdot \ell}$, portanto:

$$SE = \frac{2 \cdot (\ell + r)}{r \cdot \ell} \quad (\text{m}^{-1})$$

e) as sondagens foram executadas com diâmetro de 86 mm, obtendo-se testemunhos com 72 mm de diâmetro, ou seja, 36 mm de raio;

f) a superfície específica (SE) do trecho unitário de testemunho será:

$SE = \frac{2(\ell + 0,036)}{0,036 \cdot \ell}$, ou seja:

$$SE = \frac{\ell + 0,036}{0,018 \cdot \ell} \quad (\text{m}^{-1}).$$

2 CÁLCULO DO COMPRIMENTO UNITÁRIO MÉDIO (ℓ_i) DE TESTEMUNHO POR TRECHO ISOFRATURADO

Grau de fraturamento	Frequência de fraturas (fraturas/m)	Espaçamento entre fraturas (m)	ℓ_i (m)
F1	< 1	> 1,00	>1,00
F2	1 - 2	1,00 - 0,50	0,75
F3	2 - 10	0,50 - 0,10	0,30
F4	10 - 20	0,10 - 0,05	0,075
F5	> 20	< 0,05	0,025

Fonte: Quadro 18

3 CÁLCULO DO COMPRIMENTO TOTAL DE TESTEMUNHOS POR TRECHO ISOFRATURADO (F_i) PARA CADA TIPO LITOLÓGICO

Ver Tabela I.

4 CÁLCULO DA SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DE CADA TIPO LITOLÓGICO PRESENTE NO ENSAIO (SE_{TL})

$$SE_{TL} = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{F_i}{\ell_i} \cdot \frac{\ell_i + 0,036}{0,018 \cdot \ell_i} \right) \quad (m^{-1})$$

em que F_i = somatório dos comprimentos de testemunhos com grau de fraturamento F_i (m);

ℓ_i = comprimento unitário médio do testemunho com grau de fraturamento F_i (m).

Adotou-se $\ell_i = F_i$ para o grau de fraturamento F1, assumindo este como isento de fraturas.

Ver Tabela II.

TABELA I - Comprimento total de testemunhos por trecho isofraturado (F_i) para cada tipo litológico.

<div><div><div>ΣF_i (m)</div><div>f_i (m)</div></div></div> <div>Tipo Litológico</div>		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	TOTAL
		F ₁	0,75	0,30	0,075	0,025	(m)
TL - 01	A	4.20	13,38	30,13	10,70	10,70	69,11
TL - 02	A	4.51	0,90	1,65	—	—	7,06
	B	—	—	1,30	0,30	0,30	1,90
TL - 03	A	1.70	—	—	—	—	1,70
TL - 04	A	9.25	7,85	1,00	—	0,10	18,20
	B	—	—	3,75	0,50	0,30	4,55
TL - 05	A	2.14	3,63	3,55	0,30	—	9,62
	B	—	—	0,65	0,10	0,20	0,95
TL - 06	A	1.00	1,60	0,70	—	—	3,30
TL - 07	A	2.30	0,40	1,79	0,10	0,30	4,89
	B	0,90	—	2,30	0,20	1,10	4,50
TL - 08	A	13.39	5,30	16,89	0,90	0,60	37,08
	B	—	2,13	4,45	1,80	2,20	10,58
TL - 09	A	1.30	—	1,75	0,20	—	3,25
	B	1.20	—	—	—	—	1,20
TL - 10	A	1.94	—	0,73	—	—	2,67
	B	0.20	—	1,16	0,40	0,50	2,26
TL - 11	A	0.90	1,14	3,80	0,20	0,30	6,34
	B	—	1,91	2,30	1,50	1,40	7,11
TL - 12	A	4.16	9,08	20,78	0,89	1,00	35,91
	B	—	—	0,45	0,10	0,28	0,83
TL - 13	A	—	3,18	5,65	1,50	0,60	10,93
	B	—	—	0,23	0,20	2,80	3,23
TL - 14	A	—	—	0,10	0,52	—	0,62
TL - 15	A	—	0,77	—	—	—	0,77
	B	—	—	2,59	0,80	3,30	6,69

Fonte: Perfis individuais das sondagens SR - 204/208/402A/602/1003

Nota: A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*;

B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

TABELA II - Superfície específica de cada tipo litológico presente no ensaio (SE_{TL})

ΣSE_{Fi} Tipo Litológico (m^{-1})		F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	SE_{TL} (m^{-1})	
TL - 01	A	56,03	1 038,64	6 248,75	11 730,33	58 019,68	77 093,43	77 093,43
TL - 02	A	56,00	69,86	342,21	—	—	468,07	2 693,08
	B	—	—	269,41	328,88	1 626,72	2 225,01	
TL - 03	A	56,73	—	—	—	—	56,73	56,73
TL - 04	A	55,77	609,56	207,19	—	542,24	1 414,76	4 367,64
	B	—	—	777,75	548,41	1 626,72	2 952,88	
TL - 05	A	56,49	281,78	736,06	328,88	—	1 403,21	2 732,06
	B	—	—	135,02	109,35	1 084,48	1 328,85	
TL - 06	A	57,56	124,01	144,97	—	—	326,54	326,54
TL - 07	A	56,43	30,86	371,45	109,35	1 626,72	2 194,81	8 913,99
	B	57,78	—	477,23	219,53	5 964,64	6 719,18	
TL - 08	A	55,71	411,62	3 502,99	986,64	3 253,44	8 210,40	23 201,02
	B	—	165,34	922,72	1 973,28	11 929,28	14 990,62	
TL - 09	A	57,09	—	362,74	219,53	—	639,36	696,58
	B	57,22	—	—	—	—	57,22	
TL - 10	A	56,59	—	151,19	—	—	207,78	3 663,56
	B	65,56	—	240,79	438,23	2 711,20	3 455,78	
TL - 11	A	57,78	88,49	788,33	219,53	1 626,72	2 780,85	12 642,30
	B	—	148,46	477,23	1 644,40	7 591,36	9 861,45	
TL - 12	A	56,04	703,88	4 305,62	975,95	5 422,40	11 463,89	13 347,65
	B	—	—	97,69	109,35	1 626,72	1 833,76	
TL - 13	A	—	254,42	1 184,05	1 753,75	3 253,44	6 445,66	22 438,06
	B	—	—	47,91	219,53	15 724,96	15 992,40	
TL - 14	A	—	—	20,53	569,78	—	590,31	590,31
TL - 15	A	—	59,97	—	—	—	59,97	19 368,14
	B	—	—	536,96	877,29	17 893,92	19 308,17	

Nota: A - amostras não-interceptadas pela feição *anomalia*; B - amostras interceptadas pela feição *anomalia*

ANEXO I

Comparação entre os produtos massa-superfície específica obtidos para amostras submetidas a diferentes métodos de ensaios de alterabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Conforme enunciado no Anexo F, a análise comparativa do desempenho dos diversos tipos litológicos, quando submetidos a diferentes métodos de ensaios de alterabilidade, somente será válida se efetuada na mesma escala de tempo experimental e se apresentar equivalência entre os produtos massa-superfície específica, para minimizar o efeito de escala.

No caso dos ensaios de alterabilidade acelerada (água-estufa) e natural (com uma ou seis faixas granulométricas), esses requisitos foram anteriormente analisados (Anexo F), sendo indicadas as respectivas equivalências.

Torna-se, portanto, necessário o cálculo daquele produto com relação ao ensaio de alterabilidade natural em testemunhos de sondagens.

Sejam:

$M_T \cdot SE_T$ - produto *massa-superfície específica* no ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens; e

$M_C \cdot SE_C$ - idem, nos ensaios de alterabilidade executados em fragmentos

Dessa forma, ambos os conjuntos de ensaios somente poderão ser comparados se:

$$\frac{M_T \cdot SE_T}{M_C \cdot SE_C} = \beta \cong 1$$

2 CÁLCULO DO PRODUTO MASSA-SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DOS TIPOS LITOLÓGICOS DO ENSAIO DE ALTERABILIDADE NATURAL EM TESTEMUNHOS DE SONDAgens

$$a) \rho = \frac{M}{V} \quad e \quad V_T = \pi \cdot r_T^2 \cdot \ell_T,$$

sendo: ρ - massa específica;
 M_T - massa;
 V_T - volume;
 r_T - raio de testemunho; e
 ℓ_T - comprimento total do testemunho do tipo litológico considerado.

$$b) M_T = \rho \cdot V_T = \rho \cdot \pi \cdot r_T^2 \cdot \ell_T.$$

$$c) M_T \cdot SE_T = \rho \cdot \pi \cdot r_T^2 \cdot \ell_T \cdot SE_T \quad (\text{kg/m})$$

3 CÁLCULO DA RAZÃO β

a) $M_c \cdot SE_c = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^3 \cdot SE_c$ (kg/m) (Ver Anexo F)

b) Para cada tipo litológico, a razão β será:

$$\beta = \frac{\rho \cdot \pi \cdot r_T^2 \cdot \ell_T \cdot SE_T}{\rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_c^3 \cdot SE_c} = \frac{3 \cdot r_T^2 \cdot \ell_T \cdot SE_T}{4 \cdot r_c^3 \cdot SE_c}$$

c) Como o $r_T = 0,036$ m (Anexo H), tem-se:

$$\beta = \frac{0,000972 \cdot \ell_T \cdot SE_T}{r_c^3 \cdot SE_c}$$

d) Parâmetros para os ensaios de alterabilidade água-estufa (Método LCEC/MCA-13) e natural (faixa granulométrica única - Método LCEC/MCA-14)

$$r_c = 0,011 \text{ m}$$

$$SE_c = 272,727 \text{ m}^{-1} \quad (\text{Ver Anexo F, itens 2be/2bf})$$

$$\text{Assim: } \beta = 2,7 \cdot \ell_T \cdot SE_T$$

e) Parâmetros para o ensaio de alterabilidade natural (com seis faixas granulométricas - Método LCEC/MRL-01):

ea) TL - 01

$$r_c = 0,019 \text{ m}$$

$$SE_c = 157,895 \text{ m}^{-1} \quad (\text{Ver Anexo F, itens 4 e 3})$$

$$\text{Portanto: } \beta = 0,9 \cdot \ell_T \cdot SE_T$$

eb) TL - 04/05/07/08

$$r_c = 0,032 \text{ m}$$

$$SE_c = 93,750 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{Portanto: } \beta = 0,3 \cdot \ell_T \cdot SE_T$$

f)

TIPO LITOLÓGICO	$\ell_T(^*)$	$SE_T(^*)$	β	
			MCA-13/MCA-14	MRL-01
TL-01	69,11	77 093,43	$\sim 1,4 \times 10^7$	$\sim 4,8 \times 10^6$
TL-04	18,20	1 414,76	$\sim 7,0 \times 10^4$	$\sim 7,7 \times 10^3$
TL-05	9,62	1 403,21	$\sim 3,6 \times 10^4$	$\sim 4,0 \times 10^3$
TL-07	4,89	2 194,81	$\sim 3,0 \times 10^4$	$\sim 3,2 \times 10^3$
TL-08	37,08	8 210,40	$\sim 8,2 \times 10^5$	$\sim 9,1 \times 10^4$

(*) Fonte: Anexo H

4 CONCLUSÃO

Constata-se, dessa maneira, que os resultados do ensaio de alterabilidade natural em testemunhos de sondagens não podem ser diretamente relacionados, **do ponto de vista quantitativo**, àqueles dos demais ensaios de alterabilidade realizados, devido às grandes distorções produzidas pelo efeito de escala, sendo tanto maiores quanto menor for a faixa granulométrica considerada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES-BARROS, L. 1971. *Alteração e alterabilidade de rochas ígneas*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 57p.
- AIRES-BARROS, L.; SILVA, C.G. DA; FIGUEIREDO, C.; FIGUEIREDO, P.R. 1994. Weatherability of calcareous rocks: quantitative preliminary approach. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 7, Lisboa, 1994. *Proceedings...* Rotterdam: A.A. Balkema. v.5, p.3591-3594.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. 1990. *Laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock*. Filadélfia, ASTM. 5p. (Método ASTM D2845-90). /aprovação original em 1969; reaprovação em 1990/
- _____. 1992. *Splitting tensile strength of intact rock core specimens*. Filadélfia, ASTM. 3p. (Método ASTM D3967-92). /aprovação original em 1981; reaprovação em 1992/
- _____. 1993. *Specific gravity and absorption of coarse aggregate*. Filadélfia, ASTM. 5p. (Método ASTM C127-88). /aprovação original em 1936; última revisão em 1988; reaprovação em 1993/
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. 1984. *Agregados. Determinação da abrasão "Los Angeles"*. Rio de Janeiro, ABNT. 5p. (NBR-6465).
- BOUSQUIE, P.; PELLERIN, F.M.; STRUILLLOU, R.; ARNOULD, M. 1980. Contribution de la porosimetrie au mercure a l'étude de quelques propriétés de roches carbonatées. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (22):225-232.
- CABRERA, J.G.; BARBI, A.L. 1981. Engineering geology of dam foundations on basalt flows of the upper Parana Basin, Brazil. In: KULHAWY, F.H. (ed.). *Recent developments in geotechnical engineering for hydro projects*. Ithaca, ASCE Geotechnical Engineering Division/Cornell University. p.177-191.
- CARROLL, D. 1970. *Rock weathering*. New York, Plenum Press. 203p.
- CERATTI, J.A.P.; ARNOLD, G.P.; OLIVEIRA, J.A. DE. 1994. Weathered basalts from southern Brazil: use in low-volume roadway. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 7, Lisboa, 1994. *Proceedings...* Rotterdam: A.A. Balkema. v.5, p.3295-3301.

- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - CESP. 1981. *Diretrizes gerais para registro fotográfico de testemunhos de sondagens*. São Paulo, CESP. 6p. (CESP Especificação Técnica, EPG-ET-023). /inédito/
- _____. 1990. *Aproveitamento Hidroelétrico do Rio Paranapanema - Complexo Canoas. Projeto Básico - Usinas: Canoas I - Canoas II*. São Paulo, CESP/ENGEVIX. 3v. e 5 an.
- _____. 1992. *Usina Hidrelétrica Canoas I. Projeto Executivo. Análise da origem e destino dos materiais de construção*. Rio de Janeiro, CESP/ENGEVIX. 13p. (Relatório CN1-5GE-C50-001-RE). /revisão geral em 1993/
- _____. 1995. *Usina Hidrelétrica Canoas I. Barragens de terra/enrocamento margens direita e esquerda (trecho ensecado). Pré-ensecadeira auxiliar de jusante. Período de 12/93 a 12/94*. s.l., CESP. 58p.il. (CESP Relatório, EERG/008/95).
- _____. 1995a. *Usina Hidrelétrica de Canoas I. Filtros das barragens de terra/enrocamento - margens direita e esquerda (trecho ensecado). Ensaio de permeabilidade em areia artificial*. s.l., CESP. 41p.il. (CESP Relatório, EERG/LS-03-006/95).
- _____. s.d. *Relatório de progresso Julho/Agosto/Setembro de 1994. Complexo Canoas*. s.l., CESP. 61p.il.
- _____. s.d. *Sanidade do agregado através da ciclagem água-estufa*. Ilha Solteira, CESP. 6p. (Laboratório Central de Engenharia Civil, Métodos de ensaio, MCA-13).
- _____. s.d. *Sanidade do agregado através da ciclagem natural*. Ilha Solteira, CESP. 4p. (Laboratório Central de Engenharia Civil, Métodos de ensaios, MCA-14).
- _____. s.d. *Ensaio de meteorização de rochas*. Ilha Solteira, CESP. 10p. (Laboratório Central de Engenharia Civil, Métodos de ensaio, MRL-01).
- _____. s.d. *Ensaio de alteração de rochas. Imersão em etileno-glicol*. Ilha Solteira, CESP. 9p. (Laboratório Central de Engenharia Civil, Métodos de ensaio, MRL-04).
- _____. s.d. *Ensaio de compressão uniaxial*. Ilha Solteira, CESP. 21p. (Laboratório Central de Engenharia Civil, Métodos de ensaio, MRL-16).

- CHRISTARAS, B. 1991. Durability of building stones and weathering of antiquities in Creta/Greece. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (44):17-25.
- DE ALBA, E.; SESANA, F. 1978. The influence of expansive minerals on basaltic behavior. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 3, Madrid, 1978. *Proceedings...*Madrid: AEGAI. v.1, seção 2, p.107-116.
- FARJALLAT, J. E. S. 1969. Observações sobre a desagregação do basalto compacto usado no enrocamento do aterro da ponte do rio Sucuriú. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 1, São Paulo, 1969. *Anais...*São Paulo: Associação Paulista de Geologia Aplicada. v.III, tema 3, 9p.il. /IPT Publicação, 902/
- _____. 1971. *Estudos experimentais sobre a degradação de rochas basálticas: basaltos da Barragem de Capivara, rio Paranapanema*. São Paulo, 125p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Astronomia/USP).
- _____. 1972. Desagregabilidade de rochas e problemas relativos à sua aplicabilidade. Relato sobre o tema. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4, São Paulo, 1972. *Anais...*São Paulo: Associação Paulista de Geologia Aplicada. p.19-53.
- _____. 1974. Physical problems of the degradation of basalts. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2, São Paulo, 1974. *Proceedings...*São Paulo: ABGE. v.3, p.207-229.
- FARJALLAT, J.E.S.; BARROS, F.P. DE; YOSHIDA, R.; OLIVEIRA, J.A.N. DE. 1972. Alguns problemas de degradação dos basaltos da Barragem de Capivara, rio Paranapanema. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4, São Paulo, 1972. *Anais...*São Paulo: Associação Paulista de Geologia Aplicada, p.73-101.
- FARJALLAT, J.E.S.; MONTEZZO NETO, V.; RATTI, G. 1972a. Relação entre teores de minerais argilosos expansivos e desagregação de rochas basálticas. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4, São Paulo, 1972. *Anais...*São Paulo: Associação Paulista de Geologia Aplicada. p.123-155 il.
- FARRAN, J.; THENOZ, B. 1965. L'altérabilité des roches, ses facteurs, sa prévision. *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics*, (215):1533-1548.

- FERREIRA, M.O.Q. 1990. Geoquímica da alteração e propriedades dos granitos com utilização em enrocamentos. *Memórias e Notícias* (Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra), (109):1-33.
- FERREIRA, L.C.; BUOSI, M.A.; RIBEIRO, A.C.O. 1990. Estudos de desagregabilidade de subderrames basálticos da Formação Mosquito - UHE Serra Quebrada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6/CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 9, Salvador, 1990. *Anais...* Salvador: ABGE/ABMS. v.1, tema 5, p.477-486.
- FOOKES, P.G.; DEARMAN, W.R.; FRANKLIN, J.A. 1971. Some engineering aspects of rock weathering with field examples from Dartmoor and elsewhere. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, 4(3):139-185.
- FOOKES, P.G.; GOURLEY, C.S.; OHIKERE, C. 1988. Rock weathering in engineering time. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, 21(1): 33-57.
- FOURMAINTRAUX, D.; TOURENQ, C. 1970. Contribution de la pétrographie à l'étude des propriétés physiques et mécaniques des roches. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 1, Paris, 1970. *Proceedings...* Paris: Comité Français de Géologie de l'Ingénieur. v.1, p.234-245.
- FRAZÃO, E.B. 1993. *Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir de estudo experimental em amostras de basaltos da UHE Três Irmãos - Estado de São Paulo*. São Carlos, 163p. (Tese de Doutorado, EESC/USP).
- FRAZÃO, E.B.; AUGUSTO JR., F. 1994. Procedimentos para avaliação da alterabilidade de rochas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28, Belo Horizonte, 1994. *Anais...* Belo Horizonte: Associação Brasileira de Pavimentação. v.1, p.49-84.
- FRAZÃO, E.B.; CARUSO, L.G. 1983. Síntese do conhecimento sobre alterabilidade de rochas basálticas como material de construção em algumas barragens da Bacia do Alto Paraná. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, São Paulo, 1983. *Anais...* São Paulo: ABMS/ABGE/CBMR. v.IIA, p.21-33.
- FRAZÃO, E.B.; FERRAZ, J.L.; MINICUCCI, L.A.; CRUZ, P.T. 1993. Alterabilidade de basaltos da UHE Três Irmãos/CESP - critérios de avaliação a partir de ensaios de laboratório e de observações de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 7, Poços de

Caldas, 1993. *Anais...* São Paulo: ABGE. v.3, p.161-163 (comentários do relator Guido Guidicini e resposta dos autores).

- FRAZÃO, E.B.; GOULART, E.P. 1976. Aspectos da expansibilidade de argilo-minerais - algumas implicações em obras civis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, Rio de Janeiro, 1976. *Anais...* Rio de Janeiro: ABGE. v.2, p.351-365.
- GOLDICH, S.S. 1938. A study in rock-weathering. *Journal of Geology*, **46**(1): 17-58.
- HAMROL, A. 1961. A quantitative classification of the weathering and weatherability of rocks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS, 5, Paris, 1961. *Proceedings...* Paris: International Society of Soil Mechanics. v.2, p.771-774.
- HAYASE, K.; DRISTAS, J.A.; RIMOLDI, H.V. 1975. Presencia de saponita rica en hierro asociada con celadonita, en basaltos de Ayui, Dique Salto Grande. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5, Buenos Aires, 1975. *Proceedings...* Buenos Aires: Sociedad Argentina de Mecanica de Suelos e Ingenieria de Fundaciones. v.3, p.51-71.
- HIGGS, N.B. 1976. Slaking basalts. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, **13**(2):151-162.
- ILIEV, I.G. 1966. An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, 1, Lisboa, 1966. *Proceedings...* Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. v.1, p.109-114.
- INFANTI JR., N. 1983. Reflexões sobre investigações geológico-geotécnicas em maciços basálticos. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, São Paulo, 1983. *Anais...* São Paulo: ABMS/ABGE/CBMR. v.IIB, p.159-171.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. 1981. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo; escala 1 : 1 000 000*. São Paulo, IPT. 2v. (IPT Monografia, 5. Publicação 1183).
- _____. 1983. *Análises petrográficas pormenorizadas e análises mineralógicas da fração argilosa por difratometria de raios-X*. São Paulo, IPT. 16p.il. (IPT Certificado, 681 470).

- _____. 1995. *Geologia da área da UHE Canoas I - compilação de dados e observações realizadas durante as escavações das fundações das estruturas de concreto*. São Paulo, IPT. 34p.il. (IPT Relatório, 32 871).
- LADEIRA, F.L. 1984. Instabilidade em taludes rochosos provocada por rápido intemperismo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984. *Anais...*Belo Horizonte: ABGE. v.3, p.377-381.
- LADEIRA, F.L.; MINETTE, E. 1984a. A quantificação da alteração e da alterabilidade de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984. *Anais...*Belo Horizonte: ABGE. v.3, p.351-358.
- _____. 1984b. Índices físicos de alteração na quantificação da alterabilidade de rochas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 4, Belo Horizonte, 1984. *Anais...*Belo Horizonte: ABGE. v.3, p.359-366.
- LEINZ, V.; AMARAL, S.E. DO. 1975. *Geologia Geral*. 6.ed. São Paulo, Companhia Editora Nacional. 360p.il.
- LEINZ, V.; LEONARDOS, O.H. 1977. *Glossário geológico*. 2.ed. São Paulo, Companhia Editora Nacional. 239 p.
- LEITE, A.R.C.A.P.; ASTOLPHI, J.C.; GONTIJO, M.C.; KUPERMAN, S.C.; ONUMA, N.T.; VIEIRA JR., L.P. 1995. Proteção do espigão de jusante da UHE Porto Primavera - projeto e comportamento do CCR. In: SIMPÓSIO DE OBRAS EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 1, São Paulo, 1995. *Anais...*São Paulo: CBGB/ IBRACON /IE-SP. p.33-46.
- LEVI, F.; MELFI, A.J. 1972. Geochemical and mineralogical studies on the first stages of weathering of basic and related rocks. Part II - geochemical study. *Revista Brasileira de Geociências*, 2(1):1-7.
- LUMB, P. 1962. The properties of decomposed granite. *Géotechnique*, 12:226-243.
- MARTIN, R.P. 1986. Use of index tests for engineering assessment of weathered rocks. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 5, Buenos Aires, 1986. *Proceedings...*Rotterdam: A.A.Balkema. v.2, p.433-450.
- MELFI, A.J.; LEVI, F. 1971. Geochemical and mineralogical study on the first stages of weathering of basic and related rocks. Part I - mineralogical study. *Revista Brasileira de Geociências*, 1(1): 22-28.

- MIRANDA, A.M. 1984. Comparação entre a evolução da alteração por via experimental e evolução da meteorização em perfis naturais. *Memórias e Notícias* (Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra), (98):217-222.
- _____. 1986. Alteração experimental de rochas: a contribuição do Instituto Superior Técnico. *Geotecnia*, (48):3-37.
- OLIVEIRA, A.M.S.; SILVA, R.F. DA; FERREIRA JR. J. 1975. *Ensaio de perda d'água sob pressão. Diretrizes*. 1.ed. São Paulo, ABGE. 16p. (ABGE Boletim, 2).
- OLIVEIRA, C.A. DE; MARANESI, D.A.; ARAÚJO, J.S.; MARQUES, J.D. 1987. Desagregabilidade de rochas basálticas no Aproveitamento Hidrelétrico de Rosana e Usina e Eclusa Porto Primavera. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, São Paulo, 1987. *Anais...*São Paulo: ABGE. v.1, p.391-400.
- OLIVEIRA, P.J.R. DE; SALLES, F.M.; AGUILAR FILHO, D. 1992. Possibilidade de uso de agregados desagregáveis em concretos - avaliação de mais de 10 anos. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 20, Curitiba, 1992. *Anais...*Curitiba: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. v.2, p.419-429.
- ONODERA, T.F.; KUMARA, H.M.A. 1980. Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (22):173-177.
- PICHLER, E. 1942. *A petrografia e os ensaios tecnológicos das rochas*. São Paulo, IPT. 24p. (IPT Publicação, 149).
- PREVOSTEAU, J.M.; RAGOT, J.P.; SIMA, A. 1970. Le spectre de porosité des roches: critère possible de leur degré d'altération et de leur altérabilité. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 1, Paris, 1970. *Proceedings...*Paris: Comité Français de Géologie de l'Ingénieur. v.1, p.548-560.
- RIMOLDI, H.V. 1982. Diagnose et evaluation de l'altération des basaltes de la Formation Curuzu-Cuatia. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 4, Nova Delhi, 1982. *Proceedings...*Rotterdam: A.A.Balkema. v.6, tema 3, p.107-121.
- RODRIGUES, J.D. 1975. *Alterabilidade de rochas em problemas de engenharia. Aplicação a casos portugueses*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. 214 p.

- _____. 1977. Previsão da alterabilidade de materiais rochosos naturais. *Geotecnia*, (20):53-68.
- ROISENBERG, A.; GAMERMANN, N.; VIEIRA JR., N. 1984. Argilo-minerais em rochas basálticas inalteradas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia. v. 9, p.241-252.
- RUIZ, M.D. 1963. Mecanismo de desagregação de rochas basálticas semi-alteradas. In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 2, Rio de Janeiro, 1963. *Proceedings...* São Paulo: ABMS. v.1, p.533-543. /IPT Publicação,696/
- SCHNEIDER, A.W.; ROCHA, F.X.P. 1968. *Emprego de basaltos em pavimentação rodoviária*. Rio de Janeiro, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 43p.il. /IPR Publicação, 433/
- SERRA JR., E.; AZEVEDO, A.A. 1990. Ensaio de alterabilidade natural em basalto compacto na Usina Hidrelétrica Taquaruçu. In: CONGRESSO SULAMERICANO DE MECÂNICA DE ROCHAS, 3, Caracas, 1990. *Anais...* Caracas: Sociedad Venezolana de Mecanica del Suelo e Ingenieria de Fundaciones. v.1, p.185-194.
- SETZER, J. 1966. *Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, Comissão Interestadual da Bacia Paraná - Uruguai, em colaboração com as Centrais Elétricas de São Paulo. 61p.il.
- SIMÕES, N.S.; PEREIRA, L.M.; COTIA, C.B.; HORA, A.F.; HOLTERMAN, S.C.; PEREIRA, G.M. 1991. A utilização de turbinas Bulbo nas usinas de Canoas I e II, da CESP - Companhia Energética de São Paulo, e os benefícios econômicos incrementais advindos para o empreendimento. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, XIX, Aracaju, 1991. *Anais...* Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens. p.459-472.
- STRUILLLOU, R. 1969. *Prévision de l'altérabilité des matériaux employés en génie civil*. Bulletin de Liaison des Laboratoires Routiers, (42):35-46. /Colloque de Géotechnique, Tolouse/
- THEMAG ENGENHARIA. 1986. *Usina Porto Primavera. Projeto Executivo. Dimensionamento probabilístico da espessura da proteção do talude de jusante*. São Paulo, CESP/THEMAG. 29p. (THEMAG Relatório, 13 701-BT13-RT0618-09059/R-0A).
- TOGNON, A.A. 1985. *Glossário de termos técnicos de geologia de engenharia*. 1.ed. São Paulo, ABGE. 139p.

- TOURENQ, C.; FOURMAINTRAUX, D. 1974. L'indice de qualité des roches, quelques application. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2, São Paulo, 1974. *Proceedings...*São Paulo: ABGE. v.1, tema 4, p.20.1-20.8.
- VAN ROOY, J.L. 1994. Aggregate selection criteria for Drakensberg basalt, Kingdom of Lesotho. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 7, Lisboa, 1994. *Proceedings...*Rotterdam: A. A. Balkema. v.5, p.3245-3250.
- WALSH, J.B.; BRACE, W.F. 1966. Cracks and pores in rocks. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS, 1, Lisboa, 1966. *Proceedings...*Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. v.1, p.643-646.
- WEINERT, H.H. 1964. *Basic igneous rocks in road foundation*. Pretória, Council for Scientific and Industrial Research. 47p.il. (CSIR Research Report, 218).
- _____. 1968. Engineering petrology for roads in South Africa. *Engineering Geology*, 2(6):363-395.
- _____. 1970. *Climate, engineering petrology and the durability of natural road building materials in southern Africa*. Pretória, Council for Scientific and Industrial Research. 8p. (CSIR Research Report, 119)./re-impressão do The Rhodesian Engineer, Paper 111/
- _____. 1984. Climate and durability of south african roads aggregates. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, (29):463-466.
- YOSHIDA, R. 1972. *Contribuição ao conhecimento de características tecnológicas de materiais rochosos*. São Paulo. 2v. il. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências/USP).
- YOSHIDA, R.; FARJALLAT, J.E.S.; CARUSO, L.G.; FRAZÃO, E.B. 1972. Sugestão de roteiro e escolha de ensaios tecnológicos de rochas. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 4, São Paulo, 1972. *Anais...*São Paulo: Associação Paulista de Geologia Aplicada. p.199-235.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

Documentação fotográfica

FOTO 1 - Vista geral das escavações (situação em março/93).

FOTO 2 - Ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens. Documentação fotográfica inicial. Notar: padrão de cores (à direita), profundidades (à esquerda) e escala (inferior).

FOTO 3 - Idem. Sondagem SR-204 no 303º ciclo de ensaio. As tabuletas com fundo preto indicam as profundidades das manobras; aquelas com fundo branco mostram os limites entre os tipos litológicos.

4

5

Ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.
SR-1003: profund. 2,08 - ~21,00m
Basalto compacto, cinza-escuro: derrame F (TL-01)

FOTO 4 - 148° ciclo. O processo de ciclagem evoluiu através do lasqueamento das amostras.

FOTO 5 - 2620° ciclo. Idem.

6

7

8

Ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.
SR-402A: profund. 13,83 - ~21,00m
Basalto compacto, cinza-escuro, com minerais verdes disseminados: derrame D (TL-08)

FOTO 6 - 148° ciclo. Notar formação de lasca com aspecto de cunha (profund. ~18,70m).

FOTO 7 - 1761° ciclo. Trecho intensamente fragmentado e parcialmente desintegrado (prof. ~13,83 - ~18,70m).

FOTO 8 - 2620° ciclo. Notar completa desintegração da amostra (prof. ~13,83 - ~21,00m).

9

10

11

Ensaio de alterabilidade natural de testemunhos de sondagens.

SR - 204 - Derrame B

- profund. 53,00 - 56,23m: Brecha basáltica arenosa/siltosa, cinza-avermelhado (TL-13)
- profund. 56,23 - 62,92m: basalto compacto, cinza-claro (TL-15)

Evolução do processo de desintegração, com a completa remoção dos finos e desaparecimento da amostra.

FOTO 9 - 212º ciclo.

FOTO 10 - 303º ciclo.

FOTO 11 - 1761º ciclo.

12

13

14

FOTO 12 - Notar grande quantidade de fissuras e fendas de pequena extensão ao redor dos minerais verdes. A amostra ainda preserva a coesão.

FOTO 13 - Processo de desintegração, com perda da forma cilíndrica da amostra. Produção de fragmentos soltos e finos.

FOTO 14 - Processo de alteração de blocos na pilha de estoque.